

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 BİRKÖKÇAK, EDA ACAR

DİJİTAL HİKAYELEŞTİRME VE MODA TASARIMI SÜREÇLERİ	125
--	-----

BİRSEN ÇİLEROĞLU, HANDE ECEM BULUŞ

ARTIFICIAL INTELLIGENCE-DRIVEN SUSTAINABILITY: IMPACTS ON CONSUMER BEHAVIOR AND THE FASHION/TEXTILE INDUSTRY ...	165
--	-----

SELMA BULUT, BEYZA MÜLAYİM

BÖLÜM 1

POLYESTER KUMAŞLARIN YÜZEY MODİFİKASYONU İLE BOYANABİLİRLİK 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

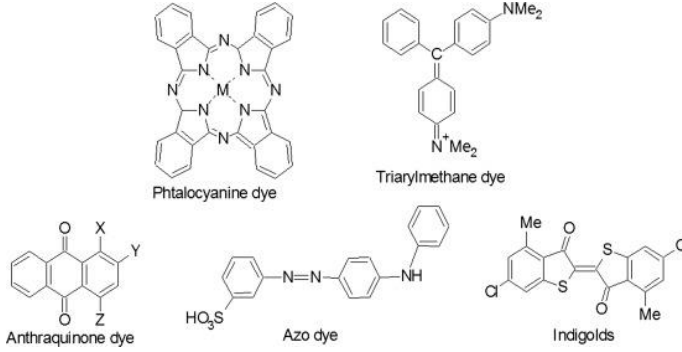
Kromoforlar, boyarmadde moleküllerinde ışığın görünür bölgede absorpsiyonunu sağlayan ve genellikle konjuge çift bağlar içeren fonksiyonel gruplardır. Bu yapılar, molekülün renk

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)
- $-NH_2$ (amin)
- $-SO_3H$ (sülfonik asit)
- $-COOH$ (karboksil)
- $-NR_2$ (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

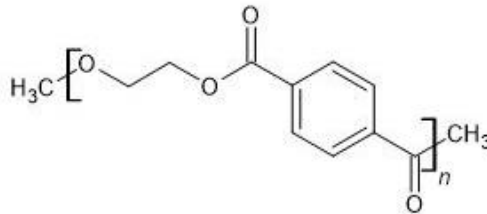
emilim maksimumunun şiddetini değiştirerek kromoforlarla birlikte işlevsel bir bütün oluşturur. Eğer dalga boyu daha uzun bir dalga boyuna kayarsa (kırmızı kayma, batokromik etki) veya daha kısa bir dalga boyuna kayarsa (mavi kayma, hipsokromik etki), kromoforların ışığı absorbe etme özellikleri değişir. 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



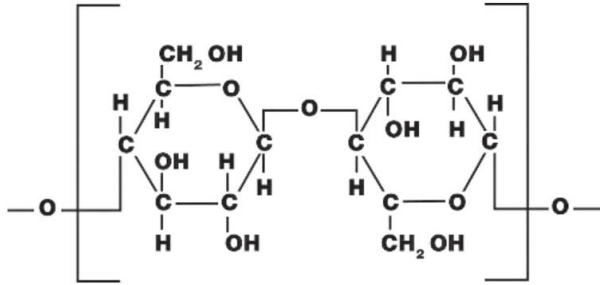
Polyester lifleri apolar ve inert karakterdedir. Bu inertlik, polyester liflerinin kimyasal reaktivitesinin düşük olmasına ve lif yüzeyine boya moleküllerinin bağ yapmasının zor olmasına yol açar. Polyesterin önemli bir özelliği de yüksek kristallik derecesidir. PET

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)

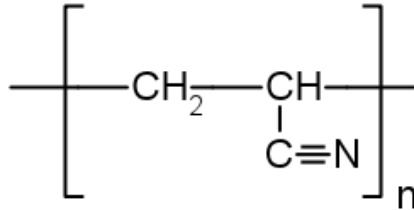
Pamuk lifleri gömlek, tişört, iç giyim ve pantolon gibi ürünlerin üretiminde kullanılır. Ayrıca, giysilerde pamuk lifleri tek başına veya polyester, viskon gibi diğer liflerle karışım halinde tercih edilebilir. Giyim sektöründe pamuk, çeşitli hava koşullarına uygunluğu ve yüksek termal ile dokunsal konforu 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



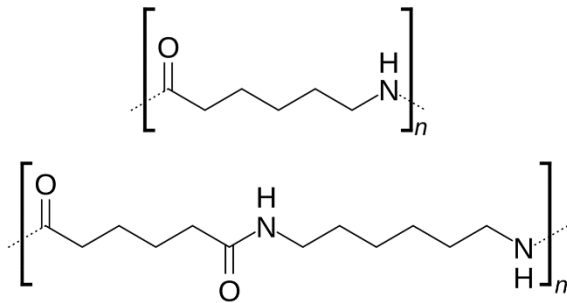
Nitril grupları ($-\text{C} \equiv \text{N}$) lifin kimyasal yapısında güçlü dipol momentler oluşturarak polar karakter kazandırır. Ancak saf PAN boyanabilirliği zayıf olduğundan, akrilik liflerin endüstriyel

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 doygunluk, 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.

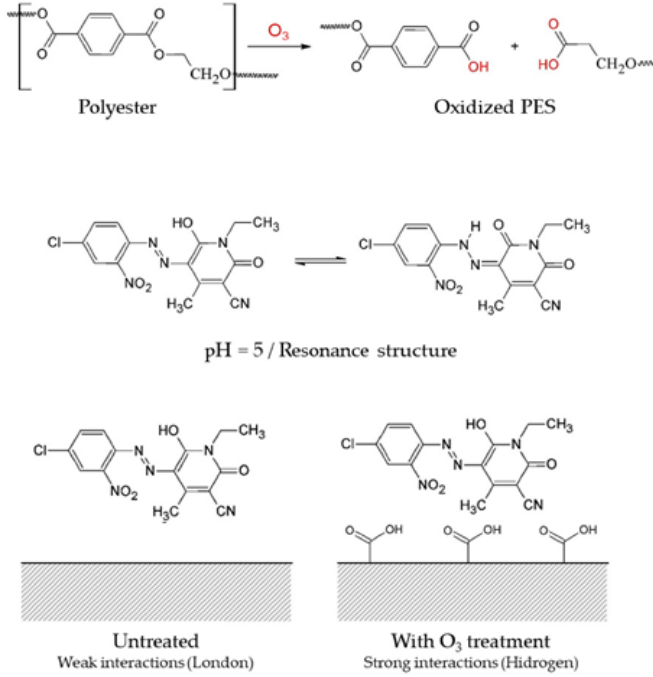
Literatür Örnekleri

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

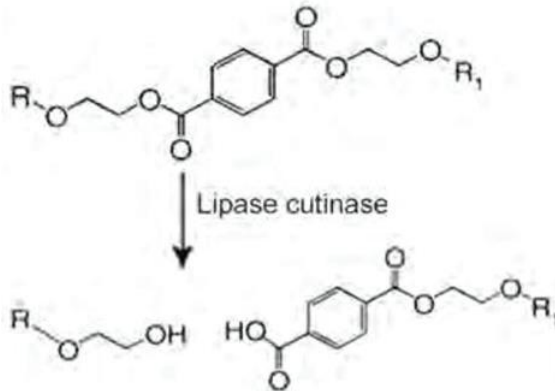


Deneysel olarak, polyester kumaş örnekleri (10 × 20 cm) UV-SURF X4 cihazında 17 W güçte ve 185–254 nm arası değişen emisyon spektrumuna sahip düşük basınçlı cıva lambaları kullanılarak ozona maruz bırakılmış, süreler 20, 30 ve 45 dakika olarak uygulanmıştır. Ozon muamelesi sonrası kumaşlar, Mathis ALT-1-B 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 ısıtıcı eklenmiş, boyama sonrası 2 g/L sodyum bisülfat 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 hidrofilikliğinin arttığını göstermiştir. Su buharı geçirgenliği de lipazla işlenmiş kumaşlarda 1980 g/m²/gün olarak ölçülmüş, kontrol kumaşta ise 1260 g/m²/gün olmuştur. Boyama analizlerinde, 400 nm’de K/S değeri alkali ile boyanmış kumaşta 3.904 iken lipazla işlenmiş ve boyanmış kumaşta 4.021 olarak ölçülmüş; bu değeri, 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.

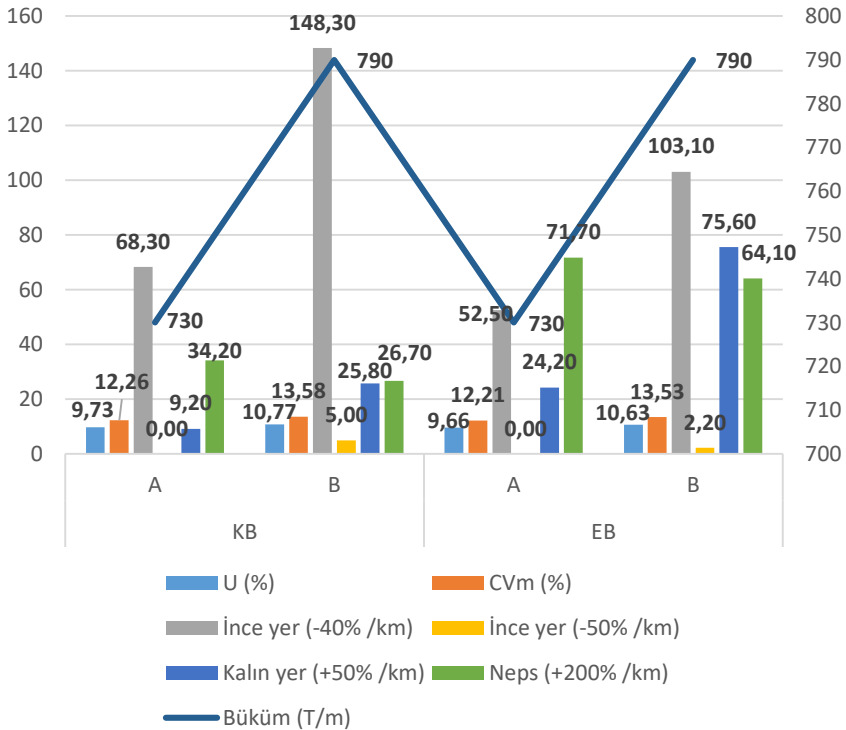
Düzgünsüzlük değerleri, iplik kütlesinin ne kadar stabil olduğunu göstermektedir. Değerlerin düşük olması daha pürüzsüz ve kaliteli iplikleri ifade eder. Hem kumaş boyalı ve hem de elyaf boyalı partilerde büküm değerleri daha düşük olmasına rağmen polyester/viskon harmanlı ipliklerin düzgünlük değerleri 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.

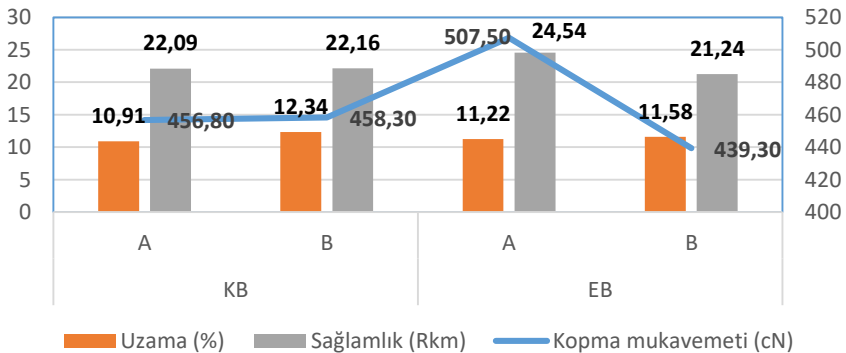
Neps, iplik üzerindeki küçük düğümçüklerdir. Kumaş boyalı grubundaki neps sayısı 26-34 arasındayken, elyaf boyalı grubunda 64-71 seviyelerine çıkmıştır. Elyaf boyama işlemi sırasında lifler birbirine sürtünür ve topaklanır. Bu topaklar eğirme sırasında tam açılmadığı için iplikte "Neps" olarak kalır. 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 karşılaşılarak 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

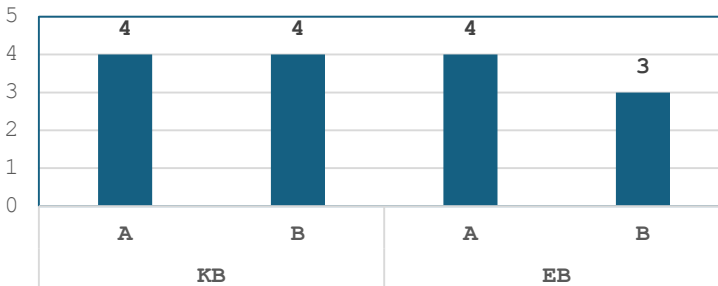


Kumaş Fiziksel Test Sonuçları

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.

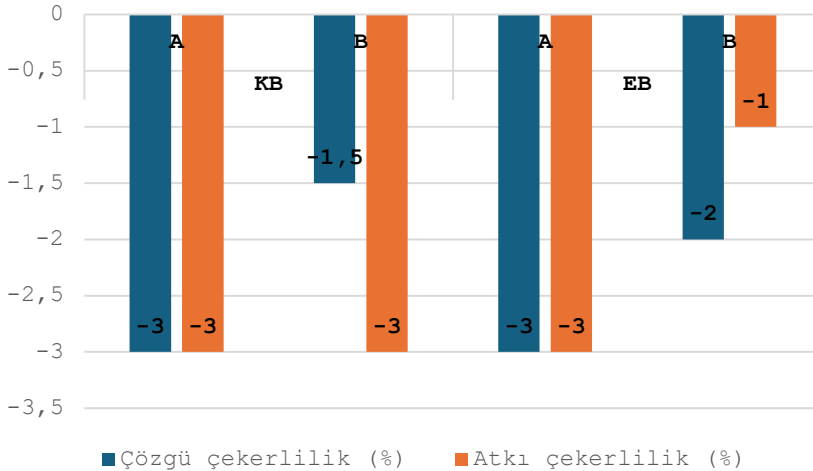
Kumaş boyalı grubunda büküm farkı ve yün elyaf ilavesi boncuklanmayı etkilememiş ancak elyaf boyalı grubunda kabul edilebilir azalış görülmüştür. Normal şartlarda ipliğe verilen büküm (T/m) arttıkça, lifler yapıya daha sıkı tutunur ve boncuklanma direncinin artması beklenir. Ancak elyaf boyalı yün harmanlı 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.

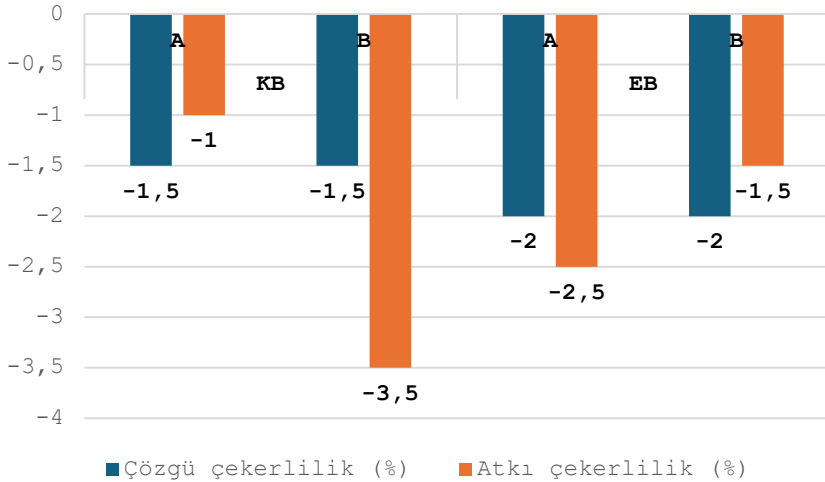
Grafik 4 Kumaş çekme değerleri



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

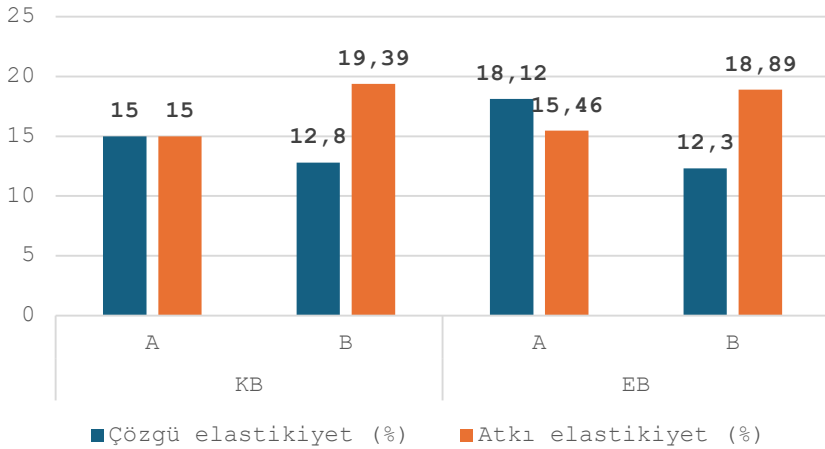
kumaşın yüksek ısı ve neme maruz kaldığında gösterdiği tepkiyi ölçmektedir. Kumaş boyalı polyester/viskon harmanlı varyasyonda çözgüde -%1,5, atkıda ise -%1 ile oldukça stabil bir performans sergilemiştir. Kumaş boyalı yünlü varyasyonda çözgü stabilitesi korunurken, atkı yönünde -%3,5 ile en yüksek çekme 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.

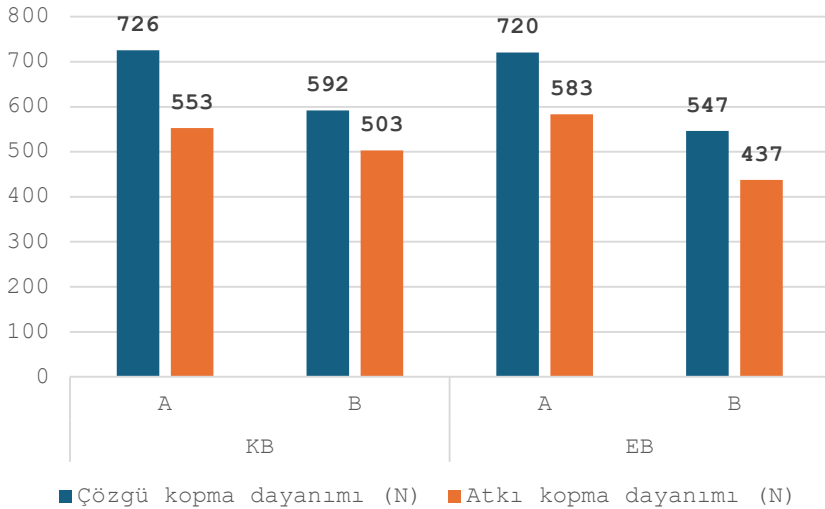
Grafik 6 Kumaş elastikiyet değerleri



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.

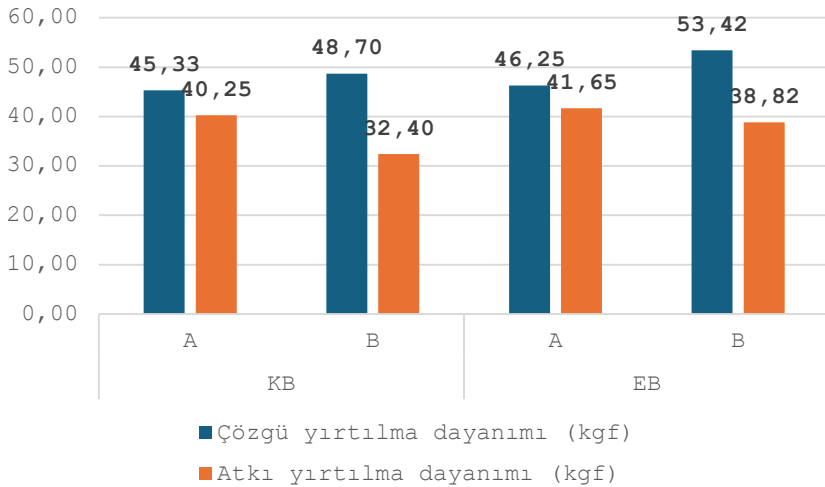
Grafik 7 Kumaş kopma dayanımı değerleri



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

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 duyardan 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, duyu, 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 & Sybilaska, 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 performansa 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 Altingül, 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

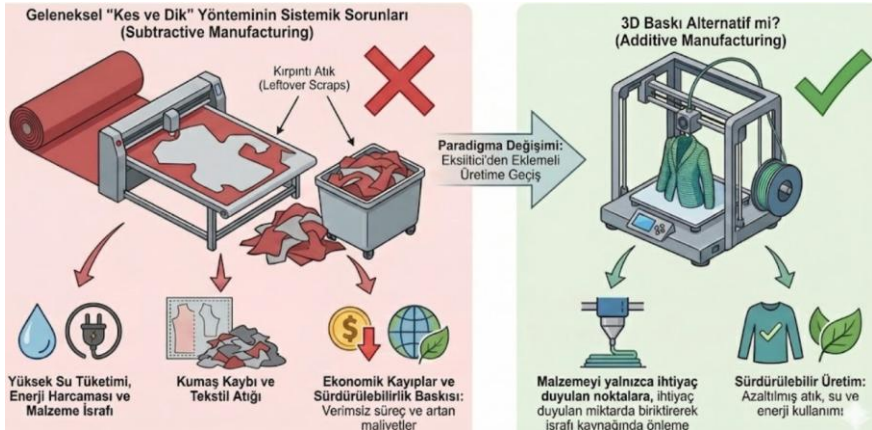
kalıplayarak şekillendiren geleneksel yöntemlerden temelden ayrılır (Jayswal & Adanur, 2022).

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

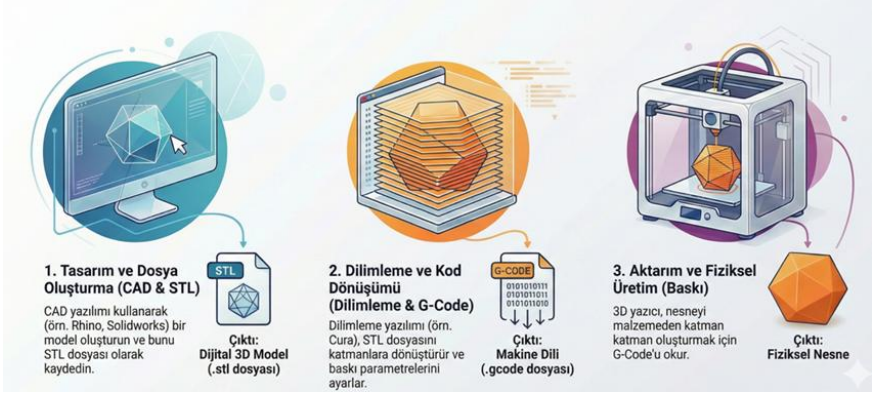
Katmanlı Üretim (AM) süreçleri, dijital bir tasarım dosyasının fiziksel bir nesneye dönüştürülmesini sağlayan ve malzemeyi katman katman (layer-by-layer) birleştirme esasına dayanan bir üretim metodolojisidir. Bu süreç, malzemelerin birleştirilerek nesnelerin yapılması işlemi olarak tanımlanır ve geleneksel 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).

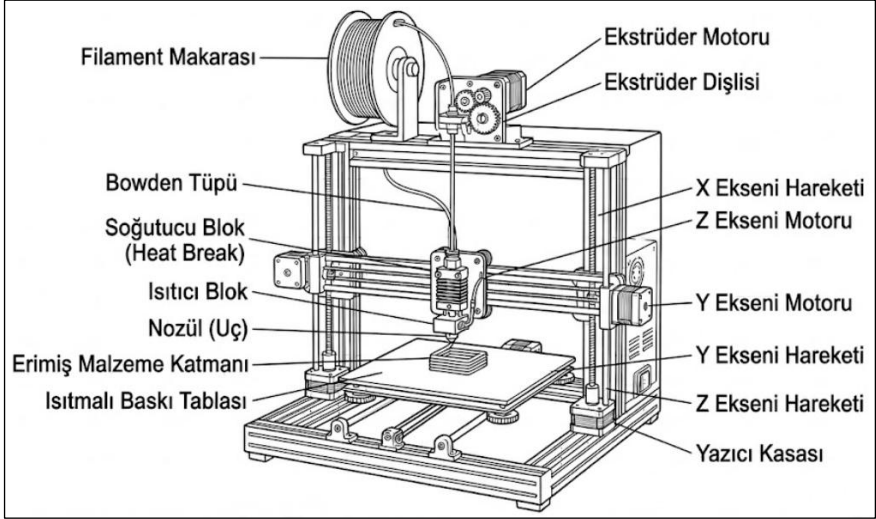
TEKSTİL VE MODA ALANINDA FDM TEKNOLOJİSİ VE MALZEMELER

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 bulunsa da, 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).

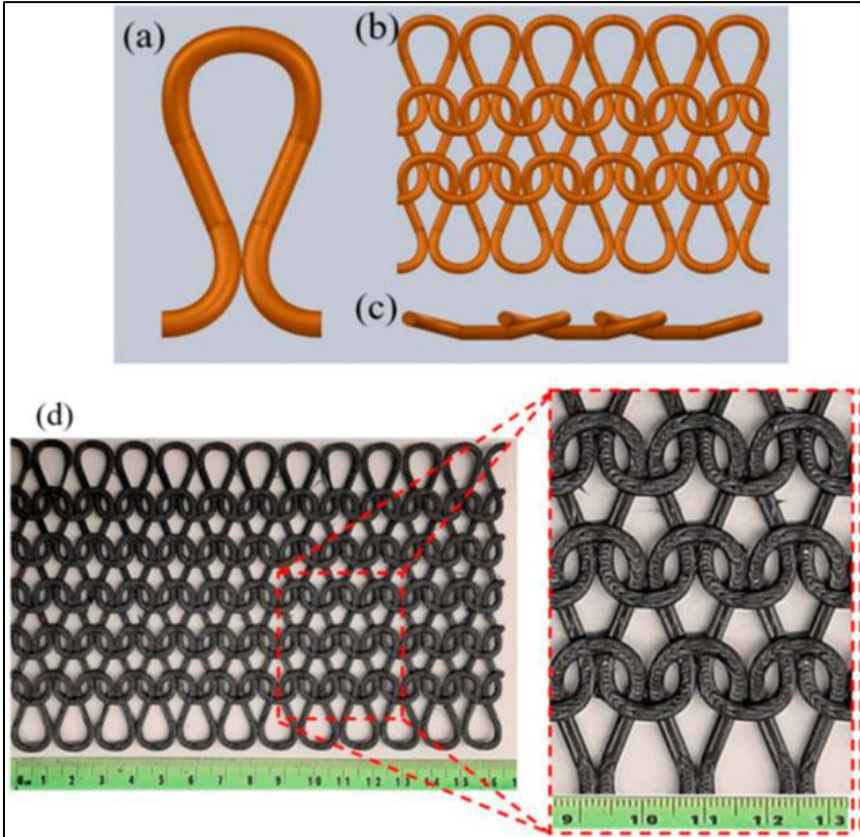
3. Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS): Petrol bazlı bu polimer, yüksek darbe dayanımı ve ısı direnci ile öne çıkar. Ancak baskı sırasında yaydığı koku ve soğuma esnasında büzülme (warping) eğilimi nedeniyle, tekstil üzerine doğrudan baskıda PLA ve TPU kadar tercih edilmez (Jayswal & Adanur, 2022).

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)

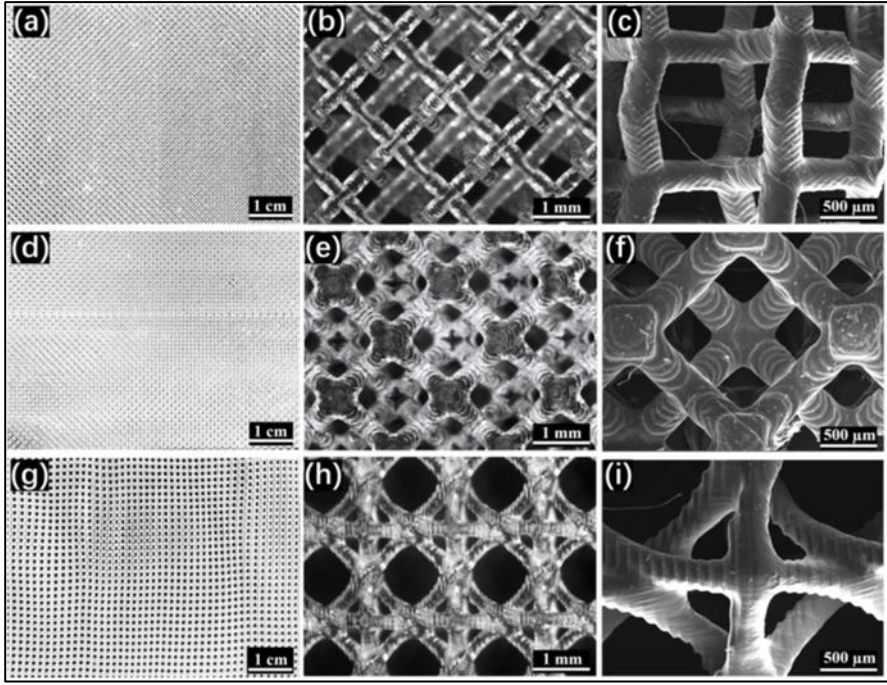
Geleneksel tekstil üretimi, liflerin bükülerek iplik haline getirilmesi ve bu ipliklerin dokuma veya örme yoluyla birbirine kenetlenmesine dayanırken; FDM teknolojisi, termoplastik polimerlerin eritilerek belirli bir yol izlemesi ve katman katman biriktirilmesi prensibiyle çalışır⁶¹. Bu temel fark, FDM 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 ağı 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.

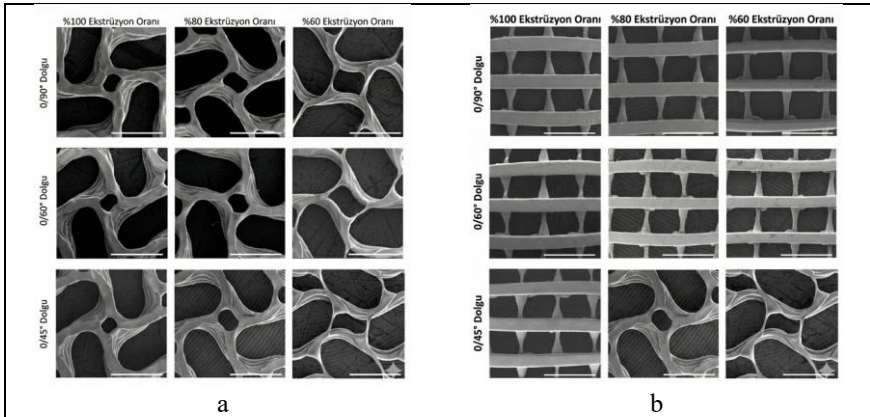
Linkli ve Mezo Yapılar: Makro ölçekli kumaş dokusunu taklit eden, birbirine geçen halkalar veya mezo ölçekli yapısal hücrelerden oluşur. Adanur & ark. (2024), Solidworks kullanarak atkı örmeciliği (weft knit) ve saç örgü (braid) yapılarını modellemiş ve FDM ile basmıştır. 3D baskılı örme yapılar, ilmeklerin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

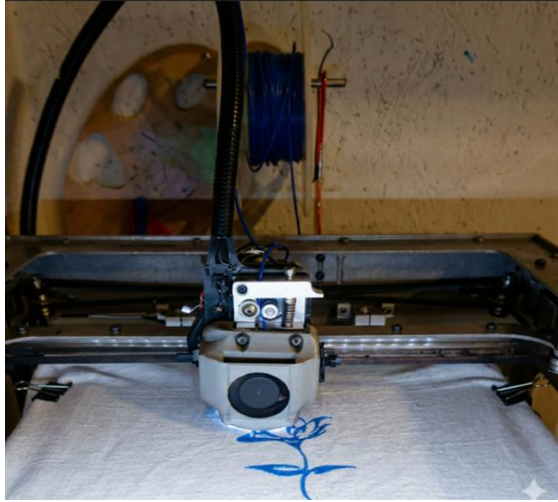
3. Depozisyon (Biriktirme): Termoplastik filament, ısıtılmış ekstrüderden geçirilerek yarı sıvı halde kumaş üzerine tabaka tabaka biriktirilir.

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



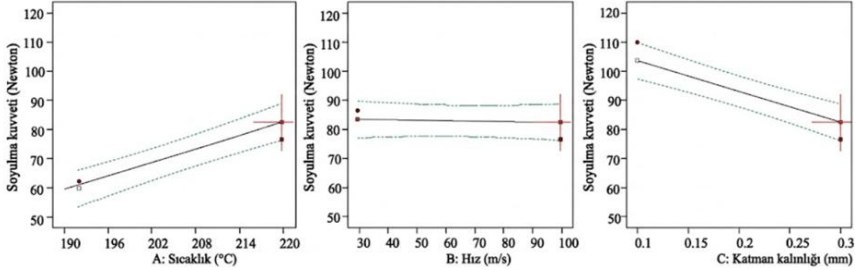
Tekstil üzerine FDM baskı süreci aşamalarında en kritik faktör, polimer ve kumaş arasındaki yapışma (adhezyon) kuvvetidir. Bu aşamada, polimer ve lifler arasında kimyasal bağlardan ziyade, "form-kilitlenme" (form-locking) veya mekanik kenetlenme adı verilen fiziksel bir bağ oluşur (Sitotaw & ark., 2020;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

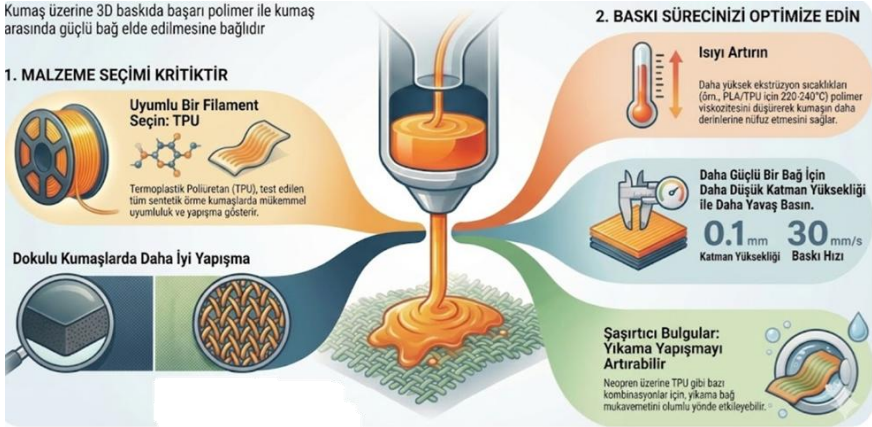
2. Esneklik (Shore Sertliği): Giyilebilir ürünlerde konfor için kumaşın dökümlülüğüne uyum sağlayacak esnek filamentler (Düşük Shore değerli TPU/TPE) tercih edilmelidir. Örneğin, 95A Shore sertliğindeki TPU, kumaşla birlikte hareket edebilirken, 83D sertliğindeki PLA rijit kalır (Goncu-Berk & ark., 2020).

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 (Leheckas & 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:

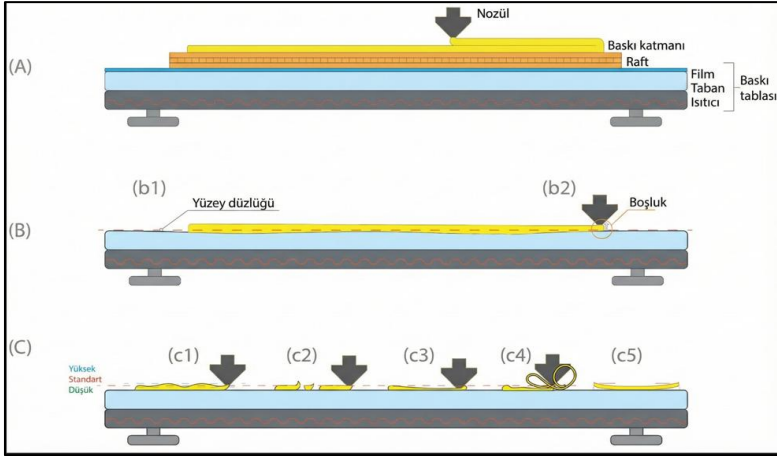
Tekstil üzerine baskı (hibrit yapılar) veya tekstil benzeri ince yapıların üretimi, standart 3D baskı işlemlerine göre çok daha hassas kalibrasyon gerektirir.

- **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).

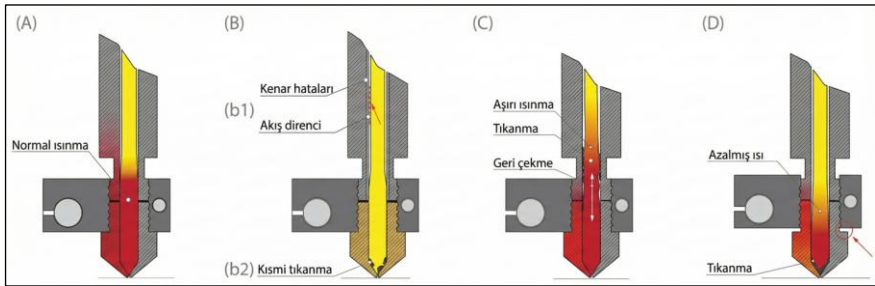
Şekil 12. FDM tip 3D yazıcılar ile üretimde karşılaşılabilecek baskı tablası ve nozul ayarı kaynaklı sorunlar



(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; Leheckas & 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 kırılmandır 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).

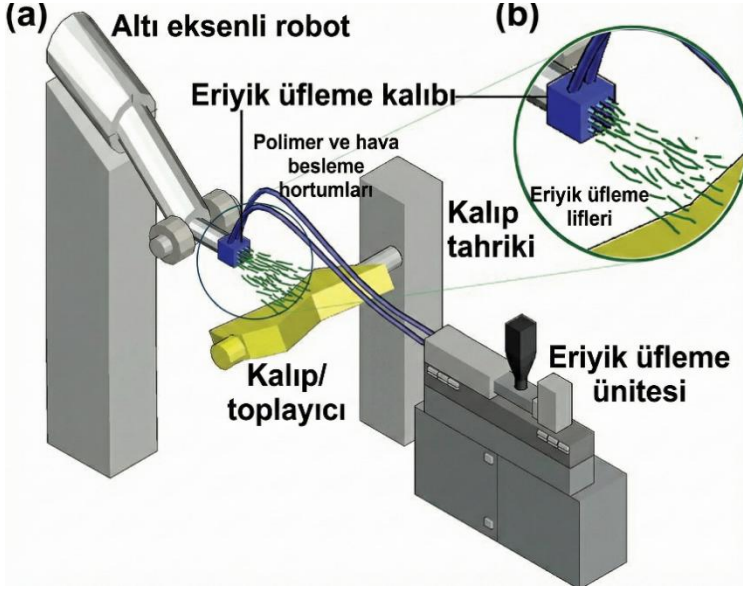
B. Gelecek Yönelimleri ve Teknolojik Vizyon

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.

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 uyaranlarla 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). Leheckas & 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 hızlandıracağını 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.

BÖLÜM 6

DİJİTAL HİKAYELEŞTİRME VE MODA TASARIMI SÜREÇLERİ

BİRSEN ÇİLEROĞLU¹
HANDE ECEM BULUŞ²

Giriş

Dijital hikayeleştirme; geleneksel anlatı biçimlerinin teknolojik gelişmeler ışığında görsel, işitsel ve metinsel çoklu ortam unsurlarıyla harmanlanarak yeniden üretildiği, çok boyutlu ve etkileşimli bir iletişim sürecidir. Moda tasarımı ise dijital hikayeleştirme, tasarım sürecini sadece bir ürün ortaya koymak değil aynı zamanda duygusal bağlamı güçlü bir deneyime dönüştürmek, marka değerlerini aktarmak ve hedef kitle ile derin bir iletişim kurmak amacıyla kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında öncelikle dijital hikayeleştirmenin tarihsel gelişimi ve temel öğeleri literatürdeki temel yaklaşımlar ışığında incelenmiştir. Dijital hikaye oluşturma sürecine dair farklı modeller ve bu sürecin eğitim ortamlarında öğretmen ve öğrenciler

¹ Prof. Dr., Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Moda Tasarımı, Orcid: 0000-0003-2743-5963

² Öğr. Gör., Haliç Üniversitesi, Tekstil ve Moda Tasarımı, Orcid: 0000-0002-9377-5205

üzerindeki eğitsel etkileri tartışılmıştır. Dijital hikayeleştirme ile moda tasarımı süreçleri arasındaki yapısal paralellikler analiz edilerek; moda eğitiminde kullanılan ders planı örneklerine, tasarım sürecine entegre edilen hikaye anlatım modellerine yer verilmiştir.

Dijital Hikayeleştirme

Hikayeler; bireylerin kendi deneyimlerini ve yaşadıklarını anlatmada, başkalarının ise yaşantılarını ve deneyimlerini anlamalarını sağlayan temel anlatı araçlarıdır. Aynı zamanda hayal gücünün özgürce kullanılmasına olanak tanıyarak bireyin yaşadığı dünyayı ve bu dünyadaki konumunu kavramasına katkıda bulunurlar. Bu yönleriyle hikayeler, geçmiş, şimdi ve gelecek arasında anlamlı bir bağlantı kuran edebi eserlerdir (Ciğerci, 2015: 27). Hikayeleştirme ise, farklı ortam ve biçimlerde kullanılsa da özünde bilgiyi, deneyimi ve değerleri aktarmaya yönelik temel bir araç olma işlevini sürdürmüştür (Dinçer, 2019: 14). Günümüzde ise internetin yaygın kullanımı ve teknolojik gelişmelerle birlikte, çoklu ortam unsurlarını (görsel, işitsel, metinsel materyaller) aracılığıyla bir araya getiren dijital hikaye formuna dönüşmüştür (Sadık, 2008).

Görüntü merkezli kültür çağı olan günümüzde, hikaye anlatıcılığı kavramı sadece edebiyatla sınırlı görülmemektedir. Bu nedenle, çeşitli tür ve medya özelliklerine uygun olarak tüm anlatı biçimlerini kapsayabilecek geniş bir hikaye anlatımı kavramının benimsenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde hikaye anlatımı ‘yakınsama çağı’ ile birlikte edebiyat ve çizgi roman gibi anlatı türlerinin yanında animasyon, film, oyun ve tasarım gibi görsel medya hikayelerini de içermektedir.

Dijital hikaye, 1960’lı yıllarda film ve televizyon programı formatlarında ortaya çıkmış, dijital hikayeleştirme kavramı ise 1980’li yıllarda gelişmiştir. Özellikle bu yıllardan itibaren öğrenme-öğretme süreçlerinde hem öğretmenler hem de öğrenciler tarafından etkin olarak kullanılan bir yöntem haline gelmiştir.

Dijital hikaye anlatımı, kişisel bilgisayar kullanımının yaygınlaşmasıyla teknik uzmanlığa sahip olmayan bireylerin de içerik ve anlatı üretebildiği kitlesel bir pratiğe dönüşmüştür. Gelişen bilim ve teknoloji, eğitimde tercih edilen yöntem ve teknikleri yalnızca bilginin yapılandırılmasına katkı sağlayarak değil, aynı zamanda öğrencilerin dikkatini çekecek, onların ilgi ve ihtiyaçlarını karşılayacak biçimde dijital araç ve gereçlerle desteklemeye olanak tanımaktadır.

Bu durum, eğitimde bilgisayar destekli yöntemlere doğru bir dönüşümü beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda dijital hikayeleştirme, geleneksel hikayeleştirme yönteminin yerine kullanılabilecek alternatif bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Hem hikaye oluşturma hem de teknoloji kullanma süreçlerini içermesi bakımından sözel hikayeleştirmeye göre daha çok boyut barındırmaktadır.

Dijital hikaye anlatımının yaygınlaştırılması konusunda ABD’de eğitim veren iki önemli kurum bulunmaktadır. Bu kurumlardan ilki, Joe Lambert’in öncülüğünde Berkeley, Kaliforniya’da bulunan ‘Dijital Hikaye Anlatım Merkezi (Center for Digital Storytelling)’dir. 1980’lerin sonlarına doğru dijital hikâye oluşturma alanındaki ilk çalışmalar da Joe Lambert ve Dana Atchley tarafından Dijital Hikaye Anlatım Merkezinde yürütülen, kar amacı gütmeyen sanatsal projeler ile başlamıştır.

1990’lı yıllarda Nina Mullen’in, Lambert ve Atchley’in katkılarıyla Dijital Medya Merkezi (Digital Media Center) San Francisco’da kurulmuştur. Atchley ve Lambert öncülüğünde kurulan Dijital Hikaye Anlatım Merkezi, ‘Herkesin anlatacak bir hikayesi vardır’ sloganıyla dijital hikaye hareketine öncülük ederek bireylerin kendi dijital hikayelerini oluşturmalarını ve bunları paylaşımlarını teşvik etmiş ve bu sürecin yaygınlaşmasına önemli ölçüde katkı sağlamıştır (Slyvester ve Grenidge, 2009). Bu merkez daha sonra ise 1998 yılında Berkeley’de Dijital Hikâye Anlatım Merkezi (Center

for Digital Storytelling) olarak yeniden yapılandırılmıştır. 2015 yılından itibaren ise kurumun adı Hikaye Merkezi (Story Center) olarak değiştirilmiştir. Bu merkezde, sağlık ve eğitim gibi alanlarda düzenlediği atölyeler ve çalıştaylar ile katılımcılara kendi dijital hikaye oluşturma eğitimleri sunmaktadır. Katılımcılar, bu eğitimlerde dijital hikaye oluşturma kullanılacak yazımları, dijital hikaye bileşenlerini ve oluşturdukları hikayelerinde kullanacakları görselleri, müzikleri, efektleri, video gibi çoklu ortam öğelerinin seçip birleştirerek kendi dijital hikayelerini oluşturmaktadırlar (Bull ve Kajder, 2004; Militello ve Guajardo, 2013; Robin, 2008).

Dijital hikayelerin tanıtımında ve yaygınlaşmasında önemli bir rol oynayan unsurlardan biri de Joe Lambert'in 2002'de yayımlanan 'Digital Storytelling: Capturing Lives, Creating Communities' adlı kitabıdır. Lambert, bu kitabında dijital hikaye oluşturma sürecini ayrıntılı olarak ele almış ve uygulanabilecek yaklaşımları açıklamıştır (Hubbel, 2011 ve Lambert, 2002).

ABD'de eğitim veren bir diğer kurum ise Dr. Bernard Robin öncülüğünde kurulan ve Houston Üniversitesi'nde yer alan 'Dijital Hikaye Anlatımının Eğitsel Kullanımı Merkezi (The Educational Uses of Digital Storytelling)'dir. Bu merkezde dijital hikaye oluşturma ve eğitimde kullanımı üzerine çalışmalar yürütülmektedir ve verilen eğitimler sayesinde bu alana ilgi ve çalışmalar artmaktadır (Bull ve Kajder, 2004; Bumgarner, 2012; Robin, 2008; Rossiter ve Garcia, 2010). Yapılan bu çalışmaların yanında BBC, Capture Wales adındaki projeye Galler'deki kasabalar gezilmiş ve oralarda yaşayan insanların anlattıkları tarihsel hikayelerin dijital hikayeleri oluşturulmuştur. Bu hikayeler BBC'ye ait web sayfasında sunulmuştur (Garrety, 2008; Hubbell, 2011 ve Pierotti, 2006).

Dijital hikaye, uygun bir hikayeyi çoklu ortam unsurlarıyla birleştirmek amacıyla kişisel dijital teknolojilerin kullanılmasına dayanmaktadır (Ohrid, 2008: 15). Alexander'a (2011) göre ise dijital hikaye, en basit ifadeyle, dijital teknolojiler kullanılarak

gerçekleştirilen bir hikaye anlatım biçimi olarak tanımlanmaktadır. Dijital hikayeler, belirli bir konuda bilgi sunmak amacıyla dijital grafik, ses, video ve müzik gibi öğeleri bir araya getiren bir tema ve bakış açısına sahip yapılar olarak kurgulanmaktadır. Genellikle birkaç dakikalık süreye sahip olan bu hikayeler, kişisel bir yaşantıyı anlatma, tarihsel bir olayı aktarma ya da belirli bir konuda öğretim yapma amacını taşımaktadır (Yamaç, 2015: 44). Kişisel hikayeler aracılığıyla öğrenciler, çoklu ortam içeriklerinin pasif tüketicisi olmaktan çıkarak bu içeriklerin aktif üreticisi konumuna gelmektedir (Ohler, 2006).

Dijital Hikaye Anlatım Merkezi (2018), başarılı bir dijital hikayenin;

- Bireysel olduğunu,
- Çıkış noktasının metin olduğu,
- Kısa ve öz biçimde kurgulandığını,
- Erişimi kolay materyallerden yararlandığını,
- Evrensel hikaye unsurlarını temel aldığı ve
- Çeşitli düzeylerde işbirliği gerektirdiğini belirtmektedir.

Dijital Hikâye Anlatım Merkezi, dijital hikayelerde bu beklenen başarıya ulaşılabilmesi için öğrencilerin dijital hikayeleştirme sürecini adım adım takip ederek çalışmalarını sürdürmeleri gerektiği üzerinde durmuştur (Olur, 2021: 59).

Dijital hikayeleştirme, çoklu ortam öğelerini (metin, görsel, ses, video) bir anlatım örgüsü içinde birleştirerek öğrenme-öğretme süreçlerinde hem öğretmenler hem de öğrenciler tarafından işlevsel şekilde kullanılan bir yöntemdir. Öğretmenler açısından dijital hikayeler, soyut kavramların somutlaştırılmasında, ders içeriğinin duygu ile desteklenmesi ve öğrencinin dikkatini canlı tutacak etkileşimli bir öğrenme ortamı sunmaktadır. Öğrenciler açısından ise

dijital hikayeler, bireysel deneyimlerini ve bilgiyi anlatıma dönüştürerek dijital araçları kullanma, yaratıcı düşünme, eleştirel sorgulama yoluyla öğrenmeye aktif olarak katılım sağlamaktadır. Bu süreçte öğrenciler pasif bir dinleyici olmaktan çıkıp, aktif bir katılımcı olur.

Dijital Hikayenin Öğeleri

Etkili biçimde tasarlanarak sunuma hazırlanan dijital hikayeler, birbirleriyle ilişkili ve kendi içinde dinamik bir yapı oluşturan yedi temel öğeden oluşmaktadır (Bull ve Kajder, 2004; Bumgarner, 2012; Robin, 2006 ve Satterfield, 2007).

Şekil 1: Dijital Hikayenin Öğeleri



Bakış Açısı: Dijital hikayeler, deneyimlere, yaşanmış olaylara ya da kurgusal anlatılara dayalı olarak oluşturulmaktadır. Dijital hikaye yazarının kendi deneyim, yaşantı ya da edinimlerinden hareketle benimsediği bakış açısı doğrultusunda iletilmek istenen mesajın anlatı içinde aktarılma biçimidir. Bu doğrultuda dijital hikayeler genellikle birinci ya da üçüncü tekil kişi anlatımıyla kurgulanmaktadır (Dinçer, 2019: 28).

Tüm hikayeler bir amaç doğrultusunda anlatılmakta olup bu amaç, hikayenin merkezinde yer alan ana kahramanın karşılaştığı bir problem, gereksinim ya da istek olabilir. Bu aşamada, ‘Bu hikaye neden anlatılacak?’ ve ‘Kime anlatılacak?’ gibi yönlendirici sorular yöneltilmelidir (Lambert, 2006). Hikayenin bakış açısını ve ana fikrini belirlemeye belirleyen bu sorulara yalnızca anahtar

sözcüklerle yanıt verilmemeli; anlatıcının hikayede gerçekte hangi noktaya vurgu yapacağı ortaya konulmalıdır (Lambert, 2010).

İlgi Çekici Soru: Dijital hikayenin sunulduğu kişide merak uyandırmak, ilgiyi başlatmak ve ilgiyi devam ettirmek amacıyla hikaye, ilgi çekici bir soru ile başlatılmaktadır. Bu soru, hikayenin başlangıcında açık biçimde ifade edilebileceği gibi anlatı akışına gömülü şekilde de kurgulanabilir. Hikayedeki bu ilgi çekici soru, gelişme ya da sonuç bölümünde yanıtlanarak izleyicide oluşan merakın giderilmesi sağlanır (Dinçer, 2019: 29).

Dijital hikayelerde bu soru, örneğin bir cinayet filminde ‘Katil kim?’ ya da bir romanda ‘Kahraman sevdiğine kavuşabilecek mi?’ gibi merak duygusu oluşturan bir sorudur ve bu soru yanıtlandığında ise hikaye tamamlanmaktadır (Lambert, 2006). Bu yolla izleyici ile hikaye arasında güçlü bir bağ kurulmaktadır ve izleyici, hikaye boyunca bu sorunun cevabını öğrenme isteğiyle hikayeyi takip etmektedir.

Duygusal İçerik: Dijital hikayelerin amacı, dinleyici ve izleyiciye doğrudan bilgi aktarmakla sınırlı olmayıp, teknolojik olanaklardan yararlanarak ve estetik boyutuna önem vererek hedef kitlenin deneyimden zevk almasını sağlamaktır. Bu doğrultuda dijital hikayeler, kişilerde farklı duygular uyandıracak biçimde tasarlanmalıdır. Hikayeler kimi zaman güldüren ve eğlendirenken, kimi zaman da hüznendiren duygusal bir içeriğe sahip olmalıdır. İlgi çekici bir soruyla birlikte duygusal içerik, hikyedeki mesajın dinleyici ve izleyiciye aktarılmasında kritik bir öge olarak öne çıkmaktadır. Hikayelerde duygusal içeriğin kurgulanmasında, dijital hikayenin hitap ettiği grup ya da kitlenin özellikleri dikkate alınması gerekmektedir (Ciğerci, 2015: 36). Bu durum bireylerin zor dönemleri nasıl aştıklarını ve hala neyi arzuladıklarını tanımlama yoluyla ortaya konulabilmektedir. Ayrıca bu etki, duygusal materyale samimi bir yaklaşımla elde edilebilir. Ölüm, kayıp, aşk, yalnızlık, reddedilme, güven ve kırılganlık gibi temel duygularla

doğrudan ilişkili hikayelerin, izleyiciyi daha kolay içine çektiği ve onlarda kalıcı bir iz bırakabildiği ifade edilmektedir (Lambert, 2006).

Ekonomi: Hazırlanacak dijital hikayenin uzunluğu, yani süresi ile ilişkilidir. Dijital hikayelerin izleyici ve dinleyicinin odaklanma süresini aşmayacak şekilde ve genellikle 2–5 dakika ile sınırlandırılmalıdır. Hikaye metninde gereksiz ayrıntılardan kaçınılması ve iletilmek istenen mesaja odaklanılması, hikayenin ideal uzunlukta tutulmasına katkı sağlayacaktır. Ekonomi öğesi yalnızca metnin süresiyle sınırlı değildir; aynı zamanda dijital hikayede kullanılacak resim, fotoğraf, müzik, efekt, video ve grafik gibi görsel-işitsel unsurların sayısı ve kullanım hikaye sıklığı da ekonomi kapsamı içinde değerlendirilmektedir (Ciğerci, 2015: 37).

Hikaye anlatımında sıklıkla karşılaşılan güçlüklerden biri, sınırlı materyalle yeterince etkili bir anlatı kurulamayacağı yönündedir. Bu nedenle ekonomiklik, aşırı ayrıntıya girmeden hikayenin temel amacını karşı tarafa açık ve anlaşılır biçimde iletebilmeyi ifade etmektedir. Ekonomi ilkesinin uygulanabilmesi ve anlatı ile görseller arasındaki ilişkinin daha net biçimde ortaya konulabilmesi için görsel senaryo taslağından yararlanılması önerilmektedir (Lambert, 2006).

Hız: Dijital hikayenin akış hızı, dinleyicinin dikkatini çekmesi açısından önemli bir unsurdur. Bu nedenle dijital hikaye anlatımında tempo, anlatının gerektirdiği biçimde çeşitlendirilmelidir. Hikayenin duygusal olduğu bölümlerde daha yavaş, daha hareketli olan bölümlerde ise daha yüksek bir tempo kullanılması, hedef kitlenin hikayeye yönelik ilgisini canlı tutmaya katkı sağlamaktadır. Bu nedenle nitelikli bir hikâyenin ‘nefes alabilen’ bir yapıya sahip olması; gerekli bölümlerde hızının artırması ve gerekli bölümlerde ise de yavaşlayarak ritmini dengelemesi gerekmektedir (Lambert, 2006).

Dijital hikaye anlatım sürecinde ekonomi ile hız öğeleri arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır; dijital hikaye yazarı, bu iki öğeyi birlikte dikkate alarak anlatıda hangi unsurların yer alacağına ve hangilerinin çıkarılması gerektiğine karar vermelidir (Ciğerci, 2015: 37).

Seslendirme: Hikayeyi oluşturan kişilerin senaryolarını kendilerinin seslendirmeleri ve görsellerle eşleştirmeleri süreci olarak tanımlanabilir. Süreç, hikayenin en kritik aşamalarından biri olup anlatıcı, kendi sesi aracılığıyla hikayenin duygusal tonunu da izleyiciye aktarabilmektedir (Lambert, 2006).

Anlatıcı, seslendirme sürecinde hikayenin konusu, içeriği ile iletilmek istenen mesajı ve duygusal içeriği dikkate alarak seslendirme yapmalıdır. Bu süreçte anlatıcı sesinde yükseltme, alçaltma, inceltme ve kalınlaştırma gibi tonlamalara yer vermek, hedef kitlenin dikkatini canlı tutmanın yanı sıra hikayede verilmek istenen mesajın daha etkili biçimde aktarılmasına katkı sağlayabilir (Ciğerci, 2015: 37).

Müziğin Kullanımı: Dijital hikayede kullanılan görseller ve yazılmış hikaye metni, iletilmek istenen mesaj ve duygusal içerikle uyumlu biçimde seçilen müzik ve ses efektleriyle bütünleştirildiğinde anlatı daha ilgi çekici ve eğlenceli hale gelmektedir. Müzik ya da efektlerin seslerinin düzeyi hikaye metnini seslendiren önüne geçmeyecek şekilde olmalıdır (Ciğerci, 2015: 37).

Müzik, görsel bilgiyi algılama biçimimizi etkilemektedir. Dijital hikayelerden gelir elde edilmesi söz konusu ise telif haklarına dikkat edilmelidir (Lambert, 2006).

Tablo 1: Dijital Hikayenin Öğeleri

	Lambert (2010)	Dijital Hikaye Anlatım Merkezi (Robin, 2008)	Ohler (2013)
1	İç görüye sahip olma	Bakış Açısı	Bakış Açısı
2	Anıyı bulma	Heyecanlandırıcı Soru	Hikaye
3	Duygulara sahip olma	Duygusal İçerik	Duygusal Katılım ve Ton
4	Hikayeyi Görme		Video ve Performans
5	Hikayeyi Duyuma	Müzik ve Sesinin Gücü	Müzik
6	Hikayeyi Birleştirme ve Hikayeyi Paylaşma	Ekonomi ve Tempo	Zaman/Ekonomiklik ve Yaratıcılık/Özgünlük

Kaynak: (Lambert 2010, Dijital Hikaye Anlatım Merkezi, Robin 2008 ve Ohler 2013)

Lambert (2010), Dijital Hikaye Anlatım Merkezi (Robin, 2008) ve Ohler (2013) tarafından ortaya konulan dijital hikaye öğeleri incelendiğinde, iyi bir dijital hikayenin hem anlatımsal hem de çoklu ortam temelli bir bütünlük gerektirdiği görülmektedir. Dijital hikayenin ilk aşaması olan Lambert'in (2010) içgörü ve anıyı bulma olarak adlandırdığı, kişinin deneyimini anlamlandırma süreciyle başlamaktadır. Bu süreç, Dijital Hikaye Anlatım Merkezi'nin (2008), bakış açısı ve heyecanlandırıcı soru kavramlarıyla paralellik göstermektedir, bu aşamada hikayenin hangi perspektiften anlatılacağını ve hangi temel soruna odaklanılacağını belirlenmesidir. Ohler (2013) ise, hikaye ve bakış açısı olarak, anlatının tarihi bir belgesel mi yoksa kişisel bir deneyim mi olacağına karar verilen, mesajın netleştirildiği stratejik bir aşama olarak nitelendirmektedir.

Lambert'in, duygulara sahip olma ögesi, Dijital Hikaye Anlatımı Merkezi tarafından duygusal içerik olarak tanımlanmaktadır ve hikayenin izleyiciyle kurduğu bağın merkezi olmaktadır. Ohler (2013), bu öğeyi duygusal katılım ve ton kavramlarıyla açıklamıştır. Hikayenin mizahi, ciddi veya iyimser gibi farklı şekillerde ortaya konulabilmektedir.

Dijital hikayeleştirme sürecini geleneksel hikayeden ayıran en temel özelliklerden biri de, çoklu ortam unsurlarının süreçte kullanılmasıdır. Lambert'in hikayeyi görme ve hikayeyi duyma olarak ayırdığı öğeler; Dijital Hikaye Anlatım Merkezinin modelinde sesin gücü ve müzik ile, Ohler modelinde ise video/performans ve müzik başlıkları altında açıklamaktadır.

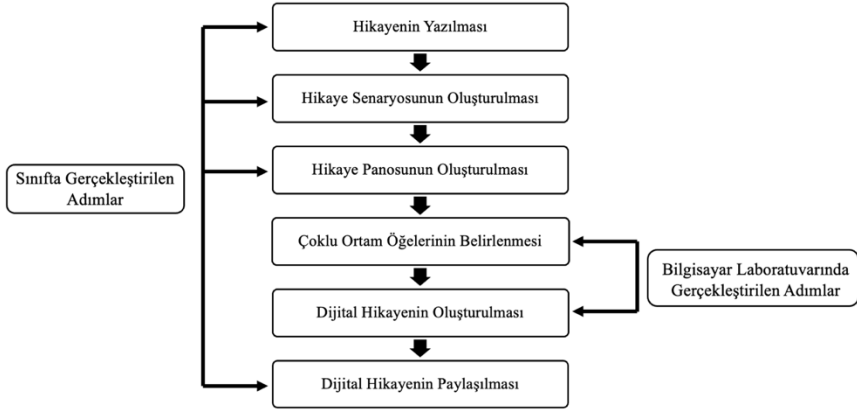
Lambert'in hikayeyi birleştirme ve hikayeyi paylaşma süreçleri, hikayenin yapımı ve paylaşılmasını içerirken; Dijital Hikaye Anlatım Merkezi ve Ohler ise bu öğeleri ekonomi, tempo, zaman/ekonomiklik ve yaratıcılık/özgünlük olarak açıklamaktadır. Hikayenin gereksiz detaylardan kaçınılması ve belirli bir süre içinde ritim ile sunulması anlamına gelmektedir.

Lambert, Dijital Hikaye Anlatım Merkezi ve Ohler'in yaklaşımları terminolojik farklılıklar gösterse de, hepsi iyi bir dijital hikayenin; güçlü bir bakış açısına sahip, duygusal bağ kurabilen, görsel-işitsel öğelerle zenginleştirilmiş, ekonomik bir kurguyla yapılmış ve özgün bir ürün olması gerektiği konusunda birleşmektedir.

Dijital Hikaye Oluşturma Süreci

Dijital hikaye oluşturma sürecine ilişkin birçok görüş bulunmaktadır. Jakes ve Brennan'a (2005b) göre dijital hikaye oluşturma süreci; hikayenin yazılması, hikaye senaryosunun oluşturulması, hikaye panosunun (storyboard) hazırlanması, kullanılacak çoklu ortam öğelerinin araştırılması, dijital hikayenin oluşturulması ve dijital hikayenin yayımlanması ya da paylaşılması olmak üzere altı aşamada ele alınmaktadır.

Şekil 2: Dijital Hikaye Oluşturma Süreci



Kaynak: (Jacks ve Brennan, 2005)

Jakes ve Brennan (2005), birinci aşama olan yazma sürecinde öğrenciler, birden fazla taslak hikâye üretmekte ve bu süreçte hikayenin temel bir temaya sahip olmasına özen gösterilmektedir. Senaryo aşaması, anlatıda ele alınan temel bileşenlerin daha yoğun ve rafine edilmiş bir biçime dönüştürüldüğü aşamadır. Görsel senaryo taslağı aşamasında öğrenciler, dijital hikayelerinin akışını organize etmekte ve anlatının hangi bölümünde hangi görsel öğelerin kullanılacağını planlamaktadır. Çoklu ortam kaynaklarının tespiti aşamasında ise öğrenciler, dijital hikayelerinde kullanacakları görsel, video ve ses öğelerini internet üzerinden araştırmakta; bu noktada kullanılacak çoklu ortam materyallerinin öğrencilerin kendilerine ait görsel ve ses kayıtlarından da oluşabileceği belirtilmektedir. Son iki aşamada öğrenciler, çeşitli teknolojik araç ve gereçlerden yararlanarak dijital hikayelerini oluşturmaktadır ve bu ürünleri paylaşmaktadır. Paylaşım aşaması, sürecin en önemli basamaklarından biri olarak öne çıkmakta; sınıf ortamında dijital hikayelerin paylaşılması, öğrencilerin birbirlerini daha iyi tanımalarına da katkı sağlamaktadır.

Tolisano'ya (2008) göre dijital hikaye oluşturma süreci üç aşamadan oluşmaktadır.

- İlk aşama, dijital hikaye üretimine yönelik hazırlık aşaması olup bu aşamada hikaye metninin yazılması ve hikayede kullanılacak resim, fotoğraf, grafik ve video gibi görsel materyallerin seçilmesi yer almaktadır.
- İkinci aşamada ise Movie Maker, Photo Story gibi bilgisayar programları ya da web tabanlı uygulamalar aracılığıyla görseller, seslendirme ve müzik gibi öğeler bir araya getirilerek dijital hikaye oluşturulmaktadır.
- Üçüncü aşama, hazırlanan dijital hikayenin bilgisayara ya da internet ortamına yüklenmesi ve paylaşılmasıdır. Buna göre, bilgisayar programlarıyla üretilen dijital hikayeler video oynatıcılar üzerinden izlenebilirken, web tabanlı araçlarla hazırlanan dijital hikayeler çevrim içi ortamda yayımlanabilmektedir.

şekil 3:Dijital Hikaye Oluşturma Bileşenleri



Kaynak: (Çiğerci, 2015: 38)

Kearney (2011) dijital hikaye oluşturma sürecini üretim öncesi, üretim dönemi, üretim sonrası ve dağıtım olmak üzere dört aşamada ele almaktadır.

- *Üretim öncesi aşamasında*, dijital hikayeyi geliştirecek kişi hikayeyi hangi amaçla yazacağını, hikaye türünü ve izleyici-dinleyicinin dikkatini canlı tutacak odak soruyu belirledikten sonra, hikaye panosundan (storyboard) yararlanarak senaryo geliştirme sürecine başlamaktadır. Bu senaryoya bağlı olarak hikayede kullanılacak resim, fotoğraf, müzik, efekt ve video gibi çoklu ortam öğelerini seçer ve planlamasını yapar.
- *Üretim döneminde* ise bilgisayar ya da web tabanlı ortamda tercih edilen programlar kullanılarak dijital hikaye oluşturulur ve yayınlanması için hazır hale getirilir.
- *Üretim sonrası aşamasında* ise anlatıcı, oluşturduğu dijital hikayeye ilişkin arkadaşlarından ya da öğretmeninden aldığı değerlendirmeler doğrultusunda düzenlemeler yaparak ürününe son halini verir.
- *Dağıtım aşamasında*, tamamlanan ve kaydedilen dijital hikaye bilgisayar ortamında veya web ortamında paylaşılır.

Eğitimde dijital hikayeler ve dijital hikaye anlatımının kullanımına yönelik çalışmalar yürüten Houston Üniversitesi Eğitim Teknolojisi Bölümü, dijital hikaye oluşturma sürecini dört aşamada tanımlamaktadır.

- İlk aşamada hikaye anlatıcısı, hikâyenin parametrelerini belirledikten sonra, bir konu belirlemektedir. Ardından hikayesinde kullanacağı resim, çizim, fotoğraf, harita ve tablo gibi görsel materyalleri seçmektedir. Kaynakların toplanmasını ardından anlatıcı, hikayenin amacını netleştirmek için düşünmeye başlar. Burada amaç bilgilendirme mi, ikna etme mi ya da sorgulamak mı gibi amacına ilişkin sorularına yanıt vermektedir.

- İkinci aşamada anlatıcı; ses, görseller, metin ve diğer içerik öğelerini oluşturur ve bu materyalleri Photo Story uygulamasına aktarmaktadır. Bu aşamada anlatıcı gerekli gördüğü durumlarda görsellerin sayısı ve sıralamasında düzenlemeler yapabilmektedir.
- Üçüncü aşamada ise anlatıcı hikayeyi kurgulayarak kaydetmekte ve sonlandırmaktadır. Hikayenin amacı ile anlatımın hangi bakış açısından yapılacağına karar vererek seslendirmede kullanılacak metni hazırlamaktadır.
- Dördüncü aşamada, seslendirilen hikaye Windows Media Video ya da tercih edilen başka bir dosya formatında bilgisayar ortamına kaydedilmektedir. Ardından hikaye sunularak geri bildirimler ve dönütler alınmaktadır.

Barrett (2009), dijital hikayelerin oluşturulma sürecinde izlenen aşamaları beş temel adımda ele almaktadır:

1. Hikâye metninin yazılması: dijital hikayenin konusu belirlenerek anlatı metni oluşturulur. Bu konu; önemli bir olay ya da kişi, yaşamda meydana gelen değişimler, doğadaki bir olgu veya tarihsel bir olay gibi farklı temalar üzerinden kurgulanabilir. Yazılacak metnin, izleyici ve dinleyicinin dikkatini ve ilgisini çekebilecek nitelikte olması; ayrıca dijital hikayede kullanılacak görsel-işitsel unsurların gerisinde kalmayacak bir anlatı gücüne sahip bulunması önemlidir. Geleneksel hikayelerde olduğu gibi dijital hikaye metni de giriş-gelişme-sonuç bölümleri çerçevesinde yapılandırılabilir; kişi, olay, yer ve zaman gibi temel anlatı öğelerine yer verilebilir. Bu aşamada aynı zamanda hikayenin akışının nasıl ilerleyeceği planlanmalı; seslendirme, müzik, görsellerin hangi

sırada, ne kadar süreyle ve hangi amaçla kullanılacağına ilişkin sorular yanıtlanmalıdır.

2. Ses kaydının yapılması, hazırlanan metin dijital ortamda seslendirilerek kaydedilir. Ses kaydı için mikrofon ve kayıt yapmaya imkan veren bir yazılım kullanılabileceği gibi, ses kayıt cihazları veya cep telefonları da tercih edilebilir. Seslendirmenin mümkün olduğunca sessiz bir ortamda yapılması; ses hikayenin konusuna, tonuna ve akışına göre uyumlu biçimde kullanılması önerilmektedir.
3. Görsel materyallerin toplanması, dijital hikayede kullanılacak fotoğraf, grafik, resim, video ve animasyon gibi görsel materyaller seçilir. Bu materyaller, özgün çekimler yoluyla üretilebileceği gibi mevcut arşivlerden ya da çevrim içi kaynaklardan da temin edilebilir. Ancak internetten alınacak görsel-işitsel unsurların kullanımında telif haklarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, mümkün olduğunda anlatıcının kendi fotoğraf ve videolarını üretmesi uygun bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Ayrıca hikayenin mesajını güçlendirecek metaforik anlam taşıyan görsellerin seçilmesi, anlatının etkisini artırabilir.
4. Dijital hikayenin oluşturulması önceki basamaklarda hazırlanan metin, ses kaydı ve görseller bir araya getirilerek dijital ürün oluşturulur. Bu süreçte PhotoShop, Paint, Photo Story, Windows Ses Kaydedicisi, Audacity, Movie Maker, iMovie, PowerPoint gibi yazılım ve uygulamalardan yararlanılabilir.
5. Dijital hikayenin yayımlanması ise oluşturulan dijital hikaye uygun formatta dışa aktarılır ve paylaşılır. Web tabanlı araçlarla üretilen dijital hikayeler çevrim içi

ortamda yayımlanarak izlenebilirken; video oluşturma programlarıyla hazırlanan dijital hikayeler uygun formatlarda kaydedilerek Windows Media Player veya benzeri oynatıcılar aracılığıyla görüntülenebilmektedir.

Morra (2014), dijital hikaye oluşturma sürecini döngüsel bir yapı içerisinde sekiz aşamadan oluşan bir süreç olarak tanımlamakta ve bu aşamaları;

- Bir fikirle başlama,
- Araştırma/keşif/öğrenme,
- Yazma/senaryo,
- Görsel senaryo taslağı/plan,
- Görsel, video ve seslerin oluşturulması ve toplanması,
- Birleştirme,
- Paylaşma ve
- Yansıtma ve dönüt biçiminde sıralamaktadır.

Bu aşamalarda, dijital hikaye oluşturacak bireylerin öncelikle her hikayede olduğu gibi bir fikir ortaya koymaları ve anlatacakları hikayenin kurguya mı yoksa gerçek bir yaşantıya mı dayalı olacağına karar vermeleri gerekmektedir. Hikayenin konusuna karar verildikten sonra, bireylerin bu konu hakkında araştırma yapmaları beklenmekte; bu süreç, dijital hikayede ele alınacak içeriğin öğrenilmesine de katkı sunmaktadır. Araştırma sürecinin ardından oluşturulacak hikayenin senaryosu yazılmaya başlanır. Senaryo yazımı tamamlandıktan sonra dijital hikayenin görsel senaryo taslağı hazırlanır. Bu aşamada birey, senaryoyu ses ve görsellerle eşleştirerek hangi görsel ve işitsel unsurları kullanacağına karar vermektedir. Devamında, görsel senaryo taslağında belirlenen ses ve görsellerin toplanması süreci başlamakta; bu materyaller dış

kaynaklardan temin edilebileceği gibi bireyler tarafından da üretilebilmektedir. Bu aşamayı, birleştirme aşaması olarak ifade edilen dijital hikayenin fiilen oluşturulma süreci izlemektedir. Sürecin devamında bireyler, oluşturdukları dijital hikayeleri paylaşmakta; son aşamada ise hem kendi çalışmalarını hem de diğer katılımcıların ürünlerini değerlendirerek yansıtma ve dönüt sürecini gerçekleştirmektedir.

Öğretmenler ve Öğrenciler Açısından Dijital Hikayeleştirme

Eğitimde kullanılan dijital hikayeler, öğretmenler tarafından tasarlanan öğretim aracı olarak kullandıkları dijital hikayeler ve öğrencilerin kendi oluşturdukları öğrenme aracı olarak kullandıkları dijital hikayeler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Robin, 2006). Öğretmenler, zengin çoklu ortam bileşenlerini içeren dijital hikayeleri ders sürecine dahil ederek öğrencilerin derse yönelik ilgisini arttırmayı, yeni fikirler geliştirmelerini teşvik etmek amacıyla hazırlanan hikayeleri izletmeyi ve dinletmeyi tercih etmektedirler. Ayrıca öğretmenler tarafından hazırlanan dijital hikayeler, kavramsal ya da soyut nitelikteki içeriklerin somutlaştırılmasına olanak tanımaktadır ve hikaye etrafında yapılandırılan tartışma ortamları ile konuların daha anlaşılır biçimde ele alınmasını kolaylaştırmaktadır. Sınıf içi öğrenme süreçlerinde çoklu ortam kullanımı, bilginin edinilmesini desteklediği ve zor konu ya da kavramların anlaşılır olmasına yardımcı olduğu inanıldığı için, dijital hikayeler öğretmenler açısından etkili bir öğretim aracı olarak değerlendirilmektedir. (Dinçer, 2019: 22). Alan yazında dijital hikayelerin akademik başarı, ders katılımı, tutumu, motivasyonu ve ilgili arttırdığı ve sınıf ortamında daha zevkli ve eğlenceli bir öğrenme-öğretme sürecinin oluşturulmasına katkı sağladığı düşünülmektedir (Barrett, 2005; Daigle, 2008; Demirer, 2013; Doğan, 2012; Yang ve Wu, 2012).

Kendi dijital hikayelerini oluşturabilen öğretmenlerin, dijital hikayeleri öğrencilerin içeriğe ilgi duymasını sağlamada, hikayede ele alınan konu etrafında tartışma ortamı oluşturmada ve soyut kavramları daha anlaşılır kılmada yararlı buldukları görülmektedir (Robin, 2008). Bununla birlikte öğrenme sürecinde elde edilen sonucun, hikayeden bağımsız olarak bireyin kişisel öğrenme süreciyle ilişkili olduğu vurgulanmaktadır (Garrety, 2008). Dolayısıyla hikaye ne kadar iyi kurgulanmış olursa olsun, dinleyicinin dikkat düzeyi, konuya yönelik ilgisi ve bireysel çabası öğrenme çıktıları üzerinde belirleyici unsurlar olarak önemli olmaktadır.

Dijital hikayeler, öğretmenlere teknolojiyi ders süreçlerine uyarlama ve öğrencilerin 21. yüzyıl becerilerini geliştirerek sınıf içinde farklılaştırılmış öğrenme etkinlikleri tasarlama imkanı sunmaktadır (Kieler, 2010). Öğretmenlerin mesleki gelişimi açısından çeşitli üstünlüklere sahip olan dijital hikayeler; öğretmenlerin iletişim ve 21. yüzyıl becerilerini, motivasyonlarını, okuma-yazma becerilerini teknoloji destekli biçimde kullanmalarını artırıcı bir etki oluşturabilmektedir (Wake ve Modla, 2010). Ancak çoklu beceri gerektiren dijital hikaye kullanım sürecinde bu becerilerin öğrencilere aktarılabilmesi için öğretmenlerin, ilgili tekno-pedagojik alan bilgisine yönelik yeterliliklere sahip olmaları gerekmektedir (Clarke ve Thomas, 2012; Robin, 2008).

Çağdaş eğitim araçlarından biri olarak dijital hikayelerin eğitimde kullanımında öğrenci kazanımlarının en üst düzeye çıkarılabilmesi için, öğretmenlere de önemli sorumluluklar düşmektedir. Öğretmenler, bilgi toplumuna dönüşüm sürecinde değişen koşullara uyum sağlayabilen kuşakların yetiştirilmesinde ve çağdaş eğitim anlayışlarının sınıf ortamına taşınmasında önemli aktörler arasında yer almaktadır.

Dijital hikayeler, yalnızca öğretmenlerin hazırladığı teknoloji temelli bir öğretim aracı olarak değil; aynı zamanda öğrenciler

tarafından bireysel ya da grup çalışması şeklinde üretilebilen bir öğrenme aracı olarak da değerlendirilmektedir. Dijital hikaye oluşturma sürecinin öğrencilere kendi çalışmalarını ve akranlarının çalışmalarını değerlendirip eleştirme olanağı sunduğunu; bu yönüyle sosyal öğrenmeyi ve duyuşsal zekayı geliştirmektedir (Robin, 2008).

Öğrencilerin dijital hikaye geliştirme sürecinde, öğrenciler kendi hikayelerini oluşturmaya başlamadan önce öğretmen tarafından hazırlanan dijital hikayelerin örnek olarak sunulması, süreci somutlaştırma ve yönlendirme açısından önemli olmaktadır. Dijital hikaye oluşturma sürecinde izlenecek adımların öğrencilere açıklanması ve bu öğelerin uygulamaya koymaları sağlanmalıdır. Dijital hikaye sürecinde öğrencilerin ilk olarak belirli bir konuya hakkında araştırma yapmaları, daha sonra hikâyelerinde kullanacakları bakış açısını belirlemeleri ve anlatıyı ilgi çekici kılacak bir soru belirlemeleri beklenmektedir.

Bu hazırlıklar çalışmanın başlangıcında dahi öğrencilerin dikkatini ve ilgisini artırarak motivasyonlarını destekleyebileceği ifade edilmektedir. Bunun yanı sıra öğrenciler, kendi hikayelerini oluştururken kütüphane ve internet gibi farklı bilgi kaynaklarını etkili biçimde kullanmayı öğrenmekte; böylece zengin bir içerik havuzu oluşturarak bu içeriği analiz etme ve sentezleme düzeylerini geliştirebilmektedir. Dijital hikaye üretim süreci; soru sorma, düşünceleri yapılandırma, görüşlerini açıklamayı, anlatı kurgulama ve sunma gibi beceriler üzerinden öğrencilerin iletişim becerilerini geliştirecektir. Ayrıca öğrencilerin hazırladıkları dijital hikayeleri web ortamında yayımlamaları, ürünlerini akranlarıyla paylaşma ve geri bildirim alma fırsatı yaratarak; hikayeler üzerinde eleştiri ve yorumlar yoluyla duygusal zeka ve sosyal öğrenmeyi destekleyen önemli bir deneyim alanı oluşturmaktadır (Dinçer, 2019: 25).

Dijital hikaye anlatımı, geleneksel hikaye anlatımına göre öğrencilerin motivasyonunu daha çok artırdığı; öğrencilerin düşüncelerini düzenlediğini, içeriği öğrenmelerini ve işbirliğine

dayalı çalışmaları kolaylaştırdığını belirtmektedir (Yang ve Wu, 2012). Ayrıca, dijital hikaye oluşturma sürecine öğrencilerin etkin katılım göstermeleri, ders ve öğrenme içeriğini öğrenciler açısından daha ilgi çekici hale getirdiği vurgulanmaktadır (Karakoyun ve Erişti, 2011). Günümüz öğrencilerinin yalnızca düz metne dayalı içerikler yerine, dijital ortama taşınmış ve birden fazla duyu organını aynı anda harekete geçiren çoklu ortam materyallerini tercih ettikleri ifade edilmektedir (Yee ve Hargis, 2012).

Dijital hikayeler, hem bilgi aktaran bir kaynak, hem de etkili bir sunum aracı olarak; çoklu okuryazarlık becerileri yoluyla görme ve işitme süreçlerini etkinleştirerek görüntü, ses ve metin arasında bütünlük kurulmasını sağlamaktadır (Fries-Gaither, 2010; Ohler, 2005). Böylelikle, öğrencilerin görsel ve işitsel araçların kullanımına ilişkin farkındalık düzeylerinin gelişmesine de katkı sağlamaktadır (Borneman ve Gibson, 2011; More, 2008).

Matthews'e (2008) göre dijital hikayeler, öğrencilerin öğrenme sürecine etkin katılımını desteklemekle kalmayıp, aynı zamanda öğrencilerin öğrenmelerini yansıtmalarına imkan tanımaktadır. Dijital hikaye oluşturma süreci öğrenciler açısından değerlendirildiğinde; kendilerini keşfetmelerine olanak tanınması, teknolojiyi etkili biçimde kullanmalarını sağlanması, öğretim sürecine yönelik motivasyonu artırması, öğrenme deneyimlerini kişiselleştirilmesi ve öğrenme-öğretme sürecine ilişkin gereksinimlerin karşılanmasında öğrencinin aktif rol üstlenmesini sağlaması gibi çeşitli yararlar sunulmaktadır (Dinçer, 2019: 26).

Dijital Hikayeleştirme ve Moda Tasarımı

Çeşitli medya aracılığıyla gerçekleşen hikaye anlatımı, başkalarıyla sürekli bilgi alışverişi olan iletişim eyleminin bir türüdür. Moda tasarımı da kişinin kendi hikayesini kıyafet ve aksesuarlar aracılığıyla görsel olarak ilettiği bir iletişim aracıdır. Dijital bir ortamda büyüyen Z kuşağı da dahil olmak üzere sosyal

medya nesli, bir tüketici grubu olarak, metinden ziyade video platformlarındaki dijital hareketli görüntüler aracılığıyla iletişime daha aşınadır. Moda endüstrisinde, dijital teknolojinin gelişimi moda tasarımının temsil edilme biçimlerini çeşitlendirmektedir.

Tasarım alanında hikaye anlatımı, tüketicide duygusal etki yaratan tasarımlar geliştirmek ve satışa bağlanabilecek etkili bir tanıtım aracı olarak kullanılmaktadır. Moda tasarımı, film ve animasyon gibi alanlarla birlikte görsel hikaye anlatımına dahil olan bir alandır. Moda, bireyin kişiliğini ifade etmek için bir sembol rolü oynamaktadır, hikaye ise, benlik ile başkaları arasındaki dışsal ve görsel iletişime yardımcı olma rolünü üstlenmektedir.

Tasarımcı, görsel bir hikaye anlatıcısıdır ve görsel olarak iletişim kurmak istedikleri insanlarla duygusal bağ kurmak için hikaye anlatımının mantığını anlaması gerekmektedir. Tasarımcının, üretilen hikayeyi ‘iyi görünecek biçimde’ düzenleme becerisine sahip olması gerekmektedir. Yani hikaye anlatımını tasarım sürecine uygun biçimde harmanlayabilme yeteneği olmalıdır.

Son zamanlarda modayı da içeren tasarım alanlarında, hikaye oluşturup iletme yöntemi olan hikaye anlatımı, ‘senaryo yöntemi’ olarak sürece dahil edilmektedir. Tasarımda senaryo tekniğinin kullanılması, kullanıcının potansiyel ihtiyaçlarını merkeze alan kullanıcı odaklı tasarım geliştirme yöntemi olarak; hikayeye gerçeklik katar, karmaşık fikirleri kolayca çözer ve başka alanlardaki insanların tasarım fikirleri için görüş bildirmesine büyük yardım sağlayabilir (Kim Hyun-hwa, 2007).

Moda Tasarımında Tasarım Süreci ve Hikaye Anlatımı

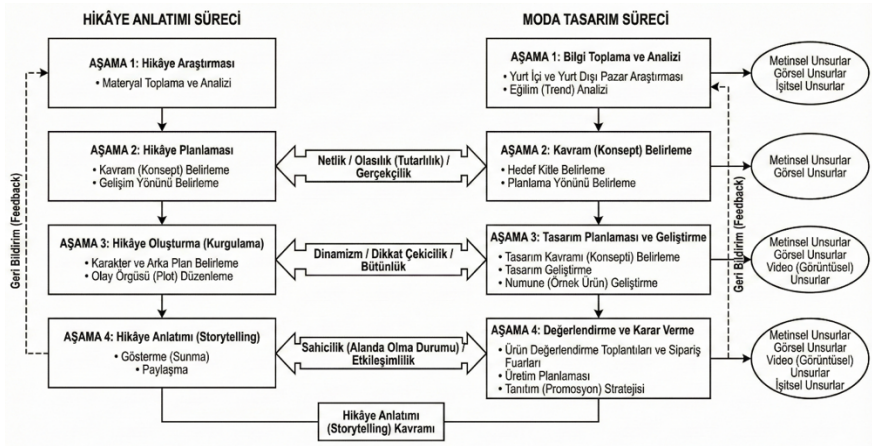
Tasarımda problem çözme sürecine tasarım süreci denilmektedir. Bu süreçte tasarımcılar araştırma ve deneyim yoluyla karmaşık sorunları çözmekte ve hikaye anlatımı tekniklerini dahil ederek daha yeni ve yaratıcı tasarımlar geliştirebilirler. Özellikle moda tasarımında hikaye anlatımı, tasarımcıların kendi değerlerini

tasarım süreci içinde kesin olarak oluşturmaları için etkili bir stratejidir.

Dijital moda hikaye anlatımının bir diğer yöntemi, anlatısal olmayan bir bağlantı yoluyla görüntü tabanlı hikaye anlatımıdır. Resimlerin güçlü bir anlatısallıkla oluşturulduğu yöntemin aksine, görüntü tabanlı hikaye anlatımı görüntünün kendisinin duyuşsal bağlantısını ifade eder. Bu yöntem, çeşitli konuları ve deneysel ifadeleri alışılmadık şekillerde mümkün kılar (Kim ve Suh, 2017). Görüntü tabanlı formattaki hikayeler, giriş-gelişme-dönüş-sonuç mantıksal bağlantısını takip etmez; bunun yerine, kelimelere dökülemeyen görsel ve işitsel unsurları kullanarak, grafikler ve dijital efektlerle dijital görüntüler kullanarak modayı ifade eder.

Hikaye anlatımı unsurları ve yapısı ile moda tasarım süreci arasındaki karşılıklı ilişki analiz edilerek, moda tasarımının sürecinin her aşamasının hikaye anlatımıyla nasıl örtüştüğünü ve bu süreçte hangi ortak unsurların birlikte kullanılabileceği ortaya konulmaktadır.

Şekil 4: Moda Tasarım Süreci ile Hikaye Anlatımı Arasındaki İlişki



Kaynak: (Sung ve Kwon, 2009: 216)

*Google Gemini Pro uygulaması aracılığıyla ile derlenmiştir.

Şekil 4’de, moda tasarım süreci ile hikaye anlatımı arasındaki yapısal ilişkiyi analiz ederek, moda tasarım sürecinde kullanılan hikaye anlatımı unsurlarını ve her aşamada gerekli olan özellikleri belirlenmektedir.

1. Aşama (Bilgi Toplama ve Analiz): Materyal toplama ve analizini içeren hikaye keşfiyle ortak özellikler taşımaktadır. Bu aşamada toplanan ve analiz edilen veriler, çevremizdeki her şeyi kapsamaktadır. Kitaplar, dergiler gibi yazılı materyallerin yanı sıra görsel ve işitsel materyaller de kullanılmaktadır. Tasarım sürecinde, fikir bulmak için sıklıkla görseller ve müzik de kullanılmaktadır. Bu aşamada, moda tasarım sürecinin ve hikaye anlatımının ortak unsurları olarak metinsel, görsel ve işitse unsurlar belirlenmektedir.
2. Aşama (Konsept Belirleme): Hikaye anlatımındaki, hikaye planlama aşamasına benzerdir. Burada konsept oluşturmayı, hedef kitle belirlenmesi ve buna uygun hikaye ve tasarım planının yönü belirlenmektedir. Bu aşamada, belgelenmiş bir planı ve hedef kitleyi belirlemek için metinsel ve görsel unsurların kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, oluşturulan konsept açıkça sunulmalıdır ve hedef kitle belirlemede hikaye ve tasarıma canlılık katacak gerçekçilik ve inandırıcılık duygusuna sahip olması gerekmektedir.
3. Aşama (Tasarım Planlama ve Geliştirme): Hikayenin anlatımıyla ilgili olan aşamadır. Hikaye anlatımında, karakterlerin ve arka planların oluşturulması, tasarım konseptinin oluşturulmasıyla aynı anlama gelmektedir. Tasarım konseptinin geliştirilmesi, geliştirilecek tasarımın temel formunun etrafında bir hikaye veya senaryo oluşturup zamansal ve mekansal bağlamı oluşturmayı içermektedir. Tasarım ve örnek geliştirme,

hikayenin evrimi veya olay örgüsünün kurgusu olarak yorumlanabilmektedir. Tasarım geliştirme, eskizler ve görüntü haritaları gibi görsel unsurları, gerekli durumlarda ise açıklama için metinsel unsurları içermektedir.

4. Bu aşama hem görsel hem de metinsel unsurları gerektirmektedir ve görsel ifade, tasarım konseptini etkili bir şekilde iletilmesi için önemli olmaktadır. Tasarımın ve hikaye anlatımının başarısı, hedef kitlenin dikkatini çekmek için kattığı dinamizm ve ilgiye bağlıdır. Sadece eğlence ve ilgiye odaklanmaktan kaçınmak için, oluşturulan konseptle süreklilik de göz önünde bulundurulmalıdır.
5. Aşama (Değerlendirme ve Karar): Sunum ve paylaşımı kapsayan hikaye anlatımı aşamasıdır. Fuarlar ve satış toplantıları, sunum için temsili yöntemlerdir ve bir ürünü hedef kitleye tanıtım stratejileri aracılığıyla tanıtmak ve değerlendirmek, paylaşım ile eş anlamlıdır. Bu aşama, başarılı bir moda hikaye anlatımı oluşturmak için hikaye anlatımının tüm metinsel, görsel, sinematik ve işitsel unsurlarını kullanmaktadır. Görsel unsurlar, tasarım geliştirme ve örnek geliştirme sürecinde tasarım konseptini geliştiren sanal arka planları ve görsel efektleri içermektedir. İşitsel unsurlar, özellikle fuarlarda ve satış toplantılarında ürün açıklamalarıyla ilgili olanlar, tanıtım stratejilerinin bir parçası olarak kullanılan müzik ve reklam sloganları, hedef tüketicilerin dikkatini anlamada ve çekmede çok önemli bir rol oynamaktadır. Sunum ve paylaşım, hikaye anlatımının temel hedefleridir ve özünü en iyi şekilde yansıtır. Bu süreç, tasarımcılar ve tüketiciler, yazarlar ve okuyucular arasında etkileşimi teşvik edilir; bu sayede tasarım ve

hikaye anlatımı değerlendirilir ve karara bağlanır. Daha önce de belirtildiği gibi, hikaye anlatımının en önemli özelliklerinden biri etkileşimdir. Bu, ürünün tanıtıldığı veya anlatıldığı yerde bulunmayı ve etkileşimi en üst düzeye çıkarmayı içermektedir (Sung ve Kwon, 2009: 216-217).

Bu moda hikaye anlatımı yöntemi; fotoğraflar veya moda şovları gibi mevcut moda medyası aracılığıyla iletilemeyen bir hikayeyi zenginleştirebilen, hikayesel bir giriş, ardından hikayenin gelişimi, dönüşü ve sonucu ile temsil edilmektedir (Soloaga ve Guerrero, 2016).

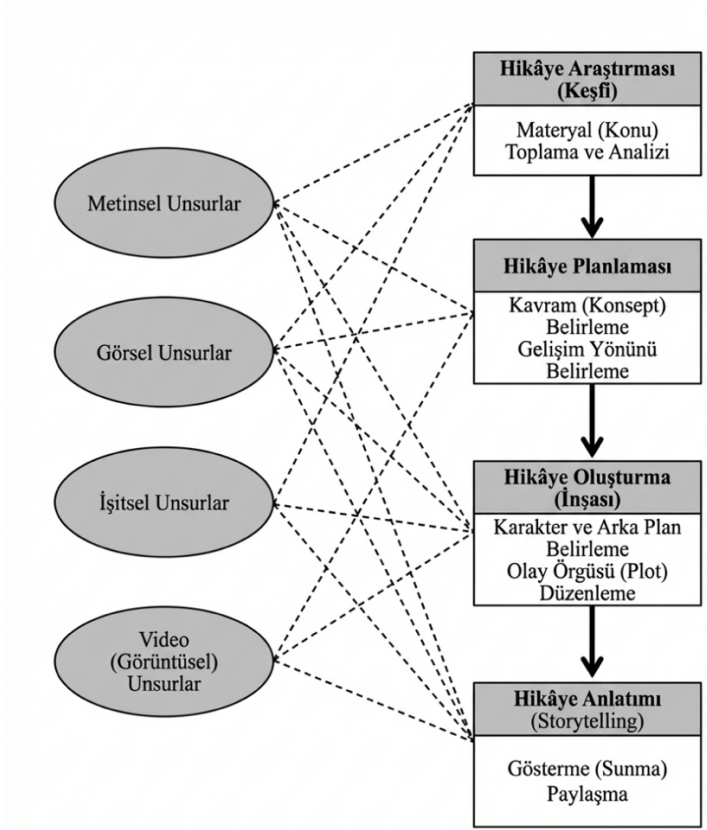
Dijital moda hikaye anlatımı, anlatısal olmayan bir bağlantı yoluyla görüntü tabanlı hikaye anlatımıdır. Resimlerin güçlü bir anlatısallıkla oluşturulduğu yöntemin aksine, görüntü tabanlı hikaye anlatımı görüntünün kendisinin duysal bağlantısını ifade etmektedir. Bu yöntem, çeşitli konuları ve deneysel ifadeleri alışılmadık şekillerde mümkün kılmaktadır (Kim ve Suh, 2017). Görüntü tabanlı formattaki hikayeler, giriş-gelişme-dönüş-sonuç mantıksal bağlantısını takip etmez; bunun yerine, kelimelere dökülemeyen görsel ve işitsel unsurları kullanarak, grafikler ve dijital efektlerle dijital görüntüler kullanarak modayı ifade etmektedir.

Moda tasarımında Dijital Hikayeleştirmenin Unsurları ve Yapısı

Sung ve Kwon (2009)'da, hikaye anlatıcılığı unsurları olarak metinsel, görsel, işitsel ve görüntüsel (video) olmak üzere dört unsur olarak; hikaye anlatıcılığının yapısını ise hikayenin araştırılması, hikayenin planlanması, hikayenin oluşturulması ve hikaye anlatımı olmak üzere dört aşama tanımlamıştır. Şekil 5'deki çizgiler, unsurların (metinsel, görsel, işitsel ve görüntüsel) sadece nihai bir ürünün parçası olmadığını; aynı zamanda hikayenin araştırılması,

planlanması, oluşturulması ve anlatımı sırasında aktif olarak kullanıldığını göstermektedir.

Şekil 5: Hikaye Unsurları ve Yapısı



Kaynak: (Sung ve Kwon, 2009: 213).

**Google Gemini Pro uygulaması aracılığıyla ile derlenmiştir.*

Şekil 5’de sol tarafta bulunan dört unsurun üstlendiği işlevler şu şekildedir; metinsel unsur, anlatının temel anlam örgüsünü kurarak ve içerik bütünlüğünü sağlayarak sürecin tüm aşamalarına kapsamaktadır. Görsel unsur, özellikle karakterlerin, mekanın ve arka planın güçlendirerek anlatının somutlaştırılmasında belirleyici rol oynamaktadır. İşitsel unsur, anlatımın anlaşılabilirliğini ve akıcılığını desteklerken ses, tonlama ve müzik gibi bileşenler aracılığıyla

duygusal etkiyi artırmaktadır. Görüntüsel (video) unsur ise sanal zaman–mekan kurgusunun inşası, dijital ortamın sunduğu olanakların kullanımı ve özel efektlerle anlatının deneyimsel boyutunun zenginleştirilmesiyle ilişkili olmaktadır.

Şekil 5’de sağ tarafta bulunan dört unsur ise işlevi şu şekildedir; *hikayenin araştırılması*, sürecin başlangıç noktasıdır. Bu aşamada önemli nokta, materyalin sistematik bir biçimde toplanması ve analizinin yapılmasıdır. Hikayenin bu süreçte hammaddesi bulunur. *Hikayenin planlanması*, toplanan materyallerin bir çerçeve konulduğu aşamadır. Bu aşamada iki önemli karar alınır:

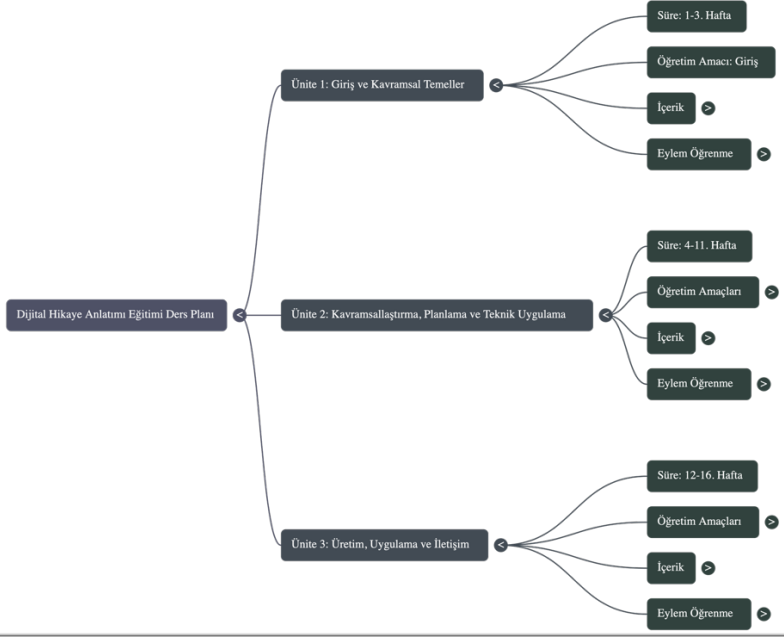
- Kavram belirleme: hikayenin özünün, ana fikrinin ve temanın tanımlanmasıdır.
- Gelişim yönünü belirleme: hikayenin nasıl ilerleyeceği ve hangi hedefe doğru ilerleyeceğinin kurgulanmasıdır.

Hikayenin oluşturulması, hikayenin önceden ayrıntılandırılan olay örgüsünün yapılandırılma/üretim sürecidir. Hikaye de olay örgüsüne ek olarak ise karakterlerin ve arka planın belirlenmesi yapılarak hikaye somutlaştırılmaktadır. *Hikayenin anlatımı*, sürecin nihai amacı olan sunumun ve aktarımının yapılmasıdır. Diğer aşamalarda geliştirilen hikaye bu aşamada ise göstererek ve paylaşma yaparak hedef kitleye iletilir.

Dijital hikaye anlatımı, hikayelerin dijital medya tarafından yaratıldığı ve iletildiği yoldur. Dijital hikaye anlatımı kavramı, hem moda duyarlılığı hem de dijital medya bilgisi gerektiren günümüz moda iletişim ortamında, moda videoları aracılığıyla anlama ve eğitim için temel sağlar. Dijital moda hikaye anlatımı yöntemiyle oluşturulan dijital moda filmi, biçimsel olarak dijitalleştirilmiş hareketli görüntülere ve içerik olarak dijitalleştirilmiş hikaye anlatımına dayanır. Moda sunumlarındaki dijital hareketli görüntüler, filmdeki hareket ve devinimlerin anlaşılmasının yanı sıra çok taraflı, üç boyutlu ve duygusal bir ifade yeteneği gerektirir. Bu

nedenle, geleneksel moda medyasının düz (flat) aktarım yönteminden farklı bir yaklaşıma ihtiyaç bulunmaktadır.

Şekil 6: Dijital Hikaye Anlatımı Ders Planı-1



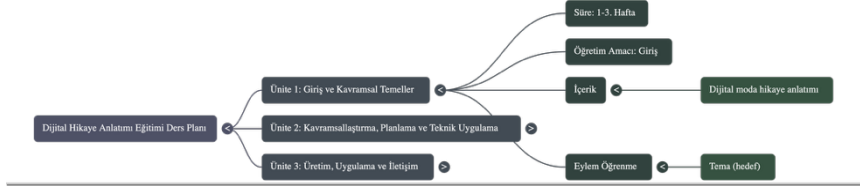
Kaynak: (Kim, 2022: 335)

* Google Notebook Al uygulaması aracılığıyla ile derlenmiştir.

Kim (2022)'de moda öğrencileri için hazırlanan dijital hikaye anlatımı eğitimi ders planı, toplam 16 haftalık bir süreci kapsamaktadır ve üç ana üniteye ayrılarak yapılandırılmaktadır. Bu ders planı, öğrencileri için teorik bir girişten başlatılıp, teknik yetkinlik kazandırmaya ve nihayetinde bir ürün ortaya koymaya yönlendiren aşamalı bir yol haritası sunmaktadır. Ders planının hedefleri ise şu şekildedir;

- Dijital moda hikaye anlatımı kavramını anlamak,
- Moda filmi yapım yöntemlerini öğrenmek ve bunları kullanma yeteneğini geliştirmektir.

Şekil 7: Dijital Hikaye Anlatımı Ders Planı-2

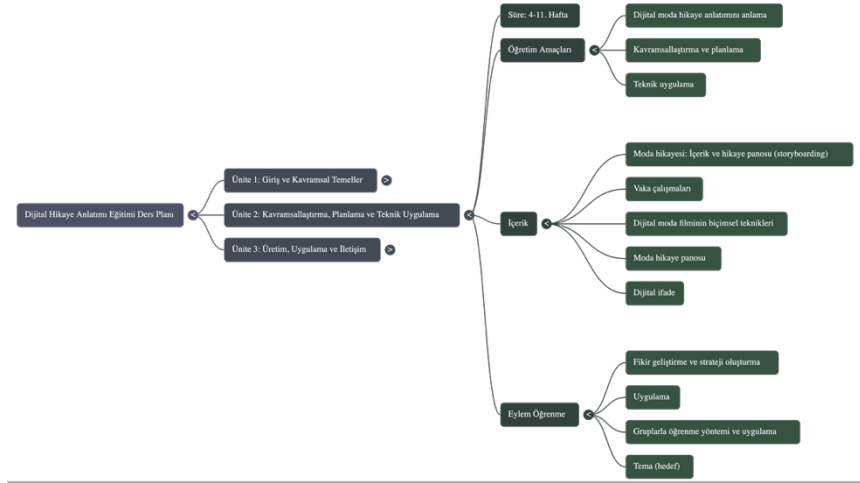


Kaynak: (Kim, 2022: 335)

* Google Notebook AI uygulaması aracılığıyla ile derlenmiştir.

İlk üç hafta boyunca, ünite 1'de keşfedilen moda alanlarındaki dijital hikaye anlatımı ve film yapımı kavramları açıklanmaktadır.

Şekil 8: Dijital Hikaye Anlatımı Ders Planı-3



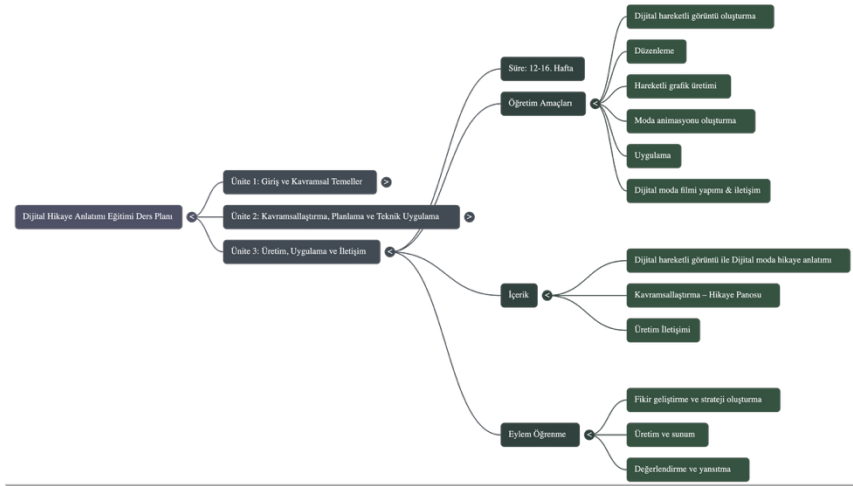
Kaynak: (Kim, 2022: 335)

* Google Notebook AI uygulaması aracılığıyla ile derlenmiştir.

Ünite 2, bu eğitim en uzun ve teknik açıdan en yoğun bölümüdür. Bu ünite de, 'kavramsallaştırma ve planlama' ve 'teknik uygulama' hedeflerine odaklanmaktadır. Sekiz hafta boyunca, ünite 2'de açıklanan ilgili dijital görüntü üretim programının ana fonksiyonları açıklanmıştır. Hareketli görüntüler, video üretimi,

hareketli grafikler eğitimiyle ilgili önceki çalışmalara ilişkin kavramlara dayanmaktadır (Choi, 2010; Choi, 2013; Park, 2019). Öğrenciler, dijital hareketli görüntü üretim programları olarak Premiere Pro ve After Effects'in fonksiyonlarını öğrenmektedir ve dijital hareketli görüntü oluşturma, düzenleme, hareketli grafik üretimi, moda animasyonu oluşturma gibi dinamik görüntüler aracılığıyla modayı nasıl ifade edeceklerini keşfetmektedirler.

Şekil 9: Dijital Hikaye Anlatımı Ders Planı-4



Kaynak: (Kim, 2022: 335)

* Google Notebook Al uygulaması aracılığıyla ile derlenmiştir.

Son beş hafta ise, ünite 3’de bulunan hikayenin ‘uygulama’ ve ‘dijital moda hikaye yapımı’ aşamasıdır. Süreç, konseptin ve hikayenin oluşturup akışının tamamlanması ve uygulama/sunma kısmına dönüşmesini kapsamaktadır (Kim, 2022: 336).

Moda Tasarım Süreçlerinde Dijital Hikayeleştirmenin Kullanımı

Dijital hikayeleştirme, moda tasarımı süreçlerinde yalnızca estetik sunum aracı olmamaktadır. Araştırma, kavramsallaştırma, tasarım geliştirme, üretim ve iletişim aşamalarını bütüncül biçimde

destekleyen stratejik bir yöntem olarak kullanılabilecek bir yol olarak düşünülmektedir.

1. *Kavramsal Hikayeleştirme*: Tasarım fikrinin arka planını, duygusal ve kültürel bağlamını görünür hale getirmeyi sağlamaktadır. Dijital moodboard'lar, kavram anlatımını destekleyen moda filmleri, dijital eskiz defterleri kullanılarak yapılabilmektedir. Bu uygulamalar tasarım öğrencilerinde kavramsal tutarlılık ve soyut düşünme becerisini geliştirmektedir. Bir koleksiyon temasının farklı tarihsel dönemlere ait görseller, kayıt ve dokümanlar hatta edebi anlatılarla birlikte dijital bir hikaye haline getirilmesi koleksiyonun duygusal anlatısını oluştururken tasarımcı ya da tasarımcı adaylarında temanın içselleştirilmesini destekleyecektir.

2. *Süreç Odaklı Hikayeleştirme*: Tasarımın 'nasıl' oluştuğunu belgeleme süreçlerinde etkili olarak kullanımı mümkün olmaktadır. Zaman çizelgesi anlatımı, süreç vlogları, hızlandırılmış üretim videoları oluşturarak gerçekleştirilebilmektedir. Tasarım ve ürünlerdeki süreç şeffaflığı, zanaatkarlık uygulamalarının görünürlüğü ve değerlerin kayıtlı olmasını sağlamak ve yavaş moda süreçlerinin anlatılarını oluşturmak için etkili olduğu düşünülmektedir.

3. *Kullanıcı / Hedef Kitle Odaklı Hikayeleştirme*: Tasarımın kullanıcıyla kurduğu ilişkiyi anlatmak amacıyla kullanıcıların duyguları, mekanları, ritüelleri hikaye formatında sunulurken yapılandırılmasıdır. Persona temelli dijital anlatılar, sosyal medya için mikro hikayeler, kişisel stil seçimine yönelik etkileşimli senaryolar oluşturularak kullanılabilmektedir. Tasarım düşüncesi ve deneyim tasarımıyla benzeşik yaklaşımlar içermektedir. Bir kapsül koleksiyonun giyilme hikayesi ile; günlük yaşam senaryoları oluşturulabilir.

4. *Malzeme ve Teknik Odaklı Hikayeleştirme*: Kumaş, teknik ve üretim bilgisini soyut olmaktan çıkarıp anlatıya dönüştürülmesi

amacıyla kullanılmaktadır. 3D kumaş ve yardımcı malzeme simülasyonları, yüzey manipülasyonları ve tasarımlarına yönelik kısmi animasyonlar, artırılmış gerçeklik destekli malzeme incelemeleri, farklı teknolojilerin üretim sürecine etkilerinin gösterimleri yoluyla kullanım potansiyeli bulunmaktadır. Bir desen oluşumunun boyahane süreçleri ve dijital baskı gibi farklı yollarla anlatımını içeren bir hikaye yapılandırılabilir.

Bu yaklaşımla oluşturulacak süreçler teknik bilginin anlatısal öğrenme yoluyla içselleştirilmesine katkı sağlayacaktır.

5. *Sürdürülebilirlik ve Etik Hikayeleştirme:* Tasarımın çevresel ve sosyal etkisini farkedilir hale getirmek için kullanılmaktadır. Üretim zinciri hikayeleri ve QR kod ile erişilen dijital anlatılar aracılığıyla ürün yaşam hikayelerinin anlaşılması sağlanabilmektedir. Böylece bir ürün etiketi okutulduğunda; hammaddenin kaynağı, üreticinin hikayesi, karbon ayak izi bilgisi, çok katmanlı bir dijital hikaye olarak yapılandırılabilir. Lüks ve uluslararası markalarda şeffaflık temelli anlatılara yönelik örnekler mevcuttur.

6. *Transmedya Hikayeleştirme:* Aynı tasarım hikayesini farklı dijital platformlarda farklı biçimlerde anlatmanın amaçlandığı ve uygulamaların bu şekilde çoklu gerçekleştirildiği yaklaşımlara işaret etmektedir. Bir koleksiyonun; ihamı Instagram’da, üretimi YouTube’da, dijital defilesi metaverse ortamında birlikte kurgulanabilmektedir. Bu yaklaşımla aynı koleksiyonun farklı mecralarda benzer vurgularla yer alması hedef kitleyi kapsayıcılık ve mesajın içselleştirilmesi bakımından daha etkili sonuçlar beklenmektedir.

7. *Moda Tasarımı Öğretiminde Dijital Hikayeleştirme:* Öğrenciden ‘koleksiyon hikaye dosyası’ istenmesi, dijital portfolyonun anlatı temelli değerlendirilmesi ve grup çalışmalarında ortak hikaye evreni oluşturma uygulamalarında kullanılabilir

nitelikte olmaktadır. Kullanımı sonucunda öğrencilerde; eleştirel düşünme, yaratıcı anlatım, dijital okuryazarlık, tasarım gerekçelendirme becerilerinin gelişmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

Moda tasarımı dijital hikayeleştirme, tasarımı nesneden deneyime, üründen anlatıya ve koleksiyondan kültürel metne dönüştüren stratejik bir yaklaşım olarak kullanılabilir potansiyelindedir.

Sonuç

Bu çalışmada, geleneksel hikaye anlatıcılığının teknolojik gelişmelerin ortaya çıkardığı dijital hikayeleştirme kavramı ve bu kavramın moda tasarımı süreçleriyle olan ilişkisi incelenmiştir. Dijital hikayeleştirmenin sadece bir sunum tekniği olmadığı, aynı zamanda tasarım düşüncesini yapılandıran, süreci belirleyen ve kullanıcı ile duygusal bağ kuran çok katmanlı bir iletişim ve öğrenme aracı olduğunu ortaya çıkmaktadır.

Moda tasarımı alanındaki çalışmalar incelendiğinde, tasarım süreci ile hikaye anlatımı süreci arasında benzerlikler bulunmaktadır. Tasarımcı, aslında görsel bir hikaye anlatıcısı olarak konumlanmaktadır; koleksiyonun teması, malzemesi ve üretim süreci, dijital araçlar (video, animasyon, ses) aracılığıyla bütüncül bir anlatıya dönüşmektedir.

Dijital hikayeleştirme moda tasarımı süreçlerinde nesneyi deneyime, ürünü ise kültürel bir metne dönüştüren güçlü bir metodoloji olmaktadır. Bu yöntemin eğitim müfredatlarına entegre edilmesi, tasarım öğrencilerinin eleştirel düşünme, dijital okuryazarlık ve yaratıcı anlatım becerilerini geliştirmelerine katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

- Barrett, H. (2005). *esearching And Evaluating Digital Storytelling As A Deep Learning Tool*. [Http://Electronicportfolios.Org/Portfolios/Sitestorytelling2006.Pdf](http://Electronicportfolios.Org/Portfolios/Sitestorytelling2006.Pdf) adresinden alındı.
- Barrett, H. (2024). *How To Create Simple Digital Stories*. [Http://Electronicportfolios.Com/Digistory/Howto.Html](http://Electronicportfolios.Com/Digistory/Howto.Html) adresinden alındı.
- Borneman, D. a. (2011). Digital Storytelling: Meeting Standards Across The Curriculum in A Wwı/Holocaust Unit. *School Library Monthly*, 27(7), 16-17.
- Brennan, D. S., Jakes, D.S. (2005). *Digital Storytelling, Visual Literacy and 21st Century Skills*. Aralık 2025 tarihinde <https://d20digitalstorytelling.pbworks.com/f/storytelling+and+visual+literacy.pdf> adresinden alındı.
- Bumgarner, B. L. (2012). *Digital Storytelling in Writing: A Case Study oOf Student Teacher Attitude Toward Teaching With Technology* (Doktora Tezi). Missouri University.
- Ciğerci, F. M. (2015). *İlkokul Dördüncü Sınıf Türkçe Dersinde Dinleme Becerilerinin Geliştirilmesinde Dijital Hikayelerinin Kullanılması* (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Anadolu Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Choi, B. (2010). A study of basic motion graphic design curriculum. *Journal of Digital Design*, 10(3), 23-32.
- Choi, B. (2013). A case study on designing a short-film making class for the basis of moving image design curriculum. *Journal of Integrated Design Research*, 12(4), 77-89.

- Daigle, B. (2008). *Digital storytelling as a literacy-based intervention for a sixth grade student with Autism Spectrum Disorder: an exploratory case study* (Yüksek Lisans Tezi). Louisiana State University.
- Demirel, V. (2013). *İlköğretimde e-Öyküleme Kullanımı ve Etkileri* (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Dinçer, B. (2019). *Dijital Hikaye Temelli Matematik Öğretiminin Ortaokul Öğrencilerinin Kavram Öğrenme Üzerine Etkileri* (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Doğan, B. (2012). Educational Uses of Digital Storytelling In K-12: Research Results of Digital Storytelling Contest (Distco) 2012.
- Fries-Gaither, J. (2010). Digital Storytelling Supports Writing Across Content Areas. *Ohio Journal of English Language Arts*, 9-13.
- Garrety, M. C. (2008). *Digital storytelling: An emerging tool for student and teacher learning* (Doktora Tezi). Iowa State University.
- Greenidge, W.-I., & Sylvester, R. (2009). Digital Storytelling: Extending the Potential for Struggling Writers. *The Reading Teacher*, 63(4), 284-295.
- Guajardo, M. M. (2013). Virtually Speaking: How Digital Storytelling Can Facilitate Organizational Learning. *Journal of Community Positive Practices*, 80-91.

- Hubbell, N. (2011). *Digital Storytelling and Study Abroad: The Impact of a Narrative-Digital Storytelling and Study Abroad: The Impact of a Narrative-Based, Reflective Practice upon Identity Construction* (Yüksek Lisans Tezi). University of Denver.
- Kajder, G. B. (2004). Digital Storytelling in the Language Arts Classroom. *Learning & Leading with Technology*, 32(4), 46-49.
- Kearney, M. (2011). A learning design for student-generated digital storytelling. *Learning & Leading with Technology*, 36(2), 169-188.
- Kevin Yee and Jace Hargis. (2012). Digital Storytelling: Kizoa, Animoto, and Photo Story 3. *Turkish Online Journal of Distance Education-TOJDE*, 13(1), 12-14.
- Kieler, L. (2010). Trials in Using Digital Storytelling Lynda Kieler Effectively With the Gifted. 33(3), 48-52.
- Kim, S. (2022). Effect of action learning on digital storytelling education for fashion students. *International Journal Of Fashion Design, Technology and Education*, 15(3), 331-341.
- Kim, J., Suh, S. (2017). A Study on Characteristics of Story-Telling by Fashion Film Categorization. *Journal Of Fashion Business*, 21(4), 1-20.
- Kwon, Y.-J. S.-Y. (2009). A Study on Establishing Relationship Between Fashion Design Process and Storytelling. *J. Kor. Soc. Cloth. Ind.*, 11(2), 210-218.
- Lambert, J. (2002). *Digital Storytelling: Capturing Lives, Creating Community*. Berkeley: Center For Digital Storytelling.

- Lambert, J. (2010). *The digital storytelling cookbook*. Berkeley: Californiya: Digital Diner Press.
- Matthews, G. (2008). *Digital Storytelling Tips And Resources*. Boston: Simmons College.
- Morra, S. (2013). *8 Steps To Great Digital Storytelling*. Aralık 2025 tarihinde <https://samanthamorra.com/2013/06/05/edudemic-article-on-digital-storytelling/> adresinden alındı.
- More, C. (2008). Digital Stories Targeting Social Skills For Children With Disabilities: Multidimensional Learning. *Intervention In School And Clinic*, 43(3), 168-177.
- Ohler, J. (2006). The world of digital storytelling. *Educational leadership*, 63(4), 44-47.
- Ohler, J. (2013). *Digital Storytelling in The Classroom. New Media Pathways To Literacy, Learning, And Creativity*. Sage Publications.
- Olur, B. (2021). *Sosyal Bilgiler Dersinde Dijital Hikaye Kullanımı: Öğrencilerin Yeterlik ve Değerlerinin İncelenmesi* (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Park, B. (2009). Education of media by production of image contents: Focusing on non-linear editing. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 23(9), 1096-1103.
- Pierotti, K.E. (2006). *Digital storytelling: An application of vichian theory* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Brigham Young Universitesi, İngiltere.

- Robin, B. R. (2008). Digital Storytelling: A Powerful Technology Tool for the 21st Century Classroom. *Taylor & Francis*, 47(3), 220-228.
- Rossiter, M., Garcia, P. A. (2010). Digital storytelling: A new player on the narrative field. *New Directions for Adult and Continuing Education*, 37-48.
- Sadik, A. (2008). Digital Storytelling: A Meaningful Technology-Integrated Approach for Engaged Student Learning. *Springer*, 56(4), 487-506.
- Satterfield, B. (2007). Eight Tips for Telling Your Story Digitally. Aralık 2025 tarihinde <https://psdtech.pbworks.com/f/Eight+Tips+for+Telling+Your+Story+Digitally.pdf> adresinden alındı.
- Thomas, R. G. (2012). Digital Narrative and the Humanities: An Evaluation of the Use of Digital Storytelling in an Australian Undergraduate Literary Studies Program. *Higher Education Studies*, 2(3), 30-43.
- Wake, D. G., Modla, V. B. (2010). Language Experience Stories Gone Digital: Using Digital Stories With The Lea Approach. *Mentoring Literacy Professionals: Continuing The Spirit Of Cra/Aler After*, 253-274.
- Ya-Ting C. Yang, W.-C. I. (2012). Digital storytelling for enhancing student academic achievement, critical thinking, and learning motivation: A year-long experimental study. *Computers & Education*, 339-352.
- Yamaç, A. (2015). *İlkokul Üçüncü Sınıf Öğrencilerinin Yazma Becerilerinin Gelişiminde Dijital Hikayelerin Etkisi* (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

BÖLÜM 7

ARTIFICIAL INTELLIGENCE–DRIVEN SUSTAINABILITY: IMPACTS ON CONSUMER BEHAVIOR AND THE FASHION/TEXTILE INDUSTRY

1. SELMA BULUT¹

2. BEYZA BUZOL MÜLAYİM²

Introduction

In line with the Sustainable Development Goals, the transformation of individual consumption practices has become a priority area for both public policy and business strategies. Sustainable consumer behavior refers to individuals' consideration of environmental impacts, social responsibility criteria, and ethical production standards when making product choices (Young et al., 2010). Traditional models of consumer behavior assume that purchasing decisions are primarily driven by economic benefits,

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojisi Bölümü, Orcid: 0000-0002-6559-7704

² Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, Orcid: 0000-0001-5224-3934

perceived quality, and individual needs, while environmental sensitivity is often positioned as a secondary or complementary motivation. However, the proliferation of artificial intelligence (AI) technologies has placed sustainability-related information at the center of consumer experience, thereby elevating the significance of environmental criteria in purchasing decisions and enabling them to become a primary factor in consumer choice.

AI technologies contribute to the advancement of sustainable consumer behavior through three key functions. First, via big data analytics, large-scale consumer interaction data (such as purchase history, online browsing patterns, and demographic profiles) are systematically processed to generate detailed insights into consumer tendencies toward sustainable products. Second, recommendation systems leverage these insights to present personalized product alternatives, making sustainable options a more visible component of the shopping process. Third, interactive information tools—such as chatbots, digital labeling solutions, and carbon footprint calculators—provide consumers with real-time, concrete information about the environmental impacts of products, thereby facilitating the integration of environmental awareness into purchasing decisions. The cumulative effect of these components allows sustainability criteria to move from being a secondary motivation to becoming a central and decisive element in consumer decision-making (Goyal et al., 2022).

One of the most significant components of AI-supported sustainable consumer behavior initiatives is personalized recommendation systems. These systems analyze consumers' past purchasing data, online browsing behaviors, and demographic information to prioritize products that meet sustainability criteria (Zhang et al., 2020; Jain & Kumar, 2021). For example, when a user shows a preference for low-carbon textile products, algorithms suggest similar items, thereby enhancing the visibility of sustainable

alternatives. This approach has been shown to increase the adoption of eco-friendly products, particularly among younger consumer segments (Jain & Kumar, 2021; Goyal et al., 2022).

Another critical application of artificial intelligence (AI) in fostering sustainable consumer behavior is supply chain transparency. The fashion and textile industries, in particular, are frequently criticized for their high carbon footprint, excessive water consumption, and use of toxic chemicals (Ellen MacArthur Foundation, 2017; Niinimäki, 2020). Stella McCartney serves as a pioneering example of integrating supply chain transparency into its core sustainability strategies. The brand employs AI-powered solutions that collect and analyze environmental impact data across its production chain via digital platforms and communicates these findings to consumers through product labeling and online channels. Such a transparency-driven approach enables consumers to make informed evaluations of sustainable alternatives while reinforcing ethics and environmental consciousness as decisive motivations in purchasing behavior. Consequently, supply chain traceability is recognized as a critical tool for strengthening sustainable consumer behavior. The complexity and global scope of production processes in these industries often restrict the traceability of supply chains and limit consumers' access to information about the environmental and social impacts of products. In this context, AI-based systems—integrated with blockchain technologies—facilitate real-time monitoring of all stages from raw material sourcing to final product retail. Blockchain-enabled platforms document product origins, energy sources, logistics processes, and carbon footprints with a high degree of verifiability, thereby reducing information asymmetry (Goyal et al., 2022).

Another crucial element in the development of sustainable consumption behavior is the use of digital applications aimed at consumer education and awareness-raising. Through AI-based

chatbots, interactive mobile platforms, and virtual assistants, consumers can access real-time information regarding products' carbon footprints, water consumption, and social impacts (Goyal et al., 2022). These information systems help consumers evaluate sustainable product alternatives more consciously, transforming sustainability from an abstract value into a tangible criterion within the decision-making process. For instance, Levi's communicates its Water<Less® technology—implemented in denim production to achieve up to 68% water savings—through online information systems, thereby positioning sustainability knowledge at the core of its strategic communication approach (Levi's, 2020). Such applications enable sustainability to transcend being merely a marketing-driven discourse, instead reshaping consumer purchase motivations around environmental and social responsibility.

AI also supports sustainable consumer behavior through gamification strategies. Drawing inspiration from behavioral economics theories, these applications reward users for making sustainable choices and enhance motivation through badge and point systems (Hamari et al., 2014; White et al., 2019). For example, a brand may develop AI-powered loyalty programs that award points to consumers who purchase low-carbon products. Such systems reinforce sustainable behavior by linking it to a sense of social impact and personal benefit.

However, alongside its contributions to promoting sustainable consumer behavior, AI also entails certain risks. First, the datasets used in recommendation systems may contain biases (Goyal et al., 2022; Mehrotra et al., 2021). Such biases can restrict access to sustainable products for particular demographic groups or lead to differentiated pricing strategies. For instance, low-income user profiles may be less frequently exposed to higher-priced sustainable alternatives by algorithms, thereby raising issues of equity in sustainable consumption behavior.

Another major challenge concerns the energy consumption and carbon footprint of AI systems. Deep learning algorithms, in particular, require significant amounts of electricity in large-scale data centers (Goyal et al., 2022). As a result, AI solutions designed to advance sustainability can themselves become contributors to carbon emissions. Consequently, the concept of “green artificial intelligence” has gained prominence in academic literature, emphasizing the need to improve the energy efficiency of data centers (Schwartz et al., 2020).

An effective AI strategy should be grounded in three core principles: transparency, ethical data use, and inclusivity. Transparency ensures that consumers understand the logic underlying recommendation systems. Ethical data use requires that user data be collected and processed on the basis of explicit consent. Inclusivity entails designing algorithms that are adaptable to diverse income levels, age groups, and cultural contexts (Floridi & Cowls, 2019; Jobin et al., 2019).

In conclusion, artificial intelligence technologies represent a powerful lever with the potential to transform sustainable consumer behavior. From personalized recommendation systems to supply chain traceability, and from gamification to educational platforms, a wide array of applications facilitates the diffusion of environmentally friendly habits. Yet, this transformation can only be sustained if the technology is designed not solely for efficiency and benefit, but also with ethical safeguards, transparency, and energy efficiency at its core. The responsible deployment of these technologies will not only strengthen consumer trust but also make a tangible contribution to the achievement of sustainable development goals.

1. Conceptual Framework of Sustainable Consumer Behavior

Global economic fluctuations, the energy crisis, and climate change are increasingly transforming consumption habits. Within this context, consumer education enables individuals to develop a more conscious, responsible, and resource-efficient approach to meeting their needs. This approach forms the foundation of sustainable consumer behavior. Sustainable consumer behavior is not limited to the fulfillment of individual requirements; it also encompasses the reduction of environmental impacts, the support of ethical production processes, and the protection of the rights of future generations. Therefore, consumer education makes a direct contribution to the development of sustainable consumer behaviors by raising awareness against external factors that drive individuals toward irresponsible consumption (Hayta, 2009).

Today, consumption practices extend beyond the fulfillment of individual needs, encompassing a multidimensional sphere with environmental, social, and economic implications. In particular, climate change, the rapid depletion of natural resources, and the intensification of environmental crises have made it necessary to re-evaluate consumption behaviors from a sustainability perspective (Jackson, 2005). Within this context, sustainable consumer behavior has emerged as a research domain of growing importance in modern societies, attracting attention from both individuals and institutions.

In its simplest sense, sustainable consumer behavior refers to consumers making product and service choices not only based on personal benefit but also by taking into account their social and environmental consequences (Young et al., 2010). In doing so, the

individual transcends self-interest in decision-making and considers the needs of future generations.

Sustainable consumer behavior is a multidimensional concept informed by various disciplines. Economics, psychology, sociology, marketing, and environmental sciences collectively provide its theoretical foundations.

The Theory of Planned Behavior (Ajzen, 1991) posits that pro-environmental actions are influenced by individuals' attitudes, social norms, and perceived behavioral control. For example, when a consumer considers purchasing organic food, the decision is shaped not only by personal attitudes but also by the expectations of their social environment and their perceived availability of resources.

The Value–Belief–Norm Model (Stern, 2000) emphasizes that environmental values and norms form the foundation of sustainable behaviors. According to this model, individuals who hold strong ecological values are more likely to develop attitudes that directly shape their pro-environmental actions.

In addition, the social identity approach highlights how individuals' consumption behaviors are shaped by social affiliation and group norms (Sharma & Jha, 2017). For instance, an individual living within an environmentally conscious community may incorporate sustainable practices as an integral part of their identity.

In the literature, sustainable consumer behavior is generally examined across three dimensions: environmental, social, and economic (White, Habib, & Hardisty, 2019).

Environmental Dimension: This dimension focuses on the preservation of natural resources, waste reduction, and energy

efficiency. Recycling practices, avoiding single-use products, and choosing eco-friendly alternatives are illustrative examples.

Social Dimension: This refers to the alignment of consumer behavior with principles of justice, ethics, and social responsibility. Choosing fair-trade products and supporting brands that do not rely on child labor are particularly emphasized in this context.

Economic Dimension: Sustainable consumption is significant not only for environmental and social well-being but also for long-term economic benefits. This includes consumers opting for durable products, supporting local producers, and developing awareness against overconsumption.

These three dimensions intersect in consumers' sustainable choices, offering a holistic perspective. Nevertheless, several barriers hinder the widespread adoption of sustainable consumer behavior. Among the most prominent is the well-documented attitude–behavior gap (Vermeir & Verbeke, 2006). Although consumers often express positive attitudes toward sustainability, these do not always translate into actual purchasing behavior. The key reasons identified in the literature include:

Price sensitivity: Sustainable products are often perceived as more expensive.

Lack of information: Consumers may not have sufficient knowledge about the benefits of sustainable products.

Power of habits: Traditional consumption patterns tend to resist change.

Trust issues: The prevalence of “greenwashing” strategies by some brands undermines consumer confidence.

These barriers demonstrate that consumer behavior is shaped not only by individual choices but also by structural and cultural factors. Digital transformation and artificial intelligence applications

offer new opportunities for promoting sustainable consumer behaviors. Eco-friendly mobile applications, carbon footprint calculators, sustainable shopping recommendations, and smart labeling systems support consumers in making more informed and conscious decisions (White et al., 2019).

Moreover, social media serves as a significant tool in raising sustainability awareness. Younger generations, in particular, create peer influence by sharing sustainable lifestyles on digital platforms, thereby contributing to the transformation of consumption practices.

Sustainable consumer behavior is not limited to individuals' ethical choices; rather, it represents a holistic approach encompassing environmental, social, and economic dimensions. Therefore, the widespread adoption of sustainable consumption practices requires not only individual engagement but also the active involvement of businesses, policymakers, and civil society organizations.

A study examining the impact of individuals' lifestyles on sustainable consumption behaviors revealed that lifestyle and sustainable consumption patterns vary significantly according to gender, age, education, income, and occupation, while marital status was found to influence only lifestyle. Furthermore, among the sub-dimensions of lifestyle, healthy eating and consciousness were positively associated with environmentally sensitive behavior; communication and positivity, spiritual development, and healthy eating were positively related to saving behavior; and consciousness was positively linked to reusability behavior. By contrast, no significant relationship was found between lifestyle and non-essential purchasing behavior (Karaca, 2018). A more recent study conducted in 2022 emphasized that the production and consumption paradigm accelerated by the Industrial Revolution has led to the depletion of natural resources and the intensification of environmental problems. The study highlighted the importance of

the United Nations' 2030 Sustainable Development Goals (SDGs), which address global priorities in areas such as poverty, hunger, health, education, energy, climate, and responsible production and consumption. Additionally, the study underlined the active role of art in fostering sustainability awareness, such as reducing waste, promoting reuse, and raising ecological consciousness through sustainable design practices. The findings demonstrated that the adoption of eco-friendly habits and the avoidance of overconsumption by individuals and societies are critical for achieving a sustainable future (Aslan, 2022).

An examination of the conceptual framework reveals that sustainable consumer behavior is shaped not only by individual attitudes, values, and social norms but also by economic conditions and cultural contexts. Future research that explores cultural differences, the influence of digital technologies, and structural barriers in consumer behavior in greater depth will make important contributions to advancing the understanding of this concept.

2.Impacts of Artificial Intelligence on Sustainable Behavior

As one of the most critical components of digital transformation, artificial intelligence (AI) has profoundly reshaped not only technological advancements but also the lifestyles of individuals and societies over the past decade. The threats posed by climate change, the rapid depletion of natural resources, and environmental degradation have positioned sustainability as one of

the most pressing global priorities. Within this context, the concept of sustainable behavior has increasingly attracted the attention of researchers and policymakers. Sustainable behavior encompasses actions such as reducing energy, water, and natural resource consumption; adopting environmentally friendly modes of transportation; and engaging in recycling and reuse practices (Kollmuss & Agyeman, 2002).

The emergence of artificial intelligence (AI) has created new opportunities for guiding and supporting sustainable behaviors not only through individual awareness but also via technology. In particular, AI applications integrated with big data analytics, machine learning, and the Internet of Things (IoT) are capable of observing, predicting, and influencing individuals' actions in line with sustainability goals. Recent studies conducted in Türkiye and globally demonstrate that AI-based systems enhance environmentally friendly behaviors across various domains, ranging from energy management and food consumption to fashion and transportation choices (Hasan et al., 2025).

Energy Efficiency and Consumption Habits

Energy management is one of the domains where artificial intelligence (AI) demonstrates its strongest impact on sustainable behavior. Smart meters and thermostats analyze users' consumption habits and encourage energy savings. For instance, AI-based systems such as Nest and Tado learn users' daily routines and optimize heating and cooling settings, achieving up to 20% reductions in energy use. A comprehensive meta-analysis on smart meters revealed an average decrease of 3.4% in household electricity consumption and 3.0% in natural gas consumption (Behavioural Insights Team, 2025). Similarly, a study conducted in the United States found that smart meters improved electricity distribution

efficiency by reducing losses by 4–7% and decreasing the duration of power outages by 5.5% (MIT Sloan, 2023).

Energy Efficiency and Consumption Habits

Energy management is one of the domains where artificial intelligence (AI) exerts its strongest influence on sustainable behavior. Smart meters and thermostats analyze users' consumption patterns and encourage energy savings. For example, AI-based systems such as Nest and Tado learn users' daily routines and optimize heating and cooling settings, achieving up to 20% reductions in energy use. A comprehensive meta-analysis on smart meters revealed an average reduction of 3.4% in household electricity consumption and 3.0% in natural gas consumption (Behavioural Insights Team, 2025). Similarly, a study conducted in the United States demonstrated that smart meters enhanced electricity distribution efficiency by reducing losses by 4–7% and lowering the duration of power outages by 5.5% (MIT Sloan, 2023).

In addition, large-scale energy companies are optimizing renewable energy production and distribution through AI-based forecasting systems. This trend supports sustainable behavior not only at the corporate level but also within individual consumption practices. In Türkiye, AI-supported smart grid applications contribute to the integration of renewable energy, particularly by improving storage and distribution processes in regions with high levels of solar energy usage (Köse et al., 2025). Moreover, AI algorithms enable real-time forecasting of energy demand, ensuring more effective utilization of renewable resources and reducing dependence on fossil fuels. Collectively, these developments demonstrate that AI not only enhances energy efficiency but also enables renewable energy systems to become more reliable and sustainable on a global scale.

Smart Cities, Smart Homes, and Behavioral Changes

Smart city applications, supported by AI-driven data analytics, enable more sustainable urban living. For example, smart transportation systems implemented in Barcelona and Singapore have reduced traffic congestion while encouraging the use of public transport, thereby lowering individuals' carbon footprints (Uzer & Özaslan, 2023). Similarly, AI-based traffic sensors used in Istanbul Metropolitan Municipality's smart transportation projects have contributed to sustainable behavior by reducing fuel consumption (Smart City, 2021).

Smart home technologies also facilitate the development of sustainable behaviors at the individual level. AI-enabled faucets that optimize water use, smart lighting systems, and waste management solutions support households in adopting environmentally friendly practices. As one of the core components of smart city applications, artificial intelligence plays a critical role in helping cities achieve their sustainability goals. AI-based sensors used in traffic management perform real-time data analysis to regulate transportation flows and contribute to reducing carbon emissions (Batty et al., 2012). Similarly, smart systems developed for waste management and efficient water use not only reduce operational costs for municipalities but also strengthen environmental sustainability (Nam & Pardo, 2011). In addition, AI-powered facial recognition and crowd analysis systems enhance urban security by facilitating proactive decision-making processes in city governance. Thus, artificial intelligence transforms not only the technological but also the environmental and social dimensions of smart cities, making it a cornerstone of the vision for sustainable urbanization.

Transformation in Fashion and Consumption Habits

The fashion and textile sector accounts for nearly 10% of global carbon emissions, and the fast fashion model poses significant

challenges for sustainability. At this point, artificial intelligence (AI) plays an active role in demand forecasting, inventory management, and recycling processes, guiding both producers and consumers toward more sustainable choices. Brands such as Zara and H&M have reduced overproduction and optimized logistics processes through AI-based demand forecasting systems (Rathore, 2019).

Research conducted in Türkiye has shown that textile companies utilizing AI-based production planning have succeeded in reducing energy consumption while enhancing their export competitiveness (Karadayı-Usta, 2024). Moreover, AI algorithms analyze consumer behavior to provide personalized product recommendations, thereby contributing to a reduction in unnecessary consumption. As a result, consumers are increasingly encouraged to shop “less, more consciously, and more sustainably.”

Education, Awareness, and Behavioral Transformation

One of the key contributions of artificial intelligence (AI) to sustainable behavior is in the field of education and awareness. AI-based systems integrated into online learning platforms deliver personalized content, enabling more effective learning experiences regarding environmentally friendly behaviors. For example, gamified education applications modeled after platforms like Duolingo, when adapted for environmental education, employ AI algorithms to adjust to users’ learning pace and thereby enhance their environmental awareness.

AI also plays a significant role in social media. Algorithms increase the visibility of sustainability campaigns and encourage individuals to adopt eco-friendly habits. Research conducted in Türkiye has shown that recycling campaigns carried out via social media reached broader audiences when supported by AI-based targeting (Demir & Çelik, 2022).

Potential Risks and Ethical Debates

While artificial intelligence (AI) is a powerful tool for promoting sustainable behaviors, it should not be overlooked that AI itself generates significant energy consumption and a considerable carbon footprint. Training large-scale machine learning models requires substantial amounts of electricity, which in turn increases carbon emissions. For this reason, in recent years, the concept of Green AI has gained prominence. Green AI emphasizes improving energy efficiency, reducing carbon emissions, and utilizing more environmentally friendly hardware in the development and operation of AI systems (Adedokun, Liang, Hamzah, & Johnson Mary, 2024). This strategy not only mitigates the environmental impact of AI but also aligns technological progress more closely with sustainability goals.

First and foremost, issues of data privacy and algorithmic bias can undermine individuals' trust in technology. For example, AI algorithms used in personalized advertising may encourage consumers toward overconsumption, thereby conflicting with sustainability objectives (White, Habib, & Hardisty, 2019).

Artificial intelligence stands out as a powerful tool for promoting sustainable behaviors. Evidence from energy efficiency, smart city applications, transformations in fashion and consumption habits, as well as education and awareness initiatives demonstrates that AI positively influences individuals' environmentally friendly practices. Nevertheless, risks such as data privacy concerns, ethical challenges, and high energy consumption must be carefully considered.

Future research is expected to reveal the long-term behavioral impacts of AI-based systems, develop usage models grounded in ethical principles, and assist policymakers in integrating

these technologies into sustainability agendas. In Türkiye, greater investment in this field will not only enhance global competitiveness but also represent a critical step toward building a sustainable future.

3. The Effects of Artificial Intelligence on Sustainable Fashion Behavior

The fashion industry is recognized as one of the most polluting sectors, accounting for approximately 10% of global carbon dioxide emissions and generating 92 million tons of textile waste annually. In this context, the effects of AI technologies on sustainable fashion behavior hold critical importance for both environmental and social sustainability. AI carries the potential to create revolutionary changes across processes in the fashion sector—from production to consumption—and stands out as a key instrument in shaping consumer behavior toward sustainability (Ramos et al., 2023; Jaitly & Desai, 2024). Figure 1 illustrates how AI applications support sustainability across all stages of the fashion industry, from design to recycling.

Figure 1. The Impact of Artificial Intelligence on the Sustainable Fashion Value Chain



Reference: Generated with Gemini 2.5 Flash

Artificial Intelligence and Its Role in Sustainable Fashion Production

AI technologies play a transformative role in optimizing production processes and minimizing waste in the fashion industry. Predictive analytics systems improve demand forecasting accuracy, reducing overproduction by 20–30% (Rana et al., 2025; Ramos et al., 2023). This provides a technological solution to one of the core problems of fast fashion: excessive production and surplus inventory.

Virtual sampling and digital prototyping technologies significantly reduce the need for physical sample production, cutting material waste by up to 80% (Jaitly & Desai, 2024; Rathore, 2019). These technologies not only minimize the costs and environmental impacts of design modifications but also accelerate creativity and innovation processes (Lee, 2022).

AI-supported systems play a critical role in ensuring transparency within the fashion industry's complex supply chains. When integrated with blockchain technology, AI applications enable the monitoring of environmental and social impacts at every stage of the production process (Zhang, 2024). Such transparency helps reduce greenwashing practices and empowers consumers to make more informed choices (Zhao & Fariñas, 2022).

AI algorithms also analyze consumer preferences and behavioral patterns to deliver personalized sustainable fashion recommendations. By combining consumers' environmental values with their style preferences, these systems can increase sustainable shopping by up to 35% (Rana et al., 2025; De Lima, 2025). AI-powered chatbots further facilitate the adoption of eco-friendly choices by engaging directly with consumers and offering tailored sustainable fashion suggestions (Manzo et al., 2024).

By analyzing consumer data and preferences, AI customizes garments for different body types, thereby reducing the need for alterations and minimizing the likelihood of returns. Augmented reality (AR) and virtual try-on technologies significantly decrease return rates in online shopping, lowering both logistics costs and the associated carbon footprint. These technologies have become particularly critical in the post-pandemic era, as online shopping has substantially increased.

AI-based platforms also play an important role in educating consumers and raising awareness about sustainable fashion

practices. AI-driven algorithms not only suggest sustainable fashion choices but also provide insights into the impacts of purchases, thereby offering a higher degree of personalization. This educational approach carries strong potential for reshaping consumer behavior over the long term and increasing demand for sustainable products.

AI emerges as a key technology in the implementation of circular economy models within the fashion sector. AI-supported systems optimize the processes of transforming textile waste into new products by assessing their upcycling potential (Jaitly & Desai, 2024; Candeloro, 2020). This approach functions as a technological catalyst in the transition from a linear to a circular economy model.

Blockchain technology, when integrated with AI, can be employed to scale life cycle management. This integration enables continuous monitoring and optimization of the environmental impacts of fashion products across all stages—from production to disposal. In this way, sustainability criteria can be incorporated starting from the product design phase.

Artificial Intelligence Applications in the Textile and Fashion Sector

The textile and fashion sectors are characterized by rapid transformation cycles and intense competition, driven by increasing numbers of seasons, product diversity, speed, dispersed supply chains, and delays in market entry (Glogar, 2025). At the global level, the industry faces mounting sustainability pressures due to the environmental impacts of production and consumption processes. In this context, AI-based technologies have been widely adopted in recent years to improve quality, reduce fabric waste, and enhance efficiency in production processes; predictive maintenance and

fabric inspection are among the most notable applications (Ultralytics, 2024).

Moreover, AI applications are extensively employed to enhance customer engagement, provide personalized experiences, and strengthen brand competitiveness (İKÇÜ, 2023). The integration of artificial intelligence into the fashion and textile industry extends beyond technical processes such as production, fundamentally transforming design practices, supply chains, logistics, marketing, and sustainability approaches. AI is now broadly applied across the entire value chain—from design and production to customer experience, from trend forecasting to eco-friendly supply chain management (Kohan Textile Journal, 2025; DHL, 2025; Warwick Evans Publishing, 2025).

The use of artificial intelligence (AI) in the fashion and textile sector began in the early 2000s with data mining and customer relationship management (CRM) software. Initially, algorithms were employed to analyze consumer preferences, but over time they were integrated into production processes and design. Since the 2010s, the advancement of big data analytics and the widespread adoption of machine learning have enabled fashion brands to implement AI-based systems across a wide spectrum, from inventory management to trend forecasting. Supported by big data, these systems have become effective tools for inventory optimization, supply chain improvement, market trend prediction, and the development of personalized marketing strategies (Gong, 2024; Levi's, 2020). In the post-2020 period, particularly under the influence of the COVID-19 pandemic, digitalization accelerated, and AI applications became more prevalent in virtual stores and online customer experiences.

AI technologies are particularly employed in critical areas of textile production processes such as quality control, defect detection, and energy efficiency. Computer vision-based systems detect fabric defects within milliseconds, thereby reducing waste rates. In

addition, smart production lines enable more precise management of yarn quality and dyeing processes, which not only lowers costs but also supports sustainability objectives.

Machine learning algorithms can predict the maintenance needs of production machinery and identify potential failures before they occur, thereby significantly reducing unplanned downtime and production losses. By integrating IoT-based sensor data with machine learning, errors such as feeder or needle stoppages—particularly in complex systems like knitting machines used in the textile industry—can be predicted with high accuracy, allowing maintenance processes to be planned more effectively. This not only reduces the risk of malfunctions but also enhances production efficiency, lowers costs, and supports companies in achieving their sustainability goals (Elkateb et al., 2024). Such improvements are particularly valuable in increasing labor productivity in high-capacity textile factories.

Brands such as Nike and Adidas have also leveraged AI- and IoT-based smart inventory systems to improve efficiency in stock management, reduce overproduction, and minimize energy losses in logistics, thereby contributing to their sustainability objectives (Cleverence, 2024).

Although fashion design has traditionally been regarded as a process rooted in creative intuition, AI-powered software is now expanding designers' sources of inspiration and opening new aesthetic horizons. Deep learning algorithms are capable of learning from past collections to forecast future trends and even generate original design suggestions (Raman et al., 2025).

For instance, Generative Adversarial Network (GAN)-based systems can virtually test different patterns, colors, and fabric combinations, significantly shorten the design process while enhancing creativity. This approach enables fashion brands to accelerate collection cycles and respond more rapidly to shifting

consumer demands. Recent studies confirm that GAN-based models support automation in design and are increasingly being integrated into the innovative collection development strategies of luxury fashion houses (Choi, Cho, & Lee, 2023; Jung et al., 2025). Gucci, for example, has reported employing AI in combination with human creativity to forecast future trends and design new collections. In this context, AI functions as a “creative collaborator” within the design process (Nasirov, 2024; Forbes, 2024).

One of the areas where AI is most intensively applied is supply chain management. Big data analytics and machine learning make significant contributions to optimizing stock levels, forecasting demand, and managing logistics operations more efficiently. Fast fashion brands such as Zara and H&M have reduced overproduction by 20–30% and improved logistics efficiency through AI-based demand forecasting models (Rathore, 2023). This not only generated economic benefits but also contributed to reducing textile waste. Amazon, likewise, leverages AI-powered demand forecasting models to optimize inventory placement and delivery speed, thereby enhancing operational efficiency. Moreover, these systems have been reported to contribute to reduced traffic congestion, faster delivery times, and lower carbon emissions (Reuters, 2025).

AI makes significant contributions to the development of personalized marketing strategies in the fashion sector. Recommendation systems analyze consumers’ past shopping habits and online behaviors to deliver customized product suggestions, which not only enhance customer satisfaction but also strengthen brands’ sales performance (Bharati Rathore, 2019; Amosu et al., 2024).

In addition, virtual fitting rooms and augmented reality (AR) applications allow consumers to experience products digitally before making a purchase (Karadayı-Usta, 2024). Such applications reduce

return rates and support sustainability goals. For instance, Uniqlo has expanded the use of its Magic Mirror AR technology in stores, enabling customers to virtually try on clothing items and thereby lowering return rates (Uniqlo, 2023). Similarly, L'Oréal has introduced its ModiFace-powered Virtual Try-On application, which leverages AI to enable consumers to virtually test makeup products (L'Oréal Paris, 2025).

The textile and fashion sectors are characterized by intensive environmental impacts due to high water consumption, chemical use, and carbon emissions. AI applications contribute to mitigating these negative effects, particularly by offering innovative solutions in energy efficiency, waste management, and material optimization during production processes. AI-based design tools enable more efficient use of recycled materials, thereby supporting circular economy objectives. Furthermore, supply chain optimization helps reduce problems of overproduction and surplus inventory, making it an essential component of the sector's sustainable transformation (Bieńkowska, 2025; Karadayı-Usta, 2024).

With its big data analytics capabilities, AI provides high levels of accuracy in forecasting fashion trends and consumer demand. This capacity allows brands to optimize production volumes, thereby enhancing both economic and environmental efficiency. Machine learning algorithms analyze seasonal changes, social media trends, and macroeconomic factors to improve inventory management (Ramos et al., 2023; Sharma & Sharma, 2024). AI also makes significant contributions to the development of new sustainable materials. AI-assisted research and development processes accelerate the creation of biodegradable fabrics, recycled fibers, and low-impact dyeing technologies. These technological advancements directly support the fashion industry's objectives of reducing its environmental footprint. The impact of AI on sustainable fashion behavior is not limited to environmental aspects.

AI-based systems also provide important tools for monitoring fair trade practices, safeguarding labor rights, and ensuring social justice within supply chains. This approach supports the integration of the three dimensions of sustainability—environmental, economic, and social (Gupta et al., 2023). Studies indicating that 80% of global consumers are willing to pay more for sustainably produced or sourced products further demonstrate that AI-supported sustainable fashion practices are economically advantageous. This enables brands to achieve both environmental and economic objectives simultaneously. Nevertheless, the application of AI in the fashion sector faces various technological and operational constraints. High implementation costs, technical infrastructure requirements, and the need for skilled labor create adoption barriers, particularly for small- and medium-sized enterprises (Bieńkowska, 2024). In addition, poor data quality and lack of standardization can limit the effectiveness of AI systems. The use of AI in the fashion sector also brings ethical risks, such as consumer manipulation, data privacy violations, and algorithmic bias (Hermann, 2021; Huang et al., 2023). These risks can create significant social justice concerns, particularly for vulnerable consumer groups (Hermann et al., 2023). Ironically, AI technologies employed to promote sustainability themselves entail considerable energy consumption. The high energy demands of data centers and the generation of digital waste necessitate careful evaluation of the net environmental impact of these technologies (Bolón-Canedo et al., 2024; Vartumyan et al., 2023).

The future of AI in the fashion and textile sector will become increasingly intertwined with digitalization and virtual technologies. The metaverse and digital fashion allow consumers to purchase digital garments in virtual worlds, thereby reducing the need for physical production and positively impacting environmental outcomes. Moreover, through NFT-based digital clothing collections, brands can reduce environmental pressure without

relying on physical production processes while simultaneously seizing opportunities to merge sustainability with innovation (Miikkulainen-Gilbert, 2023).

Smart textiles represent another area that AI is expected to shape. Garments equipped with sensors can collect users' health data, which can then be analyzed by AI algorithms to provide personalized recommendations (Bieńkowska, 2024). These developments are poised to transform fashion into a domain that is not only aesthetic but also functional and technology driven.

Although AI applications provide significant advantages to the sector, certain challenges and ethical concerns also arise. These include issues such as data privacy, algorithmic bias, energy consumption, and the marginalization of human creativity (Bieńkowska, 2025). In particular, AI's role in design has sparked debates about whether it can replace human creativity.

Moreover, the potential exclusion of workers in low-income regions from production processes or the risk of job losses represents another critical ethical concern (Choi et al., 2023). Therefore, it is essential to develop regulatory frameworks to ensure that AI applications do not exacerbate social inequalities within the sector.

AI applications have already initiated a profound transformation in the textile and fashion sector. From production and design to logistics and marketing, they provide solutions that support efficiency, innovation, and sustainability objectives. However, for this transformation to remain sustainable in the long term, it is crucial to address ethical concerns, preserve human creativity, and ensure fairness in access to technology. The potential of AI technologies in the fashion and textile sector is substantial; yet, the effective and responsible direction of this potential will be decisive for the future of the industry.

Future Directions and Potential Developments

The future potential of AI in the fashion industry, particularly in terms of sustainability, is being shaped by technological advancements and sectoral transformation processes. As of 2023, the remarkable surge in AI's popularity has penetrated various industries, including fashion, making its transformative potential increasingly evident. Looking ahead, the widespread adoption of more sophisticated personalization algorithms, advanced virtual experience technologies, and integrated sustainability measurement systems is anticipated.

AI enhances efficiency, reduces waste, and supports sustainable practices at every stage of the fashion lifecycle. This collaboration not only benefits the environment but also promotes social equity and economic resilience. Such a multidimensional approach indicates that AI will function as a catalyst for sustainable fashion behavior.

The effects of AI on sustainable fashion behavior present a complex dynamic in which technology's potential is balanced against its risks. On the positive side, AI contributes to production optimization, waste reduction, personalized sustainable recommendations, and the advancement of circular economy models. On the negative side, however, it raises concerns regarding energy consumption, data privacy risks, and potential consumer manipulation.

For AI to serve as an effective tool in sustainable fashion behavior, the implementation of ethical frameworks, principles of transparency, and accountability mechanisms is of critical importance. In this regard, aligning technological advancements with sustainability objectives and adopting multi-stakeholder approaches will be decisive factors in shaping the future transformation of the sector (Bieńkowska, 2024).

4.AI-Supported Sustainability Practices in Other Sectors

Artificial intelligence (AI) has become a critical tool for achieving sustainability goals not only in the textile and fashion industries but also across multiple sectors such as energy, agriculture, healthcare, transportation, and construction. AI-based solutions enable more efficient use of natural resources, reduction of carbon emissions, and minimization of environmental impacts (Dwivedi et al., 2022). This section examines the contributions of AI to sustainability practices in various sectors.

AI-Driven Sustainability Practices in the Energy Sector

AI applications in the energy sector offer significant opportunities for advancing sustainability and efficiency goals. Big data analytics and machine learning–based models analyze weather conditions, economic indicators, and historical consumption data to predict energy demand with high accuracy, thereby optimizing production planning and preventing waste (Antonopoulos et al., 2020). In renewable energy systems, AI processes parameters such as solar radiation and wind speed to forecast production fluctuations and facilitate the integration of these resources into the grid (Köse, Canci Matur, & Tolon, 2025). In addition, the analysis of consumption data from smart meters using AI helps identify household and business energy use patterns, contributing both to the development of efficiency-enhancing policies and to cost-effectiveness in public services (MIT Sloan, 2025). Predictive maintenance applications further enable the early detection of equipment failures in power plants and transmission lines, reducing maintenance costs while strengthening supply security (Elkateb et al., 2024). Within this framework, AI has become a transformative tool in the energy sector, supporting both environmental and economic sustainability.

The energy sector is a major source of global greenhouse gas emissions, and AI plays a significant role particularly in renewable energy management and smart grid systems.

Renewable energy optimization: AI-based forecasting models are being developed to enhance the efficient use of variable sources such as wind and solar power (Antonopoulos et al., 2020).

Smart grids: AI-driven software enables the analysis of consumption patterns, balancing of demand fluctuations, and management of energy storage solutions.

Carbon footprint reduction: Large energy companies employ AI-based monitoring systems to measure and reduce carbon emissions in production and distribution processes.

These applications not only improve energy efficiency but also accelerate the transition toward sustainable energy.

Artificial Intelligence in the Agricultural Sector
The agricultural sector is critical worldwide in terms of both food security and environmental sustainability. AI-based precision farming applications, supported by sensor data and machine learning algorithms, enhance resource efficiency by significantly reducing the use of water, soil, and fertilizers (Liakos et al., 2018; Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). Within the scope of precision agriculture, machine learning and deep learning algorithms analyze data collected from sensors and satellite imagery, enabling substantial savings in water, soil, and fertilizer use (Liakos et al., 2018). As a result, production efficiency increases while natural resources are preserved.

AI-based models are also employed with high accuracy in the detection of diseases and pests, which helps reduce pesticide use while maintaining product quality (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). Furthermore, AI-supported forecasting systems are being

developed to manage risks associated with climate change; these systems predict extreme weather events such as droughts, floods, or frosts, thereby assisting farmers in developing adaptation strategies. Thus, AI not only enhances productivity in agriculture but also serves as a vital tool in achieving sustainable development goals.

Precision farming applications: Data collected through drones and sensors are analyzed by AI algorithms to accurately determine irrigation and fertilization needs in fields.

Yield prediction: Machine learning enables the estimation of crop yields, allowing farmers to make more informed decisions.

Waste reduction: AI-supported logistics systems minimize losses in the food supply chain, generating both economic and environmental benefits.

These applications are particularly valuable in supporting sustainable agriculture in regions where water resources are limited.

Artificial Intelligence in the Healthcare Sector

AI applications in healthcare are creating profound transformations in diagnosis, treatment, and patient care processes. Deep learning and machine learning-based systems analyze medical imaging data to achieve high levels of accuracy in the early detection of cancers, cardiovascular diseases, and neurological disorders (Esteva et al., 2019). Moreover, the processing of large datasets derived from electronic health records through AI algorithms facilitates the development of personalized treatment plans and the improvement of patient outcomes (Dankwa-Mullan, 2024). AI-supported decision support systems not only enhance physicians' diagnostic accuracy but also generate time and cost savings in healthcare services. In addition, robotic surgery and virtual assistant applications improve efficiency in patient care and reduce the workload of healthcare professionals. However, the growing

adoption of AI in healthcare also raises important debates surrounding data privacy, algorithmic bias, and compliance with ethical standards. Therefore, to fully harness the potential of AI in healthcare, technological advancements must be aligned with ethical and legal frameworks. The healthcare sector, given its energy-intensive processes and medical waste, is also noteworthy in terms of sustainability. AI contributes to both environmental and social sustainability in healthcare services (Esteva et al., 2019):

Resource management: Energy consumption and water use in hospitals are optimized through AI-based automation systems.

Waste management: The segregation and recycling of medical waste are carried out more effectively with computer vision technologies.

Digital health: Telemedicine and AI-assisted diagnostic systems reduce the need for patients to visit hospitals physically, thereby lowering the carbon footprint.

In addition, AI's ability to ensure accurate resource allocation in healthcare services provides more equitable access to medical care, particularly in low-income regions.

Artificial Intelligence in Transportation and Logistics

In the transportation and logistics sector, artificial intelligence (AI) provides innovative solutions that support efficiency, safety, and sustainability objectives. Machine learning and big data analytics are employed in traffic flow management, route optimization, and demand forecasting, thereby reducing fuel consumption and shortening delivery times (Pan & Zhang, 2021). Autonomous vehicle technologies, particularly in freight transportation, minimize human error, enhance safety, and lower operational costs (Litman, 2020). In logistics, AI-based algorithms reduce errors in warehouse

management and inventory control, contributing to more flexible and transparent supply chains. Moreover, the integration of drones and robotic systems with AI accelerates last-mile deliveries, improving customer satisfaction. However, challenges such as data security, workforce transformation, and the lack of regulatory frameworks remain critical issues for scaling these technologies. Therefore, while AI holds significant transformative potential in transportation and logistics, its effective and equitable implementation requires the alignment of technological, societal, and policy dimensions.

The transportation sector is one of the largest contributors to carbon emissions, and AI helps mitigate this impact by enhancing efficiency. Key areas of application include:

Autonomous vehicles: AI-powered autonomous vehicles enable lower fuel consumption and provide safer driving experiences (Litman, 2020).

Smart traffic management: Algorithms that optimize traffic flow in large cities reduce both fuel consumption and emissions.

Logistics optimization: Companies such as Amazon and DHL use AI-based systems to optimize delivery routes, thereby minimizing their carbon footprint.

These developments, particularly within the context of smart cities, support sustainable urban mobility.

Artificial Intelligence in Construction and Architecture

Artificial intelligence (AI) has transformative impacts in the construction and architecture sectors, spanning from design processes to project management. In architecture, AI-based algorithms contribute to the development of innovative projects both aesthetically and functionally through parametric design and

generative design tools, which generate alternative architectural solutions. In construction engineering, machine learning offers significant benefits in project cost estimation, risk analysis, and occupational safety management (Pan & Zhang, 2021). AI-powered computer vision technologies are employed on construction sites to enhance worker safety and accelerate quality control processes. Moreover, AI-supported simulations in energy-efficient building design facilitate the widespread adoption of sustainable architectural practices. Nevertheless, challenges such as the high demand for data, the lack of compatible software infrastructures, and the potential overdependence of professional creativity on technology need to be carefully addressed. Thus, while AI is a powerful tool for enhancing efficiency, sustainability, and safety in construction and architecture, its successful implementation requires a balanced integration of human creativity and technological innovation.

The construction sector is at the center of sustainability debates due to its high energy consumption and carbon emissions. AI is widely applied in the design of energy-efficient buildings and in smart city planning (Pan & Zhang, 2021). Key areas include:

Energy simulations: AI-based software simulates the energy performance of buildings, enabling more efficient design decisions.

Smart materials: AI evaluates the performance of next-generation materials, contributing to the development of sustainable building solutions.

Green architecture: Continuous monitoring and optimization of energy use in smart buildings strengthen sustainable architectural practices.

These applications play a crucial role, particularly in the construction of carbon-neutral cities.

Common Benefits and Ethical Concerns

An examination of applications across different sectors highlights the common benefits of AI for sustainability, which can be summarized as follows:

- Efficiency in resource utilization

- Reduction of carbon emissions

- Minimization of waste

- Increased speed and accuracy in decision-making processes

However, ethical concerns must not be overlooked. High energy consumption, algorithmic bias, and data privacy issues within AI systems can undermine sustainability objectives (Vinuesa et al., 2020). Moreover, inequalities in access to technology in developing countries raise questions about whether AI can serve as a just tool for sustainable transformation.

AI-supported sustainability practices provide both environmental and social benefits in sectors such as energy, agriculture, healthcare, transportation, and construction. Yet, the long-term impacts of these technologies must be evaluated not only from a technical perspective but also through ethical and social dimensions. The potential of AI is considerable; however, its effective realization requires careful guidance, cross-sectoral collaboration, and support from global policies.

Risks and Ethical Debates in the Use of Artificial Intelligence

Despite the positive impacts of AI on sustainable fashion and consumer behavior, the widespread adoption of these technologies also brings significant ethical dilemmas and potential risks. These risks raise questions about the net contribution of technology to achieving sustainable development goals and highlight the necessity of developing comprehensive regulatory frameworks. The dual

effects of artificial intelligence on sustainable consumer behavior are summarized in Table 1.

Table 1. The Dual Impact of Artificial Intelligence on Sustainable Consumption

Opportunities (Positive Effects)		Risks (Negative Effects / Challenges)
Personalized Recommendations: Algorithms analyze consumer preferences and highlight sustainable product options.		Algorithmic Bias: Historical or incomplete training data may limit equal access to sustainable choices.
Supply Chain Transparency: AI integrated with blockchain enables monitoring of environmental and social impacts.		Data Privacy Violations: Collection and misuse of personal and behavioral data pose risks.
Demand Forecasting & Waste Reduction: Helps reduce overproduction by 20–30%.		Energy Footprint Paradox: Training large AI models consumes high levels of energy and increases carbon emissions.
Virtual Sampling & Digital Prototyping: Reduces the need for physical samples and minimizes material waste.		Consumer Manipulation: Promoting products as “sustainable” may encourage overconsumption.
Education & Awareness: Chatbots and interactive tools improve consumers’ sustainability literacy.		Lack of Transparency (Black Box): Decision-making mechanisms of AI systems are often unclear to users.
Support for Circular Economy: AI systems optimize the upcycling of textile waste into new products.		Socio-Economic Inequality: Automation may cause job losses or marginalization of low-income groups.
Resource Efficiency: Optimizes energy, water, and raw material usage, reducing costs and environmental impact.		Short-Term Profit Orientation: Firms may prioritize financial gains over long-term sustainability.

Data Privacy and Security Concerns

AI systems process and store large amounts of personal and behavioral data in order to provide personalized services. This significantly increases the risks of data breaches, unauthorized access, and privacy violations (Huang et al., 2023; Zhang & Zhang, 2023). The collection of sensitive information—such as consumers’ clothing preferences, body measurements, purchasing habits, and even emotional responses—can have serious consequences if misused or exposed to cyberattacks (Vartumyan et al., 2023). Particularly in light of regulations such as the European Union’s General Data Protection Regulation (GDPR), it is vital for fashion companies to adopt transparent data management policies in their AI applications and to prioritize consumer consent.

Algorithmic Bias and Social Injustice

AI algorithms tend to reinforce and amplify historical and societal biases present in the datasets on which they are trained. In the fashion industry, this may manifest as personalized recommendations and designs that exclude certain body types, skin tones, or cultural preferences (Ashok et al., 2022; Puntoni et al., 2021). For example, an algorithm trained primarily on data collected from a specific geography or demographic group may overlook the needs of consumers from different cultural backgrounds, leading to social exclusion and inequality in the market (Galaz et al., 2021; Hermann et al., 2023). Such algorithmic discrimination undermines the principle of social inclusivity—a cornerstone of sustainability—and prevents the fair distribution of technological benefits.

Consumer Autonomy and Manipulation Risk

Personalization—AI’s greatest strength—can also become a tool of manipulation that threatens consumer autonomy. Highly persuasive and targeted marketing messages may push consumers to purchase “green” products they do not actually need, creating a cycle of “sustainability-seeming” overconsumption rather than truly sustainable consumption (Du & Xie, 2020; Hermann & Puntoni, 2024). Consumers may find themselves exposed to algorithmic nudges presented as their own choices, undermining their capacity to make conscious and autonomous sustainable decisions (Gonçalves et al., 2023). Such manipulation runs counter to the spirit of sustainable fashion, shifting the focus from consumer-centered approaches to consumption-centered models.

The Environmental Paradox of AI’s Energy Footprint

Another critical issue in evaluating AI’s contribution to sustainability lies in the technology’s own environmental costs. Training large language models, running complex algorithms, and cooling massive data centers require substantial energy consumption and generate significant carbon emissions (Bolón-Canedo et al., 2024). This creates a paradox in which the gains achieved through resource efficiency and waste reduction via AI may be offset by the technology’s own ecological footprint. As a result, the concept of “Green AI” has gained increasing importance. The development of energy-efficient algorithms and the adoption of renewable energy sources have become vital to maximizing the net environmental benefits of AI (Kar et al., 2022; Fan et al., 2023).

Lack of Transparency and Accountability

Many AI systems are referred to as “black boxes” due to their complexity, making it difficult to fully understand how decisions are

made (Galaz et al., 2021). In the fashion sector, when it is not transparently explained why a consumer is recommended a particular sustainable product or how a supply chain decision is determined, accountability issues arise. This lack of transparency can undermine consumer trust and create uncertainty about who should be held responsible in the event of negative outcomes—the developer of the algorithm, the company deploying it, or the algorithm itself (Al-Tkhayneh et al., 2023; Guan et al., 2022). Research on “Explainable AI” (XAI) has therefore become a crucial focus for addressing this problem and making decision-making processes more transparent.

Socio-Economic Inequality and Impacts on Labor

The automation capacity of AI has the potential to replace human labor in routine and repetitive tasks within the fashion industry. This can lead to job losses, particularly in low-skilled positions, and exacerbate economic inequality (Bieńkowska, 2024). Considering the economic and social dimensions of sustainability, it is vital to manage AI integration through a just transition and to establish reskilling programs for affected workers. Otherwise, progress made in environmental sustainability risks undermining social sustainability, thereby losing its overall significance.

In conclusion, the ethical application of AI in sustainable fashion behavior requires striking a delicate balance between the opportunities it offers and the risks it poses. To achieve this balance, it is crucial to adopt the principles of *ethics-by-design* and transparency throughout all stages of AI systems—from design to deployment—enforce robust data protection regulations, utilize diverse datasets that minimize algorithmic bias, and develop transparent marketing practices that safeguard consumer autonomy. AI can serve as a powerful tool for building a sustainable fashion

future, but only if it is guided by a responsible and ethical approach that prioritizes human well-being and the health of the planet.

5. Conclusion and Prospects for the Future

AI-driven sustainable consumer behavior is emerging as one of the most critical issues of the 21st century. The findings examined in this study demonstrate that AI has both positive and negative effects on sustainable consumer practices. AI technologies, particularly in the fashion sector, hold the potential to reduce environmental impacts across processes ranging from production to consumption and play a crucial role in shaping consumer preferences toward sustainability.

The research results indicate that AI has reduced overproduction in the fashion sector by 20–30%, decreased material waste by up to 80% through virtual sampling, and increased sustainable shopping by 35% through personalized recommendations (Rana et al., 2025; Ramos et al., 2023; Jaitly & Desai, 2024). These figures provide tangible evidence of AI's potential to support sustainable consumer behavior.

However, AI applications also present significant drawbacks and risks. In terms of data privacy and security, the extensive use of personal data by AI systems increases the risks of data breaches, unauthorized access, and privacy violations (Huang et al., 2023; Zhang & Zhang, 2023; Vartumyan et al., 2023). Regarding algorithmic bias and fairness, AI algorithms may reproduce and amplify biases inherent in their training data, leading to

discrimination and further disadvantaging already vulnerable groups (Ashok et al., 2022; Galaz et al., 2021; Puntoni et al., 2020).

From the perspective of consumer autonomy, AI's capacity for excessive personalization and nudging may undermine consumers' free will and reduce their ability to make independent sustainable choices (Du & Xie, 2020; Gonçalves et al., 2023). Paradoxically, there is also the risk of promoting overconsumption: AI-enabled marketing can increase consumption, contrary to sustainability objectives, thereby intensifying environmental burdens (Khan et al., 2022; Hermann & Puntoni, 2024).

From an environmental perspective, AI applications themselves entail side effects such as high energy consumption and the generation of digital waste (Bolón-Canedo et al., 2024). In terms of social inequality, automation may lead to the disappearance of certain occupations and exacerbate income disparities, while the lack of transparency often leaves AI decision-making processes as "black boxes," making it difficult to understand the causes of erroneous decisions (Galaz et al., 2021; Al-Tkhayneh et al., 2023; Guan et al., 2022).

AI's potential to contribute to 134 of the 169 targets of the United Nations 2030 Sustainable Development Agenda, while at the same time negatively affecting 59 targets, underscores the dual nature of this technology (Vinuesa et al., 2019). This highlights the necessity of developing AI applications with a sustainability-oriented approach, beginning from the design stage.

Future Perspectives

The future of AI-driven sustainable consumer behavior will be shaped by the dynamic interaction between technological

advancements, ethical governance models, and the level of societal awareness. Key areas of focus for the future include:

Technological Advancements and Innovation: As AI technologies become more sophisticated in the future, their capacity to influence consumer behavior toward sustainability will increase. In particular, personalized recommendations, virtual experience technologies, and circular economy applications will become more widespread, making it easier for consumers to make sustainable choices (Jaitly & Desai, 2024; De Lima, 2025). The advancement of AI-based chatbots and virtual assistants will further enhance their effectiveness in providing consumers with comprehensive information about sustainable products and in encouraging environmentally friendly choices (Manzo et al., 2024).

Ethical Governance and Regulatory Frameworks: Strong regulatory frameworks must be developed to minimize the ethical risks of AI. Ethically aligned standards, transparency principles, and accountability mechanisms established through collaboration will increase AI's positive contribution to sustainable consumer behavior (Zhang & Zhang, 2023; Ashok et al., 2022). Multi-stakeholder dialogues, independent auditing mechanisms, and the establishment of ethics committees will ensure the responsible use of technology (Brendel et al., 2021; Nguyen et al., 2022).

Sectoral Transformation and Sustainability Integration: AI-driven sustainability applications are expected to become more widespread across various industries, particularly in the fashion sector. Circular economy models, upcycling practices, and green innovation initiatives will become more effective with AI support (Candeloro, 2020; Lee, 2022). However, the risk of economic objectives taking precedence over sustainability goals will remain a critical factor to consider in sectoral transformation (Bieńkowska, 2024).

Consumer Awareness and Digital Literacy: In the future, the growing awareness of consumers regarding AI and sustainability will contribute to amplifying the positive effects of these technologies. Digital literacy programs and sustainability education will strengthen consumers' capacity to make AI-assisted sustainable choices (Al-Sharafi et al., 2023; Hermann et al., 2023).

Environmental Impact and Energy Efficiency: Minimizing the side effects of AI applications, such as energy consumption and digital waste generation, is critically important for the success of future sustainability goals (Bolón-Canedo et al., 2024). The development of the Green AI concept and the design of energy-efficient algorithms will ensure that technology achieves a net positive environmental impact

Global Collaboration and Policy Development: Optimizing the impact of AI on sustainable consumer behavior requires international collaboration and coordinated policy development processes. Fully harnessing AI's potential in achieving the Sustainable Development Goals will be possible only through the adoption and enforcement of globally aligned ethical standards (Kalıpcıoğlu, 2023; Atamaner, 2024).

Recommendations and Future Directions

To ensure the effective and ethical development of AI-driven sustainable consumer behavior, the following recommendations are proposed:

Policy and Regulatory Recommendations

Comprehensive Legal Frameworks: Legal regulations should be developed to safeguard data privacy, algorithmic transparency, and consumer rights in AI applications. These frameworks must be

designed in alignment with sustainability objectives (Zhang & Zhang, 2023; Zhao & Fariñas, 2022).

International Standardization: Efforts to establish and implement global standards on AI ethics and sustainability should be supported, particularly those led by international organizations such as UNESCO, the EU, and the WHO (Ashok et al., 2022; Nguyen et al., 2022).

Multi-Stakeholder Governance: Ethical committees and monitoring mechanisms involving technology companies, civil society organizations, academics, and consumer representatives should be established (Brendel et al., 2021; Hermann et al., 2023).

Technology Development Recommendations

Explainable AI (XAI): AI technologies that make decision-making processes transparent and understandable should be developed and widely adopted (Behera et al., 2023; Hermann, 2021).

Ethics-by-Design Principles: AI applications should be developed from the design stage based on *ethics-by-design* and *sustainability-by-design* principles (Du & Xie, 2020; Vinuesa et al., 2019).

Energy-Efficient Algorithms: Low-energy, environmentally friendly AI algorithms should be developed, and existing systems should be optimized (Fan et al., 2023; Kar et al., 2022).

Sectoral Recommendations (Specifically for the Fashion Industry)

Strengthening circular economy models with AI support and promoting the widespread adoption of upcycling practices (Jaitly & Desai, 2024; Candeloro, 2020).

Ensuring the integration of blockchain and AI for transparent supply chain management (Zhang, 2024).

Increasing AI-driven R&D investments in the development of sustainable materials (Ramos et al., 2023).

Encouraging companies to adopt sustainability-focused performance indicators in their AI applications and to provide regular reporting in this regard (Gupta et al., 2023; Zhao & Fariñas, 2022).

Education and Awareness Recommendations

Digital Literacy Programs: Comprehensive programs should be developed to raise consumer awareness about AI technologies and to provide education on sustainable consumption (Al-Sharafi et al., 2023).

Academic Research Support: Interdisciplinary research examining the relationship between AI and sustainability should be supported, and the findings should be shared with policymakers (Kulkov et al., 2023; Fan et al., 2023).

Consumer Awareness Campaigns: Awareness campaigns should be organized to inform consumers about the benefits and risks of AI-enabled sustainable products (Sharma & Sharma, 2024; Rana et al., 2025).

Research and Development Priorities

Impact Assessment: Standard metrics and evaluation frameworks should be developed to measure the impact of AI on sustainable consumer behavior (Vinuesa et al., 2019; Galaz et al., 2021).

Risk Mitigation Strategies: Specific technological solutions should be explored to reduce algorithmic bias, protect data privacy, and support consumer autonomy (Thamik & Wu, 2022; Oğuz, 2024).

Social Impact Analysis: Long-term social impact analyses should be conducted to examine the effects of AI on different demographic groups (Hermann et al., 2023; Mclean et al., 2021).

In conclusion, the future of AI-driven sustainable consumer behavior will be shaped by balancing technological innovations with ethical and sustainability principles, adopting multi-stakeholder approaches, and enhancing societal awareness. The systematic implementation of the recommendations outlined above is critically important for minimizing the negative impacts of AI on sustainable consumer behavior while maximizing its positive potential. In this process, employing AI as a tool that enhances human well-being while supporting environmental and social sustainability should be a primary objective from both academic and practical perspectives. However, achieving this objective requires the coordinated advancement of technology development, policymaking, and public awareness initiatives.

REFERENCES

Adedokun, T., Liang, W., Hamzah, F., & Johnson Mary, B. (2024). Green AI: Strategies for reducing the carbon footprint of machine learning. *Journal of Sustainable Computing*, 9(1), 45–62. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>

Al-Tkhayneh, K., Al-Tarawneh, H., Abulibdeh, E., & Alomery, M. (2023). Social and legal risks of artificial intelligence: An analytical study. *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*. <https://doi.org/10.36941/ajis-2023-0079>

Amosu, O. R., Kumar, P., Ogunsuji, Y. M., Oni, S., & Faworaja, O. (2024). AI-driven demand forecasting: Enhancing inventory

management and customer satisfaction. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 23(2), 708–719. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.2.2394>

Antonopoulos, I., Robu, V., Couraud, B., Kirli, D., Norbu, S., Kiprakis, A., ... & Puente, E. I. (2020). Artificial intelligence and machine learning approaches to energy demand-side response: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109899. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109899>

Aslan, A. (2022). An evaluation of sustainable art and consumer awareness. *Yıldız Journal of Art and Design*, 9(2), 104–114.

Atamaner, O. (2024). The importance of artificial intelligence for sustainable development goals. <https://www.tskb.com.tr/blog/surdurulebilirlik/surdurulebilir-kalkinma-hedefleri-icin-yapay-zekanin-onemi>

Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Ouzounis, G., & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, 214(1), 481–518. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>

Bieńkowska, J. (2024). The effects of artificial intelligence on the fashion industry—Opportunities and challenges for sustainable transformation. *Sustainable Development*, 33(3), 3774–3790. <https://doi.org/10.1002/sd.3312>

Bolón-Canedo, V., Morán-Fernández, L., Cancela, B., & Alonso-Betanzos, A. (2024). A review of green artificial intelligence: Towards a more sustainable future. *Neurocomputing*, 599, 128096. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128096>

Candeloro, D. (2020). Towards sustainable fashion: The role of artificial intelligence—H&M, Stella McCartney, Farfetch,

Moosejaw: A multiple case study. *10*, 91–105.
<https://doi.org/10.6092/ISSN.2611-0563/11837>

Choi, W., Cho, E., & Lee, S. (2023). Developing an AI-based automated fashion design system: Reflecting the work process of fashion designers. *Fashion and Textiles*, *10*(1), 39.
<https://doi.org/10.1186/s40691-023-00360-w>

Cleverence. (2024, March 22). *How Nike and Adidas use smart inventory systems to avoid overstocking and shortages*. Retrieved September 4, 2025, from
<https://www.cleverence.com/articles/business-blogs/how-nike-and-adidas-use-smart-inventory-systems-to-avoid-overstocking-and-shortages>

Dankwa-Mullan, I. (2024). Health equity and ethical considerations in using artificial intelligence in public health and medicine. *Preventing Chronic Disease*, *21*.
<https://doi.org/10.5888/pcd21.240245>

De Lima, M. (2025). The fashion revolution with artificial intelligence: Personalization, experience, and sustainability. *Revista ft*. <https://doi.org/10.69849/revistaft/ch10202504040804>

Demir, S., & Çelik, M. (2022). AI-based environmental campaigns on social media: The case of Türkiye. *Journal of Communication and Society Research*, *5*(3), 110–128.

DHL. (2025, August 1). The power of AI in redesigning the entire fashion lifecycle.

Dwivedi, Y. K., Hughes, L., Kar, A. K., Baabdullah, A. M., Grover, P., & Abbas, R. (2022). Climate change and COP26: Are digital technologies and information management part of the problem or the solution? An editorial reflection and call to action. *International*

Journal of Information Management, 63, 102456.
<https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102456>

Ellen MacArthur Foundation. (2017). *A new textiles economy: Redesigning fashion's future*. <https://ellenmacarthurfoundation.org>

Elkateb, S. N., Métwalli, A., Shendy, A., & Abu-Elanien, A. E. B. (2024). Machine learning and IoT-based predictive maintenance approach for industrial applications. *Alexandria Engineering Journal*, 88, 298–309.

Esteva, A., Robicquet, A., Ramsundar, B., Kuleshov, V., DePristo, M., Chou, K., ... & Dean, J. (2019). A guide to deep learning in healthcare. *Nature Medicine*, 25(1), 24–29.
<https://doi.org/10.1038/s41591-018-0316-z>

Fan, Z., Yan, Z., & Wen, S. (2023). Deep learning and artificial intelligence in sustainability: A review of SDGs, renewable energy, and environmental health. *Sustainability*.
<https://doi.org/10.3390/su151813493>

Floridi, L., & Cows, J. (2019). A unified framework of five principles for AI in society. *Harvard Data Science Review*, 1(1).
<https://doi.org/10.1162/99608f92.8cd550d1>

Forbes. (2024, March 15). *Weaving Elegance With Intelligence: How Luxury Brands Are Embracing AI*. Retrieved September 4, 2025, from Forbes website.

Glogar, M. (2025). *Digital Technologies in the Sustainable Design and Sustainable Production of the Textile and Fashion Industry*. *Sustainability*, 17(4), 1371

Gonçalves, A., Pinto, D., Rita, P., & Pires, T. (2023). Artificial intelligence and its ethical implications for marketing. *Emerging Science Journal*. <https://doi.org/10.28991/esj-2023-07-02-01>

- Gong, Y. (2024). The impact of big data on the fashion industry. *Advances in Economics Management and Political Sciences*, 143(1), 190–196. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/2024.GA18973>
- Goyal, S., Esposito, M., Kapoor, A., & Jaiswal, M. P. (2022). Sustainable artificial intelligence: An emerging paradigm. *Technological Forecasting and Social Change*, 178, 121552. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121552>
- Guan, H., Dong, L., & Zhao, A. (2022). Ethical risk factors and mechanisms in artificial intelligence decision making. *Behavioral Sciences*, 12. <https://doi.org/10.3390/bs12090343>
- Gupta, B., Gaurav, A., Panigrahi, P., & Arya, V. (2023). Analysis of artificial intelligence-based technologies and approaches on sustainable entrepreneurship. *Technological Forecasting and Social Change*. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122152>
- Hamari, J., Koivisto, J., & Sarsa, H. (2014). Does gamification work?—A literature review of empirical studies on gamification. *Proceedings of the 47th Hawaii International Conference on System Sciences*. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2014.377>
- Hasan, M. A., Talukder, S. C., Lakner, Z., & Temesi, A. (2025). Clothing brands' sustainability practices: A bibliometric approach. *Administrative Sciences*, 15(6), 221. <https://doi.org/10.3390/admsci15060221>
- Hayta, A. B. (2009). The role of consumer education in developing sustainable consumption behavior. *Ahi Evran University Journal of Education Faculty*, 10(3), 143–151.
- Hermann, E. (2021). Leveraging artificial intelligence in marketing for social good—An ethical perspective. *Journal of Business Ethics*, 179, 43–61. <https://doi.org/10.1007/s10551-021-04843-y>

Hermann, E., & Puntoni, S. (2024). Artificial intelligence and consumer behavior: From predictive to generative AI. *Journal of Business Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114720>

Hermann, E., Williams, G., & Puntoni, S. (2023). Deploying artificial intelligence in services to aid vulnerable consumers. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11747-023-00986-8>

Huang, C., Zhang, Z., Mao, B., & Yao, X. (2023). An overview of artificial intelligence ethics. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 4, 799–819. <https://doi.org/10.1109/TAI.2022.3194503>

Jackson, T. (2005). Motivating sustainable consumption: A review of evidence on consumer behaviour and behavioural change. *Centre for Environmental Strategy, University of Surrey*.

Jain, A., & Kumar, A. (2021). Artificial intelligence in fashion industry: The next big thing. *International Journal of Information Management Data Insights*, 1(2), 100019. <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2021.100019>

Jaitly, D., & Desai, K. (2024). Artificial intelligence and the future of fashion: A systematic review on sustainable and circular practices. *2024 International Conference on Artificial Intelligence and Quantum Computation-Based Sensor Application (ICAIQSA)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICAIQSA64000.2024.10882435>

Jobin, A., Ienca, M., & Vayena, E. (2019). The global landscape of AI ethics guidelines. *Nature Machine Intelligence*, 1(9), 389–399.

Jung, J., Kim, J., Park, H., & Lee, H. (2025). Deep fashion designer: Generative adversarial networks for fashion item generation based on many-to-one image translation. *Electronics*, 14(2), 220. <https://doi.org/10.3390/electronics14020220>

Karaca, Ş. (2018). A study on determination of lifestyle effects on sustainable consumption behaviour. *Journal of Business Research - Turk*, 10(3), 1062–1080.

Karadayı-Usta, S. (2024). Role of artificial intelligence and augmented reality in fashion industry from consumer perspective: Sustainability through waste and return mitigation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108114. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108114>

Kalıpçıoğlu, C. (2023). Artificial intelligence and environmental sustainability. <https://escarus.com/yapay-zeka-ve-cevresel-surdurulebilirlik/>

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>

Khan, S., Tomar, S., Fatima, M., & Khan, M. (2022). Impact of artificial intelligent and Industry 4.0 based products on consumer behaviour characteristics: A meta-analysis-based review. *Sustainable Operations and Computers*. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.01.009>

Kohan Textile Journal. (2025, April 26). How artificial intelligence is transforming the textile industry for a smarter, sustainable future.

Kollmuss, A., & Agyeman, J. (2002). Mind the gap: Why do people act environmentally and what are the barriers to pro-environmental behavior? *Environmental Education Research*, 8(3), 239–260.

Kulkov, I., Kulkova, J., Rohrbeck, R., Menvielle, L., Kaartemo, V., & Makkonen, H. (2023). Artificial intelligence-driven sustainable development: Examining organizational, technical, and processing approaches to achieving global goals. *Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1002/sd.2773>

Köse, A., Canci Matur, U., & Tolon, E. (2025, July). The integration of artificial intelligence into renewable energy systems. In *Artificial intelligence and the future of humanity*. Ankara: Nobel Scientific Works

Lee, Y. (2022). How complex systems get engaged in fashion design creation: Using artificial intelligence. *Thinking Skills and Creativity*. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2022.101137>

Levi's. (2020). *The life cycle of a jean*. <https://www.levistrauss.com>

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>

Litman, T. (2020). Autonomous vehicle implementation predictions: Implications for transport planning. *Victoria Transport Policy Institute*, 20(1), 1–45.

L'Oréal Paris. (2025). *Virtual try-on: Try makeup looks online with ModiFace*. L'Oréal Paris UK. <https://www.loreal-paris.co.uk/service-detail-pages/make-up-try-on-detail-page>

Manzo, D., Jiang, Y., Elyan, E., & Isaacs, J. (2024). Artificial intelligence-based conversational agents used for sustainable fashion: Systematic literature review. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 41, 4640–4652. <https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2352920>

McLean, S., Read, G., Thompson, J., Baber, C., Stanton, N., & Salmon, P. (2021). The risks associated with artificial general intelligence: A systematic review. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 35, 649–663. <https://doi.org/10.1080/0952813X.2021.1964003>

Mehrotra, A., Hendricks, L. A., & Juels, A. (2021). Fairness and bias in AI recommender systems: A survey. *arXiv preprint arXiv:2109.00188*.

Miikkulainen-Gilbert, H. (2023). *Digital transformation: How can it provide the most value to fashion brands while enabling sustainable change?* (Master's thesis, Arcada University of Applied Sciences, Media Management). Theseus. <https://www.theseus.fi/handle/10024/799877>

MIT Sloan. (2025). Smart meters generate revenue, improve efficiency for public utilities. *MIT Sloan School of Management*. <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/smart-meters-generate-revenue-improve-efficiency-public-utilities>

Nam, T., & Pardo, T. A. (2011). Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions. *Proceedings of the 12th Annual International Digital Government Research Conference: Digital Government Innovation in Challenging Times* (pp. 282–291). ACM.

Nasirov, E. (2023). Applications of artificial intelligence in the marketing of iconic ready-to-wear brands [Master's thesis, İzmir Kâtip Çelebi University, Institute of Social Sciences]. İzmir Kâtip Çelebi University Open Access System.

Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 189–200. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>

Nguyen, A., Ngo, H., Hong, Y., Dang, B., & Nguyen, B. (2022). Ethical principles for artificial intelligence in education. *Education and Information Technologies*, 28, 4221–4241. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11316-w>

Oğuz, A. (2024). Consumer behavior in the era of AI-driven marketing. *Human Computer Interaction*.
<https://doi.org/10.62802/h9frxh42>

Pan, Y., & Zhang, L. (2021). Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. *Automation in Construction*, 122, 103517.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>

Raman, R., Gupta, A., & Singh, P. (2025). Circular economy transitions in textile, apparel, and fashion: AI-based topic modeling and SDG mapping. *Sustainability*, 17(4), 2356.
<https://doi.org/10.3390/su17042356>

Ramos, L., Rivas-Echeverría, F., Pérez, A., & Casas, E. (2023). Artificial intelligence and sustainability in the fashion industry: A review from 2010 to 2022. *SN Applied Sciences*, 5, 1–21.
<https://doi.org/10.1007/s42452-023-05587-2>

Rathore, B. (2019). Artificial intelligence in sustainable fashion marketing: Transforming the supply chain landscape. *Emerging Issues in Policy and Research Management Journal*, 8(2), 1–15.
<https://doi.org/10.56614/eiprmj.v8i2y19.363>

Rathore, B. (2023). AI and sustainability in the fashion industry: Demand forecasting to reduce overproduction. *Journal of Fashion Marketing and Management*, 27(3), 456–472.
<https://doi.org/10.1108/JFMM-03-2023-0045>

Reuters. (2025, June 4). *Amazon's delivery, logistics get an AI boost*. Retrieved September 4, 2025, from Reuters website.

Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., & Etzioni, O. (2020). Green AI. *Communications of the ACM*, 63(12), 54–63.
<https://doi.org/10.1145/3381831>

Sharma, A., & Jha, M. (2017). Values influencing sustainable consumption behaviour: Exploring the contextual relationship. *Journal of Business Research*, 76, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2017.03.010>

Sharma, A., & Sharma, R. (2024). Assessing the influence of artificial intelligence on sustainable consumption behavior and lifestyle choices. *Young Consumers*. <https://doi.org/10.1108/yc-09-2024-2214>

Smart city. (2021). *Istanbul 2030 smart city strategic plan*. https://www.akillisehir.istanbul/wp-content/uploads/2024/03/2030_Istanbul_Akilli_Sehir_Stratejik_Plani.pdf#page=40.13

Stella McCartney. (2020). *Annual sustainability report*. <https://www.stellamccartney.com/experience/en/sustainability/>

Ultralytics. (2024, November). The future of textile production with AI-driven manufacturing. <https://www.ultralytics.com/tr/blog/the-future-of-textile-production-with-ai-driven-manufacturing>

Uniqlo. (2023). *Uniqlo's pioneering role in revolutionizing in-store CX with Magic Mirror*. Medium. <https://medium.com/@akku03sinha/uniqlos-pioneering-role-in-revolutionizing-in-store-cx-8cf9c8f68b06>

Uzer, O., & Özaslan, A. (2023). Smart urban transportation experiments of Bursa and Antalya. *Journal of Intelligent Transportation Systems and Applications*, 6(2), 238–252. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1257238>

Vartumyan, A., Mikhailov, G., Galdin, E., Lavrova, T., & Orobinskaya, V. (2023). Risks associated with the use of artificial intelligence in various fields of science. *2023 5th International*

Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 434–438.
<https://doi.org/10.1109/SUMMA60232.2023.10349424>

Vermeir, I., & Verbeke, W. (2006). Sustainable food consumption: Exploring the consumer “attitude–behavioral intention” gap. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 19(2), 169–194.
<https://doi.org/10.1007/s10806-005-5485-3>

Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., ... & Nerini, F. F. (2020). The role of artificial intelligence in achieving the sustainable development goals. *Nature Communications*, 11(1), 233. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14108-y>

Warwick Evans Publishing. (2025, August 25). AI and big data in the fashion industry: Transforming supply chains, personalization, and sustainability through data driven innovation.

White, R. J., Habib, A., & Hardisty, D. J. (2019). How to SHIFT consumer behaviors to be more sustainable: A literature review and guiding framework. *Journal of Marketing*, 83(3), 22–49.
<https://doi.org/10.1177/0022242919825649>

Young, W., Hwang, K., McDonald, S., & Oates, C. J. (2010). Sustainable consumption: Green consumer behaviour when purchasing products. *Sustainable Development*, 18(1), 20–31.
<https://doi.org/10.1002/sd.394>

Zhang, D. (2024). The pathway to curb greenwashing in sustainable growth: The role of artificial intelligence. *Energy Economics*.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107562>

Zhang, J., & Zhang, Z. (2023). Ethics and governance of trustworthy medical artificial intelligence. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 23. <https://doi.org/10.1186/s12911-023-02103-9>

Zhang, X., Zhang, M., & Chen, L. (2020). Sustainable consumption and production in the fashion industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123660>

Zhang, Y., Li, H., & Sun, W. (2023). Green artificial intelligence: Reducing the carbon footprint of AI systems. *Sustainable Computing*, 18(2), 99–112.

Zhao, J., & Fariñas, B. (2022). Artificial intelligence and sustainable decisions. *European Business Organization Law Review*, 24, 1–39. <https://doi.org/10.1007/s40804-022-00262-2>

