



DEĞİŞTİRİLMİŞ AYRIK HAAR DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE YENİ BİR HİSTOGRAM EŞİTLEME YÖNTEMİ

Faruk BULUT*

İstanbul Arel Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Düşük Dinamik Aralığı,
Haar Dalgacık Dönüşümü,
Histogram Eşitleme,
Kontrastı İyileştirme.*

Öz

Histogram eşitleme dijital görüntülerin kontrastını artırmak için kullanılan yöntemlerden biridir. İdeal histogram eşitleme yöntemlerinde, girdi ve çıktı arasındaki görüntü benzerliğini koruyarak histogramdaki dağılımları tekdüze hale getirerek kontrast gerilmektedir. Frekans alanında yapılan bu çalışmada, Düşük Dinamik Aralığında değiştirilmiş ayrık Haar Dalgacık Dönüşümü ile yeni bir görüntü kontrast germe yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde Olasılık Kütle Fonksiyonunu ile frekansların yüksek geçiş kanalında gürültülü frekanslara bir baskılama işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yapılan frekans dönüşümlerinde histogram frekansların dinamik aralıklarında önemli bir azalma sağlanmıştır. Frekans alanındaki bu işlem görüntüde standart sapmanın artmasını sağlayarak görüntü kalitesinin iyileşmesini sağlar. Kıyaslamalı bir veri seti üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda, önerilen yöntem konvansiyonel metotlarla kıyaslanmış ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Görüntü kalitesi değerlendirme metriklerinden Tepe Sinyal Gürültü Oranı (PSNR), Ortalama Kare Hata (MSE), Yapısal Benzerlik Endeks Ölçütü (SSIM) ve Kontrast değeri deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Önerilen bu yaklaşım ile elde edilen sonuçlar diğer algoritmaların sonuçları ile kıyaslandığında hem kalitatif hem de kantitatif açıdan başarılı bulunmuştur.

A NEW HISTOGRAM EQUALIZATION METHOD WITH MODIFIED DISCRETE HAAR WAVELET TRANSFORM

Keywords

*Low Dynamic Range,
Haar Wavelet Transform,
Histogram Equalization,
Contrast Enhancement.*

Abstract

Histogram equalization is one of the methods used to increase the contrast of digital images. In the ideal histogram equalization methods, the contrast are stretched by preserving the image similarity between input and output images, making the distributions in the histogram uniform. In this study conducted in the frequency domain, a new image contrast stretching method with Haar Wavelet Transform (HWT) in Low Dynamic Range is proposed. In this method, using the Probability Mass Function (PMF), a suppression process is applied to the noisy frequencies in the high pass channel of the frequencies. Subsequent frequency transformations provide a feasible reduction in the dynamic range of histogram frequencies. This process in the frequency domain improves the image quality by increasing the standard deviation in the image. In experimental studies over a benchmarking dataset, the proposed method is compared with conventional methods and promising results are obtained. In the experimental studies, Peak Signal to Noise Ratio (PSNR), Mean Square Error (MSE), Structural Similarity Index Measurement (SSIM) and Contrast value, which are among the image quality evaluation metrics, are used. In this proposed approach, image quality is evaluated both qualitatively and quantitatively assessments, and successful results are obtained.

Alıntı / Cite

Bulut, F., (2022). Değiştirilmiş Ayrık Haar Dalgacık Dönüşümü ile Yeni Bir Histogram Eşitleme Yöntemi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 188-200.

* İlgili yazar / Corresponding author: farukbulut@arel.edu.tr, +90 212 867 25 00 (1527)

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
F. Bulut, 0000-0003-2960-8725	Başvuru Tarihi / Submission Date	03.05.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date	29.11.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Görüntü iyileştirme yöntemleri, görüntünün öznel kalitesinin insan yorumu için çok önemli olduğu birçok görüntü işleme uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Tung vd., 2021). Genel bir kural olduğu için, görüntü kalitesinin öznel değerlendirmesindeki karışıklık yani kontrast önemli bir konudur. Bir yüzeyden yansıyan renk farkı, kontrastı oluşturur. Yani kontrast, bir nesneyi diğer nesnelere ve arka planlardan ayırmada fark yaratan görsel bir niteliktir (Lecca vd., 2021). İnsanın görsel sistemi, parlaklıktan daha çok kontrasta duyarlıdır. Böylece aydınlatma koşullarındaki önemli değişikliklere rağmen bir insan dünyayı kontrast ile daha kolay algılayabilir. Örneğin, görüntü kontrastı belirli bir bölgede yüksek oranda yoğunlaşmışsa, görüntü çok bulanık hale gelir. Düzgün bir şekilde yoğunlaşan alanlarda görüntü bilgisi doğal olarak kaybolabilir (Tung vd., 2021). Ana amaç, giriş görüntüsünün tüm bilgilerini temsil etmek için görüntü kontrastını optimize etmektir. Genel olarak histogram eşitleme, bu yazının konusu olan kontrast iyileştirme veya görsel kalite iyileştirme için kullanılır.

Literatürde, görüntü kalitesini artırmak için kontrast germe ve histogram eşitleme alanında birçok algoritma önerilmiştir. Literatürdeki, histogram eşitleme metotları iki kategoride incelenebilir. Bunlar GHE (Global Histogram Equalization) ve LHE (Local Histogram Equalization) yöntemleridir. GHE yönteminde, tüm girdi görüntüsünün histogram bilgisi, dönüştürme işleminde kullanılır yani görüntü üzerinde evrensel bir işlem yapılır. Bu yaklaşımın temel amacı, giriş görüntüsünün kümülatif yoğunlukları için bir işlev gerçekleştirerek düzgün dağıtılmış bir histogram elde etmektir. Bu yaklaşım her ne kadar görüntüde genel iyileştirmeler için uygunsa da yerel parlaklık özelliklerini koruyamaz. Diğer taraftan LHE algoritmaları, görüntüdeki komşu piksellerinin histogram yoğunluklarını kullanarak bu sorunları ortadan kaldırır. LHE yöntemleri, görüntünün tüm piksellerini sırayla kaydıran küçük bir kare pencere (maske) kullanır, HE için yalnızca bu pencereye giren piksel blokları dikkate alınır ve daha sonra geliştirme için gri seviye eşlemesi bu pencerenin merkez pikseline uygulanır (Gonzalez vd., 2017). Ancak, LHE'nin gerçekleştirilmesi büyük zaman karmaşıklığı oluşturur ve yüksek hesaplama maliyeti gerektirir. Ek olarak, LHE bazen görüntünün bazı kısımlarında aşırı iyileştirme yapar. Bu ise olumsuz bir durumdur.

Başka bir açıdan da histogram eşitleme yöntemleri hem uzamsal alanda (spatial domain) hem de frekans alanında (frequency domain) yapılabilmektedir. Uzamsal diğer bir deyişle uzaysal alanda yapılan işlemler doğrudan görüntünün renk değerleri üzerinde yapılır. GHE ve LHE gibi algoritmalar genelde bu uzamsal alanda işlem yapmaktadır.

Literatürde birçok histogram eşitleme yöntemi vardır. Önerilmiş olan bu tekniklerin bazıları bu çalışmada avantajları, sınırları ve uygulamaları ile tartışılmıştır. Uzaysal aladaki çalışmalardan farkı olarak Ayrık Haar Dalgacık Dönüşümü (HWT) (Shaik vd., 2018) ile frekans alanında bir kontrast geliştirme yaklaşımı sunulmuştur. Huang ve ark., görüntüdeki ortalama parlaklık değerini koruyan ve otomatik bir histogram ayırma yönteminden oluşan yeni bir histogram eşitleme yaklaşımı önermiştir (Shih-Chia vd., 2013). Ayrıca bu yöntemde, genel görüntü bastırılırken görüntü kalitesi artırılmıştır. Cho ve ark. dalgacık alanında yaptıkları görüntü iyileştirme yönteminde renk tutarlılığını koruyarak hem yerel hem de global parlaklığı ve kontrastı artırmıştır (Dongwook vd., 2014). Iqbal ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, tıbbi görüntü çözünürlüklerini iyileştirmek için "ikili ağaç"lı karmaşık dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. Ayrıca, çift ağaçlı karmaşık dalgacık dönüşümü kullanılarak yüksek frekanslı alt bantlar elde edilmiştir (Iqbal vd., 2014). DWT ve CLAHE'yi birleştiren DWT (CLAHE-ayrık dalgacık dönüşümü) adlı yeni bir görüntü iyileştirme tekniği Lidong ve arkadaşları tarafından tanıtılmıştır (Lidong vd., 2015). Daniel vd., geliştirilmiş Guguk Kuşu Arama Algoritmasını (ECSA) kullanarak medikal görüntülerin kontrast iyileştirmesi için Optimum Dalgacık Tabanlı Maskeleye (OWBM) çalışması yapmıştır (Ebenezer vd., 2016). Dalgacık alanında entropi tabanlı bir kontrast geliştirme yaklaşımı da Kim ve ark. (Kim vd., 2016) tarafından yapılmıştır. FC-CLAHE (Fuzzy Clipped Kontrast-Limited Adaptive Histogram Equalization) olarak adlandırılan dijital mamogramların yerel kontrast arttırmaları için yeni bir histogram tabanlı algoritma Jenifer ve ark. tarafından önerilmiştir (Sheeba vd., 2016). Histogram Eşitleme alanında yapılan çeşitli yöntemlerinin genel ve kapsamlı bir araştırması, Nithyananda ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir. Farklı tipte histogram eşitleme yöntemleri bu çalışmada kronolojik sırayla kısaca açıklanmıştır (Nithyananda vd., 2016). Dalgacık tabanlı gradyan histogramları kullanan uyarlanabilir bir histogram eşitleme yöntemi Kaur ve ark. (Kaur vd., 2017) tarafından inşa edilmiştir. Liu ve ark. ise, SPOHE adında (Tabakalı Parametrik Odaklı Histogram Eşitleme) bir kontrast geliştirme yöntemi bulmuşlardır. Bir önceki yöntemlerde ortaya çıkan görsel hatalar veya engelleyici görüntü bozuklukları olmadan bölgesel iyileştirmeleri etkili bir şekilde sağlamışlardır (Liu vd., 2016). Görüntü öğelerinin (nesnelere ve arka plan) sınırlarında kontrast dağılımını otomatik modda geliştirme yöntemi Yelmanova ve ark. tarafından tanıtılmıştır

(Yelmanova vd., 2017). Mevcut CLAHE-DWT'den türetilen CLAHE-HWT adlı yeni bir hibrid görüntü iyileştirme yöntemi Bharadi ve ark. tarafından önerilmiştir. Burada Hibrit Dalgacık Dönüşümü Tip I (HWT I) kullanılmıştır (Bharadi vd., 2017). İkili Alt Görüntü Histogram Eşitleme (DSIHE) (Wang vd., 1999), Ortalama korunan Bi-Histogram Eşitleme (BBHE) (Kim vd., 1997) ve Minimum Ortalama Parlaklık Hatası Bi-Histogram Eşitleme (MMBEBHE) (Chenand vd., 2003) de görüntü kontrastını geliştirmiştir. Bu yaklaşımlar genel olarak üretilen çıktılarda girdi görüntüsüne ait olan parlaklığını korumasına karşın, doğal görünümüne görüntüler üretmede başarısız olabilirler. Bu alanda yapılmış olan bir başka çalışmada Haar dalgacık dönüşümü kullanılarak ileri düzey bir histogram eşitleme yöntemi önerilmiştir (Bulut, 2021). Öncelikle RGB kanalındaki bilgiler frekansa düzleminde ele alınmış ve ortalama renk bilgisi ile kıyaslanarak daha ileri düzey bir baskılama işlemi yapılmıştır. Elde edilen başarılı sonuçlar literatürde önerilmiş olan çok farklı çalışmalarla ileri düzey ölçütler kullanılarak kıyaslanmıştır.

Görüntü iyileştirilmesi alanında optimizasyon (eniyeleme) yöntemlerinden de sıklıkla faydalanılmaktadır. Örneğin bir çalışmada (Malik vd., 2021) görüntü kontrastının iyileştirilmesi amacıyla, optimal çözümü bulmak için yapay arı kolonisi (ABC) algoritması kullanılmıştır. Ek olarak, Evrişimli Sinir Ağları (Fujioka vd., 2021), Gri Kurt (Das vd., 2020), sürü zekası tabanlı optimize ediciler (Luque-Chang vd., 2021), Parçacık Sürüsü Optimizasyonunu (Aurangzeb vd., 2021) ve MRI (manyetik rezonans görüntüleri) için Dinamik Stokastik Rezonans (DSR) gibi optimizasyon tekniklerini kullanan bazı gelişmiş görüntü kontrastı iyileştirme yöntemleri vardır. Son zamanlarda 2D ve 3D ultrason görüntüleri, manyetik rezonans görüntüleri, X-ışınları, bilgisayarlı tomografi taramaları, nükleer tıp görüntüleme ve pozitron emisyon tomografisi (PET) gibi tıbbi görüntüler için özel olarak tasarlanmış bazı değerli görüntü iyileştirme çalışmaları da bulunmaktadır (Jose vd., 2021), (Janan vd., 2021), (Spille vd., 2021), (Brown vd., 2020).

Geleneksel histogram eşitleme, görüntülerde yapaylıklara ve anormal modellere neden olan gürültü öğelerinin de eşitlendiği bir mekanizma sunar. Bilindiği gibi yapaylıklar ve anormal desenler, görüntü kalitesini ve doğal görünümü düşürür. İdeal yöntemde, orijinal görüntü kalitesi korunurken histogram eşitlemesi de gerçekleştirilmelidir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, bu çalışma Değiştirilmiş Ayrık HWT'ye dayalı yeni bir yöntem önermektedir. Literatüre yeni bir katkı olarak önerilen yöntemde, histogram eşitleme işlemi, gürültülerin genellikle yüksek dinamik aralıkta (High Dynamic Range) olmasından dolayı tüm dönüşüm işlemleri düşük dinamik aralıkta (Low Dynamic Range) gerçekleştirilir. Bu yaklaşım görüntü kalitesi ve parlaklığın korunarak kontrastın iyileştirilmesini sağlamaktadır.

Bu makalede beş bölüm var. Birinci bölümde, yukarıda belirtildiği gibi, önerilen bu yöntemle ilgili çalışmalara ilişkin bir literatür taraması ile bu çalışmaya bir giriş yapılmaktadır. Aşağıdaki ikinci bölümde, önerilen tekniğin açıklamaları ve detayları bulunmaktadır. Üçüncü bölümde deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Teşekkürler kısmı dördüncü bölümde sunulmuştur. Son bölümde özet, gelecekteki çalışmalar ve katkılar bulunmaktadır.

2. Yöntemler (Methods)

Bu bölümde dijital görüntüde histogram eşitleme, ayrık dalgacık dönüşümü ve düşük dinamik aralıkta histogram eşitleme ile ilgili temel bilgiler verilmektedir.

2.1. Histogram Eşitleme (Histogram Equalization)

Dijital görüntüler için, R, G ve B kanallarındaki renk histogramı, o görüntünün her bir kanaldaki renk değerinin görülme sıklığını yani frekansını gösterir. Histogram eşitleme işlemi ile renk dağılımlarının geniş bir skalaya yayılması sağlanır. Bu yöntem parlak, karanlık, arka planı ve ön planı ayırmayan görüntüler için çok kullanışlıdır. Gri tonlamalı bir görüntü için yapılan işlem aynı şekilde kırmızı, yeşil ve mavi renk değerlerinin bileşenlerine ayrı ayrı uygulanarak renkli görüntülerde de yapılabilir. Şekil 1'deki iki farklı test resmi, histogram eşitleme işlemine tabi tutulmuştur. İlk satırdaki resim yüksek kontrasta, diğer resim ise daha düşük kontrasta sahiptir. Her satırdaki ikinci resimde görüldüğü üzere birçok detay daha da belirgin ve fark edilebilir hale getirilmiştir. Örneğin (b) resminde bitki arkasında bulunan diğer bitkiler ile ilgili detaylar açığa çıkmıştır. (d) resminde ise denizin dalgaları bariz bir şekilde fark edilir durumdadır.



Şekil 1. (a): Orijinal resim, (b): Geleneksel Histogram Eşitleme ile iyileştirilmiş resim ((a): Original image, (b): Image enhanced by Conventional Histogram Equalization)

Bu yöntemin önemli bir avantajı, oldukça basit bir teknik olması ve geri dönüşümlü bir operasyona sahip olmasıdır. Teorik olarak, bilinen bir histogram eşitleme işlevi varsa, orijinal histogramı geri yüklemek mümkündür. Çünkü frekans alanında yapılan işlemler sonucunda renk değerleri kaybolmamaktadır. Burada önemli bir nokta, frekans bandından kullanılabilir sinyali baskınlarken arka plan gürültüsünün kontrastını da artırma olasılığının varlığıdır. Bu bilindiği üzere olumsuz bir durumdur. Çalışmamızda bu olumsuz durum izale edilmeye çalışılmıştır.

2.2. Ayırık Haar Dalgacık Dönüşümü (Discrete Haar Wavelet Transformation)

DWT ilk olarak Macar matematikçi Alfréd Haar tarafından icat edilmiştir. Dalgacıklar, verileri frekansa göre sıralamak için geliştirilmiş matematiksel işlevlerdir ve tek boyutlu bir dizide yani vektörde saklanırlar. Dalgacık dönüşümü, öncelikle verileri uzaysal alandan (spatial domain) frekans alanına (frequency domain) dönüştürür ve her renk bileşenini görünürlük ölçeğinde depolar. Daha sonra HWT, herhangi bir sinyali (x_i) yüksek geçişli ve düşük geçişli alt bantlar olmak üzere iki banda ayırır. Düşük geçiş bandı (s_k), dalgacıkların yani vektördeki sayıların ortalama değerini; yüksek geçiş bandı (d_k) ise dalgacıkların farklılıklarını tutar. Burada bir dalgacık, bir vektör uzayının ortogonal temelini temsil eder. Burada bileşenler bir vektörde toplanmalıdır. N bileşen yani renk sayısı olmak kaydıyla (genelde $N=255$), $\log_2 N$ hamlede alçak ve yüksek frekanslar tek tek sırasıyla şu şekilde ortalama alınarak hesaplanır:

$$s_k = \frac{(x_{2k} + x_{2k+1})}{2}, \quad d_k = \frac{(x_{2k} - x_{2k+1})}{2}, \quad \text{for } k = 0, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (1)$$

Frekans alanından çıkış işlemi için ise şu aşamalar uygulanır:

$$s_k + d_k = \frac{(x_{2k} + x_{2k+1})}{2} + \frac{(x_{2k} - x_{2k+1})}{2} = x_{2k} \quad (2)$$

$$s_k - d_k = \frac{(x_{2k} + x_{2k+1})}{2} - \frac{(x_{2k} - x_{2k+1})}{2} = x_{2k+1} \quad (3)$$

Son olarak geri dönüşüm işleminde şu şekilde bir adresleme (eşleştirilme) işlemi yapılır:

$$= (x_1, x_2, \dots, x_N) \rightarrow (s \mid d) = (s_1, \dots, s_{N/2} \mid d_1, \dots, d_{N/2}) \quad (4)$$

2.3. Düşük Dinamik Aralıkta Histogram Eşitleme: DDA-HE (Histogram Equalization in Low Dynamic Range)

Burada, iki boyutlu bir resmin tek boyutlu normalleştirilmiş histogramı (Olasılık Kütle Fonksiyonu) ile HWT'ye entegrasyonu sunulmaktadır. Sunulan yöntemin amacı, aynı zamanda histogramı eşitlerken görüntü kalitesini arttırmaktır, çünkü geleneksel histogram eşitleme yöntemlerinde aynı zamanda gürültüyü de eşitleme gibi bir dezavantajı da vardır. HWT, herhangi bir sinyali iki banda ayırır: yüksek geçişli ve düşük geçişli alt bantlar. Düşük geçiş bandı, girişlerin ortalama değerini korurken, yüksek geçiş bandı girişler arasındaki farkları korur. Farklılıklar, HWT'nin çoklu çözünürlük çerçevesinde sinyalin nasıl değiştiğini gösterir. Gürültünün genellikle yüksek dinamik aralıkta var olduğu bilinmektedir. Giriş vektörünün dinamik aralığını daha düşük standart sapma ile azaltılmaktadır ve dolayısıyla histogram eşitleme yapıldıktan sonra parazitler en aza indirilmiş olur. Bu durum görüntü kalitesi iyileştirmektedir. Yöntemimizde, Olasılık Kütle Fonksiyonu (PMF) üzerine Değiştirilmiş Ayrık HWT uygulanmaktadır ve Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonunu (CDF) aşağıdaki gibi oluşmaktadır.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x}{\alpha}, & |x| > \mu \\ x, & |x| \leq \mu \end{cases} \quad (5)$$

$$cdf_x(i) = \sum_{j=0}^i \psi_{f(x)}(p_x(i)) \quad (6)$$

x , burada bir boyutlu HWT dizisindeki renk frekanslarından türetilmiş yüksek geçiş bandındaki katsayılarıdır. μ ise HWT dizisindeki tüm frekans değerlerinin ortalamasıdır. Mutlak değer içerisindeki x ise sinyalin büyüklüğünü vermektedir. Eğer herhangi bir bir HWT katsayısı, ortalama değerden büyükse muhtemelen gürültü barındırıyor ve baskılanması gerekmektedir. $f(x)$ fonksiyonundaki α hiper parametresi ile ortalamadan büyük sinyaller belirli oranlarda küçülmektedir. $\alpha = 1$ olması demek geleneksel HWT dönüşümünün yapıldığı anlamına gelmektedir. Bu çalışmada α parametresi önemli bir rol oynamaktadır. Alfa değeri ne kadar fazla olursa, sinyal gücünde o kadar fazla azalma meydana gelir. Sonsuza giden alfa değeri ile elde edilen görüntü, orijinal görüntü ile birebir aynı görüntüdür. Burada önemli bir konu şudur, baskılama işlemi HWT dizisindeki ilk eleman hariç diğerlerine yapılmaktadır. Çünkü ilk eleman HWT dizisinin ortalama değerini muhafaza etmektedir. Bilindiği üzere histogramın normalleştirilmiş versiyonu PMF'dir. Bu yöntemle, PMF'nin ortalama değeri korunurken PMF sinyalleri güçlendirmektedir. Güçlendirilmiş PMF'yi elde ettikten sonra, CDF oluşturulur ve son olarak histogram eşitlemesi tamamlanır. $\psi_{f(x)}$ işlemi Haar dalgacık dönüşüm fonksiyonudur ve $p_x(i)$ ise i .inci dalgacığın görülme sıklığını vermektedir.

Bu yöntemde, gürültü öğelerinin genellikle yüksek dinamik aralıkta görüldüğü için düşük dinamik aralıkta histogram eşitlemesi yapılmaktadır. Bu makalenin amacı, HWT'nin dinamik aralık azaltma ve kontrast geliştirme sağlayan histogramlarda nasıl uygulanabileceğini kanıtlamaktır.

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Öncelikle, tüm deneyler normal özelliklere sahip bir bilgisayar kullanılarak CSIQ test veri setindeki (Larson vd., 2010) 30 resim üzerinde gerçekleştirilmiştir. Başarım testleri MATLAB ortamında yapılmıştır.

3.1. Performans Ölçüm Metrikleri (Performance Measurement Metrics)

Önerilen histogram eşitleme yönteminden sonra görüntü kalitesinin nasıl korunduğunu ölçmek için dört adet görüntü kalitesi ölçütü kullanılmıştır. Bunlar Ortalama Kare Hata (MSE), Tepe Sinyal-Gürültü Oranı (PSNR), Yapısal Benzerlik İndeksi (SSIM) ve her resmin son olarak kontrast değeridir (İnce vd., 2022). MSE ve PSNR, görüntü işleme algoritmalarının performansını değerlendirmek için görüntü işlemede kullanılan ölçütlerdir. Girdi ve çıktı fotoğrafı olarak X ve Y , $N \times M$ boyutunda iki matris olsun. İki sinyal arasındaki MSE aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$MSE = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} [X(i,j) - Y(i,j)]^2 \quad (7)$$

Y, X'e ne kadar yakınsa, MSE o kadar küçük olacaktır. Açıkça ki, MSE sifıra eşit olduğunda maksimum benzerlik elde edilir. L toplam renk çeşidi olmak kaydıyla PSNR ise şu şekilde tanımlanır:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{L^2}{MSE} \quad (8)$$

Kalite ölçüm metriği olarak, desibel birim üreten PSNR, orijinal ve filtrelenmiş görüntüler arasındaki farkı hesaplar. PSNR değeri ne kadar yüksekse, filtrelenmiş görüntünün kalitesi o kadar iyi olur. PSNR ve MSE, görüntü filtreleme kalitesini karşılaştırmak için kullanılan iki hata ölçüm kriteridir. MSE, filtrelenmiş ve orijinal görüntüler arasındaki kümülatif kare hatasını gösterir (İnce vd., 2019). PSNR ise tepe hatanın ölçüsünü görüntüler. Kısaca, MSE değeri ne kadar düşükse, hata o kadar düşük olur.

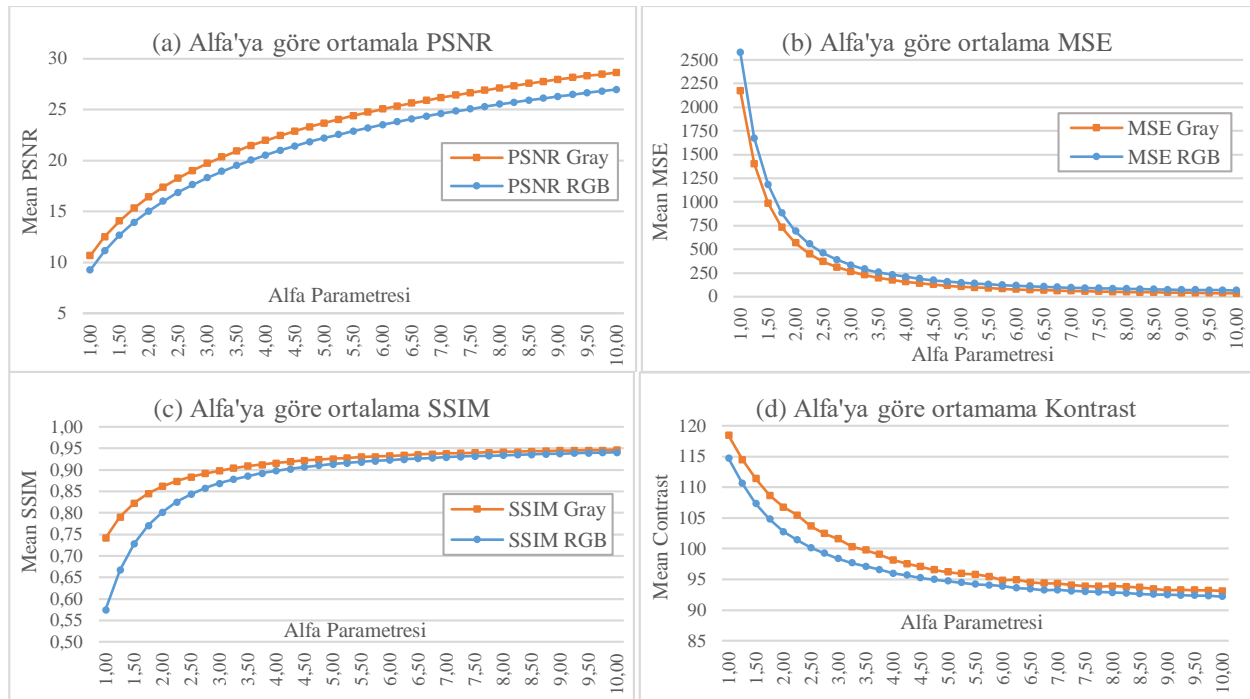
SSIM indeksi, iki görüntü arasındaki yüzdellik benzerliği belirlemek için yaygın ve iyi bilinen bir kriterdir. SSIM, [0, 1] aralığında reel bir değer verir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x + \mu_y + C_1)(\sigma_x + \sigma_y + C_2)} \quad (9)$$

Kontrast değerleri ise, görüntüdeki renk değerlerinin standart sapması ile bulunur. Yüksek kontrast değeri yüksek görüntü kalitesi demektir. Diğer bir açıklamayla bir görüntünün kontrastı, basitçe maksimum ve minimum piksel yoğunluğu arasındaki fark olarak açıklanabilir. Yani, aynı görüş alanı içindeki bir grup nesnenin parlaklık veya renk farkıdır. Bu çalışmada, kalite değerlendirmesi için kenar tabanlı kontrast ölçümü (EBCM) bir performans kriteri olarak tercih edilmiştir (Jang vd., 2016). Bu ölçü, geliştirilmiş bir görüntünün normalde orijinal görüntüden daha fazla kenar pikseline sahip olduğu gerçeğine dayanmaktadır.

3.2. Deneysel Çıktılar ve Analizi (Experimental Outputs and Analysis)

Önerilen yöntem bir alfa parametresi gerektirdiğinden, görüntü kalitesi metriklerinin farklı alfa parametre değerlerine bağlı olarak nasıl değiştiğini gözlemlemek için, alfa, 1.0'dan 10.0'a 0.25 adımlarla başlayan bir dizi sıralı değerlerle test edilmiştir. Sonuçlar Şekil 2'de gösterildiği gibi gözlemlenebilir. Şekil 2'de gösterilen sonuçlara göre, PSNR ve SSIM, alfa ile pozitif bir logaritmik korelasyona sahipken, MSE ve Kontrast, alfa ile negatif bir logaritmik korelasyona sahiptir. Bu, alfa artırılırken görüntü kalitesinin arttığı ve dinamik aralıktaki parazit miktarının azaldığı anlamına gelir. Alfa doygun noktasını bulmak için alfa 10 değerine kadar azar azar çıkarılır ve sonrasında somut bir değişiklik olmadığı gözlemlenir. Bunlara ek olarak, histogram eşitleme, parazit öğelerinin genellikle bulunmadığı düşük dinamik bir aralıktaki kontrastı artırarak görüntü kalitesini yükseltir. Bu yöntemle histogram daha az görüntü ile eşitlenir ve mevcut diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar elde edilir.



Şekil 2. Hem Gri Tonlama hem de RGB renk uzayları için alfa parametrelerine göre PSNR oranları (a), MSE değerleri (b), SSIM oranları (c) ve Kontrast Değerleri (d).

3.3. Diğer Yöntemlerle Performans Karşılaştırması (Performance Comparison with Other Methods)

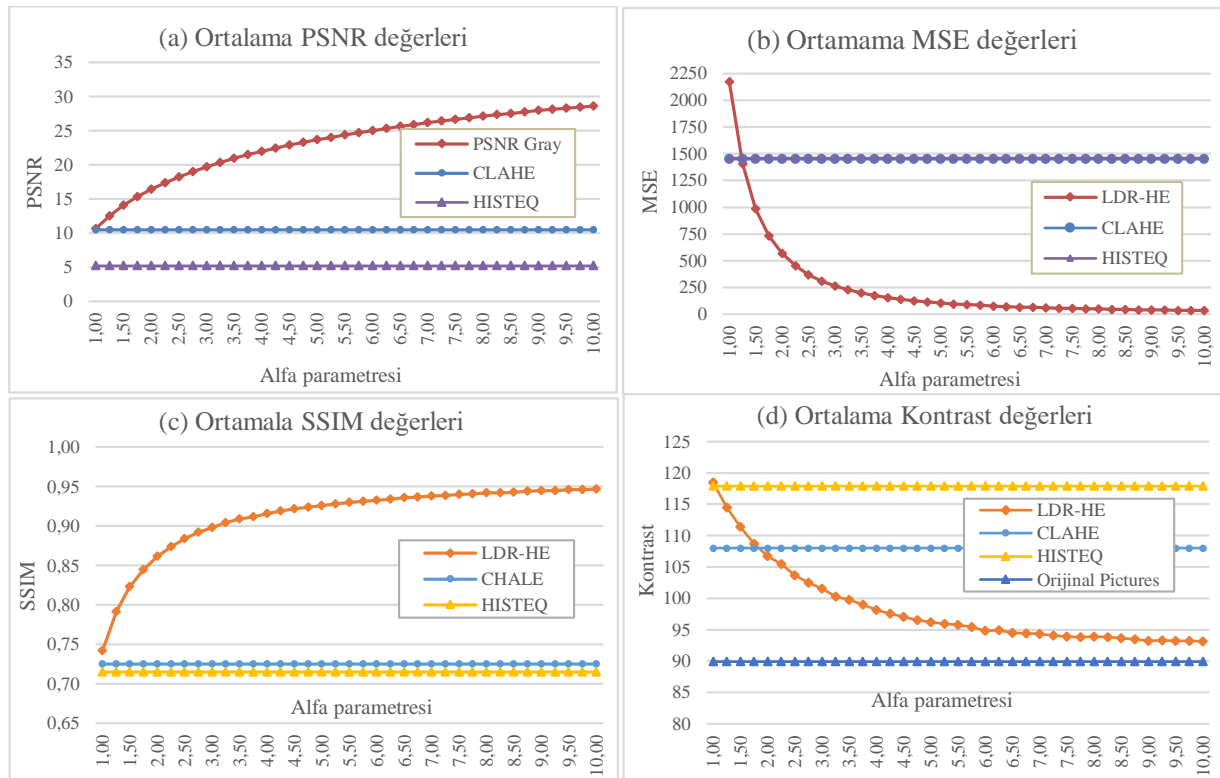
Bu bölümde, önerilen yöntem literatürde var olan mevcut konvansiyonel yöntemle karşılaştırarak kıyaslamalı bir çalışma yapılmıştır. Çok yaygın olarak kullanılan Histogram Eşitleme yöntemi (HISTEQ) ve Kontrast Sınırlı Uyarlanabilir Histogram Eşitleme (CLAHE) (Sahu vd., 2019) metodu çalışmaya dâhil edilmiştir.

Tablo 2. Orijinal resimlerin kontrast ölçümleri, mevcut yöntemlerle eşitlenmiş görüntüler ve Gri tonlamalı ve RGB formatlarında DDA-HE $\alpha = 1,75$ (Contrast measurements of original images, images synchronized with existing methods, and DDA-HE in Grayscale and RGB formats, $\alpha = 1,75$)

	Gri için kontrast				RGB için kontrast			
	Orijinal	CLAHE	HISTEQ	DDA-HE	Orijinal	CLAHE	HISTEQ	DDA-HE
Resim 1	74.3	146.3	137.0	118.4	81.1	136.9	130.6	110.8
Resim 2	67.7	101.4	117.1	106.9	77.4	106.0	118.5	109.3
Resim 3	119.1	125.6	114.1	111.4	123.4	125.2	113.9	116.3
Resim 4	117.6	134.7	124.6	123.7	118.1	134.8	124.4	122.9
Resim 5	12.7	64.7	116.1	75.9	13.1	55.7	115.9	74.7
Resim 6	47.5	92.9	112.5	107.3	80.6	114.9	115.2	107.2
Resim 7	115.1	121.8	124.8	123.3	101.8	120.7	123.1	119.3
Resim 8	135.3	117.7	118.5	125.8	129.4	118.4	117.5	123.0
Resim 9	69.2	109.7	117.7	101.5	64.6	106.2	116.5	98.1
Resim 10	61.7	68.1	124.3	91.1	59.4	66.5	123.1	107.2
Resim 11	201.2	132.6	115.3	130.9	176.2	134.4	117.1	133.2
Resim 12	96.1	111.7	105.4	102.4	89.2	110.1	107.4	101.2
Resim 13	128.8	116.2	110.0	111.1	135.6	115.3	109.8	113.7
Resim 14	215.2	166.7	122.9	136.8	211.8	176.7	121.8	145.0
Resim 15	50.8	102.0	110.8	97.1	56.2	105.9	112.9	95.7
Resim 16	107.8	125.3	117.9	114.1	117.7	123.9	118.0	117.3
Resim 17	111.0	117.1	119.4	120.4	109.6	114.6	119.7	116.8
Resim 18	132.2	125.8	124.1	129.3	122.2	121.9	124.3	125.3
Resim 19	66.6	99.7	121.5	101.7	68.4	100.9	122.2	102.7
Resim 20	38.9	69.7	114.5	75.8	35.3	62.9	111.2	74.2
Resim 21	126.9	94.0	107.7	120.0	145.4	103.0	108.3	123.0
Resim 22	44.9	101.5	116.6	90.4	52.6	97.9	116.0	90.0
Resim 23	63.3	76.3	114.2	89.9	64.1	76.2	114.2	89.7

Resim 24	150.1	121.8	125.1	131.2	148.0	128.6	124.8	131.8
Resim 25	93.8	118.5	120.8	116.3	79.8	106.5	119.7	110.3
Resim 26	26.4	81.5	122.2	104.3	27.3	76.4	118.8	97.2
Resim 27	78.6	114.9	113.9	108.6	90.9	114.9	112.3	109.3
Resim 28	55.5	97.6	117.7	108.5	60.9	89.1	118.6	102.6
Resim 29	55.6	74.0	111.6	88.1	51.1	71.9	108.2	82.5
Resim 30	33.8	110.9	118.4	97.8	36.0	111.5	117.5	96.1
ORT.	89.9	108.0	117.9	108.7	90.9	107.6	117.4	104.78
STD. SAP.	48.54	23.84	6.34	15.98	45.63	25.57	5.55	16.74

Tablo 2’de görüldüğü üzere gri seviyede elde edilen sonuçlar ile RGB’de elde edilen sonuçlar arasında yüksek bir korelasyon vardır. Bu durum önerilen yöntemin renk kanallarından bağımsız olduğunu göstermektedir. Ayrıca, optimum bir alfa değeri bulmak için, önerilen yöntemin ve mevcut yöntemlerin aynı değerlere sahip olduğu kontrast değerleri gözlemlenmiştir. Gözlemler sonucunda CLAHE’nin kontrast değerlerinin hemen hemen aynı olduğu deneylerde kontrast doygunluk noktası olarak alfa değeri 1.75 olarak belirlenmiştir. Bu değer önerilen yöntem için en ideal değerdir.



Şekil 3. Alfa parametre değerlerine göre yöntemler arasında Ortalama PSNR’ler (a), Ortalama MSE’ler (b), Ortalama SSIM’ler (c) ve Ortalama Kontrastların (d) karşılaştırılması (Comparison of Mean PSNRs (a), Mean MSEs (b), Mean SSIMs (c), and Mean Contrasts (d) between methods according to alpha parameter)

Önerilen DDA-HE (LDR-HE) yönteminin başarıları Şekil 3’teki eğriler incelenerek analiz edilebilir. Bu şekillerde CLAHE ve HISTEQ sonuçları sabittir, alfa parametresine bağlı değildir. Yöntemler arasındaki performans farkını göstermek için şekilde gösterildiği gibi bir örnekleme stili tanıtılmıştır. DDA-HE, kendi hiper parametresine çok duyarlıdır. DDA-HE, aşağıdakilere bağlı olarak düşük dinamik aralıkta histogram eşitlemesi gerçekleştirdiğinden α parametresinde, değer artırıldığında resimlerin kontrast değeri logaritmik olarak azalmaktadır. Bununla birlikte, PSNR ve SSIM değerleri, alfa alanında MSE azalırken logaritmik olarak alfa miktarı kadar artar. Bu, orijinal resimle görüntü kalitesinin ve yapısal benzerliğin alfa miktarı kadar arttığını kanıtlamaktadır. Bununla birlikte, histogram eşitlemesinin amacı kontrastı artırmak olduğu için kontrastta aşırı miktarda azalma tercih edilmez. Bu sorunu çözmek için DDA-HE ve CLAHE noktalarının kesişme noktaları alfa alanındaki kontrast değerlerine göre belirlenir. Tablo 3 ve Tablo 4, sırasıyla tüm ve özet deney sonuçlarının karşılaştırmalarını aşağıdaki gibi göstermektedir:

Tablo 3. DDA-HE'nin mevcut yöntemlerle karşılaştırılması (Comparison of DDA-HE with existing methods)

	CLAHE (GRİ)				HISTEQ (GRİ)				DDA-HE (GRİ) ($\alpha = 1,75$)			
	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast
Resim 1	7.53	2454.5	0.70	146.28	8.98	1908.5	0.76	136.99	14.42	502.48	0.91	118.39
Resim 2	8.14	1775.3	0.68	101.40	8.60	1720.0	0.69	117.14	13.08	570.38	0.94	106.91
Resim 3	11.91	1154.8	0.70	125.62	12.00	1166.6	0.71	114.12	16.47	404.46	0.87	111.40
Resim 4	12.26	1383.9	0.73	134.66	12.54	1313.9	0.75	124.56	23.19	111.75	0.96	123.71
Resim 5	2.70	2146.1	0.58	64.74	2.93	1912.6	0.60	116.14	1.29	2966.3	0.50	75.87
Resim 6	11.02	1032.6	0.82	92.90	12.01	940.6	0.87	112.47	12.67	706.41	0.78	107.33
Resim 7	11.42	1248.2	0.71	121.85	10.34	1509.3	0.67	124.85	16.33	402.77	0.90	123.31
Resim 8	11.14	1971.4	0.78	117.72	11.41	1811.2	0.66	118.54	24.24	96.55	0.98	125.83
Resim 9	7.49	2276.0	0.74	109.70	7.34	2314.5	0.65	117.70	14.41	462.10	0.95	101.54
Resim 10	12.70	398.3	0.65	68.05	14.23	339.51	0.75	124.35	6.47	1673.10	0.64	91.11
Resim 11	12.97	1148.9	0.69	132.57	12.66	1303.5	0.70	115.28	15.70	611.63	0.83	130.86
Resim 12	11.03	1403.1	0.81	111.68	10.15	1606.5	0.73	105.43	22.69	95.67	0.99	102.37
Resim 13	11.04	1921.3	0.72	116.25	11.12	1920.5	0.71	109.95	17.64	420.26	0.90	111.06
Resim 14	16.85	511.5	0.82	166.68	17.20	529.33	0.89	122.92	14.89	803.26	0.86	136.80
Resim 15	6.64	1968.1	0.74	101.98	6.96	1941.3	0.74	110.80	9.02	1137.2	0.83	97.08
Resim 16	13.30	995.1	0.82	125.25	12.98	1100.7	0.79	117.89	31.42	15.34	0.98	114.12
Resim 17	11.52	1385.7	0.76	117.11	11.58	1367.7	0.73	119.40	23.89	80.14	0.92	120.41
Resim 18	10.54	2029.9	0.71	125.82	10.39	2003.9	0.67	124.07	28.85	29.95	0.98	129.29
Resim 19	6.84	2208.9	0.66	99.69	7.29	2060.9	0.66	121.51	11.15	818.63	0.85	101.66
Resim 20	6.64	1558.0	0.59	69.68	6.56	1505.7	0.58	114.49	5.14	2205.1	0.55	75.75
Resim 21	12.30	1460.9	0.78	93.97	12.16	1623.9	0.77	107.74	23.62	107.78	0.96	119.99
Resim 22	5.57	2766.3	0.69	101.49	6.28	2435.1	0.65	116.59	10.01	994.26	0.86	90.36
Resim 23	13.89	452.81	0.75	76.28	13.77	475.15	0.73	114.23	8.70	1497.5	0.60	89.85
Resim 24	14.99	625.78	0.74	121.76	15.43	581.51	0.70	125.13	19.77	207.99	0.82	131.24
Resim 25	13.44	709.01	0.77	118.50	11.38	1151.3	0.77	120.82	16.59	342.71	0.94	116.30
Resim 26	11.18	863.98	0.77	81.48	10.27	979.41	0.74	122.15	10.40	1033.4	0.77	104.27
Resim 27	12.05	972.85	0.78	114.86	12.33	956.8	0.79	113.94	16.70	333.93	0.91	108.55
Resim 28	11.39	1010.2	0.74	97.58	10.26	1203.8	0.71	117.74	14.44	499.90	0.88	108.49
Resim 29	10.54	791.62	0.65	74.01	9.32	970.7	0.63	111.59	7.05	1768.7	0.61	88.14
Resim 30	5.21	2895.8	0.65	110.87	5.23	2992.8	0.62	118.37	9.51	1074.7	0.87	97.80
ORT.	10.47	1450.7	0.72	108.01	10.46	1454.9	0.72	117.90	15.33	732.49	0.85	108.66
STD.SAP.	3.19	690.07	0.06	23.84	3.11	617.7	0.07	6.34	7.10	702.10	0.14	15.98







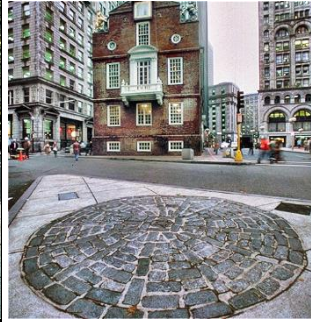



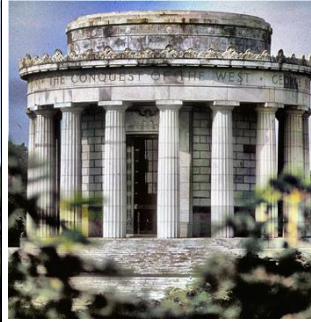
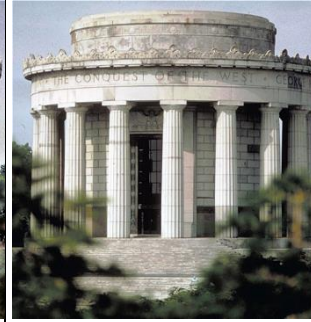
Tablo 4'de önerilen yöntem ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek PSNR değeri, en düşük MSE değeri ve en yüksek SSIM değeri elde edilmiştir. Bu durum, nicelik açısından başarılı sonuçlar elde edildiğini göstermektedir.

Tablo 4. Mevcut yöntemlerle DDA-HE sonuçlarının özeti (Summary of DDA-HE results with available methods)

	CLAHE (GRİ)				HISTEQ (GRİ)				DDA-HE (GRİ) ($\alpha = 1,75$)			
	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast
ORT.	10.47	1450	0.72	108.01	10.46	1454	0.72	117.90	15.33	732.49	0.85	108.66
STD.SAP.	3.19	690	0.06	23.84	3.11	617	0.07	6.34	7.10	702.10	0.14	15.98

Tablo 5'de histogram eşitleme sonuçlarından alınmış bazı görüntüler orijinal resim referans alınarak kalitatif ve kantitatif değerlendirme için verilmiştir. CLAHE ve HISTEQ yöntemlerinde her ne kadar görsel açıdan iyi bir iyileştirme elde edildiği gözlemlense de yüksek bir kontrast kazancının olduğu açıktır. Bu durum görüntüde bazı bozulmalara neden olmaktadır.

Tablo 5. Tüm yöntemlerden örnek deneysel sonuçlar (Sample experimental results from all methods)

Orijinal	HISTEQ	CLAHE	DDA-HE ($\alpha = 1, 75$)
 <p>PSNR: - MSE: - SSIM: - Kontrast: 128.8</p>	 <p>PSNR: 11.12 MSE: 1920.53 SSIM: 0.71 Kontrast: 1109.95</p>	 <p>PSNR: 11.04 MSE: 1921.31 SSIM: 0.72 Kontrast: 116.25</p>	 <p>PSNR: 17.64 MSE: 420.26 SSIM: 0.90 Kontrast: 111.06</p>
 <p>PSNR: - MSE: - SSIM: - Kontrast: 119.10</p>	 <p>PSNR: 12.00 MSE: 1166.67 SSIM: 0.71 Kontrast: 114.12</p>	 <p>PSNR: 11.91 MSE: 1154.88 SSIM: 0.70 Kontrast: 125.62</p>	 <p>PSNR: 16.47 MSE: 404.46 SSIM: 0.87 Kontrast: 111.40</p>
 <p>PSNR: - MSE: - SSIM: - Kontrast: 111.00</p>	 <p>PSNR: 11.58 MSE: 1367.71 SSIM: 0.73 Kontrast: 119.40</p>	 <p>PSNR: 11.52 MSE: 1385.71 SSIM: 0.76 Kontrast: 117.11</p>	 <p>PSNR: 23.89 MSE: 80.14 SSIM: 0.92 Kontrast: 120.41</p>

Ayrıca MSE değerleri incelendiğinde, her bir resimde önerilen yöntemle göre yüksek bir MSE değeri vardır. İkinci satırda bulunan ev ve kaldırım fotoğrafında ise HISTEQ yöntemi CLAHE'ye göre yüksek bir kontrast artırımı gerçekleştirmiştir. 1166.67 oranındaki yüksek MSE ve %71'lik benzerlik oranı ile (SSIM değeri) başarısız bir sonuç elde edilmiştir. Önerilen yöntemde hem düşük hata oranı hem de yüksek bir benzerlik oranı yakalanmıştır.

Tablo 5'te gösterildiği gibi, DDA-HE, ortalama kontrast değerleri hemen hemen aynı olduğunda PSNR, MSE ve SSIM açısından mevcut iki yöntemle göre başarılıdır. Ek olarak, test görüntülerinde bir gürültü faktörü olduğundan, histogram eşitleme sırasında gürültü de artırılmaktadır. Bu nedenle, karşılaştırma ölçütü olarak kontrast değerleri kullanılamaz; ancak, diğer üç kalite ölçütünü karşılaştırmak için referans değer olarak kullanılabilir. Tablo 6, karşılaştırmalı sonuçları aşağıdaki gibi göstermektedir:

Tablo 6. DDA-HE için, Gri Tonlama (a) ve RGB (b) için ölçümlerin ortalama değerleri, Gri Tonlama (c) ve RGB (d) için ortalama standart sapmalar. $\alpha = 1.75$ (For DDA-HE, mean values of measurements for Grayscale (a) and RGB (b), mean standard deviations for Grayscale (c) and RGB (d), $\alpha = 1.75$)

	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast
CLAHE	10.47	1450.73	0.72	108.01
HISTEQ	10.46	1454.95	0.72	117.90
DDA-HE	15.33	732.49	0.85	108.66

(a)

	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast
CLAHE	10.46	1454.95	0.72	107.59
HISTEQ	9.31	2489.55	0.57	117.39
DDA-HE	13.94	884.47	0.77	108.21

(b)

	Standart Sapma			
	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast
CLAHE	3.19	690.07	0.06	23.84
HISTEQ	3.11	617.77	0.07	6.34
DDA-HE	7.10	702.10	0.14	15.98

(c)

	Standart Sapma			
	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast
CLAHE	3.11	617.77	0.07	25.57
HISTEQ	5.80	2137.47	0.20	5.55
DDA-HE	5.91	818.12	0.16	16.74

(d)

Tablo 6'daki deneysel sonuçlara ve kıyaslama çalışmasına göre, DDA-HE hem gri tonlamalı hem de RGB görüntü formatlarında en iyi performansı göstermektedir. Performans PSNR, MSE, SSIM ve Kontrast değerleri ile ölçülür; ancak, yöntemler benzer kontrast değerlerine sahip olduğunda değerlendirme yapılabilir. Gri ölçekli görüntülerde, kontrast değerleri 108 civarında olduğunda, önerilen DDA-HE yöntemi %85 SSIM oranına ulaşırken, CLAHE ve HISTEQ yöntemleri %72 SSIM oranına ulaşmaktadır. Bu, DDA-HE'nin orijinal görüntüye göre yapısal benzerliğinin CLAHE ve HISTEQ yöntemlerinden çok daha fazla koruduğunu gösterir. Ek olarak, ortalama kare hata (MSE), CLAHE (1450.73) ve HISTEQ (1454.95) değerlerinin neredeyse yarısı olarak ölçülür. Görüntü kalitesi, önerilen yöntemin diğer iki yöntemle göre öncülük ettiği PSNR metriğiyle de ölçülebilir. RGB görüntülerde, önerilen DDA-HE yönteminin Tablo 6 (b) 'ye göre en iyi performansı gösterdiği görülmektedir. Bu konuda; Önerilen DDA-HE yönteminin, orijinal görüntülerle yapısal benzerliği ve gürültüye karşı sağlamlığı korumak açısından geleneksel histogram eşitleme yönteminden (HISTEQ) ve CLAHE'den daha iyi olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır.

4. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmada, histogram eşitleme işlemine Değiştirilmiş Ayrık Haar Dalgacık Dönüşümü (HWT) uygulayan bir görüntü iyileştirme yaklaşımı sunulmuştur. Sunulan yöntemin amacı, aynı zamanda histogramı eşitlerken görüntü kalitesini arttırmaktır. Kalite korunumu için, Değiştirilmiş Ayrık HWT'ye dayalı yeni bir yöntem sunulmaktadır. Önerilen DDA-HE yönteminde, gürültünün ve parazitlerin genellikle yüksek dinamik aralığında var olduğunu dikkate alınarak yüksek frekanslar belirli bir alfa hiper parametresi ile baskılanmıştır. Frekans alanında yapılan bu işlem geri dönüşüm işleminde karşımıza kontrast kazancı olarak çıkmaktadır. Literatürde var olan diğer yöntemlerle deneysel çalışmalarla kıyaslama yapıldığında yüksek bir başarımla elde edildiği görülmüştür.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, İstanbul Rumeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimince BAP2019004 nolu proje kapsamında desteklenmiş olup teşekkürlerimizi arz ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Bharadi, V.A.; Padole, L., 2017. Hybrid wavelet transform I and II combined with Contrast limited adaptive histogram equalization for image enhancement. In: Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), 1-7.
- Brown, J., Somo, S., Brooks, F., Komarov, S., Zhou, W., Anastasio, M., & Brey, E., 2020. X-ray CT in phase contrast enhancement geometry of alginate microbeads in a whole-animal model. *Annals of biomedical engineering*, 48(3), 1016-1024.

- Bulut, F., 2021. Low dynamic range histogram equalization (LDR-HE) via quantized Haar wavelet transform. *The Visual Computer*, 1-17.
- Chenand, S.-D. A.Ramli, 2003. "Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in Contrast enhancement," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 49, 1310-1319.
- Daniel, Ebenezer; Anitha, J., 2016. Optimum wavelet based masking for the Contrast enhancement of medical images using enhanced cuckoo search algorithm. *Computers in biology and medicine*, 71: 149-155.
- Dang Quoc, H. and Nguyen Doan, C., 2022. An Effective Hybrid Algorithm Based on Particle Swarm Optimization with Migration Method for Solving the Multiskill Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*.
- Das, P., & Das, A., 2020. Adaptive Gabor Filtering using Grey Wolf Optimization for Enhancement of Brain MRI. In *2020 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*, 356-359.
- Dongwook Cho, Tien D. Bui., 2014. Fast image enhancement in compressed wavelet domain, In *Signal Processing*, Volume 98, 295-307.
- Fujioka, T., Yashima, Y., Oyama, J., Mori, M., Kubota, K., Katsuta, L., ... & Tateishi, U., 2021. Deep-learning approach with convolutional neural network for classification of maximum intensity projections of dynamic Contrast-enhanced breast magnetic resonance imaging. *Magnetic Resonance Imaging*, 75, 1-8.
- Gonzalez, Rafael C., Richard E. Woods, *Digital Image Processing (4th Edition)*, March 2017, Pearson Publishing.
- Ince, I.F., Bulut, F., Kilic, I., Yildirim, M.E. and Ince, O.F., 2022. Low dynamic range discrete cosine transform (LDR-DCT) for high-performance JPEG image compression. *The Visual Computer*, 1-26.
- Iqbal, M.Z., Ghafoor, A., Siddiqui, A.M., Riaz, M.M., Khalid, U., 2014. Dual-tree complex wavelet transform and SVD based medical image resolution enhancement, In *Signal Processing*, Volume 105, 430-437.
- Huang, S.C. and Yeh, C.H., 2013. Image contrast enhancement for preserving mean brightness without losing image features. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(5-6), 1487-1492.
- Janan, F., & Brady, M., 2021. RICE: A method for quantitative mammographic image enhancement. *Medical image analysis*, 102043.
- Jang, C.Y., Kang, S.J. and Kim, Y.H., 2016. Adaptive Contrast enhancement using edge-based lighting condition estimation. *Digital Signal Processing*, 58, 1-9.
- Jenifer, S., Parasuraman, S. and Kadirvelu, A., 2016. Contrast enhancement and brightness preserving of digital mammograms using fuzzy clipped contrast-limited adaptive histogram equalization algorithm. *Applied Soft Computing*, 42, 167-177.
- Jose, J., Gautam, N., Tiwari, M., Tiwari, T., Suresh, A., Sundararaj, V., & Rejeesh, M. R., 2021. An image quality enhancement scheme employing adolescent identity search algorithm in the NSSST domain for multimodal medical image fusion. *Biomedical Signal Processing and Control*, 66, 102480.
- Kaur, A., Singh, C., 2017. Contrast enhancement for cephalometric images using wavelet-based modified adaptive histogram equalization. *Applied Soft Computing*, 51: 180-191.
- Kim, S.E., Jeon, J.J. and Eom, I.K., 2016. Image contrast enhancement using entropy scaling in wavelet domain. *Signal Processing*, 127, 1-11.
- Kim, Y.T., 1997. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization. *IEEE transactions on Consumer Electronics*, 43(1), 1-8.
- Larson, E.C. and Chandler, D.M., 2010. Most apparent distortion: full-reference image quality assessment and the role of strategy. *Journal of electronic imaging*, 19(1), p.011006.
- Lecca, M., Rizzi, A. and Serapioni, R.P., 2021. An Image Contrast Measure Based on Retinex Principles. *IEEE Transactions on Image Processing*, 30, 3543-3554.
- Lidong, H., Wei, Z., Jun, W. and Zebin, S., 2015. Combination of contrast limited adaptive histogram equalisation and discrete wavelet transform for image enhancement. *IET Image Processing*, 9(10), 908-915.
- Liu, Y.F., Guo, J.M. and Yu, J.C., 2016. Contrast enhancement using stratified parametric-oriented histogram equalization. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 27(6), 1171-1181.
- Luque-Chang, A., Cuevas, E., Pérez-Cisneros, M., Fausto, F., Valdivia-Gonzalez, A. and Sarkar, R., 2021. Moth swarm algorithm for image contrast enhancement. *Knowledge-Based Systems*, 212, p.106607.
- Malik, R., Pande, S., Khamparia, A., & Bhushan, B., 2021. 3 Contrast enhancement approach for satellite images using hybrid fusion technique and artificial bee colony optimization. In *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, 33-54.
- Nithyananda, C. R., et al., 2016. Survey on Histogram Equalization method based Image Enhancement techniques. In: *Data Mining and Advanced Computing (SAPIENCE)*, International Conference on. IEEE, 150-158.
- Sahu, S., Singh, A.K., Ghrera, S.P. and Elhoseny, M., 2019. An approach for de-noising and contrast enhancement of retinal fundus image using CLAHE. *Optics & Laser Technology*, 110, 87-98.
- Shaik, A. and Thanikaiselvan, V., 2021. Comparative analysis of integer wavelet transforms in reversible data hiding using threshold based histogram modification. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 33(7), 878-889.

- Spille, D. C., Adeli, A., Sporns, P. B., Heß, K., Streckert, E. M. S., Brokinkel, C., ... & Brokinkel, B., 2021. Predicting the risk of postoperative recurrence and high-grade histology in patients with intracranial meningiomas using routine preoperative MRI. *Neurosurgical review*, 44(2), 1109-1117.
- Tung, T. C., & Fuh, C. S., 2021. ICEBIN: Image Contrast Enhancement Based on Induced Norm and Local Patch Approaches. *IEEE Access*, 9, 23737-23750.
- Wang, Y., Q. Chen, and B. Zhang., 1999. "Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 45, 68-75.
- Yelmanova, E. and Romanyshyn, Y., 2017, February. Histogram-based method for image contrast enhancement. In *2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, 165-169.