

MALZEME DÖNGÜSELLİĞİ VE TOPLUMSAL ETKİLER DERİ-TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKLAŞIMLAR İLE TARİHSEL GELİŞİM



EDİTÖR
PROF. DR. MERUYERT KAYGUSUZ

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2025

ISBN • 978-625-8682-14-4

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruyenyayinevi.com

e-mail: seruyenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 42488

**MALZEME DÖNGÜSELLİĞİ VE
TOPLUMSAL ETKİLER
DERİ-TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE
SÜRDÜRÜLEBİLİR YAKLAŞIMLAR
İLE TARİHSEL GELİŞİM**

Editör:

Prof. Dr. Meruyert KAYGUSUZ

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

AYAKKABI TARİHİNDE MALZEME, TASARIM VE
DÖNGÜSELLİK..... 1

Serap KOCABIYIK ÇAŞKURLU

Betül KIR

BÖLÜM 2

ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ VE DÖNGÜSEL EKONOMİ
PERSPEKTİFİNDEN DERİ SEKTÖRÜNDE ATIK DEĞERLENDİRME
POTANSİYELİ23

Ertan EROL

BÖLÜM 3

GÖRÜNMEYENİ YÖNETMEK: DERİ SANAYİİNDE SOSYAL
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİN ÖLÇÜMÜ VE GELECEK VİZYONU69

Fazlı AKYÜZ

Xashim BEGALİEV

BÖLÜM 4

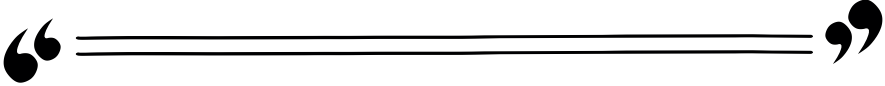
FONKSİYONEL ve SÜRDÜRÜLEBİLİR TEKSTİL YÜZEYLERİ İÇİN
YENİLİKÇİ DOĞAL BOYAMA YAKLAŞIMLARI99

Gamze GÜLŞEN BAKICI

Deniz Mutlu ALA



AYAKKABI TARİHİNDE MALZEME, TASARIM VE DÖNGÜSELLİK



Serap KOCABIYIK ÇAŞKURLU¹

Betül KIR²

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, Ayakkabı Tasarımı ve Üretimi Programı, İstanbul, Türkiye, ORCID: 0000-0002-4103-3314

² Öğr. Gör., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, Ayakkabı Tasarımı ve Üretimi Programı, İstanbul, Türkiye, ORCID: 0000-0002-6223-3665

1. GİRİŞ

Ayakkabı, tarih boyunca ayakların dış etkenlerden korunması ve bireylerin günlük yaşam aktivitelerini kolaylaştırması amacıyla teknolojik ve kültürel gelişmeler doğrultusunda değişiklik göstermiştir. Dış ortam etkilerinden koruyan işlevsel bir ürün olan ayakkabı; sosyal statüyü, kültürel kimliği, mesleği, cinsiyet rollerini ve estetik anlayışı yansıtan sembolik nesneler hâline gelmiştir. Ayakkabı modelleri tarih boyunca, coğrafi koşulların gerektirdiği işlevsellik, toplumsal yapıların belirlediği sembolik anlamlar ve teknolojik imkânların bulunduğu yenilikler ile sürekli bir değişim göstermiştir.

Çalışma kapsamında ayakkabıların tarihsel serüveni modeller üzerinden, kronolojik bir yaklaşımla, malzeme–teknoloji–kültür ekseninde ele alınmaktadır. Model kavramı sadece form değil, aynı zamanda toplumsal bir ifade biçimi olarak anlam kazanmıştır.

Tarihsel süreç, ayakkabı üretiminde kullanılan malzemelerin yalnız estetik ve işlevsel değil, aynı zamanda çevresel ve toplumsal etkilerle şekillendiğini göstermektedir. Özellikle sanayileşme sonrası dönemde malzeme tercihleri, döngüsellik ve sürdürülebilirlik tartışmalarının temelini oluşturmuştur.

1.1. Tarihsel Süreçte Malzeme Döngüsellliği ve Sürdürülebilirlik

Ayakkabı tarihinin erken dönemlerine bakıldığında, sürdürülebilirlik ve döngüsellik kavramlarının modern terminolojiyle ifade edilmemiş olsa da, fiilen uygulandığı görülmektedir. Tarih öncesi ve antik dönemlerde ayakkabı üretimi; yerel olarak temin edilen doğal malzemeler, sınırlı üretim ölçeği ve onarılabilir tasarım anlayışı üzerine kurulmuştur. Deri, bitkisel lifler, ağaç kabukları ve dokuma malzemeler, bulunduğu coğrafyanın ekolojik koşullarına uygun şekilde kullanılmış; üretim süreçleri doğayla uyumlu, atık miktarı ise son derece sınırlı olmuştur. Bu bağlamda erken dönem ayakkabıları, günümüzde “doğal döngüsel kullanım” olarak tanımlanabilecek bir üretim ve tüketim modelini yansıtmaktadır.

Sanayi Devrimi ile birlikte ayakkabı üretimi, el zanaatından makineleşmiş seri üretime doğru evrilmiş; bu dönüşüm, malzeme döngüsellğinde önemli bir kopuşa yol açmıştır. Standartlaşma, hız ve maliyet avantajları ön plana çıkarken, onarım kültürü yerini hızlı tüketim anlayışına bırakmış; sentetik ve petrol bazlı malzemelerin yaygınlaşmasıyla birlikte ürünlerin çevresel etkisi artmıştır. Ayakkabı, bu süreçte uzun ömürlü ve tamir edilebilir bir kullanım nesnesinden, büyük ölçüde tek kullanımlı ya da kısa ömürlü bir tüketim ürününe dönüşmüştür.

21.yüzyılda ise çevresel sorunların görünür hâle gelmesi, iklim krizi ve kaynakların sınırlılığı gibi faktörler doğrultusunda, ayakkabı tasarımı ve

üretiminde döngüsel ekonomi anlayışı yeniden gündeme gelmiştir.

Geri dönüştürülmüş malzemeler, biyobazlı alternatifler, modüler ve onarılabilir tasarımlar, tarihsel süreçte terk edilen yerel ve doğal üretim ilkelerinin çağdaş teknolojiyle yeniden yorumlanmasını sağlamaktadır. Bu yönüyle günümüz ayakkabı tasarımları, sanayi sonrası dönemin yarattığı kopuşu onarmaya yönelik bir “geri dönüş” sürecini temsil etmektedir. Dolayısıyla ayakkabı tarihine yalnızca biçimsel ve estetik değişimler açısından değil, malzeme döngüsellliği ve toplumsal üretim-tüketim ilişkileri bağlamında bakıldığında; tarih öncesinden günümüze uzanan sürecin doğrusal değil, döngüsel bir gelişim sergilediği görülmektedir. Bu döngü, sürdürülebilirlik kavramının günümüzde neden ayakkabı tasarımının merkezinde yer aldığını açıklayan tarihsel bir zemin sunmaktadır.

2. TARİHSEL SÜREÇTE AYAKKABI MODELLERİ VE MALZEME KULLANIMI

2.1. Tarih Öncesi Dönemlerde Ayakkabı Modelleri

Ayakkabıya ilişkin bilinen en eski bulgular İspanya, Fransa ve İtalya'daki mağaralardan elde edilmiştir. Taş Devri'nin orta dönemlerine tarihlenen İspanya'daki mağara resimlerinde, deri etek ve ceketli kadın figürleri, deri çizme ve pantolon giymiş avcı figürleri görülmektedir. MÖ 12.000-15.000 yıllarına tarihlenen bulgular, insanların hem deri hem de kürk kullanarak işlevsel ayakkabılar ürettiğini gösterir.

MÖ 8.000 yılı civarında Amerikan yerlilerinin sandalet türü ayakkabılar giydikleri anlaşılmıştır. Bu sandalet modelleri, basit örgü teknikleriyle yapılmış taban ve ayak üzerine geçen kayışlardan oluşur. Japonya'da ise ilk dönemlerde deri, diğer toplumlarda olduğu gibi ayakkabı yapımında tercih edilmiş; ancak daha sonraki dönemlerde Asya'dan yayılan kültürün etkisiyle tahta ayakkabılar ve dokuma giysiler yaygınlık kazanmıştır.

Oregon Üniversitesi'nden Luther Cressman'ın 1938'de ABD'nin Oregon bölgesinde keşfettiği sandaletler, yaklaşık 9.500 yıllıktır. Bükülmüş iplerden yapılmış, kapalı burunlu ve modern formda sandalet örnekleridir. Ayakkabı tasarımının, ne kadar fonksiyonel biçimde çözümler üretebildiği bu örneklerle anlaşılmaktadır.

Yaklaşık 5000 yıl öncesine tarihlenen bazı ayakkabı örnekleri, ağaç kabukları lifleriyle üretilmiş olup, dönemin malzeme çeşitliliği ve el işçiliği hakkında önemli ipuçları sunmaktadır (Arkeofili, 2018) (Şekil 1-a). Ermenistan'ın Areni-1 Mağarası'nda bulunan ayakkabı ise, günümüze ulaşan iyi korunmuş deri ayakkabıdır. Kuru mağara iklimi sayesinde bozulmadan günümüze ulaşmıştır (Choklat, 2012, s. 10; Pinhasi vd., 2010, s. 1), (Şekil 1-b).



Şekil 1. Ağaç kabuk lifleri ve deri malzemeli ilk ayakkabı örnekleri (E.H.A., 2025).

1991’de Alp Dağları’nda bulunan Buz adam Ötzi’nin ayakkabıları, MÖ 3800–3700 yıllarına tarihlenmiştir. Geyik derisi saya, ot örgüsü iç dolgu ve tendonlarla bağlanan bir modeldir. Soğuk iklim koşullarına son derece uygundur.

2.2. Antik Çağ Ayakkabı Modelleri

Antik çağda ayakkabılar hem işlevsel hem sembolik anlam taşımıştır.

Antik Mısır

Mısır’da sıcak iklim koşulları nedeniyle sandaletler yaygın olmuştur. MÖ 3000-525 yılları arasında firavunların resim ve heykellerinin genelinde doğal deriden yapılmış sandaletler giydikleri görülmektedir.

Toplumda sosyal sınıf farklılıkları ayakkabı tasarımlarına da yansımış; üst sınıfa mensup bireyler deri ve metal detaylarla süslenmiş ayakkabılar kullanırken, halk daha sade ve işlevsel modelleri tercih etmiştir. Sandalet tabanları zaman içinde güçlendirilmiş, renkler sınıf göstergesi hâline gelmiştir (Lissner, 2012, s. 57; Valbelle, 1992, s. 119; Blanck, 1999; Hussein, 2016).

Sosyal sınıf ayakkabı modelleri:

Firavunlar: Altın işlemeli, renkli, bazen tamamen altından yapılan sandaletler; törensel ve sembolik amaçlı kullanılırdı.

Asiller: Yüksek kaliteli deri, bazen renkli ve süslü sandaletler; işçilikte özenli, statü göstergesi.

Rahipler: Beyaz sandaletler, ritüel temizlik ve saflık için kullanılırdı.

Halk: Sade kösele veya liften (palmiye, papirus) yapılmış sandaletler; dayanıklı ve işlevsel.

Firavunlar ve üst sınıflar için ayakkabılar, güç ve statü göstergesi iken halk için koruyucu ve işlevsel bir eşyaydı.

Mezopotamya

Sümerler MÖ 3500 civarında doğal liflerden örülmüş sandalet modelleri üretmiştir (Kramer, 2002, s. 141). Bitkisel liflerin dayanıklılığı ve kolay bulunabilirliği bu modeli yaygın kılmıştır (Şekil 2). Neolitik dönemde tarımın yaygınlaşmasıyla birlikte bireylerin fiziksel aktiviteleri artmış; bu durum, ayakkabıların işlevsel yapısının gelişmesine etki etmiştir.



Şekil 2. Sümer Sandaletleri (Doble, 2021).

Hititler

Hitit uygarlığında ayakkabı modelleri, özellikle yukarı doğru kıvrık burunlu deri ayakkabılar ile bilinir. Tapınak ve saraylardaki duvar kabartmalarında ve yazılı eserlerde bu modeller görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Hititlerde duvar kabartmaları

Antik Yunan

Antik Yunan'da ayakkabı üretimi hem işlevsel hem de estetik yönüyle gelişmiş bir zanaat alanı olarak öne çıkmıştır. Dayanıklılığı artırmak için sığır, geyik ve çeşitli hayvan derileri kullanılmış; süsleme amacıyla gravür, baskı, nakış ve aplike dikiş teknikleri uygulanmıştır. Helenistik dönemde tabanlarda

estetik amaçlı çiviler ve semboller bulunur (Yıldız, 2000). Ayakkabı modelleri sosyal statüyü, ritüeli ve sanatsal ifadeyi yansıtıyordu (Smith, 2021; Morrow, 1985).

Ayakkabı modelleri:

- Basit sandaletler
- Bağcıklı sandaletler
- Mantar tabanlı modeller
- Seyahat, avcılık veya tiyatro oyuncularını tarafından giyilen çizmeler (kothornos)

Yüksek tabanlı kothornos, oyuncunun karakterinin statüsünü seyirciye göstermesi açısından teatral bir işlev taşımıştır.

Yunan uygarlığı, Roma uygarlığının başlangıcını oluşturmuştur. Roma ayakkabı ve çizmelerinde taban katlarında artış ve taban üstü derilerde süslemeler dikkat çekmektedir. Romalılarda ayakkabı türleri yapılan göreve göre değişiklik göstermiştir. Ayakkabılarda sivri, yuvarlak, kalkık burunlu, yüksek topuklu ve bağcıklı çeşitler görülmektedir. Uzun burunlu ayakkabılar toplumsal düzeyin bir göstergesi olmuş; asiller uzun burunlu ayakkabılar altına tahta taban ekleyerek giymişlerdir. Başlangıçta köleler, köylüler ve yoksul halk sıcak bölgelerde yaz aylarında çoğunlukla yalınayak dolaşırken, zenginler altın ve gümüş gibi değerli taşlarla süslü, yıldızlı deriden yapılmış ayakkabılar giymiştir. Sandaletler başlangıçta soylu kişiler tarafından kullanılmışken, zamanla soyluluk göstergesi olmaktan çıkıp gündelik giysi unsuru haline gelmiştir.

Antik Roma

Romalılarda ayakkabı türleri yapılan göreve göre değişiklik göstermiştir. Ayakkabılarda sivri, yuvarlak, kalkık burunlu, yüksek topuklu ve bağcıklı çeşitler görülmektedir. Uzun burunlu ayakkabılar toplumsal düzeyin bir göstergesi olmuş; asiller uzun burunlu ayakkabılar altına tahta taban ekleyerek giymişlerdir. Bu durum, beden üzerinden statü sergilemenin Orta Çağ Avrupa'sında sosyal hiyerarşiyi görünür kılan bir araç hâline geldiğini göstermektedir. Yoksul halk sıcak bölgelerde yaz aylarında çoğunlukla yalınayak dolaşırken, zenginler altın ve gümüş gibi değerli taşlarla süslü, yıldızlı deriden yapılmış ayakkabılar giymiştir. Sandaletler başlangıçta soylu kişiler tarafından kullanılmışken, zamanla soyluluk göstergesi olmaktan çıkıp gündelik giysi unsuru haline gelmiştir (Şekil 4).

Antik Roma'da ayakkabılar işlevsel ve sembolik anlamlar taşımıştır. Ayakkabı statünün en açık göstergelerinden biri hâline gelmiştir (Blanck, 1999; Elliott, 2023).

Dönemin ayakkabı modelleri:

- Caligae: Dayanıklı askeri sandalet
- Soleae: Hafif günlük sandalet
- Calceus: Kapalı model
- Asiller: Lüks, süslü, yaldızlı, yüksek tabanlı modeller

Bazı Roma ayakkabı tabanlarında dekoratif çivilerle kelime ve semboller i lenmi tir (Yıldız, 2000, s. 31–32).



Şekil 4. Sandalet modelleri (London Museum, 2020).

2.3. Orta  a  Ayakkabı Modelleri

Orta  a da Haçlı Seferleri ve dini savaşlar kıyafetlerle birlikte ayakkabı tasarımlarını da etkilemiştir. Ayakkabı tasarımı, dinsel yapı, askeri kültür ve sınıfsal ayrımlarla yeniden bi imlenmi tir. Sanatsal süslemeler yaygınlaşmış; altın işlemeli, bacakları saran ve  orapla giyilen modeller  ne çıkmıştır. Bu dönemde zengin sınıflar tarafından tercih edilen “Medieval Ayakkabılar” ( ekil 5) deri, kumaş ve ipek gibi lüks malzemelerden üretilmiştir (Johnston & Woolley, 2015, s. 10;  lgen, 2012, s. 476; Walford, 2007).

Medieval Modeller

Bu dönemde  ne çıkan modeller:

- İ e doğru dikilen, esnek ayakkabılar (turnshoe)
- Baldır hizasına kadar çıkan deri çizmeler
- İpek, kadife, deri sayalı ayakkabılar

Zengin kesimin ayakkabılarında i lemeler, nakı lar ve parlak malzemeler yaygındır.

Pouline Ayakkabıları

1370-1400 arasında Avrupa'nın en dikkat çekici modeli pouline adlı uzun burunlu ayakkabılardır. Burun uzunluğu statü göstergesidir. Zamanla form değiştiren modelin; topuk yükseklikleri artmış ve burun kısımları yuvarlak bir şekil almıştır (Johnston ve Woolley, 2015:13; Yıldız, 2015:256). Sıklıkla deri malzemeden üretilen pouline ayakkabılar (Şekil 5), hem işlevsel hem de sembolik anlamlar taşıyan bir moda unsuru hâline gelmiştir. III. Edward, burun uzunluğuna 2 inch sınırı koymuş, II. Richard döneminde ise burunlar 18 inç'e kadar ulaşmıştır.



Şekil 5. Pouline ayakkabı modeli (Johnston ve Woolley, 2015).

2.4. Rönesans ve Erken Modern Dönem Modelleri

Chopine

15-17. yüzyıllarda chopine ayakkabılar, özellikle Venedik'te çok yüksek tabanlarıyla öne çıkmıştır. Tabanları ahşap veya mantar olup saya malzemesi deri ya da kadifedir (Şekil 6), (Johnston ve Woolley, 2015: 19). Taban yükseklikleri 75 cm'ye kadar ulaşmıştır. Saya kısmı deri ya da kadifedir.



Şekil 6. Chopine ayakkabı (The Met , 2025).

Rönesans Estetiği

Rönesans dönemi ayakkabılarında; açık renk deri, delikli saya yüzey tasarımları öne çıkmıştır. Renkli astarları veya çorapları görünür kılmak amacıyla saya yüzeyi delinmiş veya kesilmiş modeller tercih edilmiştir. Bu estetik anlayış, İtalya merkezli uluslararası moda akımlarının şekillenmesine katkıda bulunmuştur (Walford, 2007, s. 19). Kumaş, deri ve dekoratif unsurların yoğun kullanımı hem yabancı ziyaretçileri etkilemiş hem de uluslararası moda akımlarının şekillenmesine katkıda bulunmuştur.



Şekil 7. 16. Yüzyıl ayakkabı örneği (ParkStone Art, 2021)

17. Yüzyılda Topuklu Ayakkabılar

Topuklu ayakkabı, bu dönemde hem kadınlar hem erkekler tarafından kullanılmıştır. Tokalı, fiyonk süslemeli ve gösterişli modeller yaygındır.

2.5. 18. ve 19. Yüzyıl Ayakkabı Modelleri

18 ve 19. yüzyıllar, ayakkabı tasarımının modern anlamda biçimlendiği, teknolojik ilerlemelerin üretimi kökten değiştirdiği kritik bir dönemdir. Ev içi kullanımda terlikler, dış ortamda yüksek topuklu, işlemeli ayakkabılar tercih edilmiştir.

18.yüzyılda ayakkabı, özellikle Avrupa saray kültüründe görsel bir statü nesnesi hâline gelmiştir:

- Saya malzemesi olarak ipek, brokar, kadife
- Mantar, tahta veya katmanlı deri topuklar
- Zengin işleme, kabartma ve nakış teknikleri
- Giyimin bütünüyle uyumlu ayakkabı-giyim kombinleri

Bu dönemde kadınlar çoğunlukla iç mekânda terlikler ve resmi kıyafetlerle giyilen yüksek topuklu işlemeli ayakkabılar kullanmıştır (Bossan, 2007; Görünür, 2016). Şekil 8'de görüldüğü gibi genellikle işleme ile süslenmiş, deri, kadife veya ipekten üretilmişlerdir. Rokoko dönemi ayakkabılarında;

brokar kumaş, kadife ve ipek saya, mantar veya tahta topuk ve yoğun işlemler görülmektedir.



Şekil 8. 18. yy. ayakkabı örneği (Bossan, 2007).

18. yüzyılın sonlarına doğru, eşitlik anlayışının yaygınlaşması ile, ayakkabı tasarımlarında sadeleşme eğilimi görülmekte olup bu dönüşümle birlikte, önceki dönemlerde yaygın olan değerli taşlarla süslenmiş tokalar yerini daha sade kordon ve şerit detaylarına bırakmıştır. 1800 yılı itibariyle ayakkabılar deriden yapılmaya başlanmıştır ve süsleme olarak sadece bağcıklarda ipek malzeme kullanılmıştır.

İngiliz stili ve Berlin yünü gibi yerel moda akımları etkili olmuş; aynı zamanda Rokoko tarzı ayakkabı tasarımlarının yeniden canlandığı bir süreç yaşanmıştır (Şekil 9). Egzotizmin modaya yansımalarıyla birlikte, farklı kültürel esintiler içeren detaylar ayakkabı tasarımlarında kendini göstermiştir. Binicilik ayakkabıları, yüksek topuklu ayakkabılar, dönemin sosyal yapısına uygun olarak öne çıkan modeller arasında yer almıştır.



Şekil 9. Rokoko etkili ayakkabılar (1850) (Hürriyet, M., 2025).

19. yüzyıl, ayakkabıda en büyük dönüşümün yaşandığı dönemdir (Walford, 2007; Johnston & Woolley, 2015, Bossan, 2007).

- *Sağ-sol ayak için ayakkabı* (1820); bu yenilik, ayakkabının konfor ve ergonomi açısından modernleşmesinin ilk adımıdır. Bu tarihten daha önce ayakkabı üretilirken sağ-sol ayrımı olmaksızın ayak boyuna göre üretim yapılırdı.
- *Dikiş makinelerinin kullanılması* (1850 sonrası): ayakkabı saya dikimi hızlanmıştır. Dikiş makinesindeki gelişmeler, seri üretimin temelini oluşturdu. Maliyet düşmüş daha geniş kitleler ayakkabıya erişmiştir.

Goodyear dikiş sistemi (1875), modern taban-saya birleştirme tekniğinin temelidir.

- *Ayakkabı numaralandırma sistemi* (1880); Bu sistem sayesinde üretim standartlaşmış, uluslararası ticaret artmıştır.
- *Spor ayakkabının ortaya çıkışı*; yüzyılın sonlarında kauçuk tabanlı ilk spor ayakkabılar (plimsoll shoe) üretilmiştir. Sporun popülerleşmesiyle birlikte tenis ayakkabıları yaygınlaşmış, sade ve zarif stil anlayışı ön planda tutulmuştur.
- Moda etkisi ve sınıfsal farklılıklar:
Erkeklerde zarif, ince burunlu şehir ayakkabıları
Kadınlarda bağcıklı ve düğmeli botlar
Gündelik ayakkabı-resmî ayakkabı ayrımı

Ayakkabı modellerinde sivri burun modası devam ederken, kauçuk topuklar yaygınlaştı. Bu dönem, günümüzün modern ayakkabı kategorilerinin temellerinin atıldığı dönemdir.

Endüstriyel Devrim, ayakkabı üretiminde önemli değişimlerin yaşanmasına zemin hazırlamıştır (Güdek, 2023). Bu dönemde, seri üretime geçilmesiyle birlikte yeni malzemeler kullanılmaya başlanmış ve geleneksel üretim süreçleri büyük ölçüde dönüşüme uğramıştır (Erdoğan & Uyanık, 2020). Sanayi öncesi dönemde tekstil üretiminde genellikle doğal lifler; başta pamuk, yün ve keten olmak üzere kullanılırken, Sanayi Devrimi ile birlikte bu ham maddelere erişim kolaylaşmış ve maliyetler azalmıştır. Bu durum, tekstil ürünlerinin daha geniş kitlelere ulaşmasını sağlamıştır (Gökçe, Koluman, Akçay, Güneş, & Kurt, 2024).

2.6. 20. Yüzyıl Ayakkabı Modelleri

20.yüzyıl, ayakkabının hem teknik hem estetik hem de toplumsal dönüşüm açısından en hızlı değişim gösterdiği dönemdir.

1900–1940: Kadınlarda ipek, saten, boncuk işlemeli ayakkabılar, ekonomik kriz dönemlerinde koyu renkler, lastik tabanların yaygınlaşması savaş döneminde deri askerî botlara ayrıldığı için keçe ve kenevir tabanlı alternatif modeller (Şekil 10).

Bu dönemde:

Art Deco etkisi: İpek, boncuk ve saten malzemelerle geometrik desenli ayakkabılar ortaya çıkmıştır (Johnston & Woolley, 2015).

Ekonomik bunalım ve sadeleşme: 1930'larda siyah ve kahverengi tonları hâkimdir.

Kauçuk tabanlı ayakkabılar: Converse All-Star'ın (1917) doğuşu, spor ayakkabının moda nesnesine dönüşmesinin başlangıcıdır.

Savaş ekonomisi: Dünya Savaşı sırasında deri kıtlığı nedeniyle keçe, kenevir, tekstil tabanlı modeller yaygınlaşmıştır.



Şekil 10. 1900, 1910 ve 1920 ayakkabı modelleri

1920'li ve 1930'lu yıllarda ipek, kadife, boncuk, saten gibi zengin malzemelerle süslenmiş ayakkabılar, dönemin zarafet anlayışını yansıtmaktadır (Johnston & Woolley, 2015, s. 98), (Şekil 11).



Şekil 11. 1900-1940 ayakkabı modeller (Nişantaşı Müzayede, 2025).

1930'larda piyasadaki durgunluk uzun dönemli giyim seçeneklerine ilişkin talep, ayakkabı giyiminde de aynı olmuştur.

- Renkler koyulaşmış, siyah ve kahverengi kadın ve erkeklerde tercih edilen renkler olmuştur (Şekil 12).
- Lastik taban modaya girmiştir. Bu sert giyim, zor ekonomik zaman için uygun olmuştur.
- İpekler, kadınların gece ayakkabılarında baskın iken, zaman içinde bunun yerini daha pratik deri ve süet almıştır.



Şekil 12.1930'larda ayakkabı modelleri

Dünya Savaşları, ekonomik, sosyal ve siyasi alanlarda köklü dönüşümlere yol açmıştır. Savaş yıllarında, maliyetlerin artması ve kaynakların sınırlı olması nedeniyle deri, öncelikli olarak askerî botların üretiminde kullanılmıştır (Walford, 2007) Bu durum, ayakkabı üreticilerini alternatif malzemeler arayışına yönlendirmiş; keçe ve kenevir gibi malzemelerin kullanıldığı ayakkabılar yaygınlaşmıştır (Şekil 13).



Şekil 13. 1940-1970 Savaş sonrası alternatif malzemelerle üretilen ayakkabılar (keçe, kenevir, plastik, tekstil) (Forest , 2024).

1950–1980: Moda, Teknoloji ve Sporun Yükselişi

Bu dönemde: Spor ayakkabıda hızlı gelişme, plastik ve sentetik saya, hafif taban teknolojileri ve renk–malzeme çeşitliliği yaşanmıştır.

Stiletto topuğun yükselişi: Dior ve Ferragamo'nun tasarımları ile ince, yüksek topuk popüler olmuştur.

Spor ayakkabı markalarının doğuşu:

- 1920'ler: Adidas
- 1949: Asics
- 1972: Nike Air taban

Sportif ayakkabı, modanın temel parçası hâline gelmiştir.

Malzeme olarak;

- PU tabanlar
- EVA köpük
- Plastik saya
- Sentetik file malzemeler kullanılmıştır.

1970'lerde renk ve kumaş tercihleri sınırsızdır.

• Plastikler, deriler, kumaşlar, tahta ve benzeri diğer malzemeler ayakkabıların tasarım ve üretiminde kullanılmıştır.

• Çok az ayakkabı deriden yapılmıştır.

• Çeşitli renklerin ve malzemelerin bir arada uyumlu kullanımına yönelik olmuştur.

1980–2000: Sneaker Kültürü ve Teknoloji

Bu dönemde:

- Mikrofiber, streç kumaşlar
- Modaya göre retro çizgilerin geri dönüşü
- Ekolojik temalı tasarımlar
- Teknolojik spor modellerinin yükselişi görülmüştür.

Air, Gel, Boost teknolojileri: Koşu ayakkabısının konfor ve performansı ön plana çıkmıştır.

Kültürel ayakkabı ikonları:

- Reebok Classic
- Nike Air Jordan
- Adidas Superstar

Ayakkabı, gençlik kültürünün sembolü hâline gelmiştir.

Çevre bilinci ile ekolojik malzemeler ve geri dönüşümlü plastikler kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 14. 1970-2000 Sentetik deri ve spor ayakkabılar (Shoes in history 2014, 2014)

1980’lerde elbise ve iş ayakkabılarında deri yanı sıra çok çeşitli malzemeler kullanılmıştır. Spor ayakkabıda gelişme olmuştur. Ayakkabılar ergonomik olarak tasarlanmıştır.

1990’larda teknoloji ayakkabı giyimine büyük bir etki yapmıştır. Mikrofiber, streç kumaşlar, sentetik malzemeler gibi malzemelerin kullanımı ve eski moda çizgilerinin döneme yansması Milenyuma doğru ekoloji önemli bir tema olmuş, konuyla ilgili özel tasarımlar yapılmıştır.

Yirminci yüzyılın ortalarında, özellikle sentetik deri ve plastik bazlı malzemeler ayakkabı üretiminde yaygınlık kazanmıştır. Sentetik deri, gerçek deriye kıyasla daha düşük maliyetli ve daha erişilebilir bir seçenek sunarken, plastik bazlı malzemeler hafiflik, su geçirmezlik ve uzun ömürlülük gibi avantajlar sağlamıştır (Şekil 15).



Şekil 15. 20. yy. ayakkabı örnekleri (Johnston & Woolley, Shoes: A Brief History, 2015)

Ayakkabı üretiminde kullanılan saya ve süsleme malzemeleri, tarih boyunca teknolojik ilerlemeler, estetik anlayışlar ve çevresel kaygılar doğrultusunda önemli değişimler geçirmiştir. Bu süreç, işlevselliikten modaya, ekonomik faktörlerden sürdürülebilirliğe kadar birçok unsuru kapsayan geniş bir perspektife sahiptir. İlk dönemlerde doğal malzemeler kullanılarak üretilen

ayakkabılar, zamanla sentetik ve biyoteknolojik materyallerin entegrasyonu ile farklılaşmış ve çeşitlenmiştir.

Tablo 1’de görüldüğü üzere, ayakkabı tarihinde kullanılan malzemeler yalnızca estetik ve teknik gelişmeler doğrultusunda değil; üretim ölçeği, onarım kültürü ve tüketim alışkanlıklarındaki değişimlerle birlikte dönüşüm göstermiştir. Erken dönemlerde yerel, doğal ve onarılabılır malzemeler öne çıkarken, sanayileşme ile birlikte sentetik ve seri üretime dayalı malzeme tercihleri baskın hâle gelmiştir. 20. yüzyılın sonu ve 21. yüzyılda ise sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi yaklaşımları doğrultusunda biyobazlı ve geri dönüştürülmüş malzemelerin yeniden önem kazandığı görülmektedir

Tablo 1. Ayakkabı Tarihinde Kullanılan Malzemeler ve Örnek Modeller

Dönem/Yıl	Ayakkabı Türü	Kullanılan Malzemeler
~MÖ 7500	Kapalı burunlu örgü ayakkabı	Doğal lif, bükülmüş ip
~MÖ 3500	Sümer sandaletleri	Doğal lifler
MS 100	Roma caligae ve soleae	Deri
MS 1200–1400	Orta Çağ ayakkabılar	Deri, kumaş, ipek
1370–1400	Pouline	Deri
1400–1600	Chopine	Ahşap, mantar, deri, kadife
1500	Rönesans ayakkabılar	Açık renk deri
1600–1700	Topuklu ayakkabılar	Deri, ipek, kadife
1700–1800	Terlik ve işlemeli yüksek topuklular	Beyaz deri, kadife, ipek
1800	Sade bağcıklı modeller	Deri, ipek
1850	Rokoko etkili ayakkabılar	Deri, tekstil
1900–1940	Zarif boncuklu modeller	İpek, kadife, saten
1940–1970	Savaş sonrası alternatif malzemeler	Keçe, kenevir, sentetik
1970–2000	Sentetik deri ve spor ayakkabılar	Sentetik deri, plastik

2.7. 21. Yüzyılda Ayakkabı Modelleri

21. Yüzyılda ayakkabı tasarımı ve üretiminde sürdürülebilirlik önemli bir kavram haline gelmiştir. Doğal deri yerine geri dönüştürülmüş malzemeler, bitki bazlı alternatifler ve biyoteknolojik tekstiller kullanılmaya başlanmıştır. Mikro fiberler, örgü teknikleriyle üretilmiş hafif saya malzemeleri ve nefes alabilir yapılar öne çıkmaktadır. Ayrıca 3D baskı teknolojisi, ayakkabı üretiminde yenilikçi çözümler sunmakta; kişiselleştirilmiş ve atık oranı düşük ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Çevresel duyarlılık, etik üretim ve döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda geliştirilen ayakkabı malzemeleri, günümüz modasının ayrılmaz bir parçası olmuştur (Croom, 2010).

21. yüzyılda ayakkabı tasarımı sürdürülebilirlik ilkeleriyle yeniden şekillenmiştir.

- Geri dönüştürülmüş polyester ve mikro fiber sayalar
- Vegan deri
- Bitki bazlı biyomalzeme tabanlar
- Örgü saya (knit) teknolojisi
- Kişiyi özel üretim sağlayan 3D baskı ayakkabılar
- Tamir edilebilir-modüler tasarımlar
- Döngüsel ekonomi yaklaşımı

Ayakkabının işlevselliği ile tasarımın estetik dili, çevresel duyarlılıkla birleşmiştir.

21.yüzyıl, ayakkabı tasarımının dijitalleştiği, sürdürülebilirleştiği ve kişiselleştiği dönemdir.

Örgü Saya (Knit) Teknolojisi

Nike Flyknit ve Adidas Primeknit ile başlayan bu teknoloji:

- Saya ağırlığını %50 azaltır.
- Atık oranını düşürür.
- Ayakkabıyı biyomekanik olarak ayağa adapte eder.

Bu teknik, tekstil mühendisliği ile ayakkabı tasarımının kesişimidir.

3D Baskı Ayakkabılar

3D baskı:

- Kişiyi özel üretim
- Atıksız üretim
- Kompleks geometrili tabanlar üretme gibi avantajlar sağlar.

Vegan ve Biyo-Bazlı Malzemeler

- Mantar derisi (mycelium)
- Ananas yaprağı lifi (Piñatex)
- Kaktüs derisi
- Geri dönüştürülmüş PET saya

Bu malzemelerle yeni model kategorileri oluşmuştur.

Döngüsel Ekonomi ve Onarılabilir Ayakkabılar

- Modüler ayakkabılar
- Vida ile birleştirilen taban-saya sistemleri
- Üreticiye geri gönderilen geri dönüşümlü modeller

Ayakkabıda kullanım ömrünü uzatma yaklaşımı öne çıkmıştır.

Dijital Ayakkabılar

- Sanal sneaker modelleri
- Metaverse tasarımları
- Dijital kimlik ayakkabıları

Geleneksel model anlayışını kökten değiştirmiştir.

Bu gelişmeler, ayakkabı tasarımının tarihsel olarak kaybettiği onarılabilirlik, yerel üretim ve malzeme bilinci gibi değerleri, dijital teknolojiler aracılığıyla yeniden üretme potansiyeli taşımaktadır.

3. SONUÇ

Ayakkabı modellerinin tarihsel gelişimi, malzeme, teknoloji ve toplumsal yapı tarafından biçimlendirilen uzun soluklu bir dönüşüm sürecini yansıtmaktadır. İlk çağlardaki basit ve işlevsel sandaletlerden günümüzün yüksek teknolojili, sürdürülebilir ve dijital üretimle şekillenen ayakkabılarına uzanan bu süreç, ayakkabının yalnızca bir kullanım nesnesi değil, aynı zamanda kültürel ve toplumsal bir gösterge olduğunu ortaya koymaktadır.

Tarih boyunca ayakkabı; korunma ve konfor işlevinin yanı sıra, estetik beğeniler, toplumsal statü, kimlik ve aidiyet kavramlarıyla doğrudan ilişkilendirilmiştir. Kullanılan malzemeler, üretim teknikleri ve tasarım anlayışları, içinde bulunulan dönemin ekonomik yapısını, teknolojik olanaklarını ve toplumsal değerlerini yansıtan önemli göstergeler olmuştur. Bu bağlamda ayakkabı, bireysel tüketimin ötesinde, toplumsal yapının okunabileceği çok katmanlı bir kültür nesnesi niteliği taşımaktadır.

Bu çalışma, ayakkabı tarihinin yalnızca biçimsel ve estetik değişimler üzerinden değil, malzeme döngüsellliği ve üretim-tüketim ilişkileri çerçevesinde değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Erken dönemlerde yerel, doğal ve onarılabilir malzemelere dayalı üretim anlayışının, sanayileşme süreciyle birlikte büyük ölçüde kesintiye uğradığı; buna karşın 20. yüzyılın sonu ve 21. yüzyılda sürdürülebilirlik, döngüsel ekonomi ve dijital üretim teknolojileri aracılığıyla yeniden gündeme geldiği görülmektedir. Bu dönüşüm, tarihsel olarak terk edilen üretim ilkelerinin çağdaş teknolojilerle yeniden yorumlanmasını mümkün kılmaktadır.

Günümüzde ve yakın gelecekte ayakkabı tasarımının, yalnızca estetik ve performans odaklı yaklaşımlarla değil; kaynak verimliliği, yaşam döngüsü tasarımı, onarılabilirlik ve yeniden kullanım gibi kriterler doğrultusunda şekillenmesi beklenmektedir. Dijital üretim teknikleri, üç boyutlu yazıcılar, veri temelli tasarım süreçleri ve biyobazlı malzemeler, ayakkabının tasarımından kullanım ömrü sonuna kadar olan sürecin bütüncül biçimde ele alınmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda tasarımcıların ve üreticilerin, yalnızca ürün geliştiren değil, aynı zamanda sürdürülebilir üretim sistemleri tasarlayan aktörler hâline gelmesi kaçınılmaz görünmektedir.

Sonuç olarak ayakkabı, malzeme döngüsellliği ve sürdürülebilir tasarım bağlamında geleceğin üretim ve tüketim modellerinin anlaşılmasında önemli bir örnek alan sunmaktadır. Bu bölüm, ayakkabı tarihinin sunduğu deneyim ve birikimin, deri ve tekstil endüstrisinde daha etik, çevreyle uyumlu ve toplumsal sorumluluk taşıyan tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesi için güçlü bir tarihsel ve kavramsal zemin oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

- Arkeofili. (2018). *Tarih öncesi ayakkabı buluntuları*. <https://arkeofili.com>
- Blanck, H. (1999). *Footwear in antiquity*. Routledge.
- Bossan, M. (2007). *Shoes: History and icons*. Parkstone Press.
- Choklat, T. (2012). *The shoe bible*. Rockport Publishers.
- Croom, A. (2010). *Roman Clothing and Fashion*. The Hill, Birleşik Krallık: This edition published.
- Doble, R. (2021). *Mesopotamian Ancient Basket Weaving Technology and the Sumerian Reed Industry*. https://www.researchgate.net/publication/355144609_Mesopotamian_Ancient_Basket_Weaving_Technology_and_the_Sumerian_Reed_Industry adresinden alındı
- E.H.A. (2016). *Dünyanın en eski giysileri*. <https://www.ermenihaber.am>
- E.H.A. (2025, 07 19). Ermeni Haber Ajansı: https://www.ermenihaber.am/tr/news/2016/02/09/D%C3%BCnya-en-eski-5-k%C4%B1yafeti/75811?fb_comment_id=866408120143783_8664874368025 adresinden alındı
- Elliott, T. (2023). Roman footwear forms. *Journal of Ancient Material Studies*, 7(2), 1–14.
- Erdoğan, H., & Uyanık, A. (2020). Sanayi devriminde tekstil. *Tekstil ve Mühendislik*, 27(3), 45–53.
- Forest, I. (2024). <https://forestdylls.com/2024/04/10/19th-century-shoes-1871-1880/> adresinden alındı
- Hürriyet, M. (2025). <https://www.hurriyet.com.tr/mahmure/galeri-gecmisten-gunumuze-ayakkabilar-34913851/14> adresinden alındı
- Gökçe, Ü., Koluman, S., Akçay, H., Güneş, Ç., & Kurt, M. (2024). Tekstil teknolojileri ve malzeme evrimi. *Tekstil Araştırmaları Dergisi*, 12(1), 55–72.
- Güdek, E. (2023). Ayakkabı endüstrisinde dönüşüm. *Endüstri Tarihi Dergisi*, 9(1), 33–48.
- Hussein, M. (2016). Ancient Egyptian footwear at the Agriculture Museum, Giza. *Journal of Association of Arab Universities for Tourism and Hospitality*, 13(1), 1–8. <https://doi.org/10.21608/jaauth.2016.49691>
- Johnston, L., & Woolley, C. (2015). *Shoes: A brief history*. British Museum Press.
- Kramer, S. N. (2002). *History begins at Sumer*. University of Pennsylvania Press.
- Lissner, I. (2012). *Living in ancient Egypt*. Barnes & Noble.
- London Museum. (2020). <https://www.londonmuseum.org.uk/blog/these-boots-were-made-for-romans/> adresinden alındı
- Morrow, K. (1985). Greek footwear and the dating of sculpture. *American Journal of Archaeology*, 89(3), 391–403. <https://doi.org/10.2307/4350153>

- Nişantaşı Müzayede. (2025). <https://www.nisantasimuzayede.com/urun/3566807/osmanli-19-yuzyil-ipek-saten-uzeri-boncuk-isi-bitkisel-dekorlu-topuklu-cift-aya-adresinden-alindi>
- Parkstone Art. (2021). *Shoes*. <https://parkstone.international/2021/05/04/shoes/>
- Pinhasi, R., et al. (2010). A 5,500-year-old leather shoe from Armenia. *PLoS ONE*, 5(6), e10984. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010984>
- Shoes in history 2014. (2014). *Sborník materiálu z VII. Mezinárodní konference*. Zlin: The Museum of South East Moravia in Zlín.
- Smith, T. (2021). Shoes, slippers and sandals: Feet and footwear in classical antiquity (Book review). *The Classical Journal*, 116(4), 506–508. <https://doi.org/10.1353/tcj.2020.0020>
- The Met . (2025, 19 07). *The Met's Libraries and Research Centers*. <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/156120> adresinden alındı
- The Metropolitan Museum of Art. (2025). *Footwear collection*. <https://www.metmuseum.org/art/collection>
- Ülgen, S. (2012). Orta Çağ Avrupa giyiminde ayakkabı. *Sanat Tarihi Dergisi*, 21(2), 475–489.
- Yıldız, C. (2000). Anadolu'da deri ve ayakkabı tarihi. *Türkiye Kültür Tarihi Araştırmaları*, 6(1), 29–37.
- Yıldız, C. (2015). Avrupa'da orta çağ ayakkabı modası. *Tarih ve Moda Dergisi*, 4(2), 250–258.
- Walford, J. (2007). *The seduction of shoes*. Mitchell Beazley.



ENDÜSTRİYEL SİMBİYOZ VE DÖNGÜSEL EKONOMİ PERSPEKTİFİNDEN DERİ SEKTÖRÜNDE ATIK DEĞERLENDİRME POTANSİYELİ

“ ”

Ertan EROL¹

¹ Öğr. Gör. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Meslek Yüksekokulu, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, Çorlu/Tekirdağ, ORCID

BÖLÜM 1. KAVRAMSAL VE KURAMSAL ÇERÇEVE

1.1. Endüstriyel Simbiyoz: Tanım, İlkeler ve Evrim

Endüstriyel simbiyoz (ES), geleneksel, doğrusal “al-yap-at” endüstriyel modelinden radikal bir kopuşu temsil eder. Kavram, farklı endüstriyel birimler veya kuruluşlar arasında malzeme, enerji, su ve/veya yan ürünlerin fiziksel değişimine dayanan, karşılıklı fayda ve kolektif rekabet avantajı yaratmayı hedefleyen işbirlikçi bir strateji olarak tanımlanır (Chertow, 2000). Bu yaklaşım, doğadaki simbiyotik ilişkilerden esinlenerek, tek başına verimsiz veya atık olan akışların, bir bütün olarak ele alındığında değerli girdilere dönüşebileceği bir “endüstriyel ekosistem” fikrini merkezine alır (Korhonen et al., 2018).

Endüstriyel simbiyozun temelini oluşturan ilkeler, onu basit bir atık takasından öteye taşır:

- **Kaynakların Döngüselleştirilmesi ve Atığın Ortadan Kaldırılması:** ES, atığı sistemin tasarım aşamasından itibaren ortadan kaldırmayı hedefler. Atıklar ve yan ürünler, teknik ve ekonomik uygunluk çerçevesinde yeni hammadde veya girdi kaynakları olarak tanımlanır. Bu ilke, doğrusal ekonomiden, “ürün-hizmet sistemleri” ve malzeme döngüleri üzerine kurulu bir döngüsel ekonomiye geçişin temel taşıdır (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Ghisellini et al., 2016).
- **Sistem Düşüncesi ve Ağ Bazlı Optimizasyon:** ES, performansı tek bir tesisin verimliliğiyle değil, birbirine bağlı tesislerden oluşan bir ağın toplam kaynak verimliliği ve çevresel ayak izi ile değerlendirir. Bu, bölgesel düzeyde, coğrafi yakınlıktan faydalanan ve ulaşım maliyetlerini minimize eden sinerjilerin araştırılmasını gerektirir (Chertow, 2000).
- **Karşılıklı (Simbiyotik) Fayda ve Değer Yaratımı:** İşbirliğinin sürdürülebilir olması için katılımcı tüm taraflar için net bir değer teklifi sunması gerekir. Bu fayda, azalan atık bertaraf maliyetleri, düşük girdi maliyetleri, yeni gelir akışları, mevzuata uyumluluk ve gelişmiş kurumsal itibar şeklinde ortaya çıkabilir (Jacobsen, 2006).
- **Güven, Bilgi Paylaşımı ve Ortaklığa Dayalı Yönetişim:** Fiziksel akışların ötesinde, ES'nin temelini güçlü ilişkiler ve güvene dayalı işbirliği oluşturur. Başarılı ağlar, sürekli diyalog, ortak planlama ve genellikle kamu kurumları, araştırma merkezleri ve yerel toplulukların da dahil olduğu çok paydaşlı bir yönetim yapısı üzerine inşa edilir (Korhonen et al., 2018).

Endüstriyel simbiyoz kavramının evrimi, teorik bir fikirden küresel bir sürdürülebilirlik stratejisine doğru ilerlemiştir. İlk uygulamalar, 1970’lerde

Danimarka'nın **Kalundborg** bölgesinde organik bir şekilde, bireysel şirketler arasındaki ikili anlaşmalarla ortaya çıkmıştır. Bir elektrik santralinin atık ısısının şehre ve balık çiftliklerine sağlanması, bir rafinerinin atık gazının bir alçıpan fabrikasında kullanılması gibi değişimler, zamanla karmaşık bir simbiyotik ağa dönüşmüştür. Bu vaka, ES'nin hem çevresel (kaynak tüketimi ve emisyonlarda önemli azalmalar) hem de ekonomik (önemli maliyet tasarrufları) faydalarını kanıtlayan paradigmatik bir örnek haline gelmiştir (Jacobsen, 2006).

Kalundborg'dan sonraki evrim, ES'nin daha planlı ve sistematik bir şekilde uygulanması yönünde ilerlemiştir. **Chertow (2000)**, bu evrimi beş aşamalı bir "ilişki yakınlığı" skalasıyla tanımlamıştır: aynı tesiste, birbirine komşu tesislerde, bir endüstriyel parkta, bir bölgede veya sanal olarak birbirine bağlı tesislerde gelişen sinerjiler. Günümüzde ES, **Döngüsel Ekonomi**'nin operasyonel bir aracı olarak görülmektedir. Avrupa Birliği'nin "Döngüsel Ekonomi Eylem Planı" gibi politikalar, endüstriyel simbiyozu kaynak verimliliğini artırmak ve endüstriyel rekabetçiliği güçlendirmek için kilit bir strateji olarak teşvik etmektedir (European Commission, 2015). Bu evrim, kavramın organik bir iş optimizasyonu aracından, bölgesel sürdürülebilirlik ve dayanıklılık hedeflerini destekleyen stratejik bir politika aracına dönüşüğünü göstermektedir.

1.2. Döngüsel Ekonomi ve Endüstriyel Simbiyoz İlişkisi: Kuramsal Bir Bütünleşme

Döngüsel ekonomi (DE), doğrusal endüstriyel modelin çevresel sınırlarla olan temel uyumsuzluğuna bir yanıt olarak ortaya çıkmıştır. Bu model, "al-yap-at" yaklaşımından, kaynakların mümkün olduğunca uzun süre ekonomide dolaşımında tutulduğu, atığın tasarım yoluyla minimize edildiği ve doğal sistemlerin yenilendiği restoratif ve rejeneratif bir sisteme geçişi ifade eder (Ellen MacArthur Foundation, 2013). DE, sadece bir atık yönetimi stratejisinden ziyade, ürün tasarımından tüketici davranışlarına, iş modellerinden uluslararası politikaya kadar uzanan bütünsel ve sistemik bir dönüşüm çağrısıdır (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016).

Endüstriyel simbiyoz (ES) ile döngüsel ekonomi arasındaki ilişki, **makro hedefler ile mikro/meso düzey operasyonel mekanizmalar** arasındaki sinerjik ve tamamlayıcı bir bağ olarak kavramsallaştırılabilir. DE, geniş kapsamlı bir vizyon ve çerçeve sunarken, ES bu vizyonun, özellikle imalat ve ağır sanayi sektörlerinde, **pratikte nasıl hayata geçirilebileceğine dair somut bir yol haritası ve araç takımı** sağlar (Chertow, 2000). Bu bütünleşme, aşağıdaki tabloda özetlenen prensip ve mekanizmalar üzerinden gerçekleşir:

Döngüsel Ekonominin Temel Prensipleri	Endüstriyel Simbiyozun Sağladığı Operasyonel Mekanizma	Somut Uygulama Örneği
Atığı ve kirliliği tasarımıyla ortadan kaldır.	Yan ürün/atık değişim ağları kurarak, bir prosesin çıktısını diğerinin girdisi haline getirir.	Bir termik santralin uçucu külünün çimento veya tuğla fabrikasında hammadde olarak kullanılması.
Ürünleri ve malzemeleri kullanımda tut.	Endüstriyel parklar veya bölgesel ağlar içinde malzeme (su, solvent, metaller) geri kazanımı ve yeniden kullanım sistemleri kurar.	Organize sanayi bölgelerinde kurulan merkezi atıksu arıtma ve geri kazanım tesisleri.
Doğal sistemleri yenile.	Organik atıkları (biyokütle) kompost, biyogaz veya diğer biyotabanlı ürünlere dönüştürerek toprağa besin döngüsünü destekler.	Gıda işleme atıklarının tarımda gübre veya hayvan yemi olarak değerlendirilmesi.

Bu ilişkinin işleyişini sağlayan ve sizin de belirttiğiniz kilit noktaları derinleştiren dinamikler şunlardır:

- **Tasarım ve Üretimde Sistemik Yaklaşım:** DE, “döngüsellik” ürün ve proses tasarımı aşamasına dahil edilmesini savunur (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Bu, ES için kritik bir ön koşuldur. Tasarım aşamasında modülerlik, demonte edilebilirlik ve saf malzeme kullanımı gibi ilkeler benimsendiğinde, kullanım ömrü sona eren ürünlerin bileşenlerinin veya malzemelerinin endüstriyel simbiyotik ağlara yüksek kalitede girdi sağlaması mümkün hale gelir. Örneğin, belirli polimerlerden üretilmiş bir otomobil parçası, geri dönüşüm sonrası aynı sektörde veya farklı bir sektörde (inşaat, oyuncak) hammadde olarak daha verimli bir şekilde kullanılabilir.
- **Bölgesel Planlama ve Endüstriyel Ekosistemler:** ES, doğası gereği coğrafi ve ilişkisel bir yakınlık gerektirir. Bu nedenle, DE’nin uygulanmasında **bölgesel planlama ve endüstriyel ekosistem yaklaşımı** merkezi bir role sahiptir. Organize Sanayi Bölgeleri (OSB’ler) veya özel olarak tasarlanmış Eko-Endüstriyel Parklar, paylaşılan lojistik, enerji altyapısı (şebeke, buhar hatları), su geri kazanım sistemleri ve ortak atık yönetimi tesislerinin kurulması için ideal platformlardır. Bu planlı altyapı, firmalar arası simbiyotik bağlantıların maliyetini düşürür ve fizibilitesini artırır (Chertow, 2000).
- **Politika, Teşvik ve Yönetişim Çerçevesi:** DE’ye geçiş, piyasa başarısızlıklarını düzeltmek ve kolektif eylemi teşvik etmek için güçlü bir politik destek gerektirir. Avrupa Birliği’nin **Döngüsel**

Ekonomi Eylem Planı bu anlamda yol gösterici bir örnektir; atık yönetimi direktiflerinden ürün politikalarına, yeşil kamu alımlarından Ar-Ge teşviklerine kadar geniş bir araç seti sunar (European Commission, 2015). Bu tür politika çerçeveleri, ES'yi doğrudan destekler: yüksek atık bertaraf vergileri alternatif çözümleri cazip kılar, “kirleten öder” ilkesi kaynak verimliliğini teşvik eder ve “yan ürün” statüsünün net tanımlanması atık takasını kolaylaştırır. Ayrıca, bölgesel kalkınma ajansları veya endüstri birlikleri tarafından yürütülen aracılık faaliyetleri, güven inşası ve bilgi paylaşımını kolaylaştırarak ES ağlarının kurulmasında katalizör görevi görür (Korhonen, Nuur, Feldmann & Birkie, 2018).

Sonuç olarak, döngüsel ekonomi ve endüstriyel simbiyoz arasındaki ilişki tek yönlü değil, diyalektik ve karşılıklı besleyen bir ilişkidir. DE, ES için nihai hedefi ve meşruiyet zeminini oluştururken, ES ise DE'nin soyut ilkelerini somut, ölçülebilir ve uygulanabilir endüstriyel uygulamalara dönüştürür. Bu simbiyoz, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada, özellikle de deri sektörü gibi kaynak yoğun ve atık üretimi yüksek sektörlerde, vazgeçilmez bir stratejik ortaklık olarak öne çıkmaktadır.

1.3. Endüstriyel Simbiyozun Çevresel, Ekonomik ve Sosyal Faydaları: Bir Üçlü Sürdürülebilirlik Kazanımı

Endüstriyel simbiyoz (ES), doğrusal ekonomi modelinin yarattığı çevresel, ekonomik ve sosyal sorunlara entegre bir çözüm sunar. Bu uygulamalar, katılımcı firmalar ve içinde bulundukları bölge için, birbirini güçlendiren ve sürdürülebilir kalkınmayı doğrudan destekleyen çok boyutlu faydalar üretir. Bu bölümde, söz konusu faydalar, literatürdeki somut bulgular ve mekanizmalar eşliğinde detaylandırılmaktadır.

Çevresel Faydalar: Kaynak Verimliliğinde Sistemik Sıçrama

ES'nin çevresel etkisi, tek tek iyileştirmelerin ötesinde, endüstriyel ekosistem düzeyinde kaynak verimliliğinde niteliksel bir artış sağlamasıdır.

- **Atık Minimizasyonu ve Döngüsel Akışlar:** ES'nin en temel çevresel katkısı, atığın bertaraf edilecek bir maliyet unsuru olmaktan çıkarılıp, bir kaynağa dönüştürülmesidir. Bu, düzenli depolama sahalarına giden atık hacminde ve buna bağlı arazi kullanımı ile yeraltı suyu kirliliği risklerinde belirgin azalmalar anlamına gelir (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016). Örneğin, Kalundborg simbiyozunda, bir rafineriden çıkan kükürt, bir sülfürik asit tesisinde; bir termik santralden çıkan uçucu kül ise çimento fabrikasında değerlendirilerek atık akışları neredeyse sıfırlanmıştır.
- **Doğal Kaynak Tüketiminde Azalma:** Yan ürün değişimi, birincil hammadde (ham petrol, cevher, kereste, temiz su) talebini doğrudan azaltır. Bu, doğal kaynakların çıkarılması ve işlenmesi süreçlerinden

kaynaklanan habitat tahribatı, toprak erozyonu ve biyolojik çeşitlilik kaybı üzerindeki baskıyı hafifletir (UNEP, 2019). Özellikle suyun kademeli kullanımı ve geri kazanımı, sanayinin su stresi yaşayan bölgelerdeki çevresel ayak izini kritik ölçüde iyileştirebilir.

- **Enerji Verimliliği ve İklim Değişikliğiyle Mücadele:** ES, proses entegrasyonu ve atık ısı geri kazanımı yoluyla enerji verimliliğinde büyük kazanımlar sağlar. Bir tesisin atık ısının komşu bir tesiste ısıtma veya ön ısıtma için kullanılması, toplam enerji tüketimini ve fosil yakıtlara bağlı **sera gazı emisyonlarını** önemli ölçüde düşürür. Jacobsen (2006), Kalundborg'daki enerji ve buhar değişimlerinin, yıllık CO₂ emisyonlarında yüzbinlerce ton mertebesinde azalma sağladığını kantitatif olarak göstermiştir.

Ekonomik Faydalar: Rekabetçiliği Artıran Somut Kazançlar

ES, çevresel performansı ekonomiye bir yük olmaktan çıkarıp, doğrudan karlılık ve rekabet gücü ile ilişkilendiren bir model sunar.

- **Doğrudan Maliyet Tasarrufları:** Firmalar, atık bertaraf ücretleri, birincil hammadde alım maliyetleri ve enerji faturalarında önemli düşüşler elde eder. Jacobsen (2006), Kalundborg'daki firmaların, yan ürün takasları ve ortak altyapı sayesinde elde ettiği yıllık net tasarrufun on milyonlarca dolar seviyesinde olduğunu hesaplamıştır. Bu tasarruflar, şirketlerin finansal dayanıklılığını artırır.
- **Yeni Gelir Akışları ve Pazar Fırsatları:** Atık veya yan ürünler, başka bir firma için değerli bir girdiye dönüştüğünde, bunu satarak yeni bir gelir kapısı yaratılabilir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş malzemelerden üretilen “döngüsel ürünler”, çevre bilinci yüksek tüketici segmentlerinde pazar avantajı sağlar.
- **Risk Azaltma ve Uzun Vadeli Güvence:** ES, hammadde tedarikinde çeşitlilik sağlayarak ve küresel emtia fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı korunma imkanı vererek tedarik zinciri risklerini azaltır. Ayrıca, katılaştıran çevre mevzuatına (örneğin, AB'nin sınırda karbon düzenlemesi veya genişletilmiş üretici sorumluluğu) proaktif uyum, gelecekteki potansiyel cezalardan ve uyum maliyetlerinden korur (European Commission, 2015).

Sosyal Faydalar: Toplumsal Kabul ve Adil Geçiş

ES'nin faydaları, fabrika duvarlarının ötesine geçerek toplumsal düzeyde yayılır ve sürdürülebilirliğin sosyal ayağını güçlendirir.

- **İstihdamın Dönüşümü ve Artışı:** ES ağlarının kurulması, işletilmesi ve geliştirilmesi, geleneksel imalat rollerine ek olarak **yeni ve**

nitelikli iş alanları yaratır. Atık değerlendirme teknolojileri, lojistik koordinasyon, çevre danışmanlığı ve sistem analizi gibi alanlarda istihdam artar. Bu, sanayinin yoğun olduğu bölgelerde “yeşil işler” yoluyla toplumsal refahın desteklenmesi anlamına gelir.

- **Sosyal Sermaye ve Topluluk Dayanıklılığı:** Firmalar arasında güvene dayalı, uzun vadeli işbirliklerinin kurulması, bölgenin sosyal dokusunu güçlendirir. Paylaşılan altyapı ve ortak hedefler, rekabetin ötesinde bir “topluluk” bilinci oluşturur. Bu artan sosyal sermaye, gelecekteki ortak zorluklarla başa çıkmada esneklik sağlar (Korhonen, Nuur, Feldmann & Birkie, 2018).
- **Halk Sağlığı ve Yaşam Kalitesinde İyileşme:** Hava, su ve toprak kirliliğinin azalması, sanayi bölgeleri ve çevresinde yaşayan toplulukların sağlığı üzerinde doğrudan olumlu etki yapar. Daha temiz bir çevre, bölgenin çekiciliğini artırarak yaşam kalitesini yükseltir ve toplumun sanayi faaliyetlerine olan sosyal kabulünü güçlendirir. Bu, sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir ön koşuludur.

Endüstriyel simbiyoz, çevresel, ekonomik ve sosyal faydaları bir arada üreterek, sanayiye sürdürülebilir bir geleceğe taşıyacak güçlü bir kaldıraçtır. Bu faydalar, özellikle deri sektörü gibi kaynak yoğun, atık üretimi yüksek ve çevresel etkileri toplumsal hassasiyet konusu olan sektörlerde, geleneksel üretim modellerine kıyasla çok daha anlamlı ve dönüştürücü bir değer önerisi sunmaktadır.

1.4. Endüstriyel Simbiyoz Uygulamalarında Başarı Faktörleri ve Bariyerler: Kilit Engeller ve Aşma Yolları

Endüstriyel simbiyozun (ES) sunduğu üçlü sürdürülebilirlik faydalarına rağmen, yaygın uygulanması bir dizi karmaşık engelle karşı karşıyadır. Bu bölüm, başarılı ES ağlarını besleyen kritik faktörleri ve bu süreci sekteye uğratan yapısal bariyerleri, akademik ve politik literatür ışığında analiz etmektedir.

Başarı Faktörleri: Sinerjik Ağların Temel Taşları

Başarılı bir ES girişimi, tek bir faktöre değil, birbiriyle bağlantılı bir dizi sosyo-teknik koşulun varlığına bağlıdır.

Başarı Faktörü Kategorisi	Açıklama ve Kritik Bileşenler	Destekleyici Kaynak ve Örnek
1. Güçlü Yönetişim ve Paydaş Koordinasyonu	ES, piyasa işlemlerinin ötesinde güvene ve işbirliğine dayanır. Tarafsız bir aracı kurum (üniversite, kamu ajansı, sivil toplum kuruluşu) diyalogu başlatmak, bilgi akışını kolaylaştırmak ve ortak hedefler belirlemek için çok önemlidir (Chertow, 2000). Şeffaflık ve uzun vadeli taahhüt, rekabet kaygılarının üstesinden gelinmesini sağlar.	Kalundborg'un organik gelişiminde bile, sonraki aşamalarda bilgi paylaşımını koordine eden bir yönetim yapısı oluşmuştur.
2. Ekonomik ve Piyasa Koşulları	İlişkilerin sürdürülebilir olması için net bir ekonomik teklif şarttır. Bu, yüksek atık bertaraf maliyetleri, pahalı birincil hammaddeler veya enerji fiyatları ile tetiklenebilir (Jacobsen, 2006). Yan ürünler için istikrarlı bir pazar veya talep, yatırımı teşvik eder.	AB'nin atık depolama vergileri ve karbon fiyatlandırma mekanizmaları, doğrusal uygulamaları mali açıdan dezavantajlı hale getirerek ES'yi teşvik eder (European Commission, 2015).
3. Düzenleyici ve Politik Çerçeve	Net, teşvik edici ve istikrarlı politikalara ihtiyaç vardır. “Atık” ve “yan ürün” arasındaki yasal ayırımın netliği, gereksiz idari ve mali yüklerin önüne geçer (Korhonen et al., 2018). Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (GÜS) gibi politikalar, üreticileri ürün ömrü sonu yönetiminde işbirliğine iter.	Leather Working Group gibi endüstri protokolleri, sektör içinde standartlar getirerek uyumlu atık akışları yaratılmasına yardımcı olabilir.
4. Teknik ve Altyapısal Uygunluk	Firmalar arası fiziksel mesafe ve taşıma maliyetleri kritik önem taşır. Coğrafi yakınlık, sinerji potansiyelini artırır (Chertow, 2000). Ayrıca, atığın bileşimi ve kalitesindeki tutarlılık ile uygun geri dönüşüm/dönüştürme teknolojilerinin mevcudiyeti teknik fizibiliteyi belirler.	Bir organize sanayi bölgesi (OSB) içinde merkezi bir biyogaz tesisi veya atık ısı şebekesi kurmak, altyapıyı paylaşarak maliyetleri düşürür.

Bariyerler: Döngüsel Geçişin Önündeki Engeller

ES'nin potansiyeline rağmen, uygulamada karşılaşılan bariyerler çok katmanlıdır.

• Örgütsel ve İlişkisel Bariyerler:

- **Güven Eksikliği ve Rekabetçi Direnç:** Firmalar, operasyonel verilerini, atık profillerini ve gelecek planlarını paylaşmakta isteksizdir. Ticari sırların korunması ve pazar konumuna ilişkin kaygılar, açık diyalogun önünde duran en temel engellerden biridir (Korhonen et al., 2018).

- ▶ **Kurumsal Atalet ve Bilgi Eksikliği:** Geleneksel, doğrusal iş yapma modelleri derinden yerleşmiştir. Yöneticiler ve mühendisler, ES fırsatlarını tanımlamak, değerlendirmek ve uygulamak için gerekli bilgi ve becerilerden yoksun olabilir.
- **Teknik ve Operasyonel Bariyerler:**
 - ▶ **Malzeme Uyumsuzluğu ve Kalite Değişkenliği:** Özellikle deri sektöründe olduğu gibi, atık akışları (örn., kırpıntılar, çamurlar) kimyasal bileşim, nem veya kirlilik açısından heterojen olabilir. Bu, onları ikincil hammadde olarak kullanmak için gerekli **standartlaştırmayı ve ön işlemeyi** zorlaştırır (World Bank, 1998).
 - ▶ **Ölçek ve Altyapı Sorunları:** Küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler), yeterli miktarda ve sürekli atık akışı sağlayamayabilir. Ayrıca, atık ısı geri kazanımı veya boru hatları gibi paylaşılan fiziksel altyapıya yapılacak yüksek başlangıç yatırımları, finansal bir engel oluşturur.
- **Ekonomik ve Piyasa Bariyerleri:**
 - ▶ **Yanlış Fiyat Sinyalleri ve Finansman Eksikliği:** Birincil hammaddeler genellikle çevresel maliyetleri yansıtmayan sübvansiyonlu fiyatlarla sunulur. Bu, geri kazanılmış malzemeleri ekonomik açıdan dezavantajlı hale getirir. Ayrıca, ES projeleri için özkaynak, kredi veya hibe şeklinde **risk sermayesi ve uzun vadeli finansman** bulmak zor olabilir.
 - ▶ **Yüksek İşlem Maliyetleri:** Yeni tedarikçiler bulmak, sözleşmeler müzakere etmek, kaliteyi izlemek ve düzenleyici koşullara uymak, ES ağlarını kurmanın ve yönetmenin “görünmeyen” maliyetleridir.
- **Düzenleyici ve Yasal Bariyerler:**
 - ▶ **Karmaşık ve Caydırıcı Mevzuat:** Atık yönetimi mevzuatı genellikle katı ve izin odaklıdır. Bir malzemenin “atık” statüsünden çıkıp “yan ürün” veya “ikincil hammadde” statüsüne geçiş süreci belirsiz, bürokratik ve zaman alıcı olabilir. Bu, firmaları potansiyel sinerjilerden caydırır (Korhonen et al., 2018).
 - ▶ **Sorumluluk ve Risk Endişeleri:** Bir firma, başka bir firmaya sattığı veya verdiği bir yan ürünün, nihai kullanımda çevresel bir zarara yol açması durumunda yasal sorumluluğun kendisinde kalacağından endişe duyabilir.

Bu başarı faktörleri ve bariyerler, endüstriyel simbiyozun kendiliğinden yayılan basit bir süreç olmadığını, aksine **kasıtlı, çok paydaşlı ve destekleyici bir ekosistem gerektiren stratejik bir dönüşüm** olduğunu göstermektedir. Deri sektörü özelinde, teknik uyumsuzluklar (heterojen atık yapısı), yüksek atık yönetim maliyetleri ve karmaşık kimyasal içerik nedeniyle düzenleyici belirsizlikler, öne çıkan engeller arasındadır. Bu engellerin aşılması, ancak güçlü bir sektörel koordinasyon (örn., deri sanayi birlikleri), Ar-Ge odaklı atık karakterizasyonu çalışmaları ve “döngüsel deri”yi hedefleyen net politikalarla mümkün olacaktır.

BÖLÜM 2. DERİ SEKTÖRÜNDE ATIK DEĞERLENDİRME POTANSİYELİ ANALİZİ

2.1. Deri İşleme Süreçleri ve Atık Profili

Deri üretimi, hayvansal derinin fiziksel ve kimyasal olarak dayanıklı, estetik bir malzemeye dönüştürüldüğü, yüksek düzeyde kaynak ve kimyasal kullanımı gerektiren kompleks bir prosesler bütünüdür. Bu süreçler geleneksel olarak doğrusal bir model izlemekte, yani büyük miktarda su, enerji, kimyasal girdi ve nihayetinde çok çeşitli katı, sıvı ve tehlikeli atık çıktısı üretmektedir (World Bank, 1998). Sektörün döngüsel ekonomi ve endüstriyel simbiyoz perspektifinden değerlendirilebilmesi için, öncelikle bu geleneksel üretim akışının ve ortaya çıkardığı atık profilinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Temel deri işleme süreçleri, her biri farklı türde ve karakterde atık üreten dört ana aşamadan oluşur: hazırlık işlemleri, tabaklama, bitim işlemleri ve ürünleştirme.

Hazırlık İşlemleri, ham derinin işlenmeye hazır hale getirildiği, fiziksel ve kimyasal atıkların yoğun olarak ortaya çıktığı ilk aşamadır. Tuzlanmış ham deriler önce yıkanarak tuzdan ve kirleticilerden arındırılır, bu da yüksek tuz (klorür ve sülfat) ve organik yük (kan, protein, yağ) içeren bir atık su akışı yaratır. Ardından, tüy alma ve kireçleme işlemleriyle kıllar, epiderm tabakası ve deriye bağlı yağlar uzaklaştırılır. Bu aşama, **yüksek pH'lı, kükürt (sülfür) içeren ve organik madde konsantrasyonu çok yüksek (yüksek Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı - BOD ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı - COD)** atık suların yanı sıra, bertaraf edilmesi gereken büyük miktarlarda katı atık (kıl, yağ ve et parçaları) üretir (World Bank, 1998). Bu katı atıklar, doğrudan atık olarak değerlendirilmek yerine, uygun bir endüstriyel simbiyoz senaryosu için potansiyel bir biyokütle kaynağı olarak görülebilir.

Tabaklama Aşaması, derinin çürümeyen, ısıya ve suya dayanıklı bir malzemeye dönüştüğü kritik süreçtir. En yaygın yöntem olan krom tabaklama, üç değerlikli krom tuzları ([Cr(III)]) kullanır. Bu işlem, sektörün en belirgin ve potansiyel olarak en riskli atık akışlarından birini üretir: **krom**

içeren atık sular ve katı çamurlar. Tabaklama sonrası yıkama ve nötralizasyon işlemlerinden çıkan atık su, yüksek miktarda çözünmüş tuz, krom (genellikle 100-400 mg/L konsantrasyonda) ve organik yük içerir (World Bank, 1998). Proses sırasında düşük pH'tan yüksek pH'a geçiş, çözünmüş kromun hidroksit çamuru olarak çökmesine neden olur ve bu **tehlikeli atık sınıfına giren tabaklama çamurunun** ana kaynağını oluşturur. Krom(III)'ün uygun olmayan depolama koşullarında oksitlenerek toksik ve kanserojen **hegzavalent kroma ([Cr(VI)]) dönüşme riski**, bu atığın yönetimini çevre ve halk sağlığı açısından kritik bir mesele haline getirmektedir (UNEP, 2019).

Bitim İşlemleri (boyama, yağlama, kaplama), deriye renk, doku, yumuşaklık ve diğer kullanım özelliklerini kazandırır. Bu aşama, sentetik boyalar, reçineler, yağlar, pigmentler ve organik çözücüler gibi çok çeşitli kimyasalların kullanıldığı yerdir. Sonuç olarak, bu işlemlerden kaynaklanan atık su, **azo boyaların parçalanma ürünleri, fenoller, ağır metaller (boya pigmentlerinden kaynaklanan) ve yüksek organik karbon içeriği** gibi kompleks ve kalıcı kirleticiler barındırır. Ayrıca, solvent bazlı kaplama ve spreyleme işlemleri **uçucu organik bileşik (VOC) emisyonlarına** yol açar. Bu kimyasal çeşitlilik, atık su arıtma verimliliğini zorlaştırmakta ve arıtma çamurunun kompozisyonunu karmaşıklaştırmaktadır.

Son İşlem ve Ürünleştirme aşamasında ise esas olarak **katı atıklar** öne çıkar. Derinin istenilen kalınlığa getirilmesi (traşlama), şekillendirilmesi (kesim) ve yüzey işlemleri (zımparalama) sırasında büyük miktarlarda **deri kırpıntıları, tozlar ve parçacıklar** oluşur. Bu katı atıklar, genellikle organik madde (kolajen), kimyasal kalıntılar (krom, boyalar) ve işlem görmüş organik/inorganik maddeleri içerir. Geleneksel olarak düşük değerli uygulamalarda kullanılan veya bertaraf edilen bu akış, aslında **yüksek bir endüstriyel simbiyoz ve geri kazanım potansiyeli** taşımaktadır. Örneğin, krom içermeyen veya çok az içeren üst katman kırpıntıları, kompozit malzeme, yalıtım veya dolgu maddesi üretimi için değerli bir hammadde olabilir.

Sonuç olarak, deri sektörünün atık profili son derece heterojen ve karmaşıktır. Atık değerlendirme potansiyelinin doğru analiz edilebilmesi, ancak **her bir işletme ve bölge için kapsamlı bir atık haritalaması** ile mümkündür. Bu haritalama, yalnızca atıkların niceliksel (günlük/aylık tonaj) ve niteliksel (kimyasal bileşim, nem, kirletici konsantrasyonları) karakterizasyonunu değil, aynı zamanda üretim zamanlaması, mevcut toplama sistemleri ve mevcut bertaraf maliyetleri gibi operasyonel verileri de içermelidir (Leather Working Group, tarihsiz). Bu detaylı veri seti, hangi atık akışının hangi geri kazanım, geri dönüşüm veya endüstriyel simbiyoz senaryosuna (enerji geri kazanımı, kompozit malzeme üretimi, krom geri kazanımı vb.) en uygun olduğunun belirlenmesinde ilk ve en kritik adımdır. Böyle bir analiz olmadan, döngüsel ekonomi hedefleri soyut kalır ve kaynak verimliliği fırsatları gözden kaçabilir.

2.2. Deri Atıklarının Geleneksel Bertaraf ve Geri Kazanım Yöntemleri

Deri sektörü, tarihsel olarak, üretim süreçlerinden kaynaklanan yüksek hacimli ve kompleks atık akışlarını yönetmek için bir dizi geleneksel bertaraf ve geri kazanım yöntemine bel bağlamıştır. Bu yöntemler, genellikle atığı “gözden uzaklaştırmaya” veya çevresel etkileri bir noktaya kadar kontrol altına almaya odaklanırken, döngüsel ekonominin öngördüğü “kaynak olarak değerlendirme” paradigmasından uzaktır (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Aşağıda, bu geleneksel yaklaşımlar, çalışma prensipleri, uygulama alanları ve önemli sınırlılıkları çerçevesinde incelenmektedir.

2.2.1. Katı Atık Bertaraf Yöntemleri

Düzenli Depolama (Landfilling)

En yaygın ve ilkbakışta en düşük maliyetli bertaraf yöntemidir. Tabaklama çamurları, kırpıntılar ve proses artıkları gibi tüm katı atıklar için kullanılır. Ancak, deri atıklarının organik ve inorganik bileşimi nedeniyle ciddi çevresel riskler taşır. Organik içeriğin (protein, yağ) anaerobik bozunması, uzun süreli ve kontrolsüz **metan (CH₄) emisyonuna** yol açar; metan, karbondioksitten 25 kat daha güçlü bir sera gazıdır (UNEP, 2019). Daha da kritik olarak, **krom içeren çamurların** depolanması, sızıntı suyu yoluyla ağır metallerin yeraltı sularına karışma riskini barındırır. Krom(III)’ün depolama sahasının oksidatif koşullarında toksik ve mobil **hegzavalent kroma (Cr(VI))** dönüşme potansiyeli, bu riski katbekat artırır. Bu yöntem, değerli arazi kaynağını tüketen ve hiçbir kaynak geri kazanımı sağlamayan, tamamen doğrusal bir sonlanmadır.

Yakma ve Termal Bertaraf

Bu yöntem, atığın hacmini önemli ölçüde azaltma ve içerdiği organik enerjiyi (biyokütle) geri kazanma potansiyeli taşır. Özellikle kırpıntı ve kemik gibi yanıcı atıklar için kullanılabilir. Ancak, deri atıklarının heterojen yapısı yakma prosesini zorlaştırır. Krom, çinko ve alüminyum gibi ağır metallerin varlığı, **toksik metal emisyonlarına** ve uçucu külün tehlikeli atık sınıfına girmesine neden olur. Ayrıca, klor içeren bileşikler (tuz, bazı organik kimyasallar) yüksek sıcaklıkta **dioksin ve furan gibi kalıcı organik kirleticilerin (KOK’lar)** oluşma riskini taşır. Bu nedenle, enerji geri kazanımı olsa bile, ileri düzeyde emisyon kontrol teknolojileri gerektirir ve yatırım-işletme maliyetleri yüksektir. Bu durum, özellikle KOBİ’ler için ekonomik bir engel oluşturur (World Bank, 1998).

2.2.2. Atık Su Arıtma Yöntemleri

Biyolojik Arıtma

Deri endüstrisi atık suyunun yüksek organik yükünü (BOD/COD) gidermek için kullanılan temel yöntemdir. Aktif çamur sistemleri veya

anaerobik arıtma (biyogaz üretimi ile) yaygındır. Ancak, bu sistemler deri atık suyunun karakteristiği nedeniyle verimsiz kalabilir. **Yüksek tuz konsantrasyonları** (özellikle klorür ve sülfat) mikrobiyal faaliyeti inhibe eder. **Krom (Cr(III))** iyonları ise biyokütleye adsorbe olarak birikir ve zamanla toksik seviyelere ulaşarak arıtma verimliliğini düşürür, hatta prosesin tamamen çökmesine yol açabilir. Ayrıca, bazı sentetik boyalar ve kimyasallar **biyolojik olarak parçalanamaz (rekalitran)** özellikte olduğundan, bu yöntemle tamamen giderilemezler.

Fizikokimyasal Arıtma

Biyolojik arıtma öncesi veya sonrasında, askıda katı maddeleri, renki ve ağır metalleri gidermek için kullanılan vazgeçilmez bir tamamlayıcı yöntemdir.

- **Koagülasyon/Flokülasyon:** Atık suya demir veya alüminyum tuzları gibi koagülantlar eklenerek askıdaki ince partiküller ve kolloidal maddeler çöktürülür. Bu işlem, özellikle çözünmemiş kromun ve organik yükün bir kısmının giderilmesinde etkilidir, ancak büyük miktarda **tehlikeli karakterli kimyasal çamur** üretir.
- **Kireç ile Yüksek pH'ta Çöktürme:** Krom geri kazanımında kullanılan temel yöntemdir. Atık suyun pH'ı 8-9'a yükseltilerek krom hidroksit ($\text{Cr}(\text{OH})_3$) olarak çöktürülür. Çöken bu çamur, süzülerek ayrılır. Ancak, bu proses **büyük miktarda kireç tüketimi ve yüksek tuz içeren, kromla kontamine olmuş bir çamur** üretimi ile sonuçlanır. Ayrıca, çöktürülen kromun saflığı düşük olduğundan, doğrudan tabaklamada yeniden kullanımı sınırlıdır.
- **Adsorpsiyon (Aktif Karbon):** Renk gidermede ve biyolojik olarak parçalanamayan organik kirleticilerin (fenoller, boyalar) uzaklaştırılmasında etkilidir. Ancak, **yüksek işletme maliyeti** ve doymuş aktif karbonun yenilenmesi/bertarafı gibi ek sorunlar getirir.

2.2.3. Geri Kazanım Yöntemleri ve Sınırları

Krom Geri Kazanımı

Sektördeki en önemli geri kazanım çabası, değerli ve çevresel riskli bir metal olan krom üzerinde yoğunlaşmıştır. Temel yöntem, kimyasal çökeltidir. Yüksek pH'ta (kireçle) çöktürülen krom hidroksit çamuru, sülfürik asit gibi bir asitle **liç edilerek** (çözündürülerek) tekrar krom sülfat çözeltisine dönüştürülür. Bu çözelti, bir miktar saflaştırma işleminden sonra tabaklama prosesine geri beslenebilir. Ancak bu prosesin önemli sınırlamaları vardır: Verim genellikle %75-85 aralığında kalır, geri kazanılan çözeltiye **demir, alüminyum ve organik kirleticiler** karışabilir, ve prosesin kendisi **ek kimyasal**

tüketimi ve atık (liç sonrası artık) üretir. Bu nedenle, ekonomik fizibilite genellikle krom fiyatlarına ve atık bertaraf maliyetlerine bağlı olarak değişkenlik gösterir (World Bank, 1998).

Diğer Sınırlı Geri Kazanım Uygulamaları

- **Yağ ve Yağ Asidi Geri Kazanımı:** Tüy alma ve yağlama atık sularından yağlar ayrıştırılabilir ve sabun veya hayvan yemi katkı maddesi gibi düşük değerli ürünlere dönüştürülebilir. Ancak pazarı ve ekonomik değeri sınırlıdır.
- **Kompostlama:** Organik katı atıklar (et parçaları, kırpıntıların organik kısmı) kompost yapılabilir. Ancak, **krom ve tuz kontaminasyonu** riski, üretilen kompostun tarımda güvenle kullanılmasını engelleyen en büyük handikaptır.

Özetle, deri sektöründeki geleneksel atık yönetimi yöntemleri, genellikle **atığı sonlandırmaya, kontrol altına almaya veya düşük değerli uygulamalara yönlendirmeye** odaklanır. Bu yöntemler, kaynakların sistematik olarak geri kazanılmadığı, yeni çevresel riskler (sızıntı suyu, tehlikeli kül, kimyasal çamur) yarattığı ve nihayetinde **doğrusal bir ekonomi modelini sürdürdüğü** için döngüsel ekonomi ilkeleriyle temelden çelişir (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016). Örneğin, düzenli depolama ve yakma, Ellen MacArthur Foundation'ın (2013) “atığı tasarımıyla ortadan kaldır” prensibinin tam karşıtıdır. Benzer şekilde, verimsiz krom geri kazanımı, “malzemeleri kullanımda tut” prensibini yalnızca kısmen ve sorunlu bir şekilde karşılar.

Bu geleneksel paradigmanın sınırları, endüstriyel simbiyoz ve ileri döngüsel çözümlerin gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır. Bir sonraki bölümde ele alınacak olan bu yenilikçi yaklaşımlar, atıkları “bertaraf edilecek sorunlar” olarak değil, farklı endüstriyel süreçler için **değerli hammadde kaynakları** olarak yeniden konumlandırmayı hedefler.

2.3. Deri Sektöründe Üretim Süreçleri ve Ana Atık Akışlarının Haritalanması

Endüstriyel simbiyozun temel prensibi, bir sürecin çıktısını diğerinin girdisi olarak tanımlamaktır (Chertow, 2000). Bu nedenle, deri sektöründe döngüsel bir ekonomiye geçişin ilk ve en kritik adımı, üretim süreçlerinin her aşamasında ortaya çıkan atık akışlarının sistematik bir şekilde haritalanmasıdır. Bu haritalama, yalnızca atıkların nerede, ne zaman ve ne miktarda oluştuğunu değil, aynı zamanda fiziksel ve kimyasal karakterizasyonlarını da kapsamalıdır. Bu detaylı envanter, atıkların basitçe bertaraf edilmesi yerine, hangi geri kazanım veya simbiyotik değişim senaryolarına uygun potansiyel kaynaklar olduğunu belirlemenin anahtarıdır (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Aşağıda, deri üretimindeki

ana atık akışları, karakteristik özellikleri ve döngüsel ekonomi açısından taşıdıkları anlamlarıyla birlikte detaylandırılmaktadır.

2.3.1. Katı Atıklar (Kırpıntılar, Toz, Arıtma Çamuru)

Deri üretimindeki katı atıklar, büyük ölçüde **kollajen bazlı organik materyal ile proses kimyasallarının** bir karışımıdır ve değerlendirme potansiyelleri bu bileşime bağlıdır.

- **Deri Kırpıntıları ve Tozları:** Bu akışlar, traşlama, kesim, zımparalama ve parlatma gibi mekanik bitim işlemlerinde oluşur. Kollajen açısından zengin olmaları, onları biyobozunur bir hammadde olarak değerli kılar. Ancak, değerleri ve kullanım alanları büyük ölçüde **krom içeriklerine** bağlıdır. Kromlu tabaklama yapılmış deriden gelen mavi kırpıntılar, krom (III) bileşikleri içerir ve bu onların geleneksel kompost veya hayvan yemi uygulamalarını engeller. Buna karşılık, krom içermeyen veya çok az içeren üst katman (derma) kırpıntıları ve tozlar, **kompozit malzemelerde** (plastik, kauçuk, yapı malzemeleri), **tekstil dolgu maddelerinde** veya **adsorban** üretiminde daha güvenli ve yaygın bir şekilde kullanılabilir.
- **Atık Su Arıtma Çamurları:** Fizikokimyasal ve biyolojik arıtma süreçlerinin kaçınılmaz çıktısıdır. Bu çamurlar, askıda katı maddeler, çöktürülmüş krom hidroksit, ağır metaller, organik kirleticiler ve arıtma kimyasallarının (koagülantlar, polimerler) bir karışımıdır. Yüksek nem içeriği (%70-85) ve **tehlikeli atık** sınıfına girme potansiyeli (özellikle krom konsantrasyonuna bağlı olarak) bertaraf maliyetlerini son derece yükseltir (World Bank, 1998). Geleneksel düzenli depolama, bu atık için sürdürülebilir bir çözüm değildir. Bu nedenle, bu çamurlar için **stabilizasyon** (çimento veya uçucu kül ile katılaştırma), **termal işlemler** (piroliz, gazlaştırma) veya ileri **krom geri kazanım teknolojileri** gibi alternatif değerlendirme yollarının haritalanması ve geliştirilmesi hayati önem taşır.

2.3.2. Sıvı Atıklar ve Atık Su Karakterizasyonu

Deri işleme, birim ürün başına yüksek miktarda su tüketen bir sektördür ve ortaya çıkan atık su, prosesin tüm kimyasal izlerini taşır. Etkin bir geri kazanım stratejisi, atık suyun aşamalara göre karakterizasyonunu gerektirir.

- **Yüksek Organik ve İnorganik Yük:** Deri atık suyu tipik olarak çok yüksek **Kimyasal Oksijen İhtiyacı (COD)** (5.000-20.000 mg/L) ve **Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOD)** değerlerine sahiptir ki bu da yüksek düzeyde organik kirlilik anlamına gelir (World Bank, 1998). Ayrıca, ham derinin tuzlanması ve kireçleme işlemlerinden kaynaklanan **yüksek tuz konsantrasyonları** (özellikle klorür ve sülfat)

hem biyolojik arıtmayı engeller hem de suyun doğrudan geri kullanımını zorlaştırır.

- **Spesifik Kirleticiler ve Kaynakları:** Atık su, kaynağına göre farklı kirlilik profilleri gösterir. **Kireçleme atık suları** yüksek pH, kükürt ve organik azot içerir. **Tabaklama ve boyama atık suları** ise ana **krom** kaynağıdır ve renk ile kompleks organik kimyasallar (boyalar, yağlar) barındırır. Bu nedenle, tüm atık suların karıştırıldığı tek bir akış yerine, **kaynakta ayırma** prensibiyle farklı akışların ayrı toplanması, geri kazanım verimliliğini büyük ölçüde artırır. Örneğin, nispeten temiz soğutma suları basit bir arıtmadan sonra tekrar kullanılabilirken, krom içeren konsantre akışlar hedefe yönelik metal geri kazanımına tabi tutulabilir.
- **Isı Enerjisi Potansiyeli:** Proseslerden çıkan atık sular genellikle yüksek sıcaklıktadır (30-60°C). Bu **düşük dereceli atık ısının** haritalanması, komşu endüstrilerde (örneğin, seracılık veya bina ısıtması) veya kendi tesis içinde ön ısıtma amaçlı kullanım potansiyelinin değerlendirilmesi için önemli bir veri noktasıdır.

2.3.3. Tehlikeli Atıklar

Deri sektörü, kullanılan kimyasalların doğası gereği önemli miktarda tehlikeli atık üretir. Bu atıkların güvenli yönetimi, yasal bir zorunluluk olmanın ötesinde, endüstriyel simbiyozda güven inşası için de kritiktir.

- **Krom Bazlı Atıklar:** Krom (III) tuzları, kendi başlarına yüksek toksisiteye sahip olmasalar da, çevresel koşullar altında oksitlenerek **kanserojen ve yüksek derecede mobil heksavalent kroma (Cr(VI))** dönüşebilme potansiyeli taşırlar (UNEP, 2019). Bu risk, krom içeren tüm atıkları (çamur, kırpıntı, toz) potansiyel bir tehlikeli atık sınıfına sokar. Bu nedenle, krom atıklarının izlenmesi, sınıflandırılması ve kapalı döngüde geri kazanılması, sektörün en önemli çevresel önceliklerinden biridir.
- **Organik Tehlikeli Atıklar:** Bazı eski tip boyaların parçalanma ürünleri olan **aromatik aminler**, bazı **çözücüler** (diklorometan, perkloretilen) ve **biyosidal** kimyasallar tehlikeli atık kategorisinde yer alır. Bu maddelerin kullanımının azaltılması veya bertarafının sağlanması, Leather Working Group (LWG) gibi çevresel denetim protokollerinin temel gereklilikleri arasındadır (Leather Working Group, tarihsiz).

Atık akışlarının detaylı haritalanması, deri sektörü için sadece bir envanter çalışması değil, aynı zamanda bir **stratejik dönüşüm planının** ilk adımıdır. Bu harita, hangi atığın hangi proses için uygun bir kaynak olabileceğini, hangi akışların ayrılması gerektiğini ve nerelerde kapalı

döngü sistemler kurulabileceğini gösterir. Böyle bir sistem analizi olmadan, endüstriyel simbiyoz girişimleri tesadüfi ikili anlaşmalardan öteye geçemez. Bu haritalama, bir sonraki bölümde ele alınacak olan, diğer sektörlerle olası sinerjilerin ve somut geri kazanım senaryolarının tasarlanmasının temel verisini oluşturacaktır.

2.4. Deri Sektörü İçin Endüstriyel Simbiyoz Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Deri sektörü, sunduğu yüksek hacimli ve çeşitli atık akışları ile endüstriyel simbiyoz (ES) için önemli bir potansiyel barındırır. Ancak, bu potansiyelin verimli bir şekilde değerlendirilebilmesi, sektöre özgü zorluklar ve fırsatlar dikkate alınarak, sistematik ve çok aşamalı bir metodoloji ile gerçekleştirilmelidir. Bu metodoloji, bir atık akışını basit bir sorundan, birden fazla paydaş için değer yaratan bir kaynağa dönüştürmenin yol haritasını çizer. Aşağıda, deri sektörüne özgü bir ES potansiyel değerlendirme sürecinin beş kritik aşaması detaylandırılmıştır.

1. Atık Akışlarının Nicel ve Nitel Haritalanması: Temel Verinin Oluşturulması

Potansiyel değerlendirmenin ilk ve en temel adımı, önceki bölümde anlatılan atık akışlarının, bu kez bir ES perspektifi ile kapsamlı bir envanterinin çıkarılmasıdır. Bu haritalama, yalnızca atık miktarlarını (günlük/aylık tonaj) değil, aşağıdaki kritik parametreleri de belgelemelidir:

- **Kimyasal ve Fiziksel Bileşim:** Özellikle **krom (Cr) konsantrasyonu** ve formu (Cr(III)), tuz içeriği, organik madde yüzdesi (kollajen), nem, ağır metal varlığı ve pH. Bu veri, bir atığın “tehlikeli” statüsünü ve hangi prosesler için uygun olabileceğini belirler (World Bank, 1998).
- **Üretim Dinamikleri:** Atığın üretildiği spesifik proses aşaması, mevsimsel veya siparişe bağlı değişiklikler ve tesisteki toplama/ayırma altyapısının durumu.
- **Mevcut Bertaraf Maliyeti:** Her bir atık akışı için ödenen düzenli depolama, taşıma veya ön arıtma maliyetleri. Bu maliyet, ES projeleri için ekonomik temel oluşturacak ve önceliklendirmeye yardımcı olacaktır.

Bu detaylı envanter, atıkları “homojen gruplar” halinde sınıflandırmayı mümkün kılar (örn., kromsuz üst katman kırpıntıları, kromlu mavi kırpıntılar, yüksek organik içerikli primer çamur). Leather Working Group gibi protokoller, bu tür veri toplama ve raporlama için bir çerçeve sağlayabilir.

2. Paydaş Haritalaması ve Ağ Dinamiklerinin Anlaşılması

ES, özünde bir ilişkiler ağıdır (Chertow, 2000). Bu nedenle, fiziksel atık akışlarının yanı sıra, potansiyel “alıcı” ve “kolaylaştırıcı” paydaşların haritalanması esastır.

- **Potansiyel Kullanıcı Sektörler:** Deri atıklarının, başka sektörlerdeki üretim süreçlerinde girdi olarak kullanılmaya potansiyeli araştırılmalıdır. Örneğin, **deri tozu ve kırpıntıları**, inşaat (hafif yapı malzemeleri), plastik ve kauçuk (kompozit dolgu), tarım (kontrollü salınlı gübre taşıyıcı) veya tekstil (dokunmamış yüzeyler) sektörlerinde değerlendirilebilir. **Atık ısı**, organize sanayi bölgesi içindeki diğer fabrikalarda veya sera işletmelerinde kullanılabilir.
- **Kolaylaştırıcı Kurumlar:** Yerel yönetimler, üniversiteler (Ar-Ge ve analiz), sanayi odaları, çevre danışmanlık firmaları ve finans kuruluşları, ES ağlarını başlatmak ve sürdürmek için kritik roller oynar (Korhonen, Nuur, Feldmann & Birkie, 2018). Bu paydaşlar, güven inşası, teknik destek, finansman ve mevzuat konularında köprü görevi görür.

3. Teknik Uygunluk ve Teknoloji Değerlendirmesi

Bir atık akışı ile potansiyel bir kullanım alanı arasındaki eşleşmenin fizibilitesi, teknik analizle test edilmelidir. Bu aşamada şu sorulara yanıt aranır:

- **Ön İşlem Gereksinimi:** Atık, kullanıma hazır hale getirmek için nasıl bir ön işlem (kurutma, öğütme, sterilizasyon, kimyasal modifikasyon) geçmelidir? Bu işlemlerin maliyeti ve enerji tüketimi nedir?
- **Kalite ve Standart Uyumu:** İkincil hammadde olarak kullanılacak deri atığı, alıcı sektörün hammadde spesifikasyonlarına (mukavemet, saflık, boyut, stabilite) uygun mudur? Örneğin, kompozit malzeme üretiminde kullanılacak deri tozunun partikül boyutu dağılımı ve nem içeriği standartlara uygun olmalıdır.
- **Teknoloji Seçenekleri:** Mevcut geri kazanım teknolojileri (piroliz, gazlaştırma, hidroliz, membran filtrasyon) arasından hangisi belirlenen hedef için en uygun, verimli ve çevre dostudur? (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016).

4. Ekonomik Fizibilite Analizi

Teknik olarak mümkün olan her senaryo ekonomik açıdan uygulanabilir değildir. Bu nedenle, her bir ES fırsatı için kapsamlı bir maliyet-fayda analizi yapılmalıdır:

- **Gelir ve Maliyet Kalemleri:** Analiz, **potansiyel gelirleri** (ikincil hammadde satışı, bertaraf maliyetinden tasarruf, enerji satışı) ve **yatırım/operasyonel maliyetleri** (ön işlem ekipmanı, lojistik, işçilik, bakım, izleme) karşılaştırmalıdır.

- **Dışsallıkların Dahil Edilmesi:** Geleneksel analizler genellikle çevresel faydaları (karbon salımı azalması, su tasarrufu) ve sosyal faydaları (istihdam, halk sağlığı) parasal olarak hesaba katmaz. Oysa bu “dışsallıklar”, AB’nin Döngüsel Ekonomi Eylem Planı gibi politikalarla giderek içselleştirilmekte ve teşvikler/vergiler yoluyla ekonomik değer kazanmaktadır (European Commission, 2015). Jacobsen’in (2006) Kalundborg analizi, bu dışsallıkların dahil edildiği bir maliyet-fayda modelinin ES’nin gerçek ekonomik değerini nasıl ortaya koyduğunu göstermiştir.

5. Risk Değerlendirmesi ve Yönetişim Modeli

ES ilişkilerinin sürdürülebilir olması için, ortaya çıkabilecek risklerin önceden tanımlanması ve yönetilmesi gerekir:

- **Çevresel ve Regülatuvar Riskler:** Geri kazanılan bir malzemenin (örn., krom içeren kompost) uzun vadeli çevresel etkileri nedir? “Atık statüsünden çıkma” sürecindeki yasal belirsizlikler nelerdir? Krom (III)’ün Cr(VI)’ya dönüşüm riski, tüm krom içeren akışlar için sürekli izleme gerektirir (UNEP, 2019).
- **Operasyonel ve İlişkisel Riskler:** Tedarik sürekliliği (atık akışının kesintisi), kalite tutarsızlığı veya alıcı firmanın iflası gibi riskler nasıl yönetilecektir? Taraflar arasında açık iletişim, esnek sözleşmeler ve anlaşmazlık çözüm mekanizmaları içeren bir **yönetişim modeli** kurulmalıdır.

Bu beş aşamalı metodolojik çerçeve, deri sektöründeki soyut ES potansiyelini, somut, analiz edilebilir ve uygulanabilir projelere dönüştürmenin yolunu gösterir. Bu sistematik değerlendirme olmadan, senaryolar tesadüfi veya sürdürülemez kalabilir.

BÖLÜM 3. DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ VE POTANSİYEL UYGULAMALAR

3.1. Katı Atıkların Değerlendirilme Senaryoları

Deri sektöründeki katı atıklar, geleneksel bertaraf yöntemlerinin yüksek maliyet ve çevresel risklerine karşı, döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda yeniden değerlendirilmeyi bekleyen önemli bir kaynak potansiyelini temsil eder. Bu atıkların başarılı bir şekilde değerlendirilmesi, yalnızca atık yönetimi maliyetlerini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda yeni, sürdürülebilir ürünlerin ve sektörler arası iş birliklerinin ortaya çıkmasına olanak tanır (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Aşağıda, deri kırpıntılarının kompozit

malzeme üretiminde kullanımı senaryosu, teknik süreçler, fırsatlar, zorluklar ve başarı faktörleri ile birlikte kapsamlı bir şekilde analiz edilmektedir.

3.1.1. Deri Kırpıntılarının Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanımı

Deri kırpıntılarının kompozit malzeme üretiminde organik dolgu maddesi olarak kullanılması, bu atık akışı için en yüksek katma değerli değerlendirme yollarından birini oluşturur. Bu senaryo, endüstriyel simbiyozun temel mekanizmalarından olan **yan ürün değişimini** somutlaştırır: deri sektörünün bir atığı, plastik, mobilya veya inşaat sektörü için fonksiyonel bir hammaddeye dönüşür (Chertow, 2000).

Teknolojik Süreç ve Uygulama Alanları

Süreç, kırpıntıların toplanması, temizlenmesi, kurutulması ve kontrollü bir şekilde mikronize boyutlarda öğütülmesi ile başlar. Elde edilen **deri tozu**, daha sonra bir polimer matrisi (bağlayıcı) ile belirli oranlarda karıştırılarak kompozit hamuru hazırlanır. Bu karışım, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon veya presleme gibi geleneksel plastik işleme yöntemleriyle nihai ürüne dönüştürülür.

- **Polimer Matrisli Kompozitler:** Termoplastikler (polipropilen, polietilen) veya termoset reçineler (poliüretan, epoksi) ile üretilen bu kompozitler, **mobilya dekoratif parçaları, otomotiv iç trim panelleri, ayakkabı tabanları ve dayanıklı zemin kaplamaları** gibi ürünlerde kullanılabilir. Deri tozu, malzemeye doğal bir doku, artan aşınma direnci ve gelişmiş ses yutma özellikleri kazandırır.
- **Ahşap-Plastik Kompozit (WPC) Alternatifleri:** Geleneksel WPC’lerdeki ahşap liflerinin bir kısmı veya tamamı deri tozu ile ikame edilebilir. Bu, **dış mekan decking, bahçe mobilyaları ve çitler** gibi ürünlerde, malzemenin su emme oranını düşürme ve dayanıklılığı artırma potansiyeli taşır.
- **Yapısal Olmayan Uygulamalar:** Yalıtım panelleri, ses emici levhalar veya ambalaj dolgu malzemeleri gibi mekanik yük taşıma gerektirmeyen alanlarda, daha yüksek oranlarda deri tozu kullanımı mümkündür. Bu, atığın değerlendirilmesi için daha geniş bir pazar yaratır.

Teknik Zorluklar ve Çözüm Yolları

Bu senaryonun başarısı, aşağıdaki teknik ve kalite ile ilgili engellerin aşılmasına bağlıdır:

- **Koku ve Biyolojik Bozunma:** Organik kökenli deri tozu, mikrobiyal aktivite ve koku oluşumuna yatkındır. Bu risk, hammaddenin yıkanması, **termal işlem** (kısa süreli yüksek sıcaklık) veya uygun **kimyasal**

katkı maddeleri (biyosidler veya stabilize edici ajanlar) ile minimize edilebilir.

- **Nem Duyarlılığı ve Stabilite:** Deri tozu hidrofilik (su çeken) bir yapıya sahiptir ve nem çekerek kompozit malzemede şişmeye veya mukavemet kaybına neden olabilir. Bu sorun, deri tozunun **kimyasal modifikasyonu** (örneğin silan kenetleme ajanları ile) veya polimer matris ile daha iyi bir **arayüzey bağının** sağlanması yoluyla çözülebilir.
- **Mekanik Özelliklerin Standardizasyonu:** Atık derinin heterojen yapısı (deri türü, tabaklama yöntemi, yaş farklılıkları), tozun mekanik özelliklerinde değişkenliğe yol açabilir. Bu, **kapsamlı bir ön karakterizasyon ve sınıflandırma** ile yönetilmeli; farklı kalitelerdeki tozlar, farklı uygulama alanlarına yönlendirilmelidir. Leather Working Group gibi protokollerin sağladığı izlenebilirlik, bu sınıflandırmayı kolaylaştırabilir (Leather Working Group, tarihsiz).

Ekonomik ve Çevresel Fizibilite Senaryonun ekonomik ömrü, bir dizi faktöre bağlıdır:

- **Maliyet Tasarrufu ve Gelir:** Deri tozu, sentetik dolgu maddelerine (kalsit, talk) veya ahşap liflerine kıyasla genellikle daha düşük maliyetli bir alternatiftir. Ayrıca, deri üreticisi için **atık bertaraf maliyetinden kaçınma** ve **ikincil hammadde satışından gelir** elde etme fırsatı yaratır.
- **Pazar Talebi ve Rekabetçilik:** Tüketicilerin sürdürülebilir ve geri dönüştürülmüş içerikli ürünlere yönelik artan talebi, bu tür kompozitleri pazarda avantajlı kılar. AB'nin Döngüsel Ekonomi Eylem Planı gibi politikalar, bu tür yenilikçi ürünlerin teşvik edilmesini desteklemektedir (European Commission, 2015).
- **Çevresel Ayak İzi:** Bu uygulama, düzenli depolama alanlarındaki atık hacmini ve metan emisyonlarını azaltır, birincil hammadde (petrokimyasallar, kereste) tüketimini hafifletir ve böylece önemli bir **karbon ayak izi azaltımı** sağlar (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016).

Deri kırpıntılarının kompozit malzeme üretiminde değerlendirilmesi, hem teknik olarak uygulanabilir hem de ekonomik ve çevresel açıdan cazip bir döngüsel ekonomi senaryosudur. Başarı, **sektörler arası iş birliğine** (deri üreticileri, plastik işleyiciler, ürün tasarımcıları), **Ar-Geyatırımlarına** (malzeme performansını iyileştirmek için) ve **net standartlara** (ürün güvenliği ve kalite) dayanacaktır. Bu senaryo, deri atıklarını yüksek değerli bir kaynağa dönüştürerek, endüstriyel simbiyozun sunduğu sinerjik faydaların somut bir örneğini teşkil etmektedir.

3.1.2. Deri Tozu ve Arıtma Çamurunun Enerji Geri Kazanımı (Biyogaz/Briket)

Deri sektöründen kaynaklanan organik kökenli atıklar (toz, kırpıntı, arıtma çamuru), yüksek biyolojik ve termal enerji potansiyeli taşır. Ancak, içerdikleri krom, tuz ve diğer proses kimyasalları, geleneksel biyokütle değerlendirme yöntemlerinin doğrudan uygulanmasını engelleyen kritik kısıtlamalar oluşturur. Bu bölümde, bu atıklardan enerji geri kazanımını hedefleyen üç ana senaryo—anaerobik sindirim, termal dönüşüm ve katı yakıt üretimi— teknik gereklilikler, ekonomik-çevresel değerlendirmeler ve endüstriyel simbiyoz bağlamındaki rolleri ile birlikte detaylı olarak incelenmektedir.

1. Karıştırmalı Anaerobik Sindirim (Ko-Digestion)

Anaerobik sindirim (AD), organik atıkları mikrobiyal aktivite ile biyogaz (temelde metan, CH_4) ve sindirilmiş çamur (digestat) adı verilen stabil bir organik gübreye dönüştüren biyolojik bir prosesdir.

- **Fırsatlar ve Proses Dinamikleri:** Deri atıkları, yapılarındaki protein (kollajen) ve yağlar sayesinde **yüksek teorik metan verimi** sunar. Tek başlarına sindirimleri zor olduğundan, **ko-digestion** stratejisi benimsenir. Deri atıkları, kanalizasyon çamuru, gıda işleme atıkları veya hayvan gübresi gibi daha dengeli ve mikrobiyal olarak aktif organik atıklarla karıştırılarak, C/N oranı (Karbon/Azot) optimize edilir ve proses stabilitesi artırılır. Bu, bir belediye arıtma tesisi veya biyogaz santrali ile kurulacak bir endüstriyel simbiyoz ilişkisinin temelini oluşturabilir (Chertow, 2000).
- **Kritik Engeller ve Yönetim Stratejileri:** Ana zorluk, **krom (Cr(III))** ve **yüksek tuz konsantrasyonlarının** metanojenik bakteriler üzerindeki inhibitör (engelleyici) toksik etkisidir (World Bank, 1998). Bu riski yönetmek için:

1. **Strik Ön Karakterizasyon ve Dozaj Kontrolü:** Atığın ağır metal ve tuz içeriği sürekli izlenmeli ve reaktöre beslenen deri atığı oranı, toksik eşiğin altında kalacak şekilde (genellikle <%5-10) optimize edilmelidir.
2. **Biyo-elverişlilik Azaltımı:** Kimyasal ön işlemlerle kromun biyolojik olarak daha az elverişli (mobil olmayan) formlara dönüştürülmesi araştırma konusudur.
3. **Digestat Yönetimi:** Sindirim sonucu oluşan digestat, krom konsantrasyonuna bağlı olarak tarımda gübre olarak kullanılamayabilir. Bu durumda, güvenli bertarafı veya kompost gibi ikincil bir işleme tabi tutulması gerekir; bu da prosesin genel ekonomisini etkiler.

2. Termal Dönüşüm Prosesleri: Piroliz ve Gazlaştırma

Kimya veya biyoloji yerine ısının hakim olduğu bu prosesler, kontaminasyon sorununa daha dayanıklı çözümler sunar. Proses, atığın oksijen yokluğunda (piroliz) veya sınırlı oksijenle (gazlaştırma) yüksek sıcaklıkta (300-900°C) termokimyasal parçalanmasıdır.

- **Çıktılar ve Değer Akışı:**
 - **Sentez Gazı (Syngaz):** Gazlaştırma ile üretilen, hidrojen (H₂) ve karbonmonoksit (CO) bakımından zengin bu gaz, doğrudan yakılarak ısı/elektrik üretiminde veya kimyasal sentezlerde kullanılabilir.
 - **Biyo-Char (Biyokömür):** Piroliz sonucu elde edilen karbonca zengin katı kalıntı. Yüksek yüzey alanı sayesinde **toprak düzenleyici** olarak veya ağır metal adsorpsiyonu gibi çevresel uygulamalarda kullanılabilir.
 - **Biyo-Yağ:** Piroliz sıvısı, rafine edilerek yakıt ya da kimyasal hammadde kaynağı olma potansiyeli taşır.
- **Avantajları ve Risk Yönetimi:** Termal proseslerin en büyük avantajı, organik kirleticileri ve patojenleri tamamen imha etmesi ve hacmi büyük ölçüde (%70-90) azaltmasıdır. Krom gibi ağır metaller ise büyük oranda **katı kalıntıda (kül/bio-char) hapsolür**. Bu, onları bertarafı daha kolay ve güvenli bir forma sokar, ancak bu kalıntı **konsantre bir tehlikeli atık** haline gelir. Bu nedenle, başarılı bir senaryo, külün **güvenli bertarafı** veya **stabilizasyonu** (çimento matrisinde enkapsülasyon) ve proses gazlarındaki partikül madde ile ağır metal emisyonlarını kontrol eden **ileri hava kirliliği kontrol sistemlerinin** (elektrostatik çöktürücüler, torbalı filtreler) kurulumunu zorunlu kılar.

3. Briket ve Pelet Üretimi (Doğrudan Yakıt)

Bu senaryo, deri kırpıntı ve tozlarının mekanik olarak sıkıştırılarak, katı yakıt (briket/pelet) haline getirilmesi ve çimento fırınları, termik santraller veya endüstriyel kazanlarda **kömür veya biyokütle yerine ikame yakıt** olarak kullanılmasını öngörür.

- **Proses ve Gereklilikler:** Süreç nispeten basittir: atığın **kurutulması** (nemin <%15'e düşürülmesi), **öğütülmesi** ve yüksek basınçta preslenmesini içerir. Bu, KOBİ ölçeğinde uygulanabilir bir senaryodur.
- **Üstünlükler ve Operasyonel Zorluklar:**
 - **Avantajlar:** Düşük sermaye yatırımı, hızlı uygulanabilirlik

ve birincil fosil yakıt tüketimini azaltarak **karbon ayak izini düşürme** potansiyeli (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

► **Zorluklar ve Çözümler:**

1. **Enerji Dengeleri ve Koku:** Kurutma işlemi, briketin net enerji içeriğini düşürebilecek ek enerji tüketimi gerektirir. Ayrıca, kurutma sırasında organik buharlar ve kalıcı koku çıkışı olabilir. Kapalı sistem kurutucular ve gaz yıkama üniteleri bu sorunu hafifletir.
2. **Yanma Emisyonları:** Deri briketlerin yakılması, partikül madde, kükürt oksitler (SO_x) ve ağır metal emisyonlarına (krom buharı) yol açabilir. Bu nedenle, bu yakıtın sadece **ileri hava kirliliği kontrol ekipmanı bulunan, yüksek sıcaklıkta ve kontrollü yanma sağlayan tesislerde** (çimento fırınları gibi) kullanılması kritik bir şarttır. Bu, endüstriyel simbiyoz ağının güvenli bir şekilde kurulmasını gerektirir.

Sonuç: Senaryoların Karşılaştırmalı Değerlendirmesi ve Yol Haritası

Senaryo	Ana Çıktı	Temel Avantajlar	Kritik Zorluklar ve Riskler	Endüstriyel Simbiyoz Potansiyeli
Anaerobik Sindirim	Biyogaz (Enerji), Digestat	Yenilenebilir enerji, organik atığın stabilizasyonu	Krom toksisitesi, digestat bertarafı, proses hassasiyeti	Belediye/Organik atık işleyen biyogaz tesisleri ile işbirliği
Termal Prosesler	Syngaz, Biyo-char, Isı	Toksik içeriği nötrleştirir, hacim azaltımı yüksek	Yüksek yatırım maliyeti, tehlikeli kül yönetimi, emisyon kontrolü	Enerji/Isı talebi olan sanayiler, atık yönetimi firmaları
Briketleme	Katı Yakıt	Düşük yatırım, hızlı uygulama, fosil yakıt ikamesi	Yanma emisyonları, kurutma enerjisi, koku kontrolü	Çimento fabrikaları, termik santraller, endüstriyel kazanlar

Sonuç olarak, her bir enerji geri kazanım senaryosu, farklı teknik ve ekonomik profillere sahiptir. Seçim, atığın spesifik karakterine (krom/tuz içeriği, nem), mevcut altyapıya, yatırım kapasitesine ve bölgedeki **potansiyel endüstriyel partnerlerin varlığına** bağlı olacaktır. Bu senaryolar, deri sektörünün doğrusal atık modelinden, kaynak verimliliğine ve enerji geri kazanımına odaklanan daha döngüsel bir modele geçişinde hayati rol oynayabilir (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016). Başarı, teknolojik seçimin yanı sıra, paydaşlar arasında güvene dayalı, riskleri açıkça tanımlanmış ve yönetilmiş bir işbirliği ağının kurulmasına bağlıdır.

3.2. Sıvı Atıkların ve Isının Geri Kazanım Senaryoları

Deri işleme, hem yüksek sıcaklıklarda çalışan (kireçleme, boyama) hem de büyük miktarda proses suyu kullanan, dolayısıyla enerji ve su yoğun bir endüstridir. Bu bağlamda, atık suda bulunan termal enerjinin geri kazanılması, döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda kaynak verimliliğini artırmak ve operasyonel maliyetleri düşürmek için doğrudan ve son derece etkili bir stratejidir. Atık su ısıısının değerlendirilmesi, endüstriyel simbiyozun “**ortak altyapı paylaşımı**” ve “**yardımcı hizmet değişimi**” kategorilerine güçlü bir örnek teşkil eder (Chertow, 2000). Bu senaryo, basit bir enerji verimliliği önleminin ötesinde, tesis içi kapalı döngülere veya tesisler arası sinerjik ağlara kapı aralayarak, sektörün çevresel ayak izini azaltmada kritik bir rol oynayabilir.

3.2.1. Atık Su Isısının Endüstriyel Kullanım Potansiyeli

Deri işlemeden çıkan atık sular, proses gereklilikleri nedeniyle genellikle 30°C ile 60°C arasında önemli bir termal enerji potansiyeli taşır. Geleneksel olarak bu enerji, soğutma havuzlarında veya doğrudan deşarjla çevreye atılarak büyük bir israfa neden olmaktadır. Bu düşük ve orta sıcaklıktaki atık ısının geri kazanımı, başlıca üç teknolojik yol ile mümkündür. Her bir yöntem, farklı sıcaklık seviyeleri, atık su kaliteleri ve yatırım kapasiteleri için uygundur.

1. Isı Değiştiriciler ile Proses Suyu Ön Isıtması Bu yöntem, en doğrudan, yaygın ve genellikle en yüksek geri dönüşüm oranına sahip uygulamadır.

- **Teknik Prensipler ve Uygulama:** Plakalı veya borulu ısı değiştiriciler kullanarak, sıcak atık su ile soğuk şebeke veya geri dönüşüm suyu arasında, fiziksel temas olmadan ısı transferi sağlanır. Böylece, kazana gidecek veya doğrudan kullanılacak suyun sıcaklığı **önemli ölçüde (10-25°C kadar) artırılır**. Bu, kazan yakıt tüketimini ve ilgili sera gazı emisyonlarını doğru orantılı olarak düşürür.
- **Deri Sektörüne Özgü Hususlar ve Zorluklar:** Deri atık suyu, yağ, kıl, kimyasal çökelti ve askıda katı madde bakımından zengindir. Bu kirleticiler, ısı değiştirici yüzeylerinde **kirlenmeye (fouling) ve tıkanmaya** yol açarak ısı transfer verimliliğini hızla düşürür (World Bank, 1998). Bu nedenle, başarılı bir sistem için, atık suyun ısı değiştiriciye girmeden önce **etkin bir ön filtrelemeye** (çok kademeli elekler, yağ ayırıcılar) tabi tutulması ve değiştiricilerin düzenli temizlik için kolay erişilebilir (sökülebilir plakalı) tasarımlarının seçilmesi şarttır.

2. Isı Pompası Uygulamaları Isı pompaları, düşük sıcaklıktaki bir kaynaktan (atık su) ısıyı alıp, daha yüksek sıcaklıkta bir kuyuya (proses veya ısıtma suyu) aktarabilen sistemlerdir.

- **Prensip ve Avantajlar:** Elektrik enerjisi kullanarak ısıyı “yukarı taşıyan” bu sistemler, özellikle **40°C’nin altındaki atık su sıcaklıklarında** bile, proses için gerekli olan 70-80°C’lik sıcak suyu üretmeyi mümkün kılabilir. Bu, doğrudan ısı değişiminin yetersiz kaldığı durumlarda değerli bir seçenektir.
- **Ekonomik Fizibilite ve Sınırlamalar:** Isı pompalarının performans katsayısı (COP) genellikle 3 ila 5 arasındadır, yani 1 birim elektrik enerjisi ile 3-5 birim ısı enerjisi üretilebilir. Ancak, yüksek başlangıç yatırım maliyeti ve **elektrik fiyatlarının** göreceli yüksekliği, geri ödeme süresini uzatabilir. Ekonomik fizibilite, genellikle büyük ölçekli ve sürekli ısı ihtiyacı olan tesislerde daha yüksektir. Avrupa Birliği’nin enerji verimliliği hedefleri ve destekleri, bu tür yatırımları teşvik edici bir rol oynayabilir (European Commission, 2015).

3. Bölgesel Isı Ağları ve Endüstriyel Simbiyoz Bu yöntem, atık ısı geri kazanımını tek bir tesisin sınırlarından çıkararak, endüstriyel simbiyozun tam anlamıyla gerçekleştiği bir modele taşır.

- **Kalundborg Modeli ve Uyarlanabilirliği:** Danimarka’nın Kalundborg endüstriyel simbiyoz ağı, bu konseptin klasik örneğidir. Bir termik santralin atık ısısı, boru hatları ile şehir merkezine ve bölgedeki diğer endüstriyel tesislere (bir ilaç fabrikası, bir balık çiftliği) dağıtılarak, bireysel kazan ihtiyacını büyük ölçüde ortadan kaldırmıştır (Jacobsen, 2006). Benzer şekilde, bir deri işleme tesisi, **komşu bir tekstil fabrikasının, seranın veya bir konut sitesinin ısıtma ihtiyacını** karşılayabilir.
- **Kritik Başarı Faktörleri:** Bu senaryonun hayata geçmesi için üç temel koşul vardır:

Coğrafi Yakınlık: Isıyı taşımanın maliyeti, boru hattı mesafesi ile katlanarak artar. İdeal senaryo, tesislerin birbirine **1-2 km** mesafede olmasıdır.

Eş Zamanlılık ve Talep Uyumu: Deri tesisi atık ısı üretirken, alıcı tesisin de ısıya ihtiyaç duyuyor olması gerekir. Talep profillerindeki (mevsimsel/günlük) farklılıklar, **ısı depolama sistemleri** (büyük hacimli sıcak su tankları) ile dengelenebilir.

Ortak Altyapı Yatırımı ve Yönetişim: Boru hattı, pompa istasyonları ve kontrol sistemlerinin kurulum maliyeti yüksektir ve genellikle kamu destekli projeler veya konsorsiyum yatırımları gerektirir. Taraflar arasında uzun vadeli sözleşmeler ve açık bir yönetim modeli kurulması esastır (Korhonen, Nuur, Feldmann & Birkie, 2018).

Ekonomik ve Çevresel Değerlendirme Atık ısı geri kazanım projelerinin geri dönüş süresi, genellikle **2 ila 5 yıl** arasında değişir ve enerji fiyatlarındaki artışla kısalır. Çevresel faydası ise somuttur: her geri kazanılan 1 kWh termal

enerji, doğalgaz veya kömür kullanımını ve buna bağlı **karbon dioksit (CO₂) emisyonlarını** azaltır. Bu, sektörün Leather Working Group gibi çevresel protokollerdeki enerji performans kriterlerini iyileştirmesine de doğrudan katkı sağlar (Leather Working Group, tarihsiz).

Atık su ısıısının geri kazanımı, deri sektörü için “düşük meyveli” ancak sonuçları itibarıyla yüksek etkili bir döngüsellik senaryosudur. Bu uygulama, kaynak verimliliğini artırırken, aynı zamanda daha iddialı simbiyotik ilişkilerin (su geri kazanımı, kimyasal geri kazanım) kurulması için bir altyapı ve güven temeli oluşturabilir. Bu senaryo, endüstriyel faaliyetlerin çevresel maliyetlerini azaltırken ekonomik rekabet gücünü de artırabileceğini göstererek, sürdürülebilirliğin çelişkili değil, sinerjik bir hedef olduğunu kanıtlamaktadır (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016).

3.2.2. Suyun Geri Kazanımı ve Kapalı Devre Sistemler

Deri sektörünün sürdürülebilirlik önündeki en kritik zorluklardan biri, birim ürün başına aşırı su tüketimi ve yüksek kirlilik yüküne sahip atık su üretimidir. Geleneksel tek yönlü su kullanım modeli, artan su stresi, yükselen su maliyetleri ve sıkılaştıran deşarj standartları karşısında sürdürülemez hale gelmektedir (UNEP, 2019). Suyun geri kazanımı ve kapalı devre sistemlere geçiş, bu zorluğa yönelik en radikal ve döngüsel çözümü sunar. Bu yaklaşım, “kaynak verimliliği” ilkesini doruk noktasına taşıyarak, atık suyu bir sorun olmaktan çıkarıp, güvenilir bir ikincil su kaynağına dönüştürmeyi hedefler (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Bu senaryo, endüstriyel simbiyozun en ileri formlarından biri olan “**tesis içi kapalı döngülerin**” kurulmasını ve su ayak izinin minimize edilmesini kapsar.

1. İleri Arıtma Teknolojileri ve Geri Kazanım Kalite Senaryoları

Atık suyun proseslerde yeniden kullanımı, hedef kaliteye bağlı olarak kademeli bir arıtma yaklaşımı gerektirir. Teknolojiler, temel biyolojik ve fizikokimyasal arıtmanın ötesine geçerek, spesifik kirleticilerin giderimine odaklanır.

- **Membran Biyoreaktör (MBR) ve İleri Membran Süreçler:** MBR, biyolojik arıtma ile membran filtrasyonu (ultrafiltrasyon, UF) birleştirir. **0.01-0.1 mikron** aralığındaki gözenekleri ile askıdaki katı maddeleri, bakterileri ve virüsleri neredeyse tamamen uzaklaştırarak, berrak ve dezenfekte bir çıkış suyu sağlar. Bu su, doğrudan **temas dışı proseslerde** (soğutma suyu, makine yıkama, tuvalet sifonları) veya daha ileri bir arıtma (ters osmoz) için besleme suyu olarak kullanılabilir. **Ters Osmoz (RO)**, iyon düzeyinde ayırma yaparak çözünmüş tuzların, organik kalıntıların ve ağır metal iyonlarının %95-99'unu giderir. RO ile üretilen yüksek saflıktaki su, **boyama ve kaplama** gibi yüksek kalite gerektiren temaslı

proseslerde bile kullanılma potansiyeli taşır (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016).

- **İleri Oksidasyon Prosesleri (AOP'ler):** Biyolojik olarak parçalanamayan (rekalitrant) organik kirleticilerin (bazı boyalar, fenoller, kompleks kimyasallar) giderilmesi için kritik öneme sahiptir. Ozonlama, UV/H₂O₂ gibi AOP'ler, bu inatçı bileşikleri daha küçük, biyolojik olarak parçalanabilir veya zararsız moleküllere dönüştürür. Bu işlem, geri kazanılan suyun organik karbon içeriğini düşürerek, membran sistemlerde **biofouling** (biyolojik kirlenme) riskini azaltır ve suyun yeniden kullanım kalitesini artırır.
- **Tuzlu Akışların Yönetimi ve Konsantre Problemi:** Deri sektörünün en büyük teknik zorluklarından biri, tuzlama işlemlerinden kaynaklanan **yüksek tuz (NaCl) yüklü akışlardır**. RO gibi membran prosesleri bu suyu arıtabilir, ancak geride, hacmi azaltılmış, tuz ve diğer kirleticilerce aşırı zenginleşmiş bir **konsantre akış** bırakır. Bu konsantrenin bertarafı (derin kuyu enjeksiyonu, özel buharlaştırıcılar) pahalı ve zordur. Bu nedenle, başarılı bir geri kazanım stratejisi, **kaynakta ayırma** ile tuzlu akışları mümkün olduğunca ayrı toplamayı ve konsantre yönetimi için sürdürülebilir bir çözümü (örneğin, endüstriyel tuz geri kazanımı veya kontrollü bertaraf) planlamayı zorunlu kılar (World Bank, 1998).

2. Kapalı Devre Sistem Stratejileri ve Kademeli Kullanım

Gerçek bir kapalı devre hedefine ulaşmak, suyu tek bir seferlik geri kazanmaktan ziyade, onu sistematik olarak yeniden kullanmayı ve tüketimi en aza indirmeyi gerektirir. Bu, üç kademeli bir strateji ile sağlanır:

1. Kaynakta Azaltma ve Optimizasyon: Su tüketen proseslerin gözden geçirilmesi, düşük su gerektiren teknolojilere geçiş (örneğin, bazı kimyasal uygulamalarında su yerine CO₂ kullanımı) ve sızıntıların önlenmesi.

2. Kademeli Geri Kullanım (Cascading Use): Bir proses için uygun olmayan suyun, daha az kalite gerektiren başka bir proseste kullanılması. Örneğin, nihai durulama suyu, ön yıkamada; soğutma suyu, bahçe sulamada kullanılabilir.

3. Merkezi İleri Arıtma ve Geri Besleme: Tüm atık suların toplanarak, MBR+RO gibi merkezi bir ileri arıtma tesisinde işlenmesi ve elde edilen yüksek kaliteli suyun, üretim hatlarına geri beslenmesi. Bu, su çekimini %50-70 oranında azaltabilir.

3. Teknik ve Operasyonel Zorluklar

- **Membran Fouling:** Deri atık suyundaki yağlar, proteinler, kollajen kalıntıları ve kimyasallar, membran yüzeylerinde hızla birikerek tıkanmaya ve basınç artışına neden olur. Bu, işletme maliyetini yükseltir ve membran ömrünü kısaltır. **Etkin ön arıtma** (yağ giderimi, kum filtresi, koagülasyon), **düzenli kimyasal temizlik (CIP)** ve **anti-fouling kaplamalı membranların** kullanımı bu riski yönetmenin anahtarıdır.
- **Kimyasal Uyumluluk ve Ürün Kalitesi:** Geri kazanılmış suyun, derinin son kalitesini etkilememesi için kimyasal içeriği (özellikle klor, sertlik iyonları, organik kalıntı) sürekli izlenmelidir. Leather Working Group protokolü gibi standartlar, geri kazanılmış suyun belirli parametrelerde olmasını şart koşabilir (Leather Working Group, tarihsiz).
- **Sistem Esnekliği ve Maliyet:** Kapalı devre sistemler, önemli bir başlangıç yatırımı ve proses mühendisliği gerektirir. Sistem, su kalitesindeki dalgalanmalara ve üretim programı değişikliklerine karşı esnek (örneğin, dengeleme tankları ile) tasarlanmalıdır.

4. Ekonomik ve Çevresel Değerlendirme

- **Maliyet-Fayda Analizi:** Yatırım maliyeti yüksek olmakla birlikte, su geri kazanım sistemlerinin geri ödeme süresi genellikle 3-7 yıl arasındadır. Bu süre, yerel su ve atık su tarifelerindeki artış, atık su deşarj vergileri ve kuraklık dönemlerinde kesintilerden kaçınma gibi faktörlerle kısalmır. AB'nin Su Çerçeve Direktifi ve Döngüsel Ekonomi Eylem Planı, su verimliliği yatırımlarını teşvik edici finansal enstrümanlar sunmaktadır (European Commission, 2015).
- **Çevresel ve Stratejik Kazanımlar:** Su geri kazanımı, sektörün su ayak izini ve yüzeysel su kaynakları üzerindeki baskısını dramatik şekilde azaltır. Ayrıca, şebeke suyuna bağımlılığı azaltarak işletmeyi kuraklık ve su kıtlığı risklerine karşı **daha dayanıklı (resilient)** hale getirir. Bu, sektörün sosyal lisansını sürdürmesi ve gelecekteki iklim senaryolarına uyum sağlaması için stratejik bir gerekliliktir.

Suyun geri kazanımı ve kapalı devre sistemlere geçiş, deri sektörü için basit bir teknoloji yatırımı değil, köklü bir **operasyonel paradigma değişimidir**. Bu senaryo, suyun bir “tüketim malzemesi” olmaktan çıkıp, dikkatle yönetilen bir “sistem varlığı” haline geldiği döngüsel bir modelin temelini oluşturur. Başarı, yalnızca teknolojik seçimle değil, aynı zamanda tesis çapında bir su yönetimi kültürünün benimsenmesi, sürekli izleme ve proses mühendisliği ile mümkündür. Bu yol, sektörü çevresel etkilerini minimize

ederken, kaynak maliyetlerinde istikrar ve uzun vadeli rekabetçilik sağlayan daha sürdürülebilir bir geleceğe taşıyacaktır.

3.3. Kimyasal ve Tehlikeli Atıkların Yönetim Senaryoları: Krom Odaklı Kapalı Döngü Stratejileri

Deri sektöründeki kimyasal ve tehlikeli atıkların yönetimi, çevre sağlığı, mevzuata uyum ve sektörün sosyal lisansını sürdürme açısından en kritik sınavı oluşturur. Bu atıkların başında, toksikolojik riski ve yaygın kullanımı ile **krom bileşikleri** gelir. Geleneksel yaklaşım, bu atıkları bertaraf etmeye odaklanırken, döngüsel ekonomi ve endüstriyel simbiyoz perspektifi, onları kaynak olarak görmeyi ve kapalı döngü sistemlerle yönetmeyi zorunlu kılar (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Bu senaryo, sadece “son-of-pipe” arıtma teknolojilerini değil, aynı zamanda kaynakta önleme, kimyasal ikame ve tedarik zinciri sorumluluğunu içeren bütünselik bir yönetim stratejisi önermektedir.

1. Krom Geri Kazanımı ve Stabilizasyon Teknolojileri: Reaktif Yaklaşımlar

Atık su ve çamurdaki kromun kontrolü ve geri kazanımı, sektörün çevresel performansının bel kemiğidir. Teknolojiler, verimlilik, maliyet ve elde edilen ürünün kalitesine göre çeşitlilik gösterir.

- **Kimyasal Çöktürme ve Yeniden Kullanım:** En yaygın yöntem olan kireç (Ca(OH)_2) ile yüksek pH'ta çöktürme, kromu **krom hidroksit** (Cr(OH)_3) **çamuru** olarak uzaklaştırır. Ancak, bu çamurun doğrudan depolanması, Cr(III)'ün oksidatif koşullarda toksik ve mobil **hegzavalent kroma** (Cr(VI)) **dönüşüm riski** taşır (UNEP, 2019). Bu nedenle, geri kazanım senaryosu tercih edilir: Çökeltilen çamur sülfürik asitte çözülür (**re-asidifikasyon**), saflaştırılır ve konsantre edilerek tabaklama tankına geri beslenebilir. Ancak bu prosesin verimi sınırlıdır ve geri kazanılan çözeltiye organik madde, demir, alüminyum gibi kirleticiler karışabilir, bu da üst düzey deri üretiminde kullanımını kısıtlar (World Bank, 1998).
- **İleri Ayırma Teknolojileri:**
 - **İyon Değişim ve Seçici Adsorpsiyon:** Spesifik iyon değişim reçineleri veya modifiye edilmiş adsorbanlar (magnetit nanopartiküller, fonksiyonelleştirilmiş biyokömür), atık sudan krom iyonlarını seçici olarak ayırabilir. Bu yöntemler, daha yüksek saflıkta krom geri kazanımına ve atık suyun diğer bileşenlerden (organikler, diğer tuzlar) ayrılmasına olanak tanır, böylece suyun geri kazanım potansiyelini de artırır.
 - **Membran Süreçleri (Nanofiltrasyon, Elektrodializ):** Nanofiltrasyon (NF) membranları, çok değerlikli iyonları (Cr^{3+}) tek

değerlikli iyonlardan (Na^+ , Cl^-) ayırarak kromu konsantre edebilir. **Elektrodiyaliz** ise elektrik alanı kullanarak iyonları seçici membranlardan geçirir. Her iki yöntem de tuzlu atık su akışlarında etkili olabilir, ancak membran kirlenmesi (**fouling**) ve yüksek işletme maliyetleri önemli engellerdir.

- **Elektrokimyasal Prosesler: Elektrokoagülasyon**, çözünmüş kromun, sacrisyfel (kurban) anotlardan (genellikle demir veya alüminyum) salınan metal iyonlarıyla çöktürölmesini sağlar. **Elektrooksidasyon** ise, Cr(III) 'ün anot yüzeyinde direkt olarak Cr(VI) 'ya oksitlenmesi ve ardından diğfer proseslerle geri kazanılması için konsantre edilmesinde kullanılabilir. Bu yöntemler kompakt olmalarına rağmen, elektrik enerjisi tüketimi yüksektir.

2. Kaynakta Önleme ve Proses Temelli Stratejiler: Proaktif Yaklaşım

En etkili ve döngüsel tehlikeli atık yönetimi, atığın oluşmasını engellemek veya azaltmaktır. Bu, temel üretim süreçlerine ve tedarik zincirine müdahaleyi gerektirir.

- **Krom Yerine Geçen Tabaklama Yöntemleri:** Krom tabaklamasının çevresel risklerinden kaçınmanın en kesin yolu, alternatif maddelere yönelmektir. **Organik tabaklayıcılar** (bitkisel tanenler), **alüminyum**, **zirkonyum** veya **demir tuzları** gibi metalik alternatifler, belirli deri türleri için kullanılabilir. Ancak, bu alternatifler genellikle kromun sunduğu termal stabilite, esneklik ve maliyet etkinliğinin tamamını sağlayamaz, bu da Ar-Ge çabalarını ve proses optimizasyonunu zorunlu kılar (Leather Working Group, tarihsiz).
- **Yüksek Krom Kullanım Verimliliği ve Geri Dönüşüm:** Kromun proses verimliliğini artırmak, atık oluşumunu kaynağında azaltır. Bu, **otomatik dozaj sistemleri**, **yenilikçi karıştırma teknolojileri** ve tabaklama sonrası krom içeren **artık likörlerin** doğrudan yeniden kullanımı ile sağlanabilir. Bu “iç döngü” stratejisi, krom tüketimini ve atık su yükünü önemli ölçüde düşürür.
- **Kimyasal Yönetimi ve Tedarikçi Sorumluluğu:** Tehlike azaltma, kullanılan tüm kimyasalların yaşam döngüsü boyunca ele alınmalıdır. **Leather Working Group (LWG)** gibi çevresel denetim protokolleri, kimyasal tedarikçilerinin **REACH** gibi küresel düzenlemelere uyumunu, tehlikeli maddelerin listelenmesini (**MRSL - Manufacturing Restricted Substances List**) ve güvenli kullanım bilgilerinin (**SDS**) sağlanmasını zorunlu tutar (Leather Working Group, tarihsiz). Sektör, toksik azo boyaların, alkilfenol etoksilatların (**APEO**) ve diğfer kalıcı kirleticilerin kullanımını aşamalı olarak bırakmalıdır.

3. Nihai Bertaraf ve Stabilizasyon: Kontrollü Sonlanım

Tüm geri kazanım ve önleme çabalarına rağmen, bertaraf edilmesi gereken tehlikeli atık kalıntıları (krom çamuru, konsantreler) oluşacaktır. Bu atıkların güvenli yönetimi kritiktir.

- **Stabilizasyon/Katılaştırma (S/S):** Krom içeren çamurlar, çimento, uçucu kül veya silika füme gibi bağlayıcılarla karıştırılarak monolitik, dayanıklı bloklar haline getirilebilir. Bu işlem, kromun fiziksel olarak hapsedilmesini (**enkapsülasyon**) ve kimyasal olarak daha kararlı bileşiklere dönüştürülmesini sağlayarak **sızıntı riskini** minimize eder.
- **Güvenli ve İzlenebilir Bertaraf:** Stabilize edilemeyen veya yüksek konsantrasyonlu tehlikeli atıklar, lisanslı **tehlikeli atık düzenli depolama (landfill) tesislerine** gönderilmelidir. Bu tesisler, geçirimsiz alt tabaka, sızıntı suyu toplama/arıtma sistemleri ve sürekli izleme ile donatılmıştır. Avrupa Birliği'nin Atık Çerçeve Direktifi, tehlikeli atıkların izlenmesi ve bertarafı için katı bir "**atık hiyerarşisi**" ve kayıt yükümlülüğü getirmiştir (European Commission, 2015).

Entegre ve Risk Odaklı Bir Yönetim Çerçevesi Kimyasal ve tehlikeli atık yönetimi, tek bir teknolojik çözüme indirgenemez. Başarılı bir senaryo, aşağıdaki unsurları birleştiren çok katmanlı bir strateji gerektirir:

1. **Öncelikli Hedef: Kaynakta Önleme ve İkame** (Kromsuz tabaklama, verimlilik).

2. **İkinci Hedef: Kapalı Döngü Geri Kazanım** (Yüksek verimli krom ve su geri kazanımı).

3. **Son Çare: Güvenli Stabilizasyon ve Kontrollü Bertaraf.** Bu yaklaşım, sadece çevresel riski yönetmekle kalmaz, aynı zamanda krom gibi değerli bir kaynağın korunması, dışa bağımlılığın ve maliyetlerin azalması yoluyla ekonomik değer de yaratır (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016). Deri sektörünün geleceği, bu entegre kimyasal yönetimini tedarik zincirinin en başından nihai bertarafına kadar benimseyip uygulayabilmesine bağlıdır.

3.4. Endüstriyel Simbiyoz Ağı Tasarımı ve Malzeme-Enerji Akış Şemaları: Teoriden Uygulamaya Bir Yol Haritası

Endüstriyel simbiyoz (ES), doğası gereği bir ağ bilimidir. Tek tek atık değerlendirme senaryolarının başarısı, nihayetinde onların birbirleriyle ve bölgesel endüstriyel ekosistemle nasıl entegre edildiğine bağlıdır. Bu entegrasyon, rastgele ikili anlaşmalardan ziyade, kasıtlı, sistematik ve paydaş odaklı bir tasarım süreci gerektirir (Chertow, 2000). Bu bölüm, önceki bölümlerde teorik ve teknik olarak incelenen senaryoların, bir deri

işleme tesisi veya bir Organize Sanayi Bölgesi (OSB) ölçeğinde nasıl birbirine bağlanabileceğini gösteren kapsamlı bir tasarım metodolojisi ve görsel bir şema sunmaktadır.

1. Endüstriyel Simbiyoz Ağı Tasarımının Aşamaları

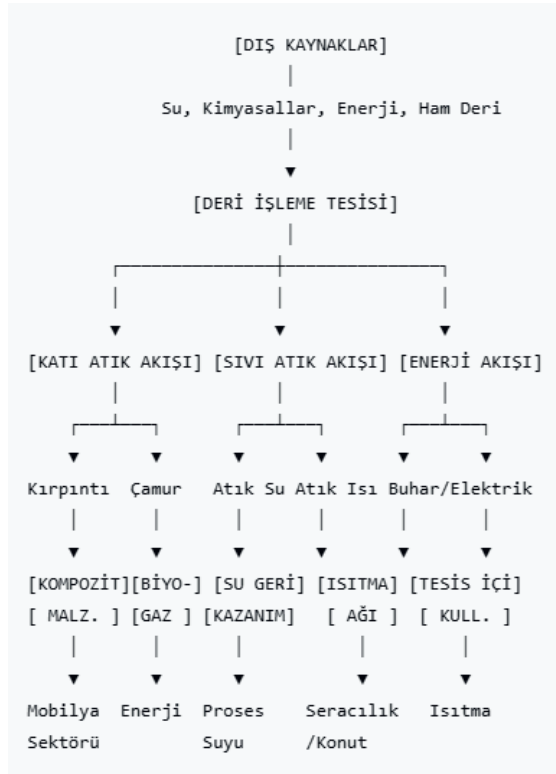
Aşama 1: Bölgesel Analiz ve Kapsamlı Akış Haritalaması Bu ilk adım, tüm tasarımın temel verisini oluşturur. Geleneksel atık envanterlerinin ötesine geçerek, **malzeme akış analizi (MAA)** prensiplerine dayanmalıdır.

- **Nitel ve Nicel Veri Toplama:** Her bir işletmede, tüm girdi (su, kimyasallar, enerji, ham deri) ve çıktı (ürün, katı/sıvı/tehlikeli atık, atık ısı, emisyon) akışları haritalanır. Deri sektörü için bu, sadece miktarların değil, **krom konsantrasyonu, tuz içeriği, organik yük ve atık su sıcaklığı** gibi kritik kalite parametrelerinin de kaydedilmesini gerektirir (World Bank, 1998).
- **Coğrafi ve Zamansal Boyut:** Akışların kaynak ve varış noktaları coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile işaretlenir. Ayrıca, üretim programlarına bağlı olarak akışlardaki **mevsimsel veya günlük değişkenlikler** de belirlenir. Bu veriler, lojistik maliyet modellemesi ve depolama ihtiyacı analizi için hayati öneme sahiptir.

Aşama 2: Çok Paydaşlı Katılım ve Yönetişim Yapısının Kurulması ES, teknolojiye önce bir ilişkiler ağıdır. Başarı, bir “**aracı kurum**” (facilitator) liderliğindeki güvene dayalı işbirliğine bağlıdır.

- **Paydaş Genişliği:** Sürece, deri üreticilerinin yanı sıra, potansiyel alıcı firmalar (inşaat, plastik, enerji, tarım), **yerelyönetimler, üniversiteler** (Ar-Ge ve analiz), **çevre teknolojisi firmaları** ve **finans kuruluşları** dahil edilmelidir (Korhonen, Nuur, Feldmann & Birkie, 2018).
- **Ortak Vizyon ve Çıkar Alignmanı:** Bir araya getirilen paydaşlar, ortak sürdürülebilirlik ve rekabetçilik hedefleri etrafında bir vizyon oluşturmalıdır. Bu, bireysel çıkarların ötesinde, kolektif değer yaratma ve risk paylaşımı anlayışını gerektirir.

Aşama 3: Sinerji Tanımlama ve Kavramsal Akış Şemalarının Geliştirilmesi Toplanan veriler, potansiyel sinerjileri (fiziksel değişim fırsatları) belirlemek için analiz edilir. Bu aşamanın çıktısı, aşağıdaki şekilde örneklendirildiği gibi bir **malzeme ve enerji akış şemasıdır**. Bu şema, karmaşık ilişkileri basitleştirerek iletişim, planlama ve karar alma için güçlü bir görsel araç görevi görür.



Şekil 1. Örnek Bir Deri İşleme Tesisi Merkezli Endüstriyel Simbiyoz Ağı (Bu şema, teorik bir model olup, tüm potansiyel akışları göstermektedir. Gerçek bir uygulama, mevcut koşullara göre bu akışlardan bir kısmını içerecektir.)

Şema Açıklaması ve Senaryo Entegrasyonu:

1. **Katı Atık Akışı (Kırpıntılar):** Deri kırpıntıları, öğütülerek kompozit malzeme üreticilerine gönderilir (Senaryo 3.1.1). Bu, bir yan ürün değişimidir.

2. **Katı Atık Akışı (Aritma Çamuru):** Organik çamur, bir biyogaz tesisinde ko-digestiyona tabi tutularak enerjiye dönüştürülür (Senaryo 3.1.2). Krom içeren çamur ise öncelikle krom geri kazanım ünitesine yönlendirilir (Senaryo 3.3).

3. **Sıvı Atık Akışı (Atık Su):** Atık su, merkezi bir ileri arıtma tesisinde (MBR+RO) işlenir. Geri kazanılan yüksek kaliteli su, deri işleme proseslerine geri beslenir (Senaryo 3.2.2). Konsantre tuzlu akış, ayrıca işlenir veya bertaraf edilir.

4. **Enerji Akışı (Atık Isı):** Proseslerden çıkan sıcak atık su, bir ısı değiştirici veya ısı pompası ile enerji geri kazanım ünitesine yönlendirilir. Kazanılan ısı, tesis içinde kullanılır veya bir bölgesel ısı ağı ile komşu bir sera işletmesine satılır (Senaryo 3.2.1).

Aşama 4: Pilot Uygulamalar ve Fizibilite Testi Tüm ağın aynı anda kurulması risklidir. En umut verici sinerjilerden biri (örn., deri tozunun kompozit üretiminde kullanımı), küçük ölçekli bir **pilot proje** olarak başlatılmalıdır. Pilotlar, teknik performansı doğrulamanın, gerçek maliyet verileri toplamanın, operasyonel sorunları çözmenin ve paydaşlar arasındaki işbirliği dinamiklerini test etmenin en güvenli yoludur (Jacobsen, 2006).

Aşama 5: Ölçeklendirme, Standartlaştırma ve Kurumsallaşma Pilot proje başarısını kanıtladıktan sonra, sinerji tüm paydaşlara yaygınlaştırılır. Bu aşamada, başarının sürdürülebilir kılınması için yapısal düzenlemelere odaklanılır:

- **Standartlar ve Sözleşmeler:** Yan ürünler için teknik spesifikasyonlar, kalite kontrol protokolleri (Leather Working Group ilkeleri ile uyumlu) ve uzun vadeli tedarik sözleşmeleri hazırlanır.
- **Ortak Altyapı ve Lojistik:** Paylaşılan toplama sistemleri, boru hatları veya depolama tesisleri gibi fiziksel yatırımlar yapılır.
- **Veri Paylaşım ve İzleme Platformu:** Akış verilerinin, çevresel performansın ve ekonomik faydaların şeffaf bir şekilde paylaşıldığı dijital bir platform, ağın sağlıklı işleyişini ve sürekli iyileştirilmesini sağlar.

2. Kritik Yönetişim Unsurları ve Risk Yönetimi

Ağ tasarımı teknik fizibilitenin yanı sıra aşağıdaki yönetim konuları hayati önem taşır:

- **Lojistik ve Altyapı:** Coğrafi yakınlık, Chertow'un (2000) vurguladığı gibi, ES'nin temel belirleyicilerindendir. Taşıma maliyetleri, sinerjinin ekonomik ömrünü belirler.
- **Sözleşme Tipleri:** İlişkiler, basit satış sözleşmelerinden, performans garantili "hizmet olarak ürün" sözleşmelerine kadar çeşitlilik gösterebilir. Avrupa Birliği'nin teşvik ettiği döngüsel iş modelleri bu tür sözleşmeleri destekler (European Commission, 2015).
- **Risk Paylaşımı:** Tedarik kesintisi, kalite değişkenliği veya regülasyon değişikliği gibi riskler, sözleşmelerde açıkça tanımlanmalı ve adil bir şekilde paylaşılmalıdır. Bu, uzun vadeli güvenin temelidir.

Sistemik Bir Dönüşüm Olarak Simbiyoz Ağı Tasarımı Bu beş aşamalı metodoloji, endüstriyel simbiyozun organik bir oluşum olmaktan ziyade, **yönetilebilir ve planlanabilir bir sistemik dönüşüm süreci** olduğunu göstermektedir. Geliştirilen akış şeması, bir deri işleme tesisinin, atıklarını çevresel bir maliyet olmaktan çıkarıp, bölgesel ekonomi için değerli girdilere dönüştüren bir "döngüsel aktivite merkezi" haline nasıl gelebileceğini

resmetmektedir. Bu tasarım, sadece çevresel hedefleri (kaynak verimliliği, atık ve karbon azaltımı) değil, aynı zamanda ekonomik (maliyet tasarrufu, yeni gelir, rekabetçilik) ve sosyal (istihdam, toplumsal kabul) sürdürülebilirlik boyutlarını da bir arada gerçekleştirmeyi mümkün kılar (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016). Nihai hedef, deri sektörünü, doğrusal bir modelden, dayanıklı, yenilikçi ve ekosistemle uyumlu bir endüstriyel simbiyoz ağının parçası olduğu döngüsel bir modele evriltmektir.

BÖLÜM 4. POLİTİKA ÖNERİLERİ VE UYGULAMA İLKELERİ

4.1. Mevcut Atık Yönetimi Politikalarının Değerlendirilmesi: Endüstriyel Simbiyoz İçin Bir Engel mi, Kaldıraç mı?

Türkiye’deki atık yönetimi politikaları, son yıllarda “sıfır kirlilik” ve “yeşil dönüşüm” hedefleri doğrultusunda önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Ancak, bu politikaların geleneksel “bertaraf odaklı” yapısı ile endüstriyel simbiyozun (ES) gerektirdiği “kaynak odaklı” sistemik yaklaşım arasında önemli bir uyumsuzluk bulunmaktadır. Bu bölüm, mevcut politika çerçevesini, ES’nin gelişimini teşvik eden ve engelleyen unsurlar açısından, aşağıdaki dört temel boyutta analiz etmektedir.

Tablo 1: Mevcut Politika Çerçevesinin Endüstriyel Simbiyoz Açısından Analizi

Politika Boyutu	Mevcut Durum ve Teşvik Edici Unsurlar	Tespit Edilen Engeller ve Uyumsuzluklar
1. Atık Tanımı ve Hukuki Statü	Çevre Yönetimi Bilgi Sistemi (ÇYS) ile atık hareketlerinin dijital takibi sağlanmıştır. Sıfır Atık Yönetmeliği, kaynakta azaltımı zorunlu kılar.	“Atık” ve “yan ürün” ayrımı net değildir. Atık statüsündeki bir malzemenin takası, karmaşık idari ve hukuki sorumluluklara yol açar, firmaları risk almaktan alıkoymaz.
2. Ekonomik Teşvik ve Maliyet Dengesi	Düzenli depolama ücretleri ve emisyon sınır değerleri, doğrusal üretimi maliyetli hale getirerek alternatif arayışını tetikler. MET Tebliğleri ile enerji/atık performansı düşük tesisler rekabet dezavantajı yaşayacaktır.	ES projeleri için özel hibe, vergi indirim veya düşük faizli kredi gibi doğrudan teşvik mekanizmaları yetersizdir. Bertaraf maliyetleri hala düşük olabilir, geri kazanım yatırımlarını ekonomik açmazıp kılmaz.
3. İzin, Lisans ve İdari Süreçler	Entegre Çevre İzni (EÇİ), tek bir izinle tesisin çevresel performansını değerlendirir. Sanayide Yeşil Dönüşüm (SYD) Belgesi, performansı A-F arası derecelendirerek şeffaflığı artırır.	Bir atığın “yan ürün” statüsü kazanarak ticarete konu olması uzun ve belirsiz bir idari onay süreci gerektirebilir. Farklı bölgelerdeki farklı idari yorumlar, standart bir ES modelinin oluşmasını engeller.
4. Performans Hedefleri ve Ölçüm	MET Tebliğleri, su/enerji verimliliği, atık oluşumu ve karbon ayak izi gibi ölçülebilir performans göstergelerini zorunlu kılar. Sıfır Atık hedefleri, geri kazanım oranlarını artırmaya yöneliktir.	Hedefler çoğunlukla bireysel tesis seviyesinde tanımlanmıştır. Bölgesel kaynak verimliliği, atık azaltımı veya karbon nötrlüğü gibi bir ES ağının kolektif performansını ölçen ve ödüllendiren ulusal/bölgesel hedefler eksiktir.

1. Atık Tanımları ve Sınıflandırmaları: “Atık” Paradigmasının Aşılması
Mevcut mevzuatın temelini, bir malzemenin “atık” olarak tanımlanması ve bu andan itibaren katı bir kontrol ve izleme rejimine tabi tutulması oluşturur. Örneğin, **Çevre Yönetimi Bilgi Sistemi (ÇYS)**, atık hareketlerinin elektronik ortamda takibini sağlayarak şeffaflığı artırmıştır. Ancak, bu sistem bir “atık” için tasarlanmıştır. Bir deri kırpıntısının komşu bir kompozit malzeme üreticisine “ikincil hammadde” olarak satılabilmesi için, üreticinin bunun “atık” değil, üretim prosesinin doğal bir çıktısı (“yan ürün”) olduğunu hukuki olarak ispatlaması gerekir. Bu belirsiz ve muğlak süreç, firmalar arasında, özellikle de “kirlenen öder” ilkesi ve uzun vadeli çevresel sorumluluk endişeleri nedeniyle, caydırıcı bir etki yaratmaktadır. Avrupa örneklerinde de görüldüğü gibi, düzenleyici çerçevenin bu tür sinerjileri “atık işleme” yerine “kaynak kullanımı” olarak görmemesi, ES’nin önündeki en büyük engellerden biridir.

2. Ekonomik Teşvikler ve Piyasa Sinyalleri: Maliyet Dengesinin Kurulması
Politikalar, ES’yi dolaylı olarak teşvik eden bazı ekonomik sinyaller üretmektedir. Örneğin, artan **düzenli depolama ücretleri** ve **emisyon sınır değerleri (ESD)**, geleneksel atık bertarafını maliyetli hale getirerek alternatif arayışını hızlandırır. Yakın zamanda yürürlüğe giren **Mevcut En İyi Teknikler (MET) Tebliğleri** ise daha ileri bir adımı temsil etmektedir. Bu tebliğler, tesislerin enerji verimliliği, su tüketimi, atık oluşumu ve emisyonlarını kapsamlı bir şekilde değerlendirerek bir **Sanayide Yeşil Dönüşüm (SYD) Belgesi** ve performans puanı (A’dan F’ye) verir. Düşük puan alan (örneğin, D, E, F) tesisler, zaman içinde piyasa erişimi, finansman olanakları ve itibar açısından dezavantajlı konuma düşebilecektir. Bu durum, firmaları kaynak verimliliğini artıracak ES projelerine yatırım yapmaya zorlayan güçlü bir piyasa sinyali oluşturma potansiyeli taşır. Ancak, bu dolaylı baskılar yeterli değildir. ES projelerinin yüksek başlangıç yatırım maliyetleri (CAPEX) ve teknolojik riskleri göz önüne alındığında, doğrudan **yatırım hibeleri, vergi indirimleri, yeşil fonlar veya kamu alımlarında öncelik** gibi aktif teşvik mekanizmalarının eksikliği, birçok potansiyel projenin hayata geçmesini engellemektedir.

3. Lisans ve İzin Süreçleri: Bürokratik Esneklik İhtiyacı
Mevcut sistemde, bir tesisin faaliyeti **Entegre Çevre İzni (EÇİ)** gibi kapsamlı bir izne bağlıdır ve bu izin, önceden beyan edilen atık türleri ve miktarları üzerinden verilir. Bir firma, planlanmayan bir yan ürün değişimi yapmak istediğinde, bu izin şartlarını değiştirmek için yeni bir başvuru ve değerlendirme sürecine girmek zorunda kalabilir. Bu süreç zaman alıcı, belirsiz ve maliyetlidir. Oysa ES’nin doğasında, piyasa fırsatlarına ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak **dinamiklik ve esneklik** vardır. Başarılı uluslararası örneklerde (örneğin, Danimarka’nın Kalundborg bölgesi), düzenleyicilerin firmalarla yakın işbirliği içinde çalışarak kuralları uygulanabilir kıldığı ve engelleri esnek bir şekilde yorumladığı görülmüştür. Türkiye’deki SYD

Belgesi'nin performans odaklı yapısı, süreçten ziyade sonuca odaklanarak bu esnekliğe kapı aralayabilir, ancak bu potansiyelin uygulamada nasıl işleyeceği henüz net değildir.

4. Performans Hedefleri ve Ölçüm: Bireyselden Kolektife Geçiş Türkiye'nin mevcut politikaları, performans hedeflerini açıkça ortaya koymaktadır. **Sıfır Atık Yönetmeliği** geri kazanım oranlarını, **MET Tebliği** ise enerji ve su verimliliği, karbon ayak izi gibi onlarca spesifik göstergiyi zorunlu kılmaktadır. Bu, olumlu ve gerekli bir gelişmedir. Ancak, bu hedefler ve ölçümler neredeyse tamamen **tek bir tesisin sınırları içinde** tanımlanmıştır. Oysa ES'nin sağladığı faydalar (karbon azaltımı, su tasarrufu, atığın önlenmesi) bölgesel ve kolektif düzeyde gerçekleşir. Örneğin, bir deri fabrikasının atık ısısını bir seraya vererek sağladığı fosil yakıt tasarrufunun, veya bir atığını komşu fabrikaya göndererek önlediği karbon emisyonunun, mevcut hedef ve raporlama sistemlerinde karşılığı yoktur. Bu nedenle, **Organize Sanayi Bölgesi (OSB) veya bölge bazlı kaynak verimliliği ve döşürülmüş karbon hedefleri** gibi yeni hedef kümelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

İleriye Dönük Politika İhtiyaçları Mevcut politika çerçevesi, ES'nin önünü açmak için gerekli altyapıyı (ölçüm, izleme, performans değerlendirme) büyük ölçüde sağlamıştır. Ancak, “kontrol ve ceza” odaklı geleneksel zihniyetten, “kolaylaştırma ve ödüllendirme” odaklı yeni bir modele geçiş gerekmektedir. Bu geçiş için şu adımlar kritik öneme sahiptir:

1. Net “Yan Ürün” Tanımı ve Hızlı Statü Değişim Prosedürleri: Atıktan yan ürüne geçişi standartlaştıran, hızlı ve öngörülebilir bir idari yol haritası oluşturulmalıdır.

2. ES'ye Özgü Finansman ve Teşvik Paketleri: Özellikle KOBİ'leri hedef alan, ES projelerine yönelik hibe, risk paylaşımı ve yeşil kredi mekanizmaları geliştirilmelidir.

3. Bölgesel/Kolektif Performans Hedefleri: OSB'ler veya endüstriyel havzalar için su-enerji-atık döngüsellik katsayıları ve karbon nötrlük hedefleri belirlenmeli, bu hedeflere ulaşan kolektif yapılar ödüllendirilmelidir.

4. Teknolojik ve Bilgi Destek Mekanizmaları: Üniversiteler ve teknoparklar aracılığıyla, özellikle deri sektörü gibi spesifik alanlarda atık karakterizasyonu, uygun teknoloji seçimi ve fizibilite çalışmaları için destek sağlanmalıdır.

Bu politika dönüşümü sağlandığında, mevcut düzenlemeler bir engel olmaktan çıkıp, Türkiye sanayisini döngüsel ekonomiye taşıyacak güçlü bir kaldıraç haline gelebilir.

4.2. Endüstriyel Simbiyoz Uygulamaları için Destek Mekanizmaları

Endüstriyel simbiyozun (ES) yaygınlaşması, tek başına piyasa dinamiklerine veya bireysel firmaların inisiyatifine bırakılamayacak kadar önemli kamusal faydalar taşır. Bu nedenle, ES'nin önündeki teknik, ekonomik ve düzenleyici engelleri aşmak için çok katmanlı ve birbirini tamamlayıcı destek mekanizmalarının oluşturulması esastır. Bu mekanizmalar, ES'yi bir “iyi niyetli girişim” olmaktan çıkarıp, “stratejik bir yatırım ve rekabet aracına” dönüştürmeyi hedefler. Aşağıda, bu mekanizmalar beş temel ekseninde detaylandırılmakta ve deri sektörüne özgü uygulama önerileri sunulmaktadır.

1. Mali Teşvikler ve Finansal Araçlar: Yatırımın Önünü Açmak

ES projelerinin yüksek başlangıç yatırım maliyeti (CAPEX) ve algılanan riski, özellikle KOBİ'ler için en büyük engeldir. Bu engeli aşmak için, geleneksel atık bertarafına kıyasla ES'yi ekonomik açıdan daha cazip hale getirecek bir maliyet yapısı oluşturulmalıdır (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

- **Hedefli Yatırım Destekleri ve Hibeler:** Deri sektörü gibi spesifik endüstrilere yönelik, ES projeleri için ayrılmış “**Döngüsel Ekonomi ve Simbiyoz Hibe Programları**” oluşturulmalıdır. Bu hibeler, özellikle atık ısı geri kazanım ekipmanları, su geri kazanım membran sistemleri veya krom geri kazanım tesisleri gibi altyapı yatırımlarının finansmanında kullanılabilir. Bu tür destekler, Avrupa Birliği'nin **Yeşil Mutabakat ve Döngüsel Ekonomi Eylem Planı** kapsamında sağlanan fonlarla benzer şekilde yapılandırılabilir (European Commission, 2015).
- **Yeşil Krediler ve Risk Paylaşım Mekanizmaları:** Ticari bankalar ve kalkınma ajansları, düşük faizli “**yeşil kredi**” hatları oluşturmalıdır. ES projelerinin kredi değerliliğini artırmak için, **kredi garantisi fonları** veya **ilk kayıp dilimini üstlenen** kamu destekli mekanizmalar devreye alınmalıdır.
- **Vergi Teşvikleri ve “Kırleten Öder” İlkesinin Etkin Uygulanması:** ES yatırımlarında **Katma Değer Vergisi (KDV) indirimi** veya **kurumlar vergisi muafiyeti** sağlanmalıdır. Aynı zamanda, geleneksel düzenli depolama ve yakma gibi doğrusal bertaraf yöntemlerinin maliyeti, **artan oranlı atık bertaraf vergileri** ile artırılarak, geri kazanımın göreceli ekonomik avantajı güçlendirilmelidir.
- **Ticaret Edilebilir Sertifikalar:** Su tasarrufu, karbon azaltımı veya atık önleme gibi ES'nin sağladığı çevresel faydaları ölçen ve ticaretine olanak tanıyan bir “**Endüstriyel Simbiyoz Sertifikası**” sistemi geliştirilebilir. Bu sertifikalar, piyasada satılarak projelere ek bir gelir kaynağı yaratabilir.

2. Bilgi ve Veri Altyapısı: Şeffaflık ve Eşleştirme

ES'nin temeli, firmalar arasında güvene dayalı bilgi paylaşımıdır. Bu paylaşımı kolaylaştırmak ve sistematik hale getirmek için dijital altyapılar kritiktir.

- **Bölgesel Atık/ Yan Ürün Veri Bankası:** Organize Sanayi Bölgeleri (OSB) veya belirli sanayi havzaları (örneğin, Çorlu Deri Sanayi Bölgesi) için bir dijital platform kurulmalıdır. Bu platformda, firmalar (isim belirtmeden) atık/yan ürün türünü (örn., kromsuz deri tozu, 35°C atık su, organik çamur), miktarını, kimyasal kompozisyonunu ve lokasyonunu girebilmeli; potansiyel alıcı firmalar da ihtiyaç duydukları hammaddeleri arayabilmelidir. Bu, bir “**simbiyoz eşleştirme (matchmaking)**” hizmeti sunar.
- **Başarı Hikayeleri ve Tekno-Ekonomik Veri Tabanı:** Farklı sektörlerde (özellikle deri, tekstil, kimya, inşaat) uygulanmış başarılı ES projelerinin detaylı vaka çalışmaları, yatırım maliyetleri, işletme giderleri ve geri ödeme süreleri ile birlikte kamuoyuna açık bir şekilde paylaşılmalıdır. Bu, diğer firmalar için somut bir yol haritası ve güven aracı olacaktır.

3. Teknik Destek ve Kapasite Geliştirme: Bilgiyi Eyleme Dönüştürmek

Firmalar, özellikle KOBİ'ler, atık karakterizasyonu, teknoloji seçimi ve proje geliştirme konularında teknik bilgi eksikliği yaşayabilir.

- **Sektörel Pilot Tesisler ve Canlı Laboratuvarlar:** Deri sektörüne yönelik, **krom geri kazanım, deri kırpıntılarının kompozit malzemeye dönüştürülmesi** veya **ileri membran teknolojileri ile su geri kazanımı** gibi konularda pilot tesisler kurulmalıdır. Bu tesisler, üniversite-sanayi işbirliği ile yönetilmeli, firmaların teknolojileri yerinde görmesine, test etmesine ve personel eğitmesine olanak tanımalıdır.
- **Ar-Ge ve Teknoloji Transferi Programları:** ES'ye yönelik yenilikçi çözümler geliştiren projelere (örn., krom içeren çamurun yeni stabilizasyon yöntemleri, düşük enerjili buharlaştırma teknolojileri) öncelikli Ar-Ge desteği verilmelidir. Ayrıca, uluslararası iyi uygulamaların (örn., Kalundborg'daki atık ısı ağları) yerel koşullara adapte edilmesini sağlayacak **teknoloji transferi programları** hayata geçirilmelidir.

Tablo 1: Destek Mekanizmaları ve Deri Sektörüne Yönelik Somut Uygulama Örnekleri

Destek Mekanizması	Somut Uygulama/Araç Önerisi	Deri Sektöründeki Potansiyel Faydası
Mali Teşvikler	“Deri Sektöründe Döngüsel Dönüşüm Fonu”: Krom geri kazanım ve su geri kazanım tesislerine %40 hibe desteği.	Atık bertaraf maliyetinde keskin düşüş, değerli kromun korunumu, su maliyetlerinin azalması.
Bilgi Altyapısı	“Çorlu OSB Dijital Simbiyoz Platformu”: Deri atık akışları ile çevredeki inşaat, plastik ve seracılık sektörü ihtiyaçlarının eşleştirildiği online portal.	Atık kırıntı ve çamur için yeni pazar fırsatlarının keşfi, atık ısının değerlendirilmesi.
Teknik Destek	“Deri Atıkları İleri Değerlendirme Pilot Tesisi”: Bir OSB içinde, firmaların atıklarını test edebileceği kompozit üretim ve biyogaz test üniteleri.	Firmaların yatırım riskini düşürmeden teknolojiyi deneyimlemesi, özgüven artışı.
Hukuki Çerçeve	“Yan Ürün Beyanı Hızlı Onay Prosedürü”: Standart kriterleri karşılayan atıklar için 30 günlük statü değişikliği süreci.	Atık ticareti önündeki belirsizlik ve idari yükün kaldırılması.
Eğitim	“Deri Sektörü Sürdürülebilirlik Uzmanlık Sertifika Programı”: Üniversite işbirliği ile proses mühendislerine ve çevre görevlilerine yönelik program.	Sektörde ES konusunda nitelikli insan kaynağının yetiştirilmesi, içselleştirilmiş bilgi birikimi.

4. Hukuki Çerçeve Geliştirme: Belirsizlikleri Ortadan Kaldırmak

Net, öngörülebilir ve teşvik edici bir hukuki zemin olmadan, mali ve teknik destekler etkisiz kalır (Korhonen, Nuur, Feldmann & Birkie, 2018).

- **Net “Yan Ürün” ve “Son Ürün” Tanımları:** Mevzuatta, bir malzemenin “atık” statüsünden çıkıp “yan ürün” veya “ikincil hammadde” sayılabilmesi için **kesin, ölçülebilir ve nesnel kriterler** (örneğin, maksimum krom konsantrasyonu, spesifik kontaminant limitleri) getirilmelidir. Bu, Chertow’un (2000) vurguladığı temel engellerden birini ortadan kaldıracaktır.
- **Paylaşımlı ve Sınırlı Sorumluluk Modeli:** Bir firmanın, yasal kriterleri karşılayan bir yan ürünü başka bir firmaya sattıktan sonra, alıcı firmanın bu malzemeyi yanlış kullanımından kaynaklanan çevresel zarardan **otomatik ve süresiz olarak sorumlu tutulması** engellenmelidir. Bunun yerine, **sorumluluğun kademeli ve sınırlı olduğu**, malzemenin takip edilebilirliğine dayalı bir model benimsenmelidir.
- **Standart Sözleşme Modelleri:** Yan ürün satışı, atık ısı kullanımı veya ortak altyapı paylaşımı gibi tipik ES ilişkileri için hazır **standart sözleşme şablonları** hazırlanmalıdır. Bu şablonlar, kalite spesifikasyonları, teslimat koşulları, fiyatlandırma mekanizmaları ve anlaşmazlık çözüm yollarını içermelidir.

5. Eğitim, Farkındalık ve Kapasite Geliştirme: Kültürel Dönüşüm

ES, sadece bir mühendislik değil, aynı zamanda bir yönetim ve iletişim becerisidir.

- **Üst Düzey Yönetim Farkındalık Programları:** CEO ve genel müdür düzeyindeki yöneticilere, ES'nin finansal (maliyet tasarrufu, yeni gelir), stratejik (rekabet avantajı, itibar) ve risk yönetimi (mevzuata uyum, tedarik zinciri dayanıklılığı) açısından faydalarını anlatan kısa, etkili programlar sunulmalıdır.
- **Teknik Personel ve “Simbiyoz Sorumlusu” Eğitimleri:** Proses mühendisleri, çevre mühendisleri ve satın alma uzmanlarına yönelik, atık karakterizasyonu, ES fırsat analizi, fizibilite çalışması hazırlama ve paydaş ilişkileri yönetimi konularında eğitimler verilmelidir. Büyük OSB’lerde, ES süreçlerini koordine edecek tam zamanlı “Simbiyoz Sorumluları” istihdam edilmesi teşvik edilmelidir.
- **Başarı Hikayelerinin Yaygınlaştırılması:** Yerel ve ulusal medya aracılığıyla, ES ile hem çevresel hem de ekonomik başarı elde etmiş firmaların hikayeleri sürekli olarak paylaşılmalı, bu sayede sektörde bir “biz de yapabiliriz” güveni ve rekabeti oluşturulmalıdır.

Bu beş destek mekanizması birbirini besleyen bir bütün olarak tasarlanmalıdır. Net bir hukuki çerçeve ve teknik bilgi olmadan mali teşvikler verimsiz kalır; eğitim ve farkındalık olmadan da mevcut altyapı ve teşviklerden yeterince yararlanılamaz. Bu kapsamlı destek ekosistemi, deri sektörünü ve diğer kaynak yoğun sektörleri, doğrusal bir modelden, dayanıklı, yenilikçi ve sürdürülebilir bir endüstriyel simbiyoz ağının parçası olduğu döngüsel bir modele geçişte güçlü bir şekilde destekleyecektir (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016).

Sonuç ve Değerlendirme: Döngüsel Bir Geleceğe Geçiş İçin Stratejik Bir Yol Haritası

Bu çalışma, endüstriyel simbiyoz (ES) ve döngüsel ekonomi (DE) ilkelerinin, geleneksel olarak kaynak yoğun ve çevresel etkileri yüksek olan deri sektörüne nasıl uygulanabileceğini sistematik bir şekilde ortaya koymayı amaçlamıştır. İncelenen kavramsal çerçeve, teknik senaryolar ve politika önerileri, sektörün doğrusal “al-yap-at” modelinden, restoratif ve rejeneratif bir sisteme geçişinin yalnızca mümkün değil, aynı zamanda ekonomik ve stratejik bir zorunluluk olduğunu göstermektedir. Endüstriyel simbiyoz, bu geçişin operasyonel motoru olarak, soyut döngüsellik hedeflerini somut, uygulanabilir ve karlı işbirliklerine dönüştürmenin yolunu sunar (Chertow, 2000; Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Ana Bulguların Sentezi ve Katkıları

Çalışmanın temel katkısı, deri sektörünün karmaşık atık profilini (katı, sıvı, tehlikeli) kapsamlı bir şekilde haritalayarak, her bir akış için ES prensiplerine dayalı spesifik değerlendirme senaryoları geliştirmesidir. Analizler göstermiştir ki:

Katı Atıklar, kompozit malzeme üretimi veya kontrollü enerji geri kazanımı yoluyla yüksek katma değerli kaynaklara dönüştürülebilir. Bu, düzenli depolama alanlarındaki baskıyı azaltırken, inşaat ve plastik gibi sektörler için alternatif hammadde kaynakları yaratır.

Sıvı Atıklar ve Atık Isı, ileri arıtma teknolojileri (MBR, RO) ve ısı geri kazanım sistemleri ile kapalı devrelere entegre edilebilir. Bu uygulama, sektörün kronik sorunları olan su stresi ve yüksek enerji maliyetlerine doğrudan çözüm getirmekte, aynı zamanda sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde düşürme potansiyeli taşımaktadır.

Tehlikeli Atıkların (başta krom) yönetiminde, geleneksel bertaraf yaklaşımından, kaynakta önleme, verimli kullanım ve ileri geri kazanım teknolojilerini içeren entegre bir risk yönetimi stratejisine geçişin zorunluluğu ortaya konmuştur. Kromun kapalı döngüde yönetimi, çevresel riski minimize ederken, stratejik bir hammaddeyi korumanın ekonomisini de beraberinde getirir.

Bu teknik senaryolar, Kalundborg gibi olgun simbiyoz ağlarının, çevresel faydaların yanı sıra sağlam ekonomik kazanımlar da üretebildiğini kanıtlayan literatürle tutarlıdır (Jacobsen, 2006). Ancak, bu çalışma, mevcut politikaların çoğunlukla bu tür sinerjileri doğrudan teşvik etmekten ziyade, düzenleyici bariyerler oluşturabileceğini tespit etmiştir. Atık statüsündeki belirsizlikler, karmaşık idari süreçler ve ES'ye özgü finansman araçlarının eksikliği, potansiyelin hayata geçirilmesinin önündeki temel engeller olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, başarılı bir dönüşüm için teknolojik çözümler kadar, destekleyici politika çerçeveleri ve paydaş işbirliklerine dayalı yeni yönetim modelleri de kritik önem taşımaktadır (Korhonen et al., 2018).

Gelecek Araştırma ve Uygulama Yönelimleri

Bu çalışma, bir başlangıç çerçevesi sunmakla birlikte, deri sektöründe ES'nin yaygınlaşması için aşağıdaki alanlarda ileri araştırma ve somut adımlara ihtiyaç bulunmaktadır:

Nicel Yaşam Döngüsü Değerlendirmeleri (YDD): Önerilen her bir senaryonun (örn., deri tozundan kompozit üretimi, atık ısı geri kazanımı) net çevresel ve ekonomik faydalarını karşılaştırmalı olarak ölçmek için

detaylı YDD çalışmaları yapılmalıdır. Bu, yatırım kararları ve politika önceliklendirmesi için hayati veri sağlayacaktır.

Dijital Platformlar ve Veri Standardizasyonu: Farklı deri işletmelerinden ve potansiyel simbiyoz partnerlerinden gelen atık/yan ürün verilerinin güvenli ve standart bir formatta paylaşılabilceği bölgesel dijital “simbiyoz platformlarının” pilot uygulamaları geliştirilmelidir. Bu, eşleştirme maliyetlerini düşürecek ve güveni artıracaktır.

Sektörler-arası İş Modeli İnovasyonu: Yan ürün takasını kolaylaştırmak için, performansa dayalı sözleşmeler, kiralama modelleri veya ortak yatırım şirketleri gibi yenilikçi iş modelleri tasarlanmalı ve test edilmelidir. Bu modeller, riski paylaşmayı ve faydaları adil dağıtmayı merkeze almalıdır.

Kapasite Geliştirme ve Eğitim Programları: Sektördeki mühendisler, yöneticiler ve politika yapımcılar için ES prensipleri, atık karakterizasyonu, döngüsel iş modelleri ve proje finansmanı konularında özel eğitim programları oluşturulmalıdır.

Nihai Değerlendirme

Deri sektörü, küresel döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmada önemli bir odak noktasıdır. Bu çalışma, sektörün karşı karşıya olduğu çevresel zorlukların, sistematik bir ES yaklaşımı ile ekonomik fırsatlara ve rekabetçi avantaja dönüştürülebileceğini göstermiştir. Başarı, tek bir firmanın çabasıyla değil, üreticiler, teknoloji sağlayıcılar, politika yapımcılar, araştırmacılar ve finansörlerden oluşan bir ekosistemin ortak çalışmasıyla mümkün olacaktır. Bu kolektif eylem, deri sektörünü, sadece daha temiz ve verimli değil, aynı zamanda geleceğin döngüsel endüstrileri arasında lider konuma taşıyabilecek bir dönüşümü başlatma potansiyelini taşımaktadır. Nihayetinde, endüstriyel simbiyoz, sürdürülebilir kalkınmayı, teoriden pratiğe, bir yükten ortak bir değer yaratımına taşıyan güçlü bir katalizördür (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016).

KAYNAKÇA

- Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 313–337.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation.
- European Commission. (2015). *Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy*. COM(2015) 614 final.
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32.
- Jacobsen, N. B. (2006). Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: A quantitative assessment of economic and environmental aspects. *Journal of Industrial Ecology*, 10(1–2), 239–255. <https://doi.org/10.1162/108819806775545411>
- Korhonen, J., Nuur, C., Feldmann, A., & Birkie, S. E. (2018). Circular economy as an essentially contested concept. *Journal of Cleaner Production*, 175, 544–552. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.111>
- Leather Working Group. *Environmental audit protocol*. Leather Working Group. <https://www.leatherworkinggroup.com>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). *Global resources outlook 2019: Natural resources for the future we want*. UNEP.
- World Bank. (1998). *Pollution prevention and abatement handbook: Tanning hides and skins*. World Bank.



GÖRÜNMEYENİ YÖNETMEK: DERİ SANAYİİNDE SOSYAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİN ÖLÇÜMÜ VE GELECEK VİZYONU

“ ”

Fazlı AKYÜZ¹
Xashim BEGALİEV²

¹ Dr. Öğretim Üyesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Su ve Atık Yönetimi Teknikerliği, Büyükçekmece, İstanbul, Türkiye, Orcid ID: 0000-0001-5629-8764

² Assoc.Prof., Candidate of Technical Sciences, Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Tashkent, Republic of Uzbekistan

1. GİRİŞ

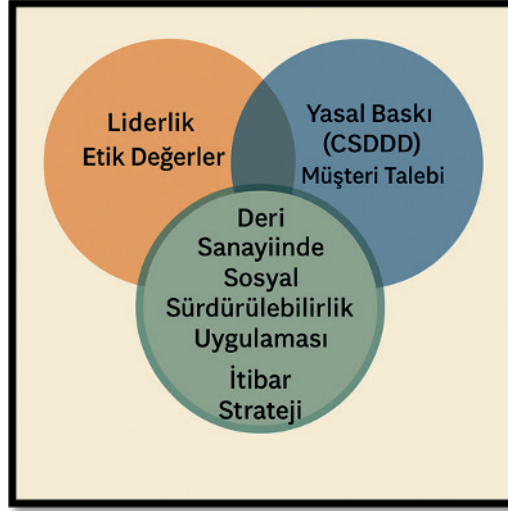
Sürdürülebilirlik kavramı, son kırk yılda küresel ölçekte hem akademik hem de politik söylemin merkezine yerleşmiştir. Başlangıçta doğal kaynakların tükenmesini önlemeye yönelik çevresel bir koruma refleksi ifade eden bu kavram, zamanla ekonomik, sosyal ve kültürel boyutları içeren çok katmanlı bir paradigma hâline dönüşmüştür. Brundtland Raporu'nun (WCED, 1987) “gelecek kuşakların kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini tehlikeye atmadan bugünün ihtiyaçlarını karşılamak” biçimindeki tanımı, bu paradigmanın en çok atıf yapılan ve hâlen geçerliliğini koruyan temel çerçevesidir. Bu tarihsel dönüm noktası, 1992 Rio Zirvesi ile küresel bir eylem planına dönüşmüş; enerji, sanayi ve kentleşme politikalarını etik bir süzgeçten geçiren çağdaş yaklaşımların temelini oluşturmuştur (Tiba & Bélaïd, 2020).

Sürdürülebilirliğin bu evrimsel yolculuğunda, odak noktası giderek “insani” boyuta kaymıştır. Bu bağlamda elinizdeki kitap bölümü, sürdürülebilirliğin genel evrimi içinde; özellikle deri sanayii özelinde sosyal sürdürülebilirliğin kavramsal temellerini, uygulama araçlarını ve sektörün karşılaştığı yapısal engelleri incelemeyi amaçlamaktadır. Çünkü deri sanayii, emek yoğun yapısı ve yüksek çevresel etkileriyle, sürdürülebilirliğin sosyal ve ekolojik boyutlarının en sert şekilde kesiştiği bir laboratuvar niteliğindedir. Artık sürdürülebilirlik; işçi hakları, sağlık ve güvenlik standartları, toplumsal refah ve etik tedarik zincirleri gibi temalar etrafında şekillenen; yalnızca çevreyi koruma sorunu değil, aynı zamanda insani ve etik bir sorumluluk alanıdır (Biancardi vd., 2023).

Günümüz küresel ekonomisinde işletmeleri bu sorumluluğu üstlenmeye iten nedenler, akademik yazında “itici güçler” (*drivers*) teorisiyle açıklanmaktadır. Literatürdeki bütüncül yaklaşımlar (Vargas-Merino vd., 2023), sürdürülebilirlik eylemlerini motive eden unsurları üç ana kategoride inceler: (i) İçsel itici güçler: Örgüt içindeki değerler, liderlik anlayışı ve etik sorumluluk bilinci. (ii) Dışsal itici güçler: Yasal düzenlemeler, toplumsal baskılar ve değişen piyasa beklentileri. (iii) Bağlantı kurucu faktörler: İç ve dış dinamikler arasında etkileşimi sağlayan itibar yönetimi ve stratejik konumlandırma mekanizmaları (Şekil 1.1).

Özellikle emek yoğun yapısı ve yüksek çevresel etkileriyle bilinen deri sanayii, bu üç faktörün kesişim noktasında yer almaktadır. Sektör; su kirliliği ve kimyasal kullanımı gibi kronikleşmiş çevresel sorunlarla anılmakla birlikte; işçi sağlığı, güvenli çalışma koşulları ve etik sorumluluklar gibi sosyal meselelerle de derin bir sınav vermektedir. Nitekim son yıllarda yapılan bibliyometrik analizler (Tyagi vd., 2022), deri sektöründe sürdürülebilirliğin sosyal boyutunun 2012 sonrasında belirgin bir ivme kazandığını; odağın “ekolojiden” “insan refahına” doğru genişlediğini doğrulamaktadır.

Avrupa Deri Sanayii'nin yayımladığı *Social and Environmental Report* (COTANCE, 2020), bu dönüşümün kurumsallaşmış halini somutlaştırmaktadır. Rapora göre; sosyal diyalog mekanizmaları, şeffaf çalışma standartları ve iş gücü refahı, artık sektörün “bağlantı kurucu faktörleri” olarak itibar yönetiminin merkezindedir. Bu bağlamda elinizdeki çalışma, sürdürülebilirliğin tarihsel ve kavramsal temellerinden hareketle; deri sanayinde sosyal sürdürülebilirliğin nasıl geliştiğini, hangi içsel ve dışsal faktörlerle şekillendiğini ve bütüncül bir yaklaşım içinde nasıl yeniden tanımlandığını tartışmayı amaçlamaktadır.



Şekil 1.1. Deri Sanayiinde Sürdürülebilirliği Tetikleyen Bütüncül İtici Güçler Mekanizması. (Chatgpt ile oluşturulmuştur)

2. DERİ SANAYİİNDE SOSYAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK: KAVRAMSAL TEMELLER, UYGULAMA ARAÇLARI VE YÖNETİŞİM DİNAMİKLERİ

Deri sanayiinin sürdürülebilirlik gündeminde, çevresel regülasyonlar ve ekonomik verimlilik arayışları genellikle başrolü oynarken; sosyal sürdürülebilirlik, sahnenin daha loş bir köşesinde kalmıştır. Oysa üretim bantlarının gürültüsü ve kimyasalların keskin kokusu arasında, sektörün asıl taşıyıcısı olan “insan” faktörü yatmaktadır. Bu çalışmanın bütünlüğü açısından, sosyal sürdürülebilirliğin kuramsal temellerini, sektörel uygulama alanlarını ve yönetim mekanizmalarının sosyal performans üzerindeki etkilerini incelemek, sadece akademik bir ilgi değil, vicdani bir sorumluluktur. Bu bölümde, kavramın teorik arka planından başlayarak; endüstriyel görünümü, bölgesel uygulama örnekleri, sertifikasyon sistemlerinin etkinliği ve karşılaşılan yapısal engeller analiz edilecek; deri sanayiinde sosyal sürdürülebilirliğin stratejik önemi bütüncül bir sentezle ortaya konacaktır.

2.1. Sosyal Sürdürülebilirliğin Kavramsal Temelleri

Sosyal sürdürülebilirlik, sürdürülebilirlik kuramının çevresel ve ekonomik bileşenleriyle birlikte üç temel sütunundan birini, belki de en karmaşık olanını oluşturur. Kavram; insan refahı, toplumsal eşitlik, güvenlik, çalışma koşulları ve topluluk dayanıklılığı gibi çok boyutlu ve ölçülmesi güç çıktılara odaklanır. Literatürün öncü çalışmaları (Dempsey vd., 2009; Spangenberg & Omann, 2006), bu bileşeni hem insan merkezli kalkınmanın normatif bir uzantısı hem de toplumsal sistemlerin kendi varlığını sürdürebilme kapasitesinin temeli olarak tanımlar.

Dempsey ve arkadaşları (2009), sosyal sürdürülebilirliği birbirini tamamlayan iki ana eksende sınıflandırır: İlki, **sosyal adalet (equity)** eksenidir; bu eksen kaynaklara adil erişimi, dışlanma ve ayrımcılığın reddini, fırsat eşitliğini ve gelir adaletsizliklerinin giderilmesini kapsar. İkincisi ise **topluluk sürdürülebilirliği** eksenidir; burada aidiyet duygusu, sosyal sermaye, güven ve dayanışma ağları ön plana çıkar. Bu ikili yapı, sosyal sürdürülebilirliği hem bir sonuç (refah, güvenlik, kapsayıcılık) hem de bir süreç (katılım, yönetim, dayanışma) haline getirir. Spangenberg ve Omann (2006) ise bu çerçeveye güçlü bir normatif derinlik katarak, sosyal sürdürülebilirliği yalnızca sosyal çıktılarla değil, aynı zamanda etik temelli karar alma süreçleriyle ilişkilendirir. Buna göre sosyal sürdürülebilirlik; toplumların kendi geleceğini adalet, eşitlik ve insan onuru temelinde yeniden inşa etme kapasitesidir.

Endüstriyel bağlamda, özellikle deri, tekstil ve ayakkabı gibi emek yoğun sektörlerde bu kavram; “adil çalışma koşulları”, “iş sağlığı ve güvenliği”, “ücret eşitliği” ve “insana yaraşır iş” (*decent work*) kavramlarıyla somutlaşır (Giménez & Tachizawa, 2012). Dolayısıyla, çalışma koşullarına son derece duyarlı olan deri sanayii için sosyal sürdürülebilirlik, yalnızca etik bir tercih değil, aynı zamanda sektörün kurumsal meşruiyetinin de temel belirleyicisidir.

2.2. Sosyal Sürdürülebilirliğin Üç Sütun İçindeki Konumu: Teoride Eşit, Pratikte Hiyerarşik

Sürdürülebilirlik, literatürde *People–Planet–Profit* (İnsan-Gezegen-Kâr) modeliyle üç eşit sütun üzerine kurulu bir tapınak gibi tasvir edilir. Ancak pratikte bu sütunlar eşit ağırlık taşımamakta; küresel ekonomik düzenin dışlıları, sosyal boyutu sistematik olarak ezmekte veya arka plana itmektedir (Epstein & Roy, 2003).

2.2.1. Ekonomik Öncelik ve “Business Case” Baskısı Kurumsal dünyada sürdürülebilirlik, genellikle ekonomik mantığın süzgecinden geçer. Friede, Busch ve Bassen’in (2015) 2200 çalışmayı inceleyen kapsamlı meta-analizi, Çevresel, Sosyal ve Yönetişim (ESG) yatırımlarının %90’ın üzerinde pozitif veya nötr finansal etki yarattığını göstermektedir. Ancak bu bulgu, acı bir gerçeği

de fısıldar: Sosyal boyut, ancak ekonomik getiriye desteklediği sürece sahnede görünür hale gelmekte; aksi halde “ikincil” bir teferruat olarak görülmektedir.

2.2.2. Çevresel Boyutun Yükselişi Karbon emisyonu, enerji kullanımı veya su tüketimi gibi çevresel göstergelerin sayılarla ifade edilebilir (nicel) doğası, çevresel sürdürülebilirliğin finansal modellerle daha kolay “konuşmasını” sağlar. Bu “ölçülebilirlik konforu”, stratejik karar alma süreçlerinde çevresel boyutun, sosyal boyuta göre çok daha baskın bir konum elde etmesine neden olmaktadır (Hallstedt vd., 2013).

2.2.3. Sosyal Boyutun Marjinalleşmesi Sosyal sürdürülebilirlik ise ne yazık ki tanımsal belirsizliği, standart metriklerin eksikliği ve etkisinin kısa vadede finansal tablolara yansımaması nedeniyle gölgede kalmaktadır (Schulte & Hallstedt, 2017). İnsan onuruna yapılan yatırımın geri dönüşü, bir arıtma tesisi yatırımının geri dönüşü kadar net hesaplanamadığında; sosyal girişimler stratejik çekirdekten uzaklaşıp, yalnızca “itibari” veya “yardımsal” bir faaliyet alanına hapsolmaktadır.

2.3. Deri Sanayiinde Sosyal Sürdürülebilirliğin Boyutları

Deri sanayiinde sosyal sürdürülebilirlik, soyut bir kavramdan öte, işçinin ciğerlerine dolan hava ve evine götürdüğü ekmektir. Sektördeki sosyal performans, temel olarak dört ana gösterge üzerinden şekillenir (Tablo 1):

Tablo 1. Sektördeki Sosyal Performans

Sosyal Boyut	Alt Göstergeler	Deri Sanayiindeki Kritik Riskler
İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG)	Kimyasal maruziyet, ergonomi, KKD kullanımı, eğitim	Krom VI maruziyeti, solunum riski, solvent buharları, havalandırma eksikliği
Adil Ücret ve Çalışma Koşulları	Ücret yeterliliği, çalışma saatleri, sendikal haklar	Düşük ücretler, zorunlu fazla mesai, kayıt dışı istihdam, örgütlenme engelleri
İzlenebilirlik ve Yönetişim	LWG, SA8000, veri kaydı, denetim	KOBİ’lerde yüksek uyum maliyetleri, tedarik zincirinde şeffaflık eksikliği
Toplumsal Etki	Yerel istihdam, topluluk sağlığı, paydaş katılımı	Atıksu deşarjının yerel halk üzerindeki etkileri, koku ve çevre-sağlık sorunları

Bu boyutlar arasında **İşçi Sağlığı ve Güvenliği**, sektörün en yaralı tarafıdır. Bangladeş ve Hindistan’da yapılan saha çalışmaları, deri işçilerinin %40–50’sinde solunum yolu rahatsızlıkları ve deri hastalıklarının kronikleştiğini ortaya koymaktadır. Krom VI ve solventlere maruziyet, yetersiz havalandırma ve Kişisel Koruyucu Donanım (KKD) eksikliği, üretimin insani

maliyetini artırmaktadır. Benzer şekilde, **Adil Ücret** sorunu, Türkiye, Hindistan ve Bangladeş gibi üretim üslerinde “düşük ücret–uzun çalışma saatleri” döngüsüyle işçileri yoksulluk sınırında tutmaktadır.

2.4. Sosyal Sürdürülebilirliğin Destekleyen Yönetişim Mekanizmaları ve Sertifikasyon Sistemlerinin Etkinliği

Deri sanayinde ve emek yoğun sektörlerde sosyal sürdürülebilirliğin yönetilmesi; SA8000, ISO 45001, Leather Working Group (LWG) ve Global Reporting Initiative (GRI) gibi mekanizmaların etkinliğine giderek daha fazla bağımlı hale gelmektedir. Bu bağlamda “etkinlik”; söz konusu sistemlerin sosyal göstergelerde somut iyileşme sağlama, hesap verebilirliği artırma ve paydaş güvenini inşa etme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Mevcut literatür, bu sistemlerin etkilerini üç ana ekseninde ortaya koymaktadır: Gösterge bazlı etkiler, bölgesel farklılıklar ve mevcut boşluklar.

2.4.1. Sertifikasyon Sistemlerinin Sosyal Etki Haritası Ampirik çalışmalar, farklı yönetim sistemlerinin belirli sosyal göstergeler üzerinde uzmanlaştığını ve ölçülebilir iyileşmeler sağladığını göstermektedir:

- SA8000 ve İşçi Hakları: Santos ve arkadaşları (2017), SA8000 sertifikasının çocuk işçiliği, çalışma saatleri ve güvenlik standartlarında belirgin iyileşmeler sağladığını belgelemektedir. Sertifikayı uygulayan firmalarda, uluslararası iş standartlarına uyumun arttığı ve çalışan muamelesinde pozitif bir dönüşüm yaşandığı görülmüştür.
- ISO 45001 ve Güvenlik Kültürü: İş sağlığı ve güvenliği (İSG) yönetiminde küresel bir referans olan ISO 45001, özellikle Hindistan ve Türkiye’deki tabakhanelerde iş kazalarının azalması ve çalışan moralinin yükselmesi ile ilişkilendirilmiştir (Neag vd., 2020; Šolc vd., 2022). Rodríguez-Martín ve arkadaşları (2023), bu standardın çalışanların yönetime katılımını artırarak “işyeri demokrasisini” güçlendirdiğini vurgular.
- LWG’nin Sosyal Evrimi: Başlangıçta çevresel odaklı bir protokol olan Leather Working Group (LWG), son yıllarda adil ücret ve sosyal diyalog kriterlerini de kapsayacak şekilde genişlemiştir. İslayem ve arkadaşları (2025), bu dönüşümün Hindistan ve Bangladeş’te tedarik zinciri boyunca sosyal performansın artmasına doğrudan katkı sağladığını raporlamaktadır.
- GRI ve Şeffaflık: Mármol ve arkadaşları (2023), GRI raporlama standartlarının sosyal göstergelerin ölçümünü standardize ederek, sektörde hesap verebilirliği ve paydaş güvenini kurumsallaştırdığını belirtmektedir.

2.4.2. Bölgesel Karşılaştırmalar: Standartlar ve Yerel Gerçeklikler Yönetişim sistemlerinin başarısı, uygulandıkları coğrafyanın kurumsal kültürüne göre önemli farklılıklar göstermektedir:

- Türkiye: Neag ve arkadaşları (2020), Türkiye’de ISO 45001 uygulamalarının İSG kültüründe sistematik bir dönüşüm yarattığını ve iş kazalarında ölçülebilir bir azalma sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca SA8000 ve GRI standartlarının benimsenmesi, etik raporlama kapasitesini artırmaktadır.
- Hindistan: Santos ve arkadaşları (2017), SA8000 sertifikasının deri ve tekstil sektörlerinde özellikle “adil ücret” ve “fiziksel çalışma koşulları” alanlarında iyileşme sağladığını belirtirken; LWG uygulamaları kimyasal güvenlik ve izlenebilirlik performansını yukarı çekmektedir.
- Bangladeş: Davoine ve Gendre (2014), Bangladeş’te SA8000 uygulamalarına rağmen yapısal işçi hakları ihlallerinin devam ettiğini, bunun da sertifikasyonun etkinliğini sınırladığını belirtmektedir. Ancak LWG ve ISO 45001 gibi teknik sistemler, güvenlik altyapısında kısmi iyileşmeler sağlamaktadır.
- İtalya: Mármol ve arkadaşları (2023), İtalya’da GRI ve Higg Index gibi araçların entegrasyonunun, şeffaf raporlama ve işçi temsil mekanizmaları açısından en olgun “etik yönetim” örneğini sunduğunu vurgulamaktadır.

2.4.3. Teknoloji Destekli Yönetişim Sertifikasyonların güvenilirliği, son dönemde blokzincir ve IoT tabanlı izlenebilirlik sistemleriyle desteklenmektedir. İsayem ve arkadaşları (2025), LWG sertifikasyonunda blokzincir teknolojisinin kullanılmasının, verilerin değiştirilemezliğini garanti ederek “güven” unsurunu pekiştirdiğini belirtir. Ancak literatür, teknolojinin insani katılımın yerini almaması gerektiği, aksine onu destekleyen bir araç olarak konumlandırılması gerektiği konusunda hemfikirdir.

2.4.4. Mevcut Boşluklar ve Gelecek Perspektifi Sistemlerin genel başarısına rağmen, literatürde üç temel sınırlılık (gap) dikkat çekmektedir:

1. Veri Kısıtı: Uzunlamasına (longitudinal) veri eksikliği, sertifikasyonların sosyal göstergeler üzerindeki “kalıcı” etkilerini değerlendirmeyi zorlaştırmaktadır.

2. Metodolojik Entegrasyon: Sosyal Yaşam Döngüsü Analizi (SLCA) ve Sosyal Etki Değerlendirmesi (SIA) artmakla birlikte; bu sistemlerin Çok Kriterli Analiz (MCA) ile birlikte kullanıldığı bütüncül ampirik örnekler halen sınırlıdır (Swarnakar vd., 2022; Meßmann vd., 2020).

3. KOBİ ve Kayıt Dışılık: Sertifikasyonların maliyet ve kapasite gereklilikleri, kayıt dışı istihdamın yoğun olduğu küçük işletmelerde (KOBİ) kapsayıcılık sorunları yaratmaktadır.

Gelecekteki araştırmalar, sosyal ve çevresel göstergeleri bütünleştiren hibrit çerçevelere ve bölgesel uygulama farklılıklarını minimize edecek, KOBİ dostu yönetim modellerine odaklanmalıdır.

2.5. Deri Sanayiinde Sosyal Sürdürülebilirliğin Önündeki Yapısal ve Operasyonel Engeller

Deri sanayiinde sosyal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma süreci, özellikle gelişmekte olan ülkelerde faaliyet gösteren küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) açısından çok boyutlu yapısal, operasyonel ve kültürel engellerle karşı karşıyadır. Bu engeller, yalnızca üretim sürecinin teknik kısıtlarıyla değil, aynı zamanda yönetim eksiklikleri, kurumsal boşluklar ve kültürel alışkanlıklarla da yakından ilişkilidir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Deri KOBİ'lerinde Sosyal Sürdürülebilirlik Engelleri: Buzdağı Modeli.
(Chatgpt ile oluşturulmuştur)

2.5.1. Yapısal Engeller: Politika Uyumsuzlukları ve Kurumsal Boşluklar Yapısal engellerin en belirgin biçimi, politika ve mevzuat düzeyinde sürdürülebilirlik ilkelerinin sektörel gerçeklikle tam olarak örtüşmemesidir. İslam ve arkadaşları (2020), özellikle Bangladeş ve Hindistan gibi gelişmekte olan ülkelerde deri sektöründe sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimini destekleyecek yeterli düzenleyici çerçevenin bulunmadığını ortaya koymaktadır. Bu kurumsal boşluklar, işletmelerin çevresel ve sosyal standartlara uyum göstermesini zorlaştırmakta; denetim ve yaptırım mekanizmalarının zayıflığı nedeniyle sürdürülebilirlik çabaları büyük ölçüde gönüllülüğe dayalı kalmaktadır.

Kovid ve arkadaşları (2021), bu durumu “kurumsal boşluklar” kavramı üzerinden açıklayarak, yetersiz mevzuat ve uygulama kapasitesinin, etik üretim pratiklerinin önünde sistematik bir engel oluşturduğunu vurgulamıştır. Özellikle

zararlı kimyasalların kullanımı, atık su yönetimi ve işçi sağlığı gibi alanlarda yetersiz altyapı ve standart eksikliği, sosyal sürdürülebilirlik çabalarının çevresel sürdürülebilirlikle paralel ilerlemesini engellemektedir (Wei vd., 2023).

Türkiye örneğinde ise, politika düzeyinde çeşitli strateji belgeleri (örneğin, *Deri ve Deri Mamulleri Sektörü Sürdürülebilirlik Eylem Planı*) bulunmakla birlikte, bu politikaların uygulamaya yansımada benzer kurumsal eşgüdüm sorunları gözlenmektedir. Bu durum, merkezi otoriteler ile sektör temsilcileri arasındaki iletişim eksikliğini ve yerel denetim kapasitelerinin yetersizliğini ortaya koymaktadır.

2.5.2. Operasyonel Engeller: Finansal Kısıtlar ve Kurumsal Kapasite Eksiklikleri
Operasyonel düzeydeki engeller, özellikle KOBİ'lerin sürdürülebilir uygulamalara geçiş sürecinde karşılaştıkları finansal ve teknik yetersizlikler üzerinden şekillenmektedir. Malaquias ve Malaquias (2020), KOBİ'lerin sürdürülebilirlik yatırımları için gerekli finansal kaynaklara erişimde ciddi sıkıntılar yaşadığını; yüksek teminat gereksinimleri ve krediye erişim zorluklarının sürdürülebilir teknolojilere yatırım yapmayı sınırladığını belirtmektedir. Benzer şekilde, Widyani ve arkadaşları (2022), işletmelerin büyüme ve yenilik kapasitelerinin finansman kısıtlarıyla doğrudan ilişkili olduğunu; özellikle sermaye eksikliğinin çevre dostu üretim teknolojilerinin benimsenmesini engellediğini göstermiştir.

Teknik bilgi eksikliği ve nitelikli işgücü yetersizliği de operasyonel engellerin başında gelmektedir. Islam ve arkadaşları (2020), birçok deri işletmesinde iş güvenliği, kimyasal yönetimi ve işçi eğitimi alanlarında bilgi açığı bulunduğunu; bu nedenle SA8000, ISO 45001 veya LWG gibi sertifikasyonların gerekliliklerinin yerine getirilemediğini vurgulamaktadır.

2.5.3. Kültürel ve Davranışsal Engeller: Farkındalık Eksikliği ve Değişim Direnci
Kültürel ve davranışsal engeller, çoğu zaman görünmez olmakla birlikte, sosyal sürdürülebilirliğin en dirençli bariyerlerini oluşturur. Bui ve arkadaşları (2021), geleneksel üretim anlayışlarının sürdürülebilirlik ilkeleriyle çeliştiğini ve bu nedenle değişim süreçlerinde ciddi direnç yarattığını belirtmektedir. Özellikle cinsiyet temelli iş bölümü, kayıt dışı istihdam ve düşük sendikalaşma oranları, sosyal sürdürülebilirliğin temel ilkeleri olan katılım ve eşitlik kavramlarının tam anlamıyla yerleşmesini engellemektedir (Kunusia vd., 2024). Ayrıca Akpuokwe ve arkadaşları (2024), yerel yöneticilerin sınırlı farkındalığının, etik sertifikasyonların benimsenme oranlarını düşürdüğünü ifade etmektedir.

2.6. Bölüm Sentezi ve Deri Sanayiine Yönelik Çıkarımlar

Bu bölüm boyunca ele alınan kavramsal çerçeve, bölgesel uygulamalar ve engel analizleri, deri sanayiindeki sosyal sürdürülebilirlik tablosuna dair üç kritik gerçeği ortaya koymaktadır.

Birincisi; sosyal sürdürülebilirlik kavramsal bir tercihten öte, normatif bir gerekliliktir. Deri sanayii bağlamında bu gereklilik; işçinin sağlığı, emeğinin karşılığı ve içinde yaşadığı toplumun refahı üçgeninde somutlaşır.

İkincisi; sertifikasyon ve yönetim mekanizmaları etkili olmakla birlikte, bölgesel eşitsizlikler belirgindir. İtalya (Santa Croce) gibi bölgelerde başarılı küme modelleri işlerken, Asya üretim üslerinde yapısal engeller dönüşümü yavaşlatmaktadır. Türkiye ise orta düzeyde uyum ve artan bir dönüşüm ivmesiyle bu iki uç arasında stratejik bir köprü konumundadır.

Üçüncüsü; sektördeki en büyük boşluk “uygulama ile yönetim arasındaki kopuş”tur. Bölüm 2.5’te detaylandırılan yapısal ve operasyonel engeller çok katmanlıdır ve çözümü sadece denetimde değil, kültürel dönüşümdedir. Geleceğe yönelik projeksiyonlar; sosyal göstergelerin ölçülebilir hale getirilmesini, KOBİ’lere özgü finansal destek modellerini ve dijital şeffaflık araçlarının “insan onurunu” merkeze alacak şekilde tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Ortaya konan bulgular, sosyal sürdürülebilirliğin yalnızca etik bir duruş değil; sektörün uzun vadeli rekabetçiliği ve meşruiyeti için hayati bir strateji olduğunu kanıtlamaktadır. Bu nedenle, izleyen bölüm, bu kavramsal çerçevenin pratiğe nasıl döküleceğine, yani sosyal performansın nasıl ölçüleceğine odaklanacaktır.

3. DERİ SANAYİİNDE SOSYAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİN ÖLÇÜLMESİ: YÖNTEMLER, GÖSTERGELER VE AMPİRİK KANITLAR

Bu bölüm, deri sanayiinde sosyal sürdürülebilirliğin nasıl ölçülebileceğine ilişkin kuramsal ve uygulamalı bir çerçeve sunmakta; ölçüm ihtiyacının kaynağını, kullanılan metodolojik yaklaşımları, sektörün özgün sosyal göstergelerini ve ampirik literatürün sunduğu bulguları bütüncül biçimde ele almaktadır. Buradaki temel amaç, sosyal sürdürülebilirliği “soyut bir iyi niyet beyanı” olmaktan çıkarıp; deri tedarik zinciri boyunca izlenebilir, karşılaştırılabilir ve karar süreçlerine entegre edilebilir somut bir boyuta taşımaktır. Bu doğrultuda bölüm, üç kritik soruya yanıt aramaktadır: Deri tedarik zincirinde sosyal sürdürülebilirlik neden ölçülmelidir? Hangi çerçeveler ve modeller bu ölçüm için kullanılabilir? Ve son olarak, ampirik çalışmalar bize ne söylemekte, hangi boşlukları işaret etmektedir?

3.1. Stratejik Bağlam: Neden Ölçmek Gerekıyor?

Sosyal sürdürülebilirliğin ölçümü, üçlü kâr-zarar (*triple bottom line*) yaklaşımı içinde ne yazık ki hâlâ “en zayıf halka” konumundadır. Çevresel etkiler; sera gazı emisyonu, su tüketimi veya atık miktarı gibi fiziksel, standartlaştırılabilir göstergelerle görece kolay nicelleştirilebilirken; sosyal

etkiler çoğu zaman nitel, bağlama özgü ve “insan onuru” gibi öznel boyutlara dayanır (Epstein & Roy, 2003; Hallstedt vd., 2013). Bu durum, literatürde “rigor gap” (titizlik boşluğu) olarak tanımlanan derin bir asimetri yaratmıştır: Çevresel ölçüm mühendislik hassasiyetinde ilerlerken, sosyal ölçüm parçalı ve belirsiz kalmıştır.

Deri sanayii gibi emek yoğun, çok kademeli ve küresel tedarik zincirlerine gömülü sektörlerde bu asimetri daha da hayati hale gelmektedir. Ham derinin elde edilmesinden konfeksiyona uzanan süreç; çoğu zaman Bangladeş, Hindistan, Türkiye ve Vietnam gibi “düşük ücret-yüksek risk” havzalarında gerçekleşmektedir (Khan, 2014). Bu yapı; işçi sağlığı ve güvenliği, çocuk işçiliği, sendikal haklar ve yerel toplulukların refahı bakımından yüksek bir sosyal risk profili doğurur.

Bu bağlamda sosyal sürdürülebilirliğin ölçümü, yalnızca kurumsal sosyal sorumluluk (KSS) raporları için bir “vitrin düzenlemesi” değil; işletmenin “faaliyet gösterme lisansını” (*Social License to Operate* – SLO) yeniden üreten bir meşruiyet aracıdır (Toffel & Brammer, 2015). Ancak mevcut göstergelerin büyük kısmı, doğrulanması zor “öz-bildirimlere” dayanmaktadır. Bu güvenilirlik sorununu aşmak adına sektör, son yıllarda Sosyal Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (S-LCA) ve Sosyal Etki Değerlendirmesi (SIA) gibi daha sofistike yöntemlere yönelmiştir.

3.2. Temel Ölçüm Çerçeveleri: SLCA ve SIA

3.2.1. Sosyal Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (S-LCA) Ürün odaklı bir yöntem olan S-LCA, bir deri ürününün “beşikten mezara” (hammadde, üretim, kullanım, bertaraf) uzanan yolculuğundaki sosyal etkileri modeller (UNEP, 2009). Çevresel LCA ile paralel bir mantık izleyen bu yöntem, etkileri beş ana paydaş grubu üzerinden okur: İşçiler, yerel topluluklar, toplum, tüketiciler ve değer zinciri aktörleri.

İtalyan tekstil sektöründe (yün/kaşmir) yapılan çalışmalar (Del Borghi vd., 2017), S-LCA’nın deri gibi katma değeri yüksek ürünlerde “sosyal sıcak noktaların” (*social hotspots*) tespitinde ne kadar etkili olduğunu göstermiştir. Bu yöntemle, bir deri ceket üzerindeki sosyal yükün; kesimhanedeki çalışma koşullarından mı, tabakhanedeki kimyasal riskten mi, yoksa markanın tedarik politikasından mı kaynaklandığı nicel veya yarı-nicel verilerle ortaya konabilir.

3.2.2. Sosyal Etki Değerlendirmesi (SIA) ve TEE Entegrasyonu S-LCA ürüne odaklanırken, SIA daha çok belirli bir projenin veya tesisin (örneğin yeni bir tabakhane OSB’sinin) bölgedeki insanlar üzerindeki etkilerine odaklanır. SIA çalışmalarında sıklıkla Toplumsal-Çevresel-Ekonomik (TEE) çerçeveye atıf yapılır da, tekstil ve deri sektöründeki uygulamalar, ekonomik ve çevresel verilerin baskınlığı altında sosyal boyutun cılız kaldığını göstermektedir

(Basta vd., 2018). Bu iki yaklaşım (S-LCA ve SIA) birbirini tamamlayarak, deri sanayiindeki ölçüm açığını kapatacak bütüncül bir resim sunar.

3.3. Deri Sanayiinde Sosyal Risk Değerlendirme Süreci: S-LCA-SIA-MADM Entegrasyonu

Deri tedarik zincirinde sosyal sürdürülebilirliğin yönetimi, beş aşamalı sistematik bir risk değerlendirme sürecini gerektirir (Şekil 3.1):

1. **Risk Tanımlama:** Sektöre özgü (kimyasal maruziyet, çocuk işçiliği vb.) ve coğrafyaya özgü (Asya üretim havzaları) risklerin belirlenmesi.

2. **Gösterge Seçimi:** S-LCA tabanlı ürün göstergeleri ile SIA tabanlı yerel/ bölgesel göstergelerin bir havuzda toplanması.

3. **Veri Toplama:** Nicel (fabrika kayıtları) ve nitel (işçi görüşmeleri, şikayet mekanizmaları) verilerin harmanlanması. Özellikle KOBİ’lerde veri güvenilirliği en kritik darboğazdır (Malaquias & Malaquias, 2020).

4. **Analiz (MADM):** Toplanan verilerin Çok Kriterli Karar Verme (MADM) yöntemleriyle işlenmesi. Bu aşamada sosyal veriler, ekonomik verilerle birlikte ağırlıklandırılarak stratejik karar girdisine dönüşür.

5. **Politika Geliştirme:** Analiz sonuçlarına göre SA8000 veya LWG gibi araçlarla entegre eylem planlarının oluşturulması.

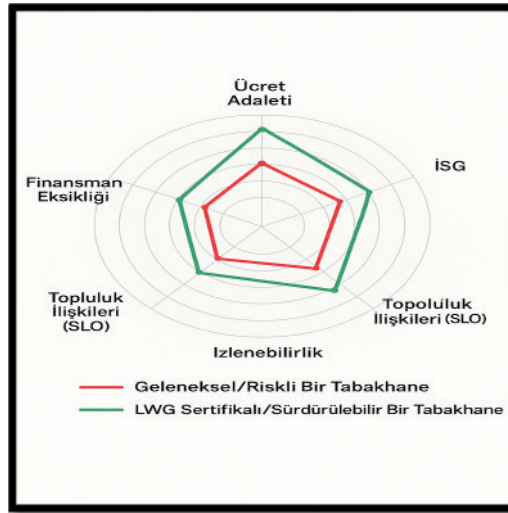


Şekil 3.1. Deri Sanayiinde Sosyal Sürdürülebilirlik Ölçüm Süreci (Şekil Açıklaması: Süreç, tedarikçilerden ve işçilerden “Veri Toplama” ile başlar; “Paydaş Analizi” ile devam eder. Elde edilen veriler “SLCA ve SIA” yöntemleriyle işlenir, ardından “MADM (Çok Kriterli Karar Verme)” ile ağırlıklandırılır ve nihayetinde “Politika/ Strateji”ye dönüşür.) (Chatgpt ile oluşturulmuştur)

3.4. Çok Kriterli Karar Verme (MADM) ve Tedarikçi Seçimi

Maliyet baskısı altındaki bir satın almacı için asıl soru şudur: “*Sosyal performansı somut bir karar değişkenine nasıl dönüştürebilirim?*” İşte bu noktada Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), TOPSIS ve bulanık mantık gibi yöntemler devreye girer.

Ofluoğlu ve arkadaşları (2017) tarafından Türk deri konfeksiyon sektöründe yapılan bir çalışma AHP ve Bulanık Kapsamlı Değerlendirme (FCE) yöntemlerini kullanarak sosyal kriterleri tedarikçi seçim sürecine entegre etmişler ve emek-yoğun bu üretimde iş gücü maliyetinin % 21 dolayında olduğunu vurgularlarken, Beshah, Kitaw ve Gelan (2013) çalışmalarında deri konfeksiyonunda hammadde maliyetinin toplam maliyetin %74’ünü aşmasına rağmen, modelin sosyal göstergelere anlamlı bir ağırlık vermesi ve seçimi etkilemesi çarpıcıdır. Benzer şekilde Endonezya örneğinde AHP ve COPRAS-G yöntemlerinin kullanılması, belirsizliğin yüksek olduğu deri tedarik zincirlerinde bu modellerin “sağlam” (*robust*) sonuçlar ürettiğini kanıtlamaktadır (Huang & Ye, 2016).



Şekil 3.2. Sosyal Performansın Çok Boyutlu Karşılaştırması: Geleneksel ve Sürdürülebilir İşletme Profili (Chatgpt ile oluşturulmuştur)

3.5. Gösterge Geliştirme ve Doğrulama: İSG, Ergonomi ve Refah

Sosyal göstergeler sadece “uzman sezgisiyle” değil, istatistiksel olarak da doğrulanmalıdır. Joe Lin, Efranto ve Santoso (2021) tarafından Endonezya’da yapılan bir çalışmada, 73 aday gösterge Doğrulayıcı Faktör Analizi (CFA) ile test edilmiş ve 5 temel faktöre (Çalışan iyi oluşu, Güvenlik kaygıları, İş yeri konforu, Kas-iskelet sağlığı, Çevresel kaygılar) indirgenmiştir.

Bu faktörlerin deri fabrikası zeminine uyarlanması hayati önem taşır. İşçilerin %40-50'sinin solunum ve cilt hastalıklarıyla mücadele ettiği bir sektörde (Islam vd., 2020); “Kayıp günlük iş kazası oranı”, “Kas-iskelet sistemi hastalığı (MSD) insidansı” ve “Yaşam ücreti farkı” gibi göstergeler, sosyal performansı hikâye anlatıcılığından çıkarıp veri temelli bir zemine oturtur. Özellikle Bangladeş örneğinde emek maliyetinin toplam ürün maliyetinin sadece %10-15'ini oluşturması (Khan, 2014), “adil ücret” tartışmasının ekonomik bir imkânsızlık değil, etik bir tercih sorunu olduğunu matematiksel olarak ortaya koyar.

3.6. Deri Sanayiine Özgü Sosyal Göstergeler ve Kritik Risk Alanları

Sektörün sosyal röntgenini çekmek için göstergeleri üç ana ekseninde sınıflandırmak mümkündür (Tablo 3.1).

Tablo 3.1. Deri Sanayiinde Sosyal Sürdürülebilirlik Boyutları ve Kritik Riskler

Boyut	Alt Göstergeler	Kritik Riskler
İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG)	Kimyasal maruziyet (Krom VI, solventler), KKD kullanımı, havalandırma etkinliği	Solunum hastalıkları, ağır metal zehirlenmesi, kas-iskelet sistemi bozuklukları
Ücret ve Çalışma Koşulları	Yaşam ücreti farkı (%), fazla mesai saatleri, kayıt dışı istihdam oranı	Yoksulluk döngüsü, iş güvencesizliği, modern kölelik riskleri
İzlenebilirlik	Tedarikçi denetim skorları, ham deri kaynak bilgisi, düzeltici faaliyet oranı	Çocuk işçiliği, etik ihlallerin gizlenmesi, şeffaflık eksikliği
Topluluk Etkileri ve SLO	Atıksu/koku şikayetleri, şikâyet mekanizması erişimi, sosyal yatırım	Sosyal lisans kaybı, yerel halk ile çatışma, itibar riski

3.7. Ölçüm Modelleri ve Sertifikasyon Sistemlerinin Sınırları

Önceki bölümde (Bölüm 2.4) yönetim aracı olarak tartışılan SA8000, LWG ve Higg Endeksi; ölçüm metodolojisi açısından ele alındığında birer “veri sağlayıcı” işlevi görür.

- **Veri Doğrulama Aracı Olarak SA8000:** Ölçüm perspektifinden bakıldığında SA8000 denetim raporları, S-LCA çalışmalarında ihtiyaç duyulan “çalışma saatleri”, “çocuk işçilik insidansı” ve “ücret dengesi” gibi nicel verilerin birincil kaynağıdır. Standardın kendisi bir yönetim aracı olsa da, ürettiği denetim verileri, sosyal etki ölçümünün ham maddesini oluşturur.

- **LWG P7 Protokolü ve Skorlama:** LWG, sosyal kriterleri (P7) bir “puanlama algoritması”na dönüştürmüştür. Bu, nitel sosyal performansın (örneğin işçi refahı), tedarikçi seçim modellerinde (MADM) kullanılabilirlik sayısal bir skora (örneğin %85 uyum) evrilmesini sağlar. Böylece sosyal sürdürülebilirlik, satın alma departmanlarının Excel tablolarına girebilecek matematiksel bir değişkene dönüşür.

3.8. KOBİ’lerde Ölçüm Kısıtları ve Çözüm Araçları

Bölüm 2.5’te değinilen operasyonel engeller, ölçüm süreçlerinde “veri körlüğü”ne neden olmaktadır. KOBİ’ler için karmaşık S-LCA analizleri maliyetli olduğundan, ölçüm stratejisi “hassasiyet”ten ziyade “uygulanabilirlik” üzerine kurulmalıdır:

1. Öz-Bildirim yerine Hibrit Doğrulama: KOBİ’lerden gelen verilerin güvenilirliğini artırmak için, beyana dayalı anketler, OSB yönetimlerinin sağladığı atık/enerji verileriyle çapraz doğrulamaya tabi tutulmalıdır.
2. Basitleştirilmiş Gösterge Setleri: 100 maddelik global standartlar yerine, “Kritik 10 Gösterge” (Örn: Kaza sayısı, Sigortalı çalışan oranı) üzerinden periyodik veri toplanması, veri akışının sürekliliğini sağlar.

3.9. Eleştirel Değerlendirme ve Öneriler

Bu bölümde çizilen çerçeve, deri sanayiinde ölçüm mimarisinin tek katmanlı olamayacağını gösterir. Ürün düzeyi için S-LCA, tesis düzeyi için SIA, stratejik kararlar için MADM ve işyeri gerçekliği için CFA ile doğrulanmış göstergeler bir arada kullanılmalıdır. En büyük eksiklik, sertifikasyonların “sonuç odaklı” (*outcome-based*) etkisinin ölçülebilmesidir. Gelecek, verinin şeffaflığını sağlayan blokzincir teknolojileri ile verinin “insanileşmesini” sağlayan katılımcı mekanizmaların sentezinde yatmaktadır. Sosyal lisansın korunması, ancak bu sentezin başarılmasıyla mümkündür.

4. 4. GELECEK VİZYONU: ENDÜSTRİ 5.0, ADİL DÖNGÜSELLİK VE YENİ BİR SOSYAL SÖZLEŞME

Bu çalışma boyunca ele alınan sosyal sürdürülebilirlik kavramı, deri sanayiinde “hayırseverlikten” “risk yönetimine” ve nihayetinde “stratejik zorunluluğa” evrilen dinamik bir süreci temsil etmektedir. Ancak sektörün önündeki on yıl, mevcut standartlara uyum sağlamanın ötesinde, üretim paradigmasının kökten değişeceği bir döneme işaret etmektedir. Bu bölüm, deri sanayiinde sosyal sürdürülebilirliğin geleceğini; teknolojik dönüşüm (Endüstri 5.0), ekolojik zorunluluklar (Döngüsel Ekonomi), yasal bağlayıcılıklar (CSDDD) ve değişen tüketici değerleri ekseninde tartışmaktadır. Amaç, sektörün yalnızca “uyum sağlayan” değil, “değer yaratan” bir yapıya nasıl dönüşebileceğini ortaya koymaktır.

4.1. Paradigma Değişimi: Endüstri 4.0'dan Endüstri 5.0'a İnsan Merkezli Dönüşüm

Sanayi üretiminde son on yıla damgasını vuran Endüstri 4.0, verimlilik, dijitalleşme ve otomasyonu merkeze alırken; sosyal sürdürülebilirlik çoğu zaman teknolojik ilerlemenin bir yan ürünü olarak değerlendirilmiştir. Ancak güncel literatür, bu teknokratik yaklaşımın sınırlarını çizmekte ve Endüstri 5.0 kavramını bir yanıt olarak öne çıkarmaktadır. Fares, Cherrafi, Shardeo ve Garza-Reyes (2025), bu yeni dönemi yalnızca bir teknolojik güncelleme değil; işçi refahını, güvenliğini ve karar süreçlerine katılımını merkeze alan bir “sosyo-teknik yeniden yönelim” olarak tanımlamaktadır.



Şekil 4.1. Endüstri 5.0 Vizyonunda Deri Değer Zinciri: Teknolojik ve Sosyal Bütünleşme. (Chatgpt ile üretilmiştir)

Deri ve tekstil gibi emek yoğun sektörlerde bu dönüşüm, otomasyonun insanı ikame etmesi değil; insan ve makine işbirliğinin (Human-Robot Collaboration - HRC) sosyal hedeflerle uyumlu hale getirilmesi anlamına gelir. Yu, Li, Mangla ve Song (2025), robotik sistemlerin ve yapay zekanın, işçi sağlığını koruyacak ve ergonomik riskleri minimize edecek şekilde tasarlandığında tedarik zinciri dayanıklılığını artırdığını vurgulamaktadır. Dolayısıyla geleceğin deri fabrikası; sadece “akıllı” değil, aynı zamanda “insan onuruna yakışır” (*decent work*) bir teknolojik ekosistem olmak zorundadır (Jena & Ghadge, 2021; Ross, 2019).

4.2. Döngüsel Ekonomi ve “Adil Geçiş” (Just Transition)

Sürdürülebilirliğin çevresel boyutu olan Döngüsel Ekonomi, sosyal adalet ilkeleriyle entegre edilmediği sürece eksik kalmaya mahkumdur. Härri ve Levänen (2024), tekstil ve moda endüstrisindeki döngüsel geçişin,

kasıtlı bir adalet tasarımı (*design for equity*) olmaksızın mevcut eşitsizlikleri derinleştirebileceği uyarısında bulunur. Bu bağlamda “Adil Geçiş”, yeşil dönüşümün yükünün işçiler ve kırılgan tedarikçiler üzerinde kalmamasını garanti altına alan bir sigorta mekanizmasıdır (Şekil 4.1).

ILO’nun (2025) tedarik zincirlerinde insana yakışır iş üzerine yayınladığı son rehberler, döngüsel iş modellerinin (geri dönüşüm, onarım, atık yönetimi) kayıt dışılığı azaltacak ve sosyal koruma sağlayacak şekilde kurgulanması gerektiğini belirtir. Deri sanayii için bu; atık toplayıcılarından tabakhane işçilerine kadar tüm aktörlerin, döngüsel ekonominin yarattığı değerden adil pay alması demektir (Tyfield, 2022).

4.3. Rejeneratif Tarım ve Atık Değerlendirme: Kırsal Kalkınma Fırsatı

Deri tedarik zincirinin en başındaki hammadde (ham deri) aşaması, Rejeneratif Tarım uygulamalarıyla güçlü bir sosyal potansiyel taşımaktadır. Onarıcı tarım uygulamaları, yalnızca toprağın sağlığını değil, aynı zamanda kırsal toplulukların refahını ve ekonomik dayanıklılığını da artırmaktadır.

Nunes, Pigatin, Oliveira, Bontempi ve Rezende (2018), tabakhane atıklarının (örneğin vermikompost yöntemiyle) tarımsal gübreye dönüştürülmesinin, sektörler arası bir döngüsellik yaratarak yerel çiftçilere ekonomik gelir sağladığını kanıtlamıştır. Bu tür “çapraz sektör” (*cross-sector*) işbirlikleri, deri sanayiini çevresel bir kirletici olmaktan çıkarıp, yerel kalkınmayı destekleyen bir “sosyal girişimci” aktöre dönüştürme potansiyeline sahiptir (Schaefer, Corner, & Kearins, 2015).

4.4. Sosyal Risk Yönetiminde Dijital Zeka: AI, Büyük Veri ve Blokzincir Sentezi

Sosyal sürdürülebilirliğin izlenmesinde geleneksel yöntemler yerini “dijital zeka”ya bırakmaktadır. Narayanan ve arkadaşları (2024), yapay zeka (AI) destekli risk değerlendirmesinin, heterojen veri akışlarını işleyerek tedarik zincirindeki güvenlik risklerine karşı dinamik bir adaptasyon sağladığını göstermektedir.

Büyük veri analitiği ve blokzincir teknolojileri ise “güven” unsurunu yeniden tanımlamaktadır. Reem, Chowdhury, Ashrafudoulla ve Ha (2025), blokzincir ve AI entegrasyonunun, uyum kayıtlarının güvenliğini ve değiştirilemezliğini garanti ettiğini belirtir. Deri sektöründe bu teknoloji, ham derinin kaynağından nihai ürüne kadar olan yolculuğunda işçi haklarının ihlal edilmediğini kanıtlayan şeffaf bir “dijital pasaport” işlevi görmektedir (Handfield, Sun, & Rothenberg, 2020). Ancak Venkataraman ve A (2025), teknolojinin “insani yönetişimi” gölgelememesi gerektiği; dijital araçların işçi katılımını destekleyen birer kaldıraç olarak kullanılması gerektiği konusunda uyarıda bulunur.

4.5. Küresel Regülasyon Dalgası: Gönüllülükten Zorunlu Durum Tespitine (CSDDD) Geçiş

Sosyal sürdürülebilirlik, uzun yıllar şirketlerin gönüllü inisiyatiflerine bırakılmışken; 2025 vizyonu bu paradigmanın “yasal zorunluluğa” dönüştüğünü göstermektedir. Avrupa Birliği’nin Kurumsal Sürdürülebilirlik Durum Tespiti Direktifi (CSDDD), tedarik zincirindeki ihlalleri “önleme ve iyileştirme” yükümlülüğü getirerek yeni bir yönetim mimarisi kurmaktadır (Sinnig & Zetzsche, 2025).

Shulman (2024), bu direktifin sınır ötesi etkisi nedeniyle, Türkiye, Hindistan ve Bangladeş gibi üretici ülkelerdeki firmalar için de bağlayıcı hale geldiğini vurgular. Artık sosyal sürdürülebilirlik bir “tercih” değil, küresel pazarlara erişim için bir “ticari ehliyet” niteliğindedir. Mizrachi (2024), moda ve deri sektörünün yüksek riskli yapısı nedeniyle, bu zorunlu rejimlerin “uygulama boşluğunu” (*enforcement gap*) dolduracağını öngörmektedir.

4.6. Yeni Tüketici Paradigması: Etik Lüks ve Pazarın Dönüşümü

Dönüşümün talep tarafında ise tüketici algısındaki köklü değişiklik yer almaktadır. Güncel araştırmalar, lüks tüketiminin salt estetikten “etik ve şeffaf” bir deneyime, yani Etik Lüks (*Ethical Luxury*) kavramına kaydığını göstermektedir (Shashwathi, 2024). Holloway (2024), tüketicilerin şeffaf ve adil üretim süreçlerini belgeleyen markalara “fiyat primi” ödemeye daha istekli olduğunu kanıtlamıştır.

Bu durum, “Büyüme Sonrası” (*Post-Growth*) tartışmalarıyla birleştiğinde; deri sektörü için hacim odaklı ucuz üretimden, değer odaklı, uzun ömürlü ve adil üretilmiş “yavaş deri” (*slow leather*) modeline geçişi zorunlu kılmaktadır (Wheeler, 2012). Wickramage, Gunarathna ve Samarawickrama (2024), Sri Lanka örneğinde olduğu gibi, sürdürülebilir iyileştirmelerin ve **malzeme çeşitliliğinin, gelişmekte olan ülkelerin küresel pazardaki konumunu güçlendirdiğini belirtmektedir.**

4.7. Genel Sonuç ve Gelecek Vizyonu

Deri sanayiinde sosyal sürdürülebilirlik üzerine kurgulanan bu çalışma, sektörün tarihsel bir eşikte olduğunu ortaya koymaktadır. Kavramsal çerçeveler, ampirik kanıtlar ve gelecek projeksiyonları ışığında, sektörün yol haritasını belirleyecek dört temel sütun şunlardır:

1. Ölçülebilirlik Zorunluluğu: “Ölçülemeyen yönetilemez” ilkesi gereği; SLCA, SIA ve MCA gibi yöntemlerle desteklenen, istatistiksel olarak doğrulanmış göstergeler, soyut iyi niyetleri somut performans tablolarına dönüştürmelidir.

2. Yasal Bağlayıcılık: AB CSDDD ve küresel durum tespiti yasaları, sosyal sürdürülebilirliği kurumsal bir “vicdan meselesi” olmaktan çıkarıp, “hukuki bir yükümlülük” haline getirmiştir.

3. Teknoloji-İnsan Dengesi: Yapay zekâ ve blok zincir, şeffaflık için muazzam fırsatlar sunsada; bu teknolojiler insan merkezli yönetişimi ikame etmemeli, aksine işçi haklarını koruyan bir şeffaflık kalkanı olarak işlev görmelidir.

4. Değer Odaklı Dönüşüm: Tüketici talebindeki “etik lüks” arayışı, sektörü maliyet odaklı rekabetten, değer ve insan odaklı bir rekabete zorlamaktadır.

Sonuç olarak; deri sanayiinin geleceği, sadece kimyasal formüllerde veya makine parkurlarında değil; tedarik zincirinin en ucundaki işçinin güvenliğinde, zanaatkarın refahında ve toplumun rızasında yatmaktadır. Sosyal sürdürülebilirlik, deri sektörü için artık bir “seçenek” değil, 21. yüzyıldaki “varoluş garantisi” ve yeni toplumsal sözleşmesidir.

Son Söz: Bir Tercih ve Sorumluluk Çağrısı

Bu çalışma, rahatlıkla seyirci kalamayacağımız bir gerçekliğin haritasını çıkarmak için kaleme alındı. Sayıların, stratejilerin ve sertifikaların ötesinde, hepimizin cevaplamak zorunda olduğu temel bir insani soruya odaklandı: **Biz, nasıl bir dünyada yaşamak ve nasıl bir dünya bırakmak istiyoruz?**

Deri sanayii, bu sorunun en acil ve çarpıcı biçimde sorulduğu sahalardan sadece biri. Giydiğimiz bir ayakkabının, kullandığımız bir aksesuarın arkasında; bir işçinin sağlığı, bir ailenin geçim kaygısı ve bir topluluğun temiz su hakkı var. Bu kitap bölümü, tedarik zincirlerinin uzun ve görünmez koridorlarında kaybolan bu insani bağlantıyı kurmak, görünmeyeni görünür kılmak için yazıldı.

Amacımız, okuyucunun kulağına şu suyu kaçırmaktır: **Bu, sadece “onların” – üreticilerin, hükümetlerin – sorunu değil. Bu, hepimizin içinde bir yerden rol aldığı bir sistemin sonucu.** Sessiz kalmak, bu sistemin devamına verilen sessiz bir onaydır.

Peki, şimdi ne yapacağız? Bu çalışma boyunca, sadece sorunu teşhis etmekle kalmadık, aynı zamanda bir “**eylem kılavuzu**” sunduk. Bu sayfalarda, dönüşümü başlatmak için ihtiyaç duyduğunuz her şey mevcut:

- **Bir “Neden” ve “Nasıl” Çerçevesi:** Sürdürülebilirliği tetikleyen içsel ve dışsal itici güçler, nereden başlayacağınızı anlamanız için size yol gösteriyor.
- **Bir Teşhis ve Ölçüm Alet Kutusu:** Tablo 1 ve 3.1’deki kritik göstergeler, S-LCA ve SIA yöntemleri, sorunun nerede ve ne kadar büyük olduğunu somut verilerle görmenizi sağlıyor.

- **Bir Karar ve Eylem Mekanizması:** MADM yöntemleri (AHP, TOPSIS), size sadece en ucuz değil, aynı zamanda en “insani” tedarikçiyi seçme becerisi kazandırıyor.
- **Bir Güven ve Meşruiyet Yapı Taşı:** SA8000, LWG, ISO 45001 gibi sertifikalar ve blokzincir teknolojisi, attığınız adımların güvenilir ve şeffaf olmasını garanti ediyor.
- **Bir Gelecek Vizyonu:** Endüstri 5.0, CSDDD ve Döngüsel Ekonomi, bunun sadece bir uyum meselesi değil, öncülük etme ve değer yaratma fırsatı olduğunu gösteriyor.

Artık bahanemiz yok. Önümüzde yatan araç kutusu, “ne yapmalıyım?” sorusuna net bir cevap veriyor.

Öyleyse, şimdi sıra sizde:

- **Bir tüketici olarak:** Satın alma gücünüz bir oy pusulasıdır. Şeffaflığı talep edin. Bu kitap bölümünün size öğrettiği göstergeleri sorun. Etik üretimi, tercihinizle ödüllendirin.
- **Bir sektör profesyoneli olarak:** Karar masanızda, maliyet baskısının yanına “insani maliyet” sütununu da ekleyin. Sunduğumuz ölçüm ve karar mekanizmalarını kullanarak, uzun vadeli itibarınızı ve toplumsal lisansınızı güvence altına alın.
- **Bir birey olarak:** Bu farkındalığı yayın. Konuşun. Daha adil bir sistem talep edin.

Bu çalışma, seyirci koltuğundan inip sahneye çıkma vaktinin geldiğine dair bir davettir. Unutmayın, pazarı ve nihayetinde dünyayı dönüştürecek olan, bizim – hepimizin – bilinçli tercihlerimiz ve ısrarlı taleplerimiz olacaktır. Bu sayfalarda size verilen araç kutusu, bu dönüşümü başlatacak kaldırıcı elinize tutuşturuyor. Artık onu kullanmak sizin sorumluluğunuz.

Kaynakça

- Abbas, N., & Ariffin, K. (2023). Internal factors in the implementation of ISO 45001 among organizations. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 13(7), 1480-1492. <https://doi.org/10.6007/IJARBS/v13-i7/17687>
- Adesola, O., Taiwo, I., Adeyemi, D., Nwariaku, H., & Abidola, A. (2025). Utilizing AI and machine learning algorithms to optimize supplier relationship management and risk mitigation in global supply chains. *International Journal of Science and Research Archive*, 14(2), 219-228. <https://doi.org/10.30574/ij-sra.2025.14.2.0351>
- Ahmed, W. A. H., & MacCarthy, B. L. (2021). Blockchain-enabled supply chain traceability in the textile and apparel industry. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125459. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125459>
- Akpuokwe, C. U., Chikwe, C. F., & Eneh, N. E. (2024). Leveraging technology and financial literacy for women's empowerment in SMEs: A conceptual framework for sustainable development. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 18(3), 020-032. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2024.18.3.0041>
- Albu, L., Bostaca, G., & Acsinte, D. (2018). Due diligence for healthy workplaces in the European tanning industry. *Proceedings of the 7th International Conference on Advanced Materials and Systems (ICAMS 2018)*, 493-498. <https://doi.org/10.24264/icams-2018.X.4>
- Alghababsheh, M., & Gallea, D. (2020). Socially sustainable supply chain management and suppliers' social performance: The role of social capital. *Journal of Business Ethics*, 173(4), 855-875. <https://doi.org/10.1007/s10551-020-04525-1>
- Arond, E., Strambo, C., Corral, F., & Burton, J. (2025). *Planning and implementing just transitions: Opportunities for south-south cooperation*. SEI Report. Stockholm Environment Institute. <https://doi.org/10.51414/sei2025.042>
- Ashby, A., Leat, M., & Hudson-Smith, M. (2012). Making connections: A review of supply chain management and sustainability literature. *Supply Chain Management: An International Journal*, 17(5), 497-516. <https://doi.org/10.1108/13598541211258573>
- Badhwar, M., Kumar, G., & Singh, S. (2023). Blockchain adoption for sustainable fashion supply chains: A systematic literature review and future research agenda. *Journal of Fashion Marketing and Management*, 28(1), 139-162. <https://doi.org/10.1108/JFMM-09-2022-0196>
- Barbu, M., Campling, L., Smith, A., Harrison, J., & Richardson, B. (2018). The trade-labour nexus: Global value chains and labour provisions in European Union free trade agreements. *Global Labour Journal*, 9(3), 258-280. <https://doi.org/10.15173/glj.v9i3.3424>
- Basta, M., Lapalme, J., Paquet, M., Saint-Louis, P., & Zwaida, T. (2018). How are supply chains addressing their social responsibility dilemmas? Review of the last decade and a half. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 25(5), 833-843. <https://doi.org/10.1002/csr.1500>

- Beshah, B., Kitaw, D., & Gelan, M. (2013). Workstation design in an Ethiopian small scale leather garment industry. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 75, 434-442. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.04.048>
- Biancardi, A., Colasante, A., & D'Adamo, I. (2023). Sustainable education and youth confidence as pillars of future civil society. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 24(2), 376-394. <https://doi.org/10.1108/IJS-HE-06-2022-0196>
- Brito, J. C., Silva, F. J. G., & Campilho, R. D. S. G. (2025). The impact of ISO 45001 on occupational health and safety performance: A systematic review. *Safety Science*, 172, 106412. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106412>
- Bueno, N., Bernaz, N., Holly, G., & Martin-Ortega, O. (2024). The EU directive on corporate sustainability due diligence (CSDDD): The final political compromise. *Business and Human Rights Journal*, 9(2), 294-300. <https://doi.org/10.1017/bhj.2024.10>
- Bui, A. T., Pham, T. P., Pham, L. C., & Ta, T. T. (2021). Legal and financial constraints and firm growth: Small and medium enterprises (SMEs) versus large enterprises. *Heliyon*, 7(12), e08576. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08576>
- COTANCE. (2020). *European leather industry: Social and environmental report 2020*. Brussels: The Confederation of National Associations of Tanners and Dressers of the European Community. [Erişim: cotance.com]
- Davoine, E., & Gendre, C. (2014). The impact of SA8000 certification on labor conditions in Bangladesh. *Society and Business Review*, 9(3), 258-275. <https://doi.org/10.1108/SBR-11-2013-0084>
- Del Borghi, A., Gallo, M., & Strazza, C. (2017). Social life cycle assessment of a wool-cashmere textile product: The methodological development of a start-up. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-1026-2>
- Dempere, J., Franklin, U., & Mattos, P. (2024). The entrepreneurial impact of the European directive on corporate sustainability due diligence. *Administrative Sciences*, 14(10), 266. <https://doi.org/10.3390/admsci14100266>
- Dempsey, N., Bramley, G., Power, S., & Brown, C. (2011). The social dimension of sustainable development: Defining urban social sustainability. *Sustainable Development*, 19(5), 289-300. <https://doi.org/10.1002/sd.417>
- Epstein, M. J., & Roy, M. J. (2003). Improving sustainability performance: Specifying, implementing and measuring key principles. *Journal of General Management*, 29(1), 15-31. <https://doi.org/10.1177/030630700302900102>
- Fares, N., Cherrafi, A., Shardeo, V., & Garza-Reyes, J. A. (2025). Supply chain management in the Industry 5.0 era: Strategic implications. *Benchmarking: An International Journal*. (Erken görünüm). <https://doi.org/10.1108/BIJ-12-2024-1136>
- Faridi, M. S., Ali, S., & Sarker, M. R. (2023). IoT-based traceability model for social sustainability in the apparel industry. *Computers & Industrial Engineering*, 178, 109112. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109112>

- Feng, T., Wang, D., & Lawton, A. (2025). Integration of Higg Index and governance frameworks in European textile supply chains. *International Journal of Production Economics*, 267, 108765. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.108765>
- Friede, G., Busch, T., & Bassen, A. (2015). ESG and financial performance: Aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 5(4), 210-233. <https://doi.org/10.1080/20430795.2015.1118917>
- Gimenez, C., & Tachizawa, E. M. (2012). Extending sustainability to suppliers: A systematic literature review. *Supply Chain Management: An International Journal*, 17(5), 531-543. <https://doi.org/10.1108/13598541211258591>
- Gunawardena, P., & Weligamage, S. (2023). Effect of development finance lending on financial performance of small and medium enterprises in Sri Lanka. *SLJO-J-JDRRA*, 1(1), 53-64. <https://doi.org/10.4038/jdr.2023.v1i1.6>
- Gustafsson, M., Bartley, T., Martel, S., & Murray, J. (2025). Smart-mix or stupid assurances? How businesses used voluntary initiatives to (de)legitimize supply chain regulation. *Global Policy*, 16(1), 5-18. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.70075>
- Hallstedt, S. I., Thompson, A. W., & Lindahl, P. (2013). Sustainability criteria in concept screening of product development. *Journal of Cleaner Production*, 54, 391-403. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.033>
- Handfield, R., Sun, H., & Rothenberg, L. (2020). Assessing supply chain risk for apparel production in low cost countries using newsfeed analysis. *Supply Chain Management: An International Journal*, 25(6), 803-821. <https://doi.org/10.1108/SCM-11-2019-0423>
- Härri, A., & Levänen, J. (2024). "It should be much faster fashion"—Textile industry stakeholders' perceptions of a just circular transition in Tamil Nadu, India. *Discover Sustainability*, 5(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00211-8>
- Holloway, S. (2024). Exploring consumer trust in supply chain certifications and its impact on marketing effectiveness. *Preprints*, 2024061393. <https://doi.org/10.20944/preprints202406.1393.v1>
- Huang, X., & Ye, Y. (2016). A multi-criteria decision making model for supplier selection based on social sustainability. *International Journal of U- and E-Service, Science and Technology*, 9(7), 277-286. <https://doi.org/10.14257/ijunesst.2016.9.7.28>
- Huq, F., Chowdhury, I., & Klassen, R. (2016). Social management capabilities of multinational buying firms and their emerging market suppliers. *Journal of Operations Management*, 46(1), 19-37. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2016.07.005>
- ILO. (2025). *Advancing decent work in supply chains*. Geneva: International Labour Organization. <https://doi.org/10.54394/PKJM3600>
- Islam, M. S., Nambohore, J. J., & Tshimba, N. M. (2020). Health risks assessment of heavy metals in leather industrial areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 19330-19342. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08456-w>

- Islayem, F., Khan, S. A., & Rahman, M. (2025). Blockchain-based trusted traceability and sustainability certification of leather products. *PLOS ONE*, 20(9), e0333192. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0333192>
- Jena, S. K., & Ghadge, A. (2021). An integrated supply chain – human resource management approach for improved supply chain performance. *The International Journal of Logistics Management*, 32(3), 918-941. <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2020-0151>
- Jin, J., Li, H., Li, Y., & Li, X. (2015). Transparency of global apparel supply chains: Quantitative analysis of corporate disclosures. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 29(2), 394-413. <https://doi.org/10.1002/csr.1744>
- Khan, M. E. (2014). Social sustainability in the ready-made garment (RMG) industry of Bangladesh. *Asian Social Science*, 10(6), 245. <https://doi.org/10.5539/ass.v10n6p245>
- Koster, M. J. F., Vos, B., & Valk, W. (2019). Drivers and barriers for adoption of a leading social management standard (SA8000) in developing economies. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 49(5), 534-551. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2018-0037>
- Kovid, R. K., Bhati, B., & Sharma, G. D. (2021). Entrepreneurial competencies, institutional voids and performance of small and medium enterprises. *Vision: The Journal of Business Perspective*, 29(1), 81-90. <https://doi.org/10.1177/09722629211058809>
- Kumar, V., Hallqvist, C., & Ekwall, D. (2017). Developing a framework for traceability implementation in the textile supply chain. *Systems*, 5(2), 33. <https://doi.org/10.3390/systems5020033>
- Kunusia, L., Namusonge, G., & Naikuru, S. (2024). Influence of entrepreneurial network ecosystem on growth of leather manufacturing small and medium enterprises in Kenya. *International Journal of Entrepreneurship and Project Management*, 9(2), 17-30. <https://doi.org/10.47604/ijepm.2371>
- Lafarre, A. (2023). The proposed corporate sustainability due diligence directive: Corporate liability design for social harms. *European Business Law Review*, 34(2), 213-240. <https://doi.org/10.54648/EULR2023017>
- Lawley, C., Haynes, M., Chudasama, B., ... & Lèbre, É. (2024). Geospatial data and deep learning expose ESG risks to critical raw materials supply: The case of lithium. *Earth Science Systems and Society*, 4(1), 10109. <https://doi.org/10.3389/esss.2024.10109>
- Lin, C. J., Efranto, R. Y., & Santoso, M. A. (2021). Identification of workplace social sustainability indicators related to employee ergonomics perception in Indonesian industry. *Sustainability*, 13(19), 11069. <https://doi.org/10.3390/su131911069>
- Malaquias, R. F., & Malaquias, F. F. O. (2020). Information and communication technologies adoption in small firms. *Management in Perspective*, 1(1), 101-123. <https://doi.org/10.14393/MIP-v1n1-2020-45770>

- Mármol, M., Sánchez, A., & Pérez, R. (2023). GRI reporting and ethical governance in the Italian fashion industry. *Sustainability*, 15(4), 3210. <https://doi.org/10.3390/su15043210>
- McCorquodale, R., & Nolan, J. (2021). The effectiveness of human rights due diligence for preventing business human rights abuses. *Netherlands International Law Review*, 68(3), 455-478. <https://doi.org/10.1007/s40802-021-00201-x>
- Meßmann, L., Zender, V., Thorenz, A., & Tuma, A. (2020). How to quantify social impacts in strategic supply chain optimization: State of the art. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120459. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120459>
- Mizrachi, M. (2024). Navigating global fashion policy: Labor, environment, and future directions for sustainability. *Academic Environmental Science*, 1(3), 1-15. <https://doi.org/10.20935/AcadEnvSci7452>
- Moktadir, M. A., & Ren, T. (2023). Leveraging environmental, social, and governance strategies for sustainable tannery solid waste management towards achieving sustainable development goals. *Sustainable Development*, 32(4), 2869-2898. <https://doi.org/10.1002/sd.2812>
- Moktadir, M. A., Ali, S. M., Rajesh, R., & Paul, S. K. (2018). Modeling the interrelationships among barriers to sustainable supply chain management in leather industry. *Journal of Cleaner Production*, 181, 631-651. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.245>
- Murmura, F., & Bravi, L. (2020). Developing a corporate social responsibility strategy in India using the SA 8000 standard. *Sustainability*, 12(8), 3481. <https://doi.org/10.3390/su12083481>
- Narayanan, N., Ghapar, F., Chew, L., ... & Daud, A. (2024). Artificial intelligence-powered risk assessment in supply chain safety. *Information Management and Business Review*, 16(3S), 107-114. [https://doi.org/10.22610/imbr.v16i3s\(i\)a.4124](https://doi.org/10.22610/imbr.v16i3s(i)a.4124)
- Neag, N., Pop, M., & Rus, D. (2020). A debate on issues regarding the new ISO 45001:2018 standard adoption. *MATEC Web of Conferences*, 305, 00002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202030500002>
- Nunes, R. R., Pigatin, L. B. F., Oliveira, T. S., Bontempi, R. M., & Rezende, M. O. O. (2018). Vermicomposted tannery wastes in the organic cultivation of sweet pepper: Growth, nutritive value and production. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 7(4), 313-324. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0217-7>
- Odimarha, A. C., Ayodeji, S. O., & Abaku, E. I. (2024). The role of technology in supply chain risk management: Innovations and challenges in logistics. *Magna Scientia Advanced Research and Reviews*, 10(2), 138-145. <https://doi.org/10.30574/msarr.2024.10.2.0052>
- Ofluoglu, H., Efendioğlu, N. O., Mutlu, M. M., & Atılgan, T. (2017). The best supplier selection by using analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation (FCE) methods: An example of a Turkish leather apparel company. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 27(4), 326-333. [Erişim: dergipark.org.tr]

- Outhwaite, O., & Martin-Ortega, O. (2019). Worker-driven monitoring: Redefining supply chain monitoring to improve labour rights in global supply chains. *Competition & Change*, 23(4), 333-358. <https://doi.org/10.1177/1024529419865690>
- Pyun, J., Kim, D., & Rha, J. (2023). Understanding the EU directive on corporate sustainability due diligence and examining strategic responses. *Korean Production and Operations Management Society*, 34(4), 495-519. <https://doi.org/10.32956/kopoms.2023.34.4.495>
- Rao, M., Bernaz, N., & Boer, A. (2023). Holding retail corporations accountable for food waste: A due diligence framework informed by business and human rights principles. *Journal of Business Ethics*, 193(3), 679-689. <https://doi.org/10.1007/s10551-023-05572-0>
- Reem, C., Chowdhury, M., Ashrafudoulla, M., & Ha, S. (2025). Leveraging blockchain and AI for biofilm control in food processing environments. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(5), e13261. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70261>
- Rodríguez-Martín, B., Rodríguez-González, P., & Domingo, R. (2023). Asking about risk in a company: A new approach to learning ISO 45001 in engineering programs. *Standards*, 3(1), 21-30. <https://doi.org/10.3390/standards3010003>
- Rosalin, G., & Santosa, W. (2023). Evaluation of suppliers in the implementation of sustainable supply chains for the apparel industry in Indonesia. *Journal of Social Research*, 2(10), 3534-3543. <https://doi.org/10.55324/josr.v2i10.1421>
- Ross, G. (2019). Turning challenge into opportunity - enhancing worker labour rights through supply chain collaboration. *SPE Health, Safety, Security, Environment, and Social Responsibility Conference*. <https://doi.org/10.2118/197835-MS>
- Santos, G., Murmura, F., & Bravi, L. (2017). SA 8000 as a tool for a sustainable development strategy. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 25(1), 95-105. <https://doi.org/10.1002/csr.1442>
- Sartor, M., Orzes, G., Di Mauro, C., Ebrahimi, M., & Nassimbeni, G. (2016). The SA8000 social certification standard: Literature review and theory-based research agenda. *International Journal of Production Economics*, 175, 164-181. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.02.009>
- Sartor, M., Orzes, G., Touboulic, A., Culot, G., & Nassimbeni, G. (2020). ISO 14001 standard: Literature review and theory-based research agenda. *Quality Management Journal*, 27(1), 31-52. <https://doi.org/10.1080/10686967.2019.1689793>
- Schaefer, K., Corner, P. D., & Kearins, K. (2015). Social, environmental and sustainable entrepreneurship research. *Organization & Environment*, 28(4), 394-413. <https://doi.org/10.1177/1086026615621111>
- Schulte, J., & Hallstedt, S. I. (2017). Company guide to implementation of sustainability criteria in product development. *Sustainability*, 9(11), 2058. <https://doi.org/10.3390/su9112058>

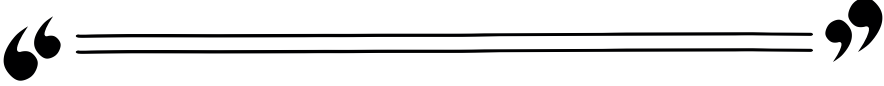
- Shashwathi, B. S. (2024). Sustainable marketing in the luxury industry. In *Sustainable Marketing and Consumer Behavior* (pp. 329-337). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781003395812-22>
- Shulman, S. (2024). Corporate sustainability due diligence. *Columbia Journal of Environmental Law*, 49(2), 479-523. <https://doi.org/10.52214/cjel.v49i2.12633>
- Sinnig, J., & Zetzsche, D. (2025). The EU's corporate sustainability due diligence directive: From disclosure to mandatory prevention of adverse sustainability impacts in supply chains. *European Journal of Risk Regulation*, 16(2), 628-652. <https://doi.org/10.1017/err.2024.100>
- Šolc, M., Blaško, P., Girmanová, L., & Kliment, J. (2022). The development trend of the occupational health and safety in the context of ISO 45001:2018. *Standards*, 2(3), 294-305. <https://doi.org/10.3390/standards2030021>
- Spangenberg, J. H., & Omann, I. (2006). Assessing social sustainability: Social sustainability and its indicators. *International Journal of Sustainable Development*, 9(1-2), 20-52. <https://doi.org/10.1504/IJSD.2006.009107>
- Sultana, D. (2021). Sustainability and transparency to safeguard fashion industry workers. *Pro Futuro*, 10(4). <https://doi.org/10.26521/PROFUTURO/2020/4/9468>
- Swarnakar, V., Singh, A. R., & Antony, J. (2022). Prioritizing indicators for sustainability assessment in manufacturing process: An integrated approach. *Sustainability*, 14(6), 3264. <https://doi.org/10.3390/su14063264>
- Thomale, C. (2024). Das Private Enforcement der EU-Lieferkettenrichtlinie. *Rabels Zeitschrift für ausländisches und internationales Privatrecht*, 88(3), 425-493. <https://doi.org/10.1628/rabelsz-2024-0046>
- Thorens, M., Bernaz, N., & Hospes, O. (2024). Advocating for the EU corporate sustainability due diligence directive against the odds: Strategies and legitimization. *JCMS: Journal of Common Market Studies*, 63(2), 606-623. <https://doi.org/10.1111/jcms.13623>
- Tiba, S., & Bélaïd, F. (2020). The pollution-convergence hypothesis: A comprehensive assessment. *Energy*, 214, 118865. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118865>
- Toffel, M. W., & Brammer, S. (2015). Codes in context: How states, markets, and civil society shape adherence to global labor standards. *Regulation & Governance*, 9(3), 205-223. <https://doi.org/10.1111/rego.12076>
- Torres, M. L., Izquierdo, M. A., Ferrero-Ferrero, I., Escrig-Olmedo, E., & Rivera-Lirio, J. M. (2022). Social life cycle analysis of textile industry impacts for greater social sustainability of global supply chains. *Systems*, 11(1), 8. <https://doi.org/10.3390/systems11010008>
- Turzo, T., Chirieleison, C., Montrone, A., & Scrucca, L. (2025). Sustainability standards and decertification: A Bayesian analysis of SA8000. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 32(5), 6951-6965. <https://doi.org/10.1002/csr.70069>

- Tyagi, P. K., Shaw, M., & Majumdar, A. (2022). Patterns and trends in socio-environmental sustainability practices in leather industry: A bibliometric analysis. *Proceedings of the 2nd Indian International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 16-18). Warangal, India: IEOM Society International. [Erişim: ieomsociety.org]
- Tyfield, D. (2022). The cultural political economy of research and innovation: Meeting the problem of growth in the Anthropocene. In *Research Handbook on the Sociology of Innovation and Entrepreneurship* (pp. 217-231). Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781839100673.00023>
- Uvarova, O., & Bernaz, N. (2025). Heightened human-rights due diligence as risk governance: Food-retail supply chains in wartime Ukraine. *European Journal of Risk Regulation*, 1-17. <https://doi.org/10.1017/err.2025.10049>
- Vandenbroucke, S. (2024). The evolution of codes of conduct to ensure labor rights in global supply chains. *AJIL Unbound*, 118, 297-302. <https://doi.org/10.1017/aju.2024.45>
- Vargas-Merino, J. A., Rikap, C., & Bianco, M. (2023). Reinforcing the holistic perspective of sustainability: Analysis of the drivers of sustainability. *Sustainability*, 15(10), 8401. <https://doi.org/10.3390/su15108401>
- Velluti, S. (2024). Labour standards in global garment supply chains and the proposed EU corporate sustainability due diligence directive. *European Labour Law Journal*, 15(4), 822-850. <https://doi.org/10.1177/20319525241239283>
- Venkataaraman, A., & A, D. (2025). What fuels stakeholder impact on sustainability: A fuzzy DEMATEL analysis of the leather supply chain ecosystem. *Discover Sustainability*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01428-x>
- Walsh-Dilley, M., Wolford, W., & McCarthy, J. (2016). Rights for resilience: Food sovereignty, power, and resilience in development practice. *Ecology and Society*, 21(1). <https://doi.org/10.5751/ES-07981-210111>
- WCED (World Commission on Environment and Development). (1987). *Our common future*. Oxford: Oxford University Press.
- Wei, C., Wang, X., Sun, S., Lu, Q., Zou, X., Xie, L., ... & Liu, X. (2023). A “three-in-one” strategy based on an on-demand multifunctional fluorescent amphoteric polymer for ecological leather manufacturing. *Green Chemistry*, 25(15), 5956-5967. <https://doi.org/10.1039/d3gc01446k>
- Wheeler, K. (2012). *Fair trade and the citizen-consumer: Shopping for justice?*. Palgrave Macmillan. <https://doi.org/10.1057/9781137283672>
- Wickramage, D., Gunarathna, G., & Samarawickrama, S. (2024). Sri Lankan leather industry: Constraints in expanding access to the global market. *Industrial Development Review*, 2024(3), 18-21. <https://doi.org/10.31705/IDR.2024.3>
- Widayani, A. A. D., Suardhika, I. N., Astiti, N. N. A. P., & Rustiarini, N. W. (2022). Triple helix: The concept of synergy for SMEs to increase business performance. *Review of Applied Socio-Economic Research*, 24(2), 183-198. <https://doi.org/10.54609/reaser.v24i2.183>

- Xuan, L. T. T., Tran, K. T., & Lieu, N. T. M. (2018). Drivers for and obstacles to corporate social responsibility practice in Vietnam – A study in small and medium enterprise exporters. *VNU Journal of Science: Economics and Business*, 34(2). <https://doi.org/10.25073/2588-1108/vnueab.4158>
- Yang, S., Hu, W., Mupandawana, M., & Yun, L. (2012). Consumer willingness to pay for fair trade coffee: A Chinese case study. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 44(1), 21-34. <https://doi.org/10.1017/s1074070800000146>
- Yu, Y., Li, Z., Mangla, S. K., & Song, M. (2025). Robot built different: How it affects supply chain resilience. *Journal of Business Logistics*, 46(3), 354-382. <https://doi.org/10.1111/jbl.70028>
- Zhu, R., Sun, S., & Huang, Y. (2021). Fair trade coffee and inclusive globalization: A metamorphosis of institutional entrepreneurship. *Multinational Business Review*, 29(2), 189-209. <https://doi.org/10.1108/mbr-11-2019-0157>



FONKSİYONEL ve SÜRDÜRÜLEBİLİR TEKSTİL YÜZEYLERİ İÇİN YENİLİKÇİ DOĞAL BOYAMA YAKLAŞIMLARI



Gamze GÜLŞEN BAKICI¹

Deniz Mutlu ALA²

¹ Doç.Dr.Gamze GÜLŞEN BAKICI (ORCID:0000-0002-4241-7096)

² Doç.Dr.Deniz Mutlu ALA (ORCID:000000025864308X)

Çukurova Üniversitesi, Adana Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Tekstil Giyim Ayakkabı ve Deri Bölümü

1. GİRİŞ

1.1. Hızlı moda endüstrisi ve çevresel sürdürülebilirlik sorunları

Hızlı moda, güncel trendleri çok kısa sürede ve düşük maliyetle piyasaya sunmayı hedefleyen, yüksek tempolu bir üretim ve tüketim modelidir. Kısa tedarik süreleri, seri üretim ve hızlı koleksiyon yenileme bu sistemin temel özellikleridir. Geleneksel moda anlayışına kıyasla yeni ürünler tüketiciyle çok daha hızlı buluşmakta, bu durum moda döngülerini kısaltarak aşırı ve bilinçsiz tüketimi teşvik etmektedir. Artan tüketim; doğal kaynak kullanımı, arazi baskısı, sera gazı salınımları ve su kirliliğinde önemli artışlara yol açmaktadır. Bu nedenle, moda sektörü de dâhil olmak üzere sorumlu tüketim yaklaşımlarının benimsenmesi iklim kriziyle mücadelede kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır (Aponte vd., 2024).

Tekstil sektörü, Bangladeş, Sri Lanka, Vietnam ve Hindistan gibi gelişmekte olan ülkelerde istihdam ve döviz girdisi sağlayarak ekonomiye katkı sunsa da, kimyasal süreçlerin yetersiz denetlenmesi ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Her yıl yaklaşık 10.000 farklı ticari boyanın üretildiği ve bunların önemli bir kısmının yüzey sularına karıştığı bildirilmektedir. Orta ölçekli bir tekstil tesisinin yüksek miktarda su tüketmesi ve boyama ile terbiye işlemlerinin endüstriyel su kirliliğinde önemli paya sahip olması, sektörün çevresel etkilerini daha da artırmaktadır. Bu durum, tekstil endüstrisini sürdürülebilirlik açısından önemli bir çevresel sorun alanı hâline getirmektedir (Islam vd., 2025).

1.2. Sentetik boyaların karbon ayak izi ve toksik etkileri

Tekstil renklendirmesinde tehlikeli sentetik boyaların giderek artan kullanımı, insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkileri açısından ciddi endişelere yol açmıştır. Küresel ölçekte tekstil uygulamalarında 10.000'den fazla farklı sentetik boya ve kimyasalın kullanıldığı ve toplam miktarın 700.000 tonu aştığı bildirilmektedir. Yaygın olarak kullanılan doğal bir lif olan pamuk, ağırlıklı olarak reaktif boyalarla boyanmakta; bu durum, farklı renklerin elde edilebilmesi için çok sayıda sentetik boyanın kullanımını gerektirdiğinden önemli bir çevresel ayak izi oluşturmaktadır (Hossain vd., 2023).

Günümüzde sentetik boyalar, hızlı ve tutarlı renklendirme, geniş renk yelpazesi, kolay uygulanabilirlik, yüksek stabilite ve düşük enerji gereksinimi gibi avantajları sayesinde tekstil endüstrisinde yaygın kullanılmakta ve küresel boya pazarının yaklaşık %75'ini oluşturmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar, uygulanan boyaların %15'ine kadar olan kısmının liflere bağlanmadan atık suya geçtiğini ve boyama, fikse etme ile yıkama işlemlerinin çok yüksek miktarda su tüketimine neden olduğunu göstermektedir. Bu süreçler sonucunda oluşan atık sular; yüksek BOİ ve KOİ değerlerinin yanı sıra klorlu

bileşikler, ağır metaller, kükürt, nitratlar, naftoller, sabunlar, krom bileşikleri, formaldehit, benzidin, şelatlayıcı ajanlar ile boya ve pigmentler gibi çok sayıda organik ve inorganik kirletici içermektedir. Bazı toksik bileşenlerin arıtma sonrası dahi suda kalabilmesi, bu atık suların hava, toprak, bitkiler ve su kaynaklarında çoklu kirlenmeye ve ciddi sağlık sorunlarına yol açmasına neden olmaktadır (Slama vd.,2021; Taha ve Gouda, 2025; Baaka vd., 2023).

Tekstil endüstrilerinden deşarj edilen sıvı ve katı atıklar sebebiyle toprakta meydana gelen kirlilik; bitkilerde oksidatif strese yol açarak bitki gelişimini baskılamakta, protein içeriğini azaltmakta, fotosentez hızını ve CO₂ asimilasyon oranlarını düşürmektedir. Bu olumsuz etkiler, tarımsal verimliliğin azalmasına ve ekosistem dengesinin bozulmasına neden olmaktadır (Slama vd., 2021).

Tekstil boya endüstrileri; kükürt, formaldehit, azot oksitleri, uçucu bileşikler, partikül madde ve tozlar gibi hoş olmayan kokuya sahip toksik gazları atmosfere salmaktadır. Bu tür hava kirliliği, başta insanlar (çalışanlar ve tüketiciler) olmak üzere hayvanları, nihai ürünleri ve genel olarak çevreyi olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Slama vd., 2021).

Endüstriyel boyalar içeren atık suların en ciddi etkileri, denizler, nehirler, göller ve akarsular gibi alıcı su ortamlarında ortaya çıkmakta ve bu etkiler geniş alanlara yayılarak sucul ekosistemlere zarar vermektedir. Farklı renklere sahip boyaların deşarjından kaynaklanan bu atık sular, çok sayıda toksik bileşen içermektedir. Boyalar, 1 mg/L gibi çok düşük konsantrasyonlarda dahi algılanabilir ve zor parçalanabilir nitelikteyken, tekstil atık sularındaki konsantrasyonları ortalama 300 mg/L'ye kadar ulaşabilmektedir. Atık suların koyu rengi ve yüksek bulanıklığı, güneş ışığının suya nüfuzunu engelleyerek çözünmüş oksijen seviyelerini düşürmekte ve pH dengesini bozmakta; bu durum sucul bitkilerde fotosentezin baskılanmasına, mikroorganizmalar tarafından düşük biyobozunurluğa ve besin zinciri üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır (Slama vd., 2021). Tekstil atık sularında ve yeraltı sularında bulunabilen kimyasallar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Tekstil atık sularında ve yeraltı sularında bulunabilen kimyasallar (İslam vd., 2025).

Kimyasal / Kirlетici Madde	Kullanım Aşaması	Hedef Organlar ve Sağlık Etkileri
Formaldehit	Kumaş ve tekstillerin buruşmaz, çekmez ve su itici hale getirilmesi (apre işlemleri)	Cilt irritasyonu, alerjik dermatit, solunum yolu tahrişi (öksürük, hırıltı, boğaz ağrısı, nefes darlığı), astım atakları, göz irritasyonu
Klorlu çözücüler (Trikloroetan – TCE)	Kumaş ağartma ve ön işlem	Merkezi sinir sistemi, karaciğer ve böbrek hasarı; atmosferik süreçleri bozarak ozon tabakasına zarar
Karbon disülfid (CS₂)	Viskon (rayon) liflerinin üretimi	Nörolojik ve psikiyatrik bozukluklar, gastrointestinal ve cinsel problemler, üreme toksisitesi, doğum kusurları, lösemi, kronik cilt ve böbrek hastalıkları
Gümüş ve nano gümüş bileşikler	Antimikrobiyal ve antibakteriyel apre işlemleri	Bakteriyel direnç gelişimi, ekotoksosite; akciğer ve sinir hücreleri üzerinde toksik etki
Klorlu parafinler (SCCPs) (Kalıcı Organik Kirlетiciler – POPs)	Alev geciktirici; askeri, su geçirmez ve çürümeye dayanıklı ağır tekstiller	Biyobirikim, sucul canlılara toksisite, endokrin bozucu etki; böbrek, karaciğer ve tiroid hasarı
Dioksinler	Koruyucu işlemler, ağartma ve boya üretimi	Akciğer ve karaciğer kanseri, diyabet, kardiyovasküler hastalıklar, erken menopoiz, endometriozis, testosteron ve tiroid hormonlarında azalma
Organotin bileşikler (DBT, TBT, TPhT)	Biyosit; ağır hizmet tekstillerinde koku oluşumunu azaltma	Bağıışıklık ve üreme sistemi hasarı; cilt, göz ve mukozalarda ciddi irritasyon
Klorofenoller	Ağır hizmet tekstillerinde koruyucu ve fungusit	Sinir sistemi, böbrekler, kan, karaciğer ve gözler üzerinde toksik etki
Toluen, metil izobütil keton, ksilen, metil etil keton	Tekstil baskı ve kurutma işlemlerinde solvent bazlı mürekkepler	Mesleki maruziyet riski; cilt ve göz irritasyonu, baş dönmesi, mide bulantısı, baş ağrısı, uyuşukluk, titreme, konuşma bozukluğu, bilinç kaybı
Alkilfenol etoksilatlar	Yün apre işlemleri; deterjan ve ıslatıcı katkı maddeleri	Endokrin bozucu etki; özellikle östrojen hormonunu etkileyerek hormon duyarlı dokularda tümör gelişimi
Nonilfenol etoksilatlar	Yıkama, ağartma ve baskı işlemlerinde ıslatıcı ajan	Üreme bozuklukları, hormonal dengesizlikler, fertilite azalması ve sperm kalitesinde düşüş
Ağır metaller (Pb, Cd, Cr, As, Hg)	Tekstil boyları ve pigment formülasyonu	Genotoksik, mutajenik ve kanserojen etkiler; üreme bozuklukları, DNA hasarı, böbrek ve karaciğer hasarı
Azo boyalar (reaktif, remazol, metil nitro vb.)	Pamuk başta olmak üzere viskon, ipek, yün ve sentetik liflerin boyanması	Kanserojen, mutajenik ve genotoksik; sucul canlılar için toksik; alerjik cilt hastalıkları ve solunum problemleri

Tekstil endüstrisinde, lif üretiminden başlayarak malzemenin farklı işlem ve dönüşüm aşamalarında kaliteyi artırmak amacıyla çok sayıda kimyasal madde kullanılmaktadır. Bu maddeler deri yoluyla emilebilmekte veya soluma yoluyla vücuda girebilmekte, sağlık riskleri oluşturmakta ve alerjik reaksiyonlara ya da cilt tahrişlerine neden olabilmektedir (Machado vd., 2025). Tekstil endüstrilerinde oluşan boya ürünleri ve yan ürünleri, atık su deşarjlarında bulunan kirleticiler ya da üretim sırasında ortaya çıkan tozlar beyin, böbrek, karaciğer ve kalp gibi hayati organları ile solunum, bağışıklık ve üreme sistemlerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ortaya çıkan hastalıklar; doğrudan maruziyet sonucu, özellikle soluma yoluyla gerçekleşebilen solunum problemleri, astım, alerjik reaksiyonlar, mide bulantısı ile cilt ve göz tahrişi ve dermatit şeklinde görülebilmektedir. Bunun yanı sıra, besin zinciri yoluyla dolaylı maruziyet sonucunda ise tüberküloz, kanser, kanamalar, genetik mutasyonlar ve kalp hastalıkları gibi daha ciddi sağlık sorunları ortaya çıkabilmektedir (Slama vd., 2021).

1.3. Doğal boyaların sürdürülebilir tekstilde yeniden yükselişi

Sentetik renklendiriciler, canlı renkler ve verimli boyama çözümleri sunarak birçok endüstrinin dönüşümünde önemli bir rol oynamıştır. Ancak bu maddelerin yaygın kullanımı; mesleki riskler ve çevresel toksisite gibi ciddi dezavantajları da beraberinde getirmiştir. Küresel ölçekte sentetik boyalara olan talep artmaya devam ettikçe, bu sorunlar daha da derinleşmekte ve sürdürülebilir alternatifler ile daha sıkı düzenleyici önlemlere olan ihtiyacı artırmaktadır (Negi, 2025).

Doğal boyaların kullanımı; çevre dostu olmaları, vücutla doğrudan temasa uygun ve güvenli olmaları, basit uygulama özellikleri, doğa ile uyumlu yapıları, yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri ve formülasyon sırasında kimyasal reaksiyona girme olasılıklarının düşük olması gibi birçok avantaja sahiptir. Doğal boyalar/renklendiriciler, genellikle insan gözü için yumuşak, parlak ve sakinleştirici tonlar sunmaktadır. Çoğu doğal boya sağlık açısından risk oluşturmaz; hatta bazı durumlarda tedavi edici özellikler gösterebilmektedir. Ayrıca, doğal boyaların kullanımı atık bertarafı açısından herhangi bir karmaşıklık yaratmamaktadır. Sürdürülebilir boyama bağlamında doğal boyalar, sentetik boyalara karşı son derece uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır. Bunun yanı sıra doğal boyalar; gıdaların renklendirilmesi, kozmetik üretimi, boya-duyarlı güneş pilleri, histolojik örneklerin boyanması, pH tayini ve daha birçok alanda kullanılmaktadır. Son yıllarda, doğal boyaların farklı yönleri akademik çevrelerde giderek artan bir ilgiyle ele alınmış ve bu alandaki araştırmalar hız kazanmıştır (Dey vd., 2025).

Son yıllarda tüketicilerin tekstil malzemelerinin işlevselliği ve güvenliği konusundaki beklentileri artmış; toplumda sürdürülebilir, yeşil ve çevre dostu

ürünlere yönelik güçlü bir yönelim gözlemlenmiştir. Bu eğilimle birlikte, sahip oldukları böcek kovucu, koku giderici, alev geciktirici, UV koruyucu, floresan özellikler, antimikrobiyal aktivite, biyouyumluluk, biyobozunurluk ve toksik olmama gibi nitelikler sayesinde doğal boyalara dönüş yeniden önem kazanmıştır. Bu özellikler, ekolojik ve katma değeri yüksek tekstillerin üretilmesinde tekstil endüstrisinde önemli bir dönüşüm yaratmıştır (Danila vd., 2021).

2. DOĞAL BOYALARIN SINIFLANDIRILMASI ve TEMEL KAVRAMLAR

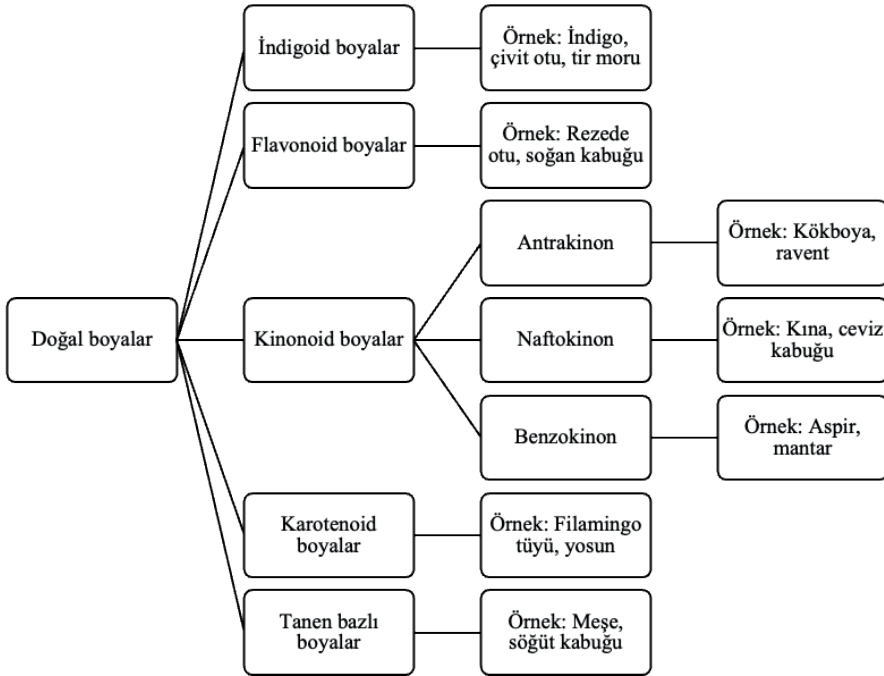
Doğal renklendiriciler; kaynakları, çözünürlük özellikleri ve kimyasal yapıları gibi farklı kriterlere göre sınıflandırılabilir. Sınıflandırılabilir.

2.1. Doğal boyaların kaynaklarına göre sınıflandırılması

Doğal boyalar, bitkilerin kök, kabuk, yaprak, meyve, odun, tohum ve çiçek gibi farklı kısımlarından elde edilmektedir (Danila vd., 2021). Bitkisel kökenli boyalara; Indigofera tinctoria bitkisinden elde edilen indigo, Curcuma longa L. bitkisinden zerdeçal (kurkumin), Rubia tinctorum bitkisinden kökboya örnek verilebilir. Hayvansal boyalar ise böcekler ve yumuşakçalardan elde edilmekte olup, koşinil böceğinden elde edilen karminik asit ve deniz salyangozundan elde edilen Tir (Tyrian) moru bu grubun bilinen örneklerindendir; ancak hayvansal kökenli boyalar etik tartışmalara konu olmaktadır. Mineral bazlı pigmentler, malakit ve ultramarin gibi doğal minerallerden elde edilmekte ve tarihsel olarak sanat ile tekstil boyamacılığında kullanılmıştır. Bununla birlikte, mineral pigmentlerin özütlemesi yerel ekosistemler üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir (Negi, 2025).

2.2. Doğal boyar maddelerin kimyasal yapılarına göre sınıflandırılması

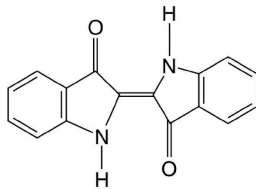
Doğal boyar maddeler, sahip oldukları temel kimyasal iskeletler ve fonksiyonel gruplara bağlı olarak indigoid, flavonoid, kinonoid, karotenoid ve tanen bazlı bileşikler başta olmak üzere farklı sınıflar altında incelenmektedir (Şekil 1).



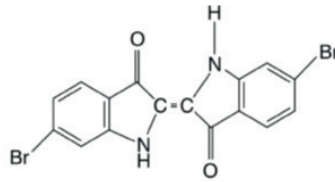
Şekil 1. Doğal boyaların kimyasal yapılarına göre sınıflandırılması (Uddin vd., 2022)

İndigoid Boyalar

Bu grupta en yaygın kullanılan doğal boya indigo olup, temel bileşeni indigotindir (CI Natural Blue 1). İndigotin, indigo bitkilerinin yapraklarında bulunmakta ve özellikle denim boyamacılığında kullanılan mavi renkli bir organik boyarmaddedir. İndigo boyalarının başlıca kaynakları Indigofera, Isatis ve Polygonum cinslerine ait bitkiler olup, özellikle Indigofera türlerinin yüksek üretim verimi sağladığı bildirilmektedir. Bu gruptaki bir diğer önemli boya olan Tir moru (purpura), Murex türü deniz salyangozlarından elde edilen, indigonun bromlu türevlerinden oluşan bir renklendiricidir; ancak üretimi için çok sayıda deniz canlısına ihtiyaç duyulması nedeniyle kaynakların tükenmesi sonucunda günümüzde kullanımından büyük ölçüde vazgeçilmiştir (Uddin vd., 2022).



a

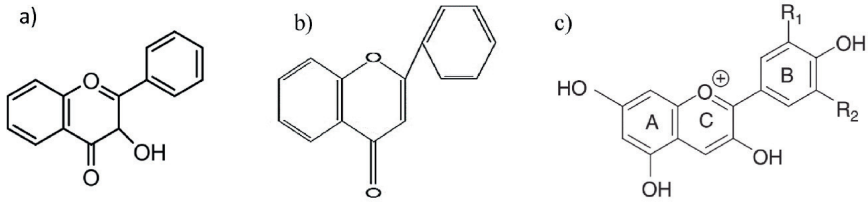


b

Şekil 2. a)İndigo b) Tir moru (tyrian purple) boyalarının kimyasal yapısı (Uddin vd., 2022).

Flavonoid boyalar

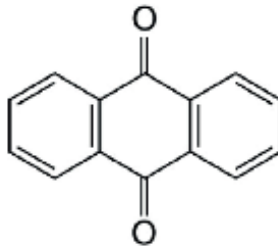
Flavonoidler, bitkilerde yaygın olarak bulunan C6–C3–C6 iskeletine sahip polifenolik yapıda doğal bileşiklerdir. Açık sarıdan kırmızı ve mavi tonlara uzanan geniş bir renk yelpazesine sahiptir. Bitkilerde savunma ve sinyal mekanizmalarında görev almakta ve UV-B ışığını absorbe ederek dokuları radyasyon hasarına karşı korumaktadır. Yaygın flavonoidlerin kimyasal yapıları Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. a) Flavonolün yapısı (açık sarı), b) Flavonun yapısı ve c) Antosiyaninin yapısı (turuncudan mora kadar) (Uddin vd., 2022)

Kinonoid Boyalar

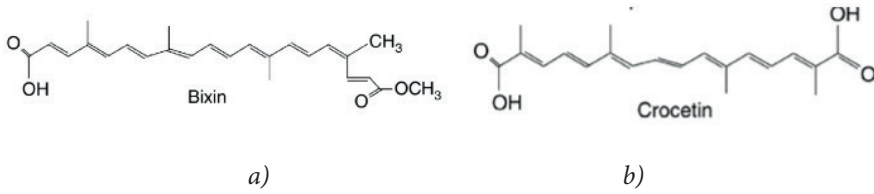
Kinonoid boyalar, doğadaki en çeşitli doğal renklendiriciler arasında yer almakta olup sarıdan kırmızıya uzanan geniş bir renk aralığı sunmaktadır. Kimyasal yapılarına göre antrakinonlar, naftokinonlar ve benzokinonlar olarak sınıflandırılır. Bu boyalarda, kırmızı tonların büyük bölümü antrakinon yapılıdır ve bitkisel ile hayvansal kaynaklardan elde edilmektedir. Avrupa ve Hint kökboyaları (*Rubia tinctorum* L. ve *Rubia cordifolia* L.), alizarin ve purpurin içeriğiyle bu grubun en bilinen örnekleri arasında yer alırken; ravent, lak, morinda ve koşinil gibi boyaların da iyi yıkama ve ışık haslığına sahip olduğu bildirilmektedir. Naftokinon boyalar turuncu-kırmızımsı-kahverengi tonlar vermekte olup, kına bitkisindeki lavson ve ceviz türlerindeki juglon bu grubun öne çıkan boyarmaddeleridir. Kına hem geleneksel hem de endüstriyel tekstil boyamacılığında yaygın olarak kullanılmaktadır. Benzokinon boyarmaddelerin düşük lif afiniteleri nedeniyle tekstilde kullanımları sınırlıdır.



Şekil 4. Antrakinon boyanın kimyasal yapısı (Uddin vd., 2022)

Karotenoid boyalar

Karotenoid boyalar, bitkilerde, alglerde ve bazı mikroorganizmalarda doğal olarak bulunan sarı kırmızı turuncu renkler veren doğal boyarmaddelerdir. Farklı kaynaklardan yüzlerce karotenoid tanımlanmış olup, bunların çoğu karotenler ve ksantofillerden oluşmaktadır. Yaklaşık 40 karbon atomu içeren konjuge bağ sistemine sahip olmaları, ışık soğurma ve reaktivite özelliklerini belirlemektedir. Tekstil boyamacılığında en yaygın karotenoid kaynakları safran (*Crocus sativus* L.) ve annatto (*Bixa orellana* L.) tohumlarıdır (Şekil 5).



Şekil 5. a) *Biksin (anetto)*, b) *Krosin (safran)* kimyasal yapıları (Uddin vd, 2022)

Tanen bazlı boyalar

Tanenler, molekül ağırlıkları 500–3000 arasında değişen, suda çözünebilen ve polifenolik yapıya sahip bileşiklerdir. Meyve, bakla, bitki mazıları (gal), yaprak, kabuk, odun ve kök gibi bitkisel kaynaklardan elde edilirler. Kimyasal yapılarına göre hidrolize olabilir tanenler, kondense tanenler ve florotanenler olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Tekstil boyamacılığında tanenler, doğal bir mordan gibi davranarak boyaların liflere olan afinitesini artırmakta ve sarı, kahverengi, gri ile siyah tonların elde edilmesinde temel bileşenler arasında yer almaktadır (Uddin vd., 2022).

2.4. Geleneksel özütleme teknikleri

Doğal boyalar, kaynaklarından; çözücü ile örnek arasındaki temasın ve etkileşimin artırılması yoluyla kütle transfer direncinin azaltılması sayesinde ekstrakte edilebilmektedir. Ancak bu yöntemler; yüksek zaman, enerji ve çözücü tüketimi, düşük özütleme verimi ve ısıya duyarlı bileşiklerin kaybı gibi önemli dezavantajlara sahiptir (Muruganandham vd., 2025).

2.4.1. Sulu Özütleme

Sulu özütleme, doğal boyaların elde edilmesinde suyun çözücü olarak kullanıldığı yaygın bir yöntem olup, bitkisel materyallerin su içerisinde ısıtılmasıyla boyar maddelerin ortama geçmesi esasına dayanır. Bitki türü ve hedeflenen renk yoğunluğuna bağlı olarak sıcaklık, pH ve özütleme süresi ayarlanmakta; işlem sonunda katı parçacıklar filtreleme ile uzaklaştırılarak konsantre bir sulu boya çözeltisi elde edilmektedir. Sert kimyasalların

kullanımını azaltması ve düşük çevresel etkiye sahip olması nedeniyle, sulu özütleme çevre dostu ve yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir (Pranta ve Rahaman, 2024).

2.4.2. Asidik Özütleme

Asidik özütleme, doğal boyaların sitrik veya asetik asit gibi asidik çözeltiler kullanılarak bitkisel materyallerden ayrıştırılmasına dayanan bir yöntemdir. Asidik ortam, hücre duvarlarını ve moleküler bağları parçalayarak boyar maddelerin çözünürlüğünü artırmakta, yüksek sıcaklıklar ise pigment salınımını daha da iyileştirebilmektedir. İşlem sonunda katı kalıntılar filtreleme ile uzaklaştırılarak konsantre bir asidik boya çözeltisi elde edilir. Asidik ortamda daha iyi çözünen doğal boyalar için yaygın olarak kullanılan bu yöntemde, asitlerin güvenli kullanımı ve uygun bertarafı çevresel etkilerin azaltılması açısından kritik önem taşımaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024).

2.4.3. Alkali Özütleme

Alkali özütleme, doğal boyaların sodyum hidroksit veya sodyum karbonat gibi bazik çözeltiler kullanılarak bitkisel materyallerden elde edilmesine dayanan yaygın bir yöntemdir. Alkali ortam, hücresel yapıları parçalayarak boyar maddelerin çözücüye geçmesini kolaylaştırmakta; gerekirse ısıtma ile pigment çözünürlüğü ve özütleme hızı artırılmaktadır. Filtreleme sonrası kullanıma hazır alkali boya çözeltisi elde edilir. Bazı doğal boyaların alkali ortamda daha kararlı olması nedeniyle tercih edilen bu yöntemde, bazik çözeltilerin güvenli kullanımı ve çevreye zarar vermeyecek şekilde bertarafı önem taşımaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024).

2.4.4. Çözücü Özütlemesi

Çözücü özütlemesinde, doğal boyalar etanol, metanol veya hekzan gibi organik çözücüler kullanılarak bitkisel materyallerden ayrıştırılmaktadır. Boya molekülleri çözücü içinde çözünerek özütlemesi kolaylaşmakta; çözünürlüğü artırmak amacıyla karıştırma veya ısıtma uygulanabilmektedir. İşlem sonunda çözücünün uzaklaştırılmasıyla konsantre doğal boya çözeltisi elde edilir. Suda çözünürlüğü düşük boyalar için etkili olan bu yöntemde, organik çözücülerin güvenli kullanımı ve uygun bertarafı çevresel açıdan kritik önem taşımaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024).

2.5. Mordan kavramı ve doğal boyamadaki rolü

Mordanlar, doğal boyama sürecinde boyanın liflere tutunmasını ve dayanıklılığını artıran, boya ile tekstil lifi arasında bağ oluşturarak fiks edici ajan görevi gören maddelerdir. Şap gibi metal tuzları veya tanen gibi organik bileşikler olabilen mordanlar, renk canlılığını ve haslığı iyileştirerek yıkama ve aşınma ile renk kaybını azaltmakta; farklı mordanların kullanımıyla

siyah-kahverengi ve yeşil-sarı-turuncu gibi geniş bir renk aralığı elde edilebilmektedir. Potasyum alüminyum sülfat (şap), kalsiyum karbonat ve demir(II) sülfat en yaygın mordanlar arasında yer almaktadır (Lopez-Rodriguez vd., 2024; Dey vd., 2025). Bununla birlikte sürdürülebilir boyama uygulamalarında, geleneksel mordanların çevresel etkilerini azaltmaya yönelik çevre dostu alternatiflere olan ilgi artmakta; bu yaklaşımlar hem boya fiksasyonunu ve haslığı iyileştirmekte hem de ekolojik açıdan sorumlu tekstil üretimine katkı sağlamaktadır (Dey vd., 2025).

Tablo 2. Bitkisel doğal boyamacılıkta kullanılan biyo-mordanlar (Che ve Yang, 2022)

Biyo-Mordan Kaynağı	Kimyasal Bileşim	Uygulanabildiği Lif Türleri
<i>Memecylon scutellatum</i> , mazi, algler, limon	Tanik asit ($C_{76}H_{52}O_{46}$)	Pamuk, keten, kenevir, jüt
Kestane, mazi, nar, Nil akasyası, kına, zerdeçal, biberiye, mazi meşesi, valonya taneni, mirabolan	Tanenler (polifenolik bileşikler)	Yün
Zerdeçal, nar, limon	Tanenler, kurkuminoidler, organik asitler	İpek
Limon, mazi	Organik asitler, tanenler	Polyester
Kına, nar, <i>Pistacia fraxinifolia</i>	Fenolik bileşikler, lavson, tanenler	Naylon
Sitrik asit	Sitrik asit ($C_6H_8O_7$)	Yün, pamuk, naylon, naylon/elastan
Tartarik asit, oksalik asit	$C_4H_6O_6$, $H_2C_2O_4$	Naylon/elastan
Krem tartar (potasyum bitartrat)	Potasyum hidrojen tartarat ($C_4H_5KO_6$)	Pamuk, viskon, ramie, yün, bambu
Peynir altı suyu proteini (bovin serum albümini, laktalbümin)	Proteinler	Pamuk
Sodyum aljinat	$C_6H_9NaO_7$	Pamuk
Yağsız süt tozu	Protein, laktoz, yağ, kül	Rayon
Sodyum karbonat	Na_2CO_3	Yün, pamuk

2.6. Geleneksel Boyama

Boyama, tekstil ürünlerine estetik bir görünüm kazandırmak amacıyla gerçekleştirilen ve doğal renklendiricilerin kumaş liflerine tutunmasını esas alan bir işlemdir (Muruganandham vd., 2025). Geleneksel boyama yöntemlerinde tekstil materyalleri, boyama öncesinde genellikle haşıl sökme, ağartma veya çeşitli kimyasal ön işlemlerden geçirilmektedir. Doğal boya özütlemesinin ardından, tekstil materyali ön mordanlama, eş zamanlı mordanlama ya da son mordanlama yöntemlerinden biri uygulanarak mordanlanmaktadır. Daha sonra boyar madde, belirli sıcaklık ve süre koşullarında boya banyosu içerisinde kumaşa aktarılmaktadır. Asidik, alkali veya nötr ortamlarda gerçekleştirilen bu boyama işlemleri, boyar maddenin

lifli etkileşimini ve genel boyama performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Dey vd., 2025).

3. GELENEKSEL DOĞAL BOYAMA YÖNTEMİNİN SINIRLILIKLARI VE YENİLİKÇİ YÖNTEMLERİN GEREKÇELERİ

3.1.Yüksek Hacimli Üretim ve Düşük Verim

Doğal boyar maddelerin bitkisel ve biyolojik kaynaklardan elde edilmesi, çoğu zaman düşük özütlenme verimi ve uzun işlem süreleriyle sınırlı kalmakta; geleneksel yöntemler yüksek hacimli üretim gereksinimlerini karşılamada yetersiz olmaktadır. Bu nedenle ultrasonik, mikrodalga ve enzim destekli özütlenme gibi yenilikçi ve biyoteknolojik yaklaşımlar, doğal boyar maddelerin üretim hızını ve miktarını artırma potansiyeli sunmaktadır (Uddin vd., 2022).

3.2.Standardizasyon ve Tekrarlanabilirlik Sorunu

Doğal boyar madde kaynaklarının ticari ölçekte standartlaştırılmış tarımsal üretim sistemlerine dâhil edilmemesi, kalite ve renk tutarlılığında önemli dalgalanmalara yol açmaktadır. Hasat zamanı, iklim koşulları ve toprak yapısı gibi çevresel etkenler, doğal ekstraktların kimyasal bileşimini etkileyerek partiler arası renk farklılıklarına neden olmakta ve bu durum endüstriyel üretim için ciddi bir engel oluşturmaktadır. Literatürde, söz konusu sorunun ancak kamu otoriteleri, tarım sektörü ve tekstil sanayisinin iş birliğiyle geliştirilecek standart üretim ve boyama protokolleri aracılığıyla aşılabileceği vurgulanmaktadır (Uddin vd., 2022; Che ve Yang, 2022; Islam vd., 2025; Dey vd., 2025).

3.3.Mordanlama Gereksinimi ve Çevresel Etkiler

Doğal boyar maddelerin çoğu liflere doğrudan bağlanamadığından mordan kullanımı gerekli olmakta; ancak geleneksel metal bazlı mordanlar toksik atıksulara yol açarak çevresel sürdürülebilirliği olumsuz etkilemektedir. Bu durum, doğal boyaların çevre dostu niteliğini zayıflatmakta olup, güncel çalışmalar biyomordanlar ve doğal kökenli alternatif mordanlama sistemlerinin geliştirilmesinin artık zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır (Uddin vd., 2022; Islam vd., 2025).

3.4.Renk Haslığı ve Dayanıklılık

Doğal boyalarla yüksek yıkama ve ışık haslığına ulaşmak, mordan kullanılsa dahi her zaman mümkün olmamakta; özellikle pamuk gibi selülozik liflerde yıkama haslığı düşük kalırken, yün gibi protein esaslı liflerde daha iyi sonuçlar elde edilmektedir (Uddin vd., 2022). Bu durum, lif-boyama etkileşimini güçlendirecek ileri yüzey modifikasyon ve kaplama teknolojilerine olan ihtiyacı artırmaktadır.

3.5.Fiyat, Verimlilik ve Su Tüketimi

Düşük boya verimi ve sınırlı tedarik zinciri nedeniyle doğal boyar maddeler, sentetik boyalara kıyasla daha yüksek maliyetlidir; buna ek olarak klasik banyo boyama teknikleri yüksek su ve enerji tüketimi gerektirmektedir. Literatürde, doğal boyaların yaygınlaşmasının ancak su ve enerji kullanımını azaltan yenilikçi proseslerin geliştirilmesiyle mümkün olabileceği vurgulanmaktadır (Che ve Yang, 2022; Hossain vd., 2023; Islam vd., 2025).

3.6. Yeni Fonksiyonel Beklentiler

Günümüzde tekstil endüstrisi, yalnızca renklendirme işlevi sunan boyama sistemlerinden ziyade; UV koruma, antimikrobiyal etki, termokromik davranış ve akıllı tekstil özellikleri sağlayan fonksiyonel ürünlere yönelmektedir. Ancak geleneksel doğal boyama yöntemleri, bu çok işlevli performans beklentilerini karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Doğal boyaların fonksiyonel özellik kazandırabilmesi için ileri özütleme teknikleri, yüzey modifikasyonları ve biyopolimer kaplama sistemleriyle entegre edilmesi gerekmektedir. Literatürde, ultrason ve mikrodalga destekli özütleme yöntemlerinin yalnızca boya verimini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda UV koruma ve antibakteriyel performansı da iyileştirdiği bildirilmektedir. Buna ek olarak, plazma ön işlemleri ve sol-jel kaplama teknikleri, doğal boyaların lif yüzeyine daha güçlü bağlanmasını sağlayarak hem renk haslığını hem de fonksiyonel dayanıklılığı artırma potansiyeli sunmaktadır (Yuan vd., 2023). Bu nedenle doğal boyaların teknik tekstiller ve yüksek katma değerli fonksiyonel tekstil ürünleriyle rekabet edebilmesi, geleneksel boyama yaklaşımlarının ötesine geçilmesini ve disiplinler arası yenilikçi çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

4. DOĞAL BOYAMADA TEKNOLOJİ TABANLI DÖNÜŞÜM

4.1. İleri özütleme teknolojilerinin entegrasyonu

Geleneksel özütleme yöntemlerinin sınırlılıklarını azaltmak amacıyla termal olmayan ve konvansiyonel olmayan teknolojilere yönelik araştırmalar giderek artmaktadır (Muruganandham vd., 2025). Sürdürülebilir boya özütleme tekniklerinin benimsenmesi; tekstil endüstrisinin çevresel ayak izinin azaltılmasına, biyolojik çeşitliliğin ve yerel toplulukların korunmasına katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda susuz boyama, biyoteknolojik yaklaşımlar, atık kaynaklı ve bitkisel boyalar gibi stratejiler, doğal kaynak tüketimini ve çevresel etkileri azaltmaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024). Her ne kadar modern doğal boya özütleme yöntemleri yüksek verimlilik sunsa da, yüksek maliyetler ve ekipman gereksinimleri küçük ölçekli üreticiler için önemli bir engel oluşturmaktadır. Ancak teknolojik gelişmeler, kamu destekleri ve artan çevre dostu ürün talebi, özellikle ultrason destekli ve mikrobiyal özütleme yöntemlerini zamanla daha erişilebilir hâle getirecektir.

Tablo 3. Geleneksel ve ileri doğal boya özütleme yöntemlerinin karşılaştırılması (Yadav vd., 2025).

Parametreler	Geleneksel Yöntemler	Modern / İleri Yöntemler
Özütleme Verimi	Düşük – Orta (%25–40)	Yüksek – Çok Yüksek (%60–98)
Özütleme Süresi	Uzun (2–6 saat)	Kısa (10–60 dakika)
Çözücü / Enerji Kullanımı	Yüksek	Düşük – Karşılaştırılabilir
Renk Haslığı	Orta (3,0–3,5)	Yüksek (4,5–5,0)
Çevresel Etki	Yüksek (daha fazla su ve enerji tüketimi)	Düşük (düşük emisyon, yeşil çözücüler, az atık)
Ekipman Maliyeti	Düşük (kaynatma kapları gibi basit sistemler)	Yüksek (ileri reaktörler, mikrodalga sistemleri, süperkritik kaplar)
Ölçeklenebilirlik	Orta (emek yoğun, kesikli/batch prosesler)	Yüksek (otomasyona uygun, verimli, sürekli akış sistemleriyle uyumlu)
Sürdürülebilirlik	Sınırlı (yüksek kaynak ihtiyacı nedeniyle)	Güçlü (çevre dostu girdiler, döngüsel ekonomiyi destekler)

Yaşam döngüsü ve tekno-ekonomik analizler, Basınçlı Sıvı Özütlemesi ve Mikrodalga Destekli Özütlemesinin geleneksel kaynatmaya kıyasla enerji tüketimini %60'a, çözücü kullanımını ise %40–70 oranında azalttığını ve yüksek boya verimini koruduğunu göstermektedir. Süperkritik Akışkan Özütlemesi, yüksek enerji gereksinimine rağmen geri dönüştürülebilir CO₂ kullanımı sayesinde katı atığı %80, arıtma ihtiyacını %50 azaltmaktadır; buna karşılık geleneksel yöntemler kg başına 10–15 L su tüketmekte ve yalnızca %30–40 geri kazanım sağlamaktadır. Bu bulgular, yüksek başlangıç maliyetlerine rağmen modern yöntemlerin uzun vadede sürdürülebilirlik ve proses verimliliği açısından üstün olduğunu ortaya koymaktadır (Yadav vd., 2025).

4.1.1. Ultrason destekli özütleme

Ultrasonik özütleme, doğal boyaların su veya etanol gibi çözücüler içinde yüksek frekanslı ses dalgalarıyla, kavitasyon etkisi sayesinde hücre duvarlarının parçalanması yoluyla elde edilmesini sağlar. Kontrollü sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu yöntem, geleneksel tekniklere kıyasla daha kısa işlem süresi, daha düşük enerji ve kimyasal tüketimi sunarken özütleme verimini artırmakta ve ısıya duyarlı bileşikleri korumaktadır. Bu nedenlerle ultrason destekli özütleme, tekstil başta olmak üzere gıda ve kozmetik endüstrilerinde doğal boya üretimini daha verimli ve çevre dostu hâle getiren yaygın bir yöntem olarak kullanılmaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024; Yadav vd., 2025).

4.1.2. Mikrodalga destekli özütleme

Mikrodalga destekli özütleme, doğal boyaların su veya etanol gibi mikrodalgaya uygun çözücüler kullanılarak mikrodalga radyasyonu ile hızlı ve verimli biçimde elde edildiği modern bir yöntemdir. Mikrodalga enerjisinin moleküler titreşimi artırması sayesinde kısa sürede yüksek özütleme verimi sağlanmakta; kontrollü sıcaklık ve süreler, pigment bozulmasını önlemektedir. Az çözücü kullanımı, kısa işlem süresi ve yüksek verim sunması nedeniyle çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkan bu yöntemin etkinliği; çözücü türü, materyal özellikleri, hedef bileşik yapısı, sıcaklık, süre ve mikrodalga gücüne bağlıdır (Pranta ve Rahaman, 2024). Mikrodalga özütlemesi açık ve kapalı kap sistemlerinde uygulanabilmekte; kapalı sistemler düşük çözücü tüketimi ve uçucu kayıplarının azaltılması avantajı sunarken, açık sistemler atmosferik basınçta güvenli çalışma ve reaktif ilavesine olanak sağlamaktadır (Yadav vd., 2025). Berberis ve meşe palamudu ile organik pamuğun mikrodalga destekli boyanması, geleneksel yöntemlere kıyasla daha üstün kolorimetrik özellikler, maliyet etkinliği ve zaman tasarrufu sağladığını göstermiştir (Büyükkakıncı vd., 2021). Benzer şekilde, koşinil kaynaklı doğal boyanın mikrodalga destekli özütleme ile elde edilerek ipek kumaşların boyanmasında kullanılması, renk verimini ve boyama performansını belirgin biçimde artırmıştır (Amin vd., 2020).

4.1.3. Ögütme destekli mikrodalga özütleme

Ögütme destekli mikrodalga özütleme, mekanik öğütme ile eş zamanlı mikrodalga ışınlamasını birleştiren, başlangıçta bileşik sentezi için geliştirilmiş yenilikçi bir tekniktir ve doğal boya özütlemesine uyarlanması nispeten yenidir. Bu yöntemde bitkisel materyal, çözücü varlığında ya da çözücü kullanılmadan, mikrodalga fırına entegre cam tüp havan-tokmak sistemi içinde öğütülmekte; mekanik parçalama hücre yapısını zayıflatırken mikrodalga ışınlaması hızlı ısınma sağlayarak boya bileşenlerinin ortama etkin biçimde geçmesini teşvik etmektedir. Deneysel çalışmalar, bu tekniğin geleneksel mikrodalga destekli özütlemeye kıyasla özütleme verimini %10–15 artırdığını, çözücü kullanımını azalttığını ve pigment bütünlüğünü daha iyi koruduğunu göstermekte; bu yönleriyle yöntemin bitkisel kökenli boyalar için çevre dostu ve maliyet etkin bir alternatif sunduğu belirtmektedir (Yadav vd., 2025).

4.1.4. Fermantasyon

Fermantasyon, mikroorganizmaların organik materyalleri boya bileşiklere dönüştürdüğü, sıcaklık, pH ve oksijen koşullarının kontrollü olduğu biyoteknolojik bir yöntemdir. Fermantasyon sonrası pigmentler filtrelenerek konsantre doğal boya çözeltileri elde edilmekte; yenilenebilir

kaynak kullanımı, düşük kimyasal ihtiyacı ve biyoaktif özelliklerin korunması sayesinde süreç yeşil kimya ilkeleriyle uyumlu, sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024). Kateşu, kökboya, dut yaprağı ve nar kabuğu yüksek renk verimi, iyi haslık ve UV koruma özellikleriyle öne çıkarken; ayrıca bal kabağı çekirdeği yağının sulu enzimatik özütleme ile elde edilmesi ve enzimatik olarak çıkarılan doğal boyaların poliamid kumaşların endüstriyel boyanmasında uygulanabilir olduğu raporlanmıştır (Dey vd., 2025).

4.1.5. enzimatik özütleme

Enzimatik özütleme, bitki hücre duvarlarını parçalayan selüloz, pektinaz ve lakkaz gibi özgül enzimler aracılığıyla boyar maddelerin daha etkin serbest bırakılmasını sağlayan çevre dostu bir yöntemdir. Özellikle meyveler, soğan kabukları ve çiçek taç yapraklarından elde edilen flavonoidlerin özütleme veriminin %20–30 oranında arttığı; aynı zamanda renk stabilitesinin iyileştiği ve işlem süresinin kısaldığı raporlanmıştır. Düşük enerji gereksinimi, toksik olmayan ve biyobozunur yapısı sayesinde geleneksel çözücü bazlı yöntemlere kıyasla daha yeşil bir alternatif sunmaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024; Yadav vd., 2025). Enzimatik işlemler pigment yapısında dönüşümlere de yol açabilmekte; örneğin gardenya pigmenti genipozidin kırmızı ve mavi türevlerine dönüştürülmesi bu duruma örnek teşkil etmektedir. Ayrıca papain enzimi ön işleminin polyester/pamuk karışım kumaşlarda hidrofobik yapıyı azaltarak daha basit, çevre dostu ve sürdürülebilir bir boyama sürecini mümkün kıldığı bildirilmektedir (Dey vd., 2025; Molla vd., 2025).

4.1.6. Süperkritik akışkan özütleme

Süperkritik özütleme, boyar maddelerin süperkritik akışkanlar (özellikle karbondioksit CO₂, propan, bütan veya etilen) içindeki yüksek çözünürlüğünden yararlanan ileri bir tekniktir. Özütleme, boya bileşenlerinin 40–80 °C sıcaklık ve 35–75 MPa basınç aralıklarında süperkritik CO₂ ile etkileştiği yüksek basınçlı kaplarda gerçekleştirilmektedir. Sıcaklık ve basınçtaki küçük değişimler, çözücü gücünü önemli ölçüde etkileyerek seçici ve yüksek verimli özütlemeye olanak tanımaktadır. Süperkritik CO₂'nin gaz ve sıvı özelliklerini birlikte göstermesi, özütleme sonrası basınç düşürüldüğünde kolayca uzaklaştırılmasını ve geride konsantre doğal boyanın kalmasını sağlamaktadır. Düşük toksisite, çözücü geri kazanımı, az çözücü kullanımı ve ısıya duyarlı boyaların korunması, bu yöntemin başlıca avantajları arasında yer almaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024; Yadav vd., 2025).

4.1.7. Basınçlı sıvı özütleme

Basınçlı sıvı özütlemesi, boyar madde geri kazanımını artırmak amacıyla yüksek sıcaklık ve orta–yüksek basınç altında gerçekleştirilen, zaman açısından verimli ve düşük çözücü tüketimine sahip bir tekniktir. Proses; numunenin

inert materyallerle dağıtılarak özel özütleme kabına yerleştirilmesi, ardından 0,5–21 dakika süren statik fazda çözücüyle temas ettirilmesi ve bunu izleyen dinamik fazda çözücünün sürekli akış hâlinde geçirilmesi esasına dayanır. Yöntemin etkinliği çözücü türü, sıcaklık, basınç ve adsorban özelliklerine bağlı olup, hızlı özütleme ve düşük çözücü kullanımı başlıca avantajlarıdır; buna karşın yüksek ekipman maliyeti ve özütleme sonrası ek saflaştırma gereksinimi önemli dezavantajlar arasında yer almaktadır (Yadav vd., 2025).

4.1.8.Katı faz özütleme

Katı faz özütleme, hedef boyar maddelerin özelliklerine göre seçilen silika, karbon veya kil bazlı adsorbanlar kullanılarak gerçekleştirilen ve sıvı–sıvı özütlemesine benzer biçimde fazlar arası dağılıma dayanan bir tekniktir. Katı adsorbanlar, boyar bileşenlerin deriştirilmesini ve saflaştırılmasını sağlayarak özütleme verimliliğini artırmakta; sıvı–sıvı özütlemesine kıyasla daha yüksek geri kazanım, daha az emülsiyon oluşumu ve daha basit operasyonel süreçler sunmaktadır (Yadav vd., 2025).

4.1.9.Yüzey aktif madde aracılı teknikler

Yüzey aktif madde aracılı özütleme, iyonik olmayan yüzey aktif maddeler kullanılarak sulu çözeltilerden hidrofobik bileşenlerin yüzey aktif maddece zengin faza transfer edilmesi esasına dayanmaktadır. Özütleme verimi, ultrason veya mikrodalga ışınlama ile desteklendiğinde daha da artmakta; bu yöntem özellikle suda düşük çözünürlüğe sahip boyar maddelerin etkin geri kazanımında yüksek performans sunmaktadır (Yadav vd., 2025).

4.2. Alternatif Mordanlama Yaklaşımları

Doğal boyaların tekstil liflerine sınırlı bağlanma kabiliyeti, renk verimi ve şiddetini artırmak için metal bazlı mordanlar ve güçlü kimyasal reaktiflerin kullanımını gerektirmekte; bu durum doğal boyaların çevre dostu niteliğiyle çelişmektedir (Mehrpavar vd., 2016). Son dönemde, doğal boyaların çevre dostu yapıları nedeniyle kullanım alanları genişlerken, boyanabilirliklerinin artırılması önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda, m-transglutaminaz (m-TGase) ve bentonit nanokilden oluşan biyo-nano-mordanların yün kumaşların doğal boyalarla boyanmasındaki etkileri incelenmiştir. Sonokimyasal yöntemle farklı konsantrasyonlarda uygulanan bu sistemin, yün lifleriyle güçlü etkileşimler oluşturduğu ve yüzey yapısını belirgin biçimde değiştirdiği rapor edilmektedir. Kökboya ile yapılan boyamalarda, işlem görmüş yün kumaşların renk kuvveti (K/S) ve yıkama haslığı değerlerinin işlem görmemiş numunelere göre daha yüksek olduğu, özellikle %5 oranındaki biyo-nano-mordanın en iyi sonuçları verdiği belirtilmektedir (Pour vd., 2020).

SiO_2 ve TiO_2 nanoparçacıkları sol-jel yöntemiyle sentezlenerek kökboya (madder) ile pamuk kumaşın boyanmasında uygulanmıştır. Nanoparçacık ilavesi, renk şiddetini (K/S), haslık özelliklerini ve ultraviyole koruma faktörünü (UPF) artırılmış pamuklu kumaşa kıyasla belirgin biçimde artırmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar, TiO_2 nanoparçacıklarının SiO_2 'ye göre daha yüksek renk verimi, daha iyi haslık ve üstün UV koruma sağladığını ortaya koymaktadır (Gupta vd., 2022).

Sentezlenen ZnO nanoparçacıklarının mordan olarak kullanımıyla ipek kumaşların çay polifenoller ve hematoksin gibi farklı doğal boyar maddelerle boyanması incelenmiştir. Bulgular, ZnO nanoparçacıklarının yüksek yüzey alanı sayesinde mordanlama etkinliğini artırdığını ve özellikle yıkama ile ışık haslığının geleneksel metal mordanlara kıyasla belirgin biçimde iyileştiğini ortaya koymaktadır. Bu yönüyle ZnO nanoparçacıkları, doğal boyama süreçlerinde fonksiyonel ve çevre dostu bir mordan alternatifi olarak değerlendirilmektedir (Du vd., 2022).

Literatürde, zirkonyum dioksit (ZrO_2) nanoparçacıklarının doğal boyalarla yün kumaşların boyanmasında mordan olarak kullanımına yönelik çalışmalar öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, farklı oranlarda uygulanan nano- ZrO_2 'nin, kekik (*Thymus*) ile gerçekleştirilen mordanlama öncesi, eşzamanlı ve mordanlama sonrası boyama süreçlerinde kumaş performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Nano- ZrO_2 ile mordanlanan yün kumaşların alevlenebilirliğinin azaldığı, bu durumun lif yapısına entegre olan nanoparçacıkların ısı yalıtıcı etkisinden kaynaklandığını ortaya konmuştur. Ayrıca, Nano- ZrO_2 varlığı kumaşların hidrofobik karakterini artırmış; hem Gram-pozitif hem de Gram-negatif bakterilere karşı belirgin antibakteriyel özellikler kazandırmıştır (Taheri vd., 2015).

4.3. Yenilikçi doğal boyama çalışmaları

Nanoteknolojinin potansiyeli, tekstil endüstrisinde mevcut fonksiyonellikleri iyileştirmek ve tekstillere tamamen yeni özellikler kazandırmak amacıyla araştırılmaktadır. Lif, iplik ve kumaşın üretiminde ve kimyasal işlemlerinde nanoteknolojinin kullanımı, geleneksel tekstillere kıyasla üstün fonksiyonel özellikler sunarak tekstil uygulamalarının kapsamını genişletmiştir. Nanoteknoloji ile geliştirilebilen tekstil özellikleri arasında yumuşaklık, dayanıklılık, nefes alabilirlik, su iticilik, alev geciktiricilik ve UV koruma yer almaktadır. Fonksiyonel özelliklerin yanı sıra, nanoteknoloji nanoparçacıklar formunda tekstillerin renklendirilmesinde daha yüksek verim sağlamak amacıyla da kullanılabilir. Bu yaklaşımın başarılı olabilmesi için, nanoparçacıkların yeterince küçük boyutlara indirgenmesi ve boya banyosunda agregasyonu önleyecek şekilde iyi dağılması gerekmektedir (Gupta vd., 2022).

Doğal boyaların tekstil uygulamalarındaki temel sınırlılığı, düşük stabilite ve zayıf lif-boya etkileşimidir. Bu sorunun aşılmasında, kil esaslı taşıyıcılarla geliştirilen hibrit pigment sistemleri etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Özellikle klorofilin halloysit nanotüpleri ile hibritleştirilmesi, pigmentin yüksek oranda adsorbe edilmesini ve çevresel etkilere karşı stabilize edilmesini sağlamaktadır. Literatürde bildirilen yüksek adsorpsiyon verimleri, halloysitin doğal pigmentler için etkin bir taşıyıcı olduğunu göstermekte; bu stabilizasyon etkisi, boyama ve baskı sonrası tekstil yüzeylerinde iyileştirilmiş haslık performanslarıyla ilişkilendirilmektedir. Ön işlem uygulanmış ve uygulanmamış kumaşların karşılaştırılması, hibrit pigment-lif etkileşiminin süreç koşullarına bağlı olarak optimize edilebildiğini ve endüstriyel kabul edilebilir haslık seviyelerine ulaşılabildiğini ortaya koymaktadır (Lopez-Rodriguez vd., 2024).

Kitosan-polipropilen imin dendrimer temelli lif ön işlemleri, metal mordan kullanımını azaltan veya ortadan kaldıran sürdürülebilir bir alternatif sunarak hem çevresel etkiyi düşürmekte hem de doğal boyaların renk performansını iyileştirmektedir. Bu yaklaşım, ekolojik tekstil üretimi ve yeşil kimya prensipleriyle güçlü bir uyum göstermektedir (Mehrparvar vd., 2016).

Atmosferik hava plazması, kimyasal kullanımına gerek duyulmadan tekstil yüzeylerinin modifiye edilmesini sağlayan fiziksel bir aktivasyon yöntemidir. Plazma uygulamasıyla lif yüzeyinde oluşan aşındırma etkisi ve aktif fonksiyonel gruplar, yüzey enerjisini artırarak boyar maddelerle etkileşimi güçlendirmekte; bu özellik özellikle protein liflerinde boyar madde alımını ve bağlanmasını iyileştirmektedir. Doğal bitkisel boyalarla yapılan boyamalarda, plazma ile aktive edilmiş lif yüzeyleri boyar maddelerin lif içine difüzyonunu ve lif-boya bağlarının stabilitesini artırmakta; mikrodalga destekli boyama gibi enerji verimli yöntemlerle birlikte kullanıldığında daha kısa sürede homojen renklenme ve iyileştirilmiş haslık özellikleri sağlamaktadır (Eyupoglu vd., 2025).

Yün liflerinin doğal kökboya ile renklendirilmesinde, lif-boya etkileşimini güçlendiren çevre dostu ön işlemler önemli bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda doğal kökenli bir yüzey aktif madde olan soya lesitininin kimyasal ve fiziksel olarak modifiye edilerek kullanılması, lif yüzeyinde boyar madde penetrasyonunu ve homojen difüzyonu artıran etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Düşük sıcaklık plazma uygulamaları ise kimyasal reaktif kullanmadan lif yüzeyinde mikro pürüzlülük ve aktif fonksiyonel gruplar oluşturarak yünün boyar maddelere olan afinitesini artırmaktadır. Plazma ile aktive edilmiş liflerin biyobazlı yardımcı maddelerle birlikte kullanılması, doğal boyamanın daha düşük sıcaklıklarda ve enerji tasarrufu sağlayan koşullarda gerçekleştirilmesine olanak tanımakta; asetillenmiş

lesitin varlığında plazma işlemli yün liflerinin yaklaşık 76,5 °C’de etkili biçimde boyanabildiği bildirilmektedir. Bu kombine yaklaşımlar, metal mordan kullanımını azaltırken doğal boyaların yün lifleri üzerindeki performansını iyileştiren sürdürülebilir bir strateji sunmaktadır (Barani ve Maleki, 2011). Çevre dostu yöntemlerle renkli ve antibakteriyel tekstiller elde etmek amacıyla pamuk ve bambu rayon örme kumaşlar düşük basınçlı, radyo frekanslı su buharı plazması ile işlem görmüş ve Japon düğümü (Fallopia japonica) rizom ekstraktı ile boyanmıştır. Sonuçlar, plazma işleminin selülozik lif yüzeyinde hafif bir aşındırma etkisi oluşturarak boya alımını artırdığını göstermiştir. Plazma işlemli numunelerde *S. aureus*’a karşı antibakteriyel etki gözlenirken, *E. coli*’ye karşı anlamlı bir etki belirlenmemiştir (Gorjanc vd., 2016).

Literatürde, yün liflerinin kına yaprakları ve civanperçemi çiçekleri gibi doğal boyalarla renklendirilmesinin optimizasyonunda Yanıt Yüzey Metodolojisi’nin (RSM) etkin biçimde kullanıldığı bildirilmektedir. Doğal boyaların liflere olan düşük afinitesi nedeniyle metal mordan kullanımının yaygın olduğu, ancak bu gereksinimi azaltmak amacıyla çevre dostu ön işlem yöntemleri arasında plazma uygulamalarının öne çıktığı vurgulanmaktadır. Çalışmalarda, plazma gücü, boyama sıcaklığı ve şap mordan konsantrasyonundaki artışın renk değerini yükselttiği; daha düşük pH koşullarında ise daha yüksek renk şiddeti sağlandığı raporlanmıştır. Bu yöntemin yün liflerinin boyanabilirliğini artıran ve potansiyel olarak toksik metal mordan ihtiyacını azaltan etkili bir yüzey modifikasyon tekniği olduğu ifade edilmektedir (Haji, 2020).

Pamuk liflerinin dikloro-s-triazinil reaktif grubu içeren anyonik köprüleyici ajanlarla ön işlemden geçirilmesi, berberin gibi alkaloid yapılı doğal boyalarla yapılan boyamalarda yıkama ve kuru temizleme haslığını belirgin biçimde iyileştirmektedir. Bu reaktif köprüleyici sistemler, lif-boya etkileşimini kimyasal bağlanma yoluyla güçlendirmektedir. Bunun yanı sıra, ultrasonik boyama gibi fiziksel enerji destekli yöntemlerin *Symplocos spicata* ile pamuk boyamada boya alımı ve haslık özelliklerini geleneksel yöntemlere kıyasla artırdığı; gama ışını ile lif ve boya ön işlemlerinin ise yapısal değişimler yoluyla renk haslığını geliştirdiği rapor edilmektedir. Enzimatik ön işlemler de özellikle protein esaslı liflerde etkili olup, ipek liflerinin lipaz, diastaz ve proteaz-amilaz gibi enzimlerle ön işlemden geçirilmesi, lif yüzeyinin kontrollü biçimde modifiye edilmesini sağlayarak boyar madde bağlanmasını ve haslık performansını iyileştirmekte; bu biyoteknolojik yaklaşımlar kimyasal mordan kullanımını azaltma potansiyeliyle sürdürülebilir tekstil uygulamalarıyla uyum göstermektedir (Yuan vd., 2023).

Çalışmalarda, doğal kına boyası ile polyester kumaşların boyanmasında mikrodalga destekli, çevre dostu bir yöntem öne çıkmaktadır. Limonun

biyomordan olarak kullanıldığı bu yaklaşım, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında boya alımını belirgin biçimde artırmakta ve boyama süresini yaklaşık %60–65 oranında azaltmaktadır (Arain vd., 2021).

4.4. Doğal Boyama ile Fonksiyonel Özellik Kazandırma

Doğal boyaların kullanımı, sentetik boyarmaddelerin olumsuz etkilerini azaltmanın ötesinde, tekstil kumaşlarına ek biyolojik ve fonksiyonel özellikler kazandırmaktadır. Geniş ölçüde erişilebilir, toksik olmayan, alerjik reaksiyonlara yol açmayan ve antioksidan özellikler sergileyen doğal boyalar, çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Doğal boyalarda bulunan indigoid, piridin, karotenoid, kinonoid, flavonoidler, betalainler, antosiyaninler, antrakinonlar ve tanenler; tekstil liflerindeki –OH, –SO₃H, –COOH, –C₆H₅OH ve –NH₂ gibi fonksiyonel gruplarla etkileşerek alev geciktirici, böcek kovucu, antibakteriyel ve UV koruyucu özelliklerin oluşumunda rol oynamaktadır. Bu fonksiyonel özelliklerden sorumlu başlıca doğal boyar bileşenler Tablo 4'te özetlenmiştir (Eyüpoğlu vd., 2025; Uddin vd., 2022).

Tablo 4. Fonksiyonel özelliklere göre doğal boyalar ve sorumlu kimyasal bileşenleri (Uddin vd., 2022)

Fonksiyonel Özellik	Doğal Boya (Botanik Adı)	Fonksiyonel Özellikten Sorumlu Bileşen	Test Edilen Substrat
Antimikrobiyal	Nar kabuğu (<i>Punica granatum</i>)	Hidrolize tanenler (pirogallol)	Lyocell
Sivrisinek kovucu	Nar kabuğu (<i>Punica granatum</i>) + PVA	Ellagik tanen, polivinil alkol	Pamuk
Antimikrobiyal, güve önleyici	Kına (<i>Lawsonia inermis</i>)	Lawson (2-hidroksi-1,4-naftokinon)	Yün
Antibakteriyel, antioksidan	Kitosanla işlem görmüş kına (<i>Lawsonia inermis</i>)	Polikasyonik yapıdaki kitosan + lawson	Jüt
Antimikrobiyal	Kitosanla işlem görmüş çay (<i>Camellia sinensis</i>)	Polifenoller, kitosan	Yün
Antibakteriyel	Bakayan (<i>Melia composita</i>)	Alkaloidler ve limonoidler	İpek, yün, pamuk
Antibakteriyel, UV koruma	Kökboya (<i>Rubia tinctorum</i>), Aspir (<i>Carthamus tinctorius</i>)	Di- ve tri-hidroksiantrakininler, karthamin	Poliamid 6
Antibakteriyel	Neem (<i>Melia azedarach</i>)	Fenolik bileşikler ve flavonoidler	Kenevir
Antimikrobiyal	Golden dock (<i>Rumex maritimus</i>)	Tanen	Yün
Antibakteriyel	Berberis (<i>Berberis vulgaris</i>)	Berberin (kuaterner amonyum yapısı)	Yün
Antibakteriyel	Şakayık (<i>Paeonia officinalis</i>)	Paenol, paeoniflorin türevleri	Pamuk, yün, ipek
Antimikrobiyal	Goldthread (<i>Coptis chinensis</i>), Karanfil (<i>Syzygium aromaticum</i>), Mazi, Nar	Berberin, eugenol, gallotanenler	Pamuk, yün, ipek

Fonksiyonel Özellik	Doğal Boya (Botanik Adı)	Fonksiyonel Özellikten Sorumlu Bileşen	Test Edilen Substrat
UV koruma, antibakteriyel, antioksidan	Modifiye kurkumin (<i>Curcuma longa</i>)	Kurkumin-UV absorban reaktif kompleks	İpek
Güve önleyici	Ceviz kabuğu (<i>Juglans regia</i>)	Juglon (5-hidroksi-1,4-naftokinon)	Yün
Antibakteriyel, antioksidan	<i>Lycium ruthenicum</i> Murray	Açılasyonlu antosiyaninler	Yün
Antimikrobiyal, UV koruma	<i>Quercus infectoria</i> , <i>Acacia catechu</i> , <i>A. nilotica</i> vb.	Tanen	Pamuk
UV koruma	Okaliptüs yaprağı (<i>Eucalyptus camaldulensis</i>), Portakal kabuğu, Karahindiba	Tanenler, flavonoidler, karotenoidler	Yün
UV koruma	Karanfil tomurcuğu, Meşe kabuğu	Tanen	İpek
UV koruma	Weld (<i>Reseda luteola</i>), Woad (<i>Isatis tinctoria</i>)	Flavonoidler (luteolin, apigenin)	Kenevir, keten
UV koruma	Kına (<i>Lawsonia inermis</i>)	Lawson	Katyonize pamuk
UV koruma	Zerdeçal (<i>Curcuma longa</i>)	Kurkumin	Polyester
UV koruma	Koşinil (<i>Dactylopius coccus</i>)	Karminik asit	İpek, yün
UV koruma, deodorant, antimikrobiyal	Mazı, Areka cevizi, Nar kabuğu	Gallotanenler, kateşinler, ellagik tanen	İpek
UV koruma, antibakteriyel	Gromwell (<i>Lithospermum erythrorhizon</i>), Muz kabuğu	Deoksşikikinin, tanenler	Pamuk
Güve önleyici	Gümüş meşe, ceviz kabuğu, nar kabuğu	>%40 tanen	Yün
Deodorant	Gardenya (<i>Gardenia jasminoides</i>), kahve posası, nar	Krosin, kafein, ellagik asit	Pamuk, ipek, yün

Çay (*Camellia sinensis*), yüksek antioksidan içeriği sayesinde tekstil renklendirmede kullanılan önemli bir doğal boya kaynağıdır. Kırmızı, siyah ve yeşil çay ekstraktlarının pamuk kumaşlarda uygulanması, doğal boyaların fonksiyonel performansını değerlendiren çalışmalar arasında yer almakta; pamuk liflerinin kitosan ile ön işlemden geçirilmesinin lif-boyaya etkileşimini artırarak boya alımını iyileştirdiği bildirilmektedir. Aynı çay türünden elde edilen ekstraktların, kullanılan özütlemeye yöntemine bağlı olarak farklı renk tonları ve UV koruma performansları sergileyebildiği; dolayısıyla elde edilen renk ve fonksiyonel özelliklerin çay türünden ziyade özütlemeye ve boyama koşullarıyla ilişkili olduğu vurgulanmaktadır. Bu bulgular, doğal boyalarla fonksiyonel tekstil üretiminde hammadde seçiminin yanı sıra proses parametrelerinin de belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır (Bonet-Aracil vd., 2016).

Ejder meyvesinden elde edilen tamamen yeni bir doğal boya kaynağının yün liflerine uygulanmasıyla canlı ve parlak renk tonları elde edilebildiği, aynı zamanda kumaşlara belirgin antibakteriyel özellikler kazandırdığı rapor edilmektedir. Bu bulgular, ejder meyvesi bazlı doğal boyaların fonksiyonel ve sürdürülebilir tekstil uygulamaları için umut verici bir alternatif sunduğunu göstermektedir (Sadannavar vd., 2024).

Tıbbi bir bitki olan Çin pelini (*Artemisia argyi*)’den elde edilen doğal biyo-boya/biyo-ajanın pamuk tekstillerde kullanımını genişletmek amacıyla plazma yüzey modifikasyonu ve soya proteini kaplamasının uygulanabilirliği incelenmiştir. Sonuçlar, soya kaplamasının tek başına doğal boya alımını artırdığını; plazma ön işlemiyle birlikte uygulandığında ise kumaşın boyanabilirliğinin daha da iyileştiğini göstermektedir. Plazma sonrası ultrasonik soya kaplaması, pamuk kumaşa yumuşak tuşe kazandırırken renk kuvveti ve UV koruma performansını artırmış; ayrıca antioksidan özelliklerin yanı sıra *Staphylococcus aureus*’a karşı %95–100 bakterisidal etki sağlayarak güçlü antibakteriyel performans sergilemiştir (Li vd., 2023).

Justicia schimperiana yaprak ekstraktının toksik olmayan doğal bir renklendirici olarak pamuk kumaşlara renk ve antibakteriyel özellik kazandırdığı çevre dostu bir yaklaşım rapor edilmiştir. Çalışmada özütleme çözücü yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bakır sülfat, demir sülfat ve şap, eşzamanlı mordanlama yöntemiyle kullanılmış; boyanmış kumaşların antibakteriyel etkinliği *Staphylococcus aureus* ve *Escherichia coli* bakterilerine karşı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, işlem görmüş pamuk kumaşların her iki patojene karşı istenen düzeyde antibakteriyel özellik sergilediğini göstermektedir (Tegegne vd., 2024).

Oksijenik fotogranüllerden elde edilen fikosiyanin, sürdürülebilir ve fonksiyonel bir doğal boya olarak tekstil uygulamalarında öne çıkmaktadır. Literatürde, sodyum fosfat tamponu ile uygulanan dondurma-çözme ve ultrason destekli özütlemenin yüksek verim sağladığı, amonyum sülfatla stabilize edilen fikosiyaninin ise depolamaya uygun olduğu bildirilmektedir. Tekstil uygulamalarında, çift mordanlama sonrası soğuk boyamada pamuk liflerinin ipeğe kıyasla daha yüksek boya afinitesi ve yıkama dayanımı sergilediği; buna karşılık ipek kumaşların daha yüksek antioksidan aktivite sunduğu raporlanmıştır. UV koruma açısından pamuk kumaşlar çok yüksek UPF değerleriyle üstün performans gösterirken, ipek kumaşların orta düzeyde koruma sağladığı belirtilmektedir. Bu bulgular, fikosiyaninin farklı lif türlerinde renk ve fonksiyonel özellik kazandırabilen çevre dostu bir doğal boya olduğunu ortaya koymaktadır (Nair vd., 2025).

Semizotu (*Portulaca oleracea L.*) bitkisinin doğal bir boyar madde kaynağı olarak tekstil uygulamalarındaki potansiyeli literatürde ele alınmıştır. Yapılan çalışmalarda, bitkinin optimum koşullarda ekstrakte edilmesiyle elde edilen boyaların moleküler yapıları ve nano ölçekli özellikleri incelenmiş; yün kumaşlardaki boyama mekanizması ve adsorpsiyon kinetiği değerlendirilmiştir. Bulgular, semizotu bazlı doğal boyaların yün kumaşlarda sentetik boyalara kıyasla daha yüksek renk derinliği ($K/S = 23,53$) sağladığını, bunun yanı sıra yüksek ultraviyole koruma özelliği ($UPF = 253,47$) ve belirgin antibakteriyel aktivite (*Staphylococcus aureus* için %71,3; *Escherichia coli* için %37) kazandırdığını göstermektedir (Zhang vd., 2022).

Geri dönüştürülmüş nonwoven polyester kumaşların ilave mordan kullanılmadan kara halile (*Terminalia chebula*) doğal boyası ile boyanmasına yönelik çalışmalar yer almaktadır. Bulgular, kara halile (*T. chebula*) boyasının geri dönüştürülmüş PET esaslı nonwoven kumaşlara kahverengi ton kazandırdığını, artan sıcaklık, süre ve konsantrasyonla boyanabilirliğin iyileştiğini göstermektedir. Ayrıca, sürtme ve ter haslığının yüksek düzeyde olduğu ve kumaşların belirgin antibakteriyel özellikler sergilediği rapor edilmektedir (Lee vd., 2020).

5.SONUÇ

Tekstil endüstrisi, yüksek üretim hacmi ve yoğun kimyasal kullanımı nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezinde yer almakta; özellikle sentetik boyar maddelerden kaynaklanan atık sular, toksik yan ürünler ve yüksek kaynak tüketimi ekosistemler ve insan sağlığı üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ve çevreyle daha uyumlu yapıya sahip doğal boyalar, sürdürülebilir tekstil üretimi için yeniden önemli bir alternatif olarak gündeme gelmiştir.

Ancak doğal boyaların endüstriyel kullanımını sınırlayan düşük verim, renk tekrarlanabilirliği sorunları, yetersiz haslık, mordanlama gereksinimi ve yüksek su-enerji tüketimi gibi yapısal engeller bulunmaktadır. Literatür, bu sorunların yalnızca geleneksel yöntemlerle aşılamayacağını; ultrason, mikrodalga, enzimatik, fermentasyon, süperkritik akışkan ve basınçlı sıvı gibi ileri özütleme teknolojilerinin kaçınılmaz olduğunu göstermektedir. Yaşam döngüsü ve tekno-ekonomik analizler, başlangıç maliyetleri yüksek olsa da bu yöntemlerin uzun vadede önemli çevresel kazanımlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Doğal boyalar, çevre dostu renklendirmenin ötesinde UV koruma, antibakteriyel etki ve antioksidan aktivite gibi fonksiyonel özellikler kazandırabilme potansiyelleriyle de stratejik önem taşımaktadır. Nanoteknoloji, plazma yüzey modifikasyonu, biyopolimer destekli ön işlemler ve hibrit pigment sistemleri, lif-boya etkileşimini güçlendirerek renk performansını ve fonksiyonel dayanıklılığı artırmakta, metal mordanlara olan bağımlılığı azaltmaktadır.

Sonuç olarak, doğal boyamacılığın sürdürülebilir tekstil endüstrisinde kalıcı ve rekabetçi bir konum elde edebilmesi; ileri özütleme teknolojileri ile yenilikçi yüzey ve mordanlama yaklaşımlarının bütüncül biçimde entegrasyonuna, akademi-sanayi iş birliğinin güçlendirilmesine ve standartlaştırılmış yeşil üretim sistemlerinin yaygınlaştırılmasına bağlıdır.

KAYNAKLAR

- Muruganandham, M., Tamilselvi, Y., Sivasubramanian, K., Velmurugan, P., Oleyan Al-Otibi, F., & Sivakumar, S. (2025). Sustainable dyeing of cotton, silk and leather using natural dye from Bixa orellana seeds: extraction, optimization and assessment of antibacterial activity. *Frontiers in Chemistry*, 13, 1474160. <https://doi.org/10.3389/fchem.2025.1474160>
- Hossain, T., Das, S. C., Akhtarujjaman, M., Uddin, M. A., & Bedoura, S. (2023). Eco-friendly dyeing of cotton fabric using used tea bag extracts: A comprehensive study on pH, fabric cationisation, and computational analysis. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 7, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100387>
- Eyupoglu, C., Eyupoglu, S., Merdan, N., & Basyigit, Z. O. (2025). Natural Dyeing of Vacuum Plasma-Treated Silk Fabric with Hypericum Perforatum and Estimation of Dyeing Characteristics with an Optimizable Neural Network Model. *Fibers and Polymers*, 26, 2043–2056. <https://doi.org/10.1007/s12221-025-00936-x>
- Olivar Aponte, N., Hernández Gómez, J., Torres Argüelles, V., & Smith, E. D. (2024). Fast fashion consumption and its environmental impact: a literature review. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 20(1), 2381871. <https://doi.org/10.1080/15487733.2024.2381871>
- Islam, M. M., Aidid, A. R., Mohshin, J. N., Mondal, H., Ganguli, S., & Chakraborty, A. K. (2025). A critical review on textile dye-containing wastewater: Ecotoxicity, health risks, and remediation strategies for environmental safety. *Cleaner Chemical Engineering*, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2025.100165>
- Slama, H. B., Chenari Bouket, A., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., Silini, A., Cherif-Silini, H., Oszako, T., Luptakova, L., Golinska, P., & Belbahri, L. (2021). Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts and treatment methods. *Applied Sciences*, 11(14), 6255. <https://doi.org/10.3390/app11146255>
- Taha, A., & Gouda, S. (2025). Eco-friendly dye removal: Impact of dyes on aquatic and human health and sustainable fungal treatment approaches. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 29(1), 2733-2763. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2025.414816>
- Machado, V., Marinho, A., Vieira de Castro, P., & Silva, T. (2025). From fabric to finish: The cytotoxic impact of textile chemicals on humans health. *Textiles*, 5(2), 16. <https://doi.org/10.3390/textiles5020016>
- Negi, A. (2025). Natural dyes and pigments: Sustainable applications and future scope. *Sustainable Chemistry*, 6(3), 23. <https://doi.org/10.3390/suschem6030023>
- Dey, P., Dey, P., Hoque, M. B., Baria, B., Rahman, M. M., Shovon, S., & Das, D. (2025). Sustainable and eco-friendly natural dyes: a holistic review on sources, extraction, and application prospects. *Textile Research Journal*, 95(19–20) 2472–2499. <https://doi.org/10.1177/00405175251321139>

- Danila, A., Muresan, E. I., Chirila, L., & Coroblea, M. (2021). Natural dyes used in textiles: a review. In *The 7th International Symposium TTPF* (52-59). <https://doi.org/10.2478/9788366675735-010>
- Baaka, N., Khiari, R., & Haji, A. (2023). Ecofriendly dyeing of textile materials with natural colorants from date palm fiber fibrillium. *Sustainability*, 15(2), 1688. <https://doi.org/10.3390/su15021688>
- Uddin, M. A., Rahman, M. M., Haque, A. N. M. A., Smriti, S. A., Datta, E., Farzana, N., ... & Sayem, A. S. M. (2022). Textile colouration with natural colourants: a review. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131489. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131489>
- Pranta, A. D., & Rahaman, M. T. (2024). Extraction of eco-friendly natural dyes and biomordants for textile coloration: a critical review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 39, 101243. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101243>
- López-Rodríguez, D., Jordan-Nunez, J., Mico-Vicent, B., & Belda, A. (2024). Printing and dyeing of halloysite nano clay hybrid with natural chlorophyll dye on cotton fabric. *Dyes and Pigments*, 231, 112352. <https://doi.org/10.1016/j.dye-pig.2024.112352>
- Che, J., & Yang, X. (2022). A recent (2009–2021) perspective on sustainable color and textile coloration using natural plant resources. *Heliyon*, 8(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10979>
- Yadav, S., Prajapati, H. C., Sonkar, S. P., Nigam, R. S., Chandravanshi, R., & Gupta, C. (2025). Innovations in natural dye production: bridging tradition and modern technology. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1568094. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1568094>
- Buyukakinci, Y. B., Guzel, E. T., & Karadag, R. (2021). Organic cotton fabric dyed with dyer's oak and barberry dye by microwave irradiation and conventional methods. *Industria Textila*, 72(1), 30-38. <https://doi.org/10.35530/IT.072.01.1755>
- Amin, N., Rehman, F. U., Adeel, S., Ahamd, T., Muneer, M., & Haji, A. (2020). Sustainable application of cochineal-based anthraquinone dye for the coloration of bio-mordanted silk fabric. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(7), 6851-6860. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06868-3>
- Molla, W. T., Kebede, Z., Semagn, N., Adgo, A., & Godana, C. (2025). Sustainable reactive dyeing of polyester/cotton blend fabric via papain enzyme surface modification. *Scientific Reports*, 15(1), 40216. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24150-0>
- Gupta, V., Jose, S., Kadam, V., & Shakyawar, D. B. (2022). Sol gel synthesis and application of silica and titania nano particles for the dyeing and UV protection of cotton fabric with madder. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 5566-5576. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1881688>
- Yuan, W., Grethe, T., & Mahltig, B. (2023). Sol-gel coatings with the fluorescence dye Rhodamine B for optical modification of cotton. *Communications in Development and Assembling of Textile Products*, 4(1), 1-17. <https://doi.org/10.25367/cdatp.2023.4.p1-17>

- Mehrpour, L., Safapour, S., Sadeghi-Kiakhani, M., & Gharanjig, K. (2016). Chitosan-polypropylene imine dendrimer hybrid: a new ecological biomordant for cochineal dyeing of wool. *Environmental Chemistry Letters*, 14(4), 533-539. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0559-1>
- Bonet-Aracil, M. Á., Díaz-García, P., Bou-Belda, E., Sebastián, N., Montoro, A., & Rodrigo, R. (2016). UV protection from cotton fabrics dyed with different tea extracts. *Dyes and Pigments*, 134, 448-452. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2016.07.045>
- Barani, H., & Maleki, H. (2011). Plasma and ultrasonic process in dyeing of wool fibers with madder in presence of lecithin. *Journal of dispersion science and technology*, 32(8), 1191-1199. <https://doi.org/10.1080/01932691.2010.505525>
- Gorjanc, M., Savić, A., Topalić-Trivunović, L., Mozetič, M., Zaplotnik, R., Vesel, A., & Grujić, D. (2016). Dyeing of plasma treated cotton and bamboo rayon with Fallopia japonica extract. *Cellulose*, 23(3), 2221-2228. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-0951-9>
- Haji, A. (2020). Natural dyeing of wool with henna and yarrow enhanced by plasma treatment and optimized with response surface methodology. *The Journal of the Textile Institute*, 111(4), 467-475. <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1642710>
- López-Rodríguez, D., Jordan-Nunez, J., Mico-Vicent, B., & Belda, A. (2024). Printing and dyeing of halloysite nano clay hybrid with natural chlorophyll dye on cotton fabric. *Dyes and Pigments*, 231, 112352. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2024.112352>
- Li, Z., Zhang, Y., Xia, W., Tang, Y., & Li, Q. (2023). Producing natural-colored super-powerful antibacterial cotton with plasma-assisted fiber surface modification: a green and effective cotton process for medical and healthcare applications. *Materials Advances*, 4(3), 932-939. <https://doi.org/10.1039/D2MA00701K>
- Sadannavar, M. K., Periyasamy, A., Islam, S. R., Shafiq, F., Dong, X., & Zhao, T. (2024). Natural dyeing and antimicrobial functionalization of wool fabrics dyed with chinese dragon fruit extract to enhance sustainable textiles. *Sustainability*, 16(16), 6832. <https://doi.org/10.3390/su16166832>
- Tegegne, W., Haile, A., Zeleke, Y., Temesgen, Y., Bantie, H., & Biyable, S. (2024). Natural dyeing and anti bacterial finishing of cotton fabric with extracts from Justicia schimperiana leaf extract: a step towards sustainable dyeing and finishing. *International Journal of Sustainable Engineering*, 17(1), 52-61. <https://doi.org/10.1080/19397038.2023.2301702>
- Nair, V. K., Sahu, A., Samuchiwal, S., Malik, A., Ghosh, P., & Butola, B. S. (2025). Phycocyanin from oxygenic photogranules: A feasible ecofriendly dye for cotton and silk fibers. *Cleaner Materials*, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100334>
- Du, H., Yue, M., Huang, X., Duan, G., Yang, Z., Huang, W., ... & Yin, X. (2022). Preparation, application and enhancement dyeing properties of ZnO nanoparticles in silk fabrics dyed with natural dyes. *Nanomaterials*, 12(22), 3953. <https://doi.org/10.3390/nano12223953>

- Zhang, W., Wang, X., Weng, J., Liu, X., Qin, S., Li, X., & Gong, J. (2022). Eco-dyeing and functional finishing of wool fabric based on *Portulaca oleracea* L. as colorant and *Musa basjoo* as natural mordant. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(2), 103624. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103624>
- Arain, R. A., Ahmad, F., Khatri, Z., & Peerzada, M. H. (2021). Microwave assisted henna organic dyeing of polyester fabric: a green, economical and energy proficient substitute. *Natural Product Research*, 35(2), 327-330. <https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1619721>
- Taheri, M., Maleknia, L., Ghamsari, N. A., Almasian, A., & Fard, G. C. (2015). Effect of zirconium dioxide nanoparticles as a mordant on properties of wool with thyme: dyeing, flammability and antibacterial. *Oriental Journal of Chemistry*, 31(1), 85. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/310109>
- Lee, J. H., Jung, J. S., & Kim, S. H. (2020). Dyeing and antibacterial properties of chemically recycled PET thermal-bonded nonwovens dyed with *Terminalia chebula* dye. *Polymers*, 12(8), 1675. <https://doi.org/10.3390/polym12081675>
- Pour, R. A., Bagheri, R., Naveed, T., Ali, N., Rehman, F., & He, J. (2020). Surface functionalization of wool via microbial-transglutaminase and bentonite as bio-nano-mordant to achieve multi objective wool and improve dyeability with madder. *Heliyon*, 6(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04911>