

ALTI AYDA BİR YAYIMLANAN ULUSAL HAKEMLİ DERGİ

Derleme Makale
Review Article

DOI: 10.5281/zenodo.15031093

Geliş Tarihi / Received
26.12.2024

Kabul Tarihi / Accepted
18.02.2025

Yayın Tarihi / Publication Date
16.03.2025

Sorumlu Yazar/Corresponding author
e-mail: betulenginkucuk@gmail.com

Cite this article: Küçük, B. ve Yaman, E.
(2025). Yazma Eserlerde Mürekkep
Korozyonunun Etkileri ve
Görüntüleme Teknikleriyle
Okunabilirliğin Sağlanması, D-Sanat,
Cilt: 1, Sayı: 9, 72-93.



Content of this journal is licensed under
a Creative Commons Attribution-
Noncommercial 4.0 International
License.

YAZMA ESERLERDE MÜREKKEP KOROZYONUNUN ETKİLERİ VE GÖRÜNTÜLEME TEKNİKLERİYLE OKUNABİLİRLİĞİN SAĞLANMASI

EFFECTS OF INK CORROSION ON MANUSCRIPTS AND ENSURING READABILITY THROUGH IMAGING TECHNIQUES

Betül KÜÇÜK*, Emre YAMAN**

Öz

Orta Çağ'dan 20. yüzyıla kadar Avrupa'da ve İslam coğrafyasında yazı mürekkebi olarak sıklıkla kullanılmış olan demir içerikli mürekkepler, içeriklerinde bulunan asidik bileşikler ve demir iyonları nedeniyle zamanla bozunmaya uğramaktadır. Ayrıca çevresel koşullar, biyolojik etkenler ve insan faktörü gibi etkenler de mürekkep korozyonunun etkilerini güçlendirmektedir. Bu çalışma demir içerikli mürekkeple yazılmış yazma eserlerde meydana gelen bozunma süreçleri ile iç ve dış etkenlerin bozunmaya etkisini inceleyerek, eserlerin bozunma derecelendirmesinin yapılmasının ve geleceğe aktarımının önemi üzerinde durmaktadır. Çalışma kapsamında metin alanı mürekkep korozyonu nedeniyle okunamaz hale gelmiş yazma eserlerde, okunabilirliği sağlamak amacıyla kullanılacak dijital görüntüleme yöntemleri, literatürde var olan uygulamalar üzerinden irdelenmektedir. Bu yöntemler geleneksel görüntüleme teknikleri, güncel görüntüleme teknikleri ve ileri görüntüleme teknikleri olarak sınıflandırılmış olup bu tekniklerin avantajları ve zorlukları kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mürekkep Korozyonu, Bozunma, Yazma Eser, Okunabilirlik, Dijital Görüntüleme

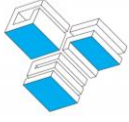
Abstract

Iron-based inks, which were frequently used as writing inks in Europe and the Islamic world from the Middle Ages to the 20th century, degrade over time due to the acidic compounds and iron ions they contain. This degradation process leads to serious negative effects, such as fading of the ink color, loss of mechanical strength, and material deterioration. Environmental conditions, biological factors, and human influence also exacerbate the effects of ink corrosion. This study examines the degradation processes in manuscripts written with iron-based inks, focusing on the impact of internal and external factors on degradation, and emphasizes the importance of assessing the degree of deterioration and preserving these works for the future. The study also reviews digital imaging methods used to restore readability in manuscripts where the text areas have become illegible due to ink corrosion, based on existing applications in the literature. These methods are classified as traditional imaging techniques, current imaging techniques and advanced imaging techniques, and the advantages and difficulties of these techniques are compared.

Keywords: Ink Corrosion, Degredation, Manuscript, Readability, Digital Imaging

* Konservatör, Türkiye Yazma Eserler Kurumu Başkanlığı, betulenginkucuk@gmail.com, Orcid: 0000-0003-4299-523X

** Konservatör, Türkiye Yazma Eserler Kurumu Başkanlığı, emre.yaman2406@gmail.com, Orcid: 0009-0001-2174-2308



Giriş

İlk yazım mürekkebi olan is (karbon) mürekkebinin kalıcı olmaması yeni bir mürekkep arayışına neden olmuş ve zamanla karbon mürekkebine tanen eklenerek demir içerikli mürekkep üretilmiştir (Bulcka ve Wagner, 2004:757; Sharma vd., 2014:2098). Demir içerikli mürekkepler, malzemelerinin ulaşılabilir olması, üretiminin kolay olması, yazıldığı yüzeyden kolay çıkarılamaması ve yazma kolaylığı sağlaması gibi sebeplerle Orta Çağ'dan 20. yüzyıla kadar özellikle Avrupa'da ve İslam coğrafyasında sıklıkla kullanılmıştır (Kocabay, 2012:34; Budnar vd. 2006:407). Mürekkeplere yönelik çeşitli hazırlanma reçeteleri bulunsa da ana bileşenleri meşe mazından elde edilen tanen içeren gallik asit, renklendirici madde olarak kullanılan sülfatlar (demir II sülfat ($FeSO_4$)), su veya sirke gibi çözücüler ve Arap zamkı gibi bağlayıcılardır (Tanrıverdi, 2022:14; Corregidor vd., 2019:2691). Mürekkebin kalitesi, içerisine eklenen malzemenin kalitesine ve oranlarına göre değişiklik göstermektedir. Örneğin mürekkebin çökmesini yavaşlatmak için asit, yavaş kurumasını sağlamak için gliserin gibi katkı maddeleri eklenerek mürekkebin özellikleri değiştirilmiştir (Torgan Güzel vd., 2023:3; Rabin, 2021:72).

Yazma eserlerde görülen mürekkep korozyonun başlıca nedeni mürekkebin yapımında kullanılan metal bileşikler ve asidik çözeltilerdir. Malzemelerin içerik tespitinde, çeşitli görsel incelemeler ve analitik yöntemler kullanılmakta ve bu çalışmalar ışığında mürekkep hakkında kapsamlı sonuçlara ulaşılabilmektedir. Örneğin Yakın Kızılötesi Işını (NIR) incelemeleri, karbon ve demir mürekkeplerinin opaklık farklarından yararlanarak karşılaştırma yapmayı sağlamaktadır. NIR altında, demir mürekkepler yarı opak hale gelirken, karbon mürekkebinde değişim gözlemlenmemektedir (Rabin, 2021:74-75). Ayrıca Infrared (IR) ve Ultraviyole (UV) ışık kullanılarak mürekkep çeşitleri ve bozunma dereceleri değerlendirilebilmektedir (Duh vd., 2017). Analitik yöntemlerden X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) analiziyle, mürekkeplerin inorganik bileşenleri, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve Raman Spektroskopisiyle, bağlayıcılar ve demir etkileşimleri, Taramalı Elektron Mikroskopu-Enerji Dağıtıcı X-Işını spektrometresi (SEM EDX), Enerji Dağılımlı X-Işını Floresans Spektroskopisi (ED-XRF), Parçacık veya Proton Kaynaklı X-Işını Emisyonu (PIXE) ve X-Işını Absorpsiyonu Yakın Kenar Yapısı (XANES) analizleriyle de demir varlığı, oranları ve dağılımı araştırılabilmektedir (Zamorano, 2018; Tibúrcio vd., 2020; Budnar vd., 2005; Arcon vd., 2007:199). Demir iyonlarının kimyasal bağlanma durumu ise Mössbauer Spektroskopisiyle belirlenmektedir (Espina vd., 2022:27938; Torgan Güzel vd., 2023:1; Lurf vd., 2021).

Mürekkep korozyonunun yavaşlatılması üzerine yapılan çalışmalar, 1898 yılında St. Gallen'deki ilk "Uluslararası Antik El Yazmaları Koruma Konferansı" ile başlamıştır ve 2019'da Krems'te düzenlenen "Mürekkep Aşınması Konferansı (IIC)" ile devam etmiştir. "InkCor" gibi projelerle, demir mürekkebi içeren belgelerde kağıdın kararlılığı, gramajı, mürekkep çizgilerinin genişliği ve kağıdın pH'ının korozyona olan etkileri incelenmiştir. Mürekkep korozyonunun tedavisinde yaygın olarak kabul görmüş olan konservasyon yöntemleri, kalsiyum fitat ve kalsiyum bikarbonat uygulamaları olmasına rağmen bu alanda birçok araştırmacı literatüre yenilikler katmıştır (Duh vd., 2017: 96; Melo vd., 2022:4). Örneğin magnezyum fitat kullanımı (Kolar vd., 2007), magnezyum hidroksit nanopartiküllerinin kağıt stabilizasyonundaki etkileri (Poggi vd., 2010), kağıdın pH'ını stabilize etmek için fitat tedavisinin nanoselüloz ile birleşimi (Völkel vd., 2020), jelatin uygulaması (Gimat vd., 2021), Guar zamkı bazlı bir nanokompozit (Afsharpour ve Gilani, 2022) ve nanoboyutlu magnezyum hidroksit ve antioksidan maddelerin (potasyum bromür, tetrabutilamoniyum bromür veya propil gallat) kullanımı (Jarmulkiene vd., 2023) mürekkep korozyonunun yıkıcı etkilerini yavaşlatmak için önerilmiş tedavi yöntemleridir. Kimya uzmanları ve konservatörler bu bozunmaya sahip eserlerin tedavi yöntemleri üzerine çalışmalarını devam ettirse de günümüzde korozyonun yıkıcı etkilerini durduran bir strateji belirlenmemiştir.

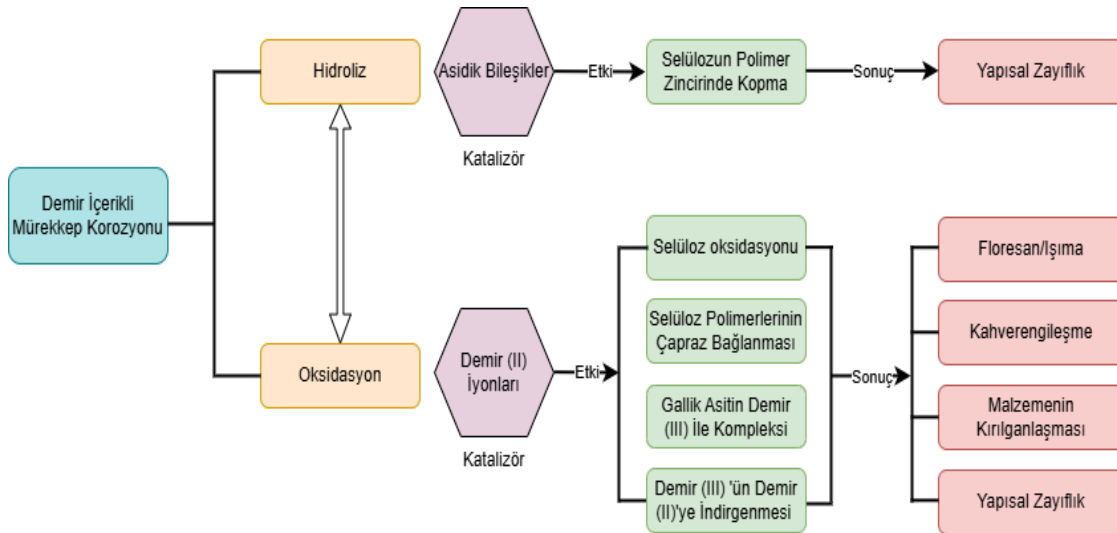
Bu çalışma, mürekkep korozyonunun yazma eserlerdeki yıkıcı ve durdurulamaz etkilerine karşı eserin okunabilirliğinin sağlanmasına yönelik literatürde olan görüntüleme yöntemlerinin, amaç, kapsam, sınırlılıklar, avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırmaktadır. Çalışma kapsamında mürekkep korozyonunun derecelendirilmesinin önemi ve bu bozunmayla mücadele eden yazma eserlerde uygulanabilecek görüntüleme yöntemleriyle bozulmuş yazı alanlarının

okunabilirliklerinin sağlanmasının gerekliliği vurgulanmaktadır. Çalışma, bu tekniklerin uygulamalarını detaylı bir şekilde ele alarak, yazılı tarihimizin ve kültürümüzün önemli bir parçasını oluşturan yazma eserlerin güvenle gelecek nesillere aktarılması için dijital koruma önerilerini sunmaktadır.

Mürekkep Korozyonunun Bozunma Süreçleri

Çalışma kapsamında mürekkep korozyonunun süreçleri "bozunma" kavramıyla açıklanacaktır. "Bozunma" ve "Bozulma" terimleri birbirine yakın anlamlar taşımakla birlikte, bağlamlarına göre farklı kavramsal nüanslar içermektedir. "Bozunma," bir malzemenin veya yapının kimyasal, fiziksel ya da biyolojik süreçler neticesinde temel bileşenlerine ayrılması ya da geri dönüştürülemez bir şekilde değişime uğraması anlamına gelmektedir. Öte yandan, "bozulma" daha genel bir terim olup herhangi bir nesnenin veya durumun eski ya da düzgün halini kaybetmesi anlamında kullanılmaktadır. Bu makalede "bozunma" kelimesi özellikle tercih edilmiştir, ele alınan süreçler, yapıların veya malzemelerin kimyasal ve fiziksel bütünlüklerinin dönüşümünü kapsamaktadır.

Kağıdın doğal yaşlanma süreci, özellikle demir içerikli mürekkeplerin etkisiyle hızlanmaktadır. Demir içerikli mürekkep, kağıttaki selüloz temelli yapılar üzerinde çeşitli hasarlara yol açmakta ve bu süreç iki ana bozunma mekanizmasıyla gerçekleşmektedir. İlk olarak, mürekkep içeriğindeki asidik bileşikler, selülozun hidrolizini katalizleyerek polimer zincirlerinde kopmalara neden olmaktadır (Çakar, 2019:13; Karademir ve İmamoğlu, 2001:99). Bu süreç, kağıdın pH değeri kontrol edilmediği sürece hızlanarak devam etmekte ve eserde mekanik dayanım kaybına sebep olmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1: Mürekkep Korozyonunun Bozunma Süreçleri: Hidroliz ve Oksidasyonun Etkileri ile Sonuçları (Betül Küçük & Emre Yaman)

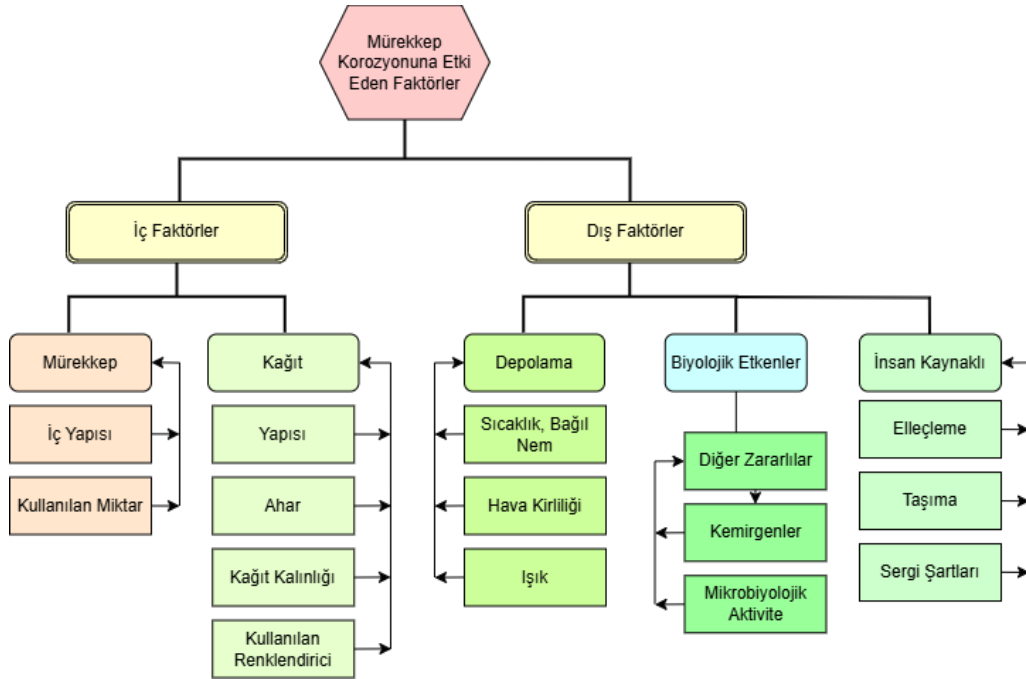
Diğer mekanizma ise, demir (II) iyonlarının katalizlediği oksidasyondur (Arcon vd., 2007:199). Demir iyonlarının varlığı, selülozun oksidasyonunu başlatmakta ve bu da selüloz polimerlerinin çapraz bağlanmasına yol açmaktadır. Ayrıca, mürekkep içinde bulunan gallik asidin, demir (III) ile kompleks oluşturmasının yanı sıra, demir (III)'ün demir (II)'ye indirgenmesini sağlayarak korozyon oluşumunda etkin bir rol oynamaktadır (Rouchon-Quillet vd., 2004:389). Oksidasyon sonucunda eserin mürekkep alanlarında ışım/floresans etki, kahverengileşme, kırılgenlik ve mekanik dayanım kaybı meydana gelmektedir (Şekil 1). Tüm bu bozunmalar eserde zamanın ve bulunduğu ortam koşullarının etkisiyle artan ve kademeli olarak ilerleyen bir süreçtir.

Mürekkep Korozyonuna Etki Eden Faktörler

Mürekkep korozyonunun hasar derecesini etkileyen faktörler iç ve dış etkenler olarak sınıflandırılmaktadır. Demir içerikli mürekkeple yazılmış eserlerde dış ve iç etkenlerin birleşimi korozyon hızını belirgin şekilde artırmaktadır (Koç, 2019:89).

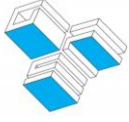
İç etkenler mürekkep ve kağıt olarak ikiye ayrılabilir (Şekil 2). Mürekkebin içeriğinde kullanılan malzemelerin oranlarındaki farklılıklar bozunmayı hızlandırıcı rol oynamaktadır. Örneğin yanlış formüle edilmiş mürekkepler, yazı renginin hızla solmasına ve zamanla mürekkebin okunabilirliğini kaybetmesine neden olabilmektedir (IFLA, 2019:2). Mürekkebin yüzeyde kapladığı alan, yazı alanının genişliği, metin aralıklarının geniş ya da sık olması ve yazmak için kullanılan kalemde sayfa yüzeyine aktarılan mürekkebin yoğunluğunu ifade etmektedir. Mürekkebin kullanım miktarı ya da kağıt üzerindeki yoğunluğu/kalınlığı korozyonun derecesinde en önemli etkenlerden biridir (Albro vd., 2008:134).

Kağıt yüzeyinin pürüzsüz olmasını sağlamak için yapılan aharda kullanılan malzemeler, kağıdın kalınlığı ve renklendirici olarak kullanılan malzemeler yine korozyonun hızına etki etmektedir. Örneğin yüksek kağıt gramajı bozunmaya neden olan bileşiklerin kağıt içinde yayılımını yavaşlatmakta ve mürekkep korozyonunun yol açtığı hasarı sınırlamaktadır (Kolar vd., 2006:169). Renkli kağıtların üretiminde kağıt hamuruna katılan ya da kağıdın yüzeyine sürülen renklendirici maddelerin içerikleri de mürekkep korozyonunun hızını artırmaktadır. Nguyen ve arkadaşlarına göre özellikle İslam el yazmalarında estetik nedenlerle renklendirilen kağıtların içeriğinde demir açısından zengin bileşikler (tanen gibi organik bileşiklerle birleştirilmiş demir tuzları) içeren boyaların kullanımı demir içerikli mürekkeplerde korozyon hızını artırmaktadır (Nguyen vd., 2008:156).



Şekil 2: Mürekkep korozyonuna etki eden iç ve dış faktörler (Betül Küçük & Emre Yaman)

Dış etkenler ise depolama, biyolojik etkenler ve insan kaynaklı etkenler olmak üzere üçe ayrılmaktadır (Şekil 2). Depolama ve sergileme koşullarında dalgalanan sıcaklık ya da döngüsel nem değişiklikleri, asit hidroliz reaksiyonlarını teşvik ederek kağıdın pH seviyesini düşürmekte ve kağıdın kırılganlaşmasına neden olmaktadır (Liu vd., 2022:4). Tse ve arkadaşları (2009) 19. yüzyıla ait, demir içerikli mürekkeple yazılmış ve yüksek bağıl neme (%85 RH) maruz kalmış



eserlerde, demir iyonlarının sayfa üzerinde boş alanlara hareket etmesine olanak sağladığını ve oksidasyon için ek alanlar yarattığını dile getirmişlerdir (Tse vd., 2009:80). Bu bulgular, belgelerin depolanma ve sergilenme koşullarında kontrol sağlanması ve sabit tutulması gerektiğini göstermektedir. Yapılan çalışmalar mürekkep korozyonuna sahip eserler için ideal depolama koşullarının %50 (\pm 5) bağıl nem ve 18°C (\pm 2°C) olduğunu göstermiştir. Ayrıca mürekkep korozyonuna sahip eserler, ışık ve hava kirleticilerinden korunması amacıyla asitsiz müze kartonlarından yapılan kutularda saklanmalı ve bu eserlerin sergilenmesi için önerilen ışık miktarı (tüm UV ışığın geçişinin engellenmesi şartıyla) 30-50 lux aralığında olmalıdır (IFLA, 2019:3-4).

Yazma eserlerde kullanılan kağıt, deri, mürekkep, boya ve yapıştırıcı gibi birçok organik ve inorganik malzeme, biyolojik etkenler ve çeşitli organizmalar için zengin besin kaynaklarıdır. Bu canlıların metabolik aktiviteleri sırasında ürettikleri asitler (oksalik, fumarik, süksinik, sitrik vb.) ve enzimler, kağıt ve derinin yapılarını bozmakta ve pH seviyelerini düşürerek demir içerikli mürekkebin korozyonuna uygun ortam oluşturmaktadır (Caneva vd., 1991:56-59; Banik, 1998; Yoldaş, 2023:54).

Demir içerikli mürekkep kaynaklı korozyon tahribatına etki eden bir diğer dış etken ise insan kaynaklı etkenlerdir. Eserlerin elleçlenmesi, taşınması ve kullanımı sırasında gerçekleştirilen yanlış müdahaleler mürekkep korozyonu nedeniyle mekanik dayanımı zayıflamış eserlerde, özellikle yazı alanında çatlaklara ve kayıplara neden olmaktadır. Ayrıca bilinçsiz müdahaleler ve uygun olmayan koruma uygulamaları (örneğin yoğun su kullanımı) mürekkep korozyonunun yıkıcı etkilerini arttırmaktadır (IFLA, 2019:2).

Mürekkep korozyonunun sahip eserlerin bozunma derecelerinin belirlenmesi, iç ve dış etkenlerden kaynaklı zararların en aza indirilebilmesi için önemlidir. Eserlere yapılacak her müdahale bozunma derecelendirmeleri dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir ve bir eserde farklı derecede bozunmaların olabileceği göz önünde bulundurularak en yüksek bozunma derecesine göre hareket edilmesi gerekmektedir.

Mürekkep Korozyonunun Yıkıcı Etkileri ve Mevcut Bozunmanın Derecelendirilmesi

Gerhard Banik'e göre (1998) demir içerikli mürekkebin bozunmasında ilk aşama UV ışık altında yazı alanının çevresinde floresan bir ışımaya meydana gelmesidir. İlerleyen aşamalarda bu alanın çevresini kahverengi bir renk değişikliği kaplamaya başlamaktadır. Bu renk değişimi etkileşimde olduğu diğer sayfa üzerinde de gözlemlenebilmektedir. Son aşamada korozyon oluşumu tüm yazı ve kâğıt yüzeyini kaplayarak, yazının okunmasını imkânsız hale getirirken kâğıt liflerinin kopmasıyla kayıplar meydana getirmektedir (Banik, 1998).

Hollanda Kültürel Miras Enstisüsü/ Netherlands Institute for Cultural Heritage-ICN tarafından mürekkep korozyonunun bozunma süreçleri yedi farklı aşamada değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında bu değerlendirme esas alınarak grafiklerde geliştirme ve görselleştirme yapılmıştır. Şekil 3'de üstte verilen görseller ICN'nin kataloğundan alınırken altta verilen görseller yeniden oluşturulmuştur. Şekil 3'de 1 numaralı görsel henüz korozyonun başlamadığını belirtmektedir. 2 numaralı görsel korozyonun başlangıç aşamasını temsil etmektedir ve bu aşamada, yazı alanının arka sayfasında mavi ışımaya (floresan etki) görülmektedir. 3 numaralı görsel arka sayfada görünen ışımaya ek olarak yazı alanının bulunduğu sayfada sarı renkli bir lekelenme başladığını göstermektedir. 4 numarada, mürekkep alanındaki sarı lekelenmelerin açık kahverengiye döndüğü anlatılmaktadır. Bu aşamada yazı alanının arka sayfasında ışımaya devam etmektedir. 5 ve 6 numaralı görselde açık kahverengi lekelenmeler koyu kahverengiye dönmekte ve mürekkepte çatlaklar meydana gelmektedir. 7 numarada, mürekkepte ve kağıtta kayıplar meydana geldiği ifade edilmektedir. 8 numara olarak adlandırılan görsel, çalışma kapsamında yapılan geliştirme ile eklenmiştir. Bu görsel, mürekkebin ve kağıdın tamamen hasar gördüğü, renk değişiminin çoğunlukla siyaha döndüğü, eserin tamamen kırılma haline geldiği ve elleçlemeye kesinlikle müsaade etmeyeceğini anlatmaktadır.



Şekil 3: Mürekkep korozyonunun bozunma evreleri, mürekkepte meydana gelen değişimler (üst) (Reißland & Hofenk, 2001), yazı alanında görülen görsel etkiler (alt) (Betül Küçük & Emre Yaman).

Mevcut Bozunmanın Derecelendirilmesi




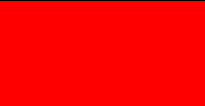
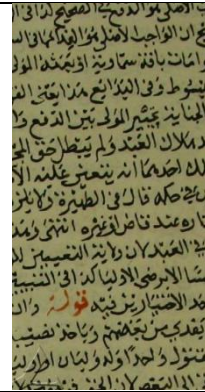
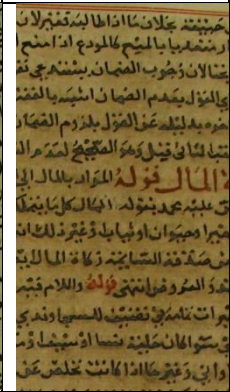


ICN mürekkep korozyonunun mevcut bozunma durumlarının derecelendirmesini dört başlıkta incelemiştir. Buna göre 1. derece bozunmaya sahip eserler “iyi” durumda, 2. derece bozunmaya sahip eserler ise “orta-iyi” durumda, 3. derece bozunmaya sahip eserler “kötü” durumda, 4. derece bozunmaya sahip eserler “çok kötü” durumda olarak nitelendirilmiştir (Reißland ve Hofenk, 2001).

Çalışma kapsamında da mürekkep korozyonunun mevcut bozunma durumlarının derecelendirmesi için dört başlık kullanılmıştır. Buna göre 0. derece bozunmaya sahip eserler “korozyon yok” olarak tanımlanmıştır. Bu eserlerin metin alanlarında renk değişikliği görülmemektedir ve kağıdın mekanik dayanımı oldukça iyi durumdadır. 1. derece bozunmaya sahip eserler “korozyon başlangıç evresi” olarak tanımlanmıştır. Bu eserlerin metin alanlarında kahverengi renk değişikliği ve arka sayfalarında floresan etki gözle görülebilmektedir ancak kağıdın mekanik dayanımı iyi durumdadır.

2. derece bozunmaya sahip eserler “ileri derece korozyon” olarak nitelendirilmiştir. Bu eserlerin yazı alanlarında koyu kahverengi hareler yoğunudur ve bu hareler kağıt yüzeyinde de ilerlemiş olabilmektedir. İleri derece korozyona sahip eserlerin yazı alanlarında çatlaklar oluşmaya başlamıştır ve kağıdın mekanik dayanımı düşüktür. 3. derece bozunmaya sahip eserlerin durumu “aşırı/yoğun korozyon” olarak değerlendirilmiştir (Tablo 1). Bu bozunma derecesine sahip eserlerin metin alanlarında ciddi kayıplar meydana gelmiştir ve kağıdın mekanik dayanımı oldukça düşüktür. Korozyon nedeniyle metin alanlarında parça kayıpları görülebilmektedir.

Eserlerin taşınmaları söz konusu olduğunda, 0. ve 1. derece bozunma olarak sınıflandırılan eserlerdeki kağıtların mekanik dayanımlarının yüksek olmasından dolayı eserlerin ciddi şekilde zarar görmeleri beklenmemektedir. Ancak, hasar oluşma ihtimaline karşı taşıma işlemlerinin özenle gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Diğer yandan, 2. ve 3. derece bozunmaya

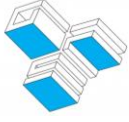
sahip eserlerin taşınmaları önerilmemektedir. Bu eserlerin taşınmalarının zorunlu olduğu durumlarda ise titreşimi en aza indirecek şekilde dolgu malzemeleri ile eserlerin desteklenmeleri ve sert koruyucu kutu içerisinde eserlerin hareketleri tamamen kısıtlanmalıdır. Bu bozunma derecesine sahip eserlerin elleçlenmesi ve kullanımının müze/kütüphane/arşiv personeli ile sınırlı olması önerilmektedir. Ayrıca taşıma sırasında oluşabilecek iklim değişikliklerinin eserde oluşturabileceği hasara ve mevcut bozunma durumunun artışına sebep olacağı da göz önüne alınarak depolanmasında ve taşınmasında uygun sıcaklık ve bağıl nem koşullarının sağlanması gerekmektedir (Reißland ve Hofenk, 2001).

Bozunma Derecesi	0. Derece	1. Derece	2. Derece	3. Derece
Renk Temsili				
Mevcut Bozunmanın Adlandırılması	Korozyon Yok	Korozyon Başlangıç Evresi	İleri Korozyon	Aşırı/Yoğun Korozyon
Eser Görseli				
Sayfa Numarası:	256	98	47	60
Eser: Türkiye Yazma Eserler Kurumu Başkanlığı, Süleymaniye Yazma Eser Kütüphanesi, Süleymaniye Koleksiyonu'na ait 00421 envanter numaralı eser.				

Tablo 1: Mürekkep Korozyonunun Bozunma Derecelendirmesi ve Mevcut Durum Değerlendirmesi (Betül Küçük & Emre Yaman)

Mürekkep korozyonuna sahip yazma eserler incelenirken korozyonunun çeşitli bozunma derecelerine rastlamak mümkündür. Bir başka anlatımla, bir yazma eserin ilk sayfalarında bozunma 0 dereceyken ilerleyen sayfalarında 3. derece bozunma görülebilmektedir. Bu durumdaki bir eserde derecelendirme yapılırken 3. derece bozunma esas alınmalı ve taşıma, elleçleme, depolama koşulları ve konservasyon önceliği buna göre değerlendirilmelidir. Tablo 1'de Türkiye Yazma Eserler Kurumu Başkanlığı, Süleymaniye Yazma Eser Kütüphanesi, Süleymaniye Koleksiyonu'nda bulunan 00421 envanter numaralı yazma eser örnek olarak kullanılmıştır.

Eserin 256 sayfa numaralı görseli incelendiğinde yazıda renk değişikliği ve yazının etrafında harenme görünmemektedir. Ancak 98. sayfasında yazı alanında solma görülürken yazının etrafında harenme gözle görülür biçimde başlamıştır. Eserin 47. Sayfasında yazı alanının neredeyse tümünde renk değişimi ve kahverengileşme belirgindir. Korozyonun ileri aşaması olarak adlandırılabilir bu aşamada renk değişiminin sayfa yüzeyine, mürekkebin olmadığı alanlara ilerlediği de görülmekte ve sayfa üzerinde çatlamlar tespit edilebilmektedir, bu aşamadaki sayfalar esnekliklerini yitirmiştir. Eserin 60. sayfasında ise aşırı/yoğun korozyon nedeniyle metin kısmında ciddi kayıplar yaşanmıştır. Bu evrede olan mürekkep korozyonu bozunmasında eserin metnini okumak güçtür. Eserin mekanik



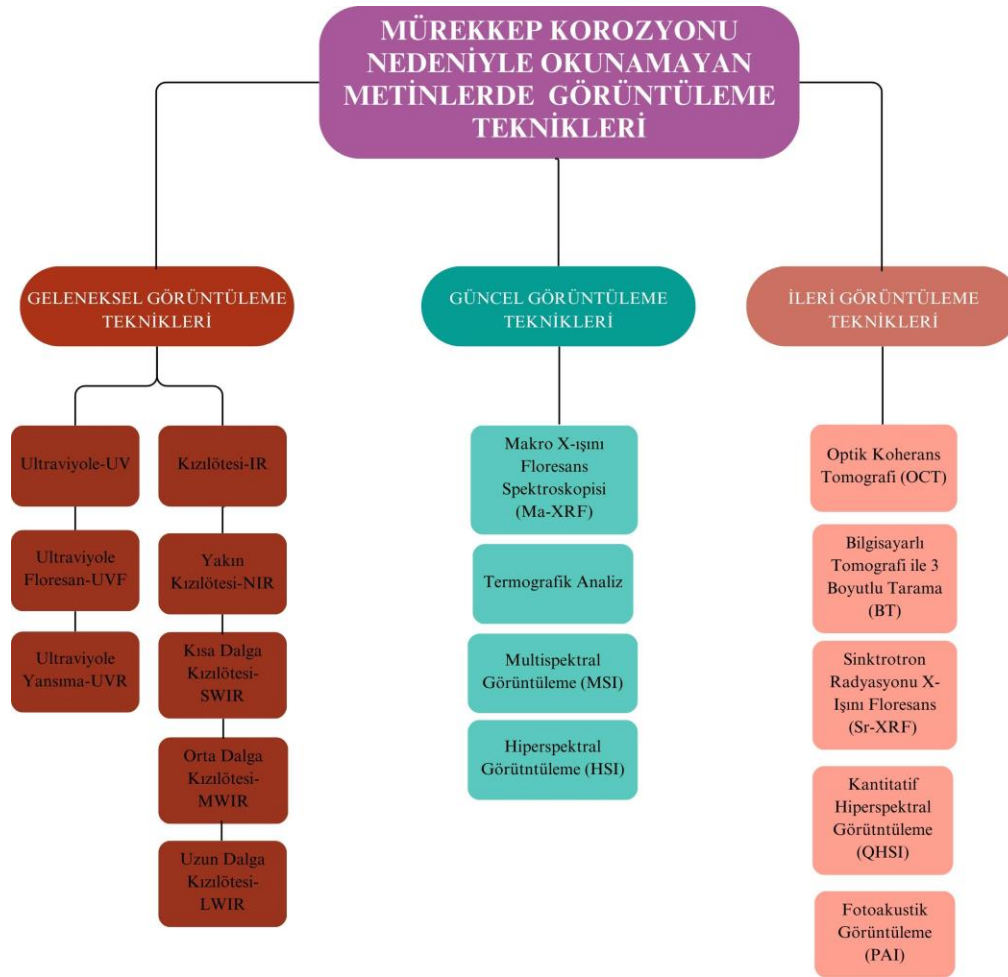
dayanımı oldukça zayıftır ve yazı alanına yapılacak kontrolsüz müdahalelerde kayıp alanlar artacaktır. Bu eserin bozunma derecesini belirlerken sayfa 60'ta görülen "Aşırı/yoğun korozyon"dan dolayı 3. derece bozunmaya sahip olduğu ve sadece uzman kişilerce müdahale edilmesi gerektiği düşünülebilir. Bozunma derecesi 0 ve 1 olan eserlerde yüksek çözünürlüklü tarama ve dijitalleştirme uygulamaları yeterli olurken, bozunma derecesi 2 ve özellikle 3 olarak belirlenmiş eserlerin okunması imkansız hale gelmiş olduğundan bu eserlerin okunabilirliklerini ve gelecek nesillere aktarımını sağlamak amacıyla görüntüleme teknikleri ile incelenmesi gerekmektedir.

Görüntüleme Teknikleri ile Okunabilirlik

Mürekkep korozyonunun ilerleyen aşamalarında yazı alanlarının okunamaz hale geldiği ve tüm tedavi çalışmalarına rağmen korozyonun tamamen durdurulamadığı bilinmektedir. Ancak mürekkep korozyonunun ileri aşamalarında dahi alt katmanların görüntülenebilmesi ve metnin okunabilmesi için çeşitli görüntüleme teknikleri bulunmaktadır.

Tonazzini ve arkadaşları (2019) el yazmaları ve resimlerdeki gizli ayrıntıları ortaya çıkarmak için kullanılan analitik ve matematiksel yöntemleri araştırmışlar ve bu araştırmada Multispektral Görüntüleme (MSI), X-Işını Floresans Spektroskopisi (XRF) Lazer-İndüklü Plazma Spektroskopisi (LIBS), Raman Spektroskopisi ve Termografi gibi yöntemlerin kullanılabileceğini söylemişlerdir (Tonazzini vd., 2019). Perino ve arkadaşları ise (2024) el yazmalarının gizli katmanlarını açığa çıkarmak için kullanılan modern teknolojileri, bunların perspektiflerini ve sınırlarını tartıştıkları makalelerinde UV Fotoğrafçılık, Multispektral (MSI) ve Hiperspektral (HSI) Görüntüleme, Makro X-Işını Floresans Spektroskopisi (Ma-XRF), Bilgisayarlı Tomografi (BT), Kızılötesi Termografi (IRT), Terahertz Görüntüleme (THz), Fotoakustik Görüntüleme, Sinkrotron Radyasyonu (Sr) ve İyon Demeti Analizini (IBA) incelemişlerdir. Yazarlara göre; yöntemlerin her biri alt katmanların okunabilirliğinde oldukça yararlıdır ve gelişen teknolojiyle entegre edildiğinde çok daha iyi sonuçlar alınacaktır (Perino vd., 2024:691).

Çalışma kapsamında, mürekkep korozyonunun ileri bozunma dereceleri nedeniyle okunamayan metinlerin görüntülenmesi amacıyla araştırılan teknikler geleneksel, güncel ve ileri olarak üç ana başlıkta verilmiştir (Şekil 4). Her bir ana başlık ise mürekkep korozyonu nedeniyle hasar görmüş eserlerin metin sayfalarının okunabilirliği üzerine kullanılan ve literatürde olan örneklerle göre alt başlıklara bölünmüştür. Geleneksel yöntemler uzun süredir kullanılan ve uygulanabilirliği daha kolay yöntemleri içerirken, güncel teknikler yaygın olarak kullanılan yöntemleri içermektedir. İleri teknikler ise literatürde yaygın kullanımına rastlanmayan, henüz yeni gelişmekte ve yapılacak çalışmalarla gelişmesi umut edilen yöntemleri kapsamaktadır.



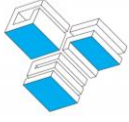
Şekil 4: Görüntüleme Tekniklerinin Sınıflandırılması (Betül Küçük & Emre Yaman)

Geleneksel Görüntüleme Teknikleri

Ultraviyole (UV) görüntüleme teknikleri, UV spektrumunun farklı bölgelerini kullanarak gizli kalmış metinlerin geri kazanımı için kullanılan ilk yöntemdir. UV, görünür ışıktan daha kısa dalga boylarına sahiptir ve yaklaşık 10 ila 400 nanometre arasında değişmektedir. Ayrıca UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm) ve UV-C (100-280 nm) olmak üzere kendi içinde dalga boylarına göre bölümlere ayrılmaktadır.

UV incelemelerde, incelenen malzemenin UV ışığı soğurma ya da yansıma özellikleri gözlemlenmektedir. Bu alanda en yaygın iki teknik, UV floresan (UVF) ve UV yansıma (UVR)'dir. UVF, belirli materyallerin UV ışığı emip görünür ışık yayma özelliğine dayanarak incelenen malzemedeki detayları ortaya çıkarmaktadır. UVF'nin avantajları arasında düşük maliyetli ekipman kullanımı, hızlı görüntü alma süreci ve basit görüntü işleme bulunmaktadır. UVR yönteminde ise, incelenen nesnenin yüzeyi tarafından yansıtılan UV radyasyonu yakalanmaktadır. Her iki yöntemin de genellikle kesin sonuçlar vermediği, daha çok diğer tekniklerin uygulanmasına zemin hazırladığı belirtilmektedir (Perino vd., 2024:685).

Montani ve arkadaşları (2012) 13.-14. yüzyıla tarihlenen ve farklı nedenlerden dolayı bozunmaya uğramış bir belgenin incelemesinde UV ışık kullanmışlardır ve çıplak gözle görünmeyen yazıları ortaya çıkarmışlardır (Montani vd., 2012).



Pottier ve arkadaşları ise (2019) yangında hasar görmüş Orta Çağ el yazmalarında okunamayan alanları UVF ile incelemiş ve bu alanların görünür hale gelmesini sağlamışlardır (Pottier vd., 2019).

Kızılötesi (IR) görüntüleme teknikleri; IR ışık, elektromanyetik spektrumda görünür ışığın hemen ötesinde, dalga boyu yaklaşık 700 nm ile 1 mm arasında olan ışığı kapsamaktadır. Kızılötesi ışık, mürekkep ve diğer malzemelerin farklı yansıma özelliklerinden yararlanarak çıplak gözle görülmeyen veya zamanla kaybolmuş yazıların ortaya çıkarılmasını sağlayarak eserlerin alt katmanlarındaki mürekkep ve boya izlerini tespit etmektedir. Bu görüntüleme tekniği dalga boylarına göre Yakın Kızılötesi (NIR), Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR), Orta Dalga Kızılötesi (MWIR) ve Uzun Dalga Kızılötesi (LWIR) olarak dört ana gruba ayrılmaktadır. NIR ile en fazla 200–300 µm derinlikteki yapılar görünür hale gelmektedir ve 750–1000 nm aralığındadır. NIR ile eserlerdeki alt katmanlar, çizimler, yazılar veya kompozisyonlar ortaya çıkarılmaktadır (Tserevelakis, 2017:2). SWIR 1000–3000 nm aralığındadır ve incelenen malzemelerin absorbe etme ve yansıtma özelliklerini incelemek için kullanılmaktadır. MWIR 3000–5000 nm aralığında olup sıcaklık emisyonlarını ve değişimlerini tespit etmektedir. LWIR ise 8000–14000 nm aralığında olup sıcaklık emisyonlarını görselleştirmek için kullanılmaktadır (Wu vd., 2016:978).

Güncel Görüntüleme Teknikleri

Makro X-Işını Floresans Spektroskopisi (Ma-XRF); XRF bir malzemenin yapısını ve kimyasal bileşenlerini belirlemeye olanak tanıyan tahribatsız bir analiz yöntemi, Ma-XRF geniş yüzey alanlarında taramalar yaparak elementlerin mekansal dağılımı/haritalamasını yapmaya olanak sağlamaktadır (Zito vd., 2024:2). Yazma eserlerde XRF kullanılarak yazı materyalleri (parşömen, kağıt vb.) ve mürekkep bileşenleri analiz edilirken, Ma-XRF ile elementel haritalamalar ve mekansal dağılımlar yapılarak alt katmanlar görünür hale gelmekte ve okunurluğunu kaybetmiş yazı alanlarında okunabilirlik sağlanabilmektedir (Viguerie vd., 2018; Mazzinghi vd., 2020; Magkanas vd., 2021).

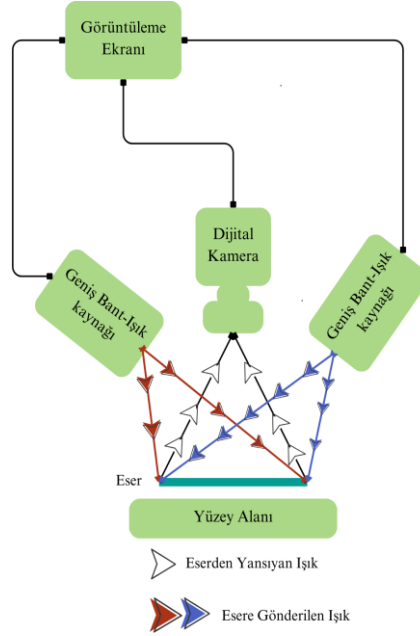
Romano ve arkadaşları (2023) Herculaneum'dan gelen ve yaklaşık M.Ö. 200 yılından M.S. 1. yüzyıla kadar tarihlendirilen papirüslerde Ma-XRF kullanarak, papirüs yazarlarının metinleri düzenlemek ve hizalamak için kurşunla çizilmiş çizgiler kullandığını ortaya çıkarmıştır (Romano vd., 2023). Fransa Kraliçesi Marie-Antoinette ile İsveç Kontu Axel von Fersen arasındaki gizli yazışmalardaki redakte edilmiş bölümlerin ortaya çıkarılmasında yine Ma-XRF yöntemi kullanılarak, yazışmaların üzerindeki sansürlenmiş metinler elementel analiz ve veri işleme teknikleriyle incelenmiştir. Araştırma sonuçları, redakte edilmiş sekiz mektubun içeriğinin başarıyla açığa çıkarılmasını sağlamıştır. Ayrıca Ma-XRF'in element haritalamasıyla, demir mürekkebiyle yazılmış ve üst üste bindirilmiş metinlerin çözülmesinde bir araç olabileceği dile getirilmiştir (Michelin vd., 2021).

Termografik analiz (IRT); MWIR ve LWIR dalga boylarında yapılan ölçümlerle nesnelerin yüzey sıcaklık dağılımlarını ortaya çıkaran termografik analiz veya termal görüntüleme, malzemelerin ısıyı iletme farklılıklarından yararlanarak görüntüleme sunmaktadır (Mercuri vd., 2011:476; Ambrosini vd., 2022:170). Bu yöntemde doğru görüntülerin elde edilmesi için IR kaynağından yayılan ışığın numune yüzeyine homojen olarak dağılması gerekmektedir (Paoloni, 2020:4) IRT yöntemi, kızılötesi ışınları toplayan ve dedektöre ileten optik sistem, IR ışınlarını elektrik sinyaline dönüştüren kızılötesi dedektör, sinyalleri işleyen bilgi işleme sistemi ve işlenen sinyallerin görüntülenmesini sağlayan monitörden oluşmaktadır (Hou vd., 2020:2). Bu görüntüleme yöntemi, farklı mürekkep türlerinin ısıyı yansıtma farklılıklarından yararlanarak su hasarına uğramış veya mürekkebi dağılmış yazıların yeniden okunabilir hale gelmesini sağlamaktadır.

Roma'da bulunan Biblioteca Angelica'da yapılan araştırmalarda, 17. yüzyıla ait bir kitabın arka kapağında yer alan kağıtta, çıplak gözle görünmeyen yazı alanı, kızılötesi termografi kullanılarak yeniden okunur hale getirilmiştir (Orazi, 2020:444; Dritsa vd., 2022:5).

Teknolojinin gelişimiyle IRT kameralar geçmişe nispeten düşük maliyetli ve kullanımı kolay hale gelmiştir. (Ambrosini vd., 2022:171). Bu durum IRT tekniklerinin yazma eserlerin okunabilirliğinde kullanımını yaygınlaştırmıştır.

Multispektral görüntüleme (MSI); MSI görüntülemenin çalışma prensibi, farklı dalga boylarındaki ışıkların kullanılarak (örneğin, görünür ışık, ultraviyole ve kızılötesi ışık) bir nesnenin çeşitli spektral özelliklerini yakalamaktır (Şekil 5) (Giacometti vd., 2017:103). MSI'nin sıradan bir kamerayla fotoğraf çekiminden farkı, nesneden gelen radyasyonu seçebilme ve spektral aralığın belirli bölümlerini izole edebilme yeteneğidir (Perino vd., 2024:685).



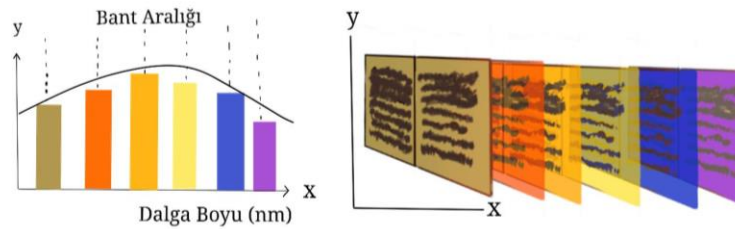
Şekil 5: Multispektral görüntüleme yöntemi çalışma prensibi (Betül Küçük & Emre Yaman)

Farklı dalga boylarında çekilen görüntüler, farklı yazı katmanlarını ve pigmentleri ortaya çıkarabilmektedir. Bu sayede, metinlerin okunabilirliği artırılmakta ve alt katmanlardaki gizli yazılar görünür hale getirilmektedir.

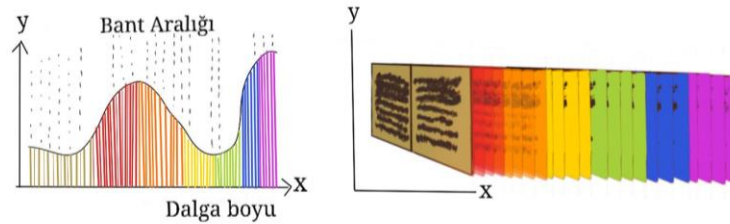
Literatüre bakıldığında yazma eserlerde ve parşömenlerde mürekkep solması, akması ve demir içerikli mürekkeplerin korozyona uğraması gibi sebeplerle hasar görmüş metinlerin okunabilirliğini sağlamanın en iyi yolu olarak multispektral görüntüleme tekniği görülmektedir (Giacometti vd., 2017:105). Konu ile ilgili birçok çalışma MSI'nin olumlu sonuçlarını göstermektedir. Örneğin 14. ve 15. yüzyıllara ait üç adet parşömen üzerinde, metnin okunurluğunu sağlamak amacıyla MSI kullanılarak metin alanında silinmiş ya da kahverengilemiş alanların kolaylıkla okunması sağlanmıştır (Pronti vd., 2018). Peratello (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, Danimarka bulunan Orta Çağ el yazmasının solmuş ve silinmiş mürekkeplerinin okunmasında MSI kullanılarak okunabilirlik sağlanmıştır (Peratello, 2024). Jones ve arkadaşları ise (2020) MSI'nin kültürel miras üzerinde kullanımına yönelik çalışmaların arttığını ancak MSI süreçlerinin tutarsız şekilde belgelenmiş olduğunu ve farklı araştırmalar arasında karşılaştırma yapmanın zorluğunu vurgulayarak, mevcut teknolojilerle MSI'nin verimli bir şekilde nasıl uygulanacağına dair kapsamlı bir kılavuz eksikliği olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında görüntüleme öncesinde nesnenin incelenmesi ve doğru protokolün belirlenmesi için uzmanların ve konuyla ilgili bilim insanlarının yöntem belirlemesi gerektiğini vurgulamışlardır. Ayrıca görüntüleme sisteminin kurulumu, veri işleme ve yönetimi, dokümantasyon ve raporlama konularında da ortak bir yol oluşturmayı amaçlamışlardır (Jones vd., 2020).

Hiperspektral görüntüleme (HSI); multispektral görüntülemenin daha gelişmiş bir versiyonu olan bu teknik, Ultraviyole (UV) ve Yakın Kızılötesi (NIR) gibi spektrumlar da dahil olmak üzere 365 nm ile 1100 nm aralığında geniş bir spektrumda görüntüleme yapmaktadır. Hiperspektral görüntülemeyle, alt katmanların görünür hale gelmesi, silinmiş metin alanlarının okunabilirliğinin sağlanması, farklı mürekkep türlerinin tespiti, çevresel koşulların etkisiyle eserde meydana gelen değişikliklerin tespiti yapılabilmektedir (Shiel, 2009:162). Kim ve arkadaşları ise (2011) mürekkep korozyonunun farklı bozunma derecelerine sahip toplamda üç belge üzerinde hiperspektral görüntülemeler yaparak alt katmanları görünür hale getirmiş ve belgenin okunmasını sağlamışlardır (Kim vd., 2011). Prekolumbiyen Mesoamerika dönemi olarak adlandırılan Kristof Kolomb'un Amerika'ya keşfinden önceki dönemi ifade eden döneme ait bir kodeksin alt katmanlarını ortaya çıkarmak için HSI kullanılmış ve kodeksin gizli kalan çizimleri ortaya çıkarılmıştır (Snijders vd., 2016). Tournié ve arkadaşları (2019) ise Herculeaneum'dan bulunmuş eski bir papirüs kağıdının arka yüzünde gizlenmiş eski Yunanca metinleri SWIR-HSI (1000-2500 nm) kullanarak ortaya çıkarmıştır (Tournié vd., 2019).

MSI

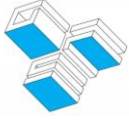


HSI



Şekil 6: Multispektral ve Hiperspektral görüntüleme bant aralığı temsili (Betül Küçük & Emre Yaman)

Multispektral ve hiperspektral görüntüleme teknikleri benzer çalışma prensiplerine sahiptir. Her iki yöntemde de ışık kaynaklarından gönderilen ışıklar, eser tarafından soğrularak ya da yansıtılarak kameraya ulaşmakta ve çekim yapılmaktadır. Kamera ise bu çekimleri görüntüleme ekranına aktarmaktadır (Şekil 5- ve Şekil 6). Ancak MSI, 3 ila 10 geniş spektral bant üzerinden düşük spektral çözünürlüklü analizler yapmayı mümkün kılarken; HSI, 100 ila 450 dar spektral bant üzerinden yüksek spektral çözünürlüklü analiz yapmaktadır (Shiel, 2009:164). HSI ile geniş spektral bantlarda yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmesi aynı zamanda büyük miktarlarda veri oluşmasına neden olmaktadır. Bu verilerin işlenmesi uzun zaman alırken, ayrıştırılması, yorumlanması, analizi ve depolanması da zor olmaktadır. Ayrıca HSI görüntüleme sistemi MSI'ya oranla çok daha yüksek maliyetlidir. Hem MSI hem de HSI sistemlerinin doğru ve tutarlı sonuçlar üretebilmesi için düzenli olarak kalibre edilmesi gerekmektedir. Ayrıca HSI'nın bakım ve operasyon maliyetleri de MSI'ya oranla daha yüksektir (Tablo 2). Her iki görüntüleme tekniğinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi uzmanlık istemektedir (Qureshi vd., 2019:18-19).



Her iki görüntüleme tekniğinin farkı, kullanılan ışık kaynaklarının dalga boylarıdır. Bu durum beraberinde odaklanılan alan hakkında yapılan araştırmayı ve elde edilen sonuçları da etkilemektedir. Bu farklılıklar nedeniyle, MSI yazma eserlerde okunabilirliği artırmak gibi geniş spektral bantların yeterli olduğu uygulamalarda tercih edilirken, HSI ise mürekkep ve pigment analizi, kağıdın alt katmanların haritalandırılması gibi yüksek spektral çözünürlüğün gerekli olduğu alanlarda kullanılmaktadır.

Özellik	Multispektral Görüntüleme	Hiperspektral Görüntüleme
Bant sayısı	Az sayıda geniş spektral bant	Çok sayıda dar spektral bant
Çözünürlük	Düşük	Yüksek
Veri Yoğunluğu	Daha az veri	Daha fazla veri
Kapsam	Belirli dalga boyları	Sürekli spektrum
Kullanım Alanları	Mürekkep kompozisyonu tespiti, yüzey analizi	Mürekkep korozyonu haritalandırması, kimyasal analiz
Cihaz Maliyeti	Daha düşük	Daha yüksek
Veri işleme	Basit ve hızlı	Zor ve yavaş

Tablo 2: Multispektral ve Hiperspektral görüntüleme yöntemlerinin karşılaştırılması (Betül Küçük & Emre Yaman)

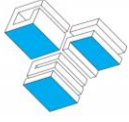
İleri Görüntüleme Teknikleri

Optik Koherens Tomografi (OCT) ile tarihi eserlerde görüntüleme ilk defa 2004 yılında yazılan bir makale ile ortaya atılmıştır (Targowski vd., 2004). Taşınabilir olması sayesinde eserlerin saklandığı arşivler ve depolarda kullanılabilir. Düşük enerjili kızılötesi ışınlar ile görüntüleme yapan OCT'nin tarihi eserlere zarar verip veremeyeceğine dair sistemli bir çalışma bulunmamaktadır ancak sağlık sektöründe kullanımı için gerçekleştirilen çalışmalar örnek alınarak tahribatsız olduğu ifade edilmektedir (Iwanicka vd., 2018:169; Liang, 2011:61).

Diğer tahribatsız tomografik tekniklerden olan BT ile karşılaştırıldığında, OCT daha yüksek dikey çözünürlük (derinlik) sunar. Yatay çözünürlüğü diğer tomografik teknikler ile karşılaştırıldığında genellikle daha düşük olmakla birlikte OCT 1-5 cm² aralığında geniş bir görüş alanı sunmaktadır. Dolayısıyla katmanlı yapıların görüntülenmesi için OCT oldukça uygundur ancak birçok yapının kızılötesi ışınları geçirgenliği düşüktür (Targowski vd., 2015:167).

Liang ve arkadaşları şeffaf boyalar ve mürekkepler için en uygun dalga boyunu bulmaya çalıştıkları araştırmalarında 2 µm dalga boyunda en uygun sonuçlara ulaştıklarını bildirmişlerdir (Liang vd., 2005). 2006 yılında, ilk kez bir parşömen üzerinde OCT ile görüntüleme yapılmıştır, demir içerikli mürekkep ile yazılan parşömende, yazıların altında kalan bozunmalar tespit edilmiştir (Góra vd., 2007).

Düşük enerjili kızılötesi ışınlarla çalışan Optik Koherans Tomografi (OCT), yalnızca yapı ve katmanların görüntülenmesinde kullanılmakta ve element analizi yapamamaktadır. Bu nedenle element analizleri gerçekleştirebilen XRF veya MSI gibi diğer görüntüleme ve analiz sistemleriyle kalibre edilebilmektedir. Bu yaklaşım ile eserlerin yapısal özellikleri ve kimyasal bileşikleri birlikte görüntülenebilmektedir (Liang vd., 2008:33).

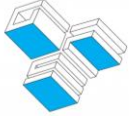


Bilgisayarlı Tomografi ile 3 Boyutlu Tarama (BT); incelenen eserin sarılı ya da katlanmış olması ve açılmasının mümkün olmadığı durumlarda, Bilgisayarlı Tomografi ile 3 Boyutlu Tarama alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir. Bu teknoloji, nesnelerin içindeki katmanları detaylı bir şekilde görüntülemek amacıyla X-ışınları kullanmaktadır. X-ışınları, nesnenin farklı katmanlarından geçerken, her katman farklı oranda ışınları absorbe etmektedir. Bu sayede, bir nesnenin iç yapısı, üç boyutlu bir görüntü şeklinde elde edilebilmektedir. BT, incelenen numunenin iç yapısını inceleyerek, yazma eserlerin katmanlarını, mürekkep ve pigmentlerin dağılımını, yazının silinmiş bölümlerini veya eklemeler yapılmışsa bunları tespit etme olanağı sağlamaktadır. Ayrıca bu incelemeyle demir içerikli mürekkeplerin tespiti ve mühürlü belgelerin içeriği de tespit edilebilmektedir (Neoralová vd., 2023:4; Albertin, 2022:41). Yapılan bir çalışmada, BT ve bir dizi matematiksel algoritma kullanılarak sarılmış veya katlanmış papirüs belgelerindeki gizli metinler, papirüsü fiziksel olarak açmadan ve içeriğine zarar vermeden, dijital olarak yeniden yapılandırılmıştır. Böylece papirüsün içerdiği bilgiler belge açılmadan okunabilir hale getirilmiştir (Baum vd., 2017). Stromer ve arkadaşlarına göre (2018) bu yöntemin dezavantajı, nesnenin maruz kaldığı X-ışınlarının kağıdın selülozik yapısında yaşlandırmayı hızlandırabileceğidir (Stromer vd., 2018:2).

Sinkrotron Radyasyonu X-Işını Floresans (Sr-XRF); demir içerikli mürekkeple yazılmış eserlerde metinlerin okunabilirliğinin sağlanmasında kullanılan bir diğer teknik de Sr-XRF'tir. XRF, elektronlarla etkileşime giren kısa dalga boyundaki elektromanyetik radyasyon türüken, Sr-XRF elektronların çok yüksek hızlarda döndüğü büyük halkalardan elde edilen radyasyondur ve yüksek enerji seviyelerine, çok yüksek parlaklığa ve kısa dalga boylarına sahiptirler. Sr-XRF'ler nanometre seviyesinde yüksek çözünürlük sağlamaktadırlar ve özellikle diğer incelemelerin yetersiz kaldığı durumlarda ya da eserin üzeri boya vb. malzemeler ile kapatılmış olduğunda alt metinlerin okunabilmesi ve ortaya çıkarılmasında tahribatsız bir yöntem olarak tercih edilebilmektedir (Glaser & Deckers, 2014:104). Sr-XRF'in dezavantajı sinkrotron tesislerine ulaşımın zorluğudur ve bu tesisler farklı enerji seviyelerinde sinkrotrona sahiptirler (Lida 2013:2). Çoğu tesis ulusal ve uluslararası kullanıcılara açıktır. Ancak analizin maliyeti diğer görüntüleme yöntemlerine oranla yüksektir. Diğer bir dezavantaj Gimat ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan bir çalışmada belirtilmiştir. Bu çalışma, sinkrotron X-ışını incelemeleri sırasında X-ışını radyasyonunun eserler üzerindeki etkilerini bir dizi deneysel çalışmayla incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre, X-ışını kullanımının mürekkep ve kağıdın bozunmasına neden olabileceği ve analiz yapılırken, maruziyet süresinin ve X-ışını dozunun düşük tutulmasını önermişlerdir (Gimat vd., 2022). Ayrıca bu yöntemde çok fazla veri yoğunluğu elde edilmekte ve bu verilerin işlenmesi yavaş ve karmaşık bir süreçten geçmektedir.

Kantitatif Hiperspektral Görüntüleme (QHSI); görüntüleme tekniklerinde kullanılan cihazlar kurumların isteklerine göre geliştirilebilmekte ve incelenmek istenen vakaya göre çeşitli şekilde kalibre edilebilmektedir. Örneğin Aalderink ve arkadaşları (2010) HSI cihazını, ticari olarak alınmış, yansıma değeri bilinen beyaz bir referans ile kalibre etmişlerdir ve incelenen belgeden yansıyan ışık miktarı, referans ile karşılaştırılarak kantitatif yansıma ölçümünü yapmışlardır. Kullandıkları yöntem kantitatif hiperspektral görüntüleme (QHSI) adını verdikleri çalışmalarında, belgeden elde edilen dijital görüntülerin içerisindeki milyonlarca pikseli, kalibre edilmiş referans ile karşılaştırarak spektral veriler elde etmişlerdir (Aalderink vd. 2010). Kantitatif hiperspektral görüntülemelerle yazma eserlerde mürekkep ve pigmentlerdeki mevcut bozunmaların ön tanımlamaları, mürekkep korozyonunun bozunma seviyelerinin tanımlamaları, çevresel koşullar (sıcaklık, bağıl nem, kirleticiler ve ışık) etkisiyle oluşan bozulmalar tespit edilebilmekte ve silinmiş ya da korozyon nedeniyle okunamayan metinlerin görünürlüğü artırılabilir (Klein vd., 2008:5578-5579; Padoan vd., 2008).

Fotoakustik Görüntüleme; solmuş, silinmiş ya da okunmayan mürekkep alanlarının okunması için geleneksel ve güncel tekniklerin yanı sıra Perino ve arkadaşları tarafından önerilen yeni teknikler arasında Fotoakustik görüntüleme (PAI-Photoacoustic Imaging) bulunmaktadır. PAI katmanlı belgelerdeki gizli içerikleri ortaya çıkarmak için kullanılan yenilikçi bir tekniktir (Perino vd., 2024:690). Bu teknik, malzemelere ışık gönderildiğinde, malzemenin bu ışığı emerek ısıya dönüştürmesi prensibine dayanmaktadır. Işık emilimi sonucu oluşan ısı, malzemedeki moleküllerin titreşmesine yol açmakta ve bu da akustik dalgaları oluşturmaktadır. Fotoakustik görüntüleme, bu akustik dalgalar özel sensörler



aracılığıyla kaydedilmektedir. Elde edilen veriler, belge içindeki farklı katmanların ve bileşenlerin belirlenmesine olanak tanımaktadır (Tserevelakis vd., 2018). Yazma eserlerde yapılan fotoakustik analizler, mürekkep hasarlarını, mürekkep bileşenlerini ve eski yazıların tahribatsız bir şekilde okunmasını sağlayabilmektedir.

Literatürde bu ileri görüntüleme yöntemlerine dair çalışmalar sınırlıdır. Gelecek çalışmalarda bu yöntemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Sonuç ve Öneriler

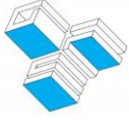
Bu çalışmada, mürekkep korozyonunun yazma eserler üzerindeki yıkıcı ve durdurulamaz etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve bu sorunla başa çıkmak için kullanılan görüntüleme, okunabilirlik ve dijital koruma teknikleri ele alınmıştır. Demir içerikli mürekkeplerle yazılan yazma eserler, bugün dünya genelinde ve Türkiye’de birçok müze, kütüphane ve arşiv koleksiyonlarında yer almakta olup, mürekkep korozyonu bu eserlerin yok olmasına neden olmaktadır. Mürekkep korozyonunun etkilerini yavaşlatmak mümkün olsa da tamamen durdurulması henüz söz konusu değildir. Bu nedenle, çalışmada ele alınan görüntüleme teknikleri, korozyon nedeniyle okunamaz hale gelen metinlerin yeniden görünür hale getirilmesine ve yazma eserlerin uzun vadeli korunmasına katkıda bulunmaktadır. Geleneksel, modern ve gelişmiş görüntüleme tekniklerinin her biri, yazma eserlerdeki görünmeyen katmanları ve metinleri ortaya çıkarmada önemli roller oynamaktadır. Bu tekniklerin avantaj ve dezavantajları şu şekilde özetlenebilir;

Geleneksel görüntüleme teknikleri olan UV ve IR görüntülemeler, düşük maliyetli ve hızlı uygulama avantajlarına sahipken, kesin sonuçlar vermekte yetersiz kalabilmektedir.

Güncel görüntüleme tekniği olan termografik analiz, farklı mürekkep türlerinin ısı iletim farklarını ortaya çıkarmaktadır ancak yüksek çözünürlük gerektiren detaylarda sınırlı kalmaktadır. Multispektral görüntüleme ise farklı dalga boylarındaki ışık kullanımıyla detayları ortaya çıkarmaktadır. Henüz uygulanacak protokolde birlik sağlanamamış olması ve tutarsız belgelemeler yapılan çalışmalar karşılaştırma yapılmasını zorlaştırırsa da mürekkep korozyonu nedeniyle okunamayan sayfaların görüntülenmesinde oldukça iyi sonuçlar alınmaktadır. Hiperspektral görüntüleme, kimyasal bileşimlerin detaylı analizini sağlamaktadır ve ekipman maliyeti yüksektir. Multispektral ve hiperspektral görüntüleme tekniklerinin her ikisi de nesnelerin spektral özelliklerini incelemek için kullanılmaktadır. Ancak okunabilirlik sağlamak amacıyla multispektral yeterli görülmektedir. Daha derin ve detaylı araştırmalar gerektiğinde hiperspektral görüntülemeler tercih edilebilir.

İleri görüntüleme tekniği olan bilgisayarlı tomografi ile üç boyutlu tarama, incelenen eserin üç boyutlu görüntülenmesi ve katman analizini sağlamaktadır. Özellikle sarılı ya da katlanmış olan eserlerin demir içerikli yazı alanlarının tespitinde olumlu sonuçlar alınmaktadır. Sinkrotron radyasyonu X-ışını Floresans Spektroskopisi, Kantitatif Hiperspektral Görüntüleme ve Fotoakustik Görüntüleme gizli katmanların ve içeriklerin detaylı analizi için yenilikçi tekniklerdir ancak yaygın uygulanabilirlik açısından daha fazla araştırma gerektirmektedir.

Gelecek çalışmalar için tekniklerin entegrasyonu sağlanabilir ve çeşitli görüntüleme teknikleri bir arada kullanılarak yazma eserlerin korunmasında daha kapsamlı ve etkili sonuçlar elde edilebilir. Yapılacak uygulamalarda uzmanlar ve bilim insanları tarafından geliştirilecek protokoller, yapılacak işlemlerin sağlam temellere dayandırılması ve doğruluğu açısından önem arz edecektir. Ayrıca görüntüleme tekniğinin seçiminde çeşitli parametreler göz önüne alınmalı ve ihtiyaca yönelik bir teknik belirlenmelidir. Uygulanacak görüntüleme tekniklerine karar verirken cihazın maliyeti, cihazlara erişilebilirlik, cihazların kalibrasyon ve bakım maliyetleri önemli parametrelerdir. Ayrıca verilerin işlenmesi ve yorumlanması analiz sonuçlarının doğru yorumlanması için gerekli bir basamaklardır. Bu nedenle seçilecek görüntüleme tekniğinde uzmanlarla birlikte çalışmak ve gerekli durumlarda disiplinler arası iletişimi sağlamak önemlidir. Ayrıca kısa



vadeli planlardan ziyade uzun ve sürdürülebilir teknikler tercih edilmelidir. Konservatörler ve araştırmacılar için eğitim programları düzenlenerek, bu tekniklerin doğru ve etkin bir şekilde kullanılmasına yönelik farkındalık artırılmalıdır. Türkiye’de de bu çalışmaların sayısının artırılması büyük önem taşımaktadır. Müze, kütüphane ve arşiv koleksiyonlarında bulunan mürekkep korozyonlu eserlerin bozunma dereceleri belirlenmeli ve buna göre bozunma derecesi 2-3 olan ve metin alanları okunamaz hale gelmiş olan eserler muhakkak uzmanlar tarafından ele alınarak, bu eserlerin alt katmanlarını okunur hale getirmek için görüntüleme teknikleri kullanılmalıdır. Bozunma derecesi 0-1 olan eserler ise dijitalleştirme teknikleri ile gelecek nesillere aktarılmalı ve bilimsel araştırmalara katkı sağlanmalıdır.

Bu çalışma, mürekkep korozyonuna sahip yazma eserlerin korunmasına yönelik yenilikçi yaklaşımları ve uygulanabilir çözümleri detaylı bir şekilde ele alarak kültürel mirasın geleceğe güvenle aktarılmasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Kaynakça

Albertin, F. (2022). “X- Ray Tomography For Manuscripts”, *Umanistica Digitale*, 6(12), s. 39–64.

Albro, S., Biggs, J. L., Dekle, C., Haude, M. E., Karnes, C., & Khan, Y. (2008). “Developing Guidelines For Iron-Gall Ink Treatment At The Library Of Congress”, *The Book and Paper Group Annual*, 27, s.129-165.

Ambrosini, D., Rubeis, T., Pasqualoni, G. & Paoletti, G. (2022). “Comparative Examples Of The Evolution Of Thermal Cameras In Artwork Diagnostics: An Experimental Perspective”, *The Future of Heritage Science and Technologies: Design, Simulation and Monitoring*, ed. Rocco Furferi, Lapo Governi, Yary Volpe, Francesco Gherardini, Kate Seymour, Springer, s. 169-179.

Arcon, I., Kolar, J., Kodre, A., Hanzel, D., Strlic, M. (2007). “XANES Analysis Of Fe Valence In Iron Gall Inks”, *X-Ray Spectrometry*, 36, s.199–205.

Banik, G. (1998). “Ink Corrosion Chemistry”. <https://irongallink.org/ink-corrosion-chemistry.html>, Erişim tarihi, 28.11.2024.

Baum, D., Lindow, N., Hege, C. H., Lepper, V., Siopi, T., Kutz, F., Mahlow, K., Mahnke, H. E. (2017). “Revealing Hidden Text In Rolled And Folded Papyrus”, *Applied Physics A*, 123, Article number 171.

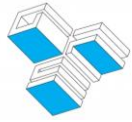
Aalderink, B. J., Klein, M. E., Padoan, R., Bruin, G. & Steemers, T. A. G. (2010). “Quantitative Hyperspectral Imaging Technique for Condition Assessment and Monitoring of Historical Documents”, *The Book and Paper Group Annual*, 29, s.121–126.

Budnar, M., Uršič, M., Simčič, J., Pelicon, P., Kolar, J., Šelih, V. S., Strlič, M. (2006). “Analysis Of Iron Gall Inks By PIXE”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 243(2), s.407-416.

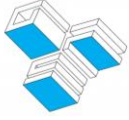
Bulska, E., & Wagner, B. (2004). “A Study Of Ancient Manuscripts Exposed To Iron-Gall Ink Corrosion”, *Comprehensive Analytical Chemistry*, 42, s.755–788.

Caneva, G., Nugari, M. P., & Salvadori, O. (1991). *Biology In The Conservation Of Works Of Art*. Rome: ICCROM.

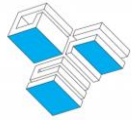
Corregidor, V., Viegas, R., Ferreira, L. M., Alves, L. C. (2019). “Study of Iron Gall Inks, Ingredients and Paper Composition Using Non-Destructive Techniques”, *Heritage*, 2(4), s.2691-2703.



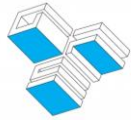
- Çakar, P. (2019). Yazma Eserlerde Kullanılan Boyarmaddelerin Belirlenmesi ve Kağıdın Yaşlanma Kinetiği Üzerine Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dritsa, V., Orazi, N., Yao, Y., Paoloni, S., Kouï, M., & Sfarra, S. (2022). "Thermographic Imaging in Cultural Heritage: A Short Review", *Sensors*, 22(23), s.1-16. <https://doi.org/10.3390/s22239076>
- Duh, J., Krstić, D., Desnica, V., ve Fazinić, S. (2017). "Non-Destructive Study Of Iron Gall Inks in Manuscripts", *Nuclear Instruments And Methods in Physics Research B: Beam Interactions With Materials And Atoms*, 417, s.96-99.
- Espina, A., Cañameres, M. V., Jurašeková, Z., ve Sanchez-Cortes, S. (2022). "Analysis of Iron Complexes of Tannic Acid and Other Related Polyphenols as Revealed by Spectroscopic Techniques: Implications in the Identification and Characterization of Iron Gall Inks in Historical Manuscripts", *ACS Omega*, 7(32), s.27937–27949.
- Giacometti, A., Campagnolo, A., MacDonald, L., Mahony, S., Robson, S., Weyrich, T., Terras, M., ve Gibson, A. (2017). "The Value Of Critical Destruction: Evaluating Multispectral Image Processing Methods For The Analysis Of Primary Historical Texts", *Digital Scholarship in the Humanities*, 32(1), s.101-122, <https://doi.org/10.1093/llc/fqw036>.
- Gimat, A., Michelin, A., Massiani, P., & Rouchon, V. (2021). "Beneficial Effect Of Gelatin On Iron Gall Ink Corrosion", *Heritage Science*, 9(125), s.1-15.
- Gimat, A., Schöder, S., Thoury, M., ve Dupont, A. L. (2022). "Degradation Of Historical Paper Induced By Synchrotron X-Ray Technical Examination", *Cellulose*, 29(8), s.4347-4364.
- Góra, M., Pircher, M., Götzinger, E., Bajraszewski, T., Strlič, M., Kolar, J., Hitzemberger, C. K., ve Targowski, P. (2006). "Optical Coherence Tomography For Examination Of Parchment Degradation", *Laser Chemistry*, Sayı 1, s.1-6, <https://doi.org/10.1155/2006/68679>.
- Hou, F., Zhang, Y., Zhou, Y., Zhang, M., Lv, B., ve Wu, J. (2022). "Review on Infrared Imaging Technology", *Sustainability*, 14(18), s.1-26, <https://doi.org/10.3390/su141811161>.
- IFLA. (2019). Iron Gall Ink FAQs: Preservation and Conservation Section, North America, https://www.ifla.org/wpcontent/uploads/2019/05/assets/pac/Documents/faq_iron_gall_ink_north_america.pdf, Erişim tarihi: 15.11.2024
- Iida, A. (2013). "Synchrotron Radiation X-Ray Fluorescence Spectrometry", *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, R. A. Meyers (Ed.), <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a9329>.
- Iwanicka, M., Sylwestrzak, M., ve Targowski, P. (2018). "Optical Coherence Tomography (OCT) for Examination of Artworks", *Advanced Characterization Techniques, Diagnostic Tools and Evaluation Methods in Heritage Science*, ed. David M. Bastidas ve Emilio Cano, Springer, s.49-59. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75316-4_4.
- Jarmulkiene, O., Liubiniene, M., ve Beganskiene, A. (2024). "Stabilization of Iron Gall Ink Damaged Paper with Nanosized Magnesium Hydroxide and Antioxidants", *Studies in Conservation*, 69(5), s.360-368. <https://doi.org/10.1080/00393630.2023.2250195>.



- Jones, C., Duffy, C., Gibson, A. & Terras, M. (2020). "Understanding Multispectral Imaging of Cultural Heritage: Determining Best Practice in MSI Analysis of Historical Artefacts", *Journal of Cultural Heritage*, 45, s. 339-350. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.03.004>
- Karademir, A. & İmamoğlu, S. (2001). "Kağıtların Doğal Yaşlanmasına Bağlı Önemli Degradasyon Reaksiyonları", *Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(2), s.98-108.
- Kim, S. J., Deng, F. & Brown, M. S. (2011). "Visual Enhancement of Old Documents with Hyperspectral Imaging", *Pattern Recognition*, 44, s.1461-1469.
- Klein, M. E., Aalderink, B. J., Padoan, R., Bruin, G. & Steemers T. A. G. (2008). "Quantitative Hyperspectral Reflectance Imaging", *Sensors*, 8, s.5576-5618.
- Kocabay, Ö. G. (2012). "Yazma Eserlerde Kimyasal Bozulmalar ve Kimyasal Bozulmaların Durdurulması", (Uzmanlık Tezi), İstanbul; T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı Kütüphaneler ve Yayımlar Genel Müdürlüğü.
- Koç, H. (2019). "Vakıflar Genel Müdürlüğü Arşivinde Bulunan İzzet Mehmet Paşa Vakfına Ait Yazma Eserlerin Bozulma Durumlarının Tespiti ve Koruma Önerileri", (Yüksek Lisans Tezi), Ankara: Gazi Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü.
- Kolar, J., Možir, A., Strlič, M., de Bruin, G., Pihlar, B., & Steemers, T. (2007). "Stabilisation of Iron Gall Ink: Aqueous Treatment with Magnesium Phytate", *e-PRESERVATIONScience*, 4, s.19-24.
- Kolar, J., Stolfa, A., Strlič, M., Pompe, M., Pihlar, B., Budnar, M., Simčič, J., & Reissland, B. (2006). "Historical Iron Gall Ink Containing Documents: Properties Affecting Their Condition", *Analytica Chimica Acta*, 555(1), s.167-174. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.08.073>
- Glaser, L. & Deckers, D. (2014). "The Basics of Fast-scanning XRF Element Mapping for Iron-gall Ink Palimpsests", *Manuscript Cultures*, 7, s.104-112.
- Lerf, A., Wagner, F. E., Dreher, M., Espejo, T. & Pérez-Rodríguez, J. L. (2021). "Mössbauer Study of Iron Gall Inks on Historical Documents", *Heritage Science*, 9(1), s.1-14.
- Liu Y., Fearn, T. & Strlič, M. (2022). "Photodegradation of Iron Gall Ink Affected by Oxygen, Humidity and Visible Radiation", *Dyes and Pigments*, 198 (2), s.109947.
- Liang, H., Gomez Cid, M., Cucu, R., Dobre, G., Podoleanu, A. & Pedro, J. (2005). "En-face Optical Coherence Tomography: A Novel Application of Non-invasive Imaging to Art Conservation", *Optics Express*, 13(16), s.6133-6144. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.006133>
- Liang, H., Keita, K., Peric, B., & Vajzovic, T. (2008). "Pigment Identification with Optical Coherence Tomography and Multispectral Imaging", *Proc. OSAV'2008, The 2nd International Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision*, 12-15 Mayıs, Rusya, s. 33-42.



- Liang, H. (2011). "Advanced Optical Imaging Methods for Investigating Manuscripts. The Technological Study of Books and Manuscripts as Artefacts - Research Questions and Analytical Solution", *Archaeopress, BAR International Series, Sayı 2209*, s.55-66.
- Magkanas, G., Bagán, H., Sistach M.C. & García, J.F. (2021). "Illuminated Manuscript Analysis Methodology Using MA-XRF and NMF: Application on the Liber Feudorum Maior", *Microchemical Journal*, 165, s.106112. DOI:10.1016/j.microc.2021.106112
- Mazzino, A., Ruberto, C., Castelli, L., Ricciardi, P., Czelusniak, C., Giuntini, L. & Taccetti, F. (2020). "The Importance of Being Little: MA-XRF on Manuscripts on a Venetian Island", *X-Ray Spectrometry*, 50(4), s.2s.-278. <https://doi.org/10.1002/xrs.3181>
- Melo, J. M., Otero, V., Nabais, P., Teixeira, N., Pina, F., Casanove, C., Fragoso, S. & Sequeira, S. O. (2022). "Iron-gall Inks: A Review of Their Degradation Mechanisms and Conservation Treatments", *Heritage Science*, 10(145) <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00779-2>
- Mercuri, F., Zammit, U., Orazi, N., Paoloni, S., Marinelli, M. & Scudieri, F. (2011). "Active Infrared Thermography Applied to the Investigation of Art and Historic Artefacts", *International Journal of Thermophysics*, 104, s.475-485, <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1450-8>
- Michelin, A., Pottier, F. & Andraud, C. (2021). "2D Macro-XRF to Reveal Redacted Sections of French Queen Marie-Antoinette Secret Correspondence with Swedish Count Axel von Fersen" *Science Advances*, 7, DOI: 10.1126/sciadv.abg4266
- Montani, I., Sapin, E., Pahud, A. & Margot, P. (2012). "Enhancement of Writings on A Damaged Medieval Manuscript Using Ultraviolet Imaging", *Journal of Cultural Heritage*, 13(2), s.226-228.
- Neoralová, J., Kazanskii, A., Kindlerova, R. L., Novotná, D., Vávrová, P., Vavrik, D., Kumpova, I., Vopalensky, M. & Kyncl, T. (2023). "The Use of X-ray Computed Tomography and X-ray Fluorescence In Research Into Historical Printing From the 17 th Century", *Research Square*, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3349390/v1>
- Nguyen, T. P., Bouvet, S., Komenda, A. & Dumont, B. (2008). "Infrared Imaging of Corroded and Darkened Oriental Manuscripts with Standard Digital Camera". *Restaurator*, 29, s.155-162.
- Orazi, N. (2020). "Mid-wave Infrared Reflectography and Thermography for the Study of Ancient Books: A Review", *Studies in Conservation*, 65(8), s.437-449.
- Paoloni, S., Mercuri, F., Orazi, N., Caruso, G. & Zammit, U. (2020). "Photothermal Approach for Cultural Heritage Research", *Journal of Applied Physics*, 128, s.1-14. <https://doi.org/10.1063/5.0023432>
- Padoan, R., Steemers T. A. G., Klein, M. E., Aalderink, B. J. & Bruin, G. (2008). "Quantitative Hyperspectral Imaging of Historical Documents: Technique and Applications", 9th International Conference on NDT of Art, 25-30 Mayıs, Israil.
- Peratello, P. (2024). "Multispectral Imaging and Microscopic Analysis of a Medieval Runic Manuscript (AM 28 8vo)", Ed. N. Kivilcim Yavuz and Katarzyna Anna Kapitan, *Digital Medievalist*, 17(1), s.1-38. <https://doi.org/10.16995/dm.10359>



Pottier, F., Michelin, A., & Robinet, L. (2019). "Recovering Illegible Writings in Fire-Damaged Medieval Manuscripts Through Data Treatment of UV-Fluorescence Photography", *Journal of Cultural Heritage*, 36, s.183-190. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.08.012>

Perino, M., Pronti, L., Moffa, C., Rosellini, M. & Felici, A. C. (2024). "New Frontiers in the Digital Restoration of Hidden Texts in Manuscripts: A Review of the Technical Approaches", *Heritage*, 7(2), s.683-696. <https://doi.org/10.3390/heritage7020034>

Poggi, G., Giorgi, R., Toccafondi, N., Katzur, V. & Baglioni, P. (2010). "Hydroxide Nanoparticles for Deacidification and Concomitant Inhibition of Iron-Gall Ink Corrosion of Paper", *Langmuir*, s.19084–19090, <https://doi.org/10.1021/la1030944>

Pronti, L., Perino, M., Cursi, M., Santarelli, M. L., Felici, C. C. & Bracciale, M. P. (2018). "Characterization and Digital Restoration of XIV-XV Centuries Written Parchments by Means of Nondestructive Techniques: Three Case Studies" *Journal of Spectroscopy*, 2018 (1), 1-14.

Rabin, I. (2021). "Material Studies of Historic Inks: Transition from Carbon to Iron-Gall Inks", *Traces of Ink: Experiences of Philology and Replication*, ed. L. Raggetti, Brill, s.70–78. <http://www.jstor.org/stable/10.1163/j.ctv1sr6hgw.10>

Reißland, B. & Hofenk de Graaff, J. (2001). "Condition Rating for Paper Object with Iron-gall Ink" Cultural Heritage Agency of the Netherlands, <https://www.cultureelerfgoed.nl/publicaties/publicaties/2001/01/01/condition-rating-for-paper-object-with-iron-gall-ink>, Erişim Tarihi: 10-12-2024.

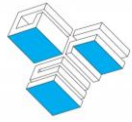
Romano, F. P., Puglia, E., Caliri, C., Pavone, D. P., Alessandrelli, M., Busacca, A., Fatuzzo, C. G., Fleischer, K. J., Pernigotti, C., Preisler, Z., Vassallo, C., Verhasselt, G., Miliari, C. & Ranocchia, G. (2023). "Layout of Ancient Greek Papyrus Through Lead-Drawn Ruling Lines Revealed by Macro X-Ray Fluorescence Imaging", *Scientific Reports*, 13, Article Number 6582, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33242-8>

Rouchon-Quillet, V., Remazeilles, C., Bernard, J., Wattiaux, A., & Fournes, L. (2004). "The Impact of Gallic Acid on Iron Gall Ink Corrosion", *Applied Physics A*, 79(2), s.389–392. <https://doi.org/10.1007/s00339-004-2541-1>

Sharma, N., Agarwal, A., Negi, Y.S., Bhardwaj, H. & Jaiswal, J. (2014). "History and Chemistry of Ink: A review", *World Journal of Pharmaceutical Research*, 3(4), s.2096-2105.

Shiel, P., Rehbein, M. & Keating, J. (2009). "The Ghost in the Manuscript: Hyperspectral Text Recovery and Segmentation", *Kodikologie und Paläographie im Digitalen Zeitalter – Codicology and Palaeography in the Digital Age*, ed. Malte Rehbein, Patrick Sahle & Torsten Schaßan, Schriften des Instituts für Dokumentologie und Editorik 2. Nordstedt: Books on Demand, s. 159-174.

Snijders, L., Zaman, T. & Howell, D. (2016). "Using Hyperspectral Imaging to Reveal a Hidden Precolonial Mesoamerican Codex", *Journal of Archaeological Science: Reports*, 9, s.143-149. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.07.019>



Stromer, D., Christlein, V., Martindale, C., Zippert, P., Haltenberger, E., Hausotte, T. & Maier, A. (2018). "Browsing Through Sealed Historical Manuscripts by Using 3-D Computed Tomography with Low-Brilliance X-Ray Sources", *Scientific Reports*, 8, s.1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33685-4>

Tanrıverdi, M. (2022). "Konya Bölge Yazma Eserler Kütüphanesi Örneği Üzerinden Yazma Eserlerde Koruma Uygulamaları", [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi], Denizli: Pamukkale Üniversitesi Arkeoloji Enstitüsü.

Targowski, P., Pronobis-Gajdzis, M., Surmak, A., Iwanicka, M., Kaszewska, E. A., & Sylwestrzak, M. (2015). "The Application of Macro-X-Ray Fluorescence and Optical Coherence Tomography for Examination of Parchment Manuscripts", *Studies in Conservation*, 60(1), s.167-177. <https://doi.org/10.1179/0039363015Z.000000000221>

Targowski, P., Rouba, B., Wojtkowski, M., & Kowalczyk, A. (2004). "Application of Optical Coherence Tomography to Non-destructive Examination of Museum Objects", *Studies in Conservation*, 49(2), s.107-114. <https://doi.org/10.1179/sic.2004.49.2.107>

Tibúrcio, C., Valadas, S., Cardoso, A., Candeias, A., Barreira, C. & Miguel, C. (2020). "On the Use of EDXRF and UV-Vis FORS to Unveil the Production of Two Illuminated Manuscripts From the Fifteenth Century Portuguese Royal Court", *Microchemical Journal*, 153, 104455. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104455>

Tonazzini, A., Salerno, E., Salam, Z. A. A., Harith, M. A., Marras, L., Botto, A., Campanella, B., Legnaioli, S., Pagnotta, S., Poggialini, F. & Palleschi, V. (2019). "Analytical and Mathematical Methods for Revealing Hidden Details in Ancient Manuscripts and Paintings: A Review", *Journal of Advanced Research*, 17, s.31-42. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.01.003>

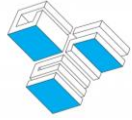
Tonazzini, A., Savino, P., Salerno, E., Hanif, M. & Debole, F. (2019). "Virtual Restoration and Content Analysis of Ancient Degraded Manuscripts" *International Journal of Information Science & Technology*, 3(5), s.16-25.

Tournié, A., Fleischer, K., Bukreeva, I., Palermo, F., Perino, M., Cedola, A., Andraud, C. & Ranocchia, G. (2019). "Ancient Greek Text Concealed on The Back of Unrolled Papyrus Revealed Through Shortwave-infrared Hyperspectral Imaging" *Applied Science and Engineering*, 5 (10), s.1-8.

Torgan Güzel, E., Karadağ, R. & Baydar, N. (2023). "Characterization of Materials in the Late 15th-Century Animal Encyclopedia at an Ottoman Library and Detection of Deterioration Products by HPLC-DAD", *Heritage Science*, 11(129), s. 1-16.

Tse, S., Goltz, D., Guild, S., Orlandini, V., Trojan-Bedynski, M. & Richardson, M. (2009). "Effect of Aqueous Treatments on Nineteenth-Century Iron-Gall-Ink Documents: Assessment Using Hyperspectral Imaging", *The Book and Paper Group Session, AIC 37th Annual Meeting, 20-23 Mayıs, Los Angeles, California*, s.75-82.

Tserevelakis, G. J., Tsagkaraki, M., Siozos, P. & Zacharakis, G. (2018). "Uncovering the Hidden Content of Layered Documents by Means of Photoacoustic Imaging", *Strain*, 55(2), s.1-9. <https://doi.org/10.1111/str.12289>



Tserevelakis, G. J., Vrouvaki, I., Siozos, P., Melessanaki, K., Hatzigiannakis, K., Fotakis, C., & Zacharakis, G. (2017). "Photoacoustic Imaging Reveals Hidden Underdrawings in Paintings", *Scientific Reports*, 7(747), s.1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00789-2>

Viguerie, L., Rochut, S., Alfeld, M., Walter, P., Astier, S., Gontero, V. & Boulc'h, F. (2018). "XRF and Reflectance Hyperspectral Imaging on a 15th Century Illuminated Manuscript: Combining Imaging and Quantitative Analysis to Understand the Artist's Technique", *Heritage Science*, 6, s.1-13. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0177-2>

Völkel, L., Prohaska, T. & Potthast, A. (2020). "Combining Phytate Treatment and Nanocellulose Stabilization for Mitigating Iron Gall Ink Damage in Historic Papers", *Heritage Science*, 8, s.1-15. <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00428-6>

Yoldaş, R. (2023). *Yazma Eserlerde Görülen Mürekkep Ve Boyar Madde Bozulmalarının Tespiti ve Koruma Onarım Önerisi: 15. Yüzyıla Ait El Yazması Üzerinde İncelemeler*, [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi], İstanbul: İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Zamorano, G. M. C. (2018). "The presence of Iron in Inks Used in Valencian Manuscripts From the 13th to 17th Century", *Microchemical Journal*, 143, s.484-492. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.07.043>

Zito, R., Bonizzoni, L. & Ludwig, N. (2024). "Application of Macro X-ray Fluorescence Fast Mapping to Thickness Estimation of Layered Pigments", *Sustainability*, 16(6), s. 1-17. <https://doi.org/10.3390/su16062467>

Qureshi, R., Uzair, M., Khurshid, K. & Yan H. (2019). "Hyperspectral Document Image Processing: Applications, Challenges and Future Prospects", *Pattern Recognition*, 90, s.12-22. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2019.01.026>

Wu, T., Li, G., Yang, Z., Zhang, H., Lei, Y., Wang, N., & Zhang, L. (2016). "Shortwave Infrared Imaging Spectroscopy for Analysis of Ancient Paintings", *Applied Spectroscopy*, 71(5), 977–987. <https://doi.org/10.1177/0003702816660724>