

Sanal Pozlama ile Su Altı Görüntü İyileştirme Virtual Exposure Based Underwater Image Enhancement

*Nur Hüseyin Kaplan, Sefa Kucuk, Nagihan Severoglu and Yasin Demir

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Erzurum Technical University, Erzurum, Türkiye.

Özet:

Su altı görüntüleme sistemleri, su altının karmaşık yapısından ve ışığın dalga boyuna bağlı emilim ve yansıma gibi sorunlardan kaynaklı olarak, karışıklığı ve görünürlüğü düşük, yapay renkli görüntüler elde etmektedirler. Elde edilen bu görüntüler; başta insan görsel algısı olmak üzere ileri görüntü işleme uygulamalarını olumsuz etkilemektedirler. Bu sorunları gidermek amacıyla sanal pozlamaya dayalı bir su altı görüntü iyileştirme yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem ilk olarak, gama düzeltmesi ile sanal pozlanmış görüntüler elde etmiştir. Elde edilen sanal pozlu görüntüler, kılavuzlu filtre yardımıyla düşük ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılmıştır. Bu düşük frekanslı bileşenlere histogram germe uygulanırken, yüksek frekanslı bileşenlerin en yüksek değerleri seçilerek yeni bileşenler üretilmiştir. Elde edilen yeni bileşenler birleştirilerek, iyileştirilmiş görüntü elde edilmiştir. Yöntemin performansını ölçmek amacıyla, literatürde kullanılan yöntemlerle karşılaştırmalar yapılmıştır. Önerilen yöntemin PSNR olarak en iyi olduğu gözlemlenirken, SSIM değeri tatmin edici düzeydedir. Ayrıca görsel sonuçlar, önerilen yöntemin renkleri korurken kenar bilgilerini geliştirdiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Su altı görüntü iyileştirme, sanal pozlama, su altı görüntüleme

Abstract:

Images captured by underwater imaging systems generate images with low contrast and low visibility due to the complex structure of the underwater and problems such as absorption and reflection rates depending on the wavelength of light. Underwater images with these problems negatively affect the human visual system, as well as the advanced image processing applications. In order to eliminate aforementioned problems, an underwater image enhancement method based on virtual exposure has been proposed. This method first obtains virtual exposure images with a simple gamma correction method. The obtained virtual exposure images are decomposed into low and high frequency components with the help of a guided filter. While histogram stretching is applied to the obtained low frequency components, a maximum selection procedure is applied to the high frequency components to obtain enhanced low and high frequency images. The obtained new images are combined to obtain the final enhanced image. To determine the performance of the proposed method, comparisons have been made with several methods. The proposed method is the best in terms of PSNR with a satisfactory SSIM value. Moreover, visual comparison results reveal that the proposed method improves edge information while preserving colors.

Keywords: Underwater image enhancement, virtual exposure, underwater imaging

1. Giriş

Son yıllarda su altı görüntüleme sistemleri deniz çevresinin izlenmesi ve korunması, su altı arkeolojisi, su altı robotları, deniz tabanı haritalama gibi birçok alanda kullanılmaktadır [1-3]. Ancak su altı görüntüleri renk yapaylıkları, düşük karışıklık ve bulanık detaylar gibi sorunlarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu durum, su altının karmaşık doğasından ve ışık üzerindeki ileri ve geri

*Corresponding author: Address: Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering Erzurum Technical University, 25050, Erzurum TURKIYE. E-mail address: huseyin.kaplan@erzurum.edu.tr, Phone: +90 442 444 5388-2426

saçılma dahil olmak üzere dalga boyuna bağlı emilim ve saçılmadan kaynaklanmaktadır [1,4-7]. Bu sorunlar; hedef tanıma ve izleme, sınıflandırma, algılama, segmentasyon, sahne anlama gibi bilgisayarlı görü görevlerinin performansı olumsuz etkilemektedir [2-3]. Sonuç olarak, su altı görüntü iyileştirme (SGİ) yöntemleri ve bu alandaki en son teknolojik ilerlemeler, su altı dünyasını doğru bir şekilde anlamak ve görsel kaliteyi artırmak için son derece önemlidir. Su altı görüntülerinin bozulmasına neden olan iki ana faktör vardır. Bu faktörlerden birincisi ileri ve geri saçılma. İleri saçılma bulanık görüntülere neden olurken, geri saçılma görüntü kenarlarını ve ayrıntılarını azaltmaktadır. Diğer faktör, optik dalga boyuna, çözünmüş organik bileşiklere ve tuz konsantrasyonuna bağlı olan ışığın zayıflamasıdır. Bu da farklı renk tonlarına neden olmaktadır. Özellikle, en uzun dalga boyuna ve en düşük enerjiye sahip olan kırmızı ışık daha fazla emilirken, mavi ve yeşil ışık için durum bunun tersidir. Bu yüzden su altı görüntüleri mavimsi ve/veya yeşilimsi olma eğilimindedir [8-9].

Genel olarak, SGİ yöntemleri üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Bu yöntemler; fiziksel model tabanlı yöntemler, fiziksel olmayan model tabanlı yöntemler ve veri-güdümlü yöntemlerdir [1,6,8,10]. Fiziksel model tabanlı yöntemler [11-15], su altı görüntülerinin oluşum sürecini fiziksel yasalara göre açıklamaktadır. Bu yöntemlerin temel amacı ortam iletimini tahmin etmektir. Fiziksel olmayan model tabanlı yöntemler [16-19], su altı görüntü oluşum mekanizmasını göz ardı ederek, bozulmuş görüntülerin piksel değerlerini ayarlayarak su altı görüntülerinin renk, keskinlik ve kontrastını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Son yıllarda, derin öğrenme tabanlı yöntemler [20-22] su altı görüntüleri iyileştirmek için etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, su altı görüntü verilerinin azlığı, su altı görüntü senaryolarının azlığı ve gerçek su altı dünyasını yansıtmayan görüntülerle yapılan çalışmalar bu yöntemlerin performansını sınırlamaktadır.

Fiziksel model tabanlı yöntemleri kullanan araştırmacılar görüntü kalitesini üç adımla iyileştirirler: (i) görüntü bozulmasına neden olan fiziksel modeli oluşturmak, (ii) modelin bilinmeyen parametrelerini tahmin etmek ve (iii) net bir görüntü üretmek için ters su altı görüntüleme problemini çözmek. Bu alanda yapılan ilk çalışmada, su altı görüntü iyileştirme için karanlık kanal önseli (DCP) [11] yöntemi kullanılmıştır. Chiang ve Chen [12], SGİ için karanlık kanal önceliği ve dalga boyu telafisi algoritmalarını birleştiren bir dalga boyu telafisi ve görüntü ayıklama (WCID) yöntemi önermiştir. Drew ve arkadaşları [13] su altı görüntülerinde kırmızı kanalın emilim oranlarındaki farktan yararlanarak bir su altı karanlık kanal önseli (UDCP) yöntemi tanıtmıştır. Peng ve arkadaşları [14], bozulmuş görüntüleri geri yüklemek için derinliğe bağlı renk değişikliklerini, sahne-ortam ışığı farklılıklarını ve uyarlanabilir bir renk düzeltme oluşum modelini içeren geliştirilmiş bir karanlık kanal önseli (GDCP) yöntemi önermiştir. Liang ve arkadaşları [15] ayrık mesafe güdümlü renk düzeltme ve bir iletim tahmin tekniği içeren geliştirilmiş su altı karanlık kanal önseli (GUDCP) yöntemini ileri sürmüştür. Fiziksel olmayan model tabanlı yöntemler, su altı görüntülerinin fiziksel bozulma sürecini dikkate almadan, doğrudan piksel değerlerini değiştirerek bir görüntünün kalitesini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Bu alanda yapılan çalışmalarda, Zhuang ve arkadaşları [16] yansıma ve aydınlatmanın çok ölçekli gradyan öncellerini birleştirerek görüntünün kalitesini artırmak için bir Bayes Retineks modeli tanıtmıştır. Zhang ve arkadaşları [17] Retineks modelinden esinlenen bir renk düzeltme ve detay koruma füzyon stratejisi önermiştir. Ancuti ve arkadaşları [18] su altı görüntülerini iyileştirmek için hesaplama açısından verimli çok ölçekli bir füzyon süreci kullanmıştır. Yöntem, karanlık bölgeleri etkili bir şekilde aydınlatmanın yanı sıra global kontrastı da artırmış ve kenar bilgisini

önemli ölçüde iyileştirmiştir. Zhang ve arkadaşları [19] renk düzeltme için minimum renk kaybı ve maksimum zayıflama haritası uygulamış ve görüntünün yerel kontrastını iyileştirmek için uyarlanabilir bir kontrast geliştirme stratejisi benimsemiştir. Veri-güdümlü yöntemler, son yıllarda su altı görüntüleri iyileştirmek için kullanılmıştır [20-23]. Li ve arkadaşları [20] tarafından geliştirilen çalışmada, su altı evrişimsel sinir ağı (UWCNN) modeli önerilmiştir. Geleneksel yöntemlerin aksine, su altı görüntüleme modelinin parametrelerini tahmin etmek yerine, doğrudan net su altı görüntüsünü yeniden yapılandırılmıştır. Jiang ve arkadaşları [21] su altı görüntülerinin iyileştirilmesi amacıyla hedef odaklı, algısal ve üretken çekişmeli ağ (GAN) öğrenme tekniklerini birleştiren bir derin öğrenme modeli sunmuşlardır. Önerilen bu model sayesinde su altı görüntülerinde karşılaşılan renk bozulmaları, düşük kontrast ve bulanıklık gibi problemleri gidermeyi hedeflemişlerdir. [22]'de, su altı görüntülerinde sıkça karşılaşılan renk bozulması, düşük kontrast ve bulanıklık gibi sorunları çözmek için çok ölçekli yoğun bağlantılara sahip bir üretken çekişmeli ağ modeli önerilmiştir.

Bu çalışmada, sanal pozlamaya dayalı bir su altı görüntü iyileştirme yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde ilk olarak giriş görüntüsünden, gama düzeltmesi yardımıyla sanal pozlama görüntüleri elde edilmiştir. Ardından, elde edilen sanal pozlanmış görüntülerden kılavuz filtre yardımıyla düşük ve yüksek frekans bileşenleri oluşturulmuştur. Düşük frekans bileşenlerine histogram germe ve ağırlıklandırma prosedürü uygulanırken yüksek frekans bileşenlerinin ise en yüksek değerlerini seçme prosedürü uygulanmıştır. Elde edilen nihai düşük ve yüksek frekans bileşenleri birleştirilerek iyileştirilmiş görüntü elde edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Önerilen yöntem, sanal pozlama görüntülerinin oluşturulması, ayrıştırma ve histogram germe ve ağırlıklandırma olmak üzere üç adımdan oluşmaktadır.

2.1. Sanal pozlama görüntülerinin oluşturulması

Görüntü yakalama aygıtlarının pozlama seviyesi, görüntünün farklı alanlarındaki ayrıntıların görünürlüğünü belirlemektedir. Düşük pozlama, iyi aydınlatılmış alanlar için daha iyi ayrıntılar sağlarken, daha karanlık bölgelerdeki ayrıntılar kaybolmaktadır. Bunun aksine, daha yüksek pozlama, karanlık bölgeler için daha iyi görünür ayrıntılar sağlamaktadır [23]. Bu nedenle, farklı pozlama seviyelerine sahip görüntüler, tek pozlama görüntüsünden daha fazla bilgi vermektedir. Bu bilgiler ışığında, bu çalışmada, çoklu pozlama görüntüleri oluşturmak için orijinal görüntüden basit bir gama düzeltme yöntemi ile sanal pozlamalı görüntülerin üretilmesi önerilmiştir. Önerilen yöntem Denklem 1'de verilmektedir.

$$I_l = I_{max}(I/I_{max})^{l-\lambda l} \quad (1)$$

Burada, $l = 0, 1, \dots, L$ pozlama seviyesini, $I_0 = I$ giriş görüntüsünü ve λ adım boyunu temsil etmektedir. Bu şekilde çoklu pozlamalı su altı görüntü dizisi elde edilmektedir.

2.2. Ayırıştırma prosedürü

Görüntü detaylarının yüksek frekanslı bileşenlerde, kaba bilgilerin düşük frekanslı bileşenlerde tutulduğu net bir şekilde bilinmektedir. Görüntünün düşük frekanslı bileşenlerini elde etmek amacıyla sanal pozlama görüntülerine Denklem 2’deki gibi kılavuzlu filtre uygulanmaktadır.

$$L_l = GF(I_l) \quad (2)$$

Burada, $GF(.)$ kılavuzlu filtreleme işlemini, L_l kılavuzlu filtrenin karşılık gelen düşük frekans çıkışını temsil etmektedir. Alçak frekans bileşenleri elde edildikten sonra, yüksek frekans bileşenleri basit bir çıkarma işlemiyle elde edilmektedir.

$$D_l = I_l - L_l \quad (3)$$

Burada, D_l yüksek frekans bileşenlerini içeren detay görüntüsünün temsil etmektedir. Orijinal görüntü, düşük ve yüksek frekans bileşenlerinin toplanmasıyla basit bir şekilde elde edilmektedir.

2.3. Histogram germe ve ağırlıklandırma

Önceki adımda oluşturulan görüntü dizisinin her bandındaki düşük frekanslı bileşenlere Denklem 4’te verilen kısıtlanmış histogram germe işlemi uygulanmaktadır.

$$L_l^s = (L_l - \alpha)((\beta - \gamma)/(\delta - \alpha)) \quad (4)$$

Burada, L_l^s germe işlemi uygulanan düşük frekanslı bileşeni, γ üst limiti, β alt limiti, α en düşük piksel değerini ve δ en yüksek piksel değerini temsil etmektedir. Germe işlemi uygulanan görüntü RGB renk uzayından HSV renk uzayına dönüştürülmektedir. Ardından, S ve V bileşenlerine Karşıtlık-Sınırlı Uyarlanabilir Histogram Eşitleme işlemi uygulanmaktadır. Korunan H bileşeni, yeni S ve V bileşenleri ile birlikte düzeltilmiş düşük frekanslı görüntüler (L_l^c) elde edilmektedir.

Düzeltilmiş düşük frekanslı görüntülerin H ve S bileşenleri kullanılarak Denklem 5’te verilen ağırlık matrisi hesaplanmaktadır.

$$W_l = H_l S_l \quad (5)$$

İyileştirilmiş düşük frekanslı görüntü (L_e), ağırlıklı düşük frekanslı görüntülerin toplamı ile Denklem 6’da verildiği şekliyle elde edilmektedir.

$$L_e = \sum_{l=1}^L W_l L_l^c \quad (6)$$

İyileştirilmiş yüksek frekanslı görüntü (D_e), yüksek frekanslı bileşenlerin maksimumunun

seçilmesiyle elde edilmektedir. Bu işleme ait matematiksel ifade Denklem 7’de verilmektedir.

$$D_e = \max(D_l) \quad (7)$$

İyileştirilmiş sonuç görüntüsü, düşük frekanslı ve yüksek frekanslı görüntülerin toplanmasıyla Denklem 8’deki gibi elde edilmektedir.

$$I_e = D_e + L_e \quad (8)$$

3. Deneysel Sonuçlar

Önerilen sanal pozlamaya dayalı yöntem, su altı görüntüleri üzerinde gerçekleştirilen deneylerle değerlendirilmiştir. Objektif bir değerlendirme elde etmek amacıyla görsel sonuçlar nicel sonuçlarla desteklenmiştir.

3.1. Veri kümesi

Önerilen yöntemin su altı görüntüleri üzerindeki etkinliğini açık bir şekilde ortaya koymak amacıyla, yapılan deneysel çalışmalarda EUVP [24] veri kümesi kullanılmıştır. EUVP veri kümesi 500 eşleştirilmiş görüntüden oluşmaktadır. Kullanılan veri kümesi, yoğun yeşil ve mavi görüntülerin yanı sıra su altı yaşamını içeren çeşitli renklerdeki canlıların görüntülerinden oluşmaktadır. Bu özellikler sayesinde, önerilen yöntemin su altı görüntüleri üzerinde kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

3.2. Değerlendirme metrikleri

İyileştirme işleminin etkinliğini nesnel bir şekilde değerlendirmek amacıyla, su altı görüntü iyileştirme alanında sıklıkla kullanılan iki temel değerlendirme metriği, tepe sinyal-gürültü oranı (Peak signal-to-noise ratio-PSNR) ve yapısal benzerlik indeksi ölçüsü (Structural similarity index measure-SSIM) [25] kullanılmıştır. PSNR, iyileştirilmiş görüntünün kesin referans görüntüsü ile olan piksel bazlı benzerliğine odaklanmıştır. Yüksek PSNR değeri, iyileştirilmiş görüntünün daha az bozulmaya uğradığını ifade etmektedir. SSIM değeri, yapısal benzerliğin yanı sıra parlaklık ve karşıtlık gibi özellikleri de değerlendirmektedir. Yüksek SSIM değeri, iyileştirilmiş görüntünün kesin referans görüntüsüne daha fazla benzediği anlamını taşımaktadır.

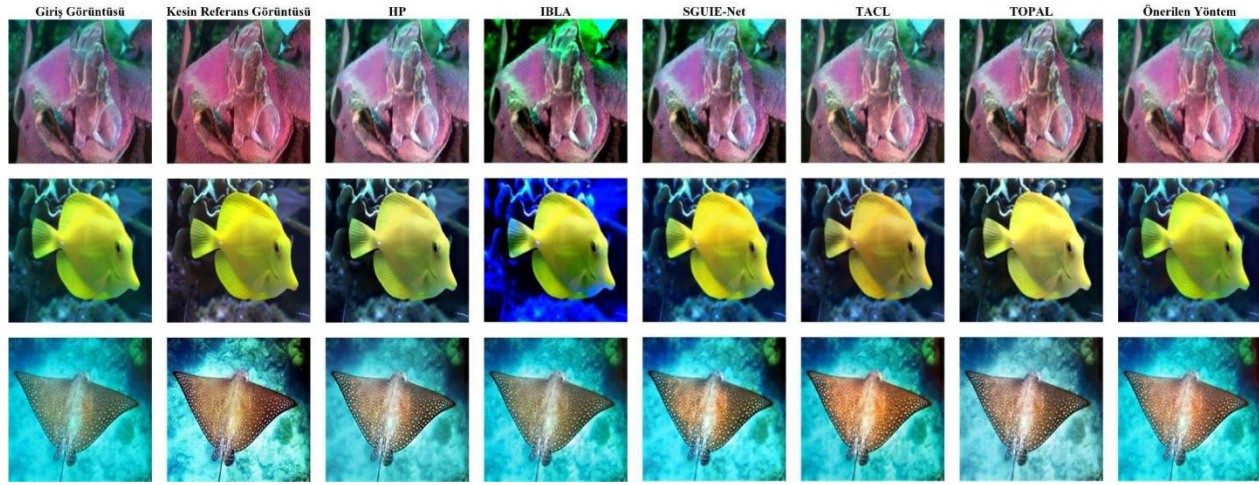
3.3. Karşılaştırmada kullanılan yöntemler

Nicel ve görsel olarak kapsamlı bir analiz yapılabilmesi için literatürde su altı görüntü iyileştirme alanında sıkça kullanılan beş farklı yöntem karşılaştırma yapmak için kullanılmıştır. Bu yöntemler, geleneksel yöntemler ve derin öğrenme tabanlı yöntemler olmak üzere iki ana başlıkta ele alınabilmektedir. HP [26], IBLA[27], SGUIE-Net [28], TACL [29] ve TOPAL [21] yöntemleri karşılaştırmalı analiz gerçekleştirmek amacıyla kullanılmıştır. Bu yöntemler ile önerilen yöntemle

ait nicel ve görsel sonuçlar, önerilen yöntemin etkinliğini kanıtlamak için sunulmuştur.

3.4. Görsel sonuçlar

Önerilen yöntemin çeşitli su altı görüntüler üzerindeki görsel performansını değerlendirmek amacıyla, farklı sahnelerden seçilmiş görüntüler üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Görsel karşılaştırma sonuçları, EUVP veri kümesine ait su altı görüntüleri ve kesin referans görüntüleri ile Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. EUVP veri kümesindeki görüntüler için görsel sonuçların karşılaştırılması.

Şekil 1’de, HP yöntemi belirli düzeyde renk koruması sağlarken yeterli detay iyileştirmesi sağlayamamıştır. IBLA, yapay renk üretimi ve detay kaybı gibi sorunlardan etkilenmiştir. SGUIE-Net renk koruması açısından iyi bir performans sergilemesine rağmen detay koruma açısından iyi sonuçlar üretememiştir. TACL, detay kaybı ve yoğun gürültünün neden olduğu bozulmaların önüne geçememiştir. TOPAL, renk koruması açısından yeterli performans gösterse de detay kaybını önleyememiştir. Önerilen yöntem, detayları ve renkleri korurken belirli ölçüde görünürlük iyileştirmesi sunmuştur. Karşılaştırmada kullanılan diğer yöntemlere göre insan görsel algısına daha uygun ve dengeli sonuçlar üretmiştir.

3.5. Nicel sonuçlar

Önerilen yöntemin nicel performansı, EUVP veri kümesinden elde edilen ortalama PSNR ve SSIM değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Önerilen yönteme ve karşılaştırmada kullanılan diğer yöntemlere ait nicel sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. EUVP veri kümesindeki ortalama PSNR ve SSIM değerlerinin karşılaştırması. Kalın ve altı çizili sonuçlar sırasıyla en iyi ve ikinci en iyi sonuçları temsil eder.

Metrik/Yöntem	HP	IBLA	SGUIE-Net	TACL	TOPAL	Önerilen Yöntem
PSNR	18.59	18.98	19.23	18.88	<u>20.12</u>	20.44
SSIM	<u>0.68</u>	0.63	0.67	<u>0.68</u>	0.76	0.67

Tablo 1’de, önerilen yöntem en yüksek PSNR değerine ulaşmıştır. Böylece, önerilen yöntemin su altı görüntülerinde piksel bazlı iyileştirmede diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar ürettiği ifade edilebilir. PSNR değeri açısından, TOPAL yöntemi ile ikinci en iyi sonuç elde edilmiştir. Buna ek olarak, TOPAL yöntemi SSIM değeri bakımından en iyi sonucu vermektedir. HP ve TACL yöntemleri ise ikinci en yüksek SSIM değerine ulaşmışlardır. Bu sonuçlar, TOPAL, TACL ve HP yöntemlerinin yapısal benzerlik açısından diğer yöntemleri geride bıraktıklarını göstermektedir.

4. Tartışma

Bu çalışmada önerilen sanal pozlamaya dayalı yöntem, geleneksel ve derin öğrenme tabanlı yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Yapılan kıyaslamalarda görsel ve nicel açıdan dikkat çekici sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen yöntem, tek bir su altı görüntü girdisi kullanarak sanal pozlama yoluyla çoklu pozlama görüntü dizisi oluşturur. Daha sonra, kılavuzlu filtre yardımı ile düşük frekans bileşeni elde edilir. Elde edilen bu bileşene sırasıyla histogram germe ve ağırlıklandırma işlemi uygulanır. Detay bileşeni ise yüksek frekanslı bileşen dizisinin maksimumunun seçilmesiyle elde edilir. İyileştirilmiş düşük frekans bileşeni ve yüksek frekans bileşeni toplanarak iyileştirilmiş sonuç görüntüsü elde edilir.

Nicel sonuçlar, yöntemin PSNR değeri bakımından literatürdeki diğer yöntemlere kıyasla daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. SSIM açısından en iyi sonuç elde edilmemiş olmasına rağmen tatmin edici düzeyde yapısal benzerlik sağlanmaktadır. Böylece, önerilen yöntemin karışıklık ve görünürlüğü etkili bir şekilde iyileştirdiği ve yapısal benzerliği belirli ölçüde koruduğu söylenebilir. Görsel sonuçlar, detay koruma, renk koruma ve görünürlük iyileştirmesi gibi ölçütlerin yeterli ve kararlı bir şekilde sağlandığını kanıtlamaktadır. Görsel ve nicel sonuçlar, önerilen yöntemin diğer yöntemlere göre daha iyi performans sergilediğini göstermektedir.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, su altı görüntülerinin iyileştirilmesinde kullanılan sanal pozlamaya dayalı bir yöntem sunulmuştur. Önerilen yöntem, tek bir su altı girdisinden sanal pozlama kullanılarak farklı pozlama seviyelerine ait görüntü kümesi oluşturmuştur. Daha sonra, histogram germe ve ağırlıklandırma işlemleri uygulanarak iyileştirilmiş görüntü elde edilmiştir. Yöntemin performansı, görsel ve nicel sonuçlar olmak üzere iki başlıkta değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin diğer yöntemlerden daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Derin öğrenme

tabanlı yöntemlere göre büyük veri kümelerine ihtiyaç duymaması, hızlı sonuç vermesi ve gerçek zamanlı uygulamalar için elverişli olması önerilen yöntemi bir adım öne çıkarmaktadır. Önerilen yaklaşımın renk koruma ve görünürlük iyileştirmesi bakımından ileri noktalara taşınabileceği düşünülmektedir. Buradan hareketle, insan görsel algısına daha uygun sonuçlar üretmek amacıyla Retineks veya beyaz dengeleme yaklaşımlarının faydalı olabileceği değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- [1] Li C, Guo C, Ren W, Cong R, Hou J, Kwong S, Tao D. An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond. *IEEE Transactions on Image Processing* 2020;29:4376–89.
- [2] Islam MJ, Xia Y, Sattar J. Fast underwater image enhancement for improved visual perception. *IEEE Robotics and Automation Letters* 2020;5(2):3227–34.
- [3] Zhou J, Li B, Zhang D, Yuan J, Zhang W, Cai Z, Shi J. UGIF-Net: An efficient fully guided information flow network for underwater image enhancement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2023;61:1–17.
- [4] Akkaynak D, Treibitz T, Shlesinger T, Loya Y, Tamir R, Iluz D. What is the space of attenuation coefficients in underwater computer vision? In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 2017. p. 4931–40.
- [5] Akkaynak D, Treibitz T. A revised underwater image formation model. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 2018.
- [6] Peng L, Zhu C, Bian L. U-shape transformer for underwater image enhancement. *IEEE Transactions on Image Processing* 2023;32:3066–79.
- [7] Cong R, Yang W, Zhang W, Li C, Guo CL, Huang Q, Kwong S. PUGAN: Physical model-guided underwater image enhancement using GAN with dual-discriminators. *IEEE Transactions on Image Processing* 2023;32:4472–85.
- [8] Liu R, Fan X, Zhu M, Hou M, Luo Z. Real-world underwater enhancement: Challenges, benchmarks, and solutions under natural light. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 2020;30(12):4861–75.
- [9] Zhuang P, Wu J, Porikli F, Li C. Underwater image enhancement with hyper-laplacian reflectance priors. *IEEE Transactions on Image Processing* 2022;31:5442–55.
- [10] Wang H, Sun S, Ren P. Meta underwater camera: A smart protocol for underwater image enhancement. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2023;195:462–81.
- [11] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2011;33(12):2341–53.
- [12] Chiang JY, Chen YC. Underwater image enhancement by wavelength compensation and dehazing. *IEEE Transactions on Image Processing* 2012;21(4):1756–69.
- [13] Drews PL, Nascimento ER, Botelho SS, Campos MFM. Underwater depth estimation and image restoration based on single images. *IEEE Computer Graphics and Applications* 2016;36(2):24–35.
- [14] Peng YT, Cao K, Cosman PC. Generalization of the dark channel prior for single image restoration. *IEEE Transactions on Image Processing* 2018;27(6):2856–68.
- [15] Liang Z, Ding X, Wang Y, Yan X, Fu X. GUDCP: Generalization of underwater dark channel prior for underwater image restoration. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*

- for Video Technology 2022;32(7):4879–88.
- [16] Zhuang P, Li C, Wu J. Bayesian retinex underwater image enhancement. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2021;101:104171.
 - [17] Zhang W, Dong L, Xu W. Retinex-inspired color correction and detail preserved fusion for underwater image enhancement. *Computers and Electronics in Agriculture* 2022;192:106585.
 - [18] Ancuti CO, Ancuti C, De Vleeschouwer C, Bekaert P. Color balance and fusion for underwater image enhancement. *IEEE Transactions on Image Processing* 2018;27(1):379–93.
 - [19] Zhang W, Zhuang P, Sun HH, Li G, Kwong S, Li C. Underwater image enhancement via minimal color loss and locally adaptive contrast enhancement. *IEEE Transactions on Image Processing* 2022;31:3997–4010.
 - [20] Li C, Anwar S, Porikli F. Underwater scene prior inspired deep underwater image and video enhancement. *Pattern Recognition* 2020;98:107038.
 - [21] Jiang Z, Li Z, Yang S, Fan X, Liu R. Target oriented perceptual adversarial fusion network for underwater image enhancement. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 2022;32(10):6584–6598.
 - [22] Guo Y, Li H, Zhuang P. Underwater image enhancement using a multiscale dense generative adversarial network. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 2019;45(3):862–70.
 - [23] Wang W, Yan D, Wu X, He W, Chen Z, Yuan X, Li L. Low-light image enhancement based on virtual exposure. *Signal Processing: Image Communication* 2023;118:117016.
 - [24] Islam MJ, Xia Y, Sattar J. Fast underwater image enhancement for improved visual perception. *IEEE Robotics and Automation Letters* 2020;5:3227–3234.
 - [25] Wang Z, Bovik AC, Sheikh HR, Simoncelli EP. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing* 2004;13(4):600–612.
 - [26] Hou G, Pan Z, Huang B, Wang G, Luan X. Hue preserving-based approach for underwater colour image enhancement. *IET Image Processing* 2018;12(2):292–298.
 - [27] Peng YT, Cosman PC. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption. *IEEE Transactions on Image Processing* 2017;26(4):1579–1594.
 - [28] Qi Q, Li K, Zheng H, Gao X, Hou G, Sun K. SGUIE-Net: Semantic attention guided underwater image enhancement with multi-scale perception. *IEEE Transactions on Image Processing* 2022;31:6816–6830.
 - [29] Liu R, Jiang Z, Yang S, Fan X. Twin adversarial contrastive learning for underwater image enhancement and beyond. *IEEE Transactions on Image Processing* 2022;31:4922–4936.