

# Mürekkep Arındırma (Deinking) Sürecinde Enzim Kullanımının Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik Üzerindeki Ekonomik ve Çevresel Yansımaları: Bir Tematik Analiz Uygulaması

Hakan Ertuğral<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Baskı Teknolojileri Bölümü, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-0870-8866), hakanertugral@gmail.com

(İlk Geliş Tarihi 20.05.2025 ve Kabul Tarihi 23.10.2025)

(DOI: 10.35354/tbed.1702622)

**ATIF/REFERENCE:** Ertuğral, H. (2026). Mürekkep Arındırma (Deinking) Sürecinde Enzim Kullanımının Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik Üzerindeki Ekonomik ve Çevresel Yansımaları: Bir Tematik Analiz Uygulaması. *Teknik Bilimler Dergisi*,16(1),8-20.

## Öz

Geride dönüştürülmüş kâğıt kullanımı, doğal kaynakların korunması ve atık miktarının azaltılması açısından çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlamaktadır. Özellikle selüloz bazlı hammaddelerde dışa bağımlılığı azaltmakta ve ekonomik faydalar sunmaktadır. Bu çalışmada, kâğıt geri dönüşüm döngüsünün en kritik aşamalarından biri olan mürekkep arındırma (deinking) süreci teknik, ekonomik ve çevresel boyutlarıyla ele alınmıştır. Özellikle bu süreçte enzim teknolojisinin uygulanabilirliği araştırılmış ve geleneksel kimyasal yöntemlerle karşılaştırmalı analizlere yer verilmiştir. Enzimlerin, selüloz liflerine zarar vermeden mürekkep parçacıklarını yüzeyden ayırmadaki etkinliği ortaya konulmuştur. Bu durumun geri dönüştürülmüş kâğıt kalitesi üzerindeki olumlu etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, Avrupa Birliği başta olmak üzere çeşitli bölgesel geri dönüşüm istatistikleri incelenmiştir. Enzim temelli deinking uygulamalarının yaygınlık düzeyi ve potansiyeli analiz edilmiştir. Çalışmanın metodolojik yönü, yalnızca literatüre dayalı bir incelemeyle sınırlı değildir. Bu kapsamda, çalışmanın nitel veri boyutunu derinleştirmek amacıyla bir saha ziyareti gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler tematik analiz yöntemiyle değerlendirilmiştir. Bu veriler, NVivo yazılımı kullanılarak tematik analiz yöntemiyle sistematik biçimde çözümlenmiştir. Kodlama süreciyle oluşturulan nitel bulgular, dört ana tema altında sınıflandırılmıştır: (1) kimyasal kullanımının azaltılması, (2) atık su kalitesinde iyileşme, (3) kâğıt kalitesinde sürdürülebilir artış ve (4) çevresel etkilerde iyileşme dir. Bu temalar, enzim bazlı arındırma uygulamalarının yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel avantajlarını da ortaya koymuştur. Tematik analiz yoluyla elde edilen bulgular, literatürle desteklenerek değerlendirilmiş ve saha gerçekliği ile kuramsal yaklaşımlar arasında bütünlük sağlanmıştır.

Sonuç olarak, çevresel etkilerin azaltılması, enerji ve kimyasal kullanımının düşürülmesi ve çıktı kalitesinin artırılması gibi avantajlar, enzim bazlı deinking süreçlerinin sürdürülebilir kâğıt üretiminde stratejik önem taşıdığını göstermektedir. Bu bağlamda, mürekkep arındırma sürecinde enzimlerin kullanımı, geri dönüşüm teknolojilerinin optimizasyonu açısından hem ekonomik hem de çevresel faydalar sunan yenilikçi bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Çalışmanın özgün katkısı, laboratuvar ölçeğinden farklı olarak endüstriyel ölçekte yapılan saha gözlemleriyle desteklenen tematik analiz yoluyla, enzim bazlı deinking süreçlerinin ekonomik ve çevresel yansımalarına ilişkin bütüncül ve uygulanabilir bir perspektif sunmasıdır.

**Anahtar Kelimeler:** Enzimatik Mürekkep Arındırma, Döngüsel Kağıt Ekonomisi, Çevresel Sürdürülebilirlik, Tematik Analiz

## Economic and Environmental Implications of Enzyme Use in the Deinking Process for Recycling and Sustainability: A Thematic Analysis Application

### Abstract

The use of recycled paper makes significant contributions to environmental sustainability in terms of conserving natural resources and reducing waste. It also reduces dependence on imported cellulose-based raw materials and offers economic benefits. In this study, the deinking process—one of the most critical stages in the paper recycling cycle—is examined from technical, economic, and environmental perspectives. In particular, the applicability of enzyme technology in this process is investigated, and comparative

\* Sorumlu Yazar: [hakanertugral@gmail.com](mailto:hakanertugral@gmail.com)

analyses with traditional chemical methods are included. The effectiveness of enzymes in separating ink particles from the surface without damaging cellulose fibers has been demonstrated. The positive effects of this on the quality of recycled paper have been evaluated. Additionally, various regional recycling statistics, particularly those of the European Union, have been examined. The prevalence and potential of enzyme-based deinking applications have been analyzed. The methodological aspect of the study is not limited to a literature-based review. In this context, a field visit was conducted to deepen the qualitative data dimension of the study, and the data obtained were evaluated using thematic analysis methods. These data were systematically analyzed using the NVivo software and thematic analysis method. The qualitative findings generated through the coding process were classified under four main themes: (1) reduction in chemical use, (2) improvement in wastewater quality, (3) sustainable increase in paper quality, and (4) improvement in environmental impacts. These themes have revealed not only the technical but also the economic and environmental advantages of enzyme-based deinking applications. The findings obtained through thematic analysis were evaluated with the support of the literature, and consistency was ensured between field reality and theoretical approaches.

In conclusion, advantages such as reduced environmental impacts, decreased energy and chemical usage, and improved output quality demonstrate the strategic importance of enzyme-based deinking processes in sustainable paper production. In this context, the use of enzymes in the ink removal process is considered an innovative approach that offers both economic and environmental benefits in terms of optimizing recycling technologies. The original contribution of this study lies in its comprehensive and practical perspective on the economic and environmental implications of enzyme-based deinking processes, supported by field observations conducted at an industrial scale rather than a laboratory scale, through thematic analysis.

**Keywords:** Enzymatic Deinking, Circular Paper Economy, Environmental Sustainability, Thematic Analysis

## 1. Giriş

Günümüzde artan çevresel kaygılar, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve iklim krizine bağlı küresel baskılar, üretim ve tüketim süreçlerinde sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımların benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çerçevede, geri dönüşüm faaliyetleri yalnızca çevresel koruma açısından değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliği bakımından da stratejik bir önem taşımaktadır. Kâğıt endüstrisi, yoğun hammadde ve enerji tüketimi nedeniyle çevresel etkisi yüksek sektörler arasında yer almakta; bu durum, kâğıt geri dönüşümünün hem çevre hem ekonomi açısından cazip bir çözüm olarak öne çıkmasına neden olmaktadır. Ancak geri dönüştürülmüş kâğıt üretim sürecinde karşılaşılan teknik engeller, bu potansiyelin tam anlamıyla değerlendirilmesini güçleştirmektedir. Söz konusu teknik zorluklardan en önemlisi, atık kâğıtların üzerindeki mürekkep kalıntılarının uzaklaştırılmasını sağlayan “mürekkep arındırma (deinking)” işlemidir. Mürekkep kalıntılarının etkin biçimde uzaklaştırılmaması, nihai ürün kalitesini düşürmekte, liflerin yeniden kullanımını sınırlamakta ve üretim verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Geleneksel mürekkep arındırma yöntemleri genellikle yüksek miktarda kimyasal madde, enerji ve su tüketimini gerektirmekte; bu da çevresel yükleri artırmakta ve maliyetleri yükseltmektedir. Bu noktada, biyoteknolojik bir çözüm olarak öne çıkan enzim temelli mürekkep arındırma yöntemleri, hem çevresel etkileri azaltma hem de üretim sürecini optimize etme potansiyeliyle dikkat çekmektedir. Enzimler, selüloz yapısına zarar vermeden mürekkep parçacıklarını lif yüzeyinden ayırarak hem kâğıt kalitesini artırmakta hem de kimyasal kullanımını azaltmaktadır.

Bu çalışma, enzimlerin mürekkep arındırma sürecindeki etkinliğini teknik, ekonomik ve çevresel boyutlarıyla inceleyerek, sürdürülebilir kâğıt geri dönüşümüne nasıl katkı sağladığını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Aynı zamanda Avrupa ve dünya genelindeki uygulamalar üzerinden sektörel eğilimler değerlendirilmekte; enzim teknolojisinin mevcut geri dönüşüm pratiklerine entegrasyonunun potansiyel etkileri tartışılmaktadır. Literatürde enzim temelli mürekkep arındırma çalışmaları ağırlıklı olarak laboratuvar ölçeğinde yürütülmüş olup, endüstriyel uygulamalarda doğrudan gözlemsel çalışmalar

sınırlıdır. Bu çalışmanın özgün yönü, saha ziyareti temelli gözlemlerle endüstriyel üretim hattında enzim uygulamalarının etkilerini doğrudan incelemesi ve elde edilen bulguları tematik analiz çerçevesinde sistematik olarak yorumlamasıdır. Bu yaklaşım, enzim bazlı deinking süreçlerinin sadece laboratuvar parametreleriyle değil, gerçek üretim ortamında da sürdürülebilirlik, verimlilik ve kalite üzerindeki etkilerini ortaya koyarak literatüre yeni bir boyut kazandırmaktadır. Çalışmanın endüstriyel ölçekli uygulanabilirlik ve tematik analiz metodolojisinin entegrasyonu açısından literatürdeki mevcut bilgi boşluğunu doldurmaya yönelik önemli bir katkı sağlaması hedeflenmektedir.

## 2. Kâğıt Geri Dönüşümünün Önemi ve Mürekkepten Arındırma Sürecinin Teknik ve Çevresel Boyutları

### 2.1. Kâğıt Geri Dönüşümünün Sürdürülebilirlik Bağlamında Önemi ve Uygulamaları

Doğaya verilen hasarın minimize edilmesi ve kaynakların kısıtlılığından ötürü sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm konuları önem kazanmaktadır. Bu kapsamda baskılı kâğıtların geri dönüştürülüp tekrar kullanılması önem kazanmaktadır. Atık kâğıtların tekrar hammadde olarak kullanılmasında ise mürekkeplerin uzaklaştırılması en önemli adımlardan biri olarak tanımlanabilir (Yılıgör, 2010). Avrupa’da son yıllarda yaşanan gelişmelere paralel olarak kâğıt geri dönüşüm oranlarında 1991 yılındaki %40,8’ den 2015 yılı itibarıyla %71,5 gibi bir orana ulaşılmış, bu geri dönüştürülen kâğıtların ise %92,8 kısmını basılı mecmualar %93,9 kadarını ise ambalaj malzemeleri oluşturmuş, ofis atık kağıdı olarak anılan ve CEPI tarafından ‘Other Graphic Papers’ tanımlanan malzeme %31,1 iken en düşük geri dönüşüm oranına sahip kâğıt malzeme olarak kalmıştır (Tsatsis et al., 2017). Geri dönüştürülmüş kâğıt kullanımının kâğıt üretiminde %20-50 arasında daha az CO<sub>2</sub> emisyonuna neden olduğu, klor içerikli kimyasallar yerine oksijen içerikli kimyasallar ile ağartma işleminin yeterli olması gibi nedenlerle de birleştiğinde çevreci yönü önem kazanır (Bajpai, 2024). Gerek tüketici talebi gerek politik tercihlerin de zorlaması sonucunda önem kazanan geri dönüştürülmüş kâğıt kullanımında temel zorluklardan biri kullanılmış kağıdın içerdiği mürekkeplerden ve kirlerden, maruz kaldığı tüm geçmiş kontaminasyondan arındırılması sürecidir ve

bu aşmada kullanılan mürekkep, baskı altı malzemesi, tercih edilen basım tipi gibi değişkenler süreçlerin kolaylık zorluk derecesi üzerinde doğrudan etki sahibi olmaktadır (Bajpai et al., 1999). Günümüzde kâğıt ürünlerinin yaklaşık %56'sı geri dönüştürülmüş malzemeden elde edilmektedir. Bu oranın teknik olarak en fazla %81'e kadar çıkabileceği belirtilmektedir. Özellikle lif kayıpları, kullanım kısıtları ve toplama verimsizlikleri nedeniyle bu seviye teknik olarak ulaşılabilecek en yüksek oran olarak verilmiştir (Bajpai, 2024). Geri dönüştürülmüş kağıtların kullanımının kağıt hammaddesine ulaşımı kolay olmayan ülkeler için de iyi bir alternatif olduğu, ekonomik açıdan hammaddeye doğrudan sahip olmayan ülkeler için de kolaylıklar sağlayacağı değerlendirilmektedir (Karahan & Karademir, 2019). Geri dönüştürme açısından lider durumdaki Avrupa'da 13 ülke %70 geri dönüştürme oranını aşmayı başarmış olup, 1998 yılından günümüze geri dönüştürülmüş kağıt kullanımlarını yaklaşık 4 kata kadar arttırmayı başarmışlardır. Bununla beraber Kuzey Amerika'da da 2000lerde başlayan teşviklerin neticesinde geri dönüştürülmüş kağıt kullanımında artış eğilimi ciddi şekilde gözlemlenmeye başlanmıştır. Bununla beraber Avrupa ülkelerinde de 12 ülkenin henüz %60 dönüşüm oranını geçemediğine dikkat edilmelidir (Bajpai, 2024). Kâğıt tüketimine bakıldığında, ortalama olarak bir kişi için 60kg civarında bir miktar ülkelerin gelişmişlik düzeylerini takip eden bir eğilim ile kişi başı kağıt tüketiminin de artış gösterdiği özellikle Asya bölgesinde gelişmekte olan ekonomilerin gelişmelerine paralel bir şekilde kağıt tüketimlerinin de artış göstereceği değerlendirilmektedir. Son 20 yıla bakıldığında, gelişmekte olan ekonomilerin konumlandığı bölgelerde kağıt ve kağıt-karton ürünlerine talepte artış eğilimi gözlenmekteyken Kuzey Amerika, Avrupa ve Japonya gibi bölgelerde talepte azalmalar veya sabit eğilimler gözlenmekte bunun neticesinde ise üretim tesisleri kapatılmakta veya üretimlerini yeni bölgelere doğru kaydırmaktadır. Geri dönüştürülmüş liflerin ticareti de geçtiğimiz yıllarda ticarete önemli bir yer bulmaya başlamıştır (Bajpai, 2024).

Taze lif kullanımı yerine geri dönüştürülmüş malzemeden elde edilen liflerin yeni kağıtların üretiminde kullanılması durumunda 28-60% daha az enerji tüketimi mümkün olmakla beraber bunun yanında ormanlara zarar verilmemesi de eklendiğinde çevre açısından olumlu sonuçları olacak bir süreç olduğu ortaya çıkmaktadır. Kâğıt geri dönüşümünün bölgesel gelişmişlik düzeyiyle de paralel bir ilişkisi söz konusudur. Geri dönüştürülmüş kağıt kullanımı, taze lif kullanımında ortaya çıkan zehirli kimyasal yan ürünlerin daha az olması, kimyasal mürekkepten arındırma içeren geri dönüştürme işlemlerinde bile miktarın taze lif kullanımındakinden az olması, atık su oluşumunun çok daha az miktarlarda olması geri dönüştürülmüş kağıt kullanımını çevreye duyarlı bir proses haline getirmektedir (Kumar & Dutt, 2021). Günümüzde geri dönüştürülmüş liflerden üretilen kağıtların kalite açısından taze liflerden elde edilenlere yakın olması özellikle mürekkepten arındırma proseslerinde kat edilen aşamaların neticesinde mümkün olmaktadır (Bajpai, 2024). Bununla beraber artan oranda geri dönüştürülmüş kağıt kullanımına paralel olarak, hammadde olarak kullanılan geri dönüştürülmüş kağıtların kalitesinde de çok ciddi problemler ortaya çıkmaktadır (Pivnenko et al., 2015). Bir diğer önemli bir husus, kağıt tüketiminin azaldığı veya aynı kaldığı ülkelerde geri dönüştürülmüş liflerden kağıt kullanımına teşvikler verilmekte, kampanyalar düzenlenmekte, malzemenin bu şekilde üretilmesi her geçen yıl arttırılmaktadır (Bajpai, 2024). Mürekkepten arındırılmış kağıtların geri dönüştürülmesinin yenilenebilir ve çevreci enerji kaynağı olarak nitelenen biyoethanol gibi yakıtların

üretimi açısından da önemli olduğu yakın zamanda yapılan çalışmalarla ortaya konulmaktadır ki bunun enerji ihtiyacının sürekli arttığı günümüzde önemli bir alternatif çözüm olabileceği değerlendirilmelidir (Saini et al., 2020; Adu et al., 2018)

Geçtiğimiz yıllarda dünya genelinde atık kağıtların tekrar kullanımına yönelik talepte yıllık bazda %2,5 artış gözlemlenmiştir (Hong et al., 2017). Doğrudan hammaddeye erişimi olmayan veya hammadde için endüstriyel orman yatırımlarının gerek maddi gerekse zaman açısından ihtiyaçları karşılamada yetersiz kalma olasılığına bir alternatif olması açısından da geri dönüştürülmüş hammaddenin kullanılmasında artan talebe paralel bir gelişme söz konusu olmaktadır. Geri dönüştürülüp kullanılma açısından en yüksek oranlara sahip olan kağıt için 2021 yılında global olarak 500 milyon ton kağıdın kullanılmış olacağı ve bunun yarısının da ambalaj endüstrisinde kullanılacağı bildirilmiştir (Han et al., 2021). Geri dönüştürülmüş kağıtların kullanımı, çöp toplanma alanlarının yönetimi açısından da kolaylıklar sağlamakta olup bu alanlarda atık birikimi olacak milyonlarca ton kağıdın birikmesi gibi bir problemin de önüne geçilmektedir (Bajpai, 2024). Global anlamda kağıt üretim endüstrisinin yıllık olarak %30 olarak büyüyeceği düşünülmektedir (de Azevedo et al., 2019). Talepte gözlenecek bu artışın üstesinden gelebilmek için doğal kaynakların kullanımının ciddi hasarlara neden olabileceği düşünüldüğünde geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımının önemi de katlanarak artmaktadır. Maddi getirilerinin yanında prosesin sürdürülebilir olması açısından alternatiflerin yaratılması kritik bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Pivnenko vd. tarafından dikkat çekilen bir husus, yakın geçmişte regülasyonlar ile mücadele ediliyor olmasına ve azaltılmış olmasına rağmen günümüzde üretilen kağıtlarda, gerek taze liflerden üretilen gerekse geri dönüştürülmüş kağıtlardan üretilen ki fenol gibi taze liflerden üretilmiş kağıtlarda rastlanmayan kimyasalları da içeren bir skalada kağıtlar ve kağıt özellikli ambalaj malzemelerinde 157 tanesi kimyasal açıdan tehlikeli 10000 civarında kimyasal olmasıdır ki bu kimyasallar içinde bio-accumulating olarak tanımlanan biyolojik olarak aktive edici malzemelerin de olması özellikle gıda ambalajlarında ciddi migrasyon sorunları yaratması açısından daha da kritik bir hal almaktadır (Pivnenko et al., 2015).

Kâğıdın geri dönüşümü dört aşamalı bir süreçtir ve bunlar; hamurlaştırma (defibering), yıkama ve yüzdürme (washing/flotation), beyazlatma (whitening) ve işlem (treatment) olarak sıralanırlar (Saxena & Chauhan, 2016). Deinking prosesi, flotation/washing (yüzdürme) olarak tanımlanan aşamada tam olarak gerçekleştirilir ve burada amaç mürekkep parçalarının kâğıt liflerinden ve yüzeylerinden uzaklaştırılmasıdır (Pathak, Bhardwaj, & Singh, 2011). Geri dönüştürülmüş liflerden kağıt kullanımı konusundaki temel zorluklar arasında en önde gelen mürekkepten arındırma prosesine limitli döngü ve ilave malzemelerin arındırılması da eşlik etmektedir (Bajpai, 2024). Geçmişte yalnızca ekonomik nedenlerle tercih edilen geri dönüştürülmüş liflerin kağıt üretiminde kullanılması 2000lerden itibaren on yıllık bir süre içinde geçmişte olanın iki katına hızlı bir şekilde çıkmış, günümüzde ise geçmiş oranların 3-4 misli gibi miktarlara dayanmış, artan çevre duyarlılığı ve toplumsal reflekslerin de neticesinde artışına da devam edeceği öngörülmektedir (Bajpai, 2024). Maliyet hususunda, toplumsal bilinçlenmenin ve atık kağıtların kolay toplanmasına takiben bölgesel ihtiyaçlar ve taşıma maliyetlerinde elde edilecek avantajlar, gelişen teknolojilerin yardımıyla elde edilen liflerin kalitesinin mümkün olduğunca korunabilmesi, geri dönüştürme



işlemi sırasında lif kaybının minimaliz edilmesi, üretim tesislerinde yapılacak çalışmalar ile kağıt üretimi veya baskıların yapılması esnasında ortaya çıkan atıkların kontamine olmadan toplanıp ekstra işleme maruz kalmadan tekrar kullanıma alınabilir olması gibi avantajlar sağlayacak olmakla beraber elde edilen kağıtların kalitesinin de taze liflerden elde edilen kağıtların kalitesine mümkün olduğuna yaklaşması sonucunda üretilen bu kağıtların değerli kağıtlar sınıfına girebilmesiyle üreticisine katma değer katacağı dikkate alınabilir (Şahin, 2016). Dikkate alınması gereken bir husus da mürekkep arındırma işlemlerinin yapılmasında her ton için 10-20 Euro arasında kimyasal maliyetin olduğu ve maliyetin ağartma işlemiyle iki katına kadar çıkabileceğidir (Bajpai, 2024).

## 2.2. Mürekkepten Arındırma Süreci: Teknik, Ekonomik ve Regülasyonel Değerlendirme

Mürekkepten arındırma süreci, geri dönüştürülmüş kağıdın yeniden kullanılabilir hale gelmesinde kritik bir aşamadır. Bu işlem, kağıt liflerinden mürekkep kalıntılarının uzaklaştırılmasını sağlayarak hem ürün kalitesini artırır hem de çevresel kirliliği azaltır. Aynı zamanda enerji tüketimi, kimyasal kullanımı ve mevzuata uyum açısından değerlendirildiğinde, sürdürülebilir geri dönüşüm uygulamalarının başarısı bu sürecin etkinliğine doğrudan bağlıdır.

Mürekkepten arındırma işlemi, INGEDE (International Association of the Deinking Industry) 11 standartları altında belirlenmiş prosedürlere, metotlara bağlı kalınarak test edilmekte ve sonuçları değerlendirilebilmektedir (Cicekler & Tutus, 2021). Ofislerde ortaya çıkan karışık ofis atığı (MOW-Mixed Office Waste) olarak da anılan atık malzemelerin geri dönüşümü en zorlu mürekkepten arındırma olarak karşımıza çıkmaktadır (Bajpai et al., 1999). Günümüzde geri dönüştürülmüş liflerden üretilen kağıtların ve kağıt malzemelerin yaklaşık %90'ı mürekkepten arındırma işlemine gerek duymayan, tekrar baskı ve yazı amaçlı kullanılmayacak olan çoğunlukla kağıt ve karton ambalaj malzemelerin üretilmesinde kullanılmakta olup, tüm bu ürünlerin yalnızca %6 gibi bir kısmı bu amaçlarla kullanıma tekrar sokulur durumdadır ve bu oranın 2025 yılına kadar çok bir artış da göstermeyeceği tahmin edilmektedir (Bajpai, 2024). Kısacası, geri kazanılmış sekonder liflerden üretilen kağıtların kullanımını daha düşük kalitede kağıtların üretilmesi amacıyla olduğunda mürekkepten arındırma proseslerine ihtiyaç duyulmamakta, bu işlem yüksek kalitede kağıtların tekrar kullanılacak şekilde hazırlanmasında önem kazanmaktadır (Şahin, 2016). Bu düşük maliyetli hammadde olarak değerlendirilebilecek geri dönüştürülmüş kağıttan elde edilen sekonder liflerin kullanımında karşılaşılan temel sorunlar arasında enerji, işçilik ve proses zamanları ile beraber baskı teknikler ve kullanılan mürekkepler sayılabilir (Karademir, et al. 2018). Yüksek kalitede kağıtların üretiminde kullanılacak geri dönüştürülmüş kağıt hamurlarının elde edilmesi için mürekkepten arındırma işlemi kritik önemde olup sadece estetik açıdan değil, elde edilecek yeni malzemede mürekkepten gelen bir takım istenmeyen başka kimyasal yapıların olmaması, direnç ve su tutma özelliklerindeki değişiklikler, verim kayıplarının olmaması, mürekkep kaynaklı olarak elekte takılı kalan lifin olmaması gibi özellikler de geri dönüştürülmüş kağıt üretim sürecinde önemlidir (Şahin, 2011).

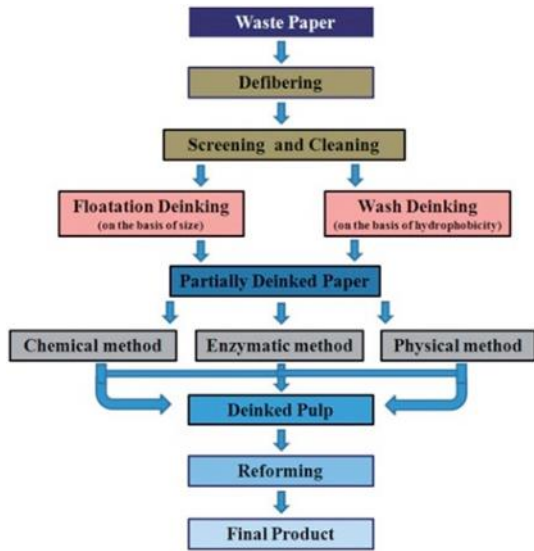
**Washing** olarak tanımlanan proses efektif ve 10 mikron altındaki partiküller için de kullanılabilir olmasına rağmen yoğun su tüketimi nedeniyle Avrupa ülkelerinde yasaklanmış, bu nedenle 40-150 mikron arasındaki partiküllerin öncelikle liflerden ayrıldığı, sonra hava kabarcıklarına yapışan bu partiküllerin

köpük şeklinde tamamen uzaklaştırıldığı hidrofobik yapılarda efektif flotasyon (flotation) tekniği kullanılmaktadır (Yılıgör & Cameron, 2009). Polimer malzemeler üzerine mürekkep partiküllerin tutundurulmasına dayandırılan adsorbsiyon de-inking prosesi de enerji ve su kullanımında yarattığı düşüşler ile son dönemde dikkat çeken metotlardan biridir (Petzold & Schwarz, 2015). Bu metodun değerlendirilmesi kapsamında, düşük maliyetli ve çevreye uyumlu olarak değerlendirilmesi mümkün olan kitin bazlı polimer malzemelerin kullanılması özellikle karbon siyah mürekkep pigmentinin liflerden çıkarılması sürecinde etkili olarak rapor edilmiştir (Farkas et al., 2020). Kağıt üzerindeki baskı yapılan mürekkep tipi, dispers olan ve olamayanlar olmasına göre sınıflandırılırken yıkama ile temizleme metodunda dispers olabilen mürekkep ve diğer lif dışı parçacıkların daha küçük boyutlara bölünerek uzaklaştırılması mümkün olmaktadır (Şahin, 2016). Mürekkepten arındırma işleminde özellikle dağılmış ve liflerden uzaklaşmış parçacıkların tekrar liflere tutunmasının önüne geçilmesi gerekmektedir (Karademir, et al., 2018). Flotasyon, yıkama ile yapılan mürekkepten arındırma işlemine göre daha seçici bir teknik olmakla beraber her iki teknikte de özel kimyasallar süreçlerde kullanılmaktadır (Bajpai, 2024). Almanya'da üretilen kağıtların %80 kadarı geri dönüştürülmüş liflerden elde edilmekte olup, flotasyon ile mürekkepten arındırma en önemli proses olarak öne çıkmaktadır (Petzold & Schwarz, 2015). En yaygın metot olan flotasyonda, çok yüksek miktarlarda kimyasal kullanımı söz konusudur (Cicekler & Tutus, 2020). Buna ilave olarak ise su kullanımının azlığı, prosesin gerçekleşeceği alanın daha ufak olabilir olması ve daha düşük yatırı maliyetleri gibi avantajları vardır (Takahashi, 1994). Flotasyon süresinin optimize edilmesi, edilmediği durumlarda optik ve fiziksel özelliklerde istenmeyen sonuçların olabileceğine dikkat edilmelidir (İmamoğlu & Peşman, 2012). Kimyasal mürekkepten arındırma işlemine kullanılan kimyasallar sırasıyla sodyum hidroksit, hidrojenperoksit, sodyum silikat, sabun, süfektantlar, kalsiyum tuzları, sülfürik asit, sodyumhidrosülfat, sodyumhidroklorür, talk pudrası sayılabilmektedir (Bajpai, 2024). Yüksek miktarlarda sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum silikat, magnezyum sülfat, hidrojen peroksit, şelatlaştırıcılar ve sürfaktan (yüzey aktifleştirici) kullanımını nedeniyle enzimlerin kullanımını enerji tasarrufu sağlayan, maliyetleri düşüren ve daha çevreci bir yöntem olarak öne çıkmıştır (Singh et al., 2019). Enzimlerin kağıt üretiminde kullanılması liflendirme aşamasındaki kullanımı kaynaklı olarak uzun bir geçmişe sahiptir (Yılıgör, 2010).

Mürekkepten arındırma prosesinin dışında kağıt üretim süreçlerinde de kullanılan bazik, klor, oksijen içerikli kimyasallar ve polimerlere alternatif süreçler olarak enzimler kendilerine yer bulmaktadır (Torres et al., 2012).

MOW (Mixed Office Waste) olarak tanımlanan basılı-yazılı kağıt attığı en önemli atık hammaddelerinden biri olmakla beraber kimyasal süreçler ile mürekkepten arındırılması non-impact mürekkep (toner) içeriği nedeniyle problem teşkil etmekte bunun üstesinden gelinmesi için de enzim kullanım teknikleri öne çıkmaktadır (Singh et al., 2020). Deinking prosesinde, yukarıda da ifade edildiği üzere hidrofobik yapıların flotasyon işlemine kolay bir şekilde uzaklaştırılması mümkünken, yaşlandırılmış ve hidrofil yapılarda uzaklaştırılması için kimyasal, fiziksel ve enzimatik tekniklerin uygulanması gerekir (Saxena & Chauhan, 2016). Özellikle termoset tonerlerin kullanıldığı basılı yüzeylerde bu polimerleri liflerden ayırmak son derece zor olmakta, enzimlerin kullanımı da yukarıda da belirtildiği üzere çevreci bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Pathak, et al, 2011). Tonerlerle

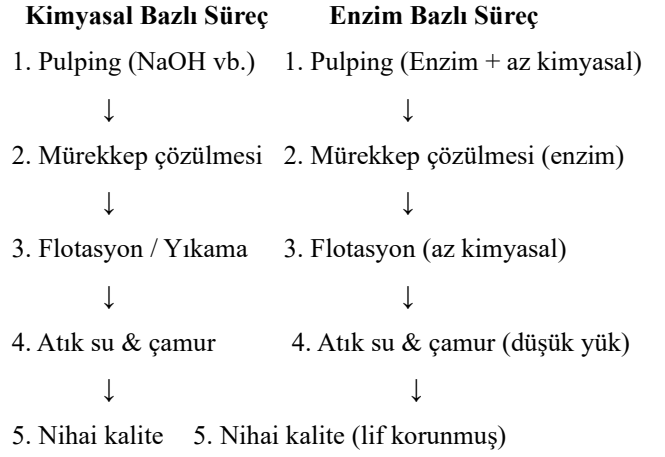
yapılan baskılardan elde edilmiş geri dönüştürülecek kağıtların üzerindeki mürekkepler, non- dispense ve termoset yapılar olmakla beraber baskım işlemi sırasında fiziksel olarak lif yapılarına tutunurlar ki bu da onların kimyasal yöntemlerle ortamdan uzaklaştırılmasını zorlu ve pahalı bir hale getirmektedir (Pathak et al., 2011). Yapılan çalışmalarda lazer ve inkjet baskılar yapılarak gerçekleştirilen baskı işlemlerinde lazer baskılı kağıtların flotasyon ile mürekkepten arındırılıp geri dönüştürülmesi işleminde daha olumlu sonuçlar verdiği rapor edilmiştir (Karademir, et al., 2018). Görüldüğü gibi hangi mürekkebin ve hangi metodun tercih edildiği, kimyasal geri dönüştürme işlemlerinde verimlilik ve istenen çıktılarının elde edilmesinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde enzimler ile yapılan işlemlerde, bu enzimler doğrudan lif- mürekkep bağının olduğu bölgeye saldırmakta bağı hidrolizle parçalayıp mürekkep partiküllerini liflerden tamamen uzaklaştırmaktadır (Singh et al., 2020). Kimyasal yöntemlerden flotasyonda ise doğrudan mürekkep ve mürekkep, mürekkep ve kabarcık, mürekkep ve selüloz, selüloz ve kabarcık arasındaki çekim enerjileri etkin rol oynamakta, yapıların su isteği olarak değerlendirebileceğimiz hidrofobitesi ayrıştırma işleminde rol oynamaktadır (Takahashi, 1994). Kullanılmış kağıt atıklarının sürekli bulunabilirliği, prosesin sürekliliğini garanti altına alacak olması ve bu şekilde sürdürülebilir kılması geri dönüştürülmüş kağıt sektörü için kritik olmakla beraber geri dönüşüm işlemleri sırasında yüksek maliyetlere maruz kalmamak adına mümkün olduğuna az kimyasal kullanımı, atık su temizleme maliyetlerinin ve çevre maliyetlerinin en düşük seviyelere çekilebilmesi, mürekkepten arındırma esnasına optimum koşulların doğru şekilde ayarlanmasıyla lif kaybının azaltılması ve bu liflerin direnç özelliklerinin de korunması kritik konular olarak üreticilerin karşısına çıkmaktadır (Şahin, 2016). Şekil 1’de deinking prosesinin en temel hali diyagram şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 1. Deinking prosesinin temel adımları

**Kaynak:** (Saxena & Chauhan, 2016).

Şekil 1 literatürde verilen deinking sürecinin temel adımlarını göstermektedir. Çalışmanın özgün katkısı olarak, enzim bazlı ve kimyasal bazlı süreçlerin farklılıklarını şekilsel olarak ortaya koyan karşılaştırmalı akış diyagramı Şekil 2’te sunulmuştur.



Şekil 2 Enzim Bazlı ve Kimyasal Bazlı Deinking Süreçlerinin Karşılaştırmalı Akış Diyagramı

**Kaynak:** Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Enzimler, kağıt üretimi ve mürekkepten arındırma proseslerinde yakın dönemde kullanılmaya başlanılan, kimyasal metotlara ve yoğun kimyasal kullanıma karşı bir alternatif olarak değerlendirilen biyolojik katalizörler olarak düşünülmelidir (Torres et al., 2012). Enzimlerle yapılan çalışmalarda ortam pH’nın ayarlanması için nitrik asit kullanımı, optimum enzim koşullarının sağlanabilmesi için dikkat edilmesi gereken bir husustur (Tsatsis et al., 2017). Enzim metodunda kullanılan enzimler; cellulases, xylanases, laccases, amylases, lipase, pectinases olarak sıralanabilir (Saxena & Chauhan, 2016). Cellulases ve Laccases enzimlerinin zehirli mürekkep bileşenlerini arındırdığı ve çevreci yakıt biyoetanol üretiminde de iyi bir seçenek olacağı rapor edilmiştir (Saini et al., 2020). Enzimler, lif yüzeyindeki fibrilleri uzaklaştırıp mürekkebin partiküllerini liflerden ayırarak, fibrillerden ayrılan partiküllerin daha hidrofobik hale gelmesi nedeniyle süspansiyon içerisinde daha kolay ayrışabilir olmasını sağlayarak ve partikül boyutlarını değiştirerek flotasyon ve yıkama yöntemleri için uygun boyutlu hale getirerek deinking prosesinde görev alırlar. Enzimlerin kullanımında ortam sıcaklığı ve pH da önemli faktörlerdir. Bununla beraber mekanik işlemlerin de enzimlerle birlikte kullanılmasının selüloz fibrillerini enzimlerin erişime daha fazlası açması nedeniyle kullanıldığı bilinmektedir (Yılgör, 2010; Saxena & Chauhan, 2016). Enzimlerin kullanımıyla geleneksel kimyasalların kullanıma olan ihtiyacın %60 daha az olacağı rapor edilmektedir (Singh et al., 2020). Tematik analiz kapsamında gözlemlenen endüstriyel pilot uygulamalarda, operatör görüşlerine göre kimyasal kullanımının yaklaşık %50 oranında azaldığı, BOD ve COD değerlerinin gözlemlere dayalı olarak yaklaşık %30–40 oranında iyileştiği ve atık su görünümünde belirgin düzelme gözlemlenmiştir. Ayrıca enzim uygulaması, süreç kontrolünü kolaylaştırdığı yönünde görüşler sunmaktadır. Çalışmada saha gözlemlerine dayalı kimyasal tasarruf oranı, literatürde bildirilen %60’lık değerden farklı çıkmakta olup, bu durum yerel koşullar, kullanılan kâğıt/mürekkep tipi ve operasyonel faktörlerden kaynaklanmaktadır. Çalışmada BOD ve COD değerlerinde gözleme dayalı olarak yaklaşık %30–40 oranında iyileşme rapor edilmiştir; ancak bu parametreler için doğrudan ölçüm yapılmamış, bulgular nitel gözlem ile desteklenmiştir. Gelecekte sayısal ölçümlerin tablo formatında ‘öncesi–sonrası’ karşılaştırmalarıyla sunulması, sonuçların güvenilirliğini artıracaktır.

Cellulases enzimi ile ilgili yapılan çalışmalarda bu enzimin efektif şekilde deinkin prosesinde kullanılabilir olduğu gözlemlenmiş olup, miktar ve zaman ayarlamasının doğru şekillerde yapıldığı durumlarda parlaklığın arttığı, bazik bir ön kimyasal işlem sayesinde ise çok daha fazla miktarlarda mürekkebin sistemden uzaklaştırılıp daha da parlak bir görünüm elde edildiği görülmüştür (Saxena & Chauhan, 2016). Bu enzim böceklerden, mantarlara, mantarlardan bakterilere kadar çok geniş bir spekturumdaki canlılardan elde edilebilen bir enzimdir (Singh et al., 2016). pH değeri cellulases (selülaz) ve xylanases (ksilanaz) için 5-6 arasında öngörülür (Yıldır, 2010). Selülaz için bugüne kadar yapılan çalışmalarda ofis atığı ile yapılan işlemlerde gerek maliyetleri düşürmesi, gerek kimyasal gereksinimini minimize etmesi, bunları yaparken mürekkep ve katkı maddelerinin liften ayrılmasını en etkili şekilde gerçekleştirmesi aynı zamanda drenaj özelliğini geliştirip kimyasal ve biyolojik süreçteki oksijen gereksinimini de en aza indirmesiyle başarılı ve verimli olduğunu gösteren çalışmalar yapılmıştır (Çiçekler & Tutus, 2021). Konvensiyonel kimyasal temizlik yöntemlerine göre efektif olduğu gösterilmiş, pulp aşamasında eklenmesinin endüstriyel uygulamalarda daha iyi olacağı çalışılmış, bununla beraber mürekkep temizlemede %24,6, serbestlikte %21,6 ve drenaj zamanında 11,5 kat daha iyi sonuçlar verdiği de gösterilirken, kağıdın mekanik özelliklerinde iyileştirmeler yaptığına işaret edilmektedir (Pathak, Bhardwaj, & Singh, 2011). Enzimlerin genellikle liflendirme aşamasının hemen başında eklenmesi gerektiği tavsiye edilmekle beraber aksi yönde çalışmalar da mevcuttur (Yıldır, 2010).

**Xylanses** kullanımı selüloz iskelet yapısında delignifikasyon sürecine doğrudan etki ederek kullanılır. Lazer baskılı kağıtlar üzerinde yapılan çalışmalarda efektiflik durumu gösterilmiştir (Saxena & Chauhan, 2016). Bu enzim ile yapılan deinking prosesinde %40 daha az kimyasal kullandığı da bilinmektedir (Singh et al., 2019).

Laccases özellikle lignin içeriği bol yapılarda yüzeydeki lignin yapısının uzaklaştırılması işlemindeki efektif yapısıyla öne çıkmaktadır. Myceliophthora thermophila ve Trametes versicolor ile üretilen laccase enziminin inkjet ve su bazlı tekstil boya ile yapılan çalışmalarda %40-80 arasında temizlediği ve bunu yaparken parlaklık konusunda da %5 geliştirme yaptığı rapor edilmiştir (Saxena & Chauhan, 2016).

Amylases kağıtların yüzeyinde bulunan nişasta katmanının ayrıştırılması aşamasında görev alan enzimdir (Saxena & Chauhan, 2016).

Lipase (Lipaz) bir diğer esteraz türü enzimlerle birlikte bitkisel yağ bazlı mürekkeplerin uzaklaştırılmasında kullanıma uygun bir enzimdir (Yıldır, 2010). Esteraz özellikle bitkisel bazlı mürekkep yapıları için önerilirken alkalın yapıdaki lipaz yağ bazlı mürekkepler için tavsiye edilir, ayrıca lipazın amfifil (hem hidrofobik hem hidrofilik olma durumu) yapısı onun işlemde sonra kağıt üzerinden de uzaklaşmasını sağlamaktadır (Saxena & Chauhan, 2016).

Pectinases, lif yüzeylerindeki ve bağların civarındaki mürekkep partiküllerini bozarak yapıdan uzaklaştırmaya ve bu sayede yıkama ve flotasyon aşamalarında konvensiyonel kimyasal temizlemeye göre daha az miktarlarda kimyasal kullanarak işlemin yapılmasına olanak verir (Saxena & Chauhan, 2016). Pektinases enzimi, ksilanaz, selülaz ve hemiselülaz gibi lif yüzeylerini değiştirip, mürekkep çevresindeki bağları tahrip etmek suretiyle mürekkebin serbest kalmasını ve bu sayede uzaklaştırılmasının kolaylaşmasını sağlamaktadır, bu aşamada

partiküllerin boyutlarını küçülttüğü de gözlemlenmiştir (Yıldır, 2010).

Bir diğer uygulama ise enzimlerin birlikte kullanılmasıdır. Selülaz ve hemiselülaz enzimlerinin birlikte kullanıldığı uygulamalar çokça denenmiştir. Bu iki enzimin birlikte kullanıldığı deinking prosesinde, off-set ve flekso baskı teknikleri kullanılarak üretilen gazete kağıtlarında 5.5 pH altında en iyi sonuçların alındığı rapor edilmiştir. Xylanases ve laccases enzimlerinin birlikte kullanıldığı sistemlerde olumlu sonuçlar alınmaktadır. Lipase, cellulase ve xylanase (40/60 hazırlanmış cellulases ve xylanase karışımının 50/50 oranda lipase ile karıştırılması) yapılan işlemlerde kopma dayanımı indeksi (burst indeksi) ve yırtılma dayanımı indeksi (tear indeksi) değerlerinde %7,4 ve %7,1 artışlar gözlemlenmiştir. Yapılan başka çalışmalarda da görülebileceği üzere enzimlerin birlikte kullanımları iyi sonuçlar vermektedir (Saxena & Chauhan, 2016).

Sonuç olarak, çeşitli enzimlerin gerek tek başlarına gerekse sinerjik kombinasyonlar halinde kullanılması, mürekkepten arındırma süreçlerinin verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Selülaz, hemiselülaz, ksilanaz, lakaz ve lipaz gibi enzimlerin uygun oranlarda birlikte kullanımı, hem fiziksel kağıt özelliklerini iyileştirmekte hem de daha çevreci ve etkili arındırma süreçlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Literatürdeki bulgular, özellikle pH ve enzim oranlarının optimize edilmesiyle baskı türüne göre yüksek performanslı sonuçların elde edilebileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, biyoteknolojik yaklaşımların gelecekte kağıt geri dönüşüm endüstrisinde daha yaygın ve sürdürülebilir çözümler sunabileceği öngörülmektedir.

### 3. Araştırma Metodolojisi, Sonuçları ve Tartışma

#### 3.1. Enzim Bazlı Deinking Sürecinin Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirliğe Katkısı: Bir Tematik Analiz Uygulaması

Enzim bazlı deinking yöntemi, kâğıt geri dönüşüm süreçlerinde çevresel etkileri azaltan yenilikçi bir biyoteknolojik yaklaşımdır. Kimyasal kullanımını minimize etmesi, enerji ve su tüketiminde tasarruf sağlaması bakımından sürdürülebilir geri dönüşüm uygulamaları arasında ön plana çıkmaktadır. Bu yöntem, hem materyal verimliliğini artırmakta hem de döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu bir çözüm sunmaktadır.

Singh, v.d., (2020), tarafından yapılan mürekkepten arındırma işlemi, geleneksel kimyasal yöntemlere göre %60 daha az kimyasal kullanımıyla benzer kağıt kalitesi sağlamıştır. Bu yöntem, atık sularındaki biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOD) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) yüklerini sırasıyla %17,9 ve %19,8 oranında azaltarak çevresel yükü önemli ölçüde düşürmüştür. Mürekkep giderme verimliliği %22,5 olarak belirlenmiş, kağıdın dayanıklılık özelliklerinde de %6 ile %11 arasında iyileşmeler görülmüştür. Sonuç olarak, enzim bazlı mürekkepten arındırma yöntemi, kâğıt geri dönüşümünde çevre dostu ve etkili bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır (Singh et al., 2020). Bu kapsamda ziyaret edilen tesis, Marmara Bölgesi'nde faaliyet gösteren, Ar-Ge odaklı ve çevreci üretim süreçlerini benimseyen özel sektör girişimi niteliğinde bir orta ölçekli işletme olarak tanımlanabilir. Tesis, yaklaşık 50 çalışanı ve günlük ortalama 20 ton karışık ofis atığı işleme kapasitesiyle, Türkiye'de kâğıt geri dönüşüm sektörünün çevresel sürdürülebilirliğe duyarlı aktörlerinden biri konumundadır. Kuruluşun üretim yapısında enzim bazlı mürekkepten arındırma sürecine geçiş yapılmış olup, bu uygulamanın çevresel ve ekonomik yansımaları gözlemsel olarak değerlendirilmiştir. Kurum adı çalışmada etik kurallar gereği gizli tutulmuş; ancak



elde edilen veriler, çevreci yaklaşımların orta ölçekli özel sektör tesislerinde nasıl uygulandığına dair önemli ipuçları sunmaktadır. Tesis adı bilgisi etik kurallar çerçevesinde çalışmada paylaşılmayarak tesise ait genel bilgilerin paylaşılmasına yer verilmiştir. Veriler, yarı yapılandırılmış tesis çalışanlarıyla yapılan kısa anket dışı karşılıklı görüşmeler aracılığıyla toplanmıştır. Veriler gözlem ve informal sohbetlerle toplanmış, anonimleştirilmiştir. Araştırma kapsamında seçilen literatür kaynakları (makaleler, kitap bölümleri, raporlar vb.) nitel veri analiz yazılımları NVivo 12, kullanılarak sistematik biçimde kodlanmıştır. Kodlama süreci, hem önceden belirlenmiş kavramsal çerçeveye dayalı ön-anlamı kodlama hem de veriden türeyen açık kodlama yöntemleriyle yürütülmüştür. Oluşturulan kodlar temel alınarak temalar türetilmiş ve bu temalar, araştırma sorularını yanıtlamaya yönelik analitik bir yapıya dönüştürülmüştür. Çalışmada açık + eksen + seçici kodlama aşamaları kullanılmıştır ve bu süreç NVivo ile sistematik biçimde yürütülmüştür. ek bir araştırmacı veri kodlamasını yaptığı için Cohen's Kappa hesaplanması yapılmamıştır. Sonuç olarak, sistematik literatür taraması ve tematik analiz ile elde edilen bulgular belirgin tematik kümeler altında yapılandırılarak araştırmanın temel kavramsal çerçevesini oluşturmaktadır.

Aşağıda dört ana temaya karşılık gelen örnek soruların yer aldığı Tablo 1'de Tema başlıkları ve gözlemsel sorulara yer verilmiştir.

**Tablo: 1 Tematik Analiz İçin Gözlem Soruları**

Tema No	Tema Başlığı	Gözlemsel / Yönlendirici Soru
1	Kimyasal Kullanımının Azaltılması	- Enzim bazlı deinking yöntemine geçişin kimyasal kullanımında ne gibi değişikliklere yol açtığını gözlemlediniz mi? - Kimyasal stoklama, iş güvenliği ya da çevre riski açısından farklar var mı?
2	Atık Su Kalitesinde İyileşme	- Enzim bazlı işlem sonrasında atık suyun fiziksel ya da kimyasal özelliklerinde belirgin farklar gözlemlendi mi? - Arıtma sisteminde kullanılan kimyasal ya da enerji girdilerinde azalma oldu mu?
3	Kâğıt Kalitesinde Sürdürülebilir Artış	- Enzimle işlenmiş kâğıtların dayanım veya baskı kalitesi gibi fiziksel özelliklerinde fark var mı? - Geri dönüşüm sürecinde bu tür kâğıtların yeniden kullanımı hakkında ne gibi gözlemler yapıldı?
4	Çevresel Etkilerde İyileşme	- Enzim bazlı yöntemle geçildikten sonra kimyasal kullanımında azalma gözlemlendi mi? -Atık suyun fiziksel/kimyasal özelliklerinde ne gibi farklılıklar oldu? - Çamur miktarı veya içeriğinde değişim oldu mu?

**Tema No**      **Tema Başlığı**      **Gözlemsel / Yönlendirici Soru**

- Enerji tüketiminde bir azalma ya da verimlilik artışı sağlandı mı?

**Kaynak:** Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Toplanan veriler sürdürülebilirlik ekseninde tematik olarak analiz edilmiş ve aşağıda sıralanan dört ana tema altında sınıflandırılarak tematik analiz uygulanması yönünde bir değerlendirme yapılmıştır.

Tematik analiz, temel olarak nitel verilerin sistematik biçimde çözümlenmesine olanak tanıyan bir yöntem olmakla birlikte, sayısal verilerin ötesine geçerek süreçlerin, uygulamaların ve deneyimlerin derinlemesine değerlendirilmesinde de etkili biçimde nicel analizlerde de kullanılabilir. Özellikle işleyişin yapısal özelliklerini, katılımcıların algılarını ve kurum içi uygulamaların bağlamsal yorumlarını ortaya koymada değerli bir araçtır. Bu yönüyle tematik analiz, sadece bireysel görüşlerin değil, aynı zamanda organizasyonel dinamiklerin ve uygulama süreçlerinin çok boyutlu analizine imkân tanımaktadır. Farklı sektörlerde ve araştırma konularında, gözleme dayalı verilerin anlamlandırılması amacıyla sosyal bilimlerde, sağlık bilimlerinde ve fen bilimlerinde de sıklıkla tercih edilmektedir (Success Team, 2023).

Buna göre;

#### **Tema 1: Kimyasal Kullanımının Azaltılması**

Ziyaret edilen geri dönüşüm tesisinde yapılan gözlemlerde, geleneksel kimyasal bazlı mürekkepten arındırma (deinking) yöntemlerinin, belirli sağlık ve güvenlik önlemleri gerektirdiği; çalışanlar açısından koruyucu ekipman kullanımının zorunlu olduğu görülmüştür. Enzim bazlı yöntemle geçiş yapılan pilot hatlarda ise kimyasal stoklaması, depolama güvenliği ve atık bertaraf maliyetlerinin azaldığı ifade edilmiştir. Gözleme dayalı olarak, çevre ve iş güvenliği yönetimi açısından enzim bazlı yöntemlerin daha az riskli ve daha sürdürülebilir bir seçenek sunduğu anlaşılmıştır.

#### **Tema 2: Atık Su Kalitesinde İyileşme**

Tesis yöneticileriyle yapılan informal görüşmeler ve gözlemler neticesinde, enzim bazlı süreçlerin sonunda ortaya çıkan atık suyun daha düşük renk, daha az süspanse katı madde ve daha düşük biyolojik yük içerdiği görülmüştür. Arıtma tesisinde kullanılan ön çöktürme ve biyolojik arıtım aşamalarında daha az kimyasal takviye ihtiyacı olduğu belirtilmiştir. Bu durum, hem işletme maliyetlerinde düşüş hem de çevresel etki açısından pozitif bir gelişme olarak değerlendirilmiştir.

#### **Tema 3: Kâğıt Kalitesinde Sürdürülebilir Artış**

Üretim hattında elde edilen gözlem ve örnek ürün incelemelerine göre, enzim bazlı işlemde geçen kâğıtların fiziksel dayanım özelliklerinde (kopma uzunluğu, patlama direnci vb.) daha tutarlı değerler elde edildiği görülmüştür. Teknik ekipler, lif yapısının daha az zarar gördüğünü ve bu nedenle kâğıdın hem daha kaliteli hem de tekrar geri dönüştürülebilir özellikte olduğunu ifade etmiştir. Bu bulgular, ürün kalitesinin sürdürülebilirliğini destekleyen güçlü bir göstergedir.

**Tema 4: Çevresel Etkilerde İyileşme**

Bu tema, kimyasal kullanımı, atık su kalitesi, enerji tüketimi ve katı atık (çamur) üretimi gibi çevreye doğrudan etki eden faktörlerde enzim bazlı yöntemin sağladığı değişiklikleri incelemektedir.

Mürekkep Arındırma (Deinking) Sürecinde Enzim Kullanımının Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik Üzerindeki Ekonomik ve Çevresel Yansımaları: Bir Tematik Analiz

Uygulaması başlıklı çalışma kapsamında geliştirilen dört ana temaya ilişkin bulgular ve önerilerin özetlendiği Tablo 2 ile analizin bulguları ve öneriler ayrıntılı olarak görülmektedir.

**Tablo: 2 Tematik Bulgular ve Öneriler Tablosu**

Tema	Gözlemsel Bulgular ve Katılımcı Alıntıları	Değerlendirme	Öneriler
Kimyasal Kullanımının Azaltılması	1 - Geleneksel yöntemlerde kimyasal depolama ve iş güvenliği riskleri gözlenmiştir. “Depolama alanında yoğun kimyasal kullanımı, çalışanlar için sürekli bir risk oluşturuyor.” - Enzim bazlı pilot hatlarda kimyasal stoklama ve atık bertaraf maliyetleri azalmıştır. “Enzim bazlı sistem sayesinde kimyasal maliyetlerimiz ve atık bertaraf yükümüz ciddi şekilde azaldı.”	Enzim bazlı sistemler, sağlık, güvenlik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından daha az riskli ve daha verimlidir.	- Enzim bazlı teknolojilerin yaygınlaştırılması desteklenmeli. - Kimyasal güvenlik maliyetleri azaltılarak çevreci politika teşvik edilmelidir.
Atık Kalitesinde İyileşme	2 - Enzimli proses sonrası çıkan atık suyun daha düşük biyolojik yük ve renk içerdiği gözlemlenmiştir. “Enzim kullanımı sonrası atık suyun kalitesi belirgin şekilde iyileşti, biyolojik yük azaldı.” - Arıtma aşamalarında daha az kimyasal takviye ihtiyacı doğmuştur. “Arıtma sürecinde kimyasal ihtiyacımız azaldı, süreç hem daha ekonomik hem de çevre dostu oldu.”	Sürecin sonunda oluşan atık suyun çevresel etkisi azalmış, arıtma maliyetleri düşmüştür.	- Atık su arıtma süreçlerinde enzim bazlı yöntemlerin yaygınlaştırılması önerilmektedir. - Atık yönetimi standartlarına entegre edilmelidir.
Kâğıt Kalitesinde Sürdürülebilir Artış	3 - Enzimli işlem görmüş kâğıtlarda dayanıklılık göstergeleri artmıştır (kopma uzunluğu vb.). “Enzim uygulaması sonrası kâğıdın kopma dayanımı gözle görülür şekilde arttı.” - Lif yapısının daha az zarar gördüğü tespit edilmiştir. “Lif yapısı korunmuş, kâğıt daha sağlam ve uzun ömürlü hale gelmiş.”	Ürün kalitesinin sürekliliği sağlanmış ve geri dönüşülebilirlik artmıştır.	- Enzim bazlı geri dönüşüm teknikleri ürün kalitesi için standartlaştırılmalıdır. - Uzun vadede üretim verimliliği artırılabilir.



- Enzim bazlı deinking yöntemi sonrasında üretim hattında kullanılan toplam kimyasal miktarında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir; özellikle kostik soda, hidrojen peroksit ve deterjan kullanım oranları düşürülmüştür. “Kimyasal kullanımını sağlamıştır. Kimyasal azaltmamız sayesinde hem kullanımındaki azalma, hem maliyet hem de çevresel yük çevresel riskleri hem de iş önemli ölçüde azaldı.” sağlığı risklerini doğrudan
- Kimyasal madde azaltmıştır. Bu durum aynı kullanımının azalmasıyla zamanda üretim maliyetlerini birlikte tesisin kimyasal de dolaylı olarak etkilemiştir. depolama alanlarında doluluk oranı düşmüş, tehlikeli madde etiketli konteyner ihtiyacı azalmıştır.
- “Depolama alanındaki konteyner sayısı ve doluluk oranı belirgin şekilde azaldı.”
- Atık suyun görünümünde gözle görülür bir açıklık sağlanmış; özellikle bulanıklık ve koku problemlerinde azalma gözlenmiştir. “Atık su daha temiz ve kokusuz hâle geldi, bu büyük bir gelişme.”
- Arıtma tesisinde kullanılan kimyasal çöktürücü ve pH düzenleyici tüketiminde düşüş rapor edilmiştir. “Arıtma sürecinde kimyasal ihtiyacımız azalınca operasyon daha sürdürülebilir oldu.”
- Süreçteki sıcaklık, buhar ve enerji gereksinimlerinin belirli kısımlarında (özellikle kurutma öncesi) azalma rapor edilmiştir.
- “Kurutma öncesi enerji tüketimi önemli ölçüde düştü, bazı verimlilik arttı.”
- Çamur üretim miktarında azalma gözlemlenmiş, sürdürülebilir bir alternatif çamurun organik yükü düşmüş ve daha kolay filtrelenebilir duruma gelmiştir. “Çamurun filtrasyonu artık daha kolay, organik yük azaldı ve iş yükü hafifledi.”
- Enzim bazlı yöntem geçiş, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli faydalar sağlar. Kimyasal kullanımını ve çevresel riski azalttığı için desteklenmeli.
- Atık su izleme sistemleri kurulmalı: Fiziksel ve kimyasal parametreler düzenli takip edilmeli.
- Enzim bazlı sistemler yaygınlaştırılmalı: Kimyasal kullanımını ve çevresel riski azalttığı için desteklenmeli.
- Kimyasal depolama riskleri yeniden değerlendirilmeli: Daha güvenli ve sadeleştirilmiş sistemler tasarlanmalı.
- Enerji tüketimi dijital olarak izlenmeli: Karbon ayak izi ölçülerek sürdürülebilirlik stratejileri geliştirilmeli.
- Çamur yönetimi optimize edilmeli: Azalan çamur daha verimli yöntemlerle bertaraf edilmeli veya yeniden değerlendirilmeli.
- Sektör-akademi işbirliği teşvik edilmeli: Süreç verileri Ar-Ge projeleriyle desteklenmeli.
- Enerji tüketimindeki görece azalma, karbon ayak izinin düşmesine katkı sağlamaktadır. Bu durum, fabrikanın çevre performansını izleyen ISO 14001 gibi sistemlerde puan kazanmasını kolaylaştırabilir.
- Çamur hacmindeki düşüş, bertaraf maliyetlerini azaltmakta ve biyolojik arıtma süreçlerinin daha verimli çalışmasını sağlamaktadır. Ayrıca çamurun kompost ya da alternatif kullanımı açısından daha elverişli bir formda olması çevreye uyumlu atık yönetimini kolaylaştırır.
- Tüm bu göstergeler, enzim bazlı deinking sürecinin yalnızca teknik değil aynı zamanda çevresel açıdan da sürdürülebilir bir alternatif olduğunu göstermektedir.

**Kaynak:** Saha gözlemleri ve informal görüşmelere dayalı olarak oluşturulmuştur.

Bu tematik analiz kapsamında gerçekleştirilen saha ziyareti ve gözlemler, enzim bazlı mürekkepten arındırma (deinking) sürecinin çevresel ve ekonomik açılardan önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymuştur. Dört ana tema çerçevesinde yapılan değerlendirmelerde, öncelikle kimyasal kullanımının azaltılması

ile iş sağlığı ve güvenliği risklerinin düşürüldüğü, kimyasal depolama ve bertaraf maliyetlerinde azalma sağlandığı gözlemlenmiştir. İkinci olarak, atık su kalitesinde iyileşme sağlanarak çevresel etki azaltılmış, arıtma süreçlerinde kimyasal yükün düşmesi işletme maliyetlerinde olumlu katkılar yaratmıştır.

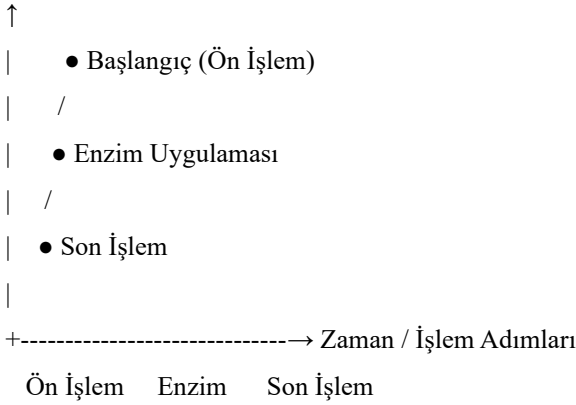
Son olarak, kâğıt kalitesinde sürdürülebilir artış ile ürün dayanıklılığının arttığı ve geri dönüştürülebilirliğin desteklendiği belirlenmiştir. Bu bulgular, enzim bazlı deinking yönteminin sürdürülebilir geri dönüşüm uygulamaları açısından güçlü bir alternatif olduğunu göstermektedir. Enzim bazlı deinking yöntemine geçişle birlikte çevresel göstergelerde belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir.

ISO 14001 standardı, çevresel performansın sürekli iyileştirilmesi için çevresel hedeflerin belirlenmesini öngörür (ISO 14001:2015). Bu çerçevede, enzim bazlı deinking süreçlerinde Kimyasal madde kullanımının azalması, hem çevresel hem de iş sağlığı açısından olumlu sonuçlar doğurmuştur. Bu çalışmada doğrudan kaza veya bulaşma vakaları ölçülmemiş olsa da, literatür ve saha gözlemleri, azalan kimyasal kullanımının iş sağlığı ve güvenliği risklerini azaltacağını göstermektedir; gelecekteki çalışmalar bu vakaların istatistiksel ölçümlerini de içerecek şekilde tasarlanabilir.

Aynı zamanda, atık suyun fiziksel ve kimyasal kalitesinde artış sağlanmış; arıtma sürecindeki kimyasal ve enerji girdileri düşmüştür. Ayrıca, enerji tüketiminde tasarruf ve çamur üretiminde azalma tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, AB Ekoetiket kriterleri ve Mevcut En İyi Teknikler (BAT) referans değerleri ile karşılaştırıldığında, süreçlerin uluslararası çevresel performans standartlarıyla uyumlu olduğunu göstermektedir.

Atık Su Parametreleri

COD/BOD/Askıda Katı Madde (mg/L)



Şekil 3. Atık Su Kalitesinde İyileşme

**Kaynak:** Çalışma kapsamında oluşturulmuştur.

Şekil 3, enzim bazlı deinking uygulamasının atık su parametreleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Başlangıçta yüksek olan COD, BOD ve askıda katı madde değerleri, enzim uygulaması ve son işlem adımlarıyla belirgin şekilde azalmış, atık su kalitesinde iyileşme sağlanmaktadır.

Uluslararası literatür, enzim bazlı deinking işleminin kimyasal madde kullanımını %50 oranında azalttığını ve aynı zamanda optik özellikleri iyileştirdiğini göstermektedir (Biswas et al., 2016). Tematik analiz çerçevesinde Türkiye'deki küçük ve orta ölçekli işletmelerde gözlemlenen %35-%45'lik kimyasal kullanım azalması, BAT referans değerlerine yaklaşmakla birlikte, farklılıklar büyük ölçüde teknolojik altyapı, enzim temini ve tedarik zinciri koşullarından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte enzim bazlı süreçlerin kısa vadede maliyet avantajı sağladığı gözlemlense de, uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirlik, enzim fiyat dalgalanmaları ve tedarik zinciri risklerine bağlı olarak değişebilir. Özellikle Türkiye'deki küçük ve orta ölçekli

işletmeler, enzim temini ve lojistik maliyetler açısından bazı belirsizlikler yaşayabilir. Bu nedenle yaygın uygulamalarda, tedarik güvenliği ve maliyet dalgalanmalarına karşı stratejik stoklama veya yerel üretim modelleri geliştirilmesi önerilmektedir. Tematik analizler ile desteklenen bu bulgular, uluslararası çevresel standartlarla uyumlu pratiklerin yerel endüstri koşullarına uygulanabilirliğini göstermekte ve enzim bazlı deinking'in hem çevresel hem de operasyonel sürdürülebilirliğe katkısını ortaya koymaktadır.

Genel endüstri uygulamalarında enzim bazlı deinking süreçleri, kimyasal kullanımını önemli ölçüde azaltırken enerji ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını düşürerek çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Örneğin, fibre modification uygulamalarında cellulase kullanımı, elektrik tüketimini 160 kWh/ton-pulp azaltmakta ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını 145 kg/ton-pulp düşürmektedir; bio-bleaching uygulamalarında xylanase ile NaOH kullanımı %50 oranında azalmaktadır (Skals et al., 2008; Baskette, 2022; CEPI, 2023). Endüstriyel Emisyonlar Direktifi, sanayi tesislerinden kaynaklanan emisyonların sınırlandırılmasını ve çevresel etkilerin azaltılmasını hedeflemektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). Bu direktif, enerji, su ve kaynak verimliliği ile güvenli kimyasal kullanımını artırmayı amaçlamaktadır. Enzim bazlı deinking süreçleri, kimyasal kullanımını azaltarak ve su tasarrufu sağlayarak bu hedeflere katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda, farklı ülkelerde enzim bazlı ve çevre dostu uygulamalara yönelik düzenlemeler ve teşvikler öne çıkmaktadır.

ABD'de kamu binalarında temizlik ve mürekkep/solvent kullanımı, çevre ve çalışan sağlığı gözetilerek düzenlenmektedir. İçişleri Bakanlığı (DOI), geri dönüştürülmüş içerikli ürün kullanımını zorunlu kılar, kimyasal temizliklerde tahrişi en aza indirecek kriterleri uygular ve çevresel performansı izlemek için yönetim mekanizmaları kurar. DOI ayrıca kağıt ürünlerinde klor veya Toksik Madde Salınım Envanterinde yer alan kimyasalları içeren mürekkep çözücülerinin kullanılmamasını şart koşarak enzim bazlı çözümleri teşvik etmektedir. Environmental Protection Agency (EPA) ise, solvent ve mürekkeplerin VOC emisyonlarını sınırlar, tehlikeli atıkları Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) kapsamında denetler ve geri dönüştürülmüş ürün standartlarını Comprehensive Procurement Guidelines (CPG) programıyla uygular. Bu yaklaşım, çevre dostu satın alma, çalışan sağlığı ve sürdürülebilir atık yönetimini sözleşmelere entegre etmek bakımından önemlidir (U.S. Environmental Protection Agency, 2021)

AB Atık Çerçeve Direktifi, atıkların çevre ve insan sağlığına zarar vermeden yönetilmesini amaçlamaktadır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015). Bu direktif, atıkların önlenmesi, yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve geri kazanımını teşvik etmektedir. Enzim bazlı deinking süreçleri, kimyasal kullanımını azaltarak bu hedeflerle uyumlu bir yaklaşım sunmaktadır. Türkiye'de atık yönetimi, Atık Yönetimi Yönetmeliği (Resmî Gazete, 02.04.2015, 29314) ile çevre ve insan sağlığı gözetilerek yürütülmektedir.

Endüstriyel Emisyonlar Direktifi (2008/1/EC), sanayi tesislerinden kaynaklanan emisyonları sınırlayarak çevresel etkilerin azaltılmasını ve sürdürülebilir kaynak kullanımını hedefler; bu bağlamda enzim bazlı deinking gibi kimyasal kullanımını ve mürekkep atıklarını azaltan uygulamalar direktifin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemektedir (European Parliament & Council, 2008). Enzim bazlı deinking süreçleri, kimyasal kullanımını azaltarak atık su ve çamur yönetimini

çevreci hâle getirmekte ve mevzuatla uyum göstermektedir. Pilot uygulamalarda enerji verimliliği ve proses optimizasyonunda hâlen geliştirme potansiyeli bulunmakta olup, bu sistemlerin yaygınlaştırılması mevzuata uygun sürdürülebilir üretimi destekleyebilir.

#### Türkiye, AB, Enzim Bazlı Deinking ve ABD Karşılaştırması

Kriter	Türkiye (Atık Yönetimi Yön., 2015)	AB Direktifleri (2008/98/EC, 2010/75/EU)	Enzim Bazlı Deinking	ABD (DOI & EPA, 2021)
<b>Kimyasal Kullanım</b>	Sınırlı kullanım ve güvenli depolama	Azaltım emisyon kontrolü	ve Kimyasal ihtiyacını azaltır, güvenli	Kimyasal kullanım güvenli, VOC emisyonları sınırlandırılır
<b>Atık Yönetimi</b>	Önleme, geri dönüşüm, güvenli bertaraf	Azaltım, yeniden kullanım, kazanım	Atık su ve çamuru geri azaltır, çevre dostu	ve Geri dönüşüm teşvik edilir, tehlikeli atık denetlenir
<b>Enerji &amp; Su Verimliliği</b>	Verimli kullanım beklenir	Tasarruf karbon azaltımı hedeflenir	ve Enerji ve su kullanımında iyileştirme potansiyeli	Sürdürülebilir operasyonlarla dolaylı tasarruf sağlanır

## 4. Sonuç

Enzim bazlı deinking uygulamaları, kâğıt geri dönüşüm süreçlerinde mürekkep arındırma performansını artırırken, lif bütünlüğünü koruyarak fiziksel kaliteyi iyileştirmekte ve süreçlerin ekonomik verimliliği ile çevresel sürdürülebilirliğe anlamlı katkılar sağlamaktadır.

Teknik açıdan, yapılan gözlemler ve informal görüşmeler, enzim bazlı deinking yöntemlerinin, geleneksel kimyasal işlemlere kıyasla daha düşük agresiflik göstererek lif yapısını daha az tahrip ettiğini ve bu sayede elde edilen geri dönüştürülmüş kâğıdın fiziksel özelliklerinde (örneğin kopma uzunluğu, patlama direnci gibi) daha tutarlı sonuçlar sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, lif bütünlüğünün korunması, tekrar geri dönüşüm imkânını artırarak dögüsel ekonomi hedeflerine katkı sunmaktadır.

Ekonomik boyutta, kimyasal kullanımının azaltılması ve buna bağlı olarak stoklama, güvenlik ve atık bertaraf maliyetlerinde yaşanan düşüşler, enzim bazlı sürecin maliyet avantajlarını göstermektedir. Özellikle kimyasal bazlı sistemlerde karşılaşılan iş sağlığı ve güvenliği risklerinin azalması, dolaylı olarak işletme verimliliğine ve sürdürülebilirliğe olumlu katkı sağlamaktadır. Tesislerde gözlemlenen bu dönüşüm, teknolojik yatırımların uzun vadede geri dönüş sağlayabileceğine işaret etmektedir. Çalışmada kimyasal maliyet ve enerji tüketiminde azalma yönünde gözlemsel bulgular rapor edilmiştir. Ancak, bu bulgular yüzdesel tasarruf oranları (örn. % veya kWh/ton) ya da parasal karşılıklar (TL, €) üzerinden nicel olarak sunulmamıştır. Dolayısıyla, tematik analiz kapsamında bu sonuçlar, ‘azaltım eğilimi’ başlığı altında nitel veriye dayalı bulgular olarak sınıflandırılmıştır. İlerleyen çalışmaların, bu nitel gözlemleri destekleyecek nicel

Kriter	Türkiye (Atık Yönetimi Yön., 2015)	AB Direktifleri (2008/98/EC, 2010/75/EU)	Enzim Bazlı Deinking	ABD (DOI & EPA, 2021)
--------	------------------------------------	--	----------------------	-----------------------

Mevzuata Uyum	Ulusal mevzuat uyumlu	AB politikaları uyumlu	Türkiye ve Federal çevre AB hedefleriyle paralel, sürdürülebilir	ve Federal düzenlemeler ve çevre dostu satın alma kriterleri ile uyumlu
---------------	-----------------------	------------------------	--	---

Özel Önlemler	-	-	-	Klor ve toksik maddeli mürekkep çözücülerinden kaçınılır
---------------	---	---	---	--

**Kaynak:** T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2015); European Parliament & Council, (2008); European Parliament & Council. (2010); U.S. Environmental Protection Agency, (2021); CEPI. (2023).

Bu karşılaştırma, enzim bazlı deinking’in kimyasal kullanımını ve atık yükünü azaltarak hem ulusal hem de uluslararası çevre mevzuatlarıyla uyumlu sürdürülebilir bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Tüm bu bulgular, enzim bazlı yöntemin çevresel sürdürülebilirlik açısından güçlü bir alternatif sunduğunu göstermektedir.

ölçümler (yıllık maliyet tasarrufu, enerji tüketim oranı) ile güçlendirilmesi önerilmektedir.

Çevresel açıdan ise, enzim bazlı işlemler sonucunda oluşan atık suyun daha düşük süspanse katı madde, renk ve biyolojik yük içermesi, arıtma süreçlerinde daha az kimyasal takviyeye ihtiyaç duyulmasına olanak tanımaktadır. Bu durum hem işletme bazlı çevresel etkilerin azaltılması hem de genel çevresel yükün hafifletilmesi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Kimyasal takviyeye olan ihtiyacın düşmesi, özellikle su kirliliği ve toksik atık üretimi bağlamında sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Çalışmada enzim tabanlı yöntemle ilgili kimyasal ve enerji tüketiminde azalma eğilimi gözlemlenmiş olsa da, % tasarruf, enerji düşüş oranı veya CO<sub>2</sub> azaltımı gibi sayısal veriler yer almamaktadır. Bu nedenle tematik analizde sonuçlar “göreceli iyileşme” olarak nitel düzeyde sunulmuş, ilerideki çalışmalar için sayısal karşılaştırmaların gerçekleştirilmesi bu kapsamda önerilmektedir.

Enzim tabanlı deinking yönteminin çevresel sürdürülebilirliği, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ile yapılan çalışmalarla desteklenmektedir. Bu yöntem, daha az tehlikeli atık oluşumu, düşük hammadde tüketimi ve azaltılmış buhar kullanımı gibi faktörlerle çevresel etkileri %7 ila %13 oranında azaltmaktadır (Nachtergaele, et al., 2024). Ayrıca, LCA analizleri, bu teknolojinin geleneksel kimyasal işlemlerle karşılaştırıldığında daha düşük karbon ayak izi ve ekolojik ayak izi sağladığını göstermektedir

Elde edilen bulgular, enzim bazlı mürekkepten arındırma yöntemlerinin geri dönüşüm süreçlerinde çevresel, ekonomik ve teknik açıdan çok boyutlu faydalar sağladığını göstermektedir. Bu yöntemler, lif bütünlüğünü koruyarak geri dönüştürülmüş kâğıdın fiziksel kalitesini iyileştirmekte, kimyasal kullanımını ve atık su

ile çamur yükünü azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Ayrıca, süreçlerin verimliliğini artırarak ekonomik avantajlar yaratması, iş sağlığı ve güvenliği risklerini düşürmesi ve döngüsel ekonomi hedefleriyle uyumlu olması, enzim bazlı deinking teknolojilerini stratejik bir çözüm olarak ön plana çıkarmaktadır. Çalışmada saha temelli gözlem ve tematik analiz yoluyla elde edilen bulgular, literatürde genellikle laboratuvar ölçeğinde sınırlı kalan enzim teknolojilerinin endüstriyel ölçekteki yansımalarını doğrudan değerlendirerek, geri dönüşüm sektöründe uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği açısından özgün bir katkı sunmaktadır. Bu perspektif, hem çevresel etkilerin azaltılması hem de üretim kalitesinin artırılması bağlamında biyoteknolojik çözümlerin yaygınlaştırılmasının önemini ortaya koymakta ve sektörel politika ile teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi için bilimsel bir temel oluşturmaktadır. Çalışma, enzim tabanlı deinking uygulamalarını geleneksel yöntemlere kıyasla çevresel ve ekonomik açıdan yenilikçi bir yaklaşım olarak ortaya koymaktadır.

Bu yönüyle çalışma, geri dönüşüm teknolojilerinde biyoteknolojik yaklaşımların sektörel sürdürülebilirlik stratejileriyle nasıl uyumlanabileceğini ortaya koyarak, hem akademik çalışmalar hem de politika geliştirme süreçleri için referans niteliği taşımaktadır. Gelecek araştırmalarda enzim tabanlı deinking süreçlerinin yaşam döngüsü analizi (LCA) daha kapsamlı şekilde yapılmalı, farklı enzim karışımlarının sinerjik etkileri saha bazlı deneylerle test edilmelidir. Ayrıca, enerji tüketimi, maliyet tasarrufu ve CO<sub>2</sub> azaltımı gibi parametrelerin nicel olarak ölçülmesi, nitel bulguların daha güçlü biçimde desteklenmesine katkı sağlayacaktır.

## Kaynakça

Adu, C., Jolly, M., & Thakur, V. K. (2018). Exploring new horizons for paper recycling: A review of biomaterials and biorefinery feedstocks derived from wastepaper. *Current opinion in green and sustainable chemistry*, 13, 21-26.

Bajpai, P., Bajpai, P. K., & Kondo, R. (1999). *Biotechnology for environmental protection in the pulp and paper industry* (266 p.). Springer.

Bajpai, P. (2024). *Recycling and deinking of recovered paper*. Elsevier.. 304 p.

Baskette, D. (2022). *The essential role of enzymes*. Europabio. <https://www.europabio.org/uploads/2022/09>

Biswas, P., Bharti, A. K., Kadam, A., & Dutt, D. (2016). Bio-deinking of mixed office waste paper by *Penicillium citrinum* NCIM-1398 and its comparative study with conventional chemical deinking. *Bioresources*, 11(4), 10168–10185. <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.10168-10185>

CEPI. (2023). *Sustainability & circularity in the pulp and paper industry*. <https://www.cepi.org>

Cicekler, M., & Tutus, A. (2020). Effects of cellulase enzyme in deinking of solvent-based inks from mixed office wastes. *Biocatalysis and Biotransformation*, 0(0), 1–9. [https://doi.org/10.1080/10242422.2020.1836606\\*\\*](https://doi.org/10.1080/10242422.2020.1836606**)

Cicekler, M., & Tutus, A. (2021). Effects of cellulase enzyme in deinking of solvent-based inks from mixed office wastes. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 39, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102228>

de Azevedo, A. R. G., Alexandre, J., Pessanha, L. S. P., Manhães, R. da S. T., de Brito, J., & Marvila, M. T. (2019). Characterizing the paper industry sludge for environmentally-safe disposal. *Waste Management*, 95, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.027>

European Parliament & Council. (2008). *Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive)*. <https://eur-lex.europa.eu>

European Parliament & Council. (2010). *Directive 2010/75/EU on industrial emissions (Industrial Emissions Directive)*. <https://eur-lex.europa.eu>

Farkas, C., Rezessy-Szabó, J. M., Gupta, V. K., Bujna, E., Csernus, O., Nguyen, V. D., & et al. (2020). Application of chitosan-based particles for deinking of printed paper and its bioethanol fermentation. *Fuel*, 280, 118539. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118539>

Han, N., Zhang, J., Hoang, M., Gray, S., & Xie, Z. (2021). A review of process and wastewater reuse in the recycled paper industry. *Environmental Technology and Innovation*, 24, Article 101897. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101897>

Hong, R., Su, L., Chen, S., Long, Z., & Wu, J. (2017). Comparison of cutinases in enzymic deinking of old newsprint. *Cellulose*, 24(11), 5089–5099. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1504-1>

İmamoğlu, S., & Peşman, E. (2012). Flotasyon süresinin mürekkep giderme işlemi ve hamur kalitesine etkisi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 13, 1–10. <http://edergi.artvin.edu.tr>

Karademir, A., Aydemir, C., Tutak, D., & Aravamuthan, R. (2018). Printability of papers recycled from toner and inkjet-printed papers after deinking and recycling processes. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 16(2), 76–82. <https://doi.org/10.1177/2280800017715707>

Karahan, S., & Karademir, A. (2019). Mürekkep Giderme İşleminin Farklı Atık Kâğıtlar Üzerindeki Etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 15-24.

Kumar, A., & Dutt, D. (2021). A comparative study of conventional chemical deinking and environment-friendly bio-deinking of mixed office wastepaper. *Scientific African*, 12, e00793.

Nachtergaele, P., Koçak, O., Escobar, Y. R., Motte, J., Gabriels, D., Mottet, L., & Dewulf, J. (2024). Does enzymatic catalysis lead to more sustainable chemicals? *Green Chemistry*, 26(1), 1-15. <https://doi.org/10.1039/d4gc04514a>

Pivnenko, K., Eriksson, E., & Astrup, T. F. (2015). Waste paper for recycling: Overview and identification of potentially critical substances. *Waste management*, 45, 134-142.

Saini, S., Chutani, P., Kumar, P., & Sharma, K. K. (2020). Development of an eco-friendly deinking process for the production of bioethanol using diverse hazardous paper wastes. *Renewable Energy*, 146, 2362-2373.

Saxena, A., & Chauhan, P. S. (2016). Role of various enzymes for deinking paper: A review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 36(4), 607–615. <https://doi.org/10.3109/07388551.2014.947890>

Singh, S., Singh, V. K., Aamir, M., Dubey, M. K., Patel, J. S., Upadhyay, R. S., et al. (2016). Cellulase in pulp and paper industry. In *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering: Microbial cellulase system*



*properties and applications* (pp. 153–163). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63564-7.00010-7>

Singh, A., Kaur, A., Dutt, R., & Ritu, Y. (2019). An efficient eco-friendly approach for recycling of newspaper waste. *3 Biotech*, 9(2), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1589-5>

Singh, A., Varghese, L. M., Yadav, R. D., & Mahajan, R. (2020). A pollution reducing enzymatic deinking approach for recycling of mixed office waste paper. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(36), 45814–45823. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10319-w>

Skals, P. B., Krabek, A., Nielsen, P. H., & Wenzel, H. (2008). Environmental assessment of enzyme assisted processing in pulp and paper industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2), 124–132.

Success Team. (2023, January 20). *Can thematic analysis be used in quantitative research?* Speak Ai. <https://speakai.co/can-thematic-analysis-be-used-in-quantitative-research/>

Şahin, H. T. (2011). Proses değişkenlerinin kâğıt geri dönüşümde verim ve kaliteye etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 20(13), 101–109.

Şahin, H. T. (2016). Atık kâğıt geri dönüşüm işlemlerinde genel esaslar ve mürekkep uzaklaştırma işlemi. *European Journal of Science and Technology*, 4. Erişim adresi: <http://www.ejosat.com>

Pathak, P., Bhardwaj, N., & Singh, A. (2011). Optimization of chemical and enzymatic deinking of photocopier waste paper. *Bioresources*, 6(1), 447–463. <https://doi.org/10.15376/biores.6.1.447-463>

Petzold, G., & Schwarz, S. (2015). Investigation of an improved deinking process of waste paper: The influence of surface tension and charge in suspension on ink removal. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 480, 398–404. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.03.019>

Takahashi, H. (1994). Deinking agent for waste paper. In T. Suzuki & M. Shinohara (Eds.), *Ecomaterials* (pp. 289–292). Elsevier.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2015, 2 Nisan). *Atık yönetimi yönetmeliği* (Resmî Gazete No. 29314). <https://www.resmigazete.gov.tr>

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). *Entegre kirlilik önleme ve kontrolü: Endüstriyel emisyonlar direktifi (IPPC/IED)*. <https://sifiratik.cevre.gov.tr>

Tsatsis, D. E., Papachristos, D. K., Valta, K. A., Vlyssides, A. G., & Economides, D. G. (2017). Enzymatic deinking for recycling of office waste paper. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), 1744–1753. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.03.001>

Torres, C. E., Negro, C., Fuente, E., & Blanco, A. (2012). Enzymatic approaches in paper industry for pulp refining and biofilm control. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96(2), 327–344. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4321-5>

U.S. Environmental Protection Agency. (2021, Ocak 19). *Department of Interior focuses on cleaning products*. [https://19january2021snapshot.epa.gov/greenerproducts/departm ent-interior-focuses-cleaning-products\\_.html](https://19january2021snapshot.epa.gov/greenerproducts/departm ent-interior-focuses-cleaning-products_.html)

Yıldır, N., & Cameron, J. (2009). Enzymatic deinking of inkjet printed papers. In *TAPPI Engineering, Pulping & Environmental Conference Proceedings* (pp. 1–15). TAPPI Press.

Yıldır N. (2010). Mürekkep Giderme Sürecinde Enzimlerin Kullanılması Using of Enzymes in Deinking Process. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 2010;60(1):50–8