

Histogram Tabanlı Çok Seviyeli Eşikleme Tekniklerinin Renk Nicemleme Üzerindeki Etkileri

Mahmut Kılıçaslan¹

Özet

Bu bölümde RGB renk uzayında renk indirgeme problemi, çok seviyeli histogram tabanlı eşikleme yöntemleri kullanılarak ele alınmıştır. Otsu, Kapur entropi ve histogramın ağırlık merkezi tabanlı eşikleme teknikleri ile her bir renk kanalı için optimum eşik değerleri belirlenmiş ve bu eşik değerleri kullanılarak renk uzayı alt sınıflara ayrılmıştır. Elde edilen her alt sınıfta yer alan piksel değerleri, ilgili sınıfın ortalama yoğunluk değeri ile temsil edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde görüntünün temel karakteristik özellikleri korunurken veri boyutunda önemli ölçüde azalma sağlanmıştır. Çalışmada farklı eşikleme yöntemlerinin renk dağılımı, sınıf içi homojenlik ve görsel kalite üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, çok seviyeli eşikleme tabanlı renk indirgeme yöntemlerinin görüntü işleme uygulamalarında etkili bir ön işleme adımı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

1. Giriş

Dijital görüntü işleme alanında renk indirgeme, görüntülerin daha düşük veri boyutu ile temsil edilmesini sağlarken görsel bilginin mümkün olduğunca korunmasını amaçlayan önemli bir ön işleme adımıdır [1]. Renk indirgeme yaklaşımları bölütleme ve içerik tabanlı görüntü erişimi gibi farklı alanlarda da kullanılmaktadır [2-4]. Özellikle depolama, iletim ve hesaplama maliyetlerinin azaltılması gereken uygulamalarda etkili renk nicemleme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Histogram tabanlı eşikleme teknikleri, gri seviye görüntülerde bölütleme amacıyla yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bu yöntemlerin renk uzayına uyarlanarak renk indirgeme problemi için kullanılması literatürde sınırlı

1 Doç. Dr., Ankara Üniversitesi Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, İstatistik Bölümü, Büyük Veri Analistliği Programı, m.kilicaslan@ankara.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-1117-7736

sayıda çalışmada ele alınmıştır. Çok seviyeli eşikleme yöntemleri, görüntü histogramını istatistiksel ve bilgi kuramsal ölçütlere göre analiz ederek optimum eşik değerlerini belirlemeye olanak tanımaktadır. Otsu yöntemi sınıflar arası varyansı maksimize etmeye dayanırken, Kapur yöntemi maksimum entropi ilkesini esas almakta, histogramın ağırlık merkezi yaklaşımı ise dağılımın moment özelliklerinden yararlanmaktadır. Histogramın ağırlık merkezine dayalı indirgeme, özellikle kenar görüntülerinin eşiklenmesinde oldukça başarılı sonuçlar vermiştir [5-7]. Bu farklı optimizasyon kriterleri, elde edilen alt sınıfların yapısını ve dolayısıyla renk indirgeme performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bölümde, söz konusu eşikleme teknikleri RGB renk kanallarına ayrı ayrı uygulanarak renk uzayı çok seviyeli olarak bölütlenmekte ve her bir alt sınıf sınıf ortalaması ile temsil edilmektedir. Böylece hem renk nicemleme gerçekleştirilmekte hem de farklı eşikleme yöntemlerinin renk indirgeme performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmektedir.

Renk indirgeme temel olarak 2 aşamadan oluşmaktadır. Bu adımlar palet tasarımı ve piksel eşleme (pixel mapping) olarak adlandırılır [8]. Palet tasarımı hesaplama bakımından zor ve kritik bir adımdır. Bu sebeple birçok makale palet tasarımına odaklanılmışlardır. Palet tasarımı için uygulanan birçok makale bulunmaktadır [9-11]. Median-Cut algoritması popüler renk indirgeme yaklaşımlarından biridir. Median cut renk indirgeme algoritması, sayısal görüntülerdeki yüksek renk çeşitliliğini sınırlı sayıda temsilci renge dönüştürmek amacıyla kullanılan sezgisel ve yinelemeli bir renk kuantalama yöntemidir. Algoritma, görüntüde bulunan tüm pikselleri RGB renk uzayında tek bir küme olarak ele almakta ve her yinelemede en geniş renk dağılımına sahip bileşeni (R, G veya B) belirleyerek ilgili eksen boyunca ortanca değere göre kümeyi iki alt kümeye ayırmaktadır. Bu bölme işlemi, hedeflenen palet boyutuna ulaşıncaya kadar sürdürülmekte ve elde edilen her alt küme, içerdiği renklerin ortalaması alınarak tek bir temsilci renk ile ifade edilmektedir. Böylece renk uzayı, her biri yaklaşık eşit sayıda piksel içeren kutulara ayrılmakta ve hem hesaplama maliyeti düşük hem de doğal görüntüler için görsel olarak tatmin edici bir palet oluşturulmaktadır. Median cut yöntemi; uygulama kolaylığı, hızlı çalışması ve ek parametre gerektirmemesi nedeniyle özellikle palet tabanlı görüntü gösterimi, görüntü sıkıştırma ve düşük bit düzeyli görüntü işleme uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmekte, ancak insan görme sisteminin algısal özelliklerini doğrudan dikkate almaması nedeniyle bazı durumlarda optimal renk dağılımını sağlayamamaktadır [12]. Octree renk indirgeme algoritması ise bir diğer renk indirgeme yöntemidir. İlgili algoritma ağaç tabanlı bir renk kuantalama yöntemidir. Bu yöntemde RGB renk uzayı, her seviye bir renk bileşenine ait bit bilgisini temsil eden sekiz dallı bir ağaç yapısı

(octree) biçiminde tasarlar ve görüntüdeki her piksel, renk bileşenlerinin en anlamlı bittene en az anlamlı bite doğru ilerlenmesiyle ağaca yerleştirilmektedir. Her düğüm, kendisine karşılık gelen renk kümesine ait piksel sayısını ve toplam renk değerlerini tutarak istatistiksel bilgi biriktirmekte, hedeflenen palet boyutuna ulaşmak için ise ağaç alt seviyelerden başlayarak kontrollü biçimde budanmaktadır. Octree algoritması, özellikle tek geçişte çalışabilmesi, dinamik olarak palet oluşturabilmesi ve gerçek zamanlı görüntü işleme uygulamalarına uygunluğu nedeniyle gömülü sistemler, grafik donanımları ve palet tabanlı görüntü sıkıştırma süreçlerinde yaygın olarak kullanılmakta; buna karşın budama stratejisine bağlı olarak bazı durumlarda algısal açıdan optimal olmayan renk dağılımları üretebilmektedir [13]. Popüler yaklaşımlardan bir diğeri de k-means yaklaşımı ile gerçekleştirilen renk indirgeme yaklaşımlarıdır [14-17]. K-means tabanlı renk indirgeme yaklaşımı, benzer renkleri aynı küme altında toplayarak sınırlı sayıda temsilci renge dönüştüren, bir yöntemidir. Bu yöntemde görüntüyü oluşturan pikseller RGB renk uzayında birer veri noktası olarak ele alınmakta ve önceden belirlenen K adet küme merkezi ile yinelemeli bir süreç yürütülmektedir. İlk aşamada rastgele veya belirli bir sezgisel yaklaşımla seçilen küme merkezleri, her pikselin Öklid uzaklığına göre en yakın merkeze atanması ve ardından her küme için yeni merkezin o kümeyle ait renklerin ortalaması alınarak güncellenmesi adımlarıyla sürekli olarak iyileştirilmektedir. Bu süreç, küme merkezlerinde anlamlı bir değişim kalmayınca ya da belirlenen yineleme sayısına ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Sonuç olarak her küme merkezi paleti temsil eden bir renk olarak kullanılmaktadır. Söz konusu yöntem, renk dağılımını veri temelli olarak modellemesi ve algısal açıdan daha dengeli sonuçlar üretebilmesi nedeniyle yüksek görsel kalite gerektiren renk indirgeme uygulamalarında etkili bir çözüm sunmaktadır. Diğer taraftan başlangıç küme merkezlerine duyarlılığı, yinelemeli yapısı nedeniyle yüksek hesaplama maliyeti ve büyük görüntülerde işlem süresinin artması gibi sınırlılıklara da sahip bulunmaktadır. Fuzzy C-Means (FCM) tabanlı renk indirgeme yöntemi kümeleme tabanlı olarak sınıflandırılan yaklaşımlardandır [18, 19]. Görüntüde ki renklerin keskin sınırlarla değil, bulanık üyelik dereceleri ile kümelerle atanmasını esas almaktadır. Bu yöntemde her piksel RGB renk uzayında bir veri noktası olarak ele alınmakta ve önceden belirlenen küme sayısı kadar renk kümesi oluşturulmaktadır. K-means algoritmasından farklı olarak her piksel yalnızca tek bir kümeyle atanmak yerine, tüm kümelerle belirli üyelik katsayıları ile bağlıdır ve bu katsayılar piksel ile küme merkezi arasındaki uzaklığa bağlı olarak hesaplanmaktadır. Elde edilen küme merkezleri paleti temsil eden renkleri oluştururken, pikseller genellikle en yüksek üyelik derecesine sahip oldukları kümeyle atanarak yeni görüntü elde edilmektedir. 2023 yılında Kılıçaslan ve İncetaş tarafından renk

indirgeme problemine yönelik olarak histogram tabanlı çok seviyeli eşikleme yaklaşımını kullanan ve temsilci renk sayısını otomatik olarak belirleyebilen yeni bir renk kuantalama yöntemi önerilmiştir[20]. Geliştirilen model üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada RGB renk uzayının her bir bileşenine ait histogramlar ağırlık merkezi (Center of Gravity – CoG) tabanlı çok seviyeli eşikleme ile bölütlenmiştir. Sonraki aşamada bu alt bölgelerin merkez noktaları kullanılarak küme merkezleri ve renk paleti oluşturulmuş, son aşamada ise her piksel Öklid uzaklığına göre en yakın küme merkezine yeniden atanarak nihai indirgenmiş görüntü elde edilmektedir. Önerilen yöntem, klasik bölme tabanlı tekniklerin geri dönüşsüz bölme problemi ile kümeleme tabanlı yöntemlerin başlangıç değerlerine duyarlılık ve kullanıcıya bağlı küme sayısı belirleme gereksinimini ortadan kaldırmayı hedeflemiştir.

Bu çalışmada, Otsu, Kapur ve histogramın ağırlık merkezi tabanlı çok seviyeli eşikleme yöntemleri kullanılarak RGB renk uzayına ait histogramlar üzerinden eşik değerleri belirlenmiş ve bu eşiklere bağlı olarak renk uzayı alt bölgelere ayrılmıştır. Gerçekleştirilen bölütleme işleminin ardından, her bir alt kümeyle düşen piksellerin renk değerlerinin ortalaması alınarak temsilci renkler elde edilmiş ve böylece renk indirgeme işlemi gerçekleştirilmiştir. Literatürde benzer biçimde eşikleme temelli bölütleme yaklaşımları farklı görüntü işleme problemleri için kullanılmıştır. Ancak bu çalışmada, Otsu, Kapur ve ağırlık merkezi tabanlı eşikleme tekniklerinin renk kuantalama başarımına etkileri; elde edilen görüntülerin görsel kalitesi ve nicel performans ölçütleri üzerinden analiz edilerek yöntemlerin güçlü ve zayıf yönleri tartışılmıştır. Böylece eşikleme tabanlı renk indirgeme yaklaşımlarının hem kuramsal hem de uygulamaya dönük karşılaştırmalı bir değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

2. Görüntü Eşikleme Teknikleri

Eşikleme, bir görüntüyü anlamlı ve analiz edilebilir alt bölgelere ayırmak amacıyla piksel yoğunluk dağılımını temel alan en temel ve etkili bölütleme yaklaşımlarından biridir. Bu yöntemlerde temel amaç, görüntü histogramından yararlanarak sınıflar arasındaki ayrımı en iyi temsil eden eşik değerlerini otomatik olarak belirlemek ve böylece farklı özelliklere sahip piksel gruplarını birbirinden ayırmaktır. Tek seviyeli eşikleme yöntemleri görüntüyü iki sınıfa ayırırken, çok seviyeli eşikleme teknikleri daha karmaşık sahnelerin birden fazla homojen bölgeye ayrılmasına olanak tanımaktadır. Otsu, Kapur ve histogramın ağırlık merkezi gibi yöntemler, eşik değerlerini belirlerken sırasıyla sınıflar arası varyansın eniyilenmesi, entropinin maksimize edilmesi ve histogram dağılımının merkezinin dikkate alınması gibi farklı optimizasyon ölçütlerini kullanmaktadır. Bu bölümde ele alınan eşikleme teknikleri, yalnızca görüntü

bölütleme amacıyla değil, aynı zamanda renk uzayının alt bölgelere ayrılması yoluyla renk indirgeme sürecine temel oluşturacaktır.

Kapur [21] (entropi) tarafından önerilen amaç fonksiyonu;

$$J(t) = H_x + H_y \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada H_x ve H_y histogramın entropilerini temsil etmekte olup,

$$H_x = -\sum_{i=0}^{t-1} \frac{p_i}{\omega_0} \ln \frac{p_i}{\omega_0}, \omega_0 = \sum_{i=0}^{t-1} p_i \quad (2)$$

$$H_y = -\sum_{i=t}^{255} \frac{p_i}{\omega_1} \ln \frac{p_i}{\omega_1}, \omega_1 = \sum_{i=t}^{255} p_i$$

$$p_i = h_i / (M \times N)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada h_i i. seviyede piksel sayısını temsil ederken, $p_{i\text{ ilgili}}$ pikselin bulunma olasılığıdır. Otsu [22] yaklaşımının amaç fonksiyonu ise;

$$j(t) = \sigma_x + \sigma_y \quad (3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Söz konusu eşitlikte σ değerleri sınıflar arası varyansı temsil etmektedir.

$$\sigma_x = \omega_0(\mu_0 - \mu_t) \text{ ve } \sigma_y = \omega_1(\mu_1 - \mu_t) \quad (4)$$

şeklinde formüle edilmiştir. Histogramın ağırlık merkezini [23] dikkate alan eşikleme yaklaşımı da başarılı metotlardan biridir. Kısmi olasılık dağılımlarının toplamı ve kısmi ortalamalar Eşitlik 5'teki gibi hesaplanmaktadır.

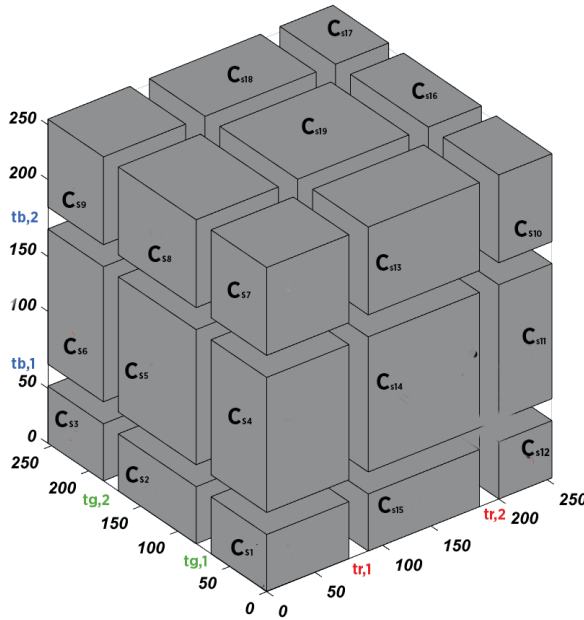
$$\omega_0 = \sum_{i=0}^{\mu_1-1} h_i, \mu_0 = \sum_{i=0}^{\mu_1-1} \frac{ih_i}{\omega_0} \quad (5)$$

$$\omega_1 = \sum_{i=\mu_1}^{255} h_i, \mu_1 = \sum_{i=\mu_1}^{255} \frac{ih_i}{\omega_1}$$

3. Eşikleme Teknikleri ile Renk Uzayı Bölütleme ve Renk İndirgeme

Bu çalışmada renk indirgeme prosedürü, RGB renk uzayının her bir kanalına ayrı ayrı uygulanan çok seviyeli histogram tabanlı eşikleme yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda görüntüye ait kırmızı (R), yeşil (G) ve mavi

(B) kanallarının her biri bağımsız bir gri seviye görüntü olarak ele alınmış ve her kanal için histogram dağılımı elde edilmiştir. Elde edilen histogramlar üzerinden Otsu, Kapur ve histogramın ağırlık merkezi tabanlı eşikleme yöntemleri kullanılarak optimum eşik değerleri belirlenmiştir. Çok seviyeli eşikleme sürecinde, her bir renk kanalına ait yoğunluk değerleri $L=256$ gri seviye olacak şekilde aralığında tanımlanmıştır. Seçilen eşikleme yöntemine bağlı olarak k adet eşik değeri $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ şeklinde elde edilmiştir. Bu eşik değerler ile renk kanalı, $c_0 = [0, t_1 - 1], c_1 = [t_1, t_2 - 1], \dots, c_k = [t_k, L - 1]$ olmak üzere $k+1$ adet sınıfa ayrılmıştır. Tüm renk kanalları kombinasyonu ile renk uzayı $C_{altsmf} = (k+1)^3$ kadar alt kümeye ayrılmıştır. Şekil 1 bölütlenmiş renk uzayını temsil etmektedir. Bahsi geçen bu işlemler referans [21], [24] ve [25]'de de yapılmıştır. Ancak ilgili çalışmalarda yapılan renk indirgeme yöntemlerinin detaylı bir karşılaştırılması bulunmamaktadır.







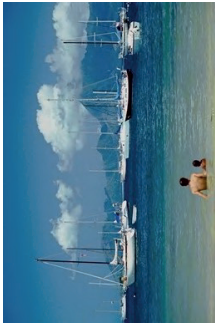



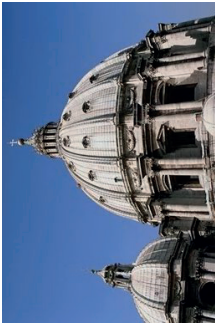
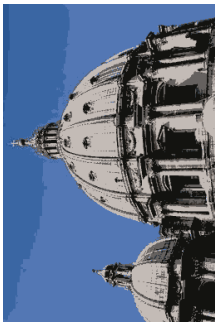
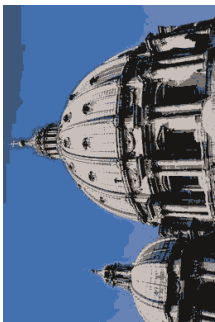

Şekil 1. Bölütlenmiş renk uzayı [20]

4. Deneysel Bulgular ve Yorumlar

Önerilen çok seviyeli eşikleme tabanlı renk indirgeme yaklaşımının performansı, yaygın olarak kullanılan Corel-1000 veri tabanından rastgele seçilen 10 farklı doğal görüntü üzerinde deneysel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, RGB renk uzayını oluşturan her bir kanal bağımsız olarak ele alınmış ve Otsu, Kapur entropi ve histogramın ağırlık merkezi tabanlı eşikleme

yöntemleri kullanılarak 2 eşik seviyesinde bölütleme işlemi gerçekleştirilmiştir. İki eşik değeri kullanıldığında her bir renk kanalı üç alt sınıfa ayrılmış ve kanalların birleşimi ile toplamda maximum 27 renk seviyeli bir temsil elde edilmiştir. Benzer şekilde 3 eşik için gerçekleştirilen sonuçlarda ise renk uzayı 64 alt sınıfa ayrılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında, farklı eşikleme yöntemlerinin renk dağılımı, sınıf içi homojenlik, görsel kalite ve detay koruma başarımı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca eşik sayısının artırılmasının renk temsil gücü ve veri indirgeme oranı üzerindeki rolü analiz edilmiştir. Bu değerlendirmeler sayesinde, varyans tabanlı, entropi tabanlı ve ortalama tabanlı eşikleme yaklaşımlarının RGB renk uzayını bölütleme karakteristikleri ortaya konularak hangi yöntemin hangi koşullar altında daha başarılı sonuçlar ürettiği tartışılmıştır. Yöntemlerin performanslarının nesnel olarak karşılaştırılabilmesi amacıyla tepe sinyal-gürültü oranı (PSNR) ve yapısal benzerlik indeksi (SSIM) metrikleri kullanılmıştır. Tablo 1’de Corel 1K verisetinden seçilen rastgele orijinal görüntüler ve yöntemlere ait iki eşik ile olan indirgeme sonuçları görsel olarak verilmiştir. Tablo 2 ve Tablo 3’te ise sırayla iki ve üç eşiklere ait performanslar verilmiştir.

Tablo 1. Görüntülerin farklı eşikleme teknikleri ile indirgenmiş görsel çıktıları

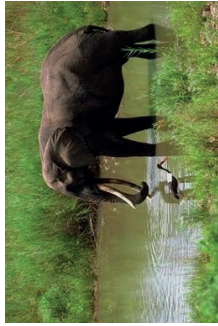
Görüntü No	Orjinal	Otsu	Kapur	Ağırlık Merkezi
1				
2				
3				



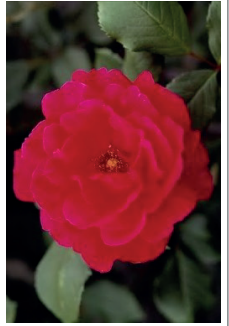
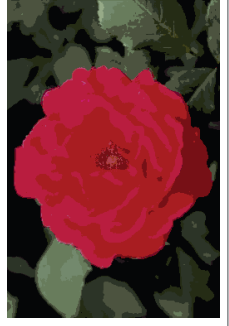
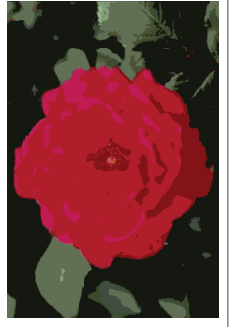
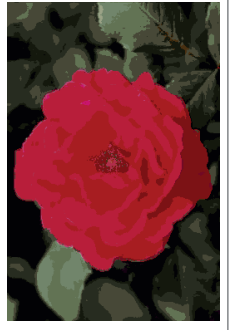
4



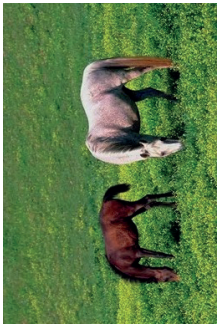
5



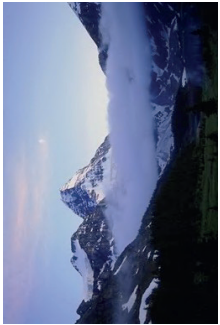
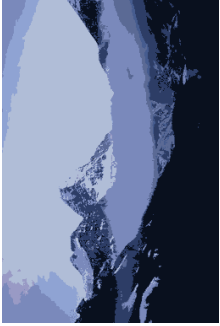
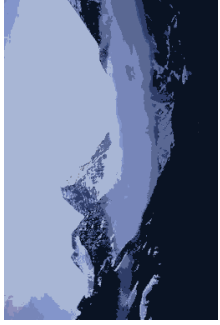
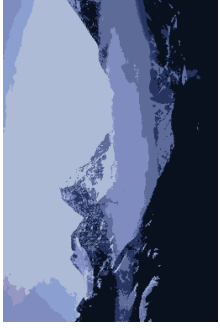
6



7



8



9



10

Tablo 2. Renk indirgeme algoritmalarının karşılaştırmalı performansları (2 eşik)

Görüntü No	Otsu			Kapur			Ağırlık Merkezi		
	SSIM	PSNR	Renk Sayısı	SSIM	PSNR	Renk Sayısı	SSIM	PSNR	Renk Sayısı
1	0,9482	23,0852	20	0,9476	23,028	20	0,9438	22,7413	20
2	0,924	25,1837	16	0,9195	24,6445	16	0,9135	24,5761	17
3	0,9645	24,5579	14	0,9602	24,0351	12	0,9652	24,6017	16
4	0,9695	23,188	20	0,9745	24,1589	18	0,9707	23,421	20
5	0,9902	28,6592	10	0,98	25,682	10	0,9846	26,6115	15
6	0,9482	24,6864	16	0,9362	23,8153	16	0,9458	24,4828	16
7	0,9621	28,4616	19	0,909	24,716	18	0,9575	27,9412	19
8	0,9323	25,0614	20	0,913	24,0673	15	0,9305	24,96	19
9	0,9839	25,6371	9	0,9791	24,5375	14	0,9823	25,2206	13
10	0,9535	22,6336	20	0,9481	22,1679	19	0,9512	22,4056	20

Tablo 3. Renk indirgeme algoritmalarının karşılaştırmalı performansları (3 eşik)

Görüntü No	Otsu			Kapur			Ağırlık Merkezi		
	SSIM	PSNR	Renk Sayısı	SSIM	PSNR	Renk Sayısı	SSIM	PSNR	Renk Sayısı
1	0,9715	25,6008	39	0,9679	25,0934	36	0,9697	35,3595	42
2	0,963	27,9132	31	0,9442	26,4053	29	0,9615	27,6127	31
3	0,971124	28,2895	22	0,9792	26,7975	22	0,9851	28,2365	22
4	0,9846	26,1936	36	0,9809	25,082	38	0,9838	36,011	36
5	0,9948	31,5546	16	0,9889	28,5976	19	0,9899	28,4671	23
6	0,9689	26,8454	28	0,9612	25,8823	23	0,9683	26,7557	26
7	0,9791	30,7847	36	0,966	28,3792	31	0,9992	27,8748	42
8	0,9626	27,5591	34	0,9413	25,7927	25	0,9822	29,5229	45
9	0,989	27,315	17	0,9905	27,9105	22	0,9905	27,9946	20
10	0,9741	25,0706	38	0,9718	24,7133	34	0,9753	25,2704	41

Tablo 2 ve Tablo 3 birlikte değerlendirildiğinde, eşik sayısındaki artışın tüm yöntemler için performansı belirgin biçimde iyileştirdiği görülmektedir. İki eşik kullanılan durumda elde edilen SSIM ve PSNR değerlerinin, üç eşik kullanılan duruma kıyasla daha düşük kaldığı; buna karşılık üç eşik ile hem yapısal benzerliğin hem de tepe sinyal-gürültü oranının yükseldiği tespit edilmiştir. Bu artış, renk uzayının daha fazla alt kümeye ayrılması sayesinde görüntünün özgün yapısının daha başarılı temsil edilmesinden kaynaklanmaktadır. İki eşik durumunda yöntemler karşılaştırıldığında, SSIM ölçütüne göre Otsu

yönteminin çoğu görüntüde en yüksek ya da en yüksek değere çok yakın sonuçlar ürettiği görülmektedir. Kapur yöntemi bazı görüntülerde Otsu yöntemini geride bıraksa da genel eğilim Otsu'nun daha kararlı ve yüksek yapısal benzerlik sağladığını göstermektedir. Ağırlık merkezi yöntemi ise SSIM açısından genellikle diğer iki yöntemin bir miktar gerisinde kalmıştır. PSNR değerleri açısından da benzer bir durum söz konusu olup, iki eşik seviyesinde Otsu yöntemi çoğu görüntüde en yüksek veya en yüksek değere çok yakın sonuçlar üretmiştir. Üç eşik kullanılan durumda ise tüm yöntemlerin performansının yükseldiği, ancak yöntemler arasındaki farkların kısmen azaldığı gözlenmiştir. SSIM değerleri incelendiğinde, bazı görüntülerde Kapur ve ağırlık merkezi yöntemlerinin Otsu yöntemini geçtiği ve özellikle ağırlık merkezi yönteminin belirli görüntülerde oldukça yüksek yapısal benzerlik değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bununla birlikte Otsu yöntemi genel ortalama dikkate alındığında yine yüksek ve dengeli sonuçlar üretmeye devam etmiştir. PSNR bakımından değerlendirildiğinde üç eşik seviyesinde en dikkat çekici artışın ağırlık merkezi yönteminde gerçekleştiği ve bazı görüntülerde diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek yeniden yapılandırma kalitesi sağladığı belirlenmiştir. Renk sayıları açısından değerlendirme yapıldığında, iki eşik durumunda yöntemlerin benzer sayıda renk ile temsil sağladığı, üç eşik durumunda ise özellikle ağırlık merkezi yönteminin daha fazla renk içeren bir temsil oluşturduğu görülmektedir. Bu durum, söz konusu yöntemin görüntü detaylarını koruma eğiliminin daha yüksek olduğunu, ancak renk indirgeme oranı açısından diğer yöntemlere göre daha düşük bir sıkıştırma sağladığını göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, düşük eşik sayılarında Otsu yönteminin hem SSIM hem de PSNR açısından daha kararlı ve başarılı sonuçlar ürettiği, eşik sayısı arttıkça Kapur ve ağırlık merkezi yöntemlerinin rekabetçi hale geldiği ve özellikle ağırlık merkezi yönteminin yüksek görüntü kalitesi sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgular, eşik sayısı ile görüntü kalitesi arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu ve uygun eşik sayısı ile yöntem seçiminin uygulamanın hedeflerine (yüksek kalite ya da yüksek indirgeme oranı) bağlı olarak yapılması gerektiğini göstermektedir.

Tablolardaki değerlerin genel ortalamaları dikkate alındığında, eşik sayısındaki artışın tüm yöntemler için performans kazanımı sağladığını göstermektedir. İki eşik durumunda SSIM değerleri yöntemlere göre yaklaşık olarak 0.94–0.96 iken, üç eşik seviyesinde bu değerler 0.96–0.99 seviyesine yükseldiği görülmektedir. Benzer şekilde PSNR değerleri iki eşikte 23–26 dB aralığında kalırken, üç eşikte 25–31 dB seviyelerine ulaşarak önemli bir artış göstermiştir. Bu artış, yeniden oluşturulan görüntü kalitesinde gözle görülür bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. Yöntem bazında ortalama değerlere bakıldığında iki eşik seviyesinde Otsu'nun hem SSIM hem PSNR açısından en yüksek ortalamaya

sahip olduğu, Kapur yönteminin buna çok yakın ancak biraz daha düşük kaldığı, ağırlık merkezi yönteminin ise özellikle SSIM bakımından sınırlı bir farkla diğerlerinin gerisinde yer aldığı belirlenmiştir. Üç eşik seviyesinde ise yöntemler arasındaki farkların azaldığı, hatta bazı görüntülerde Kapur ve ağırlık merkezi yöntemlerinin Otsu'yu geçtiği, ancak genel ortalama dikkate alındığında Otsu'nun dengeli ve yüksek performansını koruduğu görülmektedir. Renk sayılarının ortalaması incelendiğinde iki eşikten üç eşik seviyesine geçişte yaklaşık iki katına varan bir artış olduğu ve özellikle ağırlık merkezi yönteminin daha fazla renk ile temsil sağlayarak en yüksek PSNR değerlerine ulaştığı dikkat çekmektedir. Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, düşük eşik sayılarında Otsu'nun kalite–indirgeme dengesi açısından daha avantajlı olduğu, eşik sayısı arttıkça ise yöntemler arasındaki performans farkının azaldığı ve yüksek görüntü kalitesi hedeflenen uygulamalarda ağırlık merkezi ve Kapur yöntemlerinin de güçlü alternatifler haline geldiği sayısal olarak ortaya konmuştur.

5. Sonuç

Bu çalışmada, Otsu, Kapur ve histogramın ağırlık merkezi yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen çok seviyeli eşikleme tabanlı renk indirgeme işlemlerinin performansı iki ve üç eşik durumu için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, eşik sayısının artırılmasının tüm yöntemler için hem SSIM hem de PSNR değerlerinde belirgin iyileşme sağladığını ve buna bağlı olarak yeniden oluşturulan görüntü kalitesini artırdığını göstermiştir. İki eşik seviyesinde Otsu yöntemi kalite–renk indirgeme dengesi açısından daha kararlı ve yüksek ortalama performans sunarken, üç eşik seviyesinde yöntemler arasındaki farkın azaldığı ve özellikle ağırlık merkezi yönteminin daha yüksek PSNR değerleri ile dikkat çektiği belirlenmiştir. Bununla birlikte artan eşik sayısının renk sayısını yükselterek indirgeme oranını azalttığı görülmüştür. Sonuç olarak, düşük renk sayısı ile kabul edilebilir görüntü kalitesinin hedeflendiği uygulamalarda Otsu yöntemi öne çıkarken, daha yüksek görsel kalite gerektiren durumlarda eşik sayısının artırılmasıyla birlikte Kapur ve ağırlık merkezi yöntemlerinin de etkili alternatifler sunduğu ortaya konmuştur. Bu bulgular, renk indirgeme problemlerinde yöntem ve eşik sayısı seçiminin uygulama gereksinimlerine bağlı olarak yapılması gerektiğini göstermektedir.

Kaynakça

- [1] M. E. Celebi, “Forty years of color quantization: a modern, algorithmic survey,” *Artificial Intelligence Review*, vol. 56, no. 12, pp. 13953–14034, 2023.
- [2] M.O. İncetaş, and M Meriçelli, “Renk İndirgeme ve Kenar Belirleme Yardımıyla SRG Tabanlı Görüntü Bölütleme”, *Mühendislik Uygulamalarında Yenilikçi ve Multidisipliner Çalışmalar: Özgür Yayınları*, 2024, pp. 75-84.
- [3] M.O. İncetaş, “Content-Based Image Retrieval Based on Block Truncation Code using Fuzzy-C Means Quantization and Edge Detection”, *Current Research in Engineering*, Gece Kitaplığı, 2023, pp. 289-303.
- [4] M.O. İncetaş, M. Kiliçaslan, and T.R. Farshi, “Image retrieval with SNN-based multi-level thresholding”, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, pp. 98–108, 2022.
- [5] M.O. İncetaş, R. Demirci, and H.G. Yavuzcan, “Automatic segmentation of color images with transitive closure”. *AEU-international Journal of Electronics and Communications*, 68(3), pp. 260–269, 2014.
- [6] M.O. İncetaş, E. Veske, N. Emre, and R. Demirci, “Automatic cells counting in Natt-Herrick stained fish blood”, *Aquaculture Studies*, 17(3), pp. 283-294, 2017.
- [7] M.O. İncetaş, R. Demirci, and H.G. Yavuzcan, “Automatic color edge detection with similarity transformation”, *Gazi University Journal of Science*, 32(2), pp. 458–469, 2019.
- [8] A. Abernathy and M. E. Celebi, “The incremental online k-means clustering algorithm and its application to color quantization,” *Expert Systems with Applications*, vol. 207, p. 117927, 2022.
- [9] L. Brun and A. Trémeau, “Color quantization,” in *Digital color imaging handbook*: CRC press, 2017, pp. 589–637.
- [10] Z. Xiang, “Color quantization,” in *Handbook of approximation algorithms and metaheuristics*: Chapman and Hall/CRC, 2018, pp. 691–709.
- [11] A. K. Jain, M. N. Murty, and P. J. Flynn, “Data clustering: a review,” *ACM computing surveys (CSUR)*, vol. 31, no. 3, pp. 264–323, 1999.
- [12] P. Heckbert, “Color image quantization for frame buffer display,” *ACM Siggraph Computer Graphics*, vol. 16, no. 3, pp. 297–307, 1982.
- [13] M. Gervautz and W. Purgathofer, “A simple method for color quantization: Octree quantization,” in *New Trends in Computer Graphics: Proceedings of CG International’88*, 1988: Springer, pp. 219–231.
- [14] M. E. Celebi, “Fast color quantization using weighted sort-means clustering,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 26, no. 11, pp. 2434–2443, 2009.

- [15] M. E. Celebi, "Improving the performance of k-means for color quantization," *Image and Vision Computing*, vol. 29, no. 4, pp. 260–271, 2011.
- [16] S.-C. Huang, "An efficient palette generation method for color image quantization," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, p. 1043, 2021.
- [17] S. Thompson, M. E. Celebi, and K. H. Buck, "Fast color quantization using MacQueen's k-means algorithm," *Journal of Real-Time Image Processing*, vol. 17, no. 5, pp. 1609–1624, 2020.
- [18] L. Szilágyi, G. Dénesi, and C. Enăchescu, "Fast color quantization via fuzzy clustering," in *International Conference on Neural Information Processing*, 2016: Springer, pp. 95–103.
- [19] Q. Wen and M. E. Celebi, "Hard versus fuzzy c-means clustering for color quantization," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2011, no. 1, p. 118, 2011.
- [20] M. Kılıçaslan and M. O. İncetaş, "Adaptive color quantization method with multi-level thresholding," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 16, no. 1, p. 7, 2023.
- [21] J. N. Kapur, P. K. Sahoo, and A. K. Wong, "A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram," *Computer vision, graphics, and image processing*, vol. 29, no. 3, pp. 273–285, 1985.
- [22] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *Automatica*, vol. 11, no. 285-296, 1979.
- [23] R. Demirci and Ü. Okur, "Renkli Görüntülerin Ortalama Tabanlı Çok Seviyeli Eşiklenmesi," *Duzce University Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 664–676, 2019.
- [24] M. Kılıçaslan, U. Tanyeri, and R. Demirci, "Renkli görüntüler için tek boyutlu histogram," *Duzce University Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 1094–1107, 2018.
- [25] M. Kılıçaslan, U. Tanyeri, and R. Demirci, "Tekrarlı Ortalama Yardımıyla Renk İndirgeme ve Görüntü Erişimi," *Duzce University Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 1042–1057, 2020.

