



Enhancement method of low light cave images based on retinex by hessian and anisotropic diffusion filtering

Bilgin Yazlık*^{ID}

Department of Engineering Computer, Faculty of Engineering, Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Nevşehir, Türkiye

Highlights:

- Low Light Enhancement with Innovative Retinex Method
- Combination of Hessian and Diffusion Filtering
- Good Results with Qualitative and Quantitative Analysis

Keywords:

- Retinex
- Low Light Enhancement
- Cave
- Hessiand
- Diffusion Filtering

Article Info:

Research Article
Received: 01.01.2025
Accepted: 28.05.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1611345

Correspondence:

Author: Bilgin Yazlık
e-mail:
bilginyazlik@nevsehir.edu.tr
phone: +90 505 659 1778

Graphical/Tabular Abstract

In this paper, a new method of Retinex algorithm for enhancement of low light cave images is presented. Caves are mostly closed areas that are either completely dark or receive very little natural light due to their natural structure. Cavers have to work in very difficult conditions and narrow spaces inside the cave. The photographs taken during the documentation of the cave studies are mostly extremely low-light images which restrict scientific research. Retinex algorithms are successful algorithms for low-light enhancement of images. In this study, we propose a new Retinex algorithm which uses hessian and anisotropic diffusion filtering. First, hessian filter is applied to estimate the illumination component of the image and then anisotropic diffusion filter is applied for noise reduction. Then proposed method is tested on the extremely low-light images taken inside the cave. The results compared with the state-of-the-art models subjectively and objectively. Experiments show that, the proposed method is successful on light and detail enhancement of low-light cave images. Cave images enhanced with the proposed method provide more detail to researchers. The performance of the proposed method was analyzed subjectively through visuals. Furthermore, objective analysis of the proposed method was carried out using reference and non-reference methods. Table A shows the average results of all image quality analysis parameters for image dataset. Best results are highlighted in bold. As a result of different quality measurements, the proposed method is successful in all quality measurement methods on average.

	INPUT	BIMEF [26]	LLV [27]	LIME [28]	FBL [29]	MSR [10]	NAT [6]	WRI [30]	OUR
Variance ($\uparrow$)	2276	2454	2597	4078	2768	2382	2401	2583	4.869
Information Entropy ($\uparrow$)	6.74	7.16	7.13	7.44	7.29	7.33	7.08	7.21	7.59
Average Gradient ($\uparrow$)	18.30	23.51	37.88	40.92	29.32	33.27	26.66	26.54	47.26
VIF ($\uparrow$)	-	1.80	2.86	6.98	2.52	6.93	3.06	2.23	8.65

Table A. Quantitative Analysis Average Results (Dataset)

Purpose:

Caves, by their nature, are mostly narrow and dark environments and it is difficult to take photographs inside the caves. In this study, the Retinex method, which uses hessian and anisotropic diffusion filtering together, was applied for the first time to enhance low-light cave images.

Theory and Methods:

The illumination component of the image is successfully estimated with hessian filtering and the noise in the image is reduced with anisotropic diffusion filtering.

Results:

The results show that the proposed method is successful in balanced low-light enhancement, making details visible, improving texture details and preserving natural color for low-light cave images. The proposed method has a success rate of 68% (19 best of 28 total results) among the seven state-of-the-art methods, in terms of quality measurement parameters.

Conclusion:

According to the objective and subjective analysis results, the proposed method shows better performance on average. The proposed method has become successful for low-light image enhancement in terms of variance, information entropy, average gradient and visual information fidelity values.



Düşük ışıklı mağara görüntülerinin retineks tabanlı Hessian ve Anizotropik difüzyon filtreleme ile iyileştirilmesi

Bilgin Yazlık*^{ID}

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Nevşehir, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Düşük ışık iyileştirme ve detay artırmada yüksek performans
- Özellikle düşük ışıklı mağara görsellerinde güncel çalışmalara kıyasla başarılı sonuçlar
- Hessian ve Anizotropik Difüzyon filtrelemenin Retineks ile yenilikçi kombinasyonu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 01.01.2025

Kabul: 28.05.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1611345

Anahtar Kelimeler:

Retineks,
mağara,
düşük ışık iyileştirme,
hessian,
difüzyon filtreleme

ÖZ

Bu makalede, düşük ışıklı mağara görüntülerinin iyileştirilmesi için yeni bir Retineks algoritması yöntemi önerilmektedir. Mağaralar, doğal yapıları nedeniyle çoğunlukla tamamen karanlık olan veya çok az doğal ışık alan kapalı alanlardır. Mağaracılar, mağara içinde çok zor koşullarda ve dar alanlarda çalışmak zorundadırlar. Mağara çalışmalarının belgelenmesi sırasında çekilen fotoğraflar çoğunlukla bilimsel araştırmaları kısıtlayan aşırı düşük ışıklı görüntülerdir. Retineks tabanlı yöntemler, düşük ışıklı görüntülerin iyileştirilmesi için kullanılan başarılı yöntemlerdir. Bu çalışmada, Hessian ve anizotropik difüzyon filtrelemesini kullanan yeni bir Retineks algoritması önerilmektedir. Yöntemde görüntünün aydınlatma bileşenini tahmin etmek için öncelikle Hessian filtresi uygulanmakta ve ardından gürültüyü azaltmak için anizotropik difüzyon filtresi kullanılmaktadır. Daha sonra önerilen yöntem, mağara içinde çekilmiş aşırı düşük ışıklı görüntülerde test edilmiştir. Sonuçlar, literatürde bilinen başarılı modellerle öznel ve nesnel olarak karşılaştırılmıştır. Deneyler, önerilen yöntemin düşük ışıklı mağara görüntülerinin ışık ve ayrıntı iyileştirmesinde başarılı olduğunu göstermektedir. Önerilen yöntemle iyileştirilen mağara görüntüleri, araştırmacılara bilimsel çalışmalar için daha fazla ayrıntı sağlamaktadır.

Enhancement method of low light cave images based on retinex by hessian and anisotropic diffusion filtering

H I G H L I G H T S

- High performance in low-light enhancement and detail amplification
- Superior results compared to state-of-the-art methods, particularly on low-light cave images
- Innovative combination of Hessian and Anisotropic Diffusion filtering with Retinex

Article Info

Research Article

Received: 01.01.2025

Accepted: 28.05.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1611345

Keywords:

Retinex,
cave,
low-light enhancement,
hessian,
diffusion filtering

ABSTRACT

In this study, a novel Retinex-based algorithm is proposed for the enhancement of low-light cave images. Caves are enclosed environments that, by their very nature, are often completely devoid of natural light or receive only minimal illumination. Speleologists are required to work under highly challenging conditions within confined underground spaces. Photographs captured during the documentation of cave studies are frequently extremely low-light images that impose significant constraints on scientific investigation. Retinex-based methods constitute a well-established class of algorithms for low-light image enhancement. In this work, a novel Retinex algorithm incorporating Hessian filtering and anisotropic diffusion is proposed. In the proposed method, a Hessian filter is first applied to estimate the illumination component of the image, followed by anisotropic diffusion filtering to suppress noise. The proposed method is subsequently evaluated on extremely low-light images captured inside caves. The results are compared both subjectively and objectively against well-established state-of-the-art methods reported in the literature. Experimental findings demonstrate that the proposed method achieves superior performance in terms of illumination and detail enhancement for low-light cave images. Cave images enhanced by the proposed method provide researchers with significantly greater detail for use in scientific investigations.

1. Giriş (Introduction)

Mağaranın farklı bakış açılarına göre farklı tanımları yapılabilmektedir. Bu çalışmada mağaraları, bir kişinin içinde araştırma yapmasına izin verecek kadar büyük, insanlar tarafından yapılmış veya doğal olarak oluşmuş ve toprağa açılan alanlar olarak tanımlamaktayız [1]. Mağaralar, tektonik hareketler, aşınma, kaya erimesi, lav akıntısı ve buzul erimesi gibi doğal nedenlerle oluşabildiği gibi [1] özellikle Kapadokya bölgesinde sıklıkla karşılaşıldığı üzere insanların tarafından da elle oyularak oluşturulabilmektedir. Mağaralar nasıl oluşmuş olursa olsun, toprağa açıldıkları ve çoğunlukla doğal ışıktan tamamen yoksun oldukları için kapalı alanlardır. Mağara araştırmacıları, çalışmalarını belgelemek ve zorlu çalışma koşulları nedeniyle anlık olarak gözden kaçabilecek detayları incelemek için fotoğrafçılığı bir araç olarak kullanmaktadırlar. Mağaralar, yapıları gereği çoğunlukla dar ve karanlık ortamlardır ve mağaraların içinde fotoğraflar çoğunlukla son derece düşük ışık görüntüleridir. Yetersiz ışıklı mağara görüntülerinde kontrast eksikliği, düşük parlaklık, düşük renk kalitesi ve detayların kaybolması gibi problemler oluşmaktadır.

Düşük ışıklı görüntüleri iyileştirmek için akla gelen ilk yöntem, görüntüdeki ışık miktarını artırmaktır. Ancak ışık miktarı arttıkça görüntüdeki kontrast azalır, renkler bozulur ve görüntü için istenen sonuç elde edilemez. Kontrast, artan ışık nedeniyle oluşan bozulmaları telafi etmek için de artırılabilir, ancak bu durumda da ışığın artırılmasına karşılık gürültüde artış olur [2].

Piyasada halihazırda çok sayıda görüntü düzenleme uygulaması bulunmaktadır. Ancak bunlar arasında Adobe'nin Photoshop ve ACD Systems'in Photo Studio uygulamaları teknik yetenekler açısından öne çıkmaktadırlar. Bu uygulamalar düşük ışıklı görüntüleri iyileştirmek için kullanılabilir [3]. Ancak hem Photoshop hem de Photo Studio uygulamaları görüntü iyileştirme için oldukça ayrıntılı alt parametrelere sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı, özellikle düşük ışıklı görüntü iyileştirmede başarılı sonuçlar elde etmek büyük ölçüde kullanıcıya bağlıdır. Deneyimli kullanıcılar, deneyimlerine göre alt parametreleri daha doğru bir şekilde ayarlayarak daha iyi sonuçlar elde edebilirler. Düşük ışıklı görüntü iyileştirme konusunda evrensel kabul görmüş, standartlaşmış, başarılı bir teknik görüntü iyileştirme şablonu bulunmamaktadır.

Yukarıda belirtilen yöntemlere ilave olarak, düşük ışıklı görüntüleri iyileştirmek için Retineks tabanlı algoritmalarla dayalı farklı yöntemler de kullanılmaktadır [3-7]. Literatürde düşük ışıklı görüntüleri iyileştirmek için Retineks algoritmasını kullanan birçok çalışma bulunmaktadır, ancak mağara görüntülerine odaklanan bir çalışma olmasa da, düşük ışıklı mağara görüntülerini dar bir örneklem ile konu edinen çalışmalar bulunmaktadır [8-9]. Düşük kaliteli görüntülerden bilimsel açıdan değerli bilginin elde edilmesi amacıyla geliştirilen görüntü işleme yöntemleri, farklı alanlarda da başarıyla uygulanmaktadır [10]. Gauss fonksiyonu, Retineks teorisinde aydınlatma bileşenini tahmin etmek için kullanılırken [11, 12], Gauss fonksiyonu yerine farklı filtreler kullanan çalışmalar da bulunmaktadır [13, 14]. Filtre tabanlı görüntü iyileştirme yaklaşımları; iki boyutlu sayısal süzgeç tasarımı ve imge yumuşatma/keskinleştirme gibi farklı uygulama biçimleriyle literatürde yer bulmaktadır [15].

Hessian matrisi, herhangi bir fonksiyonun bölgesel uç noktalarını bulmak için kullanılmaktadır. Hessian filtresi, kontrast iyileştirme amacıyla görüntü işleme çalışmalarında başarıyla kullanılmaktadır [16]. Yağmurlu havada trafik çizgilerinin tespit edilmesini konu edinen bir çalışma, Hessian tabanlı çok ölçekli Retineks yöntemi ile

gerçekleştirilmiştir [17]. Bu çalışmada [14], görüntüdeki gürültüyü gidermek için Hessian tabanlı difüzyon filtresi kullanılmıştır. Görüntü kalitesinin algoritmik yöntemlerle artırılması ve elde edilen sonuçların nesnel kalite metrikleriyle karşılaştırılması değerlendirilmesi, görüntü işleme alanında yaygın bir araştırma yaklaşımını oluşturmaktadır [18].

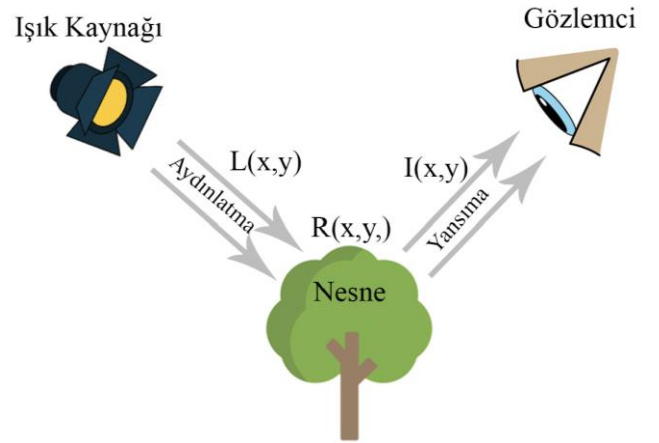
Anizotropik difüzyon filtreleme, görüntü işleme alanında gürültüyü gidermek için kullanılmaktadır [19]. Filtreleme teknikleri ve gürültü azaltma yöntemleri; biyometrik görüntüleme gibi farklı alanlarda da düşük kaliteli görüntülerin iyileştirilmesinde başarıyla uygulanmaktadır [16]. Bu filtre, Retineks algoritmasına uyarlanabilmekte ve algoritmanın gürültü giderme performansını artırmaktadır [20]. Gürültü gidermede iyi performans göstermesine rağmen, keskin kenarların bulanıklaşmasına neden olduğu bilinmektedir [21].

Bu çalışmada, Hessian ve anizotropik difüzyon filtresini birlikte kullanan Retineks yöntemi, düşük ışıklı mağara görüntülerini iyileştirmek için ilk kez uygulanmıştır. Görüntünün aydınlatma bileşeni Hessian filtrelemesi ile başarılı bir şekilde elde edilmiş ve görüntüdeki gürültü anizotropik difüzyon filtrelemesi ile azaltılmıştır. Önerilen yöntem, ışık ve ayrıntı iyileştirme açısından başarılı sonuçlar üretmiştir.

2. Teori ve Yöntem (Theory and Method)

2.1. Retineks Teorisi (Retinex Theory)

Retineks teorisi, görüntüyü yansıma ve aydınlatma bileşenlerine ayırmak için geliştirilen önemli bir görüntü iyileştirme algoritmasıdır ve günümüzde hala yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 1). Retineks kelimesi retina ve korteks kelimelerinden birleştirilmesiyle elde edilmiştir.



Şekil 1. Retineks Teorisinin Prensip Gösterimi
(Principle Illustration of Retinex Theory)

Retineks teorisi ilk olarak 1971 yılında Land ve McCann tarafından geliştirilmiştir [22]. Retineks teorisi, insanın bir nesneyi veya sahneyi nasıl gördüğünü modellemeye çalışmaktadır. Teoriye göre, insan gözü sahnede bir bütün olarak mutlak bir ışık yansıması görmek yerine bölgesel olarak değişen bir ışık yansıması görmektedir. Orijinal Retineks algoritmasında, parlaklık değerleri her bir piksel için hesaplanmaktadır [11]. Sonuç olarak, Retineks teorisine göre, insan perspektifinden ele alındığında, bir görüntü $I(x,y)$ aydınlatma bileşeni $L(x,y)$ ve yansıma bileşeni $R(x,y)$ olarak iki ayrı bileşene ayrılabilir [11].

$$I(x, y) = R(x, y)L(x, y) \quad (1)$$

Eş. 1'deki $L(x, y)$ değeri aydınlatma değeri iken, $R(x, y)$ değeri görüntüdeki nesnenin veya nesnelerin özelliklerine bağlı olarak değişen yansıma değeridir [12]. [23] gibi teknik bilgisayar programlarında gerçekleştirilebilmektedir.

2.1.1. Tek Ölçekli Retineks (SSR) (Single Scale Retinex)

Tek ölçekli Retineks, merkezdeki girdi değeri ile çevresindeki komşuluk ortalaması arasındaki farkı hesaplayan merkez/komşuluk fonksiyonları sınıfının bir üyesidir [11]. Tek Ölçekli Retineks matematiksel olarak Eş. 2'deki şekilde ifade edilir.

$$R_i(x, y) = \log(I_i(x, y)) - \log(I_i(x, y) * F(x, y)) \quad (2)$$

İfadeye I_i giriş görüntüsünün i 'inci kanalını belirtmektedir, R_i Retineks çıkış görüntüsünün i 'inci kanalını göstermektedir, F normalleştirilmiş çevresel fonksiyondur ve "*" operatörü evrişimi ifade etmektedir. Eş. 2 her renk kanalı için ayrı ayrı gerçekleştirilmektedir. Normalleştirilmiş çevre fonksiyonları olarak çeşitli fonksiyonlar kullanılabilir iken Gauss fonksiyonu sıklıkla tercih edilmektedir [11, 12].

2.1.2. Çok Ölçekli Retineks (MSR) (Multi Scale Retinex)

$F(x, y)$ 'yi doğru ölçekle gerçekleştirmek önemlidir, ancak en iyi ölçeği kolayca bulmak için basit bir yöntem bulunmamaktadır. Bu nedenle, tek ölçekli Retineks farklı ölçek değerleri için birçok kez tekrarlanmakta ve toplanmakta ve bu yöneme çok ölçekli Retineks denilmektedir [5].

Çok ölçekli Retineks matematiksel olarak Eş. 3'deki şekilde gösterilmektedir.

$$R_{MSR_i} = \sum_1^n w_n (\log(I_i(x, y)) - \log(I_i(x, y) * F_n(x, y))) \quad (3)$$

Eş. 3'teki n terimi ölçek sayısını, w_n ölçeğin ağırlığını ifade etmektedir. Çok Ölçekli Retineks algoritması iyileştirilmiş ve doğal renkleri koruma konusundaki performansı artırılmıştır [24]. Çalışmamızda çok ölçekli Retineks yöntemi kullanılmıştır.

2.2. Hessian Matrisi (Hessian Matrix)

$f(x)$ fonksiyonunun tüm ikinci dereceden kısmi türevlerini içeren matris, Hessian matrisi olarak adlandırılmaktadır. Hessian matrisi genel biçimde Eş. 4'deki gibi gösterilir [25].

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Hessian matrisleri simetrik matrislerdir ve transpozeleri kendilerine eşittir. Hessian matrisi, çok değişkenli fonksiyonlarda yerel maksimum ve minimumu tespit etmek için kullanılmaktadır [25]. Hessian matrisinin determinanı kullanılarak yerel maksimum ve minimum hesaplanabilir. Bu çalışmada, Retineks algoritmasının aydınlatma bileşeninin kestirim adımı için gri ölçekli görüntüye Hessian filtresi uygulanmıştır.

2.3. Anizotropik Difüzyon Filtreleme (Anisotropic Diffusion Filtering)

Anizotropik difüzyon filtrelemesi, herhangi bir pikselin yoğunluk değerini komşu piksellerdeki yoğunluk değerlerinden yararlanarak belirlemek için kullanılır. Difüzyon, yerel kontrastla ters orantılıdır; bu nedenle, görüntüdeki ayrıntıları vurgulayabilmektedir. Özellikle gürültü giderme ve ayrıntı iyileştirme için kullanılmaktadır [26]. Sabit bir difüzyon katsayısı kullanılarak, Gauss bulanıklaştırma efekti yaratılabilmektedir. Gri tonlamalı görüntüler için difüzyon filtresi Eş. 5'deki gibi tanımlanmıştır [27].

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \text{div}(c(\|\nabla I\|)\nabla I) \quad (5)$$

Eş. 5'te; div sembolü diverjansı, $\|\cdot\|$ sembolü Öklid normunu ve ∇ gradyanı temsil etmektedir. T , evrim süresini ve $c(\cdot)$ difüzyon katsayısını belirtmektedir.

3. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Bu çalışmada, düşük ışık koşullarında çekilmiş mağara görüntülerinin görsel kalitesini artırmak amacıyla, Retineks teorisi temel alınarak Hessian tabanlı aydınlatma kestirimi ve anizotropik difüzyon tabanlı gürültü azaltma yöntemlerinin bütünleştirildiği hibrit bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yöntemin genel akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.

Bu çalışmada, aydınlatma bileşeninin daha doğru modellenmesi için Hessian matrisine dayalı ikinci mertebeden türev bilgisi kullanılmıştır. Hessian matrisi, bir görüntünün yerel eğrilik yapısını tanımlar ve özellikle köşe, kenar veya yüzey geçişlerinin belirlenmesinde etkilidir. Bu çalışma kapsamında, Hessian filtresi kullanılarak yüksek frekanslı detayların korunması sağlanırken, aydınlatma bileşeni daha doğru bir biçimde kestirilmektedir. Böylece klasik Retineks'in zayıf aydınlatma bölgelerinde ortaya çıkan "aşırı iyileştirme" problemi azaltılmıştır. Hessian filtresi sonrası elde edilen görüntüde, özellikle düşük ışık koşullarına bağlı olarak ortaya çıkan rastgele gürültüler bulunmaktadır. Difüzyon filtresi gürültü azaltma ve detay iyileştirme amacıyla uygulanmıştır.

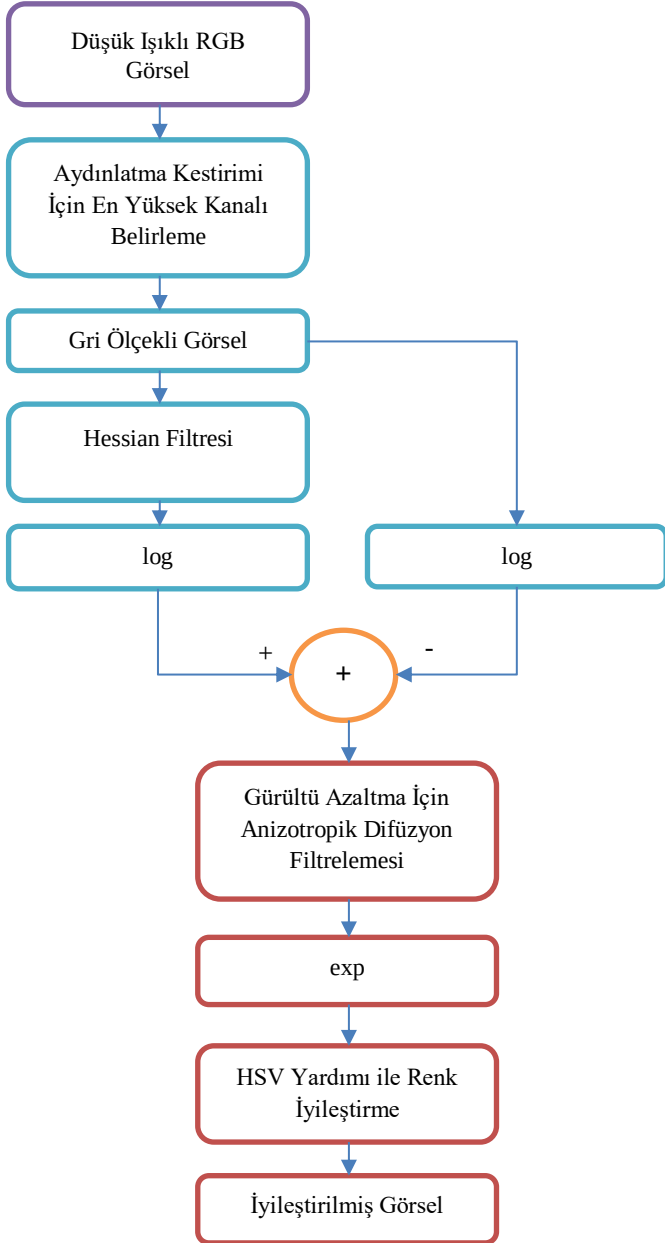
Yöntemin yenilikçi yönü, Retineks algoritmasının hem ışık hem de detay iyileştirme özellikleri açısından iyileştirilmesidir. Bu özelliklerin elde edilebilmesi için Hessian ve anizotropik difüzyon filtrelemesi yöntemleri birlikte kullanılmaktadır.

Yöntem şu şekilde uygulanmaktadır: Öncelikle düşük ışıklı RGB görüntüsünün en yüksek değerli kanalı algılanmakta ve aydınlatma bileşeni tahmin için girdi olarak kullanılmaktadır. Görüntü daha sonra Retineks yöntemi uygulaması öncesinde gri tonlamaya dönüştürülmektedir. Gri tonlamalı biçimlendirilmiş görüntü, Hessian matris tabanlı filtre ile filtrelenmektedir. Daha sonra, filtrelenmiş ve filtrelenmemiş görüntüler, aydınlatma bileşenini belirlemek için logaritma işlemi ile birbirinden çıkarılmaktadır. Son olarak anizotropik difüzyon filtresi uygulanmakta ve filtreleme işlemleri sonrasında görüntü, HSV renk uzayına dönüştürülerek renk bileşenleri üzerinde iyileştirme yapılmaktadır. Aydınlatma bileşeninde yapılan düzenleme yalnızca parlaklık kanalına uygulanırken, doygunluk ve ton bilgileri korunarak renk bozulmaları engellenmiştir. Bu işlem sonunda, aydınlık, renk doğruluğu ve detay keskinliği açısından iyileştirilmiş nihai görüntü elde edilmektedir.

Hessian matrisi görüntünün ışık bileşeninin uç noktalarını tespit etmek ve daha dengeli bir ışık dağılımı sağlamak için kullanılmıştır. Dijital I görüntüsü Eş. 6'da verilmiştir [28].

$$H(I_{(x,y)}) = \begin{bmatrix} I_{xx} = \frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial x^2} & I_{xy} = \frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial x \partial y} \\ I_{yx} = \frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial x \partial y} & I_{yy} = \frac{\partial^2 I(x,y)}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Önerilen yöntemde kullanılan Hessian filtresi, yerel uç noktaları başarılı bir şekilde tespit edebilme yeteneği sayesinde aydınlatma bileşeninin daha verimli bir şekilde tahmin edilmesini sağlamaktadır. Önerilen yöntem sayesinde Retineks'in düşük ışık iyileştirme performansı artmıştır. Difüzyon filtresinin gürültü azaltma ve detay iyileştirme açısından başarılı olduğu bilinmektedir ve bu çalışmada da başarılı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 2. Önerilen Yöntemin Genel Akış Şeması
(General Flow Chart of the Proposed Method)

Son yıllarda Derin Öğrenme tabanlı yöntemler (Zero-DCE, EnlightenGAN vb.) düşük ışıklı görsel iyileştirmede etkileyici sonuçlar verse de eğitim verisi gerektirmemesi, düşük hesaplama maliyeti ve açıklanabilir matematiksel yapısı nedeniyle Retineks tabanlı geleneksel yöntemler, özellikle mağara görselleri gibi veri

setlerinin kısıtlı olduğu alanlarda önemini korumaktadır. Önerilen yöntemin yenilikçi yönü, Retineks algoritmasının aydınlatma ve yansıma ayırımı daha kararlı hale getirmek için Hessian tabanlı yapısal bilgiyle güçlendirilmiş olması ve bu sürece anizotropik difüzyon eklenerek gürültü ve detay optimizasyonunun eşzamanlı gerçekleştirilmesidir. Böylece:

- Klasik Retineks'te görülen aşırı kontrast hataları azaltılmış,
- Düşük ışıklı bölgelerde detay kayıpları minimize edilmiştir,
- Görüntü gürültüsü azaltılırken kenar bütünlüğü korunmuştur.

Çalışmada kullanılan Anizotropik Difüzyon Filtrelemesi, Hessian Filtresi ve diğer parametrelerin değerleri Tablo 1'de sunulmuştur. Gürültü bastırma aşamasında, mağara yüzeylerindeki ince detayların korunması ile gürültünün giderilmesi arasındaki dengeyi sağlamak amacıyla Anizotropik Difüzyon iterasyon sayısı 5 ile sınırlandırılmış; iletim fonksiyonu olarak ise geniş ve homojen bölgelerdeki sınır koruma başarımı nedeniyle ikinci dereceden yöntem tercih edilmiştir. Çalışmada aydınlatma bileşeninin tahmini için klasik Gaussian filtresi yerine, yapısal özellikleri koruyan Hessian tabanlı filtreleme tercih edilmiştir. Mağara duvarlarındaki ince çatlaklar, kaya dokusu ve duvar resimlerinin detaylarını kaybetmemek amacıyla Hessian filtresi ölçeği (σ), literatürde kenar ve sırt tespiti için kabul gören varsayılan değer olan $\sigma = 1$ olarak sabitlenmiştir.

Tablo 1. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler ve değerleri
(Simulation parameters and their values)

Parametre	Değer
Anizotropik Difüzyon İterasyon Sayısı	5
Anizotropik Difüzyon İletim Fonksiyonu	İkinci dereceden
Hessian Filtresi Ölçeği	$\sigma = 1$
Retineks Ölçek Sayısı	3 (15, 80, 250)
Hassasiyet	32 bit

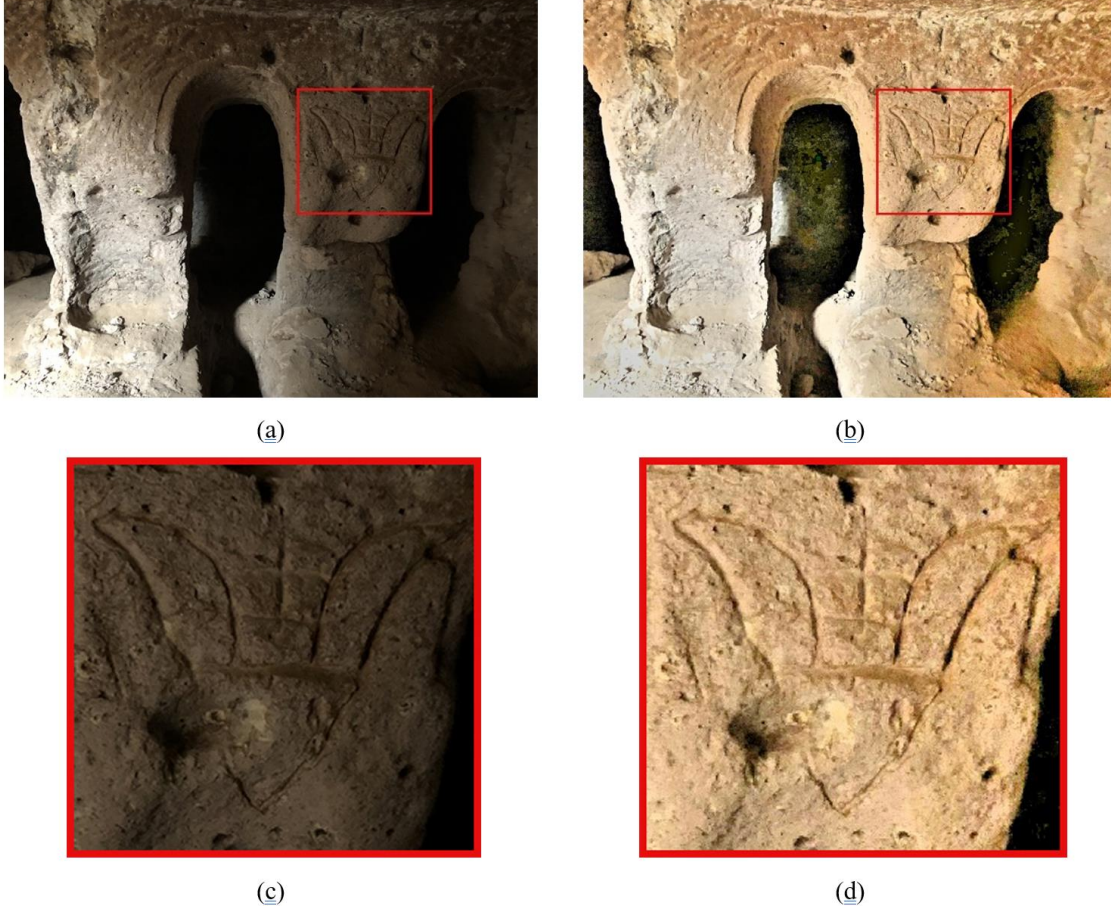
Sonuç olarak, önerilen yöntem düşük ışıkta çekilmiş mağara görüntülerinde aydınlatma homojenliği, detay keskinliği ve renk tutarlılığı açısından üstün performans göstermektedir.

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu çalışmada, önerilen yöntemin performansı nitel ve nicel olarak değerlendirilmiştir. Nitel değerlendirme için önerilen yöntem, mağara içerisinden alınan yedi adet aşırı düşük ışıklı görüntü üzerinde deneysel olarak test edilmiştir. Deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği tüm görüntüler 1143 x 857 piksel boyutunda RGB biçimli fotoğraflardır. Fotoğraflar Canon EOS500D dijital fotoğraf makinesi ve Sigma 18-50 mm lens kullanılarak çekilmiştir. Görüntülerin seçiminde son derece düşük ışıklı olmaları ve mağara türü çeşitliliği dikkate alınmıştır. Önerilen yöntem görüntülere uygulanarak düşük ışık iyileştirme ve detay iyileştirme açısından performans analizi yapılmıştır.

4.1. Nitel Değerlendirme (Quantitative Evaluation)

Aşağıdaki yedi şekilde (Şekil 3 – Şekil 9), çalışma kapsamında ele alınan düşük ışıklı mağara görüntüleri, önerilen yöntemin uygulanmasından önce ve sonra karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Ayrıntılı inceleme için, kırmızı çerçeveye çevrili görüntü alanı yakınlştırılmıştır. Görsel analiz, önerilen yöntemin düşük ışıklı mağara görüntülerindeki ışığı iyileştirmede ve detayları artırmada başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Küçükbürüngüz'den kaya oyma yeraltı sığınağı (Resim 1) a. Orijinal RGB görüntüsü b. Önerilen yöntemin sonucu c. Kırmızı çerçeve içindeki büyütülmüş orijinal görüntü d. Kırmızı çerçeve içindeki büyütülmüş önerilen yöntem sonucu görüntüsü. *Fotoğraf: Bilgin Yazlık*

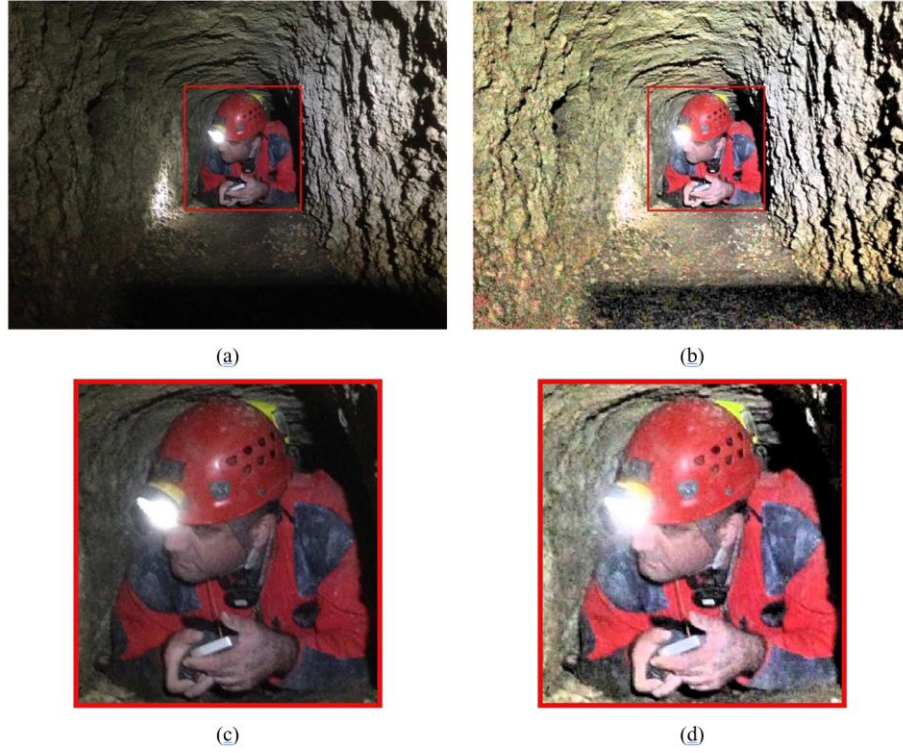
(Rock carved underground shelter from Küçükbürüngüz (Image 1) a. Original RGB image b. Result of proposed method c. Enlarged original image in red frame d. Enlarged proposed method result image in red frame. *Photograph: Bilgin Yazlık*)

Nitel değerlendirmede kullanılan ilk fotoğraf olan “Resim 1” Şekil 3’te uygulama öncesi ve sonrası şeklinde yan yana gösterilmektedir. Bu fotoğraf Kayseri’nin Küçükbürüngüz mahallesinde bulunan bir yeraltı sığınağında çekilmiştir. Önerilen yöntemin ışık iyileştirme açısından yüksek performansı açıkça görülmektedir. Önerilen yöntemin doğal renkleri korurken ışık iyileştirmesi sağlaması önemli bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Görüntünün merkezinde, kırmızı çerçeveyle vurgulanan kayadan oyulmuş bir figür öne çıkmaktadır. Orijinal görüntüde (Şekil 3.c) görülmeyen bazı detaylar, önerilen yöntemle zenginleştirilen görüntüde (Şekil 3.d) ortaya çıkmıştır. Figürün oyma çizgilerindeki derinliğin ve görüntüdeki detayların arttığı görülmektedir.

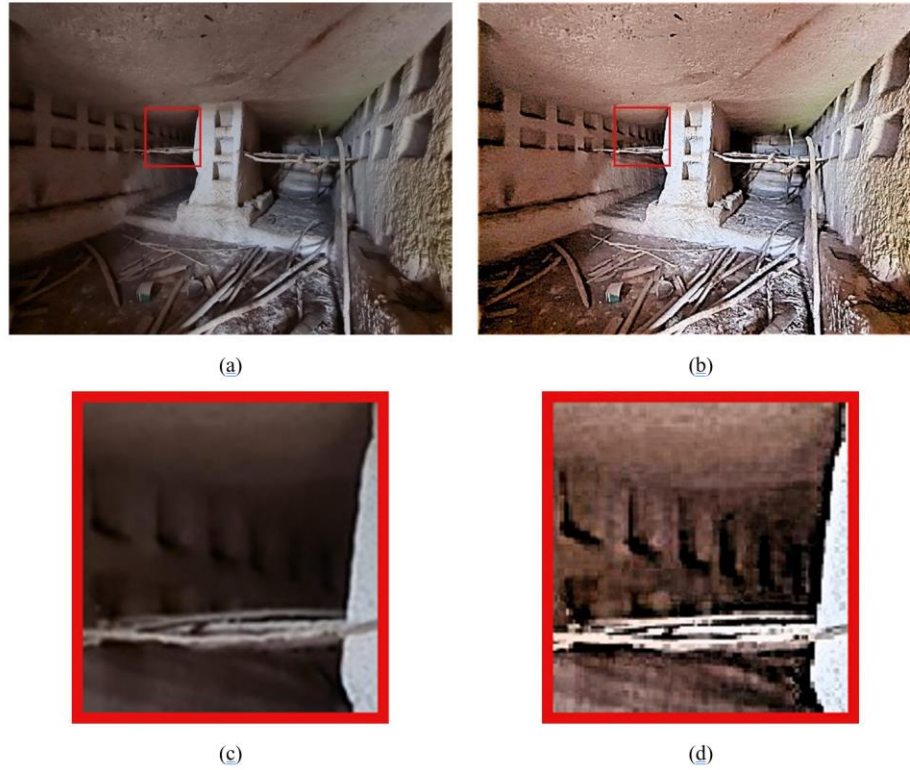
Şekil 4, uygulama öncesi ve sonrası “Resim 2”yi göstermektedir. Bu görüntü, Kayseri’nin Büyükbürüngüz semtinde bulunan Büyükbürüngüz yeraltı şehrinde çekilmiştir. Fotoğraf tamamen yapay ışıkla aydınlatılmış bir tünel içerisinde çekilmiştir. Önerilen yöntemin ışık iyileştirme açısından yüksek performansa sahip olduğu görsel karşılaştırma ile görülebilmektedir. Önerilen yöntemin uygulandığı görüntüde, görüntünün ortasında kırmızı çerçeveyle vurgulanan mağaracı, yüksek ışık ve doygun renge sahiptir. Ancak orijinal görüntüde neredeyse hiç ışık almayan alanlar, iyileştirilmiş görüntüde bir miktar parazitte birlikte görünür hale gelmiştir.

Şekil 5’te uygulama öncesi ve sonrası “Resim 3” gösterilmektedir. Bu fotoğraf, Nevşehir’in Ürgüp ilçesinde bulunan kaya oyma bir güvercinlik içerisinde çekilmiştir. Fotoğraf, kayadan oyulmuş yapının içine sızan az miktarda doğal ışık ile çekilmiştir. Önerilen yöntem orijinal görüntüye uygulanmış ve karşılaştırmalı sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Orijinal görüntüde net olarak görülmeyen kırmızı çerçeve içindeki güvercin tünelleri, iyileştirme sonrasında kolayca görülmekte ve sayılabilmektedir. Mağara araştırmacılarının daha sonra çekilen fotoğraflar üzerinde çalışabilmeleri büyük önem taşımaktadır ve bu iyileştirme sayesinde orijinal görüntüde görülmeyen detaylar artırılmaktadır. Ancak ışık artışına yanıt olarak, özellikle iyileşme sağlanan görüntünün keskin çizgilerinde bulanıklık meydana gelmiştir.

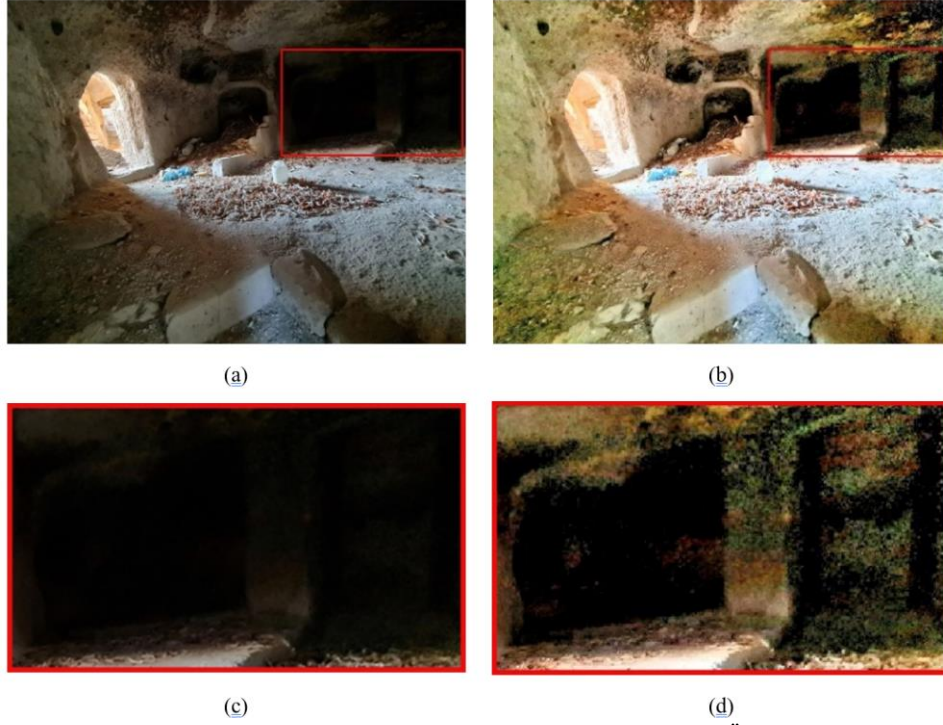
Şekil 6’da uygulama öncesi ve sonrası “Resim 4” gösterilmektedir. Bu fotoğraf Nevşehir’in Ürgüp ilçesine bağlı Karain köyünde bulunan kayadan oyma bir mağarada çekilmiştir. Fotoğraf kapıdan içeri sızan az miktarda doğal ışıkla çekilmiştir, yapay ışık kullanılmamıştır. Önerilen yöntem orijinal görüntüye uygulanmış ve karşılaştırmalı sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Kırmızı çerçevenin içinde, orijinal görüntüde net olarak görülmeyen nişler ve hatta duvardaki yosun tabakası iyileştirilmiş görüntüde rahatlıkla ayırt edilebilmektedir.



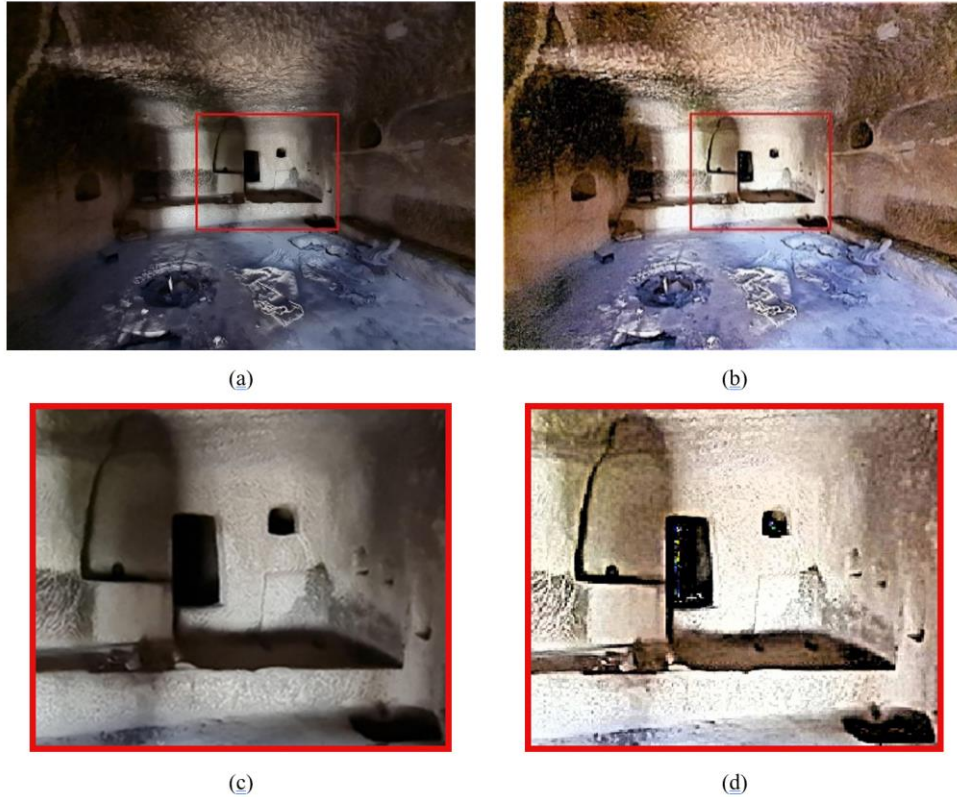
Şekil 4. Büyükbürüngüz Yeraltı Tüneli (Resim 2) a. Orijinal RGB görüntüsü b. Önerilen yöntemin sonucu c. Kırmızı çerçevedeki büyütülmüş orijinal görüntü d. Kırmızı çerçevedeki büyütülmüş önerilen yöntem sonucu görüntüsü. *Fotoğraf: Bilgin Yazlık Model: Bilgin Yazlık* (Büyükbürüngüz Underground Tunnel (Image 2) a. Original RGB image b. Result of proposed method c. Enlarged original image in red frame d. Enlarged proposed method result image in red frame. *Photograph: Bilgin Yazlık Model: Bilgin Yazlık*)



Şekil 5. Bir kaya oyma güvercinliğin içi a. Orijinal RGB görüntüsü (Resim 3) b. Önerilen yöntemin sonucu c. Kırmızı çerçevedeki büyütülmüş orijinal görüntü d. Kırmızı çerçevedeki büyütülmüş önerilen yöntem sonucu görüntüsü. *Fotoğraf: Bilgin Yazlık* (Inside of a dovecote a. Original RGB image (Image 3) b. Result of proposed method c. Enlarged original image in red frame d. Enlarged proposed method result image in red frame. *Photograph: Bilgin Yazlık*)



Şekil 6. Karain Köyü'ndeki kaya oyma mağara (Resim 4) a. Orijinal RGB görüntüsü b. Önerilen yöntemin sonucu c. Kırmızı çerçevedeki büyütülmüş orijinal görüntü d. Kırmızı çerçevedeki büyütülmüş önerilen yöntem sonucu görüntüsü. *Fotoğraf: Bilgin Yazlık* (Rock carved cave at Karain Village (Image 4) a. Original RGB image b. Result of proposed method c. Enlarged original image in red frame d. Enlarged proposed method result image in red frame. *Photograph: Bilgin Yazlık*)



Şekil 7. Karain Köyü'ndeki Kaya Oyma Şirahane (Resim 5) a. Orijinal RGB Görüntüsü b. Önerilen Yöntemin Sonucu c. Kırmızı çerçeve içinde büyütülmüş orijinal görüntü d. Kırmızı çerçeve içinde büyütülmüş Önerilen Yöntem sonuç görüntüsü. *Fotoğraf: Bilgin Yazlık* (Rock Carved Winery Cave at Karain Village (Görsel 5) a. Original RGB Image b. Result of Proposed Method c. Enlarged original image in red frame d. Enlarged Proposed Method result image in red frame. *Photograph: Bilgin Yazlık*)

Şekil 7’de uygulama öncesi ve sonrası “Resim 4” gösterilmektedir. Fotoğraf, Nevşehir’in Ürgüp ilçesine bağlı Karain köyünde bulunan kaya oyma bir sırahanede çekilmiştir. Önerilen yöntem orijinal görüntüye uygulanmış ve karşılaştırmalı sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Kırmızı çerçevede, orijinal görüntüde net olarak görünmeyen presleme kazanı ve kaya oluklar iyileştirilmiş görüntüde daha net görülebilmektedir. Önerilen yöntemle iyileştirilen görüntü, bu görüntüler üzerinde çalışacak araştırmacıların daha doğru sonuçlara ulaşmasına katkı sağlayacak niteliklere ulaşmıştır.

Şekil 8’de uygulama öncesi ve sonrası “Resim 6” gösterilmektedir. Bu fotoğraf Nevşehir’in Ürgüp ilçesine bağlı Bahçeli köyünde bulunan bir yeraltı sığınagında çekilmiştir. Resimde çok az doğal ışık ve çok miktarda yapay ışık bulunmaktadır. Önerilen yöntem orijinal görüntüye uygulanmış ve karşılaştırmalı sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Önerilen yöntem genel olarak ışık iyileştirme performansı açısından başarılı sonuçlar üretmiştir. Önerilen yöntem bu görüntüde fotoğrafın genelinde başarılı bir ışık dağılımı elde etmiştir. Yöntem ayrıca kaya yüzeyindeki doku detaylarının görünürlüğünü artırmada başarılı olmuştur.

Şekil 9’da uygulama öncesi ve sonrası “Resim 7” gösterilmektedir. Bu fotoğraf, Nevşehir’in Ürgüp ilçesine bağlı Ayvalı köyü yakınlarında bulunan isimsiz bir kaya oyma kiliseden çekilmiştir. Önerilen yöntem orijinal görüntüye uygulanmış ve karşılaştırmalı sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Orijinal görüntüde kırmızı çerçeve içerisinde çok net görülmeyen duvar doku detayının, iyileştirilmiş görüntüde daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Önerilen yöntemle özellikle kilisenin apsis kısmında dengeli ışık artışı sağlanmış ve daha başarılı bir sonuç elde edilmiştir.

Önerilen yöntemin başarımını kıyaslamalı olarak ortaya koyabilmek için, yukarıda yer alan yedi adet mağara fotoğrafına, önerilen yönteme ilave olarak Retineks tabanlı yöntemlerin en güncel ve başarılıları arasında yer alan şu yöntemler uygulanmıştır: İnsan görme sisteminden esinlenen çoklu pozlama füzyon çerçevesi yöntemi (BIMEF) [29], düşük ışıklı video içeriğinin ışık açısından iyileştirilmesi için geliştirilen yöntem (LLV) [30], aydınlatma haritası tahminine dayalı yöntem (LIME) [31], füzyon tabanlı düşük ışık iyileştirme (FBL) [32], renk restorasyonlu çok ölçekli Retineks (MSR) [11], doğruluk koruma öncelikli yöntem (NAT) [6], yansıma ve aydınlatma tahmini için ağırlıklı varyasyonel model (WRI) [33]. Karşılaştırmanın tarafsızlığını ve geçerliliğini sağlamak amacıyla, kıyaslanan tüm yöntemler için orijinal yazarların sağladığı kaynak kodlar ve makalelerinde önerdikleri varsayılan parametre setleri kullanılmıştır. Bu bağlamda kullanılan yöntemler ve yapılandırma detayları şöyledir: BIMEF [29]: Pozlama oranı ve füzyon ağırlıkları için makaledeki varsayılan $\mu = 0,5$ ve standart sapma değerleri korunmuştur. LLV [30]: Düşük ışıklı video iyileştirme algoritması tekil görüntüye uyarlanarak kontrast iyileştirme katsayıları sabit tutulmuştur. LIME [31]: Aydınlatma haritası tahmininde kritik olan yapısal düzgünlük parametresi, yöntemin önerdiği standart değer olan $\alpha = 0,15$ olarak ayarlanmıştır. FBL [32]: Girdi görüntülerinin ağırlıklandırma katsayıları orijinal çalışmadaki optimize edilmiş değerler olarak alınmıştır. MSR [11]: Ölçekler arası bilgi kaybını önlemek için literatür standardı olan küçük, orta ve büyük ölçekler $\sigma = [15, 80, 250]$ kullanılmıştır. NAT [6]: Gürültü ve detay dengesini sağlayan eşik değerleri varsayılan ayarlarda bırakılmıştır. WRI [33]: Yansıma ve aydınlatma terimlerini dengeleyen düzenleme parametreleri, yöntemin orijinal konfigürasyonuna sadık kalınarak uygulanmıştır. Şekil 10’da bu parametreler ışığında elde edilen görsel sonuçların önerilen yöntemle karşılaştırması sunulmaktadır.

Yedi farklı mağara ortamı senaryosunu içeren Şekil 10 üzerinden yapılan nitel analizde, algoritmaların aydınlatma düzeltme, renk

koruma, doku belirginleştirme ve gürültü bastırma performansları şu şekilde değerlendirilmiştir:

Aşırı Pozlama ve Doygunluk Problemleri: LIME [31] ve FBL [32] yöntemleri incelendiğinde, özellikle 2, 4 ve 6 numaralı görüntülerde, görüntünün aydınlatma bileşenini artırırken aşırı doymunluğa ve parlak bölgelerde detay kaybına neden oldukları görülmektedir. Örneğin, 2 numaralı görüntüdeki mağaracının kask ışığı ve 6 numaralı görüntüdeki ışık kaynağı çevresi, LIME ve FBL yöntemlerinde patlamış ve doku bilgisi kaybolmuştur. Önerilen yöntem ise, Hessian filtresi tabanlı aydınlatma tahmini sayesinde parlak alanları koruyarak daha dengeli bir histogram dağılımı sunmaktadır.

Renk Doğruluğu ve Gri Pus Etkisi: MSR [11] ve BIMEF [29] algoritmaları, özellikle 1 ve 7 numaralı görüntülerde, parlaklığı artırmakla birlikte görüntünün genelinde gri bir pus etkisi yaratmakta ve kontrastın düşmesine neden olmaktadır. Bu durum, mağara duvarlarındaki jeolojik renklerin soluklaşmasına yol açmaktadır. Öte yandan LLV [30] yöntemi, özellikle 3 ve 4 numaralı görüntüler, sarı ve turuncu tonlarda yapay bir renk kaymasına neden olmaktadır. Önerilen yöntem, mağara duvarlarının doğal toprak tonlarını ve kayac yapısının karakteristik renklerini, yapay renk sapmalarına mahal vermeden korumayı başarmıştır.

Doku Detayları ve Gürültü Yönetimi: Düşük ışıklı mağara fotoğraflarının en büyük problemi, aydınlatma artırıldığında ortaya çıkan gürültüdür. NAT [6] ve WRI [33] yöntemleri gürültüyü baskılamada kısmen başarılı olsa da bu işlem sırasında kaya yüzeyindeki ince detayları yumuşattıkları gözlemlenmiştir. Önerilen yöntemde kullanılan anizotropik difüzyon filtresi, kenar koruma özelliği sayesinde düz alanlardaki gürültüyü baskımlarken, mağara duvarlarındaki girintili çıkıntılı dokusal detayları keskin tutmuştur. Bu durum, özellikle 3 ve 5 numaralı görüntülerdeki duvar işlemelerinin ve zemin dokusunun önerilen yöntemde diğerlerine kıyasla daha belirgin olmasıyla kanıtlanmaktadır.

Sonuç olarak; önerilen yöntem, LIME ve FBL’deki gibi aşırı parlama sorununa yol açmadan, MSR’deki kontrast kaybını yaşamadan ve LLV’deki renk bozulmalarından kaçınarak; karanlık mağara görüntülerinin bilimsel incelemeye uygun hale getirilmesinde optimum dengeyi sağlamaktadır.

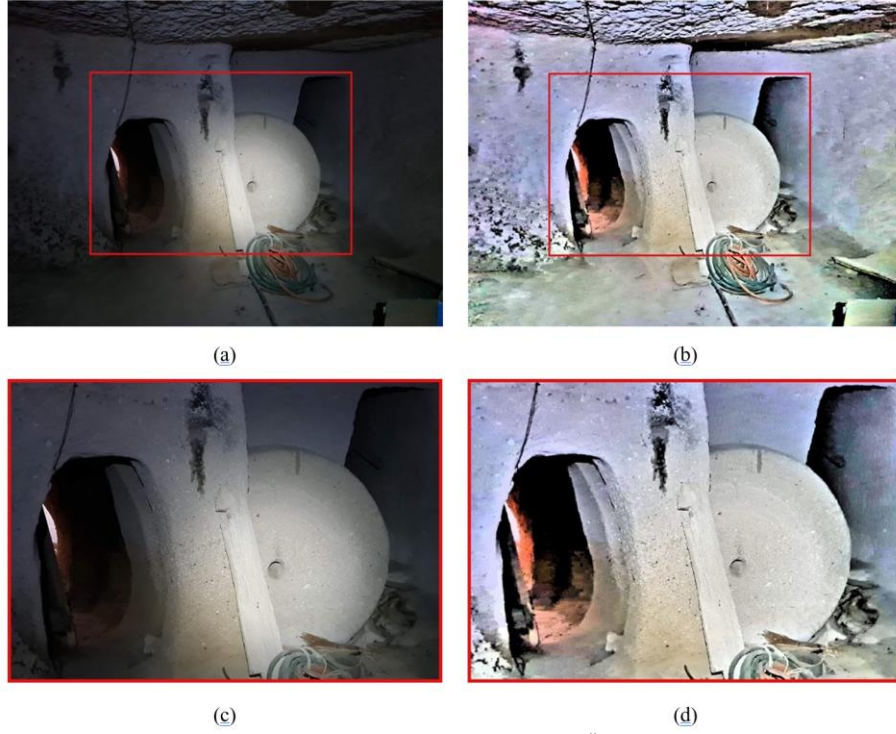
4.2. Nicel Değerlendirme (Qualitative Evaluation)

Önerilen yöntemin performansı önceki bölümde seçilen görseller aracılığıyla öznel olarak analiz edilmiştir. Bu bölümde, önerilen yöntemin performansının nesnel analizi referanslı ve referanssız yöntemler kullanılarak nicel değerlendirme yöntemi ile gerçekleştirilmektedir.

Önerilen yöntemin performansını nicel olarak analiz etmek için, bir önceki bölümde ayrıntılı olarak incelenen yedi görüntüyle sınırlamak yerine, daha gerçekçi bir performans analizi gerçekleştirmek amacıyla 83 adet aşırı düşük ışıklı, 1600 x 1200 çözünürlüklü, 24 bit renk derinliğine sahip, PNG formatlı düşük ışıklı mağara görsellerinden oluşan görüntü veri seti bu yedi görüntüye ilave edilerek kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan görüntü veri seti, yazar tarafından uzun yıllardır sahadaki gerçek mağaralardan elde edilmiştir. Sayısal analiz için aşağıda belirtilen yöntemler kullanılmıştır:

4.2.1. Ortalama Gradyan (Average Gradient)

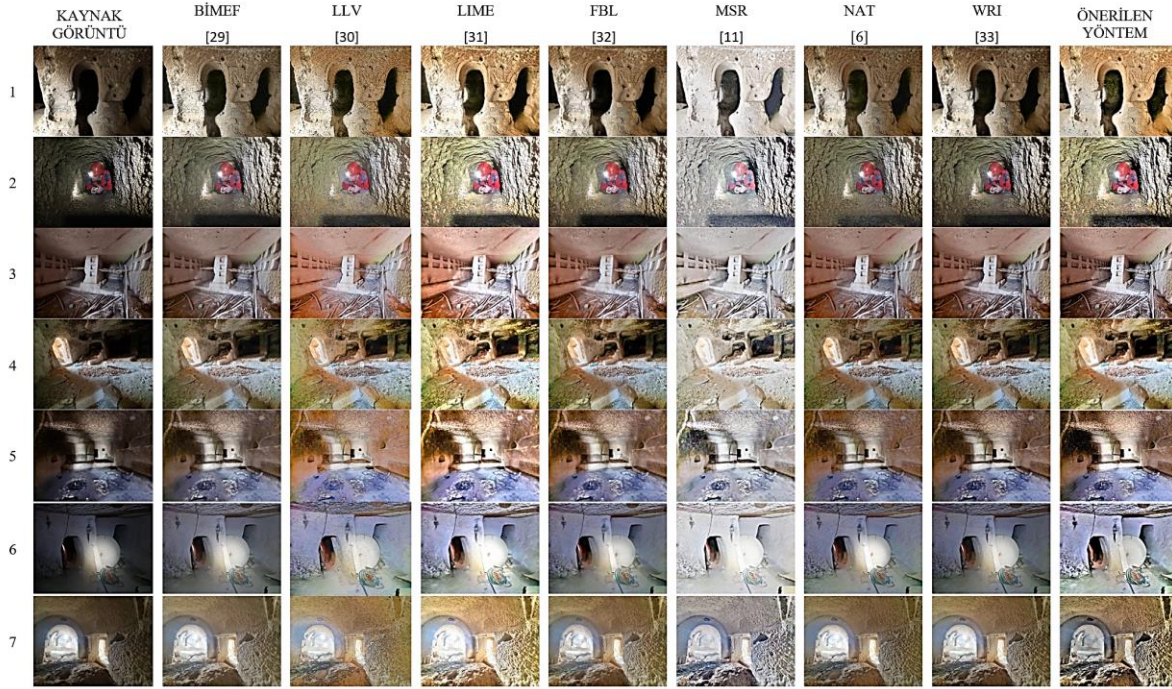
Ortalama gradyan, bir görüntünün gradyan boyutunu ölçen ve bu işlemi gerçekleştirirken her bitişik pikseli hesaba katan referanssız bir görüntü kalitesi analiz ölçüm yöntemidir.



Şekil 8. Yeraltı sığınağı ve kilit taşı (Resim 6) a. Orijinal RGB görüntüsü b. Önerilen yöntemin sonucu c. Kırmızı çerçevedeki büyütülmüş orijinal görüntü d. Kırmızı çerçevedeki büyütülmüş önerilen yöntem sonucu görüntüsü. *Fotoğraf: Bilgin Yazlık*
(Underground shelter and keystone (Image 6) a. Original RGB image b. Result of proposed method c. Enlarged original image in red frame d. Enlarged proposed method result image in red frame. *Photograph: Bilgin Yazlık*)



Şekil 9. Ayvalı Köyü Yakınlarındaki İsimsiz Kilise (Resim 7) a. Orijinal RGB Görüntüsü b. Önerilen Yöntemin Sonucu c. Kırmızı Çerçevedeki Büyütülmüş Orijinal Görüntü d. Kırmızı Çerçevedeki Büyütülmüş Önerilen Yöntemin Sonuç Görüntüsü. *Fotoğraf: Bilgin Yazlık*
(Unnamed Cave Church near Ayvalı Village (Image 7) a. Original RGB image b. Result of proposed method c. Enlarged original image in red frame d. Enlarged proposed method result image in red frame. *Photograph: Bilgin Yazlık*)



Şekil 10. Önerilen Yöntemin Farklı Son Teknoloji Düşük Işık İyileştirme Yöntemleriyle Nitel Karşılaştırması
(Qualitative Comparison of the Proposed Method with Different Stat-Of-The-Art Low Light Enhancement Methods)

Tablo 2. Ortalama Gradyan Analizi Sonuçları (Seçilmiş Görüntüler) (Average Gradient Analysis Results (Selected Images))

Görüntü	Kaynak	BİMEF [29]	LLV [30]	LIME [31]	FBL [32]	MSR [11]	NAT [6]	WRI [33]	Önerilen Yöntem
1	24,33	31,56	48,32	52,24	37,21	35,59	34,40	32,98	44,71
2	24,95	32,61	53,05	59,34	42,26	49,56	39,16	37,20	57,39
3	14,84	17,66	27,67	28,23	21,23	23,49	19,50	20,11	47,57
4	21,73	26,95	41,82	46,00	32,66	32,38	30,20	30,84	34,74
5	11,69	14,93	25,74	25,97	18,88	22,54	16,44	17,43	45,10
6	8,06	12,41	24,93	25,44	17,68	18,93	16,64	14,70	34,65
7	22,50	28,43	43,64	49,20	35,28	50,41	30,27	32,51	66,63
Ortalama	18,30	23,51	37,88	40,92	29,32	33,27	26,66	26,54	47,26

Ortalama gradyan Eş. 7'deki eşitlik ile hesaplanır.

$$AG = \frac{1}{(H-1)(W-1)} \sum_x \sum_y \frac{|G(x,y)|}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

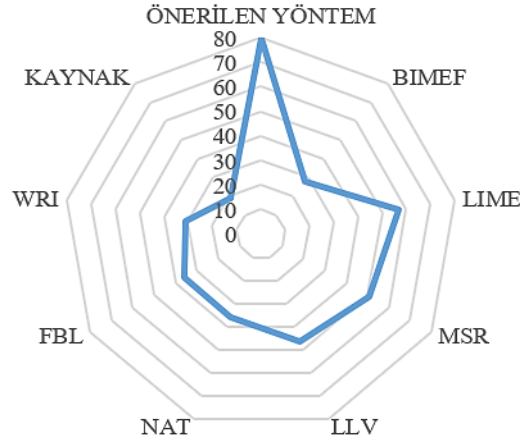
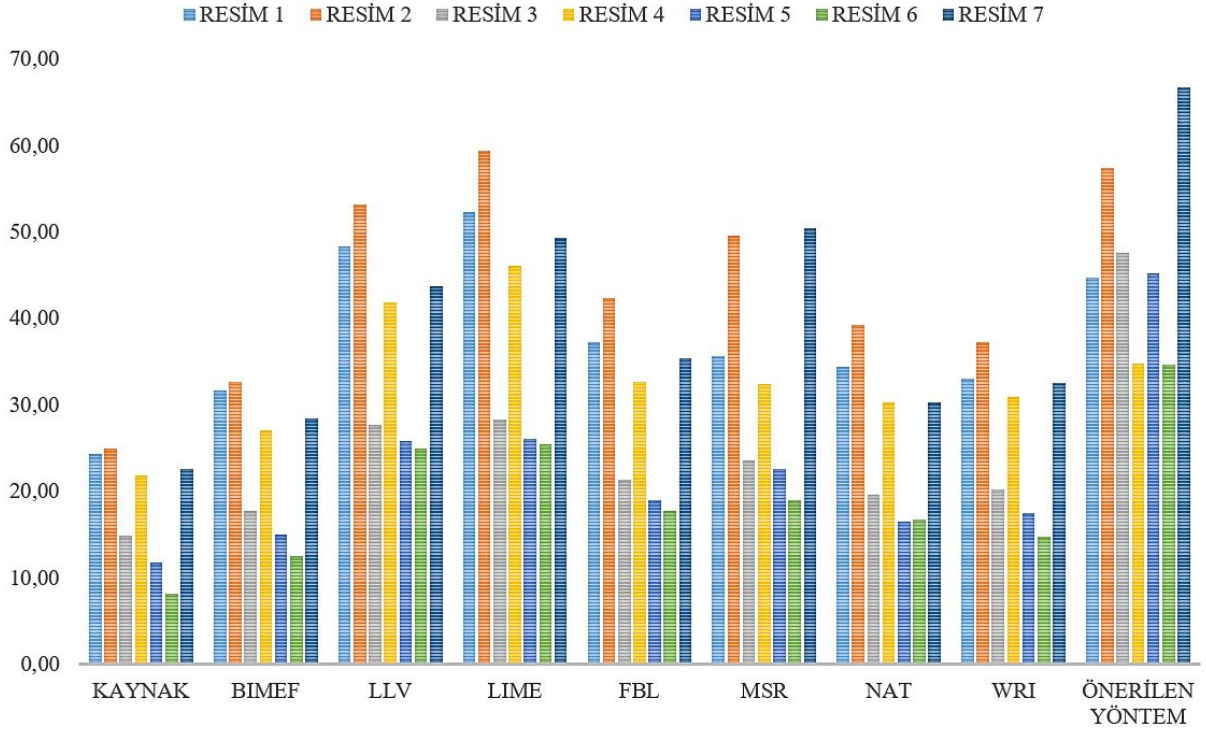
Bu eşitlikte, $H \times W$ görüntünün boyutunu ve $G(x,y)$ görüntünün gradyan vektörünü ifade etmektedir. Daha yüksek bir ortalama gradyan değeri, ışık iyileştirme açısından daha başarılı bir görüntüyü göstermektedir [34]. Analiz sonuçları sayısal olarak Tablo 2'de, grafiksel olarak ise Şekil 11'de sunulmuştur. En iyi sonuçlar italik yazıyla vurgulanmıştır. Önerilen yöntem incelenen yedi görüntünün dördünde en iyi performansı göstermiştir ve farklı modeller üç görüntüde en iyi performansı göstermiştir. Ortalama sonuçlara göre önerilen yöntem en başarılı sonucu elde etmiştir. Sonuçlar önerilen yöntemin ışık iyileştirme açısından ortalama en başarılı olduğunu doğrulamaktadır.

Görüntü seti üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 12'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Önerilen yöntem, mevcut tüm yöntemlere kıyasla en başarılı performansı göstermiştir.

4.2.2. Bilgi Entropisi (Information Entropy)

Entropi, gri tonlamalı görüntülere uygulanan referanssız bir görüntü kalitesi ölçüm aracıdır. Bir girdi görüntüsünün dokusunu tanımlamak için kullanılabilen istatistiksel öngörülemezliğin bir göstergesi entropi olarak adlandırılmaktadır. Daha temel, homojen bir görüntü düşük bir entropi değeriyle gösterilirken, çok çeşitli piksel değerlerine sahip karmaşık bir görüntü yüksek bir entropi değeriyle gösterilmektedir. Daha yüksek entropi değerleri genellikle daha karmaşık ve ayrıntılı görüntüler anlamına geldiğinden, entropi bir görüntünün kalitesini değerlendirmek için kullanılabilir [35]. Analiz sonuçları sayısal olarak Tablo 3'te ve grafiksel olarak Şekil 13'te sunulmuştur. En iyi sonuçlar italik olarak vurgulanmıştır. Önerilen yöntem incelenen yedi görüntünün beşinde en iyi performansı ve iki görüntüde ikinci en iyi performansı göstermiştir.

Sonuç olarak önerilen yöntem ortalama sonuçlara göre en iyi sonucu elde etmiştir. Bu da önerilen yöntemin görüntülerdeki detayı artırma açısından başarılı olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 12. Ortalama Gradyan Analizi Sonuçları (Veri Seti) (Average Gradient Analysis Results (Dataset))

Tablo 3. Bilgi Entropisi Analizi Sonuçları (Seçilmiş Görüntüler) (Information Entropy Analysis Results (Selected Images))

Görüntü	Kaynak	BİMEF [29]	LLV [30]	LIME [31]	FBL [32]	MSR [11]	NAT [6]	WRI [33]	ÖNERİLEN YÖNTEM
1	7,41	7,71	7,66	7,73	7,76	7,31	7,55	7,79	7,66
2	7,15	7,52	7,57	7,58	7,70	7,68	7,38	7,59	7,88
3	7,27	7,41	7,26	7,52	7,41	7,25	7,37	7,53	7,86
4	7,43	7,67	7,59	7,75	7,71	7,45	7,48	7,71	7,77
5	7,15	7,41	7,19	7,64	7,48	7,43	7,15	7,46	7,85
6	6,74	7,11	7,13	7,45	7,20	6,82	6,93	7,21	7,38
7	7,25	7,34	7,40	7,39	7,40	7,66	7,29	7,51	7,87
Ortalama	7,20	7,45	7,40	7,58	7,52	7,37	7,31	7,54	7,75

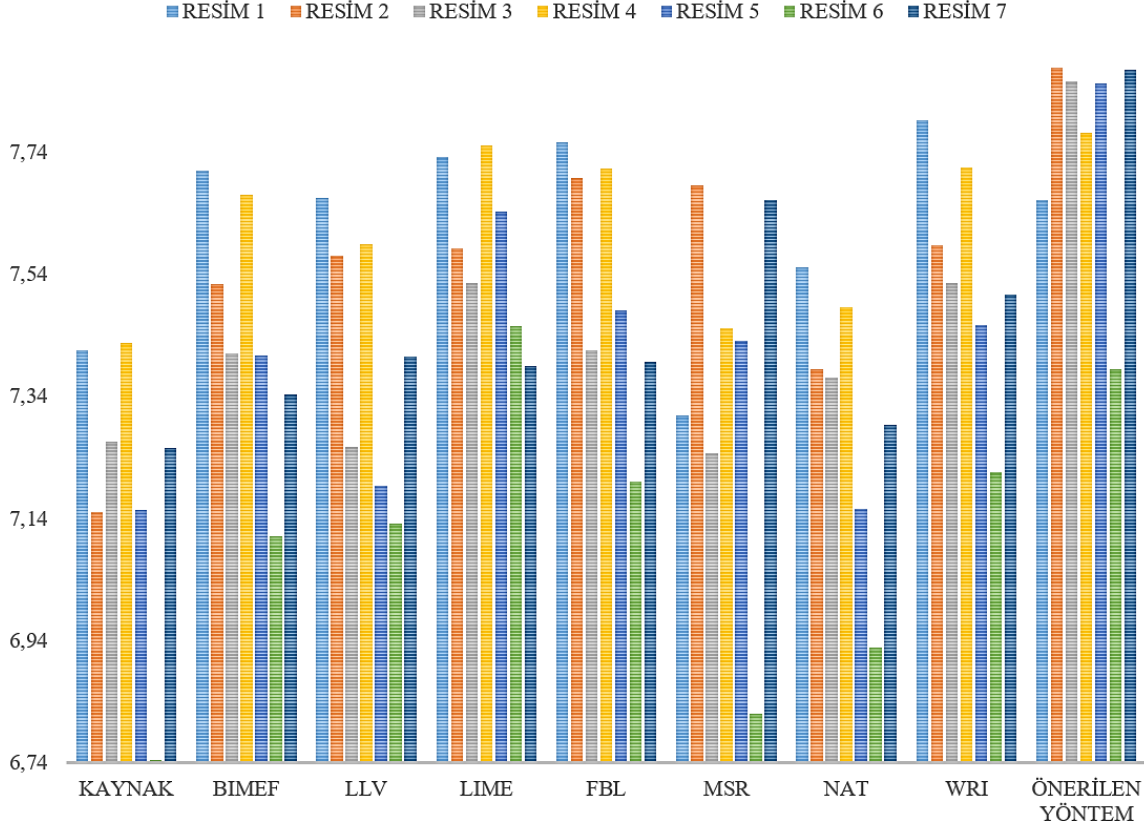
Görüntü veri seti üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 14'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Önerilen yöntem, mevcut tüm yöntemlere kıyasla en başarılı performansı göstermiştir.

4.2.3. Varyans (Variance)

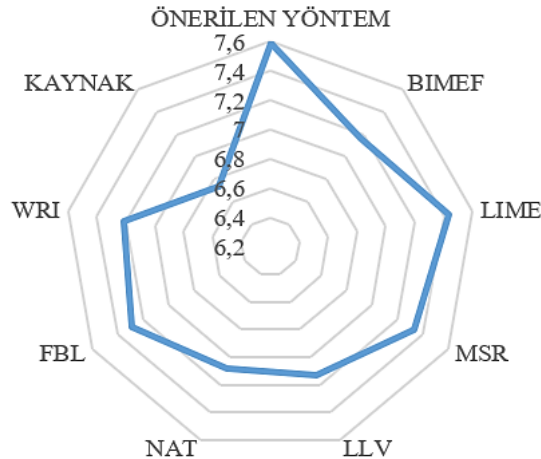
Varyans, referans dışı görüntü kalitesi ölçüm analiz yöntemidir. Bir görüntüdeki piksel değerlerinin geniş aralığı, daha yüksek bir varyans değeriyle gösterilmekte, daha fazla kontrast ve ayrıntı anlamına gelmektedir. Daha düzgün, düz bir görünüm, daha küçük bir varyansla ifade edilmektedir [36]. Analiz sonuçları sayısal olarak Tablo 4'te, grafiksel olarak ise Şekil 15'te sunulmuştur. En iyi sonuçlar tabloda

italik olarak vurgulanmıştır. Önerilen yöntem incelenen yedi görüntünün beşinde diğer modellerden daha iyi sonuçlar üretmiştir ve iki görüntüde LIME modelinden sonra ikinci en başarılı model olmuştur. Sonuç olarak, önerilen yöntem ortalama değerlerde en başarılı model olarak ortaya çıkmıştır. Bu, önerilen yöntemin ışığı iyileştirmenin yanı sıra ayrıntıyı artırmada başarılı olduğunu doğrulamaktadır.

Görüntü veri seti üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 16'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Önerilen yöntem, tüm güncel yöntemlere kıyasla en başarılı performansı göstermiştir.



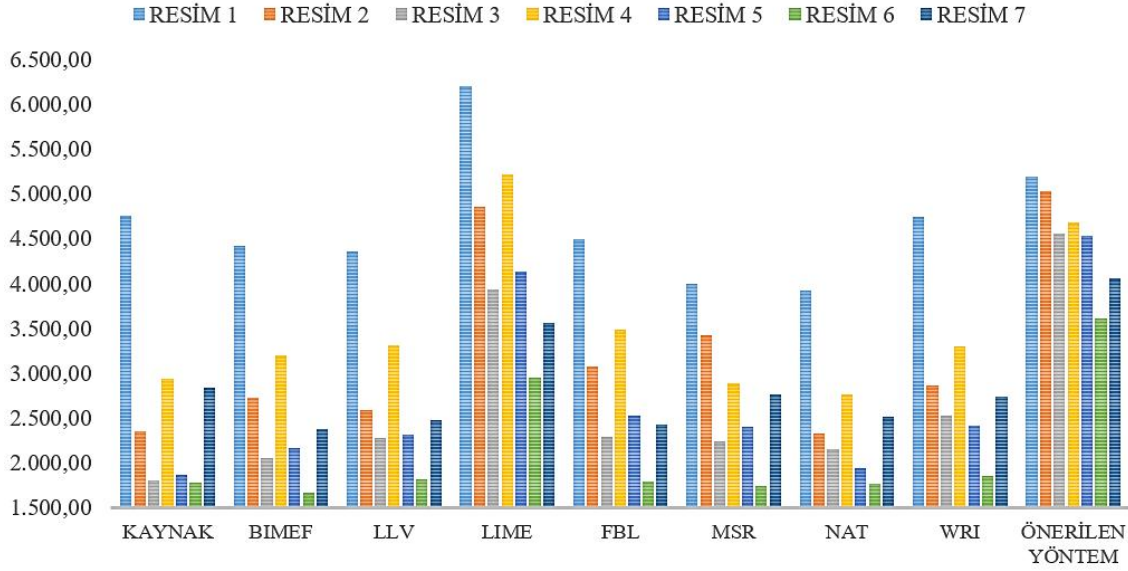
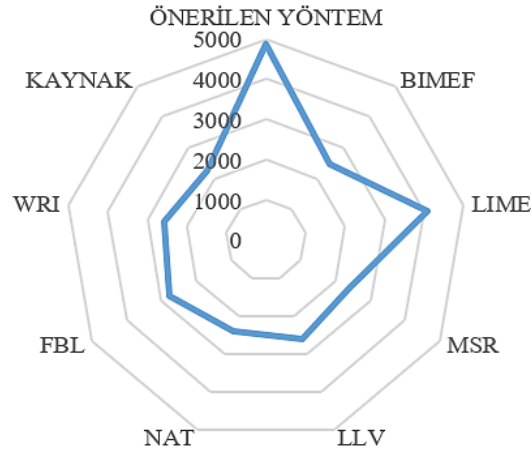
Şekil 13. Bilgi Entropisi Analizi Sonuçları (Seçilmiş Görüntüler) (Information Entropy Analysis Results (Selected Images))



Şekil 14. Bilgi Entropisi Analizi Sonuçları (Veri Seti) (Information Entropy Analysis Results (Dataset))

Tablo 4. Varyans Analizi Sonuçları (Seçilmiş Görüntüler) (Variance Analysis Results (Selected Images))

Görüntü	Kaynak	BİMEF [29]	LLV [30]	LIME [31]	FBL [32]	MSR [11]	NAT [6]	WRI [33]	ÖNERİLEN YÖNTEM
1	4.759,31	4.419,24	4.357,55	6.200,63	4.487,94	4.000,64	3.924,66	4.746,31	5.187,51
2	2.349,91	2.721,21	2.580,77	4.858,95	3.078,03	3.424,04	2.321,16	2.860,55	5.034,32
3	1.803,57	2.055,01	2.273,28	3.933,36	2.285,45	2.238,98	2.154,26	2.521,91	4.554,04
4	2.940,51	3.201,78	3.311,54	5.213,02	3.481,86	2.883,65	2.760,92	3.290,53	4.681,84
5	1.862,28	2.165,88	2.308,20	4.132,49	2.525,27	2.399,20	1.931,25	2.407,11	4.535,58
6	1.779,34	1.661,70	1.813,21	2.952,35	1.789,45	1.733,10	1.757,41	1.849,73	3.603,78
7	2.830,96	2.376,96	2.475,81	3.559,56	2.418,18	2.755,69	2.516,32	2.737,11	4.057,63
Ortalama	2.617,98	2.657,40	2.731,48	4.407,19	2.866,60	2.776,47	2.480,85	2.916,18	4.522,10

**Şekil 15.** Varyans Analizi Sonuçları (Seçilmiş Görüntüler) (Variance Analysis Results (Selected Images))**Şekil 16.** Varyans Analizi Sonuçları (Veri Seti) (Variance Analysis Results (Dataset))

4.2.4. Görsel Bilgi Doğruluğu (VIF) (Visual Information Fidelity)

VIF yöntemi, referans görüntü olan C ile iyileştirilmiş görüntü olan F arasındaki karşılıklı bilgiyi, HVS verisi kullanılarak elde edilen bilgi ile kıyaslayarak ölçen bir kalite ölçütüdür. Bu yöntem kapsamlı bir referans görüntü kalitesi değerlendirmesi sağlamaktadır. Bu makalede, Görsel Bilgi Doğruluğu (VIF) [37] orijinal görüntüyü

bozulmuş görüntü ve iyileştirilmiş görüntüyü referans olarak belirleyerek görsel bilginin bozulmasını ölçmek için rutin kullanımının aksine ters modda kullanılmıştır. VIF Eş. 8 ile hesap edilmektedir.

$$VIF = \frac{I(C;F)}{I(C;E)'} \quad (8)$$

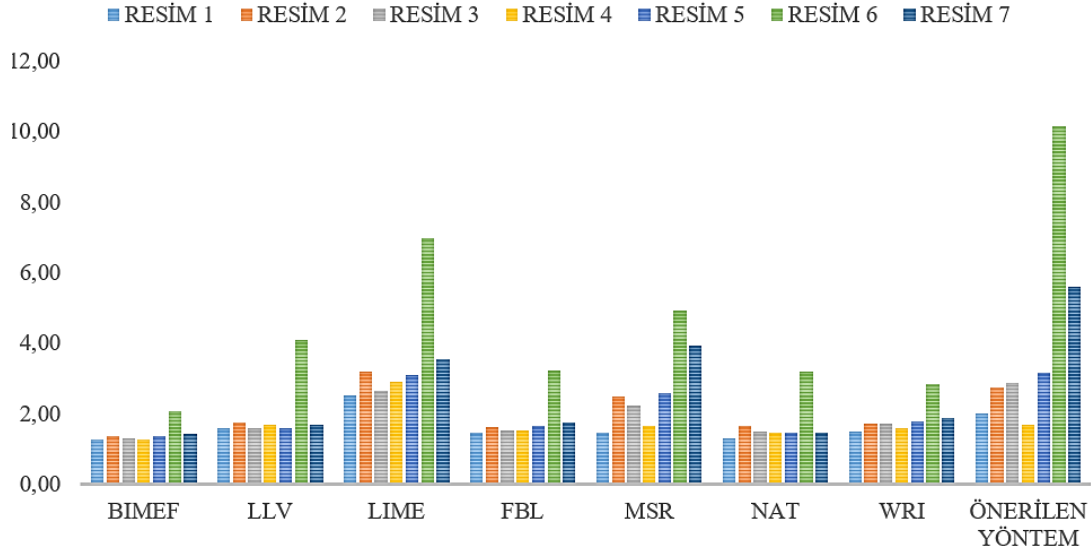
İnsan bakışı ile referans görüntüden elde edilen bilgi I(C;F) ve test görüntülerinden elde edilen bilgi I(C;E) ile gösterilmektedir. VIF, doğrusal olmayan görüntü iyileştirme algoritmalarının kalite analiz çalışmalarında başarılı sonuçlar üretmektedir [38]. Önerilen yöntem, VIF parametresi açısından incelenen yedi görüntünün dördünde diğer modellerden daha iyi sonuçlar üretmiştir (en iyi sonuçlar tabloda italik olarak vurgulanmıştır) ve üç görüntüde, Tablo 5 ve Şekil 17'de belirtildiği gibi LIME modelinden sonra ikinci en başarılı model

olmuştur. Sonuç olarak, önerilen yöntem ortalama verilerde en başarılı model olarak ortaya çıkmıştır. Bu tablo, önerilen yöntemin görüntülerin görsel bilgilerini etkili bir şekilde koruyabildiğini göstermektedir.

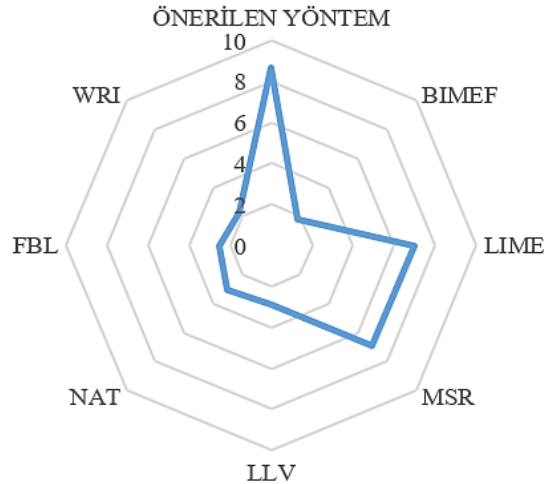
Görüntü veri seti üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 18'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Önerilen yöntem, mevcut tüm yöntemlere kıyasla en başarılı performansı göstermiştir.

Tablo 5. VIF Analiz Sonuçları (Seçilmiş Görüntüler) (VIF Analysis Results (Selected Images))

Resim	BİMEF [29]	LLV [30]	LIME [31]	FBL [32]	MSR [11]	NAT [6]	WRI [33]	ÖNERİLEN YÖNTEM
1	1,24	1,56	2,52	1,44	1,46	1,28	1,49	1,99
2	1,35	1,75	3,17	1,61	2,46	1,62	1,69	2,74
3	1,28	1,59	2,65	1,5	2,2	1,47	1,69	2,87
4	1,27	1,67	2,89	1,51	1,65	1,44	1,58	1,65
5	1,35	1,58	3,09	1,65	2,55	1,44	1,76	3,16
6	2,04	4,08	6,96	3,22	4,91	3,19	2,82	10,14
7	1,41	1,66	3,54	1,74	3,93	1,46	1,86	5,57
Ortalama	1,42	1,98	3,54	1,81	2,74	1,7	1,84	4,02



Şekil 17. VIF Analiz Sonuçları (Seçilmiş Görüntüler) (VIF Analysis Results (Selected Images))



Şekil 18. VIF Analiz Sonuçları (Veri Seti) (VIF Analysis Results (Dataset))

Tablo 6. Nicel Analiz En İyi Sonuçları (Seçilmiş Görüntüler) (Quantitative Analysis Best Results (Selected Images))

	Ortalama Gradyan	Bilgi Entropisi	Varyans	VİF
Resim 1	LIME [31]	WRI [33]	LIME [31]	LIME [31]
Resim 2	LIME [31]	ÖNERİLEN YÖNTEM	ÖNERİLEN YÖNTEM	ÖNERİLEN YÖNTEM
Resim 3	ÖNERİLEN YÖNTEM	ÖNERİLEN YÖNTEM	ÖNERİLEN YÖNTEM	ÖNERİLEN YÖNTEM
Resim 4	LIME [31]	ÖNERİLEN YÖNTEM	LIME [31]	LIME [31]
Resim 5	ÖNERİLEN YÖNTEM	ÖNERİLEN YÖNTEM	ÖNERİLEN YÖNTEM	ÖNERİLEN YÖNTEM
Resim 6	ÖNERİLEN YÖNTEM	LIME [31]	ÖNERİLEN YÖNTEM	ÖNERİLEN YÖNTEM
Resim 7	ÖNERİLEN YÖNTEM	ÖNERİLEN YÖNTEM	ÖNERİLEN YÖNTEM	ÖNERİLEN YÖNTEM

Tablo 7. Nicel Analiz En İyi Sonuçları (Veri Seti) (Quantitative Analysis Best Results (Dataset))

	Ortalama Gradyan	Bilgi Entropisi	Varyans	VİF
Veri Seti	Önerilen Yöntem	Önerilen Yöntem	Önerilen Yöntem	Önerilen Yöntem

Tablo 8. Kantitatif Analiz Ortalama Sonuçları (Seçilmiş Görüntüler) (Quantitative Analysis Average Results (Selected Images))

	Kaynak	BİMEF [29]	LLV [30]	LIME [31]	FBL [32]	MSR [11]	NAT [6]	WRI [33]	ÖNERİLEN YÖNTEM
Varyans (↑)	2.617,98	2.657,40	2.731,48	4.407,19	2.866,60	2.776,47	2.480,85	2.916,18	4.522,10
Bilgi Entropisi (↑)	7,20	7,45	7,40	7,58	7,52	7,37	7,31	7,54	7,75
Ortalama Gradyan (↑)	18,98	28,19	46,36	56,70	35,63	50,85	36,19	31,20	79,65
VİF (↑)	-	1,42	1,98	3,54	1,81	2,74	1,7	1,84	4,02

Tablo 9. Kantitatif Analiz Ortalama Sonuçları (Veri Seti) (Quantitative Analysis Average Results (Dataset))

	Kaynak	BİMEF [29]	LLV [30]	LIME [31]	FBL [32]	MSR [11]	NAT [6]	WRI [33]	ÖNERİLEN YÖNTEM
Varyans (↑)	2.276,74	2.454,49	2.597,91	4.078,34	2.768,21	2.382,26	2.401,53	2.583,98	4.869,72
Bilgi Entropisi (↑)	6,74	7,16	7,13	7,44	7,29	7,33	7,08	7,21	7,59
Ortalama Eğim (↑)	18,30	23,51	37,88	40,92	29,32	33,27	26,66	26,54	47,26
VİF (↑)	-	1,80	2,86	6,98	2,52	6,93	3,06	2,23	8,65

Tablo 6, nicel analize tabi tutulan görüntülerde hangi yöntemlerin en başarılı olduğunu göstermektedir. Tabloya göre önerilen yöntem, tabloda listelenen kalite ölçüm parametreleri açısından, mevcut yedi yöntem arasında %68 (toplam 28 sonucun 19'unda en iyi) başarı oranına sahiptir. İkinci en başarılı yöntem olarak ortaya çıkan LIME yönteminin başarı oranı %28,57'dir (28 sonuçtan 8'inde en iyi). Tablo 6 incelendiğinde, özellikle güçlü arka plan ışığına sahip Resim 1 ve Resim 4 gibi sahnelerde LIME yönteminin Ortalama Gradyan ve Varyans metriklerinde daha yüksek skorlar elde ettiği görülmektedir. Ancak bu durum, LIME yönteminin başarısından ziyade, LIME algoritmasının karanlık bölgelerdeki gürültüyü aşırı yükselterek sahte kenar bilgisi oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Yüksek gradyan değerleri, gürültü piksellerinin keskin geçişlerinden kaynaklanmaktadır. Buna karşın önerilen yöntem, içerdiği anizotropik difüzyon filtresi sayesinde gürültüyü başarılı bir şekilde bastırmaktadır. Gürültünün bastırılması, matematiksel olarak gradyan ve entropi skorlarında bir miktar düşüşe neden olsa da görsel algı kalitesini (bkz. Şekil 10) ve detayların seçilebilirliğini artırmaktadır. Dolayısıyla Resim 1 ve 4'teki düşük skorlar, önerilen yöntemin gürültü üretmeme kararlılığının bir göstergesidir."

Tablo 7, nicel analize tabi tutulan görüntü veri setinde hangi yöntemlerin en başarılı olduğunu göstermektedir. Tabloya göre önerilen yöntem, tabloda listelenen tüm kalite ölçüm parametreleri açısından, analiz konusu edilen yedi yöntem arasında en iyi performansa sahiptir.

Tablo 8, seçilen görüntüler için tüm görüntü kalitesi analiz parametrelerinin ortalama sonuçlarını göstermektedir. En iyi sonuçlar

italik olarak vurgulanmıştır. Farklı kalite ölçümleri sonucunda önerilen yöntem, ortalama olarak tüm kalite ölçüm yöntemleri içerisinde en başarılı sonuçları üretmiştir.

Tablo 9, görüntü veri seti için tüm görüntü kalitesi analiz parametrelerinin ortalama sonuçlarını göstermektedir. En iyi sonuçlar italik olarak vurgulanmıştır. Farklı kalite ölçümleri sonucunda önerilen yöntem ortalama olarak tüm kalite ölçüm yöntemleri içerisinde en başarılı sonuçları üretmiştir.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Mağaralar doğal yapıları gereği doğal ışık almayan karanlık ve çok dar alanlardır. Bu nedenle mağara görüntüleri aşırı düşük ışıklı görüntülerdir. Bu çalışmada düşük ışıklı görüntülerin iyileştirilmesi için Hessian ve anizotropik difüzyon filtreleme kullanan Retineks algoritması ilk defa uygulanmıştır. Önerilen yöntemin performansı, düşük ışıklı mağara görüntülerine uygulanarak ve Retineks tabanlı güncel modellerle karşılaştırılarak test edilmiştir. Nitel ve nicel analiz sonuçlarına göre önerilen yöntem ortalama olarak başarılı performans göstermektedir. Önerilen yöntem, varyans, bilgi entropisi, ortalama gradyan ve görsel bilgi doğruluğu değerleri açısından düşük ışık koşullarında görüntü iyileştirmede başarılı olmuştur. Önerilen yöntem, seçilen görüntüler için tüm nicel analizlerin %68'inde en iyi sonuçları üretmektedir. Önerilen yöntem ayrıca, 83 adet düşük ışıklı mağara görüntüsü kullanılarak gerçekleştirilen nitel analizlere göre, güncel yöntemlerle karşılaştırıldığında en iyi performansı sergilemiştir. Önerilen model ışığın iyileştirilmesine ek olarak

görüntüdeki doğal renkleri korumakta ve doku detay ayrıntılarını başarıyla artırmaktadır. Önerilen yöntemle iyileştirilen düşük ışıklı mağara görüntülerinin orijinallerine kıyasla araştırmacılara daha fazla ayrıntı sağladığı sonucuna varılmıştır. Modelin dezavantajları, aşırı düşük ışıklı alanlarda gürültü oluşturmaları ve keskin çizgilerin bulanıklaşmasına neden olmasıdır. Önerilen yöntemin farklı düşük ışıklı görüntü kategorilerindeki performansının araştırılması ileri araştırmalara konu edilecektir.

Veri Erişilebilirliği: Bu çalışmada kullanılan, yazarlara ait mağara görüntü veri seti şu adresten indirilebilir:
<https://doi.org/10.57760/sciencedb.28326>

Kaynaklar (References)

- White W. B., Culver D.C. Chapter 29 - Definition of Cave, Encyclopedia of Caves (Third Edition), Academic Press, 255–259, 2019.
- Neal J. C. R., Brent F., The Image Processing Handbook, 7th Edition. Boca Raton, CRC Press, 2017.
- Zhang Y., Guo X., Ma J., Liu W., Zhang J., Beyond Brightening Low-light Images, International Journal of Computer Vision, 129 (4), 1013–1037, 2021.
- Wang J., Wang H., Sun Y., Yang J., Improved Retinex-Theory-Based Low-Light Image Enhancement Algorithm, Applied Sciences, 13 (14), 2023.
- Jobson D. J., Rahman Z., Woodell G. A., A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes, IEEE Transactions on Image Processing, 6 (7), 965–976, 1997.
- Wang S., Zheng J., Hu, Li B., Naturalness Preserved Enhancement Algorithm for Non-Uniform Illumination Images, IEEE Transactions on Image Processing, 22 (9), 3538–3548, 2013.
- Muniraj M., Dhandapani V., Underwater image enhancement by color correction and color constancy via Retinex for detail preserving, Computers and Electrical Engineering, 100, 2022.
- Ma T., Fu C., Yang J., Zhang J., Shang C., RF-Net: Unsupervised Low-Light Image Enhancement Based on Retinex and Exposure Fusion, Computers, Materials & Continua, 77 (1), 1103–1122, 2023.
- Fu H., Zheng W., Meng X., Wang X., Wang C., Ma H., You Do Not Need Additional Priors or Regularizers in Retinex-Based Low-Light Image Enhancement, Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 18125–18134, 2023.
- Atik İ. İ., Pneumonia detection on chest x-ray images using residual convolutional neural network, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (3), 1719–1732, 2024.
- Petro A. B., Sbert C., Morel J., Multiscale Retinex, Image Processing on Line, 71–88, 2014.
- Katircioğlu F., Düşük-Işıklı Renkli Görüntülerin İyileştirilmesinde Kullanılan Retineks Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi, 3 (2), 2021.
- Cao N., Restoration method of sootiness mural images based on dark channel prior and Retinex by bilateral filter, Heritage Science, 9 (30), 2021.
- Deng L., Zhu H., Yang Z., Li Y., Hessian matrix-based fourth-order anisotropic diffusion filter for image denoising, Optics & Laser Technology, 110, 184–190, 2019.
- Avcı K., Kaiser-Hamming pencere yapısı ve Huang dönüşümü kullanılarak iki boyutlu sayısal süzgeç tasarımı ve imge iyileştirme uygulaması, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (4), 1459–1474, 2018.
- Altun A. A., Allahverdi N., Filtreleme Teknikleri ile İyileştirilmiş Parmakizlerini Yapay Sinir Ağları ile Tanımda Yeni Bir Yaklaşım, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 22 (2), 2013.
- Wang W., Lane Line Extraction in Raining Weather Images by Ridge Edge Detection with Improved MSR and Hessian Matrix, Information Technology and Control, 50 (4), 2021.
- Akbulut H., Aslantaş V., Evrişimli sinir ağı kullanarak çoklu-pozlamalı görüntü birleştirme, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (3), 1439–1452, 2023.
- Jumakulyyev I., Schultz T., Fourth-Order Anisotropic Diffusion for Inpainting and Image Compression, Anisotropy Across Fields and Scales, 99–124, 2021.
- Nnolim U., Entropy-guided Retinex anisotropic diffusion algorithm based on partial differential equations (PDE) for illumination correction, ArXiv, 2017, 2024.
- Sagvold P., Farup I., Pedersen M., Spatio-Temporal Retinex-Inspired Envelopes with Anisotropic Diffusion, Journal of Imaging Science and Technology, 67, 1–18, 2023.
- Land E. H., McCann J. J., Lightness and Retinex Theory, Journal of Optical Society of America, 61 (1), 1–11, 1971.
- Funt B., Ciurea F., McCann J., Retinex in Matlab, Journal of Electronic Imaging, 13, 48–57, 2004.
- Rahman Z., Jobson D. J., Woodell G. A., Multi-scale retinex for color image enhancement, Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing, 1003–1006 vol.3, 1996.
- Hjørungnes A., Complex Hessian Matrices for Scalar, Vector, and Matrix Functions, Complex-Valued Matrix Derivatives, Applications in Signal Processing and Communications, Cambridge University Press, 95–132, 2011.
- Ouwkerk J. D., Image super-resolution survey, Image and Vision Computing, 24 (10) 1039–1052, 2006.
- Perona P., Malik J., Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 12 (7), 629–639, 1990.
- Athanasiou L. S., Fotiadis D. I., Michalis L. K., 6 - Plaque Characterization Methods Using Computed Tomography, Atherosclerotic Plaque Characterization Methods Based on Coronary Imaging, Oxford Academic Press, 115–129, 2017.
- Ying Z., Li G., Gao W., A Bio-Inspired Multi-Exposure Fusion Framework for Low-light Image Enhancement, 2017.
- Dong X., Fast efficient algorithm for enhancement of low lighting video, 2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 1–6, 2011.
- Guo X., Li Y., Ling H., LIME: Low-Light Image Enhancement via Illumination Map Estimation, IEEE Transactions on Image Processing, 26 (2), 982–993, 2017.
- Fu X., Zeng D., Huang Y., Liao Y., Ding X., Paisley J., A fusion-based enhancing method for weakly illuminated images, Signal Processing, 129, 82–96, 2016.
- Fu X., Zeng D., Huang, Y., Zhang X. Ding X., A Weighted Variational Model for Simultaneous Reflectance and Illumination Estimation, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2782–2790, 2016.
- Pradham P., Younan N. H., King R. L., 16 - Concepts of image fusion in remote sensing applications, Image Fusion, Oxford Academic Press, 393–428, 2008.
- Tsai D. Y., Lee Y., Matsuyama E., Information Entropy Measure for Evaluation of Image Quality, Journal of Digital Imaging, 21 (3), 338–347, 2008.
- Aja-Fernández S., Estépar R. S. J., López C., Westin C.F., Image quality assessment based on local variance, Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society., 2006, 4815–4818, 2006.
- Sheikh H. R., Bovik A. C., Image information and visual quality, IEEE Transactions on Image Processing, 15 (2), 430–444, 2006.
- Kumar P. A., Sankaran P., Visual Information Fidelity in evaluating Retinex enhancement algorithms, 2014 International Conference on Communication and Signal Processing, 2014.

