

Antik Duvar Resimlerinin Sanal Onarımı Hakkında Bir İnceleme

A Review About Virtual Restoration of Ancient Murals

Bilgin YAZLIK

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Merkez / Nevşehir / Türkiye

bilginyazlik@nevsehir.edu.tr

0000-0002-8172-3192

Öz

Antik duvar resimleri bize geçmişte onları yaratan insanların tarihi, kültürü ve sanatı hakkında paha biçilmez bilgiler sağlar. Ancak hasarlı duvar resimleri onlardan elde edebileceğimiz bilgiyi sınırlar, bu nedenle mümkünse antik duvar resimlerinin onarılması gereklidir. Duvar resimleri taşınmaz kültürel varlıkları olduğundan, yerinde onarılması gerekir. Fiziksel onarım riskli bir işlemdir ve onarımda yapılacak bir hata bin yıllık bir duvar resmine geri dönülemez zararlar verebilir. Günümüzde bilgisayar tabanlı hesaplama yeteneklerinin artmasıyla görüntü işleme tekniklerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bugün dijital görüntü işleme tekniklerinin desteğiyle antik duvar resimlerinin sanal onarımı yapılabilmektedir. Sanal onarım sayesinde, orijinal duvar resmine fiziki hiçbir müdahalede bulunulmadan onarım ön izlemesi ve onarım sanatçılarına rehberlik yapılabilmektedir. Bu sayede fiziksel onarım süreci daha sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Görüntü işleme teknikleri, antik duvar resimlerinin dijital arşivlenmesinde, soluk duvar resimlerindeki ayrıntıların ve renklerin belirginleştirilmesinde, yıpranmış duvar resimlerinde eksik kısımların tamamlanmasında, üst üste binen motiflerin analizinde, resim yüzeyindeki çatlakların giderilmesinde ve boyamada kullanılan malzemelerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu derlemede antik duvar resimlerinin sanal onarımında kullanılan dijital görüntü işleme teknikleri ele alınmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Sanal onarım, antik duvar resimleri, resim tamamlama, resim iyileştirme.

Abstract

Ancient murals provide us invaluable information about the history, culture and art of the people who painted them in the past. But damaged murals limit our knowledge so if it is possible restoration of the ancient mural is mandatory. Since these murals are immovable cultural heritages, they need to be restored in situ. Physical restoration is a high-risk process, and a restoration mistake can irreversibly damage a thousand-year-old mural. Nowadays, thanks to the increasing computational capabilities, significant advancements have been achieved in image processing techniques. Today, virtual restoration of ancient murals could be done with the support of digital image processing techniques. Thanks to virtual restoration, restoration preview and guidance for the restoration artists can be performed without any intervention to the original mural. In this way, the physical restoration process can be carried out more accurately. Image processing techniques are used in digital archiving of ancient murals, enhancement of details and color in faded murals, inpainting missing parts of faint murals, analyzing superimposed motifs, removing cracks, and identifying the materials used for painting. In this review, digital image processing techniques used in the virtual restoration of ancient murals are discussed.

Keywords: Virtual restoration, ancient murals, inpainting, enhancement.

1. Giriş

Dijital görüntü işleme teknikleri, laboratuvara taşınması olanaksız olan antik duvar resimleri üzerinde çalışırken çok faydalıdır. Araştırmacılar, duvar resimlerinin yüzeyinde hasar oluşma riskini en aza indiren yeni onarım yöntemleri geliştirmektedirler. Bu yöntemler sıvama, saydan bir ortam üzerine çizim yapma, tebeşirleme ve kalıplama yöntemlerini içermektedir. Ancak bu yöntemler hasarı en aza indirmesine

karşın, yine de paha biçilmez eserler fiziksel temasla analiz edilmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisinin yardımıyla, antik duvar resimleri, fiziksel temas gerektirmeden analiz edilebilmektedir. [1] sayılı çalışmada, antik duvar resimlerinin derinlemesine analizi için kızılötesi ile dijital görüntüleme tekniğinden yararlanılmıştır. Kızılötesi spektrum, fotoğrafın keskinliğini azaltır, bu nedenle ticari dijital kameralar kızılötesi spektrumunu engelleyecek şekilde tasarlanmışlardır. Ancak, kızılötesi spektrumun kullanımıyla bazı soluk görüntüleri iyileştirmek mümkündür. [1]'e göre, karbon bazlı mürekkepler kızılötesi ışıkta daha belirgin görünürken, liken, yosun ve diğer canlı malzemeler kızılötesi ışık altında floresan ışık yayar. Kızılötesi ışıkta kırmızı pigmentler daha az görünür ancak siyah, kahverengi, gri ve mavimsi pigmentler daha belirgin görünür.

Duvar resimleri, yağlı boya tablolar gibi antik sanat eserleri çoğunlukla zamana dayalı çatlaklar, renk değişimi, fiziksel hasar, yüzeyde biyolojik türlerin büyümesi gibi yaşlanma problemlerine sahiptirler. [2]'de eski Çin resimlerinin dijital onarımı için hasar tespiti ve boyama yöntemi önerisi araştırılmıştır. Sonuçlar, en yakın komşuya dayalı dijital onarım tekniklerinin yardımıyla hasarlı duvar resimlerinin dijital olarak onarımının mümkün olduğunu göstermektedir.

Hasarlı antik duvar resimlerinin geleneksel yöntemlerle onarılmasının geri döndürülemez olduğu bilinmektedir. Onarımdan önce, daha az hatalı bir onarım işlemi için dijital görüntü işleme tekniklerinin yardımı ile dijital onarım yapmak mümkündür. Bu ön işlem, nihai onarım için bir kılavuz olarak kullanılabilir. [3]'de, dijital görüntü işleme tabanlı tekniklerin, geleneksel yağlı boya onarım işlemine kıyasla yağlı boya onarımının kalitesini artırabileceği gösterilmiştir.

Antik duvar resimlerinin onarımı çok önemlidir ve bazen eserin geri döndürülemez deformasyonu nedeniyle zarar verici olabilir. Antik duvar resimlerinde çatlak, renk deformasyonu ve fiziksel deformasyon (bazı alanların eksikliği gibi) sorunları görülebilmektedir. Bu makalede [4], görüntü onarımı için üç uygulama gerçekleştirilmiştir: çatlak onarımı, renk onarımı ve kavisli yüzeylerdeki kısmi görüntülerin mozaiklenmesi.

Fiziksel hasarlar veya çevresel etkiler duvar resimlerinin kalitesini düşürebilir. Dijital görüntü işleme tekniklerinin yardımıyla duvar resimlerinin orijinal görünümü benzetilebilmektedir. [5]'de beş farklı dijital renk onarım tekniği sunulmuştur: örnek ortalama eşleştirme, doğrusal yaklaşım, yinelemeli en yakın nokta yaklaşımı, beyaz nokta dönüşümü, RBF (Radyal Taban Fonksiyonu) yaklaşımı. Sonuçlar tatmin edici iyileştirmelerin elde edilebileceğini göstermektedir.

Duvar resimleri Kapadokya bölgesinde de yaygın olarak bulunmaktadır. Bu duvar resimlerinin neredeyse tamamı erken Hristiyanlık dönemine aittir. Bölgedeki antik duvar resimleri zamanla bozulma ve yok olma sorunlarıyla karşı karşıya kalmıştır. Sorunlar arasında su kaynaklı bozulmalar, vandalizm, ateş kaynaklı is, liken veya mantar gelişmesi gibi çeşitli biyolojik sorunlar yer almaktadır [6]. Aşındırıcı etkiler kaya üzerindeki eserin görünümünü zamanla bozar. Bu sorunlar resimleri aşındırır ve antik duvar resimlerinin büyük

bölümünü incelemek ve kaydetmek mümkün olmaz. Bu durum, paha biçilemez eserlerin "belirsiz" içerikli olarak arşivlenmesine neden olur. Dijital görüntü işleme teknikleri, sanat tarihçileri ve arkeologlar tarafından kaya oyma yapılarındaki duvar resimlerini incelemek, iyileştirmek ve daha iyi anlamak için kullanılmaktadır.

Erken Hristiyanlığa ait antik duvar resimleri paha biçilmez resimlerdir. Kapadokya'da kayalara oyulmuş mağaralarda bunlardan binlercesi bulunmaktadır ve hemen hemen hepsi korunmasız ve doğal aşınmaya karşı savunmasızdır. Doğal aşınma etkileri sonucunda bu paha biçilmez duvar resimlerinde zamanla renk bozulması, çatlaklar, eklenen ekstra katmanlar meydana gelmektedir. Duvar resimlerini onarmak ve korumak, geçmişten bize taşıdığı mesaj ile ne anlattığını anlamak ve geleceğe taşımak için önemlidir. Fiziksel onarım süreci geri döndürülemez bir süreçtir, zaman ve emek gerektirir. Onarım sürecinden önce onarıcılara yardımcı olmak için görüntü işleme tekniklerini kullanmak mümkündür. Görüntü işleme tekniklerinin yardımıyla onarımdan önce onarıcı, renk değişimi, çatlak, bozukluk bilgilerine göre onarım sürecini tasarlayabilir [7].

2. Antik Duvar Resimleri İçin Sanal Onarım Yöntemleri

Sanal onarım işleminde, klasik yöntemlerle elde edilen dijital görüntüler üzerinde ilk adım olarak sınıflandırma, bölütleme ve etiketleme yöntemleri kullanılarak görüntü onarımına hazır hale getirilmektedir. Ardından komşu piksellerden yola çıkarak ya da benzer duvar resimleri ile eğitilmiş yapay sinir ağlarından yararlanarak renk iyileştirmesi veya doku sentezi işlemi yapılmakta ve hasarlı alana uygulanmaktadır. Burada sentezlenen yeni dokular bilgisayarlı görü yardımı ile elde edilen bir tahmin edilen dokudan ibarettir ve başarımı seçilen metotlara bağlıdır.

Antik duvar resimlerini sanal olarak onarmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Yıpranmış duvar resminin eksik parçaları sanal görüntü tamamlama yöntemi kullanılarak tespit edilebilmekte ve bu yöntem için yapay zekâ desteği de kullanılabilmektedir. Duvar resminin soluk olduğu durumlarda renk zenginleştirme ve detay zenginleştirme işlemleri uygulanabilmektedir. Duvar resimlerindeki çatlaklar görüntü işleme teknikleriyle tespit edilebilmekte ve bu çatlaklar sanal olarak onarılabilmektedir. Sanal onarım yöntemleri Şekil-1'de gösterilmiştir.



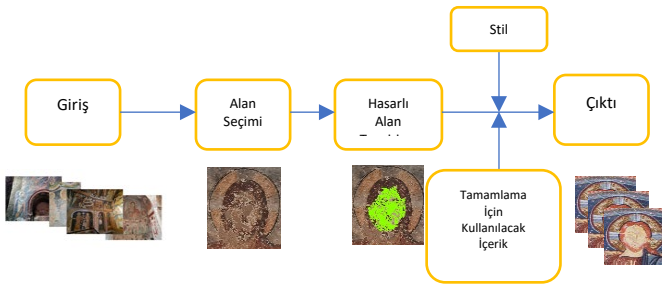
Şekil-1: Sanal Onarım Yöntemleri

2.1 Antik Duvar Resimlerindeki Eksik Parçaların Dijital Yöntemlerle Tamamlanması

Zamanla çatlamış veya fiziksel olarak hasar görmüş paha biçilmez antik duvar resimleri görüntü tamamlama yöntemi

ile tahribatsız bir şekilde tamamlanabilmektedir. Eksik alanların tamamlanması oldukça ilginç bir alandır.

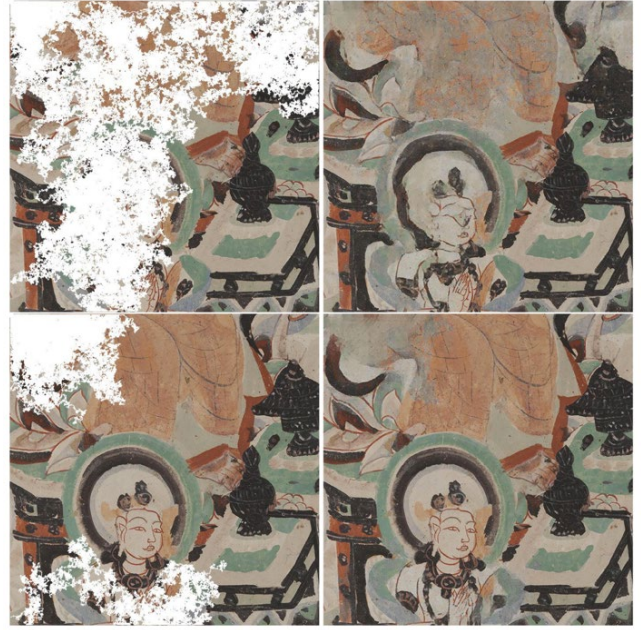
Şekil-2'de tipik bir hasarlı duvar resmi için görüntü tamamlama ile dijital onarım işleminin temel kuramı gösterilmektedir. Görüntü tamamlama işlemlerinde genellikle hasarlı resmin belirli bir alanı seçilerek onarım yapılır. Bunun için görüntüyü bölütlemeye gerekmektedir. Görüntü bölütleme, kenar birleşimlerini algılayarak ve bunları bölerek onarılacak bölgeyi tamamlar, böylece görüntü bilgisi yanlış şekilde yayılmaz. Daha sonra hasarlı duvar resmiindeki hasarlı bölgeler etiketlenir. Etiketlenen alanların en doğru şekilde tamamlanabilmeleri için derin öğrenme teknolojileri kullanılmaktadır. Bunun için ağ binlerce benzer duvar resmi ile eğitilir. Ağ daha sonra eksik parça verilerek tamamlaması istenir. İyi eğitilmiş ağlar, başarılı sonuçlar üretmektedirler [8].



Şekil-2: Tipik bir görüntü tamamlama ile dijital onarım süreci

[9]'da üretken çatışmacı ağ kullanan yeni bir algoritma geliştirilmiş ve görüntü tamamlama için kullanılmıştır. Kontrollü deney sonuçları başarılı olmuştur ve Şekil-3'te gösterilmektedir. Şekilde iki farklı tür bozulma içeren görselde resim tamamlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Üstteki resimde şeklin yüz kısmı yapay olarak bozulmuş iken alttaki resimde daha az miktarda ve kritik öneme sahip olmayan alanlarda yapay bozulmalar mevcuttur. Çalışmada ele alınan resim tamamlama yöntemi her iki tür bozulma için denenmiştir. Görsellerin sağ tarafında yer alan onarılmış görüntüler incelendiğinde uygulamanın ayrıntılı iyileştirme konusunda yetersiz kaldığı, yüz ayrıntılarında istenen düzeyde iyileştirme sağlayamadığı görülmektedir. Yüz tamamlama konusu halen görüntü tamamlama çalışmaları kapsamında zorlu bir görevdir.

Antik duvar resimleri, arkeologların ve sanat tarihçilerinin tarihi ve sanatı daha iyi anlamalarına yardımcı olan değerli bir kültürel mirastır. Ne yazık ki, antik duvar resimlerinin çoğu çatlama, bozulma ve dökülme nedeniyle tahrip olmuştur. Özellikle Kapadokya bölgesinde, fresklerin dökülmesi antik duvar resimlerinde en sık görülen hasar sorunlarından biridir. Mekanik ve yaşa bağlı pullanmalar, fresklerin yüzey veya alt katmanlarındaki boşluklarda ortaya çıkabilmektedir. [10]'da derin evrişimli sinir ağı (CNN) kullanan yeni bir görüntü tamamlama sistemi sunulmuştur. Sistem, onarılmış antik resmin fiziksel bir onarımdan sonra nasıl görünebileceğini göstermeye yardımcı olabilecek yama önerileri sunma yeteneğine sahiptir.



Şekil-3: Farklı bozulma simülasyonları altında aynı sahne için önerilen görüntü tamamlama yönteminin [9] sonuçları. Soldaki görüntülerde iki farklı bozulma simülasyonu bulunmaktadır. Sağ tarafta, önerilen yöntemin sonucu gösterilmektedir.

Kayaların yüzeyinde bulunan antik duvar resimlerinin çoğu zamanla büyük ölçekli dökülmelere maruz kalmakta ve bunun ötesinde, görüntülerin bazı kısımları tahrip olmaktadır. Bu durumlarda, antik görüntünün yeniden boyanması sanatçılar için zorlu bir görevdir. Resimlerdeki eksik alanların doldurulması, modern dijital görüntü işleme teknikleriyle de yapılabilmektedir. [11]'da büyük sürekli boşlukların tamamlanması için Kalan Toplama Modülü (RGM) ve Yarı U-Net görüntü çeviri mimarisi kullanılmıştır. [11]'da benzer resimlerle eğitilen sinir ağları kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. [12]'de, derin öğrenmeye dayalı görüntü yeniden boyama yöntemleri incelenmiştir. [12]'e göre, yüksek çözünürlüklü görüntüleri yeniden boyamak hala zorlu bir işlemdir.

[13]'de renk kontrastı geliştirme ve boşluk dokusu sentezi kullanan yeni bir teknik, antik duvar resimlerinin sanal onarımı için kullanılmıştır. Doğunluk ve doğunluk gidermeye dayalı renk kontrastı geliştirme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Markov Rastgele Alan (MRF) modelini kullanan yeni bir yama yöntemi önerilmiştir. Sonuçlar Şekil 4'te gösterilmektedir, önerilen yöntem başarılı yamalama sonuçları sergilemiştir. Üstte yer alan deforme olmuş görsel altta yer alan görselde görüldüğü üzere sanal olarak onarılmıştır. Onarım için öncelikle bozulmuş alanlar tespit edilmiş, daha sonra bu alanlara komşu alanlardaki pikseller analiz edilmiş ve daha sonra bozulmuş alan ile en uyumlu şekilde yeni doku Markov Rastgele Alan (MRF) yöntemi kullanılarak sentezlenmiş ve bölgeye yamalanmıştır. Önerilen yöntem komşu beneklerden yama üretmeye uygun olan karmaşık olmayan yama görevlerinde başarılı olmuştur.



(a)



(b)

Şekil-4: Görüntü yamalama yönteminin sonuçları. (a) Orijinal Görüntü (b) Yama uygulanmış görüntü [13].

Antik duvar resimlerindeki eksik alanların tamamlanması özellikle ayrıntılı ve karmaşık çizimlerde son derece zorlu bir görevdir. Genel bölgesel özellik çıkarma ve yapısal bilgi rehberliği kullanılarak geliştirilen sanal onarım ağı [14]'de karmaşık içerikli eksik parçalı duvar resimlerinde resim tamamlama amacıyla kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları literatürde bilinen en iyi yöntemlerle kıyaslanmıştır. Bunun için benzetilmiş bozulmalar ile gerçek bozulmalar araştırmaya konu edilmiştir. Hem nesnel hem de öznel analiz sonuçlarına göre çalışma başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Görüntü tamamlama yöntemi ile antik duvar resimlerinin iyileştirilmesinde ortaya çıkan sonucun başarımını ölçmek için [15]'de yenilikçi bir yaklaşım olarak referanssız bir nesnel analiz yöntemi olan hasar analiz oranı yöntemi kullanılmıştır. Bunun için hasar görmüş olan duvar resimlerinin, sanal onarım öncesi hasar görmüş bölgeleri işaretlenmiş, daha sonra tutarlı transfer yöntemi ile görüntüde tamamlama yapılmıştır. Son olarak sonuç görüntüsü ile sanal onarım öncesi görüntü karşılıklı olarak analize tabii tutulmuş ve hasar oranındaki değişim incelenmiştir. Örneğin seçili bir görseldeki sanal onarım öncesi bozulma oranı başlangıçta 0,35 olarak ölçülmüşken resim tamamlama sonrası bu oran 0,08'e kadar düşmüştür [15]. Sonuçlar hem çalışmada kullanılan tamamlama yönteminin başarılı olduğunu göstermiş hem de hasar oranındaki değişimin resim tamamlama çalışmalarında bir kalite analiz yöntemi olarak kullanılabileceğine dair bulgular vermiştir.

Değiştirilmiş U-Net mimarisi [16]'de hasarlı duvar resimlerinin tamamlanması için kullanılmıştır. Araştırmada otomatik hasar tanımlama ve otomatik tamamlama yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Toplamda 245 adet temiz ve 42 adet hasarlı görsel araştırmaya konu edilmiştir. Öznel analiz sonuçlarına göre araştırma resim tamamlama konusunda başarılı sonuçlar üretmiştir.

Çekişmeli kenar öğrenimi tabanlı duvar resmi onarım tekniği [17]'de ele alınmıştır. Çalışmada sınır üretim ağı ve resim tamamlama ağı birlikte kullanılmıştır. Toplamda 239 adet antik duvar resmi ile sınır ağı eğitilmiştir. Çalışmanın iyileştirilmiş sonuç görselleri tepe işaret/gürültü oranı (PSNR)'de %1,3 ve yapısal benzerlik indeksi (SSIM)'de %1,43 artış elde etmiştir.

Yenilikçi bir çekişmeli üretici ağı tabanlı sanal onarım yöntemi [18]'de antik duvar resimlerinin onarımı için kullanılmıştır. Çalışmada düzenlenmiş U-Net mimarisi ve milyonlarca ImageNet görseli ile eğitilmiş ön eğitilmiş kalıntı ağlar kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları PSNR, ortalama karesel hata (MSE) ve SSIM parametreleri açısından incelenmiştir, elde edilen bulgulara göre çalışma tüm parametrelere göre başarılı iyileştirme sonuçları elde etmiştir.

Görüntü tamamlama çalışmalarında yapay sinir ağının eğitimi için sıklıkla kullanılan veri setleri Çizelge-1'de sunulmuştur.

Çizelge-1: Görüntü Tamamlamada Sıklıkla Kullanılan Veri Setleri

Veri Seti	Yayıncı
ImageNet [19]	Stanford Üniversitesi
Places2 [20]	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
CelebA [21]	Hong Kong Chinese Üniversitesi
Paris Street View [22]	Carnegie Mellon Üniversitesi, Google
CMP façade [23]	Çek Teknik Üniversitesi
DTD [24]	Oxford Üniversitesi

2.2 Renk İyileştirme ve Ayrıntı Artırma

ImageJ, Java tabanlı görüntü işleme programıdır ve DStretch, ImageJ için özel olarak geliştirilmiş bir eklentidir. DStretch, özellikle soluk kaya resim sanatı görüntüleri ve antik duvar resimlerinin görüntü ve renk kalitesini artırmak için tasarlanmıştır. DStretch'in akademik amaçlar için yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. DStretch, kaya resim sanatı görüntülerinin kaydedilmesinde başarılıdır [25]. [26]'de DStretch farklı kaya resim sanatı görüntüleri için sınanmış, programın başarımı araştırılmış ve diğer görüntü geliştirme programlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, DStretch'in fiyat/fayda oranı açısından en iyisi olduğunu göstermektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil-5: DStretch'in başarımı (a) Orijinal kaya görüntüsü (b) Kullanıcı tarafından oluşturulan renk uzayında (LDS) Dekorelasyon yapılması (c) Kırmızı renk geliştirilmiş görüntü [25].

Şekil 5'te DStretch ile iyileştirilmiş kaya sanatı motifleri gösterilmektedir. Şekil 5.a'da orijinal ve işlem görmemiş görsel yer almakta iken, Şekil 5.b'de DStretch için özel olarak geliştirilmiş olan LDS renk uzayında ilişkisizleştirilmiş görsel yer almaktadır. DStretch tekniği, görüntünün renklerine Karhunen-Loeve dönüşümünün uygulanmasından oluşur. Bu, renklerin kovaryans (veya isteğe göre korelasyon) matrisini köşegenleştirir. Daha sonra her bir rengin kontrastı, renk farklılıklarını eşitleyecek şekilde genişletilir. Bu noktada renkler birbiriyle ilişkili değildir ve renk uzayını doldurur. Son olarak ters dönüşüm, renkleri orijinalin yaklaşık değerine geri döndürmek için kullanılır. Görüntü RGB(Mavi, Yeşil, Kırmızı)'den LDS renk uzayına dönüştürülür, hesaplama ve dönüşüm gerçekleştirilir ve daha sonra renkler dijital görüntüye yazılmadan önce tekrar RGB'ye dönüştürülür [25]. Nihai olarak Şekil 5.a'da çıplak gözle görülemeyen detaylar Şekil 5.c'de kırmızı ile vurgulanarak gösterilmiştir.

Günümüzde neredeyse tüm antik duvar resimleri zamana bağlı fiziksel aşınmalar nedeniyle solmuş ve hasar görmüştür. Analizden önce bunları görünür hale getirmek önemlidir. Bu amaçla Photoshop kullanılabilir. Adobe Photoshop™ solmuş duvar resimlerinin iyileştirilmesi için kullanılmaktadır [27]. Makalede Lab (Renk modeli, L: Işık, a: Kırmızı/Yeşil Değeri, b: Mavi/Sarı değeri) ve CMYK (Renk modeli, Cyan, Magenta, Yellow, Key kelimelerinin baş harflerinden oluşmuştur) gibi farklı renk uzayları ve farklı renk kanalları incelenmiştir. Sonuçlar, Photoshop yardımıyla duvar resimleri

üzerinde dijital görüntü işlemenin başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

[28]'de Photoshop ve DStretch yazılımları antik duvar resimlerini analiz etmek için kullanılmıştır. Dijital görüntü işleme teknikleri, çıplak gözle görülmesi zor olan soluk görüntülerin ayrıntılarını belirginleştirmede yararlı olmuştur. Sonuçlar hem Photoshop hem de DStretch'in soluk antik duvar resimlerinin ayrıntılarını iyileştirmede büyük yeteneklere sahip olduğunu göstermektedir.

Duvar resimlerinin görselliğini görüntü işleme tekniklerinin yardımıyla geliştirmek mümkündür. [29]'de, Temel Bileşenler Analizi, K-ortalamları ve İlişkisizleştirici Germe teknikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, duvar resimlerini geliştirmek için tek bir çözüm olmadığı, her tekniğin farklı sonuçlar sağladığı belirlenmiştir. Şekil 6.a'da ham kaya görüntüsü yer almaktadır. Şekil 6.b'de "Tek Bir Bileşenden Seçici Değer Yoğunlaştırması" (SIVC) yöntemi ile iyileştirilmiş görüntü bulunmaktadır. Burada ham görüntüde çıplak gözle iyi seçilemeyen çeşitli hayvan şekilleri turuncuya yakın bir renk ile görülmektedir. Nihai olarak Şekil 6.c'de renk eşleştirilmesi değiştirilmiş ve görüntüsü giderilmiş görsel bulunmaktadır. Nihai görselde açıkça çıplak gözle çok zor görülen şekiller kırmızı olarak görülebilir hale gelmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil-6: (a) Kaya sanatının orto-görüntüsü (b) Önerilen Algoritmanın uygulanması (c) Sınıflandırma ve atama süreciyle elde edilen görüntü [29].

Derin öğrenme algoritmalarının antik duvar resimlerinin renk onarımı için başarılı sonuçlar ürettiği bilinmektedir. [8]'da derin öğrenme algoritmalarından olan DenseNet algoritması duvar resminin soluk renklerinin onarılması için kullanılmıştır. Araştırmada 60 adet duvar resmi eğitim için kullanılmıştır.

Araştırma sonuçları SegNet, Deeplab ve ResNet algoritmalarının sonuçları, yapısal benzerlik indeksi (SSIM) ve zamansal verimlilik parametreleri açısından kıyaslanmıştır. DenseNet %44,62 daha hızlı sonuç üretirken benzerlik indeksi açısından da %1,289 ile en iyi sonucu elde etmiştir.

Antik duvar resimlerinin yıllar içerisinde maruz kaldığı bir diğer etki ise duman isidir. İş nedeniyle duvar resimlerinde kararmalar oluşmaktadır. İş tabakasını mükemmel bir biçimde temizleyecek bir onarım aracı bulunmamaktadır. Ancak görüntü işleme tabanlı yaklaşımlar isli duvar resimlerinin üzerindeki siyah katmanı kaldırma konusunda başarılı sonuçlar üretmektedir. Araştırmacılar [30]'da isli duvar resimlerinin sanal onarımı için hiperspektral görüntülerden ve ikiz renk zayıflatma yönteminden yararlanmışlardır. Bunun için öncelikle hiperspektral veri kümesinden yansıma verileri (R) oluşturulmuştur.

$$R = \frac{R_{ham} - R_{karanlık}}{R_{beyaz} - R_{karanlık}} \times 99\% \quad (1)$$

Burada R yansımayı, R_{ham} hiperspektral veri setini, $R_{karanlık}$ karanlık veri setini, R_{beyaz} ise %99 yansıtma değerine sahip standart yansıtıcı bileşeni ifade etmektedir. Çalışmanın nesnel analizi için ortalama gradyan, varyans ve entropi yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma literatürdeki benzer çalışmalardan yüksek başarımla sergilemiştir ve isli duvar resimlerinin üzerindeki kararmış tabakanın giderilmesinde görece başarılı olmuştur [30].

Hiperspektral görüntüleme teknolojisi sayesinde duvar resimleri herhangi bir tahribata maruz kalmadan analiz ve dijital olarak onarabilmektedir. [31]'de hiperspektral görüntüleme yardımı ile aralığı 377,45 nm ila 1033,10 nm arasında değişen toplam 18 adet hiperspektral görüntü kullanılarak görüntü iyileştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada pigment analizi, Retinex destekli sanal onarım adımları uygulanmıştır. Çalışmanın öznel analizi başarılı sonuçlar gösterirken, literatürdeki diğer çalışmalar ile öznel bir kıyaslama yapılmamış olması bir eksiklik olarak öne çıkmaktadır.

Sinir ağları, [32]'de duvar resimlerinin renklerinin iyileştirilmesi konusunda kullanılmıştır. Çalışmada derin öğrenme teknolojilerinden geri dönüşebilir artık ağ (RRN) kullanılmıştır. Öncelikle çalışmaya konu olan renkleri solmuş duvar resmi için yapısal ve dokusal benzerlik değeri oluşturulmakta, daha sonra duvar resmi veri tabanında bu resme yapısal ve dokusal anlamda en çok benzeyen daha iyi durumdaki görsel seçilmektedir. Ardından iyi durumdaki görselden yararlanarak soluk renkli görsel geri dönüşebilir artık ağ yardımı ile renk açısından iyileştirilmektedir. Çalışma sonucunda elde edilen iyileştirilmiş görüntü yapısal benzerlik indeksi (SSIM), özellik benzerlik indeksi (FSIM) ve algıya dayalı görsel kalite değerlendiricisi (PIQE) parametreleri ile incelenmiştir, çalışma üç parametre için ortalama %8,47 oranında iyileşme sağlamıştır.

2.3 Duvar Resimlerindeki Çatlakların Sanal Onarımı

Antik duvar resimlerinin çoğunda çatlak sorunu söz konusudur. Antik duvar resimlerinin görünür katmanı zamanla çatlaklar. Bu çatlakları tespit etmek ve onarmak için dijital görüntü işleme teknikleri kullanılmaktadır. [33]'de resimlerin çatlak onarımı için yeni bir yöntem sunulmuştur. Sonuçlar, önerilen tekniğin (yerel minimumları tespit etme ve silindiri şapka dönüşümünü kullanma) resimlerin çatlaklarını tespit etme ve onarma konusunda başarılı olduğunu göstermektedir.

Kaya çatlaklarının analizi, oluşum nedenini belirleme ve çatlakların yönünü analiz etme gibi önemli konular hakkında bilgi sağlayabilmektedir. Kaya çatlaklarının haritalanması, kaya mühendisliği uygulamaları için olmazsa olmazdır. Kaya çatlaklarını dijital görüntü işleme teknikleriyle izlemek mümkündür ve başarılı sonuçlar üretir [34]. Kırık haritaları sayesinde kaya mekaniği ve jeoloji hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Kaya çatlaklarını analiz etmek için kenar tespiti ve kümeleme yöntemleri kullanılmaktadır. [35]'de destek vektör makinesi (SVM) yardımıyla kaya kırığı tespiti için yeni bir metodoloji sunulmuştur, sonuçlar metodolojinin çatlak tespitinde yetenekli olduğunu göstermektedir.

Antik duvar resimlerinin uzun yıllar içerisinde yüzeyinde çok sayıda çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlakların bir kısmı doğal nedenlerle bir kısmı da vandalizm sonucu meydana gelmektedir. Çiziklerin bilgisayarlı gözü ile tespit edilmesi ve onarılması zorlu bir görevdir, zira duvar resminin yapısında bulunan düz çizgiler ile sonradan oluşan çizgiler birbirine kolaylıklar karışmaktadır. Bu durumun üstesinden gelebilmek için [36]'da yazarlar hiperspektral görüntüleme ile yararlanmışlardır. Çalışmada, hiperspektral görüntüye sırayla; yansıma düzeltme işlemi, temel bileşen analizi ve yüksek geçiren filtre yardımı ile veri iyileştirme işlemi, daha sonra sanal onarım öncesi "otsu sınıflandırması" yardımı ile maskeleme işlemi gerçekleştirilmekte, nihai olarak yenilikçi bir örnekleme tabanlı bölgesel görsel tamamlama metodu ile sanal onarım uygulanmaktadır. Çalışmanın sanal onarım başarımının nesnel analizi için kök ortalama karesel hata (RMSE) ve tepe işaret-gürültü oranı (PSNR) yöntemleri kullanılmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_i - f(x_i))^2} \quad (2)$$

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{255}{RMSE} \quad (3)$$

Burada Y_i ifadesi onarılmış görselin piksel değerini, $f(x_i)$ ise orijinal simüle edilmiş görselin benek değerini ifade etmekte, N ise gözlem sayısını belirtmektedir. Çalışma hem RMSE hem de PSNR verileri açısından literatürde bilinen başarılı çalışmalardan üstün başarımla sergilemiştir [36].

Kapadokya bölgesinde çok sayıda kaya oyma mağara bulunmaktadır. Bu mağaraların bir kısmı Roma döneminde kilise olarak kullanılmıştır. Bu yapıların oyulduğu tüfler zamanla yıpranmakta ve parçalanmaktadır. Yapıdaki çatlaklar bazen yapının tamamen çökeceğinin habercisi olabilmektedir. Bu çatlakların incelenmesi, olası bir çökme durumunda yapıların korunması ve insanların zarar görmesini önlemek için koruma planlarının geliştirilmesi açısından önemlidir. [37]'de Kapadokya bölgesinde kayaların çatlaması ve yıpranması konusu detaylıca incelenmiştir.

Kapadokya bölgesinde erken Hristiyanlık dönemine ait çok sayıda antik duvar resmi bulunmaktadır. Dönemin antik sanatçıları tarafından kaya oyma mağaraların iç duvarlarına çizilen duvar resimleri, zamanın yıkıcı tahribatına uğramış önemli kültürel miraslar arasında yer almaktadır. Fresklerde zamanla çatlaklar ve fiziksel darbelerden kaynaklanan büyük ölçekli tahribatlar bulunmaktadır. Fresklerin fiziksel olarak onarılması geri döndürülemez bir işlemdir. Bu işlemde önce, dijital görüntü işleme tekniklerinin yardımıyla ön bir görüntü geliştirme yapılabilir. [38]'de 1432 tarihli antik bir yağlıboya tabloda üst katmandaki çatlaklar belirlemiş, bu çatlaklar mümkün olduğunca doğru bir şekilde dijital olarak boyanmış ve son olarak sanal olarak onarılmıştır. Fırça darbelerini tablonun yüzeyindeki yaşlanma çatlaklarından ayırt etmek önemlidir, çünkü genellikle dijital görüntüleme teknikleri bu çatlakların tespitinde karışıklığa yol açabilmektedir. Duvar resimlerinde yüzey çatlaklarının tam olarak tespiti zorlu bir işlemdir. Bu makalede [38], çatlak tespit sürecini en doğru şekilde gerçekleştirmek ve fırça darbelerini çatlaklardan ayırmak için HSV (Hue, saturation, value) renk uzayı kullanılmış, ardından sıra istatistikleri filtrelemesi kullanılarak boyanmıştır. Ayrıca, evrişimli sinir ağlarının (CNN) boyama çatlaklarının tespiti için kullanılabileceği ve sonuçların başarılı olduğu bilinmektedir [39].

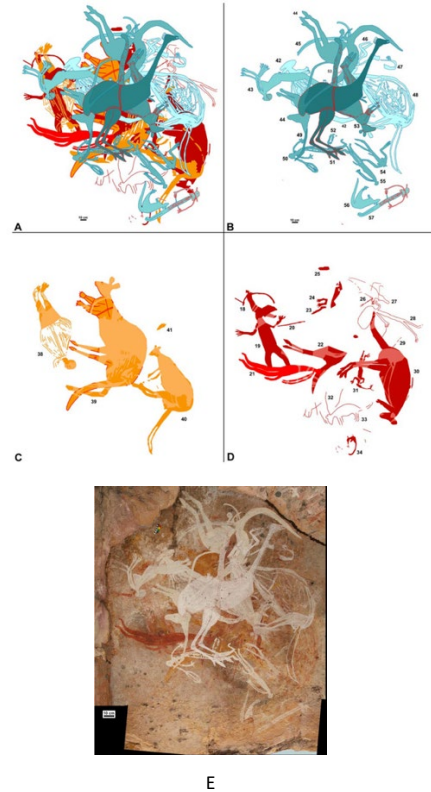
3. Sanal Onarım Öncesi Dijital Görüntü İşleme Teknikleri

Bazı durumlarda sanal onarımdan önce antik duvar resimlerinin hazırlanması gerekir. Bu hazırlık ve analiz sürecinde dijital görüntü işleme teknikleri kullanılmaktadır. Sağlanan ön hazırlık desteğiyle daha verimli bir sanal onarım süreci gerçekleştirilebilmektedir. Üst üste bindirilmiş motiflerden oluşan duvar resimleri katmanlara ayrılarak analiz edilebilmektedir. UV (ultraviyole) görüntüleme yardımıyla boyamada kullanılan boyaların biyolojik bozulma kaynakları tespit edilebilmekte ve malzeme analizi yapılabilir. Antik duvar resimleri bilgisayarlar kullanılarak arşivlenebilmektedir.

3.1 Üst Üste Binen Motiflerin Birbirinden İzole Edilmesi

Üst üste bindirilmiş motiflerin analizi, kaya resim sanatında zorlu bir araştırma alanıdır. Antik sanatçılar zaman içerisinde motiflerini önceki motiflerin görünür yüzeylerine çizmişlerdir. Dijital görüntü işleme tekniklerinin yardımıyla, üst üste bindirilmiş katmanlardaki motifler analiz edilebilmektedir. Bu makalede [40], Adobe Photoshop®'un D-Stretch ve PTGUI® (Panorama Araçları Grafik Kullanıcı Arayüzü) eklentisi, soluk

duvar resimlerini görünür hale getirmek, herhangi bir tek motifi izole etmek ve üst üste bindirilmiş görüntüleri analiz etmek için kullanılmıştır. Önerilen yöntem, üst üste bindirilmiş motiflerin izolasyonunda başarılı bir başarımla göstermiştir. Sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7.a'da yer alan DStretch ve PTGUI kullanılarak üretilmiş fotomozaiik, Şekil 7.e'de yer alan ham fotoğraftan elde edilmiştir. Bu mozaikte farklı katmanlardaki resimler farklı renklerle vurgulanmıştır. Ardından Photoshop programı yardımı ile farklı katmanlardaki motifler ayrı katmanlar halinde izole edilmiştir (Şekil 7.b, Şekil 7.c, Şekil 7.d). Orijinal görselde üst üste binmiş oldukları için analizi ve yorumlanması zor olan görseller dijital görüntü işleme programları yardımı ile izole edilmişlerdir.

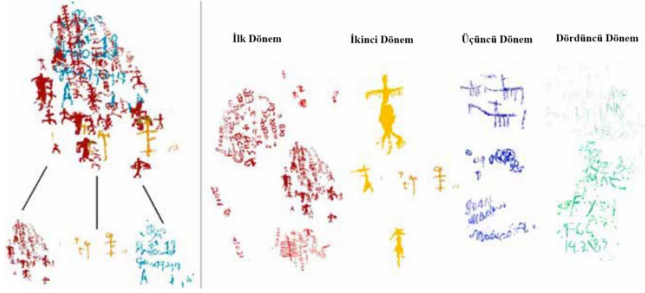


Şekil-7: D-Stretch ve PTGUI eklentilerinin sonuçları. A: Tam kompozisyon (Fotomozaiik) B: Mavi renkli şekil katmanı C: Sarı renkli şekil katmanı D: Kırmızı renkli şekil katmanı E: Ham fotoğraf [40].

Fotogrametri, makro fotoğrafçılık ve dijitalleştirilmiş duvar resimlerinin korelasyonsuzlaştırma uygulamalarının birleşimi, paleolitik kaya sanatının görsel analizinde iyi bir başarımla göstermektedir [41]. Dijital görüntü işleme teknikleri, büyük ve hareketsiz kaya yüzeyleri üzerine dekore edilmiş antik duvar resimlerinin mikro analizlerinde (tarihleme, karakterizasyon, topografya, bağlam) kullanılmaktadır. Bu yeni tekniklerin kullanımı, araştırmacıların üst üste bindirilmiş veya solmuş duvar resimlerinde bulunan yeni figürleri keşfetmelerine yardımcı olmaktadır.

Görüntü işleme teknikleri kaya oyma motiflerin analizi için de kullanılmaktadır. [42]'de araştırmacılar üst üste binmiş kaya motiflerinin analizi için Photoshop desteği ile DStretch aracını kullanmışlardır. Araştırmada normalde duvar resimleri için kullanılan DStretch'in Photoshop yardımı ile kaya oyma motifleri de analiz edilebileceği gösterilmiştir. Çalışmada elde

edilen neticelere göre kaya üzerine üst üste binecek şekilde çizilen motifler yapıldıkları döneme göre sınıflandırılabilen iken önerilen teknik sayesinde bugüne kadar çıplak gözle görülemeyen toplam 14 adet yeni kaya oyma figür tespit edilmiştir. Şekil 8'de araştırma kapsamında gerçekleştirilen bir sonuç görseli yer almaktadır. Görselde farklı zamansal yıpranma etkilerine maruz kalmış figürler farklı renklerle belirtilmiştir. Sıcak renkler daha yakın dönemi ifade ederken soğuklar daha uzak dönemi belirtmektedir.



Şekil-8: Solda üst üste binecek şekilde çizilmiş kaya oyma motiflerin [42] sayılı çalışma kapsamında bilgisayarda işlenmiş ve renklendirilmiş hali görünmektedir. Sağda ise farklı zaman dönemlerinde çizilmiş figürler birbirinden ayrılarak gösterilmiştir.

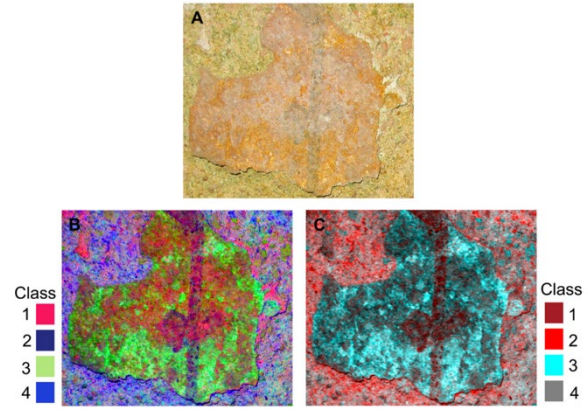
Bilgisayarların hesaplama gücü son zamanlarda artmıştır. Artan hesaplama gücünün de yardımıyla bilgisayarlar görüntü işleme tekniklerinde oldukça başarılı sonuçlar üretmektedir. Günümüzde özellikle antik duvar resimleri üzerinde çalışan araştırmacılar sıklıkla dijital görüntü işleme tekniklerinden yararlanmaktadır. Dijital görüntü işleme tekniklerinin yardımıyla kaya üzerindeki görüntü en ince ayrıntısına kadar incelenebilmektedir. Kontrast değiştirme, farklı renk kanalları üzerinde çalışma, kenarları algılama ve görüntüleri üst üste bindirme gibi birçok farklı tekniğin yardımıyla antik duvar resimlerine ilişkin anlayışımız artmaktadır. Dijital görüntü işleme teknikleri temassız analizlerdir ve bu paha biçilmez antik duvar resimleri üzerinde çalıştığımızda daha önemli hale gelmektedir. [43]'de Selva Pascuala'da (Cuenca, İspanya) bir boğaya ait Paleolitik mağara sanatı motifi dijital görüntü işleme teknikleriyle iyileştirilmiş ve izole edilmiştir.

3.2 Antik Duvar Resimlerinde Biyolojik Bozulma Analizi

Biyolojik bozulmanın kaya yüzeylerinde geri döndürülemez hasar etkileri söz konusudur. Biyolojik bozulma antik duvar resimlerinin yok olmasına yol açabilir. Kapadokya bölgesinde likenler kayaların biyolojik bozulmasında kilit rol oynamaktadır. [44]'de, Kapadokya bölgesinde kayadan oyulmuş bir kilise olan Üzümlü Kilisesi, liken kaynaklı biyolojik bozulma açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, farklı likenlerin kaya ile etkileşime girdiğini ve likenlerin varlığının şiddetli fiziksel ve kimyasal bozulmaya yol açtığını göstermektedir.

Kaya resim sanatının biyolojik olarak bozulması, özellikle Kapadokya bölgesinde yaygın bir sanat deformasyonu sorunudur. Bu makalede [45], antik duvar resimlerinin biyolojik olarak bozulması bir laboratuvar modeli ile simüle edilmiştir. Model Roma duvar resimlerine uygulanmıştır. Sonuçlar, dijital görüntü işleme tekniklerinin sanatın biyolojik olarak bozulmuş katmanının arkasındaki ayrıntıları tespit

edebileceğini göstermektedir. Dijital görüntü işleme tekniklerinin temassız yapısı nedeniyle, tarihi duvar resimlerinin koruma süreci için çok önemlidir, en iyi stratejiyi seçmek için bu teknikleri korumadan önce kullanmak gerekmektedir. Şekil 9.a'da önerilen yöntemin uygulandığı ham görsel yer almaktadır. Şeklin ortasında çıplak gözle net görülemeyen bir figür bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu işlenmemiş görsele daha sonra ultraviyole ve gün ışığı uygulanarak elde edilen görseller aracılığı ile ana bileşen analizi (PCA) uygulanmıştır. Azınlık PC bantlarıyla (PC2 ve PC3) karşılık gelenler işlenmiş sahte renkli görüntülerin kullanımı sayesinde görsel üzerindeki bileşenlerin tespiti yapılmaktadır [45]. Resimdeki sıva kalıntıları, betonlaşmalar ya da boyalar ayırt edilebilmektedir.



Şekil-9: [45]'de önerilen dijital görüntü analiz yönteminin sonuçları (A) Orijinal RGB görüntüsü. (B) Sahte renkli görüntü (PC1, PC2, PC3). Sınıflar: [1] Betonlaşma, [2] Yeşil Roma boyası, [3] Sıva, [4] Fototrofik bakteri kaynaklı biyofilm. (C) Sahte renkli görüntü (PC3, PC2, PC1). Sınıflar: [1] Yeşil Roma boyası, [2] Fototrofik bakteri kaynaklı biyofilm, [3] Sıva, [4] Betonlaşma.

3.3 Antik Duvar Resimlerinde Kullanılan Boyama Malzemelerinin Analizi

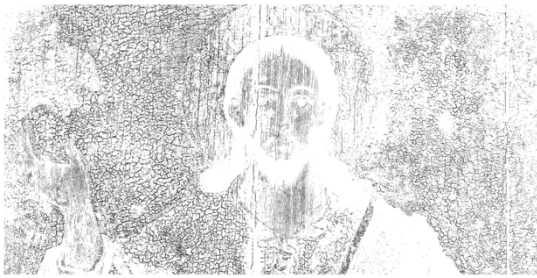
Antik duvar resimlerinde kullanılan tarih öncesi boyalarda hangi tür malzemelerin kullanıldığını belirlemek için PIXE analizi kullanılmaktadır [46]. Çalışmanın sonuçları, homosapiens'in boya üretimi için doğal kaynakları çok iyi kullandığını göstermektedir.

Antik duvar resimlerinin analizi için dijital görüntü işleme tekniklerinin kullanılması önemlidir, bu süreç bize duvar resimlerinin yaşlanma deformasyonu hakkında çok yararlı bilgiler sağlayabilmektedir, örneğin yüzeydeki çatlak çizgileri koruma geçmişi hakkında bilgi vermekte veya bağlayıcı ortam ve pigmentler boyama tekniği hakkında bilgi vermektedir [47]. Çatlak haritasının iyi bir örneği Şekil 9'da gösterilmektedir. Şekil 10.a'da Ressam Teodor Kracun tarafından resmedilmiş yağlı boya tablo yer almaktadır. Tablonun görsel muayenesinde boya tabakasında çeşitli yaşlanma bulguları tespit edilmektedir: ince yaşlanma çatlakları, geniş kuruma çatlakları, boya tabakasının farklı boyutlardaki kayıpları, rötuşlanmış alanlar ve onarım sırasında yüzeyin homojen görünümünü korumak için onarımlar tarafından boyanmış sahte çatlaklar. Şekil 10.b'de bu resmin çatlak haritası dijital görüntü işleme teknikleri yardımı ile oluşturulmuştur ve daha ileri analizler için

kullanılmaktadır. Çatlak çizgilerinin deseni, yönü, genişliği, şekli ve yoğunluğu, o dönemin sanat üretimi ve resmin koruma geçmişi hakkındaki bilgiler verir. Örneğin protein bağlayıcısı içerikli boyalar daha ince ve kare şeklinde yaşlanma çatlaklarına yol açarken, boyadaki yağ bağlayıcısı geniş kuruma çatlaklarına yol açmaktadır.



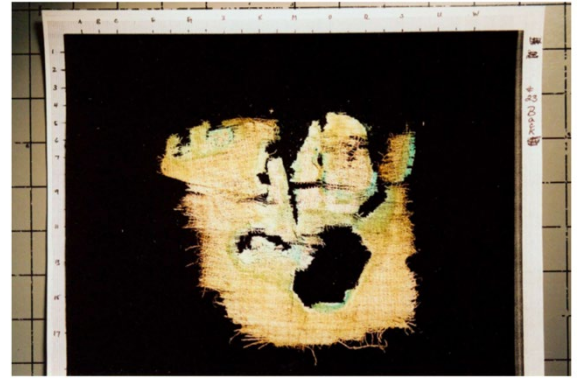
(a)



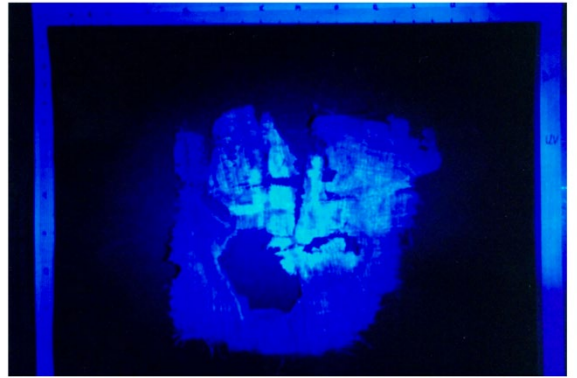
(b)

Şekil-10: (a) Ressam Teodor Kracun tarafından çizilmiş İsa Mesih yağlı boya resmine ait orijinal görüntü (b) [47]'de önerilen yöntemle orijinal görsel üzerinde tespit edilen çatlak haritası

Arkeolojik tekstiller araştırmacılar için oldukça değerli ürünlerdir. Bu tekstil ürünlerinin üretim sırasında ve sonrasında renklendirildiği bilinmektedir. Tekstil ve duvar resimlerinin renklendirilmesinde kullanılan kimyasallar çeşitli tekniklerle belirlenebilmektedir. Yansıyan UV tabanlı fotoğrafçılıkta, tamamen karanlık bir ortamda yüzeyden yansıyan UV ışığı yüzeyden yansıtılarak fotoğraflanmaktadır. Kızılötesi fotoğrafçılıkta ise kızılötesi ışık yüzeye yansıtılmaktadır. Biyolojik maddeler, mineraller ve bazı sanatçı pigmentleri kızılötesi ışık altında yansımaktadır [48]. [49]'da arkeolojik tekstiller gün ışığı ve ultraviyole yansıma yöntemleri ile analiz edilmiş ve uygulanan yöntemlerin sonuçları incelenmiştir. Yansıma yönteminin sonucu Şekil 11'de gösterilmiştir. Şekil 11.a'da orijinal görüntü yer alırken Şekil 11.b'de ultraviyole ışık altında daha parlak yansıma yapan alanlar antik bir motif içermektedir. Işığın yansıma ve emilimindeki farklılıklar, bu alanlardaki farklı kimyasal bileşenlere işaret etmektedir. Böylece kumaş üzerine uygulanan renkli desenin farklı yönleri ortaya çıkarılmaktadır. Bu desenlere dayanarak, örnekleme yapılabilir. Kumaş yüzeyindeki bozulmalar, rastgele ve her yerde bulunan dağılımına rağmen önerilen yöntemle kolayca tanımlanabilmektedir [49].



(a)



(b)

Şekil-11: (a) Ohio'daki Seip Höyüğü'nden tarih öncesi bir tekstil parçası, gün ışığı altında (b) Ultraviyole yansıma görüntüsü [49].

3.4 Antik Duvar Resimlerinin Analizi ve Arşivlenmesi

Antik duvar resimlerinin maruz kaldığı bozulmaların temassız bir biçimde analiz edilmesi duvar resimlerinin tahribatsız muayenesi açısından önemli bir çalışma alanı olarak ortaya çıkmaktadır. [50]'de araştırmacılar akustik emisyon teknolojilerinden yararlanarak antik duvar resimlerindeki bozulmaların çatlama ya da dökülme sınıflarından hangisinde yer aldığını evrimsel sinir ağları yardımı ile %95 oranında doğru tespit etmişlerdir. Gerçek zamanlı ve tahribatsız olarak çalışan sistemde yansıyan ses dalgaları dalgacık dönüşümleri yardımı ile zaman ve frekans bileşenlerine ayrılmaktadır. Çalışmanın dezavantajı ise literatürde var olan benzer çalışmalar ile yeterli karşılaştırmanın bütçesel nedenlerle yapılamamış olmasıdır.

Zamanla yıpranan duvar resimlerinde oluşan çatlakların tespiti için bilgisayarlı görü yöntemleri kullanılmaktadır. [51]'de çatlak tespitinin görüntü işleme yardımı ile otomatik bir şekilde gerçekleştirilmesi için optik darbeli termografi yöntemi ile sinir ağları yöntemi birleştirilerek bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Isıl görüntüleme sayesinde çıplak gözle görülemeyen detaylar tespit edilmektedir. Çalışmada toplam 90 görselden istifade edilmiştir. Araştırmacılar CNN mimarilerinden biri olan U-Net'in örtüşen alanlarda meydana getirdiği gerekli olmayan eğitim verilerini minimize etmek için kendi önerdikleri odaklanmış U-Net mimarisini kullanmışlardır. Çalışma sonucu elde edilen çatlak haritaları literatürdeki başarılı metotlar ile kıyaslanmıştır. Nihai sonuç

olarak elde edilen çatlak haritaları benzerlerinden daha keskin ve gürültüsüzdür. Optik darbeli termografi yöntemi her ne kadar başarılı sonuçlar üretmişse de duvar resimleri üzerinde tahribat oluşturma riski bulunmaktadır [50], [51].

Kaya yüzeylerine yapılmış antik duvar resimlerini arşivlemenin modern yollarından biri onları fotoğraflamaktır [52]. Bu işlem çoklu spektral görüntüleme teknikleriyle de gerçekleştirilebilmektedir. [53]'de Brigham Young Üniversitesi tarafından geliştirilen çoklu spektral görüntüleme sistemi, Golondrinas Kaya Resimlerinde (Guatemala) bulunan duvar resimlerinde kullanılmıştır. Çoklu spektral görüntüleme, temassız koruma yöntemi olması ve çıplak gözle görülemeyecek kadar soluk olan ayrıntıları başarılı bir şekilde geliştirmesi gibi yetenekleriyle oldukça başarılı sonuçlar üretmektedir.

Antik duvar resimlerinin zamanın yıkıcı etkileriyle sürekli olarak bozulması araştırmacılar ve arkeologlar için önemli bir engeldir. Bilgisayar alanındaki son teknolojik gelişmelerin yardımıyla, duvar resimleri kolayca bilgisayara kaydedilebilmekte ve dijital olarak iyileştirilebilmektedir. [54]'de NE Queensland'daki Torres Boğazı bölgesinden antik duvar resimleri dijital olarak kaydedilmiş ve iyileştirilmiştir. [55]'de antik duvar resimlerinde farklı görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, [55]'de herhangi bir dijital teknik işleminden önce insan gözünü daha uyumlu hale getirmek için duvar resimlerinin taslak olarak çizilmesi önerilmektedir.

Müzeler genellikle envanterlerinde antik resimler bulundurmaktadırlar. Bu resimler zamanla deforme olabilmektedir. Dijital görüntüleme, müzelerin resimleri dijital olarak arşivlemesi, gelecekteki deformasyon analizleri ve onarımlar için çok önemli bir araçtır. Görüntülerin arşivlenmesi ve sunumu için geliştirilen görsel sanatlar sistemi (VASARI) projesi, müzeler için dijital bir görüntüleme sistemidir [56]. VASARI, doğrudan müze resimlerinden 20.000x20.000 piksel görüntüler üretmektedir. VASARI proje görüntüleri, resimlerin zaman içindeki değişikliklerini izlemek, onarım sürecine yardımcı olmak için kullanılmaktadır.

M.Ö. 1650'ye tarihlenen ve yaygın olarak bozulmalara sahip görüntülere görüntü kümelemesi ve desen analizi [57]'de uygulanmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin görüntüleri kümelemek ve tarama konularında iyi bir başarıya sahip olduğunu ve ayrıca ilk çizimleri benzetme konusunda iyi bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Sanal onarım sonuçlarının gözlemcilerle daha verimli bir şekilde sunulabilmesi için, bu makalede [58] mobil cihazlar üzerinde çalışan bir artırılmış gerçeklik uygulaması önerilmiştir. Uygulama sayesinde, gözlemciler antik duvar resimlerini gerçek zamanlı olarak ve resimlerin bulundukları yerde ellerindeki mobil cihazlar sayesinde sanal olarak iyileştirilmiş bir şekilde gözlemleyebilmektedirler. Çalışma işlemsel yük verimliliği nedeniyle duvar resminin tamamına değil sadece belirli bir alanının iyileştirilmesine odaklanmıştır. Çalışmanın nesnel analizi PSNR ile gerçekleştirilmiştir. Parametreler, insan gözlemleri ile uyumlu olacak şekilde başarılı neticeler üretmiştir ve çalışmanın bölgesel iyileştirme yaklaşımının daha verimli olduğunu doğrulamıştır.

4. Sonuç

Bu çalışmada antik duvar resimlerinin sanal onarımı üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Antik duvar resimleri içerdikleri paha biçilemez bilgi sayesinde taşınma kültür varlıkları olarak kabul edilmektedirler. Duvarlar resimlerinin oldukları yerde muhafaza edilmelerinin gerekiyor olması onarılmasını zorlaştırmaktadır. Üstelik duvar resimleri üzerinde gerçekleştirilen onarım işlemleri geri döndürülemez işlemler oldukları için hatalı onarım gibi önemli bir risk içermektedirler. Gelişen bilgisayarlı görü teknolojileri sayesinde antik duvar resimleri dijital ortamda onarılabilir. Sanal onarım ile antik duvar resimlerinde herhangi bir tahribata yol açmadan içerdikleri değerli bilgiye erişmek mümkün olabilmekte ve onarım öncesinde onarımlara rehberlik edilmektedir.

Bu çalışmada incelenen çalışmaların kullandıkları sanal onarım yöntemleri Çizelge-2'de ve sanal onarım için kullandıkları metotlar/teknolojiler Çizelge 3'te özetlenmiştir:

Çizelge-2: Kullandıkları Sanal Onarım Yöntemlerine Göre Çalışmalar

Kullanılan Sanal Onarım Yöntemi	Kaynaklar
Arşivleme (Veri Seti Hazırlama)	[1], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58]
Hasarlı Görüntü Analizi ve Hasar Tespiti	[2], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51]
Eksik Görüntü Tamamlama	[2], [3], [9], [10], [11], [13], [14], [15], [16], [17], [18]
Çatlakların Doldurulması	[4], [33], [34], [35], [38]
Renk İyileştirme ve Detay Artırma	[4], [5], [6], [25], [26], [27], [28], [29], [8], [30], [31], [32]
Çatlakların Haritalanması	[36], [38], [39], [51]
Üst Üste Binen Motiflerin Birbirinden İzole Edilmesi	[40], [41], [42], [43]

Çizelge-3: Çalışmalarda Kullanılan Yöntem/Teknoloji Sınıflandırması

Sanal Onarım İçin Kullanılan Metot/Teknoloji	Kaynaklar
En Yakın Komşuya Dayalı Doku Sentezi	[2], [3], [4], [13], [15]
Üretken Çatışmacı Ağ (GAN)	[9], [17], [18]
Evrişimli Sinir Ağı (CNN)	[10], [14], [39], [50]
U-Net	[11], [16], [51]
DStretch ve Photoshop ile Temel Renk İyileştirmeleri, Renk Uzaı Dönüşümleri	[6], [25], [26], [27], [28], [29], [42]
DenseNet	[8]
Hiperspektral Görüntüleme	[30], [31], [36], [53]
Retinex	[31]
RRN	[32]
Ultraviyole Yansıma	[45], [48], [49]

Dijital görüntü işleme tekniklerinin de yardımıyla antik duvar resimlerinin eksik bölgeleri sanal boyama yöntemleri ile başarıyla tamamlanabilmekte, duvar resimlerindeki çatlaklar analiz edilerek sanal olarak başarıyla onarılabilir. Duvar resimlerinde üst üste binen motifler ve kullanılan

boyama malzemeleri başarılı bir şekilde analiz edilebilmektedir. Solmuş duvar resimlerindeki detaylar görünür hale getirilebilmekte, renkler iyileştirilebilmekte ve bilgisayarlar yardımıyla bu değerli kültürel miraslar dijital ortamda arşivlenebilmektedir.

Duvar resimlerinin maruz kaldığı tahribat çeşitlerinin belirlenmesi veya görünür/görünmez çatlakların tespiti için akustik emisyon teknolojisi[50], optik darbeli termografi yöntemi[51] ve hiperspektral görüntülemeye istisna edilmektedir. Bu yöntemler her ne kadar tahribatsız yöntemler olarak bilinse de optik darbeli termografi yöntemi yüksek güç kullanımı durumunda duvar resmine zarar verebilmektedir. Hiperspektral görüntüleme aynı zamanda sanal onarım ve görüntü iyileştirme çalışmalarında da kullanılmaktadır [30], [31], [36]. Resimde görünür aralıkta tespit edilemeyen detaylar bu teknik sayesinde tespit edilebilmektedir. Özellikle resim üzerindeki is tabakasının yalıtılmasında hiperspektral görüntülerden yararlanılmaktadır.

Özellikle resim tamamlama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sanal onarım işlemlerinde derin öğrenme teknikleri ve yapay sinir ağları kullanılmaktadır [14], [16], [18], [8], [32], [50]. Bu çalışmalarda genel olarak bir bütün halinde duvar resminin tamamının yamalanması yerine bölgesel yamalama stratejisi kullanılmaktadır. Resmin bir bütün olarak tamamlandığı çalışmalarda yeterli başarıya ulaşılamamıştır. Resmin tamamlanacak dar bir bölgesi seçilmekte ve bu alandaki eksik kısımlar tespit edilmektedir. Daha sonra orijinal görsele benzer görseller ile eğitilmiş ağlar yardımı ile eksik parçalar kestirilmekte ya da komşu pikseller analiz edilerek eksik parçalar sentezlenmektedir. Resim tamamlama yöntemleri henüz yüz gibi detaylı bölgelerin tamamlanmasında yeterli başarıya ulaşmış değillerdir, resmin karmaşık olmayan bölümlerini ise yeterli düzeyde tamamlayabilmektedirler.

Sanal onarım işlemi sonuçlarının başarımı için nesnel ve öznel analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Öznel analiz için işlem yapılmamış görseller, işlem sonrası görseller ve literatürde iyi bilinen yöntemler ile iyileştirilmiş görseller bir arada sunulmakta ve okuyucunun görsel değerlendirmesine sunulmaktadır. Bu değerlendirme yöntemi kişiden kişiye değişebileceği için karşıt olarak nesnel değerlendirme araçları da kullanılmaktadır. Literatürde sıklıkla PSNR, RMSE, SSIM, FSIM parametreleri sanal onarım kalitesini ölçmek için kullanılmaktadır.

Yapay zekanın desteklediği sanal onarım üzerine yeni araştırmalar özellikle resim tamamlama konusunda başarılı sonuçlar üretmeye başlamıştır. Sanal onarım üzerine yapılan başarılı çalışmalar, bu değerli yöntemin antik duvar resimlerinin onarımı için çok kullanışlı bir araç haline geldiğini göstermektedir. Özellikle büyük ölçekli resimlerde bir bütün olarak eksik parça tamamlama, figürlerin yüz ve el gibi detaylı bölgelerinde hassas tamamlama, is ile kararmış resimlerde is tabakasının orijinal renkleri koruyarak kaldırılması konularında derin öğrenme tekniklerinin de yardımı ile yenilikçi çözümler geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir.

Kaynakça

- [1] Fredlund, G. ve Sundstrom, L. "Digital infra-red photography for recording painted rock art", *Antiquity*, c. 81, sy 313, ss. 733-742, 2007, doi: 10.1017/S0003598X00095697.
- [2] Zeng Y. ve YGong, Y. "Nearest Neighbor based Digital Restoration of Damaged Ancient Chinese Paintings", içinde *2018 IEEE 23rd International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, Kas. 2018, ss. 1-5. doi: 10.1109/ICDSP.2018.8631553.
- [3] Jiang, D., Li, P. ve Xie, H. "Research into Digital Oil Painting Restoration Algorithm Based on Image Acquisition Technology", içinde *2022 International Conference on 3D Immersion, Interaction and Multi-sensory Experiences (ICDIIME)*, Madrid, Spain: IEEE, Haz. 2022, ss. 65-68. doi: 10.1109/ICDIIME56946.2022.00022.
- [4] Nikolaidis N. ve Pitas, I. "Digital image processing in painting restoration and archiving", içinde *Proceedings 2001 International Conference on Image Processing (Cat. No.01CH37205)*, Eki. 2001, ss. 586-589 c.1. doi: 10.1109/ICIP.2001.959084.
- [5] Pappas M. ve Pitas, I. "Digital color restoration of old paintings", *IEEE transactions on image processing: a publication of the IEEE Signal Processing Society*, c. 9, ss. 291-4, Şub. 2000, doi: 10.1109/83.821745.
- [6] David, B. Brayer, J., Mcniven, I. ve Watchman, A. L. , "Why digital enhancement of rock paintings works: Rescaling and saturating colours", *Antiquity*, c. 75, ss. 781-792, Ara. 2015, doi: 10.1017/S0003598X00089286.
- [7] Barni, M., Pelagotti, A. ve Piva, A., "Image processing for the analysis and conservation of paintings: opportunities and challenges", *IEEE Signal Processing Magazine*, c. 22, sy 5, ss. 141-144, Eyl. 2005, doi: 10.1109/MSP.2005.1511835.
- [8] Xu W. ve Fu, Y., "Deep learning algorithm in ancient relics image colour restoration technology", *Multimed Tools Appl*, c. 82, sy 15, ss. 23119-23150, Haz. 2023, doi: 10.1007/s11042-022-14108-z.
- [9] Ciortan, I. M. George, S. ve Hardeberg, J. Y. , "Colour-Balanced Edge-Guided , Digital Inpainting: Applications on Artworks", *Sensors*, c. 21, sy 6, Art. sy 6, Oca. 2021, doi: 10.3390/s21062091.
- [10] Zeng, Y., Gong, Y. ve Zeng, X. "Controllable digital restoration of ancient paintings using convolutional neural network and nearest neighbor", *Pattern Recognition Letters*, c. 133, ss. 158-164, May. 2020, doi: 10.1016/j.patrec.2020.02.033.
- [11] Xiao, Q. Li, G. ve Chen, Q. "Image inpainting network for filling large missing regions using residual gather", *Expert Systems with Applications*, c. 183, s. 115381, Kas. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115381.
- [12] Qin, Z., Zeng, Q. Zong, Y. ve Xu, F. "Image inpainting based on deep learning: A review", *Displays*, c. 69, s. 102028, Eyl. 2021, doi: 10.1016/j.displa.2021.102028.
- [13] Pei, S. C., Zeng, Y. C. ve Chang, C. H. "Virtual restoration of ancient Chinese paintings using color contrast enhancement and lacuna texture synthesis", *IEEE Transactions on Image Processing*, c. 13, sy 3, ss. 416-429, Mar. 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.821347.
- [14] Ge, H. , Yu, Y. ve Zhang, L. "A virtual restoration network of ancient murals via global-local feature extraction and structural information guidance", *Herit Sci*, c. 11, sy 1, s. 264, Ara. 2023, doi: 10.1186/s40494-023-01109-w.
- [15] Tint W. ve Tin, M. M. "Digital Restoration of Ancient Murals: Assessing the Efficacy of Coherent Transport Inpainting with Damage Ratio Analysis", içinde *2024 IEEE Conference on Computer Applications (ICCA)*, Mar. 2024, ss. 1-8. doi: 10.1109/ICCA62361.2024.10532855.

- [16] Singh, U., Maiti, S., Saini, A. ve Dhiraj, "Ancient Indian Murals Digital Restoration through Image InPainting", içinde *2023 10th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Mar. 2023, ss. 635-640. doi: 10.1109/SPIN57001.2023.10116111.
- [17] Yan, Y., Zhang, R., He, H. Lei, T., Zhang, X. ve Jiang, C. "Image Restoration Technology of Tang Dynasty Tomb Murals Using Adversarial Edge Learning", *J. Comput. Cult. Herit.*, c. 17, sy 3, s. 52:1-52:11, Eyl. 2024, doi: 10.1145/3674984.
- [18] Kumar P. ve Gupta, V. "Restoration of damaged artworks based on a generative adversarial network", *Multimed Tools Appl.*, c. 82, sy 26, ss. 40967-40985, Kas. 2023, doi: 10.1007/s11042-023-15222-2.
- [19] Russakovsky ve ark.. O., "ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge", *International Journal of Computer Vision*, c. 115, sy 3, ss. 211-252, Ara. 2015, doi: 10.1007/s11263-015-0816-y.
- [20] Zhou, B., Lapedriza, A., Khosla, A., Oliva, A. ve Torralba, A. "Places: A 10 Million Image Database for Scene Recognition", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, c. 40, sy 6, ss. 1452-1464, Haz. 2018, doi: 10.1109/TPAMI.2017.2723009.
- [21] Liu, Z., Luo, P., Wang, X. ve Tang, X. "Deep Learning Face Attributes in the Wild", içinde *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Ara. 2015, ss. 3730-3738. doi: 10.1109/ICCV.2015.425.
- [22] Doersch, C., Singh, S., Gupta, A., Sivic, J. ve Efros, A. A. "What makes Paris look like Paris?", *ACM Trans. Graph.*, c. 31, sy 4, Tem. 2012, doi: 10.1145/2185520.2185597.
- [23] Tylecek R. ve Sára, R. "patt Pattern Templates for Recognition of Objects with Regular Structure", içinde *Pattern Recognition: 35th German Conference, GCPR 2013, Saarbrücken, Germany, September 3-6, 2013. Proceedings*, Springer, 2013, ss. 364-374. doi: 10.1007/978-3-642-40602-7_39.
- [24] Cimpoi, M., Maji, S., Kokkinos, I., Mohamed, S. ve Vedaldi, A. "Describing Textures in the Wild", içinde *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Haz. 2014, ss. 3606-3613. doi: 10.1109/CVPR.2014.461.
- [25] Harman, J. "Using Decorrelation Stretch to Enhance Rock Art Images", program adı: American Rock Art Research Association Annual Meeting, May. 2005. Erişim: 21 Şubat 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.dstretch.com/AlgorithmDescription.html>
- [26] Le Quellec, J.-L., Duquesnoy, F. ve Defrasne, C. "Digital image enhancement with DStretch®: Is complexity always necessary for efficiency?", *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, c. 2, sy 2, ss. 55-67, Oca. 2015, doi: 10.1016/j.daach.2015.01.003.
- [27] Mark R. ve Billo, E. "Application of Digital Image Enhancement in Rock Art Recording", *American Indian Rock Art*, c. 28, 2002.
- [28] Defrasne, C. "Digital image enhancement for recording rupestrian engravings: applications to an alpine rockshelter", *Journal of Archaeological Science*, c. 50, ss. 31-38, Eki. 2014, doi: 10.1016/j.jas.2014.06.010.
- [29] Cerrillo Cuenca E. ve Sepúlveda, M. "An assessment of methods for the digital enhancement of rock paintings: the rock art from the precordillera of Arica (Chile) as a case study", *Journal of Archaeological Science*, c. 55, ss. 197-208, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.jas.2015.01.006.
- [30] Sun, P., Hou, M., Lyu, S., Wang, W., Shaker, A. ve Li, S. "Virtual cleaning of sooty murals in ancient temples using twice colour attenuation prior", *Computers & Graphics*, c. 120, s. 103924, May. 2024, doi: 10.1016/j.cag.2024.103924.
- [31] Gao, Z., Du, M., Cao, N., Hou, M., Wang, W. ve Lyu, S. "Application of hyperspectral imaging technology to digitally protect murals in the Qutan temple", *Heritage Science*, c. 11, sy 1, s. 8, Oca. 2023, doi: 10.1186/s40494-022-00847-7.
- [32] Xu Z. ve Geng, C. "Color restoration of mural images based on a reversible neural network: leveraging reversible residual networks for structure and texture preservation", *Herit Sci*, c. 12, sy 1, s. 351, Eki. 2024, doi: 10.1186/s40494-024-01471-3.
- [33] Giakoumis I. ve Pitas, I. "Digital Restoration of Painting Cracks", program adı: IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May. 1998, ss. 269-272 c.4. doi: 10.1109/ISCAS.1998.698812.
- [34] Wang, W. "An edge based segmentation algorithm for rock fracture tracing", içinde *International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGIV'05)*, Tem. 2005, ss. 43-48. doi: 10.1109/CGIV.2005.16.
- [35] Wang, W., Liao, H. ve Huang, Y. "Rock fracture tracing based on image processing and SVM", *Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007)*, Ağu. 2007, ss. 632-635. doi: 10.1109/ICNC.2007.643.
- [36] Qiao, K., Hou, M., Lyu, S. ve Li, L. "Extraction and restoration of scratched murals based on hyperspectral imaging—a case study of murals in the East Wall of the sixth grotto of Yungang Grottoes, Datong, China", *Herit Sci*, c. 12, sy 1, s. 123, Nis. 2024, doi: 10.1186/s40494-024-01215-3.
- [37] Tuncay, E. "Rock rupture phenomenon and pillar failure in tuffs in the Cappadocia region (Turkey)", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, c. 46, sy 8, ss. 1253-1266, Ara. 2009, doi: 10.1016/j.ijrmms.2009.01.011.
- [38] Cornelis B. ve ark, "Crack detection and inpainting for virtual restoration of paintings: The case of the Ghent Altarpiece", *Signal Processing*, c. 93, sy 3, ss. 605-619, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.sigpro.2012.07.022.
- [39] Szyzakin R. ark. "Crack Detection in Paintings Using Convolutional Neural Networks", *IEEE Access*, c. 8, ss. 74535-74552, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988856.
- [40] Gunn, R., Ogleby, C., Lee, D. ve Whear, R. L. "A method to visually rationalise superimposed pigment motifs", *Rock Art Research*, c. 27, ss. 131-136, Kas. 2010.
- [41] Robert, E. Petrognani, S. ve Lesvignes, E. "Applications of digital photography in the study of Paleolithic cave art", *Journal of Archaeological Science: Reports*, c. 10, ss. 847-858, Ara. 2016, doi: 10.1016/j.jasrep.2016.07.026.
- [42] Pedro Javier Sosa, A. "Image analysis and treatment for the detection of petroglyphs and their superimpositions: Rediscovering rock art in the Balos Ravine, Gran Canaria Island", *Rock Art Research: The Journal of the Australian Rock Art Research Association (AURA)*, c. 40, sy 2, ss. 121-130, Kas. 2023, doi: 10.3316/informit.308401586511910.
- [43] Clogg, P., Díaz-Andreu, M. ve Larkman, B. "Digital Image Processing and the Recording of Rock Art", *Journal of Archaeological Science*, c. 27, sy 9, ss. 837-843, Eyl. 2000, doi: 10.1006/jasc.1999.0522.
- [44] Casanova Municchia, A., Bartoli, F., Taniguchi, Y., Giordani, P. ve Caneva, G. "Evaluation of the biodeterioration activity of lichens in the Cave Church of Üzümlü (Cappadocia, Turkey)", *International Biodeterioration & Biodegradation*, c. 127, ss. 160-169, Şub. 2018, doi: 10.1016/j.ibiod.2017.11.023.
- [45] Rogerio Candelera, M. A., Jurado, V., Laiz, L. ve Saiz Jimenez, C. "Laboratory and in situ assays of digital image analysis based protocols for biodeteriorated rock and mural paintings recording", *Journal of Archaeological Science*, c. 38, sy 10, ss. 2571-2578, Eki. 2011, doi: 10.1016/j.jas.2011.04.020.
- [46] Menu M. ve Walter, P. "Prehistoric cave painting PIXE analysis for the identification of paint 'pots'", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, c. 64, sy 1, ss. 547-

- 552, Şub. 1992, doi: 10.1016/0168-583X(92)95531-U.
- [47] Crkvenjakov, D. K. "Image Processing and the Analysis of Paintings—The Case of Serbian Baroque Icons", *IEEE BITS the Information Theory Magazine*, c. 2, sy 1, ss. 122-123, Eki. 2022, doi: 10.1109/MBITS.2022.3187947.
- [48] Bridgman, C. F. ve Gibson, H. L. "Infrared Luminescence in the Photographic Examination of Paintings and Other Art Objects", *Studies in Conservation*, c. 8, sy 3, ss. 77-83, 1963, doi: 10.2307/1505133.
- [49] Baldia C. M. ve Jakes, K. A. "Photographic methods to detect colourants in archaeological textiles", *Journal of Archaeological Science*, c. 34, sy 4, ss. 519-525, Nis. 2007, doi: 10.1016/j.jas.2006.06.010.
- [50] Shi, N., Yang, L., He, P., Li, Y., Wang, M. ve Zhao, H. "Research and realization of mural painting disease recognition methods", içinde *2024 4th International Symposium on Computer Technology and Information Science (ISCTIS)*, Tem. 2024, ss. 623-630. doi: 10.1109/ISCTIS63324.2024.10698926.
- [51] Cui J. ve ark. "Attention-enhanced U-Net for automatic crack detection in ancient murals using optical pulsed thermography", *Journal of Cultural Heritage*, c. 70, ss. 111-119, Kas. 2024, doi: 10.1016/j.culher.2024.08.015.
- [52] Lesvignes E. ve ark., "Using Digital Techniques to Document Prehistoric Rock Art: First Approaches on the Engraved Panels of the Paris Basin Shelters", *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, c. 15, s. e00122, Eyl. 2019, doi: 10.1016/j.daach.2019.e00122.
- [53] Robinson E. ve Ware, G. "Multi-spectral Imaging of La Casa de las Golondrinas Rock Paintings", 2000. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.famsi.org/reports/99052/99052Robinson01.pdf>
- [54] Brady, L. M. "Documenting and Analyzing Rock, Paintings from Torres Strait, NE Australia, with Digital Photography and Computer Image Enhancement", *Journal of Field Archaeology*, c. 31, sy 4, ss. 363-379, Oca. 2006, doi: 10.1179/009346906791071837.
- [55] Brady L. M. ve Gunn, R. G. "Digital Enhancement of Deteriorated and Superimposed Pigment Art: Methods and Case Studies", içinde *A Companion to Rock Art*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012, ss. 625-643. doi: 10.1002/9781118253892.ch35.
- [56] Martinez, K., Cupitt, J., Saunders, D. ve Pillay, R. "Ten years of art imaging research", *Proceedings of the IEEE*, c. 90, sy 1, ss. 28-41, Oca. 2002, doi: 10.1109/5.982403.
- [57] Papaodysseus, C., Exarhos, M., Panagopoulos, M., Rousopoulos, P., Triantafillou, C. ve Panagopoulos, T. "Image and Pattern Analysis of 1650 B.C. Wall Paintings and Reconstruction", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, c. 38, sy 4, ss. 958-965, Tem. 2008, doi: 10.1109/TSMCA.2008.923078.
- [58] Xu, H., Zhang, Y. ve Zhang, J. "Frescoes restoration via virtual-real fusion: Method and practice", *Journal of Cultural Heritage*, c. 66, ss. 68-75, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.culher.2023.11.001.