

TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİNDE

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK, GÜVENLİK ve DÖNÜŞÜM

EDİTÖR:
Dr. Öğr. Üyesi
Ayşe ÖZKAL



SÜRDÜRÜLEBİLİR
TEKSTİL



GÜVENLİK
ve KALİTE



DÖNGÜSEL
EKONOMİ



DİJİTAL
DÖNÜŞÜM



BİDGE Yayınları

**Tekstil Mühendisliğinde Sürdürülebilirlik, Güvenlik ve
Dönüşüm**

Editör: AYŞE ÖZKAL

ISBN: 978-625-8821-59-8

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2026-06-25

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, günümüzde yalnızca geleneksel üretim süreçleriyle sınırlı kalmayan; çevre, kaynak kullanımı, ürün güvenliği ve performans gibi farklı boyutları bir arada değerlendiren bir mühendislik alanıdır. Artan üretim ve tüketim miktarları, tekstil sektörünün ekonomik değerini güçlendirirken; su, enerji, kimyasal madde kullanımı ve atık oluşumu gibi konuları da daha görünür hâle getirmiştir. Bu nedenle sürdürülebilirlik, döngüsel ekonomi ve yeşil dönüşüm yaklaşımları tekstil alanında giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Bu kitapta yer alan bölümler, tekstil sektörünün güncel konularını farklı yönleriyle ele almaktadır. Sürdürülebilir üretim teknolojileri, döngüsel ekonomi yaklaşımları ve yeşil dönüşüm, sektörün çevresel etkilerini azaltma ve kaynakları daha verimli kullanma hedefi açısından önem taşımaktadır. Bu kapsamda hammadde seçiminden üretim süreçlerine, ürün kullanımından kullanım sonrası değerlendirmeye kadar tüm aşamaların daha bilinçli şekilde ele alınması gerekmektedir. Tekstil ürünlerinden beklenen özellikler artık yalnızca estetik, konfor ve dayanıklılıkla sınırlı değildir; kullanım amacına uygun güvenlik ve performans gereklilikleri de ön plana çıkmaktadır.

Kitabın hazırlanmasında değerli katkılarıyla yer alan tüm bölüm yazarlarına teşekkür ederim. Ayrıca akademik yayıncılığa verdiği destek ve bu eserin okuyucularla buluşmasını sağladığı için BİDGE Yayınları'na teşekkürlerimi sunarım.

Editör

Dr. Öğretim Üyesi AYŞE ÖZKAL
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ VE DÖNGÜSEL EKONOMİ YAKLAŞIMLARI	1
<i>EMİNE BAKAN</i>	
TEKSTİL SEKTÖRÜNDE YEŞİL DÖNÜŞÜM	26
<i>GÜL ÖZKAN</i>	
TEKSTİLDE GÜÇ TUTUŞURLUK VE ALEV GECİKTİRİCİ UYGULAMA YÖNTEMERİ	42
<i>ŞEYMA YALÇIN TURAN, ALİ KARA</i>	

BÖLÜM 1

TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ VE DÖNGÜSEL EKONOMİ YAKLAŞIMLARI

EMİNE BAKAN¹

GİRİŞ

Tekstil endüstrisi, dünya ekonomisinin en büyük ve en dinamik üretim sektörlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Giyim, ev tekstili, teknik tekstiller ve endüstriyel uygulamalar gibi geniş bir kullanım alanına sahip olan tekstil ürünlerine yönelik talep, nüfus artışı, kentleşme, gelir seviyelerindeki yükselme ve değişen tüketim alışkanlıkları nedeniyle sürekli artış göstermektedir (Bakan, 2024).

Özellikle son yirmi yılda hızlı moda (fast fashion) anlayışının yaygınlaşması, tekstil ve hazır giyim üretim hacimlerinde önemli artışlara neden olmuş, buna bağlı olarak doğal kaynak tüketimi, enerji kullanımı ve çevresel etkiler de dikkat çekici boyutlara ulaşmıştır (Niinimäki, et al., 2020).

Tekstil sektörü, küresel ölçekte en fazla su tüketen ve çevresel kirletici oluşturan sektörlerden biri olarak değerlendirilmektedir.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Uşak Üniversitesi Ulubey Meslek Yüksek Okulu, Tasarım Bölümü, Orcid: 0000-0002-3463-4314

Elyaf üretiminden başlayarak iplikçilik, dokuma, örme, terbiye işlemleri, konfeksiyon üretimi, kullanım ve kullanım sonrası geri dönüşüm süreçlerine kadar uzanan ürün yaşam döngüsünün her aşamasında önemli miktarda enerji, su ve kimyasal madde kullanılmaktadır. Özellikle boyama departmanlarında renkleri ve toksik madde içerikleri nedeniyle çevresel riskler oluşturduğu bilinmektedir (Kant, 2012).

Avrupa Çevre Ajansı verilerine göre tekstil sektörü, gıda, konut ve ulaşım sektörlerinden sonra çevre üzerinde en fazla baskı oluşturan tüketim alanlarından biri olarak kabul edilmektedir. Avrupa Birliği ülkelerinde tekstil tüketiminin kişi başına yıllık yaklaşık 270 kg CO₂ eşdeğeri sera gazı emisyonuna ve önemli miktarda su kullanımına neden olduğu bildirilmektedir (Rovira, Souza, Nadal, & Domingo, 2025). Küresel ölçekte ise tekstil sektörünün toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %8–10'undan sorumlu olduğu tahmin edilmektedir (United Nations Environment Programme, 2023).

İklim değişikliği, biyolojik çeşitlilik kaybı, doğal kaynakların tükenmesi ve atık yönetimi sorunlarının giderek artması, üretim sistemlerinde sürdürülebilirlik temelli dönüşümleri zorunlu hale getirmiştir. Bu kapsamda "yeşil dönüşüm" kavramı son yıllarda akademik çevrelerde, sanayi kuruluşlarında ve politika yapıcı kurumlarda yoğun şekilde tartışılmaya başlanmıştır. Yeşil dönüşüm; ekonomik büyüme ile çevresel sürdürülebilirliğin birlikte ele alınmasını, kaynak verimliliğinin artırılmasını ve karbon emisyonlarının azaltılmasını hedefleyen kapsamlı bir dönüşüm süreci olarak tanımlanmaktadır (Peng, 2026). Tekstil sektöründe yeşil dönüşüm uygulamaları; sürdürülebilir hammaddelerin kullanımı, temiz üretim teknolojilerinin geliştirilmesi, enerji ve su verimliliğinin artırılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, kimyasal kullanımının azaltılması ve döngüsel ekonomi ilkelerinin benimsenmesi gibi çok boyutlu yaklaşımları

kapsamaktadır. Son yıllarda özellikle geri dönüştürülmüş lif kullanımı, kapalı çevrim üretim sistemleri, su tüketimini azaltan boyama teknolojileri ve karbon ayak izi yönetimi uygulamaları sektörün sürdürülebilirlik performansını iyileştirmeye yönelik önemli araçlar olarak öne çıkmaktadır (Shirvanimoghaddam, Motamed, Ramakrishna, & Naebe, 2021)

Döngüsel ekonomi yaklaşımı da tekstil sektöründeki yeşil dönüşüm sürecinin temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Geleneksel doğrusal ekonomi modelinde hammaddenin çıkarılması, ürün üretimi, tüketim ve bertaraf aşamalarından oluşan süreç yerine; ürünlerin yeniden kullanılması, onarılması, geri dönüştürülmesi ve sistem içerisinde mümkün olduğunca uzun süre tutulması hedeflenmektedir. Bu yaklaşım, hem kaynak kullanımını azaltmakta hem de atık oluşumunun önlenmesine katkı sağlamaktadır (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Avrupa Birliği tarafından yürürlüğe konulan Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal) ve Sürdürülebilir ve Döngüsel Tekstil Stratejisi gibi politikalar, tekstil sektörünün geleceğini doğrudan şekillendirmektedir. Özellikle karbon emisyonlarının azaltılması, ürün izlenebilirliğinin sağlanması ve dijital ürün pasaportu uygulamalarının yaygınlaştırılması, tekstil işletmeleri açısından yeni yükümlülükler ortaya çıkarmaktadır (European Commission, 2022). Türkiye gibi Avrupa Birliği ile yoğun ticari ilişkilere sahip ülkelerde faaliyet gösteren tekstil işletmelerinin de bu dönüşüm sürecine uyum sağlaması stratejik önem taşımaktadır.

Bu bölümde tekstil endüstrisinde yeşil dönüşüm kavramı kapsamlı biçimde ele alınmakta; sektörün çevresel etkileri, sürdürülebilir üretim teknolojileri, enerji ve su yönetimi uygulamaları, karbon ayak izi azaltım stratejileri, döngüsel ekonomi

yaklaşımları ve Avrupa Birliği düzenlemelerinin tekstil sektörüne etkileri güncel literatür ışığında değerlendirilmektedir.

TEKSTİL ENDÜSTRİSİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ

Tekstil endüstrisi, küresel ekonomide önemli bir üretim ve istihdam alanı oluşturmalarının yanında çevresel etkileri bakımından en yoğun kaynak kullanan sektörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Elyaf üretiminden nihai ürünün kullanım ömrünün sonuna kadar geçen süreçte yüksek miktarda su, enerji ve kimyasal madde tüketilmekte; bunun sonucunda hava, su ve toprak kirliliği ile sera gazı emisyonları meydana gelmektedir. Son yıllarda sürdürülebilirlik alanında gerçekleştirilen araştırmalar, tekstil sektörünün çevresel etkilerinin yalnızca üretim aşamasıyla sınırlı olmadığını, ürün yaşam döngüsünün tamamında önemli çevresel yükler oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Niinimäki, et al., 2020).

Su Tüketimi

Tekstil sektörünün en önemli çevresel etkilerinden biri yoğun su tüketimidir. Özellikle lif üretimi, ön terbiye işlemleri, boyama, baskı ve bitim işlemleri büyük miktarlarda su kullanımını gerektirmektedir. Pamuk üretimi bu açıdan dikkat çekici bir örnektir. Bir kilogram pamuk lifi üretimi için yaklaşık 10.000–20.000 litre arasında su tüketildiği bildirilmektedir (Mekonnen & Hoekstra, 2011). Tekstil terbiye süreçlerinde de kullanılan su miktarı kumaş türüne, üretim teknolojisine ve proses parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte, bir kilogram tekstil ürününün işlenmesi sırasında 100–200 litre su kullanılabildiği bildirilmektedir (Hasanbeigi & Price, 2015).

Su tüketiminin yanı sıra tekstil sektörünün neden olduğu su kirliliği de önemli bir çevresel problemdir. Dünya genelinde endüstriyel atık suların yaklaşık %20'sinin tekstil boyama ve terbiye

işlemlerinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir (United Nations Environment Programme, 2023).

Enerji Tüketimi

Tekstil üretim süreçleri yüksek enerji gereksinimine sahiptir. Lif üretimi, iplikçilik, dokuma, örme, boyama, kurutma ve fıkse işlemleri enerji yoğun prosesler arasında yer almaktadır. Enerji tüketiminin önemli bir bölümü fosil yakıtlardan karşılandığında yüksek miktarda sera gazı emisyonu ortaya çıkmaktadır. Hasanbeigi ve Price (2015), tekstil sektöründe toplam enerji tüketiminin yaklaşık %34'ünün iplik üretiminde, %23'ünün dokuma işlemlerinde ve %38'inin yaş terbiye işlemlerinde gerçekleştiğini bildirmiştir (Hasanbeigi & Price, 2015). Özellikle boyama ve kurutma işlemleri sırasında gerekli olan termal enerji tüketimi sektörün karbon ayak izini artırmaktadır. Küresel ölçekte tekstil ve moda sektörünün yıllık yaklaşık 1,2 milyar ton CO₂ eşdeğeri sera gazı emisyonuna neden olduğu belirtilmektedir. Bu miktar uluslararası havacılık ve deniz taşımacılığının toplam emisyonlarından daha yüksektir (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Kimyasal Kullanımı

Tekstil sektörü çok sayıda kimyasal maddenin kullanıldığı bir üretim alanıdır. Günümüzde ticari olarak kullanılan tekstil kimyasallarının sayısının 8.000'in üzerinde olduğu tahmin edilmektedir (Angold, 2024). Üretim süreçlerinde kullanılan başlıca kimyasallar: boyarmaddeler, ağartıcılar, haşıl maddeleri, yumuşatıcılar, su iticiler, alev geciktiriciler, antimikrobiyal ajanlar, pH düzenleyicilerdir. Bu kimyasalların önemli bir kısmı çevresel risk oluşturmaktadır. Özellikle azo boyarmaddelerden türeyen aromatik aminler, perflorlu bileşikler (PFAS), formaldehit içeren reçineler ve bazı ağır metaller çevresel ve toksikolojik açıdan dikkat çekmektedir (European Commission, 2022).

Mikroplastik Kirliliği

Son yıllarda tekstil sektörünün neden olduğu mikroplastik kirliliği önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir. Polyester, poliamid ve akrilik gibi sentetik liflerden üretilen tekstil ürünleri kullanım ve yıkama sırasında mikrofiber salımı gerçekleştirmektedir. Browne (2015), evsel çamaşır yıkama işlemlerinin denizel ortamlarda tespit edilen mikroplastiklerin önemli kaynaklarından biri olduğunu ortaya koymuştur (Browne, 2015). Yapılan araştırmalar sentetik tekstillerden kaynaklanan mikroplastiklerin dünya okyanuslarına ulaşan toplam mikroplastik yükünün yaklaşık %35'ini oluşturduğunu göstermektedir (Rovira, Souza, Nadal, & Domingo, 2025). Mikroplastikler; balıklar, kabuklular, deniz memelileri ve kuşlar tarafından tüketilebilmekte ve besin zinciri boyunca taşınabilmektedir. Bu durum hem ekosistem sağlığı hem de insan sağlığı açısından potansiyel riskler oluşturmaktadır.

Tekstil Atıkları ve Katı Atık Problemi

Tekstil sektörünün bir diğer önemli çevresel etkisi atık oluşumudur. Tekstil atıkları genel olarak üretim öncesi ve tüketim sonrası atıklar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Üretim öncesi atıklar; kesim artıkları, hatalı ürünler, iplik ve kumaş fireleri olabilmektedir. Tüketim sonrası atıklar ise kullanım ömrünü tamamlamış tekstil ürünlerini kapsamaktadır.

Avrupa Birliği verilerine göre her yıl yaklaşık 12,6 milyon ton tekstil atığı oluşmaktadır. Bunun önemli bir kısmı düzenli depolama sahalarına gönderilmekte veya yakılarak bertaraf edilmektedir (Textiles, E. E. A., 2022).

Hızlı moda anlayışı, ürünlerin kullanım sürelerini önemli ölçüde azaltmıştır. Ellen MacArthur Foundation (2017) tarafından yayımlanan raporda, son 15 yılda bir giysinin ortalama kullanım

süresinin yaklaşık %36 oranında azaldığı belirtilmektedir. Bu durum tekstil atıklarının hızla artmasına neden olmaktadır (Ellen MacArthur Foundation, 2017) (Bakan, 2024).

Yaşam Döngüsü Perspektifinden Çevresel Etkiler

Tekstil ürünlerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesinde yaşam döngüsü analizi (Life Cycle Assessment-LCA) önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Yaşam döngüsü yaklaşımı, hammaddenin elde edilmesinden başlayarak üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarını kapsamaktadır. Çeşitli araştırmalar, tekstil ürünlerinin çevresel etkilerinin farklı aşamalarda yoğunlaştığını göstermektedir. Pamuklu ürünlerde su tüketimi çoğunlukla tarımsal üretim aşamasında gerçekleşirken, sentetik liflerde enerji tüketimi ve karbon emisyonları lif üretimi aşamasında yoğunlaşmaktadır (Niinimäki, et al., 2020). Benzer şekilde tüketici davranışları da çevresel performansı önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Yıkama sıklığı, kurutucu kullanımı, ütöleme alışkanlıkları ve ürün kullanım süresi tekstil ürünlerinin toplam çevresel etkilerinde belirleyici rol oynamaktadır.

TEKSTİL SEKTÖRÜNDE YEŞİL DÖNÜŞÜM

Sanayi Devrimi ile hız kazanan ekonomik büyüme, doğal kaynakların yoğun kullanımı ve çevresel baskıların artmasına neden olmuştur. Özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren hava, su ve toprak kirliliği, iklim değişikliği, biyolojik çeşitlilik kaybı ve doğal kaynakların tükenmesi gibi küresel çevre sorunlarının belirgin hale gelmesi, ekonomik kalkınma ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişkinin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu süreçte sürdürülebilir kalkınma ve yeşil büyüme kavramları ön plana çıkmış, bunların uygulama boyutunu oluşturan "yeşil dönüşüm" yaklaşımı birçok sektörde olduğu gibi tekstil sektöründe de stratejik bir gereklilik haline gelmiştir (Perez-Canto & Doblas-Flrido).

Yeşil dönüşüm, ekonomik faaliyetlerin çevresel etkilerinin azaltılması amacıyla üretim ve tüketim sistemlerinin yeniden yapılandırılmasını ifade etmektedir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) yeşil dönüşümü; karbon emisyonlarının azaltıldığı, kaynak verimliliğinin artırıldığı ve ekosistem hizmetlerinin korunduğu ekonomik dönüşüm süreci olarak tanımlamaktadır (United Nations Environment Programme, 2023).

Tekstil sektörü açısından değerlendirildiğinde yeşil dönüşüm; hammadde temininden ürünün kullanım ömrü sonuna kadar olan tüm süreçlerde çevresel etkilerin azaltılmasını hedefleyen bütüncül bir yönetim anlayışını ifade etmektedir. Bu yaklaşım yalnızca çevresel performansın iyileştirilmesini değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik, sosyal sorumluluk ve kurumsal yönetim ilkelerinin de üretim süreçlerine entegre edilmesini kapsamaktadır.

Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve Tekstil Sektörü

Yeşil dönüşüm kavramının küresel ölçekte yaygınlaşmasında Birleşmiş Milletler tarafından 2015 yılında kabul edilen Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (Sustainable Development Goals-SDGs) önemli rol oynamıştır. Toplam 17 amaçtan oluşan bu hedefler arasında özellikle tekstil sektörü ile doğrudan ilişkili olanlar aşağıda sıralanmıştır (United Nations, 2016):

- Amaç 6: Temiz Su ve Sanitasyon
- Amaç 7: Erişilebilir ve Temiz Enerji
- Amaç 8: İnsana Yakışır İş ve Ekonomik Büyüme
- Amaç 9: Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı
- Amaç 12: Sorumlu Üretim ve Tüketim
- Amaç 13: İklim Eylemi

- Amaç 14: Sudaki Yaşam
- Amaç 15: Karasal Yaşam

Tekstil üretim süreçlerinde yoğun su ve enerji kullanımı nedeniyle özellikle Amaç 6, Amaç 7 ve Amaç 12 ile doğrudan ilişki bulunmaktadır. Benzer şekilde karbon emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliği ile mücadele kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar da Amaç 13 ile bağlantılıdır.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları, tekstil işletmelerine yalnızca çevresel yükümlülükler getirmemekte, aynı zamanda sürdürülebilir üretim uygulamalarını benimseyen işletmeler için yeni pazar fırsatları da yaratmaktadır. Son yıllarda çevresel performans göstergeleri, uluslararası markaların tedarikçi seçim kriterleri arasında giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Temiz Üretim Yaklaşımı

Temiz üretim, kirliliğin oluşmadan önlenmesini esas alan bir çevre yönetim stratejisidir. Geleneksel çevre koruma anlayışında kirleticiler oluştuğundan sonra arıtılırken, temiz üretim yaklaşımında kirleticilerin oluşumunun önlenmesi amaçlanmaktadır. Tekstil sektöründe temiz üretim uygulamaları; düşük su tüketimli prosesler, ozon teknolojileri, plazma uygulamaları, enzim teknolojileri ve süperkritik karbondioksit boyama sistemleri gibi yenilikçi çözümleri içermektedir (Hasanbeigi & Price, 2015). Bu teknolojiler sayesinde hem çevresel etkiler azaltılmakta hem de üretim maliyetlerinde tasarruf sağlanabilmektedir.

Su Ayak İzi Yönetimi

Tekstil endüstrisi, elyaf üretiminden boyama ve terbiye işlemlerine kadar uzanan üretim zinciri boyunca yoğun su tüketimi nedeniyle küresel ölçekte en fazla su kullanan sektörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle yaş işlemler, sektörün toplam su

tüketiminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Su kaynakları üzerindeki baskının artması, iklim değişikliği ve su kıtlığı riskleri, tekstil sektöründe su yönetiminin stratejik önemini artırmıştır (Mekonnen & Hoekstra, 2011) (United Nations Environment Programme, 2023). Bu kapsamda su ayak izi, bir ürünün üretimi sırasında doğrudan ve dolaylı olarak tüketilen ve kirletilen toplam tatlı su miktarını ifade eden önemli bir sürdürülebilirlik göstergesi olarak öne çıkmaktadır (Hoekstra, 2011). Tekstil ürünlerinde su ayak izi, kullanılan hammaddeye ve üretim süreçlerine bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Özellikle pamuklu tekstil ürünlerinin su ayak izi oldukça yüksektir. Bir kilogram pamuk lifi üretimi için yaklaşık 10.000–20.000 litre su tüketildiği, boyama ve terbiye işlemlerinde ise bir kilogram tekstil ürününün işlenmesi için 100–200 litre arasında su kullanılabildiği bildirilmektedir (Alper, 2015) (Hasanbeigi & Price, 2015).

Tekstil sektöründe su ayak izinin azaltılması amacıyla son yıllarda çeşitli sürdürülebilir uygulamalar geliştirilmiştir. Düşük flotte oranlı boyama sistemleri, köpük boyama teknolojileri, süperkritik karbondioksit ile boyama, kapalı devre su geri kazanım sistemleri ve membran filtrasyon teknolojileri bunların başlıcalarıdır. Ayrıca atık suların arıtılarak yeniden kullanılması, su verimliliğinin artırılmasına ve su kaynaklarının korunmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Dijital teknolojiler de su yönetiminde yeni olanaklar sunmaktadır. Sensör teknolojileri, Nesnelerin İnterneti ve büyük veri analitiği sayesinde su tüketimi gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte, anormal tüketim durumları belirlenerek proses optimizasyonu gerçekleştirilebilmektedir (Ghoreishi, Happonen, & Pynnönen, 2020, February).

Su ayak izi yönetimi yalnızca çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, ekonomik açıdan da önemli kazanımlar

sağlamaktadır. Su tüketiminin azaltılması, işletme maliyetlerini ve atık su arıtma giderlerini düşürürken, Avrupa Birliği'nin sürdürülebilir üretim politikaları ve artan tüketici beklentileri de tekstil işletmelerini su ayak izlerini ölçmeye ve azaltmaya yönlendirmektedir. Bu nedenle su ayak izi yönetimi, tekstil sektöründe sürdürülebilir üretim anlayışının temel bileşenlerinden biri haline gelmiş olup, gelecekte dijitalleşme ve kapalı çevrim üretim sistemleri ile daha etkin bir yapıya kavuşması beklenmektedir.

Karbon Ayak İzi Yönetimi

Tekstil endüstrisi, yüksek enerji tüketimi, karmaşık tedarik zinciri yapısı ve yoğun hammadde kullanımı nedeniyle küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumludur. Küresel ölçekte tekstil ve moda sektörünün toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %8–10'unu oluşturduğu tahmin edilmektedir (United Nations Environment Programme, 2023). Bu nedenle karbon ayak izi yönetimi, tekstil sektöründe sürdürülebilirlik stratejilerinin temel unsurlarından biri haline gelmiştir.

Karbon ayak izi, bir ürünün, hizmetin veya kuruluşun yaşam döngüsü boyunca neden olduğu sera gazı emisyonlarının karbondioksit eşdeğeri (CO₂-eşdeğeri) cinsinden toplamını ifade etmektedir (ISO 14067:2018, 2026). Tekstil sektöründe karbon ayak izi değerlendirmeleri çoğunlukla yaşam döngüsü analizi (LCA) yaklaşımı ile gerçekleştirilmektedir.

Karbon emisyonları, tekstil değer zincirinin farklı aşamalarında ortaya çıkmaktadır. Hammadde üretimi, özellikle sentetik liflerin üretiminde kullanılan petrokimyasal süreçler nedeniyle yüksek karbon yoğunluğuna sahiptir. Polyester üretimi, sektörün en yüksek emisyon oluşturan faaliyetlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Niinimäki, et al., 2020). Bunun yanında iplik üretimi, dokuma ve örme işlemleri elektrik tüketimine bağlı

emisyonlara neden olurken, boyama ve terbiye işlemleri yüksek termal enerji gereksinimleri nedeniyle önemli miktarda karbon salımına yol açmaktadır. Küresel tedarik zincirleri ve uzun mesafeli taşımacılık da sektörün toplam karbon ayak izini artırmaktadır.

Karbon emisyonlarının azaltılması amacıyla enerji verimliliği uygulamaları, yüksek verimli motorlar, proses optimizasyonu ve ısı geri kazanım sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca güneş, rüzgâr ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile geri dönüştürülmüş polyester, organik pamuk ve biyobazlı lifler gibi sürdürülebilir hammaddelerin tercih edilmesi, toplam emisyonların azaltılmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Avrupa Yeşil Mutabakatı, Paris İklim Anlaşması ve kurumsal sürdürülebilirlik raporlama standartları, tekstil işletmelerini karbon ayak izlerini ölçmeye ve azaltmaya yönlendirmektedir. Günümüzde karbon yönetimi yalnızca çevresel bir gereklilik değil, aynı zamanda uluslararası rekabet gücünü belirleyen stratejik bir unsur olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle karbon ayak izi yönetimi, tekstil sektörünün düşük karbonlu ve sürdürülebilir üretim modeline geçişinde kritik bir öneme sahip olup, gelecekte karbon nötr üretim sistemleri ve yenilenebilir enerji uygulamalarının daha da yaygınlaşacağı öngörülmektedir.

Döngüsel Ekonomi Uygulamaları

Döngüsel ekonomi, yeşil dönüşümün temel yapı taşlarından biridir. Geleneksel doğrusal ekonomi modelinde ürünler üretilmekte, tüketilmekte ve kullanım sonrasında atık haline gelmektedir. Döngüsel ekonomi yaklaşımında ise ürünlerin yeniden kullanılması, tamir edilmesi, geri dönüştürülmesi ve sistem içerisinde mümkün olduğunca uzun süre tutulması amaçlanmaktadır (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Tekstil sektöründe döngüsel ekonomi uygulamaları;

- Geri dönüştürülmüş lif kullanımı,
- Tekstil atıklarının geri kazanımı,
- Yeniden kullanım sistemleri,
- Sürdürülebilir ürün tasarımı,
- Modüler ürün geliştirme,
- İleri dönüşüm gibi uygulamaları kapsamaktadır.

Tekstil Sektöründe Yeşil Dönüşümün Sağladığı Faydalar

Yeşil dönüşüm uygulamalarının işletmelere sağladığı avantajlar yalnızca çevresel kazanımlarla sınırlı değildir. Üretim maliyetlerinin azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması, su tüketiminin azaltılması, atık yönetim maliyetlerinin düşürülmesi, kurumsal itibarın güçlenmesi, Uluslararası pazarlara erişimin kolaylaşması, yasal uyumun sağlanması, sürdürülebilir finansman kaynaklarına erişimin artması gibi birçok avantajı bulunmaktadır. Bu nedenle yeşil dönüşüm günümüzde yalnızca çevresel bir gereklilik değil, aynı zamanda işletmeler açısından stratejik bir rekabet unsuru olarak değerlendirilmektedir.

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

Tekstil endüstrisinde yeşil dönüşümün en kritik bileşenlerinden biri, üretim süreçlerinde kullanılan teknolojilerin çevresel etkileri minimize edecek şekilde yeniden tasarlanmasıdır. Geleneksel tekstil üretiminde özellikle yaş işlemler; yüksek su, enerji ve kimyasal kullanımına bağlı olarak ciddi çevresel yük oluşturmaktadır. Bu nedenle son yıllarda sürdürülebilir üretim teknolojileri, hem akademik araştırmaların hem de endüstriyel Ar-Ge faaliyetlerinin merkezinde yer almaktadır (Tobler-Rohr, 2011). Sürdürülebilir tekstil teknolojileri, kirliliğin oluşmadan önlenmesini,

kaynak kullanımının optimize edilmesini ve üretim süreçlerinin daha düşük çevresel ayak izi ile gerçekleştirilmesini hedeflemektedir. Bu kapsamda geliştirilen yeni nesil prosesler, klasik üretim tekniklerine alternatif oluşturarak tekstil sektöründe yapısal bir dönüşüm yaratmaktadır.

Süperkritik Karbondioksit ile Boyama Teknolojisi

Süperkritik karbondioksit ($scCO_2$) teknolojisi, tekstil boyama proseslerinde su kullanımını ortadan kaldıran en yenilikçi yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Karbondioksitin kritik sıcaklık ve basıncın üzerinde süperkritik faza geçmesiyle oluşan bu ortam, hem gaz hem de sıvı özelliklerini birlikte taşımaktadır. Bu özellik sayesinde boyarmaddelerin lif içerisine taşınması mümkün olmaktadır (Bechtold, Turcanu, Geissler, & Campagne, 2006). Bu yöntemin en önemli avantajı, su kullanımını tamamen ortadan kaldırmasıdır. Böylece hem atık su oluşumu engellenmekte hem de atık su arıtma maliyetleri ortadan kalkmaktadır. Ayrıca işlem sonunda kumaş üzerinde herhangi bir kurutma işlemi gerekmemesi enerji tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır (Ren, Tabata, & Hirogaki, 2026). Bunların yanında teknolojinin yüksek yatırım maliyeti ve ekipman gereksinimi, yaygınlaşmasının önündeki temel sınırlayıcı faktörler arasında yer almaktadır.

Ozon Teknolojileri

Ozon (O_3) güçlü bir oksidasyon ajanı olarak tekstil sektöründe özellikle ağartma ve yüzey işlemlerinde kullanılmaktadır. Geleneksel klor bazlı ağartma işlemlerine alternatif olarak geliştirilen ozon teknolojisi, çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir seçenek sunmaktadır. Denim sektöründe taş yıkama ve ağartma işlemleri için ozon gazı kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Bu yöntem sayesinde su tüketimi önemli ölçüde azaltılmakta ve kimyasal kullanımına olan bağımlılık düşmektedir (Eren, Yiğit, Eren, & Avinc, 2020). Düşük su tüketimi, kimyasal

kullanımının azaltılması, daha kısa proses süreleri, düşük atık su yükü, enerji tasarrufu ozon teknolojilerinin avantajlarıdır. Ancak ozonun yüksek reaktivitesi nedeniyle proses kontrolü dikkatli yapılmalı ve güvenlik önlemleri titizlikle uygulanmalıdır.

Plazma Teknolojisi

Plazma teknolojisi, tekstil yüzeylerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmek amacıyla kullanılan çevre dostu bir yüzey modifikasyon yöntemidir. Bu teknoloji özellikle su iticilik, hidrofiliklik, boya tutunması ve antimikrobiyal özelliklerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır (Shishoo, 2007). Plazma işleminin en önemli avantajı, kimyasal kullanımına ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu durum hem çevresel yükü azaltmakta hem de atık oluşumunu minimize etmektedir. Ayrıca işlem yalnızca yüzeyde gerçekleştiği için lifin hacimsel özellikleri korunmaktadır.

Enzim Teknolojileri

Enzimler, biyolojik katalizörler olarak tekstil proseslerinde çevre dostu alternatifler sunmaktadır. Geleneksel kimyasal işlemlere kıyasla daha düşük sıcaklıklarda ve daha seçici reaksiyonlar gerçekleştirebilmeleri nedeniyle sürdürülebilir üretim açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Enzim teknolojileri sayesinde su ve enerji tüketimi azalmakta, kimyasal kullanım ihtiyacı düşmekte ve daha yumuşak tuşeli tekstil ürünleri elde edilmektedir (Ravindran, Hassan, Williams, & Jaiswal, 2018).

Dijital Baskı Teknolojileri

Dijital tekstil baskı teknolojileri, geleneksel baskı yöntemlerine göre daha az su ve kimyasal tüketimi gerektiren modern üretim teknikleridir. Bu sistemlerde desenler doğrudan bilgisayar ortamında hazırlanmakta ve baskı işlemi dijital olarak gerçekleştirilmektedir.

Dijital baskının avantajları:

- Minimum su tüketimi,
- Azaltılmış kimyasal kullanım,
- Düşük stok ihtiyacı,
- Kişiselleştirilmiş üretim imkânı,
- Daha az atık oluşumu.

Özellikle hızlı moda sektöründe küçük parti üretimlere olan talep, dijital baskı teknolojilerinin önemini artırmıştır.

Düşük Flotte Oranlı ve Susuz Boyama Sistemleri

Geleneksel boyama proseslerinde yüksek flotte oranları nedeniyle büyük miktarda su kullanılmaktadır. Yeni nesil makinelerde geliştirilen düşük flotte oranlı sistemler, su tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bunun yanı sıra köpük boyama ve susuz boyama teknolojileri, tekstil sektöründe su kullanımını minimize eden önemli yenilikler arasında yer almaktadır.

Akıllı Üretim ve Endüstri 4.0 Uygulamaları

Endüstri 4.0 teknolojilerinin tekstil sektörüne entegrasyonu, üretim süreçlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hale gelmesini sağlamaktadır. Sensör teknolojileri, büyük veri analitiği ve yapay zekâ uygulamaları sayesinde proses kontrolü optimize edilmektedir.

Bu sistemler ile su ve enerji tüketimi gerçek zamanlı izlenebilmekte, kimyasal dozajı optimize edilebilmekte, hata oranları azaltılabilmekte ve üretim verimliliği artırılabilmektedir (Ghoreishi, Haponen, & Pynnönen, 2020, February).

Sürdürülebilir üretim teknolojileri, tekstil endüstrisinin çevresel etkilerini azaltmada kritik rol oynamaktadır. Süperkritik CO₂ boyama, plazma teknolojisi, ozon uygulamaları, enzim

sistemleri ve dijital üretim teknikleri, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha düşük çevresel ayak izi sunmaktadır. Bununla birlikte bu teknolojilerin yaygınlaşması için ekonomik fizibilite, yatırım maliyetleri ve endüstriyel ölçeklenebilirlik gibi faktörlerin de dikkate alınması gerekmektedir. Gelecekte yapay zekâ destekli üretim sistemlerinin ve biyoteknolojik çözümlerin tekstil üretim süreçlerinde daha baskın hale gelmesi beklenmektedir.

DÖNGÜSEL EKONOMİ VE TEKSTİL GERİ DÖNÜŞÜMÜ

Tekstil endüstrisinde sürdürülebilirlik dönüşümünün en önemli bileşenlerinden biri döngüsel ekonomi yaklaşımıdır. Küresel ölçekte her yıl yaklaşık 100 milyon ton tekstil üretilmekte ve bunun önemli bir kısmı kullanım ömrünü tamamladıktan sonra çöpe gönderilmektedir (Kastacı & Özek, 2024). Bu nedenle tekstil sisteminin lineer “üret–tüket–at” modelinden, kaynakların değerini mümkün olduğunca uzun süre koruyan döngüsel ekonomi modeline evrilmesi kritik bir gereklilik haline gelmiştir (Wojciechowska, 2021). Ayrıca döngüsel ekonomi modeli, kaynakların mümkün olduğunca uzun süre sistem içerisinde tutulmasını, yeniden kullanılmasını ve geri kazanılmasını amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, tekstil sektöründe hammadde verimliliğinin artırılması, atık oluşumunun azaltılması ve sürdürülebilir üretim sistemlerinin geliştirilmesi açısından son yıllarda zorunluluk haline gelmiştir.

Döngüsel Ekonomi Yaklaşımı ve Tekstil Sektörü

Döngüsel ekonomi yalnızca geri dönüşüm süreçlerini değil; ürün tasarımı, üretim, tüketim ve kullanım sonrası yönetimi kapsayan bütüncül bir sistem yaklaşımını ifade etmektedir. Bu modelde ürünler atık olarak değil, yeniden değerlendirilebilir kaynaklar olarak görülmektedir. Temel amaç; atık ve kirliliğin tasarım aşamasında önlenmesi, ürün ve materyallerin kullanımda tutulması ve doğal sistemlerin yeniden canlandırılmasıdır.

Avrupa Birliği'nin Sürdürülebilir ve Döngüsel Tekstil Stratejisi, 2030 yılına kadar piyasaya sunulan tekstil ürünlerinin büyük ölçüde geri dönüştürülebilir, dayanıklı ve sürdürülebilir materyallerden oluşmasını hedeflemektedir (European Commission, 2022). Bu durum, tekstil sektöründe ürün yaşam döngüsünün yeniden tasarlanmasını ve kaynak kullanımının minimize edilmesini zorunlu hale getirmektedir.

Tekstil Atıklarının Geri Dönüşümü ve Döngüsel Uygulamalar

Tekstil atıkları genel olarak üretim öncesi ve tüketim sonrası atıklar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Üretim öncesi atıklar; kesim artıkları, iplik ve kumaş fireleri ile hatalı üretimlerden oluşurken, tüketim sonrası atıklar kullanım ömrünü tamamlamış giysi ve ev tekstili ürünlerini kapsamaktadır. Avrupa Birliği'nde her yıl yaklaşık 12-15 milyon ton tekstil atığı oluştuğu ve bunun önemli bir kısmının geri kazanılmadan bertaraf edildiği bildirilmektedir (European Commission, 2022).

Tekstil geri dönüşümünde en yaygın yöntemler mekanik ve kimyasal geri dönüşümdür. Mekanik geri dönüşüm, atık tekstillerin fiziksel işlemlerle yeniden lif haline getirilmesini içerirken, kimyasal geri dönüşümde polimer zincirleri moleküler düzeyde parçalanarak yeniden hammadde elde edilmektedir (Sandin & Peters, 2018). Son yıllarda gelişen fiber-to-fiber geri dönüşüm teknolojileri ise tekstil atıklarının tekrar tekstil lifine dönüştürülmesini mümkün kılarak kapalı döngü üretim sistemlerinin gelişimine katkı sağlamaktadır.

Döngüsel ekonomi kapsamında upcycling ve downcycling uygulamaları da önem taşımaktadır. Upcycling, atık materyallerin daha yüksek değerli ürünlere dönüştürülmesini ifade ederken, downcycling atıkların daha düşük değerli ürünlerde kullanılmasını ifade etmektedir. Özellikle geri dönüştürülmüş iplik, izolasyon malzemeleri ve dolgu ürünleri tekstil sektöründeki yaygın uygulamalar arasında yer almaktadır.

Tekstil Sektöründe Gelecek Perspektifi ve Politika Yaklaşımları

Tekstil sektöründe döngüsel ekonominin başarısı, yalnızca geri dönüşüm teknolojilerine değil, aynı zamanda politika düzenlemelerine ve dijital izlenebilirlik sistemlerine de bağlıdır. Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR) uygulamaları, üreticilerin ürünlerinin kullanım ömrü sonrasındaki çevresel etkilerinden de sorumlu tutulmasını öngörmektedir. Bunun yanında dijital ürün pasaportu uygulamaları, ürünlerin hammadde içeriği, üretim süreçleri ve geri dönüştürülebilirlik bilgilerinin izlenmesini sağlayarak geri dönüşüm süreçlerinin etkinliğini artırmaktadır (European Commission, 2022). Sonuç olarak döngüsel ekonomi yaklaşımı, tekstil sektöründe sürdürülebilir üretim modeline geçişin temel yapı taşlarından biridir. Mekanik ve kimyasal geri dönüşüm teknolojileri, fiber-to-fiber sistemler ve dijital izlenebilirlik uygulamaları, tekstil atıklarının etkin yönetimini mümkün kılmaktadır. Gelecekte geri dönüşüm odaklı ürün tasarımı ve kapalı döngü üretim sistemlerinin tekstil sektöründe standart uygulamalar haline gelmesi beklenmektedir.

DİJİTAL ÜRÜN PASAPORTU UYGULAMALARI

Dijital Ürün Pasaportu (Digital Product Passport-DPP), bir ürünün yaşam döngüsüne ilişkin çevresel, teknik ve ekonomik verilerin dijital ortamda saklanması ve erişilebilir olmasını sağlayan yenilikçi bir izlenebilirlik sistemidir. Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında geliştirilen bu uygulama, özellikle tekstil sektöründe şeffaflık, izlenebilirlik ve döngüsel ekonomi hedeflerinin gerçekleştirilmesinde stratejik bir araç olarak değerlendirilmektedir (Zhang & Seuring, 2024).

Tekstil ürünlerinin hammaddeden kullanım ömrü sonuna kadar birçok farklı üretim aşamasından geçmesi, tedarik zincirinde veri yönetimini ve ürün izlenebilirliğini zorlaştırmaktadır. Dijital ürün pasaportu sistemi; hammadde kaynağı, üretim süreçleri,

kullanılan kimyasallar, su ve enerji tüketimi, karbon ayak izi ve geri dönüştürülebilirlik bilgileri gibi verilerin QR kod, RFID ve blok zinciri tabanlı teknolojiler aracılığıyla kayıt altına alınmasını mümkün kılmaktadır (Saberi, Kouhizadeh, Sarkis, & Shen, 2019). Böylece hem üreticiler hem de tüketiciler ürünlerin çevresel performansına ilişkin güvenilir bilgilere erişebilmektedir.

Dijital ürün pasaportu, geri dönüşüm süreçlerinin kolaylaştırılması, malzeme akışlarının izlenmesi ve ürün yaşam süresinin uzatılması yoluyla döngüsel ekonomiye önemli katkılar sağlamaktadır. Ayrıca sürdürülebilir tüketim davranışlarını teşvik ederek çevresel performansı yüksek ürünlerin tercih edilmesini desteklemektedir. Avrupa Birliği'nde birçok ürün grubunda zorunlu hale getirilmesi planlanan bu sistemin, gelecekte yapay zekâ destekli veri analitiği ve gerçek zamanlı sürdürülebilirlik raporlaması ile daha da gelişerek tekstil sektöründe veri temelli sürdürülebilirlik yönetiminin temel bileşenlerinden biri haline gelmesi beklenmektedir (United Nations Environment Programme, 2023) (World Economic Forum, 2023).

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Tekstil endüstrisi, yüksek su ve enerji tüketimi, yoğun kimyasal kullanımı, sera gazı emisyonları ve artan atık miktarı nedeniyle çevresel etkileri en yüksek sektörlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Hızlı moda anlayışının yaygınlaşması ve küresel tekstil tüketiminin artması, sektörün sürdürülebilirlik odaklı bir dönüşüm sürecine girmesini zorunlu hale getirmiştir.

Bu bölümde ele alınan yeşil dönüşüm yaklaşımları, sürdürülebilir üretim teknolojileri, su ve karbon ayak izi yönetimi, döngüsel ekonomi uygulamaları ve dijital ürün pasaportu sistemleri, tekstil sektörünün çevresel etkilerinin azaltılmasında önemli araçlar olarak öne çıkmaktadır. Özellikle süperkritik karbondioksit ile boyama, plazma ve ozon uygulamaları, enzim teknolojileri ve dijital

Üretim sistemleri, kaynak verimliliğinin artırılmasına ve üretim sreğlerinin daha düşük çevresel ayak iziyle gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bununla birlikte sürdürülebilir dönüşümün yalnızca teknolojik yeniliklerle sınırlı olmadığı, aynı zamanda politika düzenlemeleri, tüketici davranışları, tedarik zinciri yönetimi ve kurumsal sürdürülebilirlik stratejileri ile desteklenmesi gerektiği görülmektedir. Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Sürdürülebilir ve Döngüsel Tekstil Stratejisi gibi düzenlemeler, özellikle Avrupa Birliği pazarına ihracat yapan işletmeler açısından yeni yükümlülükler ve aynı zamanda önemli fırsatlar ortaya çıkarmaktadır.

Gelecekte tekstil sektöründe geri dönüştürülebilir ürün tasarımı, kapalı döngü üretim sistemleri, dijital izlenebilirlik uygulamaları ve karbon nötr üretim modellerinin daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir. Bu süreçte işletmelerin sürdürülebilirlik göstergelerini üretim stratejilerine entegre etmeleri, niversite-sanayi iş birliklerini güçlendirmeleri ve çevresel performansı artırmaya yönelik yenilikçi teknolojilere yatırım yapmaları büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, tekstil endüstrisinde sürdürülebilir üretim teknolojileri ve döngüsel ekonomi yaklaşımları yalnızca çevresel sorunların çözümüne katkı sağlayan uygulamalar değil, aynı zamanda sektörün uluslararası rekabet gücünü artıran ve uzun dönemli ekonomik sürdürülebilirliğini destekleyen stratejik bir dönüşüm alanı olarak değerlendirilmektedir.

Yapay Zekâ Kullanım Beyanı: Bu kitap bölümünün hazırlanması sürecinde, metinlerin dil ve anlatım açısından gözden geçirilmesi amacıyla yapay zekâ tabanlı araçlardan sınırlı düzeyde yararlanılmıştır. Bölümün bilimsel içeriği, değerlendirmeleri ve nihai sorumluluğu yazara aittir.

Kaynakça

- (2026, 06 24). ISO 14067:2018: <https://www.iso.org/standard/71206.html> adresinden alındı
- Alper, F. (2015). *Sürdürülebilirlik kavramı içerisinde su ayak izi: Tekstil sektörü örneği*. İstanbul: İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Angold, S. (2024). Sustainable futures: developing a governance framework for transition in the fashion industry and beyond. . In *The Routledge Handbook of Global and Digital Governance Crossroads* (s. 397-422). içinde India: Routledge.
- Bakan, E. (2024). Sürdürülebilir Tekstil ve Moda. A. T. Hakan Boz (Dü.) içinde, *Sürdürülebilirlik ve Sektörel Uygulamaları* (s. 134-151). Ankara: Detay Yayıncılık.
- Bechtold, T., Turcanu, A., Geissler, S., & Campagne, C. (2006). *Supercritical carbon dioxide technology in textile processing*. . Textile Research Journal. .
- Browne, M. A. (2015). Sources and pathways of microplastics to habitats. *Marine anthropogenic litter*, 229-244.
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *A New Textiles Economy: Redesigning Fashion's Future*. UK: Ellen MacArthur Foundation.
- Eren, H. A., Yiğit, İ., Eren, S., & Avinc, O. (2020). Ozone: an alternative oxidant for textile applications. In *Sustainability in the textile and apparel industries: production process sustainability* (s. 81-98). içinde Cham: Springer International Publishing.

- European Commission. (2022). *EU strategy for sustainable and circular textiles. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM (2022).*
- Ghoreishi, M., Happonen, A., & Pynnönen, M. (2020, February). Exploring industry 4.0 technologies to enhance circularity in textile industry: role of internet of things. In Twenty-first international working seminar on production economics.
- Hasanbeigi, A., & Price, L. (2015). A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry. *Journal of Cleaner Production*, 95, 30-44.
- Hoekstra, A. Y. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard.* . Routledge.
- Kant, R. (2012). Textile dyeing industry an environmental hazard. *Natural science*, 4(1), 22-26.
- Kastacı, B. B., & Özek, H. Z. (2024). Tekstil Ve Hazır Giyim Sektöründe Geri Dönüşüm Potansiyelinin İrdelenmesi. *International Congress of Recycling Economy & Sustainability Policy-II*.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and earth system sciences*, 15(5), 1577-1600.
- 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.

- Peng, Y. I. (2026). Sustainable Development and ESG Risks: Evidence on Green Growth and Ecological Footprint in OECD Countries. . *Sustainable Development*.
- Perez-Canto, S., & Doblas-Flrido, M. A. (tarih yok). A situational analysis and an action strategy for the circular economy in the textile industry. *Sustainable Development*, 34(1), 785-807.
- Ravindran, R., Hassan, S. S., Williams, G. A., & Jaiswal, A. K. (2018). A review on bioconversion of agro-industrial wastes to industrially important enzymes. . *Bioengineering*, , 5(4), 93.
- Ren, J., Tabata, I., & Hirogaki, K. (2026). Sustainable and predictable color change of dyed polyester fibers through supercritical carbon dioxide fluid treatment. . *The Journal of Supercritical Fluids*, , 237, (107053.).
- Rovira, J., Souza, M. C., Nadal, M., & Domingo, J. L. (2025). Human health risks from textile chemicals: a critical review of recent evidence (2019–2025). *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 60(2), 79-91.
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, , 57(7), 2117-2135.
- Sandin, G., & Peters, G. M. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling—A review. *Journal of cleaner production*,, 184, , 353-365.
- Shirvanimoghaddam, K., Motamed, B., Ramakrishna, S., & Naebe, M. (2021). Death by waste: Fashion and textile circular

- economy case. *Science of the Total Environment*, 718(137317.).
- Shishoo, R. (2007). *Plasma technologies for textiles*. . Elsevier.
- Textiles, E. E. A. (2022). The environment: The role of design in Europe's circular economy. . *Briefing Fe 10/2020*. . 10, 006659. EEAEuropean Environment Agency,.
- Tobler-Rohr, M. I. (2011). *Handbook of sustainable textile production*. . Elsevier.
- United Nations. (2016). *The sustainable development goals 2016*. ESocialSciences.
- United Nations Environment Programme. (2023). *Sustainability and circularity in the textile value chain: A global roadmap*.
- Wojciechowska, P. (2021). Fibres and textiles in the circular economy. *In Fundamentals of natural fibres and textiles*. (s. 691-717). içinde Woodhead Publishing.
- World Economic Forum. (2023). *Digital Transition Framework: An action plan for public-private collaboration*.
- Zhang, A., & Seuring, S. (2024). Digital product passport for sustainable and circular supply chain management: a structured review of use cases. . *International Journal of Logistics Research and Applications*,, 27(12), 2513-2540.

BÖLÜM 2

TEKSTİL SEKTÖRÜNDE YEŞİL DÖNÜŞÜM

GÜL ÖZKAN¹

Giriş

İklim değişikliği, doğal kaynakların hızla tükenmesi, çevresel kirlilik, ekosistemin bozulması ve küresel ölçekte sanayi üretiminin çevresel boyuttaki olumsuz etkileri, sanayi sektörlerini sürdürülebilir üretim modellerine yönlendirmektedir.

Tekstil ve hazır giyim endüstrileri; yoğun su tüketimleri, yüksek enerji kullanımları, kimyasal girdileri, olumsuz çevresel çıktıları ve kısa ürün döngüleri sebebiyle çevresel sürdürülebilirlik tartışmalarının başlıca odak noktalarından biri konumundadır (Niinimäki et al., 2020).

“Yeşil Dönüşüm” kavramı, tekstil sektörüne ilişkin akademik ve politik söylemlerde belirgin biçimde öne çıkmaktadır. Ancak literatürde bu kavram çoğu zaman sürdürülebilirlik, döngüsel ekonomi veya temiz üretim kavramlarıyla iç içe ve sınırları net çizilmeden kullanılmaktadır. Bu durum, tekstil sektöründe yeşil dönüşümün ne anlama geldiği, hangi boyutları kapsadığı ve nasıl uygulanabileceği konusunda kavramsal bir belirsizlik yaratmaktadır (Bick et al., 2018).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Moda Tasarımı, Orcid: 0000-0003-2225-2279

Yeşil dönüşüm, ekonomik faaliyetlerin çevresel sınırlar içinde yeniden yapılandırılmasını amaçlayan kapsamlı bir dönüşüm sürecini ifade etmektedir (Stahel, 2016; OECD, 2018). Avrupa Yeşil Mutabakatı ile birlikte tekstil ürünlerine yönelik çevresel gerekliliklerin bağlayıcı hâle gelmesi, sektörün üretimden tedarik zinciri yönetişimine kadar bütüncül bir dönüşüm ihtiyacını ortaya koymaktadır (European Commission, 2020). Bu bağlamda “yeşil dönüşüm” kavramı, özellikle tekstil gibi çevresel olumsuz etkisi yüksek sektörlerde stratejik bir zorunluluk hâline gelmiştir.

Tekstil alanındaki çalışmaların önemli bir bölümü belirli uygulamalara (örneğin organik pamuk kullanımı, geri dönüşüm veya enerji verimliliği) odaklanmakta; ancak bu uygulamaların yeşil dönüşüm çerçevesinde bütüncül olarak nasıl konumlandığı yeterince tartışılmamaktadır. Literatürde teknolojik çözümlerin çevresel etkilerini sıklıkla ele alınırken, bu çözümlerin sektörel yaygınlaşma düzeyi, ekonomik uygulanabilirliği ve özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki sınırlılıkları konusunda sınırlı bir analitik değerlendirme ile karşılaşilmektedir (Köksal et al., 2017).

Buradan yola çıkarak, yeşil dönüşüm kavramını tekstil sektörü bağlamında eleştirel ve sistematik biçimde incelemeyi, literatürde öne çıkan yaklaşımları sınıflandırmayı ve mevcut araştırma boşluklarını ortaya koymayı hedeflemekteyim. Tekstil sektöründe yeşil dönüşüm yalnızca teknik uygulamalardan ibaret olmayan, çok boyutlu ve yapısal bir dönüşüm sürecini içermelidir. Yeşil dönüşüm kavramını tanımlamak tekstilde yeşil dönüşümün ne anlama geldiğini açıklamak, uygulama boyutlarını somut örneklerle ortaya koymak ve bilimsel çalışmalar ışığında literatürü sistematik biçimde değerlendirmeyi istediğim bu çalışmamda, üretim teknolojileri, döngüsel ekonomi, tedarik zinciri yönetişimi, politika ve regülasyonlar ile yaşam döngüsü analizi (LCA) eksenlerinde literatürü sınıflandırmakta; bulguları karşılaştırmalı olarak tartışmaktayım. Çalışma, yeşil dönüşümün tekstilde çok boyutlu bir

süreç olduğunu; çevresel kazanımlarının ise teknoloji, ekonomi ve politika etkileşimi olmaksızın kalıcılaşmadığını anlatmaktadır.

Yeşil Dönüşüm Kavramsal Çerçeve

Yeşil dönüşüm (Green Transition), ekonomik, sosyal ve çevresel sistemlerin çevresel etkileri minimize edecek şekilde yeniden yapılandırılması sürecidir. Bu kavram sürdürülebilir kalkınma hedefleri ile iç içe geçmiş olup, doğal kaynakların verimli kullanımı, karbon salınımının azaltılması, çevre kirliliğinin önlenmesi ve çevre dostu teknolojilerin benimsenmesini içerir (Proffit, 2024; TÜBİTAK, 2025). Yeşil dönüşüm, yalnızca çevresel performansı artırmakla kalmayıp aynı zamanda ekonomik rekabet gücünü güçlendiren bir sürdürülebilirlik inovasyonu ve sosyal adalet boyutlarını da kapsayan bütünsel bir dönüşüm süreci olarak da tanımlanmaktadır (Harsanto et al., 2023; Awino, 2025). Bu süreç; enerji verimliliği, düşük karbonlu üretim, temiz teknolojiler ve kaynak verimliliği ilkelerine dayanır (OECD, 2017).

Sürdürülebilirlik ve yeşil dönüşüm kavramları çoğu akademik çalışmada birlikte ele alınmakta ve özellikle üretim sektöründe yeni işletme modelleri, döngüsel ekonomi uygulamaları ve teknolojik yeniliklerle ilişkilendirilmektedir (Harsanto et al., 2023). Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP), yeşil ekonomiyi “çevresel riskleri azaltırken insan refahını ve sosyal eşitliği artıran ekonomik sistem” olarak tanımlamaktadır (United Nations Environment Programme, 2011). Bu yaklaşımda ekonomik büyüme ile çevresel bozulma arasındaki ilişkinin ayrıştırılması (decoupling) temel hedef olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde sürdürülebilirlik, çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlarıyla ele alınmakta ve tekstil endüstrisinin çevresel yükünü azaltacak yenilikçi süreçler kritik olarak görülmektedir (Harsanto et al., 2023). Döngüsel ekonomi, kaynakların yaşam döngüsü boyunca

yeniden kullanılmasını, atığın minimize edilmesini ve malzeme değerinin korunmasını amaçlayan ekonomik model olarak tanımlanır (Parnell et al., 2025; Sharma et al., 2025). Yeşil stratejilerde ise atık yönetimi, enerji verimliliği, su tüketimi azaltımı gibi stratejiler tekstil üretim süreçlerine entegre edilmektedir (Ağraş & Çetinkaya, 2023). Yeşil ekonomi, çevresel atıkların azaltılmasını ve düşük karbonlu üretimi öncelemektedir (OECD, 2018).

Endüstriyel üretim bağlamında yeşil dönüşüm, endüstriyel ekoloji ve döngüsel ekonomi yaklaşımlarıyla yakından ilişkilidir. Endüstriyel ekoloji, endüstriyel sistemleri doğal ekosistemlere benzeterek atığın minimize edilmesini ve kaynak döngülerinin kapatılmasını hedeflemektedir (Graedel & Allenby, 2010). Döngüsel ekonomi ise doğrusal “al–üret–at” modeline alternatif olarak, ürün ve malzemelerin yaşam döngüsü boyunca değerini korumayı amaçlamaktadır (Geissdoerfer et al., 2017).

Tekstil sektörü, bu yaklaşımların uygulanabilirliği açısından kritik bir alandır. Bunun temel nedeni, tekstil üretim süreçlerinin çok sayıda aşamadan oluşması ve her aşamanın çevresel etki potansiyeline sahip olmasıdır. Bu nedenle yeşil dönüşüm, tekstil sektöründe yalnızca nihai ürün özellikleriyle değil; hammadde temini, üretim teknolojileri, enerji kullanımı, atık yönetimi ve tedarik zinciri ilişkileriyle birlikte ele alınmaktadır (Niinimäki et al., 2020). Ancak tekstil literatürü bu yaklaşımları çoğunlukla teknoloji ve süreç iyileştirmeleri üzerinden ele almaktadır.

Tekstilde Yeşil Dönüşüm

Tekstil sektörü; üretim sürecinden tüketiciye kadar yüksek çevresel etkiler barındırdığı için (su kullanımı, atık, karbon salınımı, kimyasal kirlilik), yeşil dönüşümün kritik bir uygulama alanı olarak görülmektedir (Harsanto et al., 2023; Rahaman et al., 2024).

Tekstilde yeşil dönüşüm, hammaddeden t ketickiye kadar ürün yaşam döngüsünde çevresel etkiyi azaltan süreçlerin bütünleşik bir şekilde uygulanmasıdır. Bu bağlamda döngüsel ekonomi, ekotasarım, yeşil tedarik zinciri, kimyasal kullanımının minimize edilmesi ve etkin atık yönetimi başlıca yeşil dönüşüm uygulama alanlarıdır (Pak et al., 2025; Geissdoerfer et al., 2017; European Commission, 2020).

Tekstil  retiminde sürdürülebilirlik “ evresel, ekonomik ve sosyal etkilerin azaltılması için uygulanan teknik ve yönetsel pratikler” olarak tanımlanmaktadır (Sünter Eroğlu, 2023).

Tekstil endüstrisi, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %10’una sebep olmakta ve büyük hacimli su tüketimi ile çevresel baskı oluşturmaktadır. Tekstil  retiminde su, enerji ve kimyasal maddelerin yoğun kullanımı olumsuz çevresel etkiyi artırmaktadır. Aynı zamanda tekstil ve hazır giyim ürünlerinin yaşam döngüsü sonunda oluşan atıklar, döngüsel ekonomi modelleri olmadan ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır (Parnell et al., 2025). Tekstil sektörü küresel ölçekte;

- Toplam su kirliliğinin yaklaşık %20’sinden,
- Sera gazı emisyonlarının %8–10’undan,
- Büyük hacimli katı atık üretiminden sorumlu tutulmaktadır (Niinim ki et al., 2020; Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Ayrıca hızlı moda (fast fashion) modeli, tekstil sektöründeki çevresel baskının temel nedenlerinden biri olarak ele alınmakta ve yeşil dönüşümün yalnızca üretim teknolojileriyle sınırlı kalamayacağını göstermektedir (Bick et al., 2018). Bu yüksek çevresel olumsuz etki, yeşil dönüşüm uygulamalarını sadece bir tercih değil, sektörel bir zorunluluk haline getirmektedir.

Yeşil dönüşüm süreci, tekstil sektöründeki paydaşlar için riskleri (yüksek başlangıç maliyetleri, teknolojik uyum gereksinimi) ve fırsatları (rekabet avantajı, yeni pazar alanları) beraberinde getirmektedir (Günay, 2025).

Bu durum, tekstil sektöründe yeşil dönüşümün ekonomik modeller, tüketim alışkanlıkları ve kurumsal stratejilerle birlikte değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Yeşil Dönüşüm Uygulama Boyutları

Tekstilde yeşil dönüşümün tek bir uygulama ile değil, birbirini tamamlayan çok boyutlu dönüşüm alanları üzerinden gerçekleşmektedir. Yeşil dönüşümün ilk aşaması hammadde seçimidir. Organik pamuk kullanımı, geri dönüştürülmüş polyester ve Lyocell (Tencel) gibi düşük çevresel etkili lif kullanımları örnek olarak verilebilir. Bu malzemelerin çevresel ayak izinin geleneksel liflere kıyasla daha düşük olduğu yaşam döngüsü analizleriyle de ortaya konmuştur (Shen et al., 2010; Sandin et al., 2019). Yeşil dönüşümde yalnızca “ekolojik malzeme” kullanarak ürün bazlı çevre dostu iyileştirmelerin tek başına yeterli olmadığı, endüstriyel altyapının da yeniden yapılandırılması gerekmektedir.

Üretim süreçleri açısından incelediğimizde boyama, baskı, yıkama ve apre işlemlerinin tekstilin en kirletici aşamaları olduğu bilinmektedir. Bu aşamalar; yüksek su tüketimi, kimyasal yük ve enerji yoğunluğu nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezinde yer almaktadır. Temiz üretim açısından su tasarruflu boyama tekniklerinin seçilmesi, doğal ve düşük toksisiteli kimyasal ve boyarmadde seçimi ve kapalı devre su sistemlerinin kullanılması önemli örnekler arasındadır. Boyama teknolojileri üzerine yapılan çalışmalarda, su bazlı ve düşük sıcaklıkta çalışan sistemlerin geleneksel reaktif boyama yöntemlerine kıyasla %30–50 oranında su

ve enerji tasarrufu sağladığı rapor edilmiştir (Kant, 2012; Hasanbeigi & Price, 2015).

Benzer şekilde köpük boyama ve dijital baskı teknolojileri, kimyasal kullanımını azaltarak atık su yükünü önemli ölçüde düşürmektedir (Shen et al., 2010).

Denim üretimi özelinde yapılan araştırmalar, lazer ve ozon teknolojilerinin taşıma ve kimyasal yıkama işlemlerine alternatif olarak geliştirilmesinin, hem karbon ayak izini hem de iş sağlığı risklerini azalttığını ortaya koymaktadır (Muthu, 2017). Bu bulgular, yeşil dönüşümün yalnızca çevresel değil, aynı zamanda sosyal sürdürülebilirlik açısından işçi sağlığı ve güvenliği bakımından da önemli olumlu katkılar sunduğunu göstermektedir.

Ancak bu düzenlemelerin gelişmekte olan ülkelerde uyum maliyetlerini de artıracığı bilinmelidir. Bahsedilen ürün ve teknolojilerin çevresel kazanımlarının yüksek olmasına rağmen, yatırım maliyetleri nedeniyle özellikle küçük ölçekli işletmelerde yaygınlaşamadığını belirtmek doğru olacaktır.

Üretim süreçleri temelli yeşil dönüşüm yaklaşımları bu teknolojilerin büyük ölçekli işletmelerde daha hızlı benimsenmesine karşın, KOBİ'lerde yüksek yatırım maliyetleri nedeniyle sınırlı kalmasıdır (Köksal et al., 2017). Bu durum, yeşil dönüşümün sektörel ölçekte homojen ilerlemediğini ve yapısal eşitsizlikler yarattığını da ortaya koymaktadır. Tekstilde yeşil dönüşüm uygulamalarına, enerji ve karbon yönetimi açısından baktığımızda;

Tekstil işletmelerinde;

- Yenilenebilir enerji kullanımı,
- Enerji verimli makineler,
- Karbon ayak izi hesaplamaları ön plana çıkmaktadır (Hasanbeigi & Price, 2015).

Döngüsel ekonomi, tekstilde yeşil dönüşümün temel yapı taşlarından biridir. Kesim firesinin yeniden iplik üretiminde kullanılması, kullanılmış giysilerin mekanik veya kimyasal geri dönüşümü, “Geri dönüşüm için tasarım” yaklaşımı gibi örnekler tekstilde döngüsel ekonomiye hizmet eden uygulamalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı zamanda bu uygulamalar atık yönetimi noktasında olumlu çevresel etkiler doğurmaktadır. Tekstil atıkları iki ana grupta ele alınmaktadır: üretim aşamasında oluşan ön tüketim atıkları ve kullanım sonrası ortaya çıkan son tüketim atıkları (Sandin et al., 2019). Tekstil atıklarının ön tüketim ve son tüketim aşamalarında geri kazanımı, malzeme döngüsünü kapatan en önemli stratejilerdendir (Butturi et al., 2025). Ancak, özellikle son tüketim atıklarının geri dönüşümünün teknik ve lojistik açıdan daha karmaşık olduğu bilinmektedir. Yeşil dönüşüm için döngüsel ekonomi kapsamında tekstil atıklarının geri kazanımı ve yeniden ürün girdisi haline getirilmesi önemli bir strateji olarak benimsenmelidir (Parnell et al., 2025; Sharma et al., 2025).

Tekstil atıklarının ayrıştırılması, sınıflandırılması ve geri dönüşüm verimliliğinin artırılması için ileri teknolojilerin de araştırılması gerekmektedir.

Shen ve arkadaşları (2010), lif bazlı geri dönüşüm teknolojilerinin çevresel faydalarını ortaya koyarken, lif kalitesinin her geri dönüşüm döngüsünde düştüğünü ve bunun döngüsel sistemin sürdürülebilirliği açısından önemli bir sınırlılık oluşturduğunu vurgulamaktadır. Bu durum, “tam döngüsellik” teorisinin pratikte sınırlı kaldığını göstermektedir.

Ellen MacArthur Foundation (2017), döngüsel tekstil sistemlerinin çevresel etkiyi %30’a kadar azaltabileceğini belirtmektedir. Yeşil dönüşüm yalnızca üreticiyle de sınırlı değildir. Yeşil tedarik zinciri uygulamaları:

- Sürdürülebilir tedarikçi seçimi,
- Şeffaflık ve izlenebilirlik,
- Sosyal uygunluk denetimleri şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

Bu uygulamalar, özellikle hazır giyim markalarının sürdürülebilirlik raporlarında zorunlu hâle gelmiştir (Köksal et al., 2017). Çok uluslu markaların sürdürülebilirlik standartları dönüşümü teşvik etse de, bazı çalışmalar bu uygulamaların sembolik kaldığını ileri sürmektedir (Bick et al., 2018).

Bu standartlar, çoğu zaman çevresel performanstan daha çok marka itibarı yönetimine, pazarlama stratejilerine hizmet etmekte ve gerçek dönüşümü sınırlı ölçüde sağlamaktadır.

Türkiye örneğinde sertifikasyon maliyetleri ve bilgi eksikliği önemli engeller olarak raporlanmaktadır (Pak et al., 2022).

Hammadde seçimi, üretim süreçleri konularında teknolojik iyimserlik gösteren tekstil sektörü, ekonomik sürdürülebilirlik ve bölgesel farklılıklar konusunda sınırlılık göstermektedir. Yeşil dönüşümün teknolojik çözümlerle otomatik olarak gerçekleşeceği varsayımı bu açıdan sorgulanmalıdır.

Bölgesel ve politik uygulamalar bağlamında; Avrupa Yeşil Mutabakatı, tekstil sektöründe yeşil dönüşümü hızlandıran en önemli politik çerçevelerden biri olarak literatürde geniş yer bulmaktadır (European Commission, 2020). Bu düzenlemeler, karbon ayak izi raporlaması, sürdürülebilir ürün tasarımı ve atık yönetimi konularında bağlayıcı hedefler getirmektedir.

Yeşil dönüşüm uygulamaları sektörel bazda;

- Çevresel etki azaltımı ve kaynak verimliliği,
- Rekabet avantajı ve uluslararası pazarlarda sürdürülebilir marka değeri,

- Politika ve regülasyonlara uyumla risk azaltma gibi avantajlar sağlarken, (Proffit, 2024).
- Yeşil dönüşüm bilgi - beceri eksikliği ve eğitim ihtiyacı,
- Yüksek başlangıç maliyetleri ve teknolojik altyapı gereksinimi,
- Tedarik zincirinde düşük şeffaflık ve regülasyon uyumu eksikliği gibi sınırlılıklara sebep olmaktadır (Köksal et al., 2017; OECD, 2018).

Sonuç

Tekstil sektöründe sürdürülebilirlik inovasyonu üç ana başlıkta sınıflandırılmaktadır: ürün yeniliği, süreç yeniliği ve örgütsel yenilik (Harsanto et al., 2023).

Tekstil sektöründe sürdürülebilirlik bir marka imajı ya da pazarlama stratejisi olmaktan öte, bir inovasyon olmalıdır. Geri dönüşüm, temiz üretim, ekolojik hammadde, eko- tasarım vb. uygulamalar birer moda akımı değil, zorunluluk olmalıdır.

Yeşil dönüşümün başarıyla uygulanmasında teknoloji ve dijitalleşme kritik rol oynamaktadır. Yeşil beceri ve yönetsel kapasite eksikliklerinin sektörel dönüşümün önündeki önemli engeller olduğu göz ardı edilmemelidir.

Türkiye’de yapılan çalışmalarda, tekstil işletmelerinin yeşil dönüşüme yönelik farkındalığının arttığı ancak yapısal engellerin (finansman, teknoloji, bilgi) aşılması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda politika destekleri, eğitim programları ve sektörel teşvikler yeşil dönüşümün başarısı için kritik öneme sahip diğer etkenlerdir.

Bu çalışma, yeşil dönüşümün tekstil sektöründe tek boyutlu bir çevre politikası değil, hammadde seçiminden üretim teknolojilerine, enerji yönetiminden atık geri kazanımına kadar

uzanan çok katmanlı bir dönüşüm süreci olduğuna vurgulamaktadır. Tekstil sektöründe yeşil dönüşüm, döngüsel ekonomi, tedarik zinciri yönetişimi, politika ve yaşam döngüsü analizi boyutlarını kapsayan bir süreç olarak yönetilmelidir.

Bilimsel çalışmalar, yeşil dönüşüm uygulamalarının:

- Olumsuz çevresel etkiyi azalttığını,
- Kaynak verimliliğini artırdığını,
- Uzun vadede ekonomik rekabet gücü sağladığını göstermektedir.

Yeşil dönüşüm ile çevresel kazanımlar mümkündür; ancak bu kazanımların kalıcı hâle gelmesi için de teknoloji, ekonomi ve politika etkileşiminin birlikte ele alınması gerekmektedir. Bir başka ifade ile yeşil dönüşümün ürünün tüm yaşam döngüsüne yayılması gerekmektedir.

Literatürde sürdürülebilirlik ve yeşil dönüşüm çalışmalarının arttığı ancak buna rağmen önemli araştırma boşlukları bulunduğu da görülmektedir. Sürdürülebilirlik uygulamalarının ekonomik boyutlarının değerlendirilmesi, küçük ve orta boy işletmelerin yeşil dönüşüm dinamikleri ve politika ile uyum süreçleri, politika–uygulama uyumsuzlukları, yeşil dönüşümün disiplinler arası uygulamaları, ülke ve bölge bazlı analizleri ve tüketici davranışlarının sürece katkısı konularıyla literatüre katkılar sağlanabilir.

Yapay Zekâ Kullanım Beyanı

Bu çalışmanın literatür tarama aşamasında, yazım/dil bilgisi kontrollerini sağlamak ve metin akışını iyileştirmek amacıyla [IndexTR, 2025, Türkiye] akademik yapay zekâ aracından faydalanılmıştır. Yazar, üretilen içeriğin son halini incelemiş, doğruluğunu teyit etmiş ve çalışmanın tüm orijinal fikir ve sorumluluğunu üstlenmiştir.

Kaynakça

Ağraş, S., & Çetinkaya, F. (2023). Tekstil sektöründe çevresel duyarlılık ve sürdürülebilirlik politikalarına yönelik bir içerik analizi. *Equinox: Journal of Economics, Business & Political Studies*, 10(1), 26–48.

Awino, D. (2025). Challenges and opportunities for green transitions adoption in Kenya's textile manufacturing industry. *Frontiers in Sustainability*, 6, Article 1527365. <https://doi.org/10.3389/frsus.2025.1527365>

Bick, R., Halsey, E., & Ekenga, C. C. (2018). The global environmental injustice of fast fashion. *Environmental Health*, 17(1), 1–4. <https://doi.org/10.1186/s12940-018-0433-7>

Butturi, M. A., Neri, A., Mercalli, F., & Gamberini, R. (2025). *Sustainability-oriented innovation in the textile manufacturing industry: Pre-consumer waste recovery and circular patterns. Environments*, 12(3), 82. <https://doi.org/10.3390/environments12030082>

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

Sünter Eroğlu, N. (2023). *Sustainability approaches in denim products and production processes. Tekstil ve Mühendis*, 30(132), 335–350. <https://doi.org/10.7216/teksmuh.1268723>

European Commission. (2020). *A new circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Publications Office of the European Union. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Graedel, T. E., & Allenby, B. R. (2010). *Industrial ecology and sustainable engineering*. Pearson.

Günay, H. (2025). *Avrupa Yeşil Mutabakatı bağlamında Türkiye hazır giyim sektörünün dönüşüm stratejileri ve finansman zorlukları*. *Yekarum*, 10(2), 103–138. <https://doi.org/10.71208/yekarum.1757851>

Harsanto, B., Primiana, I., Sarasi, V., & Satyakti, Y. (2023). Sustainability innovation in the textile industry: A systematic review. *Sustainability*, 15(2):1549.

Hasanbeigi, A., & Price, L. (2015). A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency in the textile industry. *Journal of Cleaner Production*, 95, 30–44.

Kant, R. (2012). Textile dyeing industry: An environmental hazard. *Natural Science*, 4(1), 22–26.

Köksal, D., Strähle, J., Müller, M., & Freise, M. (2017). Social sustainable supply chain management in the textile and apparel industry: A literature review. *Sustainability*, 9(1), 100. <https://doi.org/10.3390/su9010100>

Muthu, S. S. (2017). *Sustainable apparel consumption and production*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2639-3>

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

OECD. (2017). *Green growth indicators 2017*. OECD Publishing.
<https://doi.org/10.1787/9789264268586-en>

OECD. (2018). *Business models for the circular economy*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/g2g9dd62-en>

Pak, S., Yanmaz Arpacı, Ö., Gülel, F. E., & Gölemezli, M. (2022). *Türkiye'deki tekstil işletmelerinde yeşil uygulamalar*. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(7), 954–962.
<https://doi.org/10.5505/pajes.2022.47037>

Pak, S., Yanmaz Arpacı, Ö., Gülel, F. E., & Gölemezli, M. (2025). *Türkiye'deki tekstil işletmelerinin yeşil yeterliliklerinin incelenmesi*. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(4), 679–686. <https://doi.org/10.5505/pajes.2024.57375>

Parnell, K., Rolston, A., Hilton, B., & Luccitti, A. (2025). *Circular economy in the textile industry: A review of technology, practice, and opportunity*. *Recycling*, 10(6), 225.
<https://doi.org/10.3390/recycling10060225>

Proffit. (2024, November 28). *Yeşil dönüşüm nedir?*
<https://www.proffit.com.tr/blog/yesil-donusum-nedir>

Rahaman, M. T., Pranta, A. D., Repon, M. R., Ahmed, M. F., Ahmed, M. S., & Islam, T. (2024). *Green production and consumption of textiles and apparel: Importance, fabrication, challenges and future prospects*. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(2), 100280.
<https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100280>

Sandin, G., Roos, S., Johansson, M., & Peters, G. (2019). *Environmental assessment of textile reuse and recycling: A review*. *Journal of Cleaner Production*, 214, 646–658.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.298>

Sharma, R., Yadav, V., Gaur, T. S., & Dixit, P. (2025). *A systematic review on circular economy practices in the textile industries*. *Discover Applied Sciences*, 7, Article 794. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07446-8>

Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. (2010). Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 260–274. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.001>

Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435–438. <https://doi.org/10.1038/531435a>

TÜBİTAK. (2025, 16 Nisan). *1833 SAYEM Yeşil Dönüşüm 2025-1 çağrısı açıldı*. <https://tubitak.gov.tr/tr/duyuru/1833-sayem-yesil-donusum-2025-1-cagrisi-acildi>

United Nations Environment Programme. (2011). *Towards a green economy: Pathways to sustainable development and poverty eradication*. <https://www.unep.org/resources/report/towards-green-economy-pathways-sustainable-development-and-poverty-eradication-3>

BÖLÜM 3

TEKSTİLDE GÜÇ TUTUŞURLUK VE ALEV GECİKTİRİCİ UYGULAMA YÖNTEMERİ

Şeyma YALÇIN TURAN¹
Ali KARA²

Giriş

Tekstilde güç tutuşurluk, bir malzemenin alev almasını geciktirme ya da yanma sürecini yavaşlatma özelliği olarak tanımlanmakta olup, günümüzde tekstil endüstrisinde güvenlik ve performans açısından önemli bir yere sahiptir. Yanıcı malzemelerin daha güvenli hale getirilmesine yönelik çalışmalar ise oldukça eski dönemlere dayanmaktadır. Örneğin, Roma döneminde doğal yapısından dolayı yangına dayanıklı özellik gösteren asbestin kullanıldığı bilinmektedir. 18. yüzyılda güç tutuşurluk alanındaki ilk sistematik uygulamalardan biri, 1735 yılında Wyld tarafından gerçekleştirilmiş ve selülozik lifler için şap, demir sülfat ve boraks içeren bir bitim işlemi patentlenmiştir. Daha sonraki yıllarda, 1821’de Gay-Lussac tarafından keten ve jüt gibi doğal liflere uygulanmak üzere amonyum fosfat, amonyum klorür ve boraks

¹Yüksek Kimyager, Karesi Polyester ve Petrokimya Sanayi, A.Ş. AR-GE Merkezi, Orcid: 0000-0002-7633-2576

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

esaslı bir alev geciktirici apre geliştirilmiştir. Bu uygulamalar temel olarak lif yüzeyinde koruyucu camsı bir tabaka oluşturma veya yanma sırasında açığa çıkan yanıcı gazları seyrelterek yanmayı sınırlandırma prensibine dayanmaktadır. 20. yüzyıla gelindiğinde ise özellikle 1970’li yıllardan itibaren ticari alev geciktirici kimyasalların ve lif katkılarının geliştirilmesiyle birlikte güç tutuşurluk uygulamaları daha yaygın hale gelmiş selülozik, yün ve sentetik lifler üzerinde uygulanabilen farklı yöntemler geliştirilmiştir (Choudhury, 2020).

Günümüzde güç tutuşurluk, liflerin kimyasal katkıları, alev geciktirici ajanlar veya fiziksel kaplamalar yoluyla modifiye edilmesi ile sağlanabilir bu sayede malzemenin alevlenme sıcaklığı yükselir, yanma hızı azalır ve toplam ısı salımı kontrol altına alınır. Bu özellik, özellikle ev ve iç mekân tekstillerinde, döşemelik kumaşlar, perdeler, halılar ve yatak örtüleri gibi ürünlerde yangın risklerini minimize ederek kullanıcıların güvenliğini artırır. Aynı şekilde, oteller, hastaneler, okullar ve toplu taşıma araçları gibi insan yoğunluğuna sahip alanlarda kullanılan tekstil ürünlerinin alev geciktirici özelliklere sahip olması, toplu güvenliği sağlamak açısından hayati öneme sahiptir. Bunun yanı sıra, iş güvenliği gerektiren sektörlerde kullanılan iş elbiseleri, itfaiyeci ve asker üniformaları gibi kıyafetlerin güç tutuşurluk özellikleri, çalışanların yaşamını doğrudan korur ve iş güvenliği standartlarının karşılanmasını sağlar. Ulaşım ve teknik tekstillerde, otomobil, uçak ve tren içlerinde kullanılan döşemelikler ve elektronik cihaz kılıfları da alev geciktirici özellikler sayesinde yangının yayılmasını engeller ve malzemenin dayanıklılığını artırır. Güç tutuşurluk sadece güvenlik boyutu ile sınırlı kalmayıp, ürünlerin uluslararası standartlara uygun olarak sertifikalandırılmasına da olanak tanır. Böylece hem endüstriyel uyumluluk sağlanır hem de marka güvenilirliği artırılır. Bu bağlamda, tekstilde güç tutuşurluk, malzemelerin yanma davranışını kontrol altına alarak kullanıcı

güvenliğini, ürün dayanıklılığını ve sektörel standartların karşılanmasını sağlayan, tarihsel kökleri eskiye dayanan ve modern tekstil biliminin temel araştırma ve uygulama alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır (Horrocks, 1986)

Lifler, Güç Tutuşur Lifler ve Yapısal Özellikleri

Lifler, kökenlerine ve üretim yöntemlerine göre genel olarak doğal, yarı sentetik (rejenere) ve sentetik lifler olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, liflerin kimyasal yapısı, elde edilme yöntemi ve kullanım alanları açısından büyük önem taşımaktadır. Doğal lifler, doğada hazır halde bulunan ve minimum kimyasal işlemle kullanılabilir hale getirilen liflerdir. Bu lifler kendi içinde üç alt gruba ayrılmaktadır: Bitkisel lifler; başta pamuk, keten, kenevir ve jüt olmak iyi nem alma, nefes alabilirlik ve konfor özellikleri ile öne çıkarlar. Hayvansal lifler; yün, ipek, kaşmir gibi protein esaslı liflerdir ve ısı yalıtımı, elastikiyet ve yumuşaklık gibi özellikler sunar. Mineral lifler ise daha sınırlı kullanım alanına sahip olup, en bilinen örneği asbesttir. Asbest, doğal bir mineral lif olmasına rağmen, yüksek ısıya dayanıklılığı nedeniyle geçmişte yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak insan sağlığına solunum yolu hastalıkları ve kanser riski gibi ciddi zararları nedeniyle günümüzde kullanımı birçok ülkede yasaklanmış veya ciddi şekilde sınırlandırılmıştır. Yarı sentetik lifler, doğal polimerlerden elde edilmekle birlikte, kimyasal işlemlerle yapıları değiştirilerek yeniden lif haline getirilen malzemelerdir. Bu lifler doğrudan doğadan alınmaz doğal hammaddenin çözündürülmesi ve yeniden şekillendirilmesiyle üretilir. Viskon, modal ve liyosel bu gruba örnek olarak verilebilir. Bu lifler genellikle doğal liflere benzer yumuşaklık ve nem alma özellikleri gösterirken, üretim süreci nedeniyle daha kontrollü ve homojen özellikler sunarlar. Sentetik lifler ise tamamen kimyasal sentez yoluyla, çoğunlukla petrol türevlerinden elde edilen polimerlerden üretilir. Polyester, naylon, akrilik ve polipropilen bu grubun en yaygın örnekleridir. Bu lifler yüksek mukavemet,

dayanıklılık, elastikiyet ve kimyasallara karşı direnç gibi üstün teknik özelliklere sahiptir. Ayrıca üretim koşulları kontrol edilebilir olduğu için istenilen özelliklere göre tasarlanabilmeleri önemli bir avantajdır. Bununla birlikte, düşük nem alma kapasiteleri ve çevresel sürdürülebilirlik konusundaki dezavantajları da dikkate alınmaktadır (Kothari, 2000).

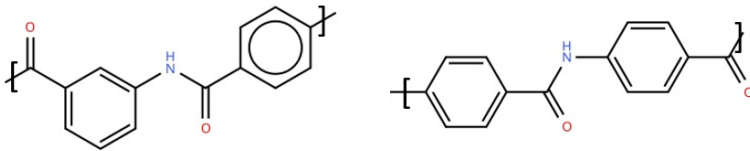
Bu geleneksel lifler, çoğunlukla yanıcıdır ve doğal halleriyle genellikle güç tutuşur özellik göstermezler. Ancak bazı lifler, yapısal ve kimyasal özellikleri sayesinde kendiliğinden güç tutuşur nitelik taşırlar. Bu tür lifler kullanılarak üretilen kumaşlar, yüksek ısı ve alev ile temas durumunda yangın riskini azaltan güç tutuşur özellikler sergiler. Bu nedenle bu kumaşlar, özellikle endüstriyel uygulamalarda, iş güvenliği ekipmanlarında, askeri ve havacılık tekstillerinde ve özel fonksiyonel ürünlerde tercih edilir. Bu lifler, kimyasal katkı veya özel modifikasyon gerektirmeden yanmayı geciktiren doğal veya modifiye edilmiş yapıya sahiptir ve bu özellikleri ile kritik güvenlik uygulamalarında önemli bir rol oynar.

Aramid Lifleri

Aramid lifleri, aromatik halkalar ve amid bağları (-CO-NH-) içeren yapıları sayesinde yüksek performans gösteren sentetik lifler arasında yer almaktadır. Bu özel kimyasal yapı, liflere yüksek çekme dayanımı, aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık kazandırmaktadır. Ayrıca aramid lifleri yanıcı değildir ve yüksek sıcaklıklarda güç tutuşur özellik göstermektedir. Aramid lifleri genel olarak para-aramid ve meta-aramid olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Para-aramid lifleri yüksek mekanik dayanımlarıyla öne çıkarken, meta-aramid lifleri daha çok ısıl dayanımlarıyla bilinmektedir. Bu iki grubun en bilinen örnekleri sırasıyla Kevlar ve Nomex'tir. Kevlar, para-aramid liflerinden üretilen yüksek performanslı bir malzemedir. Moleküler zincirlerinin lif doğrultusunda düzenli ve hizalanmış olması, Kevlar'a oldukça yüksek çekme dayanımı kazandırmaktadır.

Bu nedenle çelikten daha yüksek dayanım gösterebilmekte ve özellikle balistik koruma uygulamalarında tercih edilmektedir. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık göstermektedir. Düşük yoğunluğu sayesinde hafif bir yapıya sahip olan Kevlar, aynı zamanda birçok kimyasal ve organik çözücüye karşı da direnç göstermektedir. Bu zellikleri nedeniyle balistik yelekler, kasklar, takviye edilmiş kompozit malzemeler ile otomotiv ve havacılık sektörlerinde hafif fakat dayanıklı parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nomex ise meta-aramid liflerinden üretilmektedir ve moleküler yapısı Kevlar'a göre daha düzensizdir. Bu durum, mekanik dayanımının Kevlar'dan daha düşük olmasına rağmen ısıl dayanımının oldukça yüksek olmasını sağlamaktadır. Nomex, doğrudan alev veya yüksek sıcaklıktaki yüzeylere maruz kaldığında yaklaşık 370–400 C'ye kadar dayanabilmekte ve yanmak yerine karbonlaşma göstermektedir. Hafif ve esnek yapısının yanı sıra uzun süreli ısı maruziyetinde performansını koruyabilmesi ve birçok kimyasala karşı dirençli olması, bu lifin özellikle koruyucu tekstillerde kullanılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle Nomex yangın giysileri, iş elbiseleri, yangın battaniyeleri, fırın filtreleri ve elektrik yalıtım malzemelerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Wu vd., 2023).

şekil 1. Para aramid ve meta aramid kimyasal yapıları

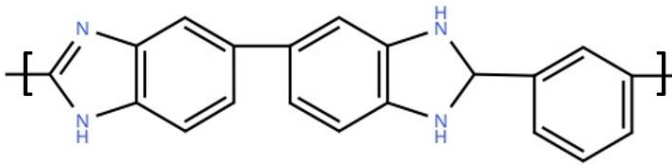


Polibenzimidazol (PBI) Lifleri

Polibenzimidazol (PBI), aromatik yapıya sahip, yüksek performanslı bir sentetik polimerdir ve en önemli özelliği yanmazlık davranışıdır. Benzimidazol halkaları içeren bu yapısı sayesinde

yüksek termal kararlılık kazanır ve alev karşısında erimez ya da damlama yapmaz. Doğrudan alevle temas ettiğinde yanmak yerine karbonlaşarak yapısını korur, bu da onu yangına karşı en güvenli polimerlerden biri haline getirir. PBI'nin en dikkat çekici özelliği çok yüksek sıcaklıklara dayanabilmesidir. Yaklaşık 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bile yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde koruyabilir. Aromatik yapısı sayesinde oldukça yüksek bir camsı geçiş sıcaklığına sahiptir ve termal bozunmaya karşı güçlü bir direnç gösterir. Bunun yanında asitler, alkaliler ve çeşitli organik çözücülere karşı kimyasal dayanımı da yüksektir, ancak bu özellikler içinde en belirleyici olanı yanmazlık performansındır. Bu üstün yanmazlık özelliği nedeniyle PBI lifleri özellikle itfaiyeci kıyafetleri, uzay giysileri ve yüksek ısıya maruz kalan endüstriyel koruyucu giysilerde kullanılmaktadır. Ayrıca metal işleme eldivenleri, yüksek sıcaklık filtreleri ve özel mühendislik uygulamalarında da tercih edilmektedir. Kevlar ve Nomex gibi aramid liflerine kıyasla daha yüksek sıcaklık dayanımı sunması, PBI'yi özellikle alev ve aşırı ısıya karşı maksimum koruma gerektiren uygulamalarda öne çıkarmaktadır (Kalaycı vd., 2014).

Şekil 2. Polibenzimidazol kimyasal yapısı

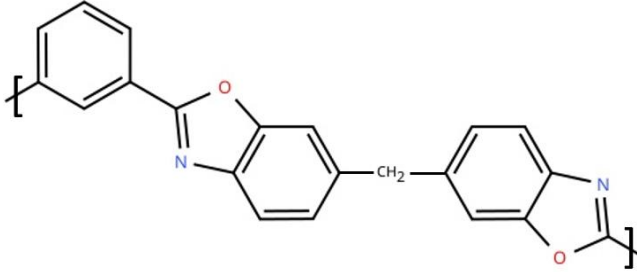


Polibenzoksazol (PBO) Lifleri

Poli(p-fenilen benzobisoksazol) (PBO) lifleri, yüksek performanslı sentetik lifler arasında yer almakta olup üstün mekanik özellikleri ve yüksek termal dayanımları ile dikkat çekmektedir. Ticari olarak genellikle Zylon adıyla bilinen bu lifler, tamamen aromatik ve rijit çubuk benzeri moleküler yapıları sayesinde oldukça

yüksek çekme dayanımı ve elastik modül değerlerine sahiptir. PBO lifleri, yaklaşık 650 °C'ye kadar termal kararlılık gösterebilmekte ve yüksek sınırlayıcı oksijen indeksleri sayesinde kolay tutuşmamaktadır. Bu nedenle alev geciktirici tekstiller, itfaiyeci koruyucu giysileri, askeri ekipmanlar ve yüksek sıcaklığa dayanıklı teknik tekstil ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca düşük yoğunluklarına rağmen yüksek özgül dayanım göstermeleri, PBO liflerinin kompozit malzemelerde önemli bir takviye elemanı olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Özellikle havacılık, savunma sanayi, balistik koruma sistemleri ve spor ekipmanlarında tercih edilmektedir. Bununla birlikte, lif yüzeyinin kimyasal olarak inert yapıda olması nedeniyle polimer matrislerle arayüzey etkileşiminin sınırlı olması ve UV ışınlarına karşı hassasiyet göstermesi, PBO liflerinin kullanımını kısıtlayan önemli dezavantajlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle son yıllarda yüzey modifikasyonu ve UV dayanımını artırmaya yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmektedir (Wang vd., 2026).

Şekil 3. Polibenzoksazol kimyasal yapısı

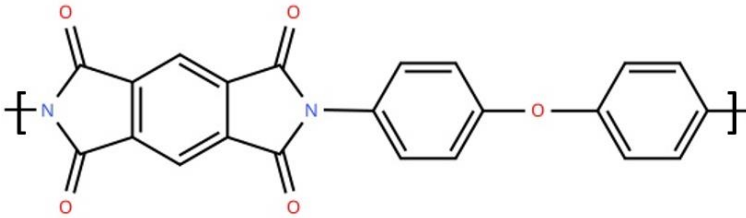


Poliimid Lifleri

Poliimid (PI) lifleri, yüksek sıcaklık, kimyasal maddeler ve aleve karşı dayanım gösteren yüksek performanslı sentetik liflerdir. Yapılarındaki aromatik zincirler ve imid grupları sayesinde yüksek termal kararlılığa sahiptirler ve yüksek sıcaklıklarda erime yerine karbonlaşma eğilimi gösterirler. Bu özellikleri sayesinde doğal olarak güç tutuşur davranış sergilemektedirler. Poliimid lifleri

havacılık, uzay teknolojileri, elektronik ve koruyucu tekstiller gibi yüksek performans gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek mekanik dayanım, düşük ağırlık, iyi kimyasal direnç ve güçlü elektriksel yalıtım özellikleri göstermektedirler. Son yıllarda yapılan çalışmalarda grafen ve karbon nanotüp gibi nanoparçacık katkılarıyla poliimid liflerinin mekanik ve alev geciktirici özelliklerinin daha da geliştirilebildiği belirtilmektedir. Ancak üretim süreçlerinin karmaşık ve maliyetli olması kullanım alanlarını daha çok özel uygulamalarla sınırlandırmaktadır (Zhang vd., 2018).

Şekil 4. Poliimid kimyasal yapısı



Fenolik Lifler

Fenolik lifler, fenol ve formaldehit esaslı çapraz bağlı yapıları sayesinde yüksek sıcaklık ve alev karşı doğal direnç gösteren yüksek performanslı liflerdir. Novoloid yapıya sahip bu lifler, yüksek termal kararlılıkları sayesinde yüksek sıcaklıklarda yanmaya karşı dayanım sağlar ve bu nedenle koruyucu tekstiller, yangına dayanıklı ürünler ile ısıya maruz kalan endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilir. Ayrıca iyi mekanik dayanım, aşınma direnci ve kırılmaya karşı direnç özellikleri sunarlar. Kimyasal açıdan da oldukça kararlı olan fenolik lifler asitlere, bazlara ve birçok organik çözücüye karşı dayanıklıdır. Bu özellikleri sayesinde zorlu çevresel koşullarda güvenilir kullanım imkânı sağlarlar. Bunun yanında karbon lifleri ve aktif karbon

liflerinin üretiminde başlangıç malzemesi olarak da kullanılmaktadırlar (Zhang vd., 2010).

Karbon Lifler

Karbon lifleri, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık özelliklerini bir arada sunan ileri performanslı liflerdir ve özellikle kompozit malzemelerin güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılır. Grafit benzeri düzenli karbon yapısı sayesinde çok yüksek çekme dayanımı ve rijitlik sağlarlar. Aynı zamanda oldukça hafif olmaları, onları uçak, otomotiv ve spor ekipmanları gibi alanlarda önemli bir malzeme haline getirir. Karbon lifleri yüksek sıcaklıklara karşı oldukça dayanıklıdır ve termal olarak stabil yapıları sayesinde yüksek ısı altında bile özelliklerini büyük ölçüde korurlar. Yanmazlık özellikleri ve düşük termal genleşme davranışı, özellikle havacılık ve uzay uygulamalarında güvenli kullanım sağlar. Ayrıca elektriksel iletkenlikleri sayesinde elektronik uygulamalarda da tercih edilirler. Kimyasal olarak inert yapıda oldukları için asit, baz ve birçok çözücüye karşı direnç gösterirler. Genellikle poliakrilonitril (PAN) türevi öncül liflerden üretilir ve bu lifler yüksek sıcaklık işlemleriyle karbon liflerine dönüştürülür. Tüm bu özellikleri karbon liflerini yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez kılar (Sharma vd., 2014).

Cam Lifleri

Cam lifleri, yüksek mekanik dayanım ve ısıya karşı direnç gerektiren uygulamalarda kullanılan inorganik yapıli liflerdir. Silika, kireç ve alümina gibi hammaddelerin eritilip ince lifler halinde çekilmesiyle elde edilirler. Bu yapı sayesinde hem hafif hem de yüksek mukavemetli bir malzeme ortaya çıkar ve kompozit sistemlerde güçlendirici olarak sıkça kullanılır. Cam lifleri yanıcı değildir ve yüksek sıcaklıklara karşı iyi bir termal dayanım gösterir. Kimyasal olarak inert olmaları sayesinde asit ve bazlara karşı dirençlidir ve nemden etkilenmezler. Bu özellikleri, uzun ömürlü ve

dayanıklı kullanım sağlar. Ayrıca elektriksel yalıtkan olmaları nedeniyle elektronik ve elektrik uygulamalarında izolasyon amaçlı da tercih edilirler. Hafiflik, dayanım ve kimyasal kararlılık özelliklerinin birleşimi sayesinde cam lifleri otomotiv, inşaat, denizcilik ve havacılık gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılan önemli bir takviye malzemesidir (Liv d., 2026).

Bazalt Lifleri

Bazalt lifleri, volkanik kökenli bazalt kayacının yüksek sıcaklıkta eritilip ince lifler hâline getirilmesiyle elde edilen inorganik esaslı yüksek performanslı liflerdir. Doğal bir hammaddeye dayanması ve üretim sürecinde ek kimyasal katkı gerektirmemesi nedeniyle çevre dostu ve sürdürülebilir bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Genel olarak yüksek mekanik dayanım, iyi elastikiyet modülü ve geniş bir sıcaklık aralığında kararlılığını koruyabilme özelliği ile öne çıkar. Özellikle yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı ve alev karşısında yapısal bütünlüğünü uzun süre koruyabilmesi, bu liflerin önemli özelliklerinden biridir. Ayrıca erime yerine yapısını büyük ölçüde muhafaza etmesi, ısı uygulamalarda tercih edilmesini sağlar. Kimyasal açıdan asit, baz ve tuz gibi agresif ortamlara karşı direnç gösterir UV ışınları ve zorlu çevresel koşullarda da stabilitesini korur. Cam liflerine benzer bir yapıya sahip olmasına rağmen bazı durumlarda daha iyi çevresel ve termal dayanım sergileyebilir. Hafif yapısı, yüksek dayanım/ağırlık oranı ve karbon liflerine kıyasla daha düşük maliyeti sayesinde kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. İnşaat, otomotiv ve denizcilik gibi alanlarda takviye elemanı olarak tercih edilmektedir (Zhang vd., 2020).

Seramik Lifleri

Seramik elyaflar, yüksek sıcaklığa dayanıklı inorganik liflerdir ve genellikle alümina, silika, zirkonya gibi seramik esaslı malzemelerden üretilir. Düşük yoğunlukları, yüksek ısı dayanımları

ve kimyasal kararlılıkları sayesinde özellikle yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik liflerin en önemli özelliklerinden biri yüksek sıcaklıklarda yapısal kararlılıklarını koruyabilmeleri ve alev geciktirici özellik göstermeleridir. Bu lifler yanmaya karşı dirençli olup ısı yalıtımı sağladıkları için yangın bariyerleri, fırın yalıtımları, ısı kalkanları ve koruyucu tekstillerde tercih edilmektedir. Bazı seramik lifler 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda dahi dayanım gösterebilmektedir. Ayrıca seramik lifler havacılık, otomotiv, enerji ve petrokimya sektörlerinde yüksek sıcaklık dayanımı gereken parçalarda kullanılmaktadır. Hafif olmaları ve iyi termal yalıtım sağlamaları nedeniyle uçak motorları, endüstriyel fırınlar ve kompozit malzemelerde önemli bir yere sahiptir. Kimyasal inertlikleri ve oksidasyona karşı dirençleri de kullanım alanlarını genişletmektedir (Roy vd., 2025).

Tekstil Materyallerinin Yanma Mekanizması

Tekstil materyallerinin yanmasının temel nedeni, liflerin büyük çoğunluğunun organik yapıda olması ve bu yapıların ısı etkisiyle parçalanarak yanıcı gazlar oluşturmalarıdır. Pamuk, yün, ipek gibi doğal lifler ile polyester ve poliamid gibi sentetik liflerin büyük kısmı karbon, hidrojen ve bazen oksijen içeren polimerlerden oluşur. Bu polimer yapılar yüksek sıcaklığa maruz kaldığında kimyasal bağlar kırılır ve ortaya çıkan uçucu parçalanma ürünleri oksijenle reaksiyona girerek yanmayı başlatır. Yanma süreci tek aşamalı bir olay değildir, birkaç basamaktan oluşur. İlk aşama ısınmadır. Lif dış bir ısı kaynağı ile belirli bir sıcaklığa ulaştığında termal bozunma başlar ve polimer zincirleri parçalanır. Bu süreçte piroliz gerçekleşir ve yanıcı gazlar açığa çıkar. Açığa çıkan hidrokarbonlar, karbon monoksit ve bazı durumlarda aldehitler gibi uçucu bileşikler ortamda yeterli oksijen bulunduğunda tutuşur ve alev oluşur. Bu nedenle aslında yanan doğrudan katı lif değil, lifin bozunmasıyla oluşan gaz fazıdır (Kim vd., 2021).

Alev oluşumundan sonra yanmanın devam edebilmesi için üç temel unsurun bir arada bulunması gerekir yakıt, oksijen ve ısı. Bu üçlü yanma üçgeni olarak tanımlanır. Yakıt lifin kendisi ya da ısı etkisiyle oluşan bozunma ürünleridir. Oksijen çevredeki havadan sağlanır, ısı ise dış bir kaynaktan ya da yanma sırasında açığa çıkan enerjiden gelir. Yanma başladıktan sonra oluşan ısı, lifin daha fazla parçalanmasına yol açar ve böylece süreç kendi kendini sürdüren bir döngüye dönüşür. Bu nedenle bazı tekstil materyalleri kolayca tutuşur ve hızlı bir şekilde yanmaya devam eder.

Şekil 5. Yanma Üçgeni



Farklı lif türleri yanma davranışı açısından önemli farklılıklar gösterir. Selülozik lifler olan pamuk ve viskon gibi materyaller genellikle kolay tutuşur, alevle hızlı şekilde yanar ve yanma sonunda kül oluşturur. Bunun nedeni selüloz yapısının oksijen içeren karbon bazlı bir polimer olmasıdır. Protein esaslı lifler, yani yün ve ipek ise daha zor alev alır ve yanma sırasında yüzeyde kısmi bir kömürleşme tabakası oluşturarak yanmanın ilerlemesini yavaşlatabilir. Sentetik liflerde ise daha farklı bir davranış görülür. Polyester ve poliamid gibi termoplastik lifler ısı etkisiyle önce yumuşar, ardından erir ve çoğu zaman damlayarak yanar, bu eriyen damlalar alevi farklı yüzeylere taşıyarak yangının yayılmasına neden olabilir. Yanma davranışında önemli bir diğer unsur kömürleşme ve erime eğilimidir. Pamuk gibi lifler yanma sırasında doğrudan kömürleşerek yapısal bütünlüğünü kaybederken, polyester gibi lifler eriyerek fiziksel form değiştirir ve bu durum

yanmanın karakterini belirler. Kömürleşme yüzeyde oksijen geçişini kısmen engelleyerek yanmayı yavaşlatabilir, bu nedenle güç tutuşur tekstillerde kömürleşme eğilimi artırılmaya çalışılır. Bununla birlikte yanma davranışı yalnızca lifin kimyasal yapısına bağlı değildir kumaşın gramajı, dokuma sıklığı, iplikler arasındaki boşluklar ve hava geçirgenliği de önemli rol oynar. Gevşek, ince ve hava boşluğu fazla olan kumaşlar daha hızlı tutuşurken, sık dokunmuş ve yoğun yapılı kumaşlar yanmaya karşı daha dirençlidir. Ayrıca yüzeyde kullanılan apre işlemleri, boyalar ve kaplamalar da yanma davranışını değiştirebilir. Bazı uygulamalar yanmayı hızlandırabilirken, alev geciktirici işlemler yanma sürecini belirgin şekilde yavaşlatır (Health canada, 2024).

Tekstilde Güç Tutuşur Uygulamalar

Tekstil materyallerinde güç tutuşurluk özelliği kazandırılması, özellikle koruyucu tekstiller, teknik tekstiller, ev tekstilleri, otomotiv tekstilleri ve askeri uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır. Tekstil liflerinin büyük çoğunluğu organik esaslı polimerik yapılardan oluştuğu için ısı ve alev karşısında belirli bir sıcaklığa ulaştıklarında bozunarak yanıcı gazlar açığa çıkarmaktadır. Oluşan bu gazlar oksijen ile birleştiğinde yanma gerçekleşmekte ve alev hızla yayılabilmektedir. Bu nedenle tekstil materyallerinin yanma davranışını kontrol altına almak, alevin ilerlemesini geciktirmek ve yangın riskini azaltmak amacıyla çeşitli güç tutuşurluk yöntemleri geliştirilmektedir. Uygulanan işlemler sayesinde tekstil yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturulabilmekte, ısı transferi azaltılabilmekte veya yanma sırasında oluşan yanıcı gaz miktarı sınırlandırılabilir. Güç tutuşurluk uygulamalarında temel amaç yalnızca materyalin tutuşmasını geciktirmek değil, aynı zamanda alev kaynağı uzaklaştırıldığında yanmanın kendiliğinden sönmesini sağlamak, duman oluşumunu azaltmak ve materyalin yüksek sıcaklık altında yapısal bütünlüğünü mümkün olduğunca koruyabilmektir. Bu doğrultuda tekstil yüzeyine uygulanan işlemler

lifin kimyasal yapısını değiştirebilmekte veya yüzey üzerinde fiziksel bir bariyer oluşturarak koruma sağlayabilmektedir. Kullanılan yöntemler uygulama kolaylığı, maliyet, çevresel etkiler, dayanıklılık ve kullanım alanına göre farklı avantajlar sunmaktadır. Özellikle son yıllarda evre dostu, düşük toksisiteye sahip ve yüksek performanslı güç tutuşurluk sistemlerine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Tekstil materyallerine güç tutuşurluk özelliği kazandırmak amacıyla en yaygın kullanılan yöntemler arasında kimyasal apre işlemleri, kaplama ve laminasyon teknikleri, sol-jel ve nano kaplama uygulamaları ile plazma ve yüzey aktivasyon işlemleri yer almaktadır. Kimyasal apre yöntemlerinde güç tutuşur kimyasallar kumaş yüzeyine emdirilerek lif yapısına belirli ölçüde bağlanırken, kaplama ve laminasyon işlemlerinde yüzey üzerinde koruyucu bir katman oluşturulmaktadır. Sol-jel ve nano kaplama yöntemleri ise düşük miktarda kimyasal kullanımıyla yüksek yüzey performansı sağlayabilmekte ve son yıllarda önem kazanan yenilikçi uygulamalar arasında yer almaktadır. Bunun yanında plazma ve yüzey aktivasyon işlemleri, lif yüzeyini modifiye ederek uygulanan güç tutuşur maddelerin kumaşa daha iyi bağlanmasını sağlamakta ve işlem etkinliğini artırmaktadır.

Kimyasal Apre

Kimyasal apre ile tekstil materyallerine güç tutuşurluk kazandırılması, kumaş yüzeyine uygulanan özel alev geciktirici kimyasallar sayesinde yanma davranışının kontrol altına alınmasına dayanır. Bu yöntem, lif üretimi sırasında değil kumaş üretiminden sonra uygulandığı için endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. Uygulanan kimyasallar lif yüzeyine fiziksel olarak tutunabilir veya lif yapısına kimyasal olarak bağlanabilir. Bu durum, işlemin yıkamaya karşı dayanıklılığını belirleyen önemli bir etkidir. Kimyasal apre uygulamalarında en yaygın kullanılan sistemler fosfor ve fosfor-azot esaslı bileşiklerdir. Bu kimyasallar kumaşa uygulandıktan sonra kurutma ve fikse işlemleri ile kumaş yüzeyinde

sabitlenir. En yaygın kullanılan yöntemlerden biri kumaşın alev geciktirici çözeltiye daldırılması, fazla kimyasalın uzaklaştırılması ve ardından belirli sıcaklıkta kürleme yapılmasına dayanan emdirme-kurutma-kürleme yöntemidir. Kürleme işlemi sırasında kimyasallar lif yüzeyine daha güçlü şekilde bağlanır ve böylece yıkamaya dayanıklı bir güç tutuşurluk etkisi sağlanabilir. Özellikle selülozik liflerde bazı kimyasallar lif yapısı ile bağ oluşturarak uzun süreli koruma sağlayabilmektedir. Bu aprelerin etkisi, lifin ısı karşısındaki bozunma davranışını değiştirmesine dayanır. Fosfor içeren bileşikler yüksek sıcaklıkta lifin kömürleşmesini artırır ve yanıcı gaz oluşumunu azaltır. Aynı zamanda yüzeyde oluşan karbonca zengin tabaka, ısı transferini sınırlandırarak oksijenin lif yüzeyine ulaşmasını zorlaştırır (Salmeia vd., 2016). Azot içeren bileşikler ise yanma sırasında inert gazlar oluşturarak alev ortamını seyreltir ve yanmanın devamını zorlaştırır. Fosfor ve azotun birlikte kullanılması, daha düşük kimyasal miktarıyla daha yüksek performans sağlayan sinerjik bir etki oluşturur. Bazı alev geciktirici sistemler yalnızca kömürleşmeyi artırmakla kalmaz, aynı zamanda gaz fazındaki yanma reaksiyonlarını da etkiler. Özellikle geçmişte kullanılan halojen bazlı bileşikler, alev sırasında oluşan serbest radikallerle reaksiyona girerek yanma zincirini kesintiye uğratabilmektedir. Ancak bu maddelerin çevresel ve toksikolojik zararları nedeniyle günümüzde daha çevreci alternatifler tercih edilmektedir. Yeni nesil apre sistemleri, düşük toksisiteye sahip ve çevreyle daha uyumlu olacak şekilde geliştirilmektedir. Kimyasal apre uygulamalarında kullanılan kimyasalın miktarı, kumaşın emme kapasitesi, kurutma sıcaklığı ve fikse koşulları elde edilen güç tutuşurluk performansını doğrudan etkiler. Bunun yanında kumaşın tuşe, mukavemet ve konfor özelliklerinin korunması da önem taşır. Bu nedenle güncel çalışmalar, yüksek güç tutuşurluk sağlayan ve kumaş özelliklerini minimum düzeyde etkileyen sistemlerin geliştirilmesine odaklanmaktadır.

Literatürde farklı polimerik yapılarda geliştirilen çeşitli çalışmalar, fosfor ve azot temelli sistemlerin hem reaktif hem de yüzey modifikasyonuna dayalı yaklaşımlar ile yüksek performanslı güç tutuşurluk sağladığını göstermektedir. Chen vd. (2022) gerçekleştirdikleri çalışmada pamuk kumaşlara çevre dostu ve kalıcı alev geciktirici özellik kazandırmak amacıyla mannitol bazlı fosfor içeren reaktif bir bileşik (FR-MNT) sentezlemişlerdir. Fosforöz asit ve fosforik asit ile oluşturulan ara ürünlerin üre ile modifiye edilmesiyle fosfor–azot içeren reaktif bir yapı elde edilmiştir. Bu yapı pamuk kumaşa emdirme yöntemi ile uygulanmış ve 175°C’de fiks edilerek lifin hidroksil grupları ile kovalent bağ oluşturmaları sağlanmıştır. Çalışma sonucunda pamuk kumaşın LOI değerinin yaklaşık %18–19 seviyesinden %32–34 seviyelerine yükseldiği, 50 yıkama sonrasında bile LOI değerinin %30’ın üzerinde kaldığı rapor edilmiştir. Dikey yanma testlerinde ise alev süresinin belirgin şekilde azaldığı ve kumaşın kendiliğinden söndüğü, ayrıca yanma sonrası %30–40 oranında kompakt kömürleşmiş kalıntı oluştuğu belirtilmiştir. Başka bir çalışmada Nandy vd. (2026) polyester kumaşlara fosfor içeren 3-HPP bileşiği ve azot içeren disperse boyalar aynı boya banyosuna eklenerek tek ve iki adımlı HT boyama prosesleri ile uygulamışlardır. Ayrıca bazı numunelerde plazma yüzey aktivasyonu kullanılarak kimyasal tutunma artırılmıştır. Sonuç olarak ham polyesterde yaklaşık %20–21 olan LOI değerinin işlem sonrası %30–35 aralığına çıktığı, bazı optimum koşullarda %36 seviyelerine ulaştığı bildirilmiştir. Yanma testlerinde damlama davranışının tamamen ortadan kalktığı ve yanma sonrası %25–35 oranında karbonlaşmış tabaka oluştuğu gözlenmiştir. Ayrıca plazma uygulanan numunelerde renk veriminin (K/S) yaklaşık %10–20 oranında daha iyi korunduğu belirtilmiştir. Bu çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, fosfor–azot temelli sistemlerin hem selülozik hem de polyester esaslı liflerde LOI değerini artırabildiği, bununla birlikte yanma davranışını kökten değiştirerek damlama ve hızlı alev yayılımını önemli ölçüde baskıladığı görülmektedir. Ayrıca

uygulama yönteminin ve yüzey aktivasyonunun, hem alev geciktiricilik hem de fiziksel kumaş özellikleri üzerinde belirleyici olduğu anlaşılmaktadır.

Kaplama ve Laminasyon

Kaplama ve laminasyon yöntemleri, tekstil materyallerine güç tutuşurluk kazandırmada yüzeyde oluşturulan koruyucu katmanlar üzerinden çalışan uygulamalardır. Bu yöntemlerde temel amaç, kumaşın ısı ve oksijenle temasını sınırlayarak yanma sürecini yavaşlatmak ve yanıcı gaz oluşumunu azaltmaktır. Kimyasal apre yöntemlerinden farklı olarak lifin içine küçük moleküllerin nüfuz etmesi yerine, yüzeyde daha kalın ve sürekli bir bariyer tabakası oluşturulur. Bu özellikleri sayesinde özellikle teknik tekstillerde ve yüksek performans gerektiren alanlarda sıkça tercih edilir. Kaplama yönteminde tekstil yüzeyine polimer esaslı bir film uygulanır ve bu film içerisinde alev geciktirici katkıları bulunur. Poliüretan, akrilik veya silikon bazlı polimerler bu amaçla yaygın olarak kullanılır. Uygulama sonrasında kurutma ve ısı işlemleri yüzeyde sürekli bir tabaka oluşturulur. Bu tabaka yanma sırasında ilk temas noktası olarak davranır ve hem ısı geçişini hem de oksijen ulaşımını sınırlandırır. Aynı zamanda içerdiği katkıları sayesinde yüksek sıcaklıkta bozunarak kömürleşmiş bir yapı oluşturabilir ve alttaki lifleri korur. Bazı inorganik dolgu maddeleri de ısıyı absorbe ederek ve su açığa çıkararak yanma sürecini yavaşlatır ve kaplamanın dayanımını artırır. Laminasyon yönteminde ise tekstil yüzeyine önceden hazırlanmış ince bir film veya membran ısı ve basınç yardımıyla yapıştırılır. Laminasyon sayesinde daha homojen ve kontrollü bir koruyucu yapı elde edilir. Yanma sırasında bu katman ya eriyerek yüzeyi kapatır ya da bozunarak koruyucu bir kömür tabakası oluşturur. Çok katmanlı yapılarda ise farklı katmanlar ısı yalıtımı, bariyer oluşturma ve mekanik dayanım gibi ayrı görevler üstlenir. Kaplama ve laminasyon yöntemlerinin en önemli avantajı, yüzeyde sürekli bir koruyucu tabaka oluşturarak yüksek güç

tutuşurluk performansı sağlamasıdır. Bununla birlikte kumaşın hava geçirgenliği, esnekliği ve tutum özellikleri üzerinde değişikliklere yol açabilir. Bu nedenle uygulama koşulları dikkatle seçilmelidir. Günümüzde bu yöntemler, daha hafif, ince ve çevre dostu sistemler geliştirmek amacıyla nano katkılar ve halojensiz formülasyonlar ile daha ileri seviyelere taşınmaktadır.

Kaplama ve laminasyon yöntemlerine ilişkin literatürde birçok farklı uygulama örneği bulunmaktadır. Örneğin Fang vd. (2023) gerçekleştirdikleri çalışmada, PET kumaşlara biyobazlı fitik asit ve jelatin kullanılarak katmanlı bir kaplama sistemi uygulamışlardır. Katmanlı kaplama yöntemi ile kumaş yüzeyinde koruyucu bir yapı oluşturulmuş ve bu yapının alev geciktirici performansı incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda kaplamanın kumaşın LOI değerini artırdığı, damlama davranışını engellediği ve yanma sırasında daha kararlı bir kömürleşmiş tabaka oluşturduğu belirlenmiştir. Ayrıca sistemin hem gaz fazında hem de yoğun fazda etkili bir güç tutuşurluk mekanizması sağladığı ifade edilmiştir. Benzer şekilde Zhou vd. (2025) gerçekleştirdikleri çalışmada ise pamuklu kumaşlara hem güç tutuşurluk hem de süperhidrofobik özellik kazandıran çevre dostu bir kaplama sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmada ammonyum fitat ile alev geciktirici bir tabaka oluşturulmuş, ardından silika nanopartikülleri ve PDMS içeren hidrofobik kaplama uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlarda kumaşın yanıcılığının önemli ölçüde azaldığı ve su temas açısının 150° üzerine çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca kaplamanın yıkama, aşınma ve farklı kimyasal ortamlara karşı dayanımını büyük ölçüde koruduğu görülmüştür. Bu çalışmalar, kaplama teknolojilerinin yalnızca güç tutuşurluk sağlamakla kalmayıp aynı zamanda su iticilik, termal dayanım ve mekanik dayanıklılık gibi ek fonksiyonel özellikler de kazandırabildiğini göstermektedir. Özellikle biyobazlı ve halojensiz sistemlere yönelik çalışmaların artması, gelecekte daha çevre dostu

ve yüksek performanslı tekstil yüzeylerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Sol Jel ve Nano Kaplama

Sol-jel ve nano kaplama yöntemleri, tekstil materyallerine güç tutuşurluk kazandırmada kullanılan gelişmiş yüzey modifikasyon teknikleri arasında yer almaktadır. Bu yöntemler, klasik kaplama ve laminasyon uygulamalarına benzer şekilde koruyucu bir bariyer oluşturmaya rağmen, çok daha ince, homojen ve yüksek performanslı tabakalar meydana getirmesiyle öne çıkmaktadır. Lif yüzeyinde oluşturulan bu ince koruyucu yapı sayesinde kumaşın esneklik, tutum ve hava geçirgenliği gibi temel özellikleri büyük ölçüde korunabilmektedir. Sol-jel yöntemi, sıvı formdaki öncü çözeltilerin tekstil yüzeyine uygulanması ve ardından kontrollü kurutma ile ağ yapısında ince bir koruyucu tabaka oluşturulması esasına dayanmaktadır. Oluşan bu yapı lif yüzeyine güçlü şekilde bağlanarak yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı bir katman meydana getirir. Böylece yanma sırasında liflerin parçalanması yavaşlamakta, yanıcı gaz oluşumu azalmakta ve alevin ilerleme hızı önemli ölçüde düşmektedir. Aynı zamanda yüzeyde meydana gelen yapı, ısının lif içerisine geçişini sınırlandırarak koruyucu bir bariyer görevi görmektedir. Bu yöntemle elde edilen kaplamalar ince yapıda olmalarına rağmen yüksek yıkama dayanımı ve uzun süreli kullanım avantajı sunmaktadır. Nano kaplama yöntemlerinde ise tekstil yüzeyine nano boyuttaki parçacıklar uygulanarak yüksek yüzey alanına sahip koruyucu bir tabaka oluşturulmaktadır. Bu yapılar, lif yüzeyinde homojen dağılım sağlayarak hem fiziksel hem de kimyasal koruma mekanizmalarının etkinliğini artırmaktadır. Nano yapılar yüksek sıcaklık altında karbonlaşmayı desteklemekte, yanıcı gaz çıkışını azaltmakta ve alev yayılımını sınırlandırmaktadır. Bunun yanında bazı nano katkılar, yanma sırasında oluşan aktif radikalleri baskılayarak gaz fazındaki zincir reaksiyonlarını kesintiye uğratmakta ve böylece yanmanın

devam etmesini zorlaştırmaktadır. Her iki yöntemde de uygulama süreci çözeltinin kumaş yüzeyine homojen şekilde aktarılması, fazla maddenin uzaklaştırılması, ardından kurutma ve fikse işlemleri ile koruyucu tabakanın stabilize edilmesi aşamalarını içermektedir. Oluşturulan ince yüzey tabakası sayesinde daha az kimyasal kullanılarak yüksek güç tutuşurluk performansı elde edilebilmekte, aynı zamanda kumaşın kullanım konforu korunabilmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar da bu yöntemlerin özellikle polyester kumaşlarda yanıcılığı azaltma, damlama problemini önleme ve karbonlaşmayı artırma açısından oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Guido vd. (2013) gerçekleştirdikleri çalışmada, polyester kumaşlara boehmit nanoparçacıkları ve GPTMS içeren hibrit sol-jel kaplamalar uygulamışlardır. Yapılan testlerde saf polyester kumaş yaklaşık 12 saniyede tamamen yanarken ve yoğun şekilde damlama gösterirken, boehmit ve GPTMS birlikte kullanılan kaplamalarda damlama tamamen ortadan kalkmış ve yanma süresi yaklaşık 33–34 saniyeye yükselmiştir. Ayrıca kaplanmış kumaşlarda yanma sonrası kalan artık miktarının %29–33 seviyelerine ulaştığı belirlenmiş, bu durum koruyucu karbon tabakasının oluştuğunu göstermiştir. Benzer şekilde Wang vd. (2021) gerçekleştirdikleri çalışmada ise DOPO modifiye silika esaslı sol-jel kaplama sistemi geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda polyester kumaşların sınırlayıcı oksijen indeksi değerinin %21,5’ten %32’ye yükseldiği belirlenmiştir. Ayrıca çok düşük kaplama oranlarında bile eriyerek damlama davranışının tamamen engellendiği, toplam ısı salımı ve maksimum ısı yayılım hızının önemli ölçüde azaldığı rapor edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, fosfor ve silika içeren hibrit yapının hem gaz fazında hem de kondanse fazda etkili bir alev geciktirme mekanizması oluşturduğunu göstermiştir. Bu çalışmalar, sol-jel ve nano kaplama yöntemlerinin tekstil materyallerinde yüksek performanslı güç tutuşurluk sağlamada oldukça etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle düşük kimyasal kullanımıyla yüksek

alev dayanımı sağlaması, kumaş özelliklerini büyük ölçüde koruması ve çevre dostu sistemler sunması nedeniyle bu yöntemlerin gelecekte daha yaygın kullanım alanı bulacağı düşünülmektedir.

Plazma Yöntemi

Plazma yöntemi ile tekstil materyallerine güç tutuşurluk kazandırılması, lif yüzeyinin yüksek enerjili iyonize gazlarla işlenmesine dayanır. Bu yöntem, klasik kimyasal apre ve kaplama işlemlerinden farklı olarak lif yüzeyini fiziksel ve kimyasal açıdan aktive ederek çalışır. Plazma işlemi sırasında oluşan iyonlar ve radikaller lif yüzeyinde yeni fonksiyonel grupların oluşmasını sağlar ve böylece yüzey daha aktif hale gelir. Bu aktif yapı, güç tutuşur kimyasalların lif yüzeyine daha etkili şekilde bağlanmasına yardımcı olur. Plazma uygulaması sayesinde fosfor, azot veya bor bazlı alev geciktirici maddeler kumaş yüzeyine daha güçlü şekilde tutunabilir. Böylece yıkamaya karşı daha dayanıklı ve kalıcı güç tutuşurluk etkisi elde edilir. Aynı zamanda lif yüzeyinde oluşan mikroskobik pürüzlülük, uygulanan kimyasalların yüzeye daha iyi bağlanmasını destekler. Bu durum hem doğal hem de sentetik liflerde yanmanın yavaşlatılmasına katkı sağlar. Bazı plazma uygulamaları tek başına da yanmayı geciktirici etki gösterebilir. İşlem sırasında yüzeyde oluşan aktif gruplar, ısı etkisiyle karbonlaşmayı artırarak koruyucu bir tabaka oluşmasına yardımcı olur. Bu tabaka yanıcı gaz çıkışını azaltır ve alevin yayılmasını geciktirir. Böylece plazma yöntemi hem kondanse faz hem de gaz faz mekanizmalarını destekleyerek etkili bir güç tutuşurluk sağlar. Plazma teknolojisi ayrıca çevre dostu bir yöntem olarak öne çıkar. Düşük miktarda kimyasal kullanılması ve solvent gerektirmemesi sayesinde çevresel etkiler azaltılabilir. Bunun yanında kumaşın tutum, esneklik ve hava geçirgenliği gibi özellikleri büyük ölçüde korunur. Günümüzde plazma işlemleri nano katkılar ve farklı kimyasal sistemlerle birlikte kullanılarak daha yüksek performanslı ve kalıcı güç tutuşur tekstil yüzeyleri geliştirilmektedir. Plazma yöntemi ile tekstil materyallerine güç

tutuşurluk kazandırılması, lif yüzeyinin yüksek enerjili iyonize gazlarla işlenmesiyle yüzeyin aktive edilmesi esasına dayanır. Bu işlem sayesinde lif yüzeyinde fonksiyonel gruplar oluşur ve yüzey reaktivitesi artarak alev geciktirici kimyasalların daha etkin bağlanması sağlanır. Böylece hem uygulanan aprelerin tutunması güçlenir hem de daha kalıcı bir güç tutuşurluk etkisi elde edilir.

Bu yaklaşımı destekleyen çalışmalar arasında Nandy vd. (2024) gerçekleştirdikleri çalışma yer almaktadır. Bu çalışmada polyester kumaşlara atmosferik plazma ön işlemi uygulanmış ve ardından fosfor bazlı 3-hidroksifenil fosfinil-propanoik asit ile apreleme yapılmıştır. Sonuçta işlem görmemiş kumaşta LOI değeri 20.8 iken, plazma + % 4 kimyasal uygulanan numunede LOI değeri 30'a yükselmiştir. Ayrıca 20 yıkama sonrası LOI değerinin yaklaşık 28 seviyesinde korunması, işlemin kalıcılığını göstermiştir. Bir diğer çalışma olan Ngo vd. (2021) gerçekleştirdikleri çalışmada ise DBD plazma ön işlemi sonrası fosfor içeren alev geciktirici bir kimyasal ile apre uygulanmıştır. Bu çalışmada LOI değerlerinde belirgin artış elde edilirken, 5 yıkama sonrasında dahi alev geciktirici etkinin büyük ölçüde korunduğu rapor edilmiştir. Ayrıca plazma süresinin 60 saniyeyi aşması durumunda mekanik özelliklerde ve renk stabilitesinde düşüş görüldüğü belirlenmiştir. Genel olarak bu çalışmalar, plazma ön işleminin polyester yüzeyini aktive ederek alev geciktirici kimyasalların bağlanmasını güçlendirdiğini ve böylece daha yüksek LOI değerleri ile daha dayanıklı güç tutuşurluk sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak plazma destekli yöntemler, yüksek performanslı ve kalıcı tekstil yüzey modifikasyonu için etkili bir alternatif oluşturmaktadır.

Sonuç

Tekstil materyallerinde güç tutuşurluk özelliği, yangın güvenliğinin sağlanması ve kullanıcı korunmasının artırılması açısından günümüz tekstil teknolojilerinin en önemli araştırma

alanlarından biri haline gelmiştir. Liflerin kimyasal yapısı, termal bozunma davranışı ve yüzey özellikleri yanma mekanizmasını doğrudan etkilerken, geliştirilen farklı güç tutuşurluk yöntemleri bu süreci kontrol altına almayı amaçlamaktadır. Aramid, PBI, PBO, poliimid ve fenolik lifler gibi doğal olarak güç tutuşur özellik gösteren yüksek performanslı lifler ileri teknik uygulamalarda önemli avantajlar sunarken kimyasal apre, kaplama ve laminasyon, sol-jel ve nano kaplama ile plazma destekli yüzey modifikasyon yöntemleri sayesinde geleneksel tekstil materyallerine de etkili alev geciktirici özellikler kazandırılabilir. Literatürde yer alan çalışmalar, özellikle fosfor ve azot temelli sistemlerin, nano yapıli kaplamaların ve plazma destekli uygulamaların LOI değerlerini belirgin şekilde artırdığını, damlama davranışını azalttığını ve karbonlaşmayı destekleyerek yanma direncini geliştirdiğini göstermektedir. Ayrıca çevre dostu, düşük toksisiteli ve yüksek dayanımlı sistemlere yönelik çalışmaların artması, sürdürülebilir ve yüksek performanslı güç tutuşur tekstillerin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Bu gelişmeler doğrultusunda, gelecekte hem kullanıcı konforunu koruyan hem de yüksek yangın güvenliği sağlayan yenilikçi tekstil yüzeylerinin daha geniş kullanım alanı bulacağı öngörülmektedir.

Etik Beyan

Bu kitap bölümünün hazırlanması sırasında yalnızca dil kontrolü gibi biçimsel düzenlemeler amacıyla yapay zeka araçları (ChatGPT) kullanılmıştır. Çalışmanın kurgusu, bilimsel içeriği, literatür taraması, ve değerlendirmeleri tamamen yazarlar tarafından özgün olarak hazırlanmış olup, çalışmanın bilimsel sorumluluğu bütünüyle yazarlara aittir.

Kaynakça

Chen, Y., Liao, Y., Zhang, G., & Zhang, F. (2022). Durable flame-retardant finishing of cotton with a reactive phosphorus-based environmental flame retardant. *Journal of Natural Fibers*, 19(16), 15128-15138.

Choudhury, A. K. R. (2020). *Flame retardants for textile materials*. CRC Press.

Fang, Y., Wu, J., Chang, S., & Wu, L. (2023). Flame retardant and anti-dripping polyethylene terephthalate fabric based on bio-based phytic acid/gelatine coating. *Surface Engineering*, 39(1), 49-55.

Guido, E., Alongi, J., Colleoni, C., Di Blasio, A., Carosio, F., Verelst, M., ... & Rosace, G. (2013). Thermal stability and flame retardancy of polyester fabrics sol-gel treated in the presence of boehmite nanoparticles. *Polymer degradation and stability*, 98(9), 1609-1616.

Horrocks, A. R. (1986). Flame-retardant finishing of textiles. *Rev. Prog. Color*, 16(1), 62-101.

Industry guide to flammability of textile products in Canada. Government of Canada. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/consumer-product-safety/reports-publications/industry-professionals/industry-guide-flammability-textile.html>

Kalaycı, E., Avinç, O., & Yavaş, A. (2014). Polibenzimidazol (pbi) lifleri. *Tekstil ve Mühendis*, 21(96), 51-67.

Kim, Y., Lee, S., & Yoon, H. (2021). Fire-safe polymer composites: flame-retardant effect of nanofillers. *Polymers*, 13(4), 540.

Kothari, V. K. (Ed.). (2000). Textile fibres: Developments and innovations (Progress in textiles: Science & technology, Vol. 2). IAFL Publications. ISBN 9788190103312.

Li, H., Gu, P., & Watson, J. C. (2026). Glass fibers.

Nandy, S., Sreekumar, T. V., Palaskar, S., & Mehra, N. (2024). Plasma-assisted incorporation of flame-retardant chemicals for improved flame retardancy of polyester fabrics. *Polymer Engineering & Science*, 64(11), 5411-5425.

Nandy, S., Sreekumar, T. V., Shinde, S., PM, A., Naskar, A., Bhattacharyya, A. R., & Mehra, N. (2026). Advanced Flame Retardant Polyester via Nitrogen–Phosphorus Synergism and Plasma-Driven Surface Functionalization. *Surfaces and Interfaces*, 108657.

Ngo, H. T., Vu Thi Hong, K., & Nguyen, T. B. (2021). Surface modification by the DBD plasma to improve the flame-retardant treatment for dyed polyester fabric. *Polymers*, 13(17), 3011.

Roy, S., Kulshrestha, M., Bhargava, P., & Das, S. (2025). Manufacturing of ceramic fibers: an overview. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 62(4), 611-634.

Salmeia, K. A., Gaan, S., & Malucelli, G. (2016). Recent advances for flame retardancy of textiles based on phosphorus chemistry. *Polymers*, 8(9), 319.

Sharma, M., Gao, S., Mäder, E., Sharma, H., Wei, L. Y., & Bijwe, J. (2014). Carbon fiber surfaces and composite interphases. *Composites Science and Technology*, 102, 35-50.

Wang, C., Wang, M., Chen, Y., Liu, L., Qin, C., & Huang, Y. (2026). Poly (p-phenylene benzobisoxazole) fiber: properties, applications, and advances in surface modification for improved

interfacial and UV resistance. *Advanced Composites and Hybrid Materials*.

Wang, Q. Z., Liu, C., Xu, Y. J., Liu, Y., Zhu, P., & Wang, Y. Z. (2021). Highly efficient flame retardation of polyester fabrics via novel DOPO-modified sol-gel coatings. *Polymer*, 226, 123761.

Wu, S., Sikdar, P., & Bhat, G. S. (2023). Recent progress in developing ballistic and anti-impact materials: Nanotechnology and main approaches. *Defence Technology*, 21, 33-61.

Zhang, D., Yu, J., Wu, H., Jaworska, B., Ellis, B. R., & Li, V. C. (2020). Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile Engineered Cementitious Composites (ECC). *Composites Part B: Engineering*, 184, 107741.

Zhang, W. F., Liu, C. L., Ying, Y. G., & Dong, W. S. (2010). The preparation and characterization of boron-containing phenolic fibers. *Materials Chemistry and Physics*, 121(1-2), 89-94.

Zhang, X., Yan, X., & Shi, M. (2018). The flame retardancy and pyrolysis mechanism of polyimide fibers investigated by cone calorimeter and pyrolysis–gas chromatography–mass spectrometry. *Journal of Industrial Textiles*, 48(2), 465-481.

Zhou, C., Lu, M., Rong, H., Deng, L., Zhang, J., Li, S., & Dong, A. (2025). Facile fabrication of eco-friendly flame retardant and superhydrophobic coatings on cotton fabrics. *Surfaces and Interfaces*, 69, 106758.

