KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTATİSTİK VE BİLGİSAYAR BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

HİSTOGRAM TABANLI KONTRAST İYİLEŞTİRMEDE DAĞILIM DUYARLI YENİ YAKLAŞIMLAR: SİMETRİK VE ESNEK HİSTOGRAM EŞİTLEME YÖNTEMLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BUKET NUR ALTUN

OCAK 2026
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTATİSTİK VE BİLGİSAYAR BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

HİSTOGRAM TABANLI KONTRAST İYİLEŞTİRMEDE DAĞILIM DUYARLI YENİ YAKLAŞIMLAR: SİMETRİK VE ESNEK HİSTOGRAM EŞİTLEME YÖNTEMLERİ

Buket Nur ALTUN

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"YÜKSEK LİSANS (İSTATİSTİK)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 / 12 /2025
Tezin Savunma Tarihi : 12 / 01 /2026

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan KESEMEN
ORCID : - - -

Trabzon 2026

ÖNSÖZ

“Histogram Tabanlı Kontrast İyileştirmede Dağılım Duyarlı Yeni Yaklaşımlar: Simetrik ve Esnek Histogram Eşitleme Yöntemleri” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Orhan KESEMEN’e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Bilgisayar Bilimleri Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararımda arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Fatma ALTUN ve babam Cafer ALTUN’a, kardeşim Mehmet ALTUN’a ve değerli arkadaşım Arş. Gör. Mehmet Can YENİKAN’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Buket Nur ALTUN

Trabzon 2026

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalında
Buket Nur ALTUN Tarafından Hazırlanan

HİSTOGRAM TABANLI KONTRAST İYİLEŞTİRMEDE DAĞILIM DUYARLI YENİ YAKLAŞIMLAR: SİMETRİK VE ESNEK HİSTOGRAM EŞİTLEME YÖNTEMLERİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 25 / 12 / 2025 gün ve 2134 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Mehmet Akif BAKIR

Üye : Prof. Dr. Orhan KESEMEN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim ŞAHİN

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Histogram Tabanlı Kontrast İyileştirmede Dağılım Duyarlı Yeni Yaklaşımlar: Simetrik ve Esnek Histogram Eşitleme Yöntemleri” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Orhan KESEMEN’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 12/01/2026

Buket Nur ALTUN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET VII
SUMMARY VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ IX
TABLOLAR DİZİNİ XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ XIV
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Sayısal Görüntülerin Özellikleri 1
1.2. Sayısal Görüntülerde Kontrast 3
1.3. Kontrast Ölçüm Yöntemleri 6
1.3.1. Kontrast İyileştirme İndeksi (CII) 9
1.3.2. Ayrık Gri Seviye Enerjisi (GLE) 10
1.3.3. Yapısal Benzerlik İndeksi Ölçütü (SSIM) 11
1.3.4. Doğal Görüntü Kalitesi Değerlendiricisi (NIQE) 13
1.3.5. Kalite Farkındalıklı Kontrast (QAC) 14
1.3.6. Uyuşmazlık Ölçüsü 16
1.4. Kontrast İyileştirilmesi İçin Kullanılan Yöntemler 16
1.4.1. Klasik Histogram Eşitleme (HE) 24
1.4.2. Ağırlıklandırılmış Histogram Eşitleme (WHE) 31
1.4.3. Parlaklık Koruyan Çift Histogram Eşitleme (BBHE) 32
1.4.4. İkili Alt Görüntü Histogram Eşitleme (DSIHE) 33
1.4.5. En Küçük Ortalama Parlaklık Hatalı Çift Histogram Eşitleme (MMBEBHE) 34
1.4.6. Ağırlıklı Ortalama ile Ayrılmış Histogram Eşitleme (WMSHE) 35
1.4.7. Yinelemeli Ayrılmış ve Ağırlıklı Histogram Eşitleme (RSWHE) 36
1.4.8. Yinelemeli Ortalama ile Ayrılmış Histogram Eşitleme (RMSHE) 37
1.4.9. Yinelemeli Alt Görüntü Histogram Eşitleme (RSIHE) 38
1.4.10. Kontrast Sınırlı Uyarlanabilir Histogram Eşitleme (CLAHE) 38
1.4.11. Dinamik Histogram Eşitleme (DHE) 40

1.4.12. Çoklu Tepe Noktalı Histogram Eşitleme (MPHE) 40
1.4.13. İnsan Görsel Sistemi Tabanlı Histogram Eşitleme (HVS_HE) 41
1.4.14. Taban (Plato) Sınırlı Histogram Eşitleme (PLHE) 42
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 44
2.1. Simetrik Histogram Eşitleme (SHE) 44
2.1.1. Gerçek Ortancayla Simetrik Histogram Eşitleme 45
2.1.2. Kaydırmalı Ortancayla Simetrik Histogram Eşitleme 50
2.2. Esnek Histogram Eşitleme (SOHE) 54
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 67
3.1. Simetrik Histogram Eşitleme (SHE) Bulguları 71
3.2. Esnek Histogram Eşitleme (SOHE) Bulguları 88
4. SONUÇLAR 108
5. ÖNERİLER 110
6. KAYNAKLAR 112
ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

HİSTOGRAM TABANLI KONTRAST İYİLEŞTİRMEDE DAĞILIM DUYARLI YENİ YAKLAŞIMLAR: SİMETRİK VE ESNEK HİSTOGRAM EŞİTLEME YÖNTEMLERİ

Buket Nur ALTUN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Orhan KESEMEN
2026, 115 Sayfa

Sayısal görüntü işleme uygulamalarında kontrast iyileştirme için yaygın biçimde kullanılan histogram eşitleme yöntemi, gri seviye dağılımını tüm dinamik aralığa yayarak kontrast artışı sağlamakta; ancak aşırı kontrast artışı, parlaklık kayması ve yapay bozulma oluşumu gibi istenmeyen sonuçlara da yol açabilmektedir. Özellikle yoğun veya çarpık histogram yapısına sahip görüntülerde bu problemler daha belirgin hâle gelmektedir.

Bu tez çalışmasında, klasik histogram eşitleme yönteminin söz konusu sınırlamalarını azaltmaya yönelik olarak iki yeni kontrast iyileştirme yöntemi önerilmiştir: Simetrik Histogram Eşitleme (SHE) ve Esnek Histogram Eşitleme (SOHE). SHE yöntemi, histogram eşitleme sürecine simetri kavramını dâhil ederek, görüntü histogramının seçilen bir simetri noktası etrafında dengeli biçimde yeniden düzenlenmesini amaçlamaktadır. SOHE yöntemi ise histogramın tamamen geniş bir aralığa yayılması yerine, esneklik parametresi yardımıyla kontrollü ve kademeli bir kontrast iyileştirme sağlamayı hedeflemektedir.

Önerilen yöntemlerin performansı, farklı histogram karakterlerine sahip toplam 30 görüntü üzerinde değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalarda altı farklı nicel metrikler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, SHE ve SOHE yöntemlerinin kontrast artışı ile yapısal korunum ve algısal kalite arasında dengeli bir performans sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kontrast iyileştirme, Histogram eşitleme, Simetrik histogram, Esnek histogram eşitleme, Görüntü kalite değerlendirme

Master Thesis

SUMMARY

DİSTRİBUTİON-SENSİTİVE NOVEL APPROACHES İN HİSTOGRAM-BASED CONTRAST ENHANCEMENT: SYMMETRİC AND SOFT HİSTOGRAM EQUALİZATİON METHODS

Buket Nur ALTUN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Statistics and Computer Sciences Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Orhan KESEMEN
2026, 115 Pages

Histogram equalization is a widely used method for contrast enhancement in digital image processing applications; however, it can cause undesirable effects such as over-enhancement, brightness shift, and artifacts, especially in images with dense or skewed histogram structures. In this thesis, two novel contrast enhancement methods are proposed to address the limitations of classical histogram equalization: Symmetric Histogram Equalization (SHE) and Soft Histogram Equalization (SOHE). The SHE method reorganizes the image histogram in a balanced manner around a selected symmetry point by incorporating the concept of symmetry. The SOHE method provides controlled and gradual contrast enhancement using a flexibility parameter, rather than spreading the histogram over the entire dynamic range. Experimental results obtained from 30 images with different histogram characteristics, evaluated using six quantitative metrics, indicate that the proposed methods achieve a balanced performance in terms of contrast enhancement, structural preservation, and perceptual quality.

Keywords: Contrast enhancement, Histogram equalization, Symmetric histogram, Soft histogram equalization, Image quality assessment

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Çok kanallı görsel bileşenlerinin renk bilgileri; (a) Orijinal Lena görüntüsünün RGB uzayda gösterimi; (b) Kırmızı kanal; (c) Yeşil kanal; (d) Mavi kanal 3

Şekil 2. Gri seviyeli görsel renk derinliği; (a) Orijinal görüntü (8 bit); (b) 3 bitlik görüntü; (c) 2 bitlik görüntü; (d) 1 bitlik görüntü 3

Şekil 3. Örnek görüntü ve histogramı 5

Şekil 4. Parlaklığı artırılmış görüntü ve histogramı 5

Şekil 5. Kontrastı artırılmış görüntü ve histogramı 6

Şekil 6. Düşük GLE skorlu görüntü ve histogramı (0.009) 11

Şekil 7. Yüksek GLE skorlu görüntü ve histogramı (0.2921) 11

Şekil 8. Kontrast germe yöntemlerinin uygulanması; (a, b) Orijinal görüntü ve histogramı; (c, d) Otokontrast uygulanmış görüntü ve histogramı; (e, f) Ayarlanmış kontrast germe uygulanmış görüntü (Aralık = [0.25-0.55]) ve histogramı 19

Şekil 9. Orijinal görüntü ve histogramı 20

Şekil 10. Şekil 9'da yer alan görüntüye otokontrast uygulaması 21

Şekil 11. Şekil 9'da yer alan görüntüye HE uygulaması 21

Şekil 12. Şekil 9'da yer alan görüntü üzerinde farklı kontrast iyileştirme yöntemlerinin etkileri; (a) Otokontrast yöntemi için yoğunluk değerlerinin değişim eğrisi; (b) Histogram eşitleme yöntemi için yoğunluk değerlerinin değişim eğrisi 22

Şekil 13. Görüntüye göre histogram eşitleme yönteminin performansı; (a,b) Sağa çarpık dağılıma sahip görüntü ve histogramı; (c,d) Histogram eşitleme sonrası görüntü ve ilgili histogram 23

Şekil 14. Görüntüye göre histogram eşitleme yönteminin performansı; (a,b) Sola çarpık dağılıma sahip görüntü ve histogramı; (c,d) Histogram eşitleme sonrası görüntü ve ilgili histogram 24

Şekil 15. Histogram eşitlemenin piksel yoğunluklarının dağılımına etkisi 25

Şekil 16: Histogram eşitleme sonucunda görüntü piksellerinin tüm renk aralığına yayılması 27

Şekil 17. Histogram eşitlemenin meydana getirdiği değişimin gösterimi; (a) Şekil 9a için kümülatif dağılım eğrisi (b) Şekil 11a için kümülatif dağılım eğrisi 28

Şekil 18. Oda görüntüsü için histogram eşitleme sonucu ortaya çıkan bozulmalar 29

Şekil 19. Bakteri görüntüsü için histogram eşitleme sonucu ortaya çıkan bozulmalar 30

Şekil 20. WHE uygulanmış bir görüntü ve histogramı 32
Şekil 21. BBHE uygulanmış görüntü ve histogramı 33
Şekil 22. DSIHE uygulanan görüntü ve histogramı 34
Şekil 23. MMBEBHE uygulanan görüntü ve histogramı 35
Şekil 24. WMSHE uygulanmış görüntü ve histogramı 36
Şekil 25. RSWHE uygulanmış görüntü ve histogramı 36
Şekil 26. RMSHE uygulanmış görüntü ve histogramı 37
Şekil 27. RSIHE uygulanmış görüntü ve histogramı 38
Şekil 28. CLAHE uygulanmış görüntü ve histogramı 39
Şekil 29. DHE uygulanmış bir görüntü ve histogramı 40
Şekil 30. MPHE uygulanmış görüntü ve histogramı 41
Şekil 31. HVS_HE uygulanmış görüntü ve histogramı 42
Şekil 32. PLHE uygulanmış görüntü ve histogramı 43
Şekil 33. Orijinal görüntü ve histogramı 47
Şekil 34. SHE ve HE yönteminin karşılaştırılması; (a, b) HE yönteminin uygulanması ve histogramı; (c, d) SHE yönteminin uygulanması ve histogramı 48
Şekil 35. Orijinal, HE ve SHE uygulanmış görüntülere ait kümülatif dağılım fonksiyon eğrileri 49
Şekil 36. Örnek görüntü ve histogramı 50
Şekil 37. Gerçek ortanca ile SHE uygulanmış görüntü ve histogramı 51
Şekil 38. Düşük ortanca (0.4) ile gerçekleştirilen SHE ve histogramı 51
Şekil 39. Yüksek ortanca (0.8) ile gerçekleştirilen SHE ve histogramı 52
Şekil 40. Karanlık bölgenin baskın olduğu görüntü için SHE; (a) Orijinal görüntü; (b) Gerçek ortanca ile SHE (m=0.086); (c) Düşük ortanca ile SHE (m=0.03); (d) Yüksek ortanca ile SHE (m=0.5) 53
Şekil 41. Şekil 40'ta verilen görüntülerin yoğunluk dağılımlarının histogram gösterimleri 53
Şekil 42. Aydınlık bölgenin baskın olduğu görüntü için SHE; (a) Orijinal görüntü; (b) Gerçek ortanca ile SHE (m=0.67); (c) Düşük ortanca ile SHE (m=0.4); (d) Yüksek ortanca ile SHE (m=0.8) 54
Şekil 43. Şekil 42'de verilen görüntülerin yoğunluk dağılımlarının histogram gösterimleri 54
Şekil 44. Histogram eşitlemenin aralığı tamamen açma problemi 55
Şekil 45. Biber görüntüsü için λ parametresinin farklı değerleri için elde edilen görüntüler ve histogramları; (a,b) $\lambda = 0$ (Orijinal); (c,d) $\lambda = 0.2$ 58
Şekil 46. Şekil 45'in devamı; (a,b) $\lambda = 0.4$; (c,d) $\lambda = 0.6$; (e,f) $\lambda = 0.8$ 59

Şekil 47. Şekil 45'in devamı; (a,b) $\lambda = 1$ (HE) 60
Şekil 48. Biber görüntüsü için λ parametresinin farklı değerleri için elde edilen kümülatif birikimli dağılım fonksiyon eğrileri 60
Şekil 49. Uçak görüntüsü için λ parametresinin farklı değerleri için elde edilen görüntüler ve histogramları; (a,b) $\lambda = 0$ (Orijinal); (c,d) $\lambda = 0.2$; (e,f) $\lambda = 0.4$ 61
Şekil 50. Şekil 49'un devamı; (a,b) $\lambda = 0.6$; (c,d) $\lambda = 0.8$; (e,f) $\lambda = 1$ (HE) 62
Şekil 51. Uçak görüntüsü için λ parametresinin farklı değerleri için elde edilen kümülatif birikimli dağılım fonksiyon eğrileri 63
Şekil 52. Saat görüntüsü için λ parametresinin farklı değerleri için elde edilen görüntüler ve histogramları; (a,b) $\lambda = 0$ (Orijinal) 63
Şekil 53. Şekil 52'nin devamı; (a,b) $\lambda = 0.2$; (c,d) $\lambda = 0.4$; (e,f) $\lambda = 0.6$ 64
Şekil 54. Şekil 52'nin devamı; (a,b) $\lambda = 0.8$; (c,d) $\lambda = 1$ (HE) 65
Şekil 55. Saat görüntüsü için λ parametresinin farklı değerleri için elde edilen kümülatif birikimli dağılım fonksiyon eğrileri 66
Şekil 56. Çalışma kapsamında kullanılan görüntüler 67
Şekil 57. Şekil 56'nın devamı 68
Şekil 58. Temsili seçilen görüntüler 70
Şekil 59. Şekil 58'in devamı 71
Şekil 60. Simetri noktasına göre SHE yönteminin etkisi; (a,b) $m = 0.2$ (c,d) $m = 0.4$; (e,f) $m = 0.6$ 72
Şekil 61. Şekil 60'ın devamı; (a,b) $m = 0.8$; (c,d) $m = 0.43$(Gerçek ortanca) 73
Şekil 62. Simetri noktasına göre SHE yönteminin etkisi; (a,b) $m = 0.2$; (c,d) $m = 0.4$ 74
Şekil 63. Şekil 62'nin devamı; (a,b) $m = 0.6$; (c,d) $m = 0.8$; (e,f) $m = 0.27$ (Gerçek ortanca) 75
Şekil 64. Simetri noktasına göre SHE yönteminin etkisi; (a,b) m=0.2 76
Şekil 65. Şekil 64'ün devamı; (a,b) m=0.4; (c,d) m=0.6; (e,f) m = 0.8 77
Şekil 66. Şekil 64'ün devamı; (a,b) m=0.64 (Gerçek Ortanca) 78
Şekil 67. (a) Orijinal Görüntü (Şekil 56l) ; (b) SHE ($m = 0.67$); (c) HE; (d) WHE; (e) BBHE; (f) DSIHE; (g) MMBEBHE; (h) WMSHE; (i) RSWHE; (j) RMSHE; (k) RSIHE; (l) CLAHE; 84
Şekil 68. (a) DHE; (b) MPHE; (c) HVS_HE; (d) PLHE 85
Şekil 69. (a) Orijinal Görüntü (Şekil 56l); (b) SHE ($m = 0.67$); (c) HE; (d) WHE 85
Şekil 70. Şekil 69'un devamı; (a) BBHE; (b) DSIHE; (c) MMBEBHE; (d) WMSHE; (e) RSWHE; (f) RMSHE; (g) RSIHE; (h) CLAHE 86
Şekil 71. Şekil 69'un devamı; (a) DHE; (b) MPHE; (c) HVS_HE; (d) PLHE 87

Şekil 72. Şekil 67 ve Şekil 68'de ki görüntülere ait skor değerlerinin eğrisi 87
Şekil 73. Esneklik parametresine göre SOHE yönteminin etkisi; (a,b) $\lambda = 0.0$ (Orijinal görüntü); (c,d) $\lambda = 0.2$ 89
Şekil 74. Şekil 73'ün devamı; (a,b) $\lambda = 0.4$; (c,d) $\lambda = 0.6$; (e,f) $\lambda = 0.8$ 90
Şekil 75. Şekil 73'ün devamı; (a,b) $\lambda = 1.0$ (HE) 91
Şekil 76. Esneklik parametresine göre SOHE yönteminin etkisi; (a,b) $\lambda = 0.0$ (Orijinal görüntü); (c,d) $\lambda = 0.2$; (e,f) $\lambda = 0.4$ 92
Şekil 77. Şekil 76'nın devamı; (a,b) $\lambda = 0.6$; (c,d) $\lambda = 0.8$; (e,f) $\lambda = 1.0$ (HE) 93
Şekil 78. Esneklik parametresine göre SOHE yönteminin etkisi; (a,b) $\lambda = 0.0$ (Orijinal görüntü); (c,d) (a,b) $\lambda = 0.2$ 94
Şekil 79. Şekil 78'in devamı; (a,b) $\lambda = 0.4$; (c, d) $\lambda = 0.6$; (e,f) $\lambda = 0.8$ 95
Şekil 80. Şekil 78'in devamı; (a,b) $\lambda = 1.0$ (HE) 96
Şekil 81. Şekil 56e için SOHE sonuçları (a) Orijinal görüntü ($\lambda = 0$); (b) $\lambda = 0.1$; (c) $\lambda = 0.2$; (d) $\lambda = 0.3$; (e) $\lambda = 0.4$; (f) $\lambda = 0.5$; (g) $\lambda = 0.6$; (h) $\lambda = 0.7$; (i) $\lambda = 0.8$; (j) $\lambda = 0.9$; (k) $\lambda = 1$ 102
Şekil 82. (a) Orijinal Görüntü (Şekil 56e) ; (b) SOHE ($\lambda = 0.8$) (c) HE; (d) WHE; (e) BBHE; (f) DSIHE; (g) MMBEBHE; (h) WMSHE; (i) RSWHE; (j) RMSHE; (k) RSIHE; (l) CLAHE; (m) DHE 103
Şekil 83. Şekil 82'in devamı; (a) MPHE; (b) HVS_HE; (c) PLHE 104
Şekil 84. Şekil 82'de ki görüntülere ait histogramlar; (a) Orijinal Görüntü (Şekil 56e) ; (b) SOHE ($\lambda = 0.8$); (c) HE; (d) WHE; (e) BBHE; (f) DSIHE 104
Şekil 85. Şekil 84'ün devamı; (a) MMBEBHE; (b) WMSHE; (c) RSWHE; (d) RMSHE; (e) RSIHE; (f) CLAHE; (g) DHE; (h) MPHE 105
Şekil 86. Şekil 84'ün devamı; (a) HVS_HE; (b) PLHE 106
Şekil 87. Şekil 82 ve Şekil 83'te ki görüntülere ait skor değerlerinin eğrisi 106

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Histogram eşitleme adımları 27
Tablo 2. Şekil 56'da yer alan görüntülerin çarpıklık katsayısı 69
Tablo 3. Şekil 57'de yer alan görüntülerin çarpıklık katsayısı 70
Tablo 4. Kullanılan görüntülerin en düşük uyuşmazlık ölçüsüne ait skorları 79
Tablo 5. SHE yönteminin diğer yöntemlerle uyuşmazlık ölçüsü skoru ile karşılaştırılması 80
Tablo 6. Anket sonuçlarına göre parametrelerin tercih edilme sayısı 97
Tablo 7. Esneklik parametresi tahmini için anketten elde edilen veri seti 100

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CII	:	Kontrast İyileştirme İndeksi
GLE	:	Ayrık Gri Seviye Enerjisi (Discrete Gray Level Energy)
SSIM	:	Yapısal Benzerlik İndeksi Ölçütü (Structual Similarity Index Measure)
NIQE	:	Doğal Görüntü Kalitesi Değerlendiricisi (Natural Image Quality Evaluator)
FSIM	:	Özellik Benzerlik İndeksi (Feature Similarity Index)
QAC	:	Kalite Farkındalıklı Kontrast (Quality Aware Contrast)
IQA	:	Görüntü Kalite Değerlendirmesi (Image Quality Assessment)
HE/CHE	:	Klasik Histogram Eşitleme
WHE	:	Ağırlıklandırılmış Histogram Eşitleme (Weighted Histogram Equalization)
BBHE	:	Parlaklık Koruyan Çift Histogram Eşitleme (Brightness Preserving Bi-Histogram Equalization)
DSIHE	:	İkili Alt-Görüntü Histogram Eşitleme (Dualistic Sub-Image Histogram Equalization)
MMBEBHE	:	En Küçük Ortalama Parlaklık Hatalı Çift Histogram Eşitleme (Minimum Mean Brightness Error Bi-Histogram Equalization)
WMSHE	:	Ağırlıklı Ortalama ile Ayrılmış Histogram Eşitleme (Weighted Mean Separated Histogram Equalization)
RSWHE	:	Yinelemeli Ayrılmış ve Ağırlıklı Histogram Eşitleme (Recursively Separated and Weighted Histogram Equalization)
RMSHE	:	Yinelemeli Ortalama ile Ayrılmış Histogram Eşitleme (Recursive Mean Separate Histogram Equalization)
RSIHE	:	Yinelemeli Alt-Görüntü Histogram Eşitleme (Recursive Sub-Image Histogram Equalization)
AHE	:	Uyarlanabilir Histogram Eşitleme (Adaptive Histogram Equalization)
CLHE	:	Kontrast Sınırlı Histogram Eşitleme (Contrast Limited Histogram Equalization)
CLAHE	:	Kontrast Sınırlı Uyarlanabilir Histogram Eşitleme (Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization)
DHE	:	Dinamik Histogram Eşitleme (Dynamic Histogram Equalization)

MPHE	:	Çoklu Tepe Noktalı Histogram Eşitleme (Multi-Peak Histogram Equalization)
HVS	:	İnsan Görsel Sistemi (Human Visual System)
HVS_HE	:	İnsan Görsel Sistemi Tabanlı Histogram Eşitleme (Human Visual System based Histogram Equalization)
PLHE	:	Taban (Platolu) Sınırlı Histogram Eşitleme (Plateau Limit Histogram Equalization)
RGB	:	Kırmızı Yeşil Mavi Renk Uzayı (Red-Green-Blue)
MSE	:	Ortalama Kare Hata
NSS	:	Doğal Sahne İstatistikleri (Natural Scene Statistics)

1. GENEL BİLGİLER

Günümüzde, bilgiye erişimin ve kaydetme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte veri miktarı ve türü hızla artmakta ve çeşitlenmektedir. Elde edilen verinin kendine özgü nitelikleri, mevcut çözüm alanlarının yetersiz kalmasına ve yeni disiplinlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Verinin özelliklerine göre gelişen bu yeni alanlardan biri de görüntü işlemedir. Artan görsel verilerin varlığı ve çoğalması, bu alana duyulan ihtiyacı bir gereklilik haline getirmiştir. Görüntü kaydetme araçlarının gelişmesiyle birlikte görüntü işleme, toplum nezdinde bilinir ve yaygın şekilde kullanılır hale gelmiştir. Görüntü işleme, görsel verilerin analiz, tahmin ve çıkarım gibi amaca yönelik kullanılması için işlenmesinde temel araçtır. Bu özelliği sayesinde; uydu görüntüleri, tıp ve sağlık sektörü, tarım gibi birçok stratejik alanlarda etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Veri analizine başlamanın ilk ve en önemli adımı veri manipülasyonudur. Analizin doğruluğu ve güvenilirliği, veri manipülasyonunun titizlikle ve doğru bir biçimde yapılmasına doğrudan bağlıdır. Genel veri manipülasyonu süreçleri; kayıp veri kontrolü, veri temizliği (aykırı değerlerin ve hatalı girdilerin düzeltilmesi), değişken tanımlarının oluşturulması ve veri normalizasyonu gibi kritik adımları içerir. Görüntülerden oluşan bir veri seti analize girdiğinde ise, her görsel bir veri örneği olarak değerlendirilir. Bu nedenle, görüntü işleme süreci de bir tür veri manipülasyonu gerektirir. Bu manipülasyon, görüntüleri analize hazırlama işlevini üstlenir. Görüntülere uygulanan manipülasyon işlemleri, genel analiz gereksinimleri haricinde, çoğunlukla görüntünün kendi özellikleri üzerinden gerçekleşir. Görüntü özelliklerinin iyileştirilmesi, görüntü işleme sürecinin başarılı geçmesini ve sonuçların kalitesini doğrudan etkiler. Bu sebeple, bir görüntü özelliklerinin iyileştirilmesi için gerçekleştirilen gürültü azaltma, kontrast artırma ve kenar belirleme gibi işlemlerin her biri, görüntü işleme ve bilgisayarla görme alanında ayrı birer çalışma alanı haline gelmiştir.

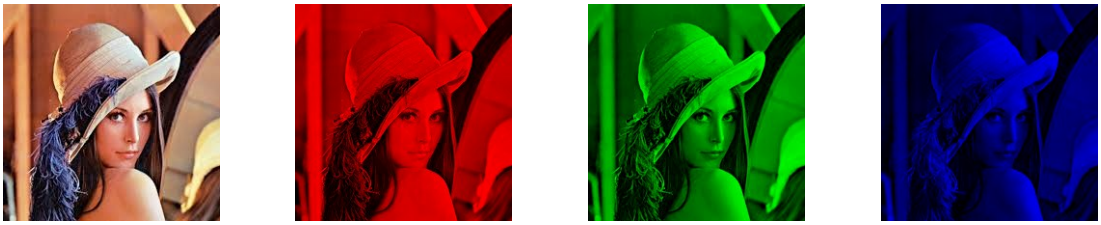
1.1. Sayısal Görüntülerin Özellikleri

Görüntü işleme, görüntüleri analize hazır hale getiren ve/veya analiz eden bir alandır. Görüntü işleme sürecinin ilk adımı genellikle veri manipülasyonuna denk olan görüntü kalitesini artırmaktır. Görüntü kalitesini etkileyen faktörler, analize uygunlukları, yapısal

gereksinimleri, uygulama ve kullanım amacına yönelik özelliklerin yeterliliği görüntü özellikleri üzerinden yapılan işlemler sonucunda artmaktadır. Bu özellikler görüntünün analize uygunluk açısından kalitesini belirlemektedir. Görüntünün kendi kalitesini belirleyen özellikler ise görüntünün temel özellikleridir. Temel özellikler, çözünürlük, keskinlik, parlaklık, kontrast ve görüntüdeki gürültü gibi faktörlerden oluşmaktadır. Bu faktörler üzerinde yapılan çalışmalar görselin renk, doku gibi temel özellikleri üzerinde iyileştirmeler yaparak daha iyi görseller oluşturmayı veya mevcut görselleri analize hazır hale getirmeyi amaçlar. Bu amaçla görsellerin piksel, kullanılan renk uzayı gibi bilgilerini kullanır. Bu bilgiler çeşitli faktörlerden etkilenmekte ve görselin durumunu iyi ya da kötü etkilemektedir. Işığın geliş açısı, renk dengesi, fotoğraftaki nesnelerin konumları, ışık yetersizlikleri veya düşük kaliteli kayıt cihazları gibi çeşitli faktörler bunlardan bazılarıdır (Celona, Leonardi, Napoletano, & Rozza, 2022).

Görüntünün özelliklerinin iyileştirilebilmesi için uygulanacak yöntemler, görüntünün bulunduğu uzaya göre farklılıklar göstermektedir. Pikseller renk ya da yoğunluk değerlerini belirten ve görüntünün yapı taşı olan en küçük özelliktir. Her piksel bir renk bilgisidir ve her renk belirli sayıda bitlerle ifade edilir. Bitler ise görüntünün içinde yer alan en küçük bilgidir. 1 bit $2^1 = 2$ renk bilgisi, 2 bit $2^2 = 4$ renk bilgisi, … , n bit 2^n renk bilgisi içerir. Renk bilgisinin nasıl tanımlandığı ise görüntünün yer aldığı uzayın bileşenlerine göre değişir. Bu bileşenlerin sayısı uzayın sahip olduğu kanal sayısını belirtir. Çok kanallı uzaylarda bir piksel kanal sayısı kadar yoğunluk bilgisi içermekteyken, tek kanallı uzaylarda bir piksel sadece bir yoğunluk bilgisini içermektedir. Çünkü herhangi renk bilgisi bulunmamaktadır. RGB uzayda her kanal 8 bitlik bir görüntü için $2^8 = 256$ yoğunluk bilgisi ve toplam 16 777 216 renk bilgisi içerebilmektedir. Bir pikselin tüm kanallarda 0 olduğunda siyah rengi ifade ederken, birinci kanalda yani "Red (Kırmızı, R)" kanalında 255 kırmızıyı ($G = B = 0$), ikinci kanalda yani "Green (Yeşil, G)" kanalında 255 yeşili ($R = B = 0$) ve üçüncü kanalda yani "Blue (Mavi, M)" kanalında 255 maviyi ($R = G = 0$) ifade etmektedir (Şekil 1). Şekil 2'de gri seviye görüntüsü ve 8, 3, 2 ve 1 bitlik formları gösterilmektedir. 8 bitlik gri seviye görüntüler için 0 hiç ışığın olmadığı durumu yani siyah noktaları, 255 ise maksimum parlaklığı yani beyaz noktaları ifade etmektedir (Şekil 2). Dolayısıyla 8 bitlik gri seviye görüntüler üzerinde görüntüyü iyileştirmek için işlemler yapmak tek kanalda uğraşmayı yani sadece bir yoğunluk bilgisi üzerinden işlem yapmayı gerektirmektedir (Saravanan, 2010). Tek kanallıların aksine çok kanallı uzaydaki bir görüntüde görüntüyü iyileştirmek için yapılan işlemler kanal sayısı kadar tekrarlanmaktadır. Bu sebeple işlem

yoğunluğu ve karmaşıklık çok kanallı uzaylarda daha fazladır. Ortaya çıkan bu karmaşıklık problemi renk bozulmalarını meydana getireceği için literatürde görüntü özelliklerinin iyileştirilmesi yöntemleri arasında çok kanallı uzaylarda geliştirilen yöntemler bulunsa da çoğunlukla tek kanallı uzaylar için geliştirilen yöntemler temel alınmaktadır (Strickland, Kim, & McDonnell, 1987).



(a) (b) (c) (d)

Şekil 1. Çok kanallı görsel bileşenlerinin renk bilgileri; (a) Orijinal Lena görüntüsünün RGB uzayda gösterimi; (b) Kırmızı kanal; (c) Yeşil kanal; (d) Mavi kanal



(a) (b) (c) (d)

Şekil 2. Gri seviyeli görsel renk derinliği; (a) Orijinal görüntü (8 bit); (b) 3 bitlik görüntü; (c) 2 bitlik görüntü; (d) 1 bitlik görüntü

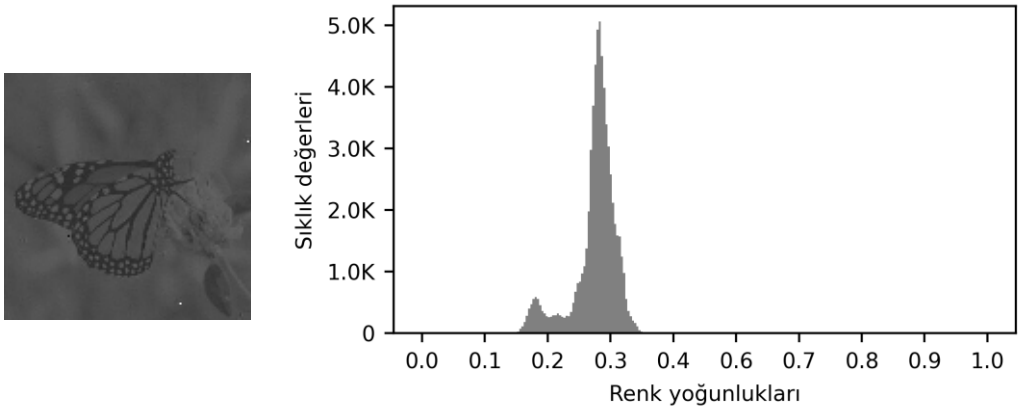
1.2. Sayısal Görüntülerde Kontrast

Görüntüye ait özelliklerin iyileştirilmesi analiz performansını etkileyeceği için literatürde bunun üzerine çok fazla çalışma bulunmaktadır. Bu özelliklerden bir tanesi de kontrast bilgisidir. Literatürde kontrast ölçümleri ve kontrast artırma yöntemleri üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Abdullah-Al-Wadud, Kabir, Dewan, & Chae, 2007; Arici, Dikbas, & Altunbasak, 2009; Starck, Murtagh, Candès, & Donoho, 2003).

Sayısal görüntü işlemede kontrast, bir görüntüdeki en parlak (beyaz) ve en koyu (siyah) pikseller arasındaki parlaklık farkının bir ölçüsüdür ve görüntünün görsel kalitesini belirleyen en kritik faktörlerden biridir. Kontrast, basitçe bir görüntüdeki yoğunlukların veya renk tonlarının ne kadar geniş bir aralığa yayıldığını ifade eder. Yüksek kontrastlı bir

görüntüde, parlak alanlar çok parlak ve koyu alanlar çok koyu olduğundan kenarlar ve ince detaylar daha belirginleşir; bu durum, piksel değerlerinin 0'dan 255'e kadar olan aralığın uç noktalarına yayıldığı anlamına gelir. Bu yayılma iki renk için ne kadar yüksek kontrast verse de sonuç olarak iki parçalı az yayılım göstermektedir. Öte yandan çoklu renk içeriklerinde tüm piksel değerleri 0 ile 255 arasında düzgün dağılıma yakın bir şekilde dağılması, görüntüdeki tüm detayları belirgin bir biçimde ortaya çıkaracaktır. Buna karşılık, düşük kontrastlı bir görüntüde ise tüm parlaklık seviyeleri birbirine yakın, yoğunlaşmış durumdadır, bu da görüntünün "soluk" görünmesine ve detayların kaybolmasına neden olur. Bu nedenle, görüntü işleme uygulamalarında (örneğin, histogram eşitleme ve kontrast germe) temel amaç, kayıp detayları ortaya çıkarmak ve görüntünün görünürlüğünü artırmak için kontrastı optimize etmektir.

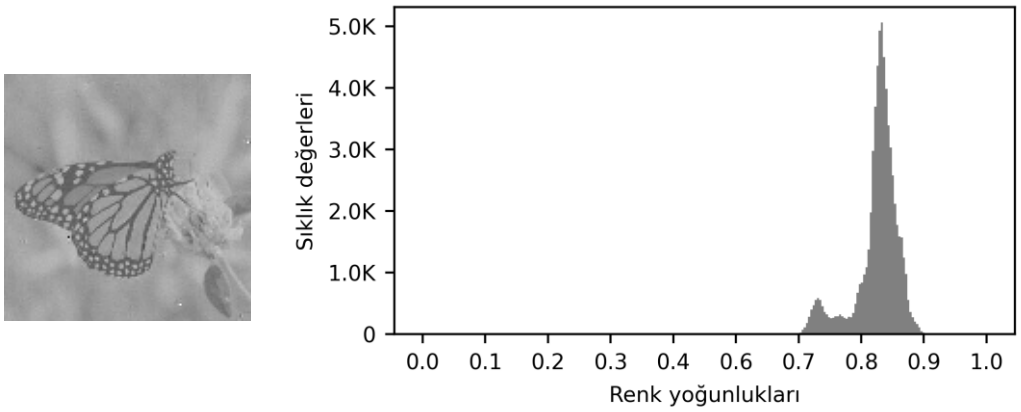
Sayısal görüntü işlemede kontrast, farklı parlaklık seviyelerinin durumunun renklere veya parlaklık yoğunluklarına göre ayrımını ifade etmektedir. Dolayısıyla parlaklık ile kontrast arasında ilişki bulunmaktadır ancak sayısal görüntü işlemede parlaklık ve kontrast farklı kavramlardır. Kontrast ayarlanırken parlaklık değişmeyeceği gibi parlaklık ayarlanırken kontrast değişmeyebilir (Arend & Spehar, 1993). Görüntüde parlaklık piksellerin ortalama yoğunluğunu ifade ederken, kontrast en parlak ve en karanlık bölgeler arasındaki dağılımını ifade etmektedir. Kontrast iyileştirilirken parlaklık hiç etkilenmeyeceği gibi çok uç seviyelerde etkilenebilmektedir. Bu sebeple literatürde parlaklığı kontrol ederek kontrast iyileştirmesi yapan yöntemlerde mevcuttur ve parlaklıktaki bozulmaların önlemesi amaçlanarak geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde parlaklık kontrolü kontrast üzerinden değerlendirilmiştir çünkü İnsan Görsel Sistemi (HVS) parlaklıktan ziyade nesnenin arka plandan ayrımına yani kontrasta odaklıdır (Rahman, Rahman, Hussain, Khaled, & Shoyaib, 2014; Rahimi-Nasrabadi, ve diğerleri, 2021).



(a) (b)

Şekil 3. Örnek görüntü ve histogramı

Şekil 3, kelebek görüntüsünü ve histogramını içermektedir. Kelebek görüntüsünde karanlık bölgelerin yoğunluklu olduğu hem görüntüden hem histogramından görülmektedir. Histogram incelendiğinde (Şekil 3b) yoğun bölgenin düşük renk yoğunluklarında yani karanlık tonlarda olduğu görülmektedir. Bu görüntünün parlaklığının artırılmış hali ise aşağıda verilmektedir (Şekil 4).

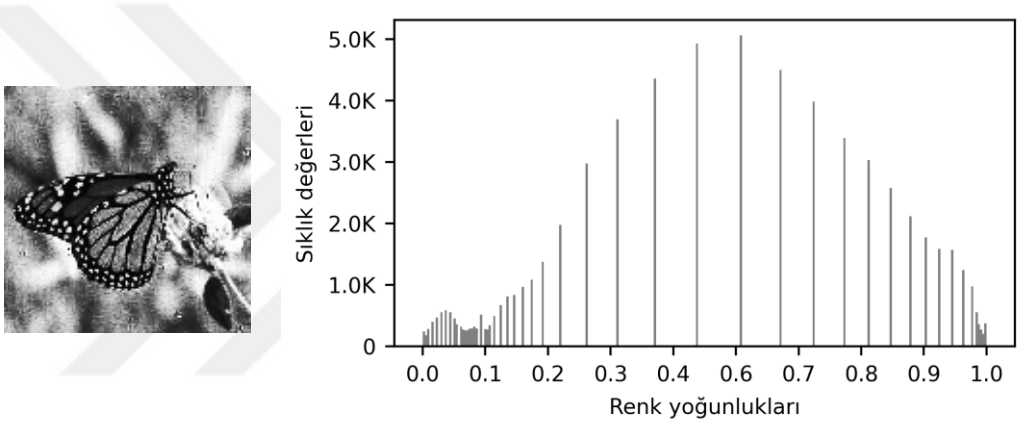


(a) (b)

Şekil 4. Parlaklığı artırılmış görüntü ve histogramı

Şekil 4a, kelebek görüntüsünün parlaklığının artırılması sonucu elde edilen görüntüdür. Şekil 4b ise bu görüntünün histogramını içermektedir. Sayısal görüntülerde kontrastın tanımı gereğince, parlaklığı artırılmış görüntüde kelebeğin daha kolay görülmesi

ve renklerin birbirinden ayrılmış ve daha net görünmesi, insanın kontrastı artırılmış bir görüntü gibi değerlendirmesine sebep olabilmektedir. Ancak histogramı incelendiğinde herhangi bir değişiklik olmadığı ve sadece görüntüye ait renk yoğunluklarının yerinin değiştiği görülmektedir. Bunun sebebi ise insan gözünün daha önce de bahsedildiği gibi parlaklık ve kontrast odaklı olmasıdır (Panetta, Wharton, & Agaian, 2008). Bu sebeple kontrast ile parlaklık karıştırılabilmektedir. Kontrastı artırılan görüntü ve histogramı ise aşağıdaki şekilde verilmektedir (Şekil 5). Şekil 5a'da kelebek görüntüsündeki renklerin farklılaştığı gözlenirken aynı zamanda histogramdaki frekanslarında tüm aralığa yayıldığı gözlenmektedir.



(a) (b)

Şekil 5. Kontrastı artırılmış görüntü ve histogramı

1.3. Kontrast Ölçüm Yöntemleri

Kontrastın iyileştirilmesi kadar değerlendirilmesi de önemlidir. İnsan gözü görüntünün ne kadar iyi ya da kötü olduğunu karşılaştırabilmektedir. Bu yüzden HVS'ye en yakın sonucu verecek olan yöntemler geliştirilmektedir. Ancak bu yöntemlerin değerlendirilmesi de öznel yorumlar ile yapılamayacağı için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemler Görüntü Kalite Değerlendirme (IQA) yöntemleri olarak değerlendirilmektedir ve referans görüntünün olup olmamasına göre tam referanslı, kısıtlı referanslı ve referanssız olarak değişmektedir (Abdoli, Nasiri, Brault, & Ghanbari, 2019).

Tam referanslı yöntemler referans bir görüntünün tüm özelliklerini, kısıtlı referanslı yöntemler referans görüntünün belirli özelliklerini kullanır. Referanssız görüntüler ise

referans bir görüntüye ihtiyaç duymadan mevcut görüntüden bilgi elde etmesidir. Referans görüntünün her zaman mevcut olmamasından dolayı genellikle tercih edilen yöntemler, referans görüntünün mevcut olmadığı durumlarda kullanılan referanssız yöntemlerdir. Çünkü günlük hayatta elde edilen görüntülerin her zaman geliştirilmiş versiyonu bulunmayabilir ve bu durumda referanslı görüntüler için kullanılan yöntemler kullanılamamaktadır (Panetta, Gao, & Agaian, 2013; Abdoli, Nasiri, Brault, & Ghanbari, 2019). Bu yöntemler için genellikle pikseller üzerinden maksimum ve minimum piksellerin yoğunluk bilgisi kullanılmaktadır (Peli, 1990; Agaian, Silver, & Panetta, 2007; Agaian, Panetta, & Grigoryan, 2001; Panetta, Gao, & Agaian, 2013; Kim & Chung, 2008).

Literatürde kontrastı tanımlamaya ve nicel olarak değerlendirmeye yönelik çok sayıda yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar yalnızca teorik tanımlar sunmakla kalmayıp, aynı zamanda kontrastın ölçülebilir hale getirilmesini sağlayan matematiksel metrikler de önermektedir. Bu bağlamda temel kontrast tanımları ve ölçütleri arasında Michelson Kontrastı, Weber–Fechner Yasası, Kontrast Oranı, Entropi Değeri ve Kontrast İyileştirme İndeksi öne çıkmaktadır. Albert A. Michelson tarafından ilk kez 1927 yılında ortaya atılan Michelson Kontrastı (C_M),

$$C_M = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \tag{1}$$

olarak tanımlanmaktadır. Görüntüde maksimum ve minimum parlaklığa sahip pikseller dikkate alınarak kontrast ölçümü yapılmaktadır. Ancak simetrik histograma sahip, yani koyu ve parlak alanların eşit dağıldığı durumlarda mevcut kontrastı doğru biçimde temsil ederken, histogramın simetrik olmadığı durumlarda yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir (Peli, 1990; Tang, Peli, & Acton, 2003). Gustav Theodor Fechner tarafından bulunan ve insan algı sistemine dayanan iki farklı yasanın birleşmesiyle ortaya çıkan Weber-Fechner Yasası (C_W),

$$C_W = \frac{I_t - I_b}{I_b} \tag{2}$$

olarak tanımlanmaktadır. Nesne odaklı görüntülerde kontrastı tanımlayan Weber-Fechner Yasasının kullanıldığı görüntülerde geniş ve tekdüze bir arka plan ve küçük bir test hedefi bulunmaktadır. Bu sebeple görüntünün ortalama yoğunluğu yaklaşık olarak ortalama arka plan yoğunluğudur ve kontrast test hedefinin yoğunluğu ile arka plan yoğunluğu arasındaki

farka bağlı olarak değişmektedir (Peli, 1990; Arend & Spehar, 1993; Tang, Peli, & Acton, 2003). Bir başka kontrast tanım ve ölçüm birimi olan kontrast oranı (CR),

$$CR = \frac{I_t}{I_b} \tag{3}$$

olarak tanımlanmaktadır ve görüntüdeki en parlak piksel ile en karanlık piksel değerinin oranını ifade etmektedir. Bu nedenle yüksek kontrast oranı, bir nesnenin arka plana karşı daha belirgin olduğunu; düşük kontrast oranı ise nesnenin arka plana karşı yeterince ayırt edilemediğini ifade etmektedir. Weber-Fechner yasasının kullanımı için gerekli olan geniş ve tekdüze bir arka plan her görüntüde bu arka plan koşulu sağlanamayabileceği için kontrast oranı daha genel bir tanımdır (Singh, Unni, Solanki, & Singh, Ranbir, 2012). Entropide literatürde kontrastı tanımlamak için kullanılan diğer bir ölçü türüdür ve aşağıda verildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$Entropi = -\sum p \ln(p) \tag{4}$$

Entropi görüntüdeki gri seviye bilgilerinin olasılık fonksiyonlarını kullanarak gri seviye dağılımındaki rastgeleliği ölçmektedir. Bu sebeple yüksek entropi değeri yoğunluk değerlerinin homojen dağıldığını ifade etmektedir. Ancak piksel ya da diğer bir ifadeyle renk kümeleri içeren bir görüntüde, entropiye dayalı yapılan iyileştirme bir kümede kontrastı düşürürken başka bir kümede artırabilmektedir. Bu durum, kontrastın orijinal görüntüye kıyasla ters bir yapıya bürünmesine neden olabilmektedir. Dolayısıyla, kontrastı ayarlanmış görüntü ile orijinal görüntünün entropi değerleri aynı kalabilmektedir. Bu nedenle entropi, tek başına ele alındığında etkili bir kontrast ölçütü değildir ve literatürde entropi temelli türetilmiş çok sayıda kontrast tanımı ve ölçümü yer almaktadır (Panetta, Wharton, & Agaian, 2008).

Literatürde kontrast iyileştirmesi için geliştirilen yöntemlerin çoğunluğu HVS baz alınarak geliştirilmektedir. HVS'nin kullanılmasının sebebi ise sayısal görüntü işlemenin daha hızlı ve daha doğru olmasını sağlamaktır. HVS, göz ve beynin görüntüyü alırken kullandığı sistem olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemde duyarlı olunan renkler (insan gözünün yeşile daha duyarlı olması), kontrastı konuma göre ayarlayabilme (ışığın az olduğu yerlerde bir süre sonra daha iyi görebilmek), düşük frekanslara duyarlılık gibi özellikler dikkatle incelenmektedir. Dolayısıyla geliştirilen yöntemler kontrasta duyarlılık fonksiyonu

kullanarak kontrastta iyileştirme yapar ve ölçüm içinde HVS odaklı yöntemler kullanır (Wharton, Panetta, & Agaian, 2007; Panetta, Wharton, & Agaian, 2008). HVS tabanlı olmayan yöntemler gibi bu metriklerde referans durumuna göre ayrılmaktadır ve kontrastı tek başına incelemektense, insan görme sistemi gibi görüntünün parlaklığı ve yapısı bakımından da değerlendirmektedir (Panetta, Gao, & Agaian, 2013). Literatürde yer alan referanssız ve HSV tabanlı yöntem sayısı çok değildir. Yapısal Benzerlik İndeksi Ölçütü (SSIM), Doğal Görüntü Kalitesi Değerlendiricisi (NIQE) bu yöntemlerden bazılarıdır (Ghadiyaram & Bovik, 2017).

Bu çalışmada karşılaştırmalar için HVS tabanlı olmayan yöntemlerden Kontrast İyileştirme İndeksi, HVS tabanlı olan yöntemlerden Ayrık Gri Seviye Enerjisi (GLE), Yapısal Benzerlik İndeksi Ölçütü (SSIM), Doğal Görüntü Kalite Değerlendiricisi (NIQE), Kalite Farkındalıklı Kontrast (QAC) ve dağılım odaklı ilerleyebilmek için uyuşmazlık ölçüsü kullanılmıştır.

1.3.1. Kontrast İyileştirme İndeksi (CII)

Basit bir kontrast ölçüm tekniği olan Kontrast İyileştirme İndeksi,

$$CII = \frac{C_{iyileştirilmiş}}{C_{orijinal}} \tag{5}$$

olarak tanımlanmaktadır. Kontrast iyileştirmesi uygulanmış bir görüntünün kontrastına ilişkin herhangi bir ölçüt (Michelson kontrastı, standart sapma vb.), orijinal görüntünün kontrastına ait ölçüte oranlanarak değerlendirilmektedir. Bu oranın 1'den büyük olması, iyileştirilmiş görüntüye ait değerin orijinal görüntüye kıyasla daha yüksek olduğunu ve dolayısıyla görüntü kontrastının arttığını göstermektedir. Bu skorun artması, iyileştirilmiş görüntüye ait kontrast bilgisinin orijinal görüntüye ait kontrast bilgisinden daha iyi olduğunu göstermektedir. Kontrast bilgisi elde edilirken araştırmacı çalışmasına uygun kontrast ölçüm yöntemini seçebilmektedir (Maurya, Lohchab, Mahapatra, & Abonyi, 2022). Bu çalışmada CII skorunun elde edilmesi için (1) eşitliğinde verilen Michelson kontrastı kullanılmıştır.

1.3.2. Ayrık Gri Seviye Enerjisi (GLE)

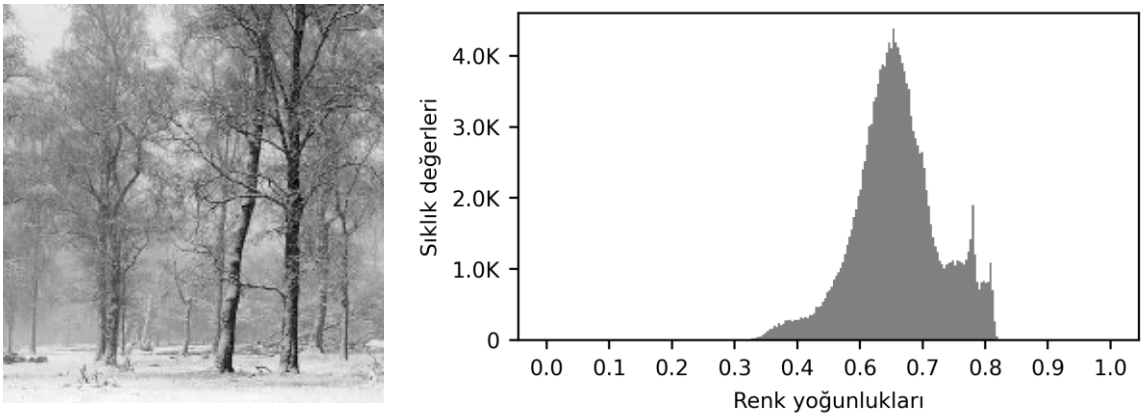
Gri ölçekli bir görüntüde her piksel, bir gri seviye (yoğunluk) değeri ile temsil edilmektedir. Bu sebeple gri seviyeli bir görüntünün özelliklerini tutan bilgilerde bu değerlerde saklıdır. GLE, görüntünün özellikleri hakkında bilgi almak için kullanılan temel yöntemlerdendir ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$GLE = \sum_{i=1}^{k} p_{\mathrm{i}}^{2} \tag{6}$$

GLE, gri seviyelerin dağılımına odaklanarak bilgi elde etmeyi amaçlar. Dolayısıyla histogram sayısını yani her bir pikselin veya gri seviyenin olasılık dağılım fonksiyonunu kullanır. Burada k maksimum gri seviye bilgisini ifade etmektedir. n-bitlik bir görüntüde maksimum gri seviye bilgisi 2^n olacağı için k'nın alabileceği maksimum değer 2^n dir. p_i ise her bir gri seviyenin olasılık dağılım fonksiyonunu veya histogram sayısını ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

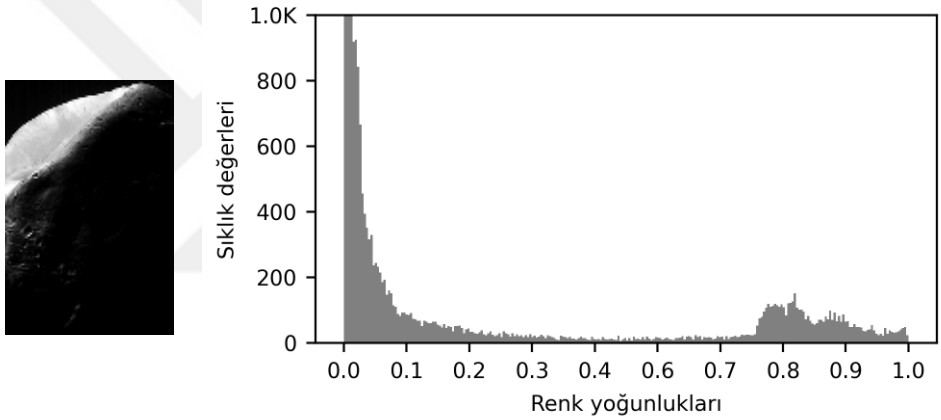
$$p_i = \frac{N_i}{N} \tag{7}$$

Burada N_i gri seviyede olan piksel sayısını, N ise toplam piksel sayısını vermektedir. Olasılığın aksiyomları gereğince $\sum p_i = 1$ olarak elde edilmektedir. Görüntüde yalnızca tek bir gri seviye veya bir gri seviyeye etrafında odaklanması durumunda GLE değeri 1 veya 1'e yakın sonuçlar vermektedir. Öte yandan histogram dağılımı düzgün dağılıma yakın olması durumunda GLE değeri 0'a yaklaşmaktadır (Şekil 7) Bu nedenle GLE metriği kullanılarak gri seviye dağılımı hakkında değerlendirme yapılabilmektedir. Kontrastın istenen düzeyde olduğu görüntülerde gri seviye dağılımı düzgün dağılıma yakın bir yapı göstermekte olup, gri seviyeler belirli bir aralıkta yoğunlaşmamakta, aksine tüm aralığa yayılmaktadır (Şekil 6). Bu bağlamda, GLE değerinin düşük olması daha yüksek kontrasta işaret etmekte ve kontrastın daha iyi olduğu şeklinde yorumlanmaktadır. (Gupta & Porwal, 2016).



(a) (b)

Şekil 6. Düşük GLE skorlu görüntü ve histogramı (0.009)



(a) (b)

Şekil 7. Yüksek GLE skorlu görüntü ve histogramı (0.2921)

1.3.3. Yapısal Benzerlik İndeksi Ölçütü (SSIM)

HVS tabanlı kontrast ölçüm yöntemlerinden biri olan ve literatürde karşılaştırmalarda sıklıkla kullanılan Yapısal Benzerlik İndeks Ölçütü (SSIM), iyileştirilmiş bir görüntünün orijinal görüntüye olan benzerliğini yalnızca piksel seviyesinde değil, insan görsel algısı perspektifinden değerlendirmektedir. Bu yönüyle SSIM, klasik hata temelli değerlendirme yöntemlerinden ayrılmaktadır. İnsan gözü bir görüntüyü algılarken, öncelikle görüntüyü bütüncül olarak değil, yerel bölgeler üzerinden incelemektedir. Başka bir ifadeyle, görüntü küçük bloklara ayrılmakta ve her blok kendi içerisinde değerlendirilmektedir. Yerel

değerlendirmeler sonucunda elde edilen bilgiler birleştirilerek, görüntüye ilişkin genel bir algı oluşturulmaktadır. SSIM ölçütü de bu algısal süreci modelleyerek görüntüyü blok tabanlı bir yaklaşımla analiz etmektedir. SSIM hesaplama sürecinde parlaklık, kontrast ve yapısal bilgi bileşenleri esas alınmakta olup matematiksel ifadesi,

$$SSIM(I,J) = l(I,J)c(I,J)s(I,J) \tag{8}$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada I ve J sırasıyla giriş (özgün) ve çıkış (iyileştirilmiş) görüntüsünü göstermektedir. *SSIM* ölçütü için kullanılan parlaklık değeri,

$$l(I,J) = \frac{2\mu_I\mu_J + C_1}{\mu_I^2 + \mu_J^2 + C_1} \tag{9}$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada μ_I ve μ_J sırasıyla giriş ve çıkış görüntüsünün ortalama piksel değerini vermektedir. *SSIM* ölçütü için kullanılan kontrast değeri,

$$c(I,J) = \frac{2\sigma_I\sigma_J + C_2}{\sigma_I^2 + \sigma_J^2 + C_2} \tag{10}$$

eşitliğinde verildiği gibi yayılım ölçüsünü kullanmaktadır. Bu eşitlikte σ_I^2 ve σ_J^2 sırasıyla giriş ve çıkış görüntüsünün piksel değerlerinin varyansını vermektedir. *SSIM* ölçütü için kullanılan yapısal bilgi bileşeni ise,

$$s(I,J) = \frac{\sigma_{IJ} + C_3}{\sigma_I\sigma_J + C_3} \tag{11}$$

biçiminde tanımlanmaktadır.

Eşitlik (9,(10 ve (11'de kullanılan C_1, C_2 ve C_3 sabitleri pay veya paydanın 0 olmasını engellemek amacıyla kullanılmaktadır. $K_1, K_2 < 1$ olmak üzere C_1, C_2 ve C_3 sabitleri,

$$\begin{cases} C_1 = (K_1L)^2 \\ C_2 = (K_2L)^2 \\ C_3 = \dfrac{C_2}{2} \end{cases} \tag{12}$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada L dinamik piksel aralığıdır. Yani görüntü n-bitlik bir görüntü ise $L = 2^n$'dir.

Bu üç temel bileşenin birlikte değerlendirilmesiyle, iyileştirilmiş görüntünün orijinal görüntüye olan benzerliği sayısal olarak ifade edilmektedir. Böylece yalnızca yoğunluk farkları değil, aynı zamanda görüntünün yapısal tutarlılığı da değerlendirme sürecine dahil edilmektedir. Bu bağlamda SSIM, görsel kalite değerlendirmesinde insan algısına daha yakın sonuçlar üreten bir metrik olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca SSIM ölçütü tek kanal (kanal başına) olmak üzere hesaplanmakta ve genellikle gri ölçekli görüntüler üzerinde uygulanmaktadır (Wang, Wang, Liao, & Lin, 2008; Hore & Ziou, 2010).

SSIM ölçütünün literatürde diğer yöntemlere göre daha sık yer almasının sebebi, benzerliği MSE, PSNR gibi yöntemlerde olduğu gibi pikseller bakımından tek bir değer olarak değerlendirmeyip, her açıdan değerlendirmesidir (Hore & Ziou, 2010). Bu ölçüt [0,1] aralığında değer alır. Görüntülerin aynı olmaları durumunda ortalama parlaklıkları ve standart sapmaları eşit olacaktır. Bunun sonucunda ise ilgili fonksiyonlar 1'e eşit olur ve SSIM değeri 1 sonucunu verir. Dolayısıyla SSIM değerinin 1'e yaklaşması iyileştirilmiş görüntünün orijinal görüntüye oldukça benzer olduğunu, 0'a yaklaşması ise iyileştirilmiş görüntünün orijinal görüntüden oldukça farklı olduğunu ifade etmektedir. Bu yöntemin eksikleri ise insan gözünün sınırlamalarını kontrol etmemesidir. Bu sebeple literatürde HVS tabanlı yöntemler arasında geçebileceği gibi yarı HVS tabanlı olan yöntemler arasında da karşılaşılabilmektedir. İnsan gözü keskinliklere, köşelere, renklere duyarlıdır. Örneğin yeşil tonlar insan gözünün en dikkatini çeken renklerdir. Bundan sonra kırmızı, en son ise mavi gelir. Ancak SSIM hesaplanırken bu özelliklere dikkat edilmez. Tamamen HVS tabanlı yöntemler ise bu ayrımları değerlendirir ve bu değerlendirmeler için çeşitli fonksiyonlar kullanır. Bu sebeple literatürde SSIM kullanarak geliştirilmiş tamamen HVS tabanlı yöntemlerde bulunmaktadır (Wang, Wang, Liao, & Lin, 2008).

1.3.4. Doğal Görüntü Kalitesi Değerlendiricisi (NIQE)

Doğal Görüntü Kalitesi Değerlendiricisi (NIQE), görüntü işlemede görüntünün kalitesini ölçmek için kullanılan HVS tabanlı bir benzerlik uzaklığıdır. Tamamen referanssız bir metrik olan NIQE, görüntünün kalitesini belirlerken orijinal görüntüye ait piksel değerlerinin, normalize edilmiş piksel karşılığı Lokal Ortalaması Çıkarılmış ve Kontrastı Eşitlenmiş Piksel Değerleri (MSCN) ile elde eder ve mevcut görüntünün doğal istatistiklere

benzerliğini ölçmek için elde ettiği MSCN vektörlerini, Genelleştirilmiş Gauss Dağılımı'nın (GGD) simetrik olmayan hali olan Asimetrik Genelleştirilmiş Gauss Dağılımı (AGGD) için kullanır. GGD görüntülerin her zaman simetrik olduğunu varsayarak histogramın sağ ve sol kuyruklarını eşit değerlendirir (Mittal, Moorthy, & Bovik, 2012b). AGGD ise histogramın sağ ve sol kuyruklarının her zaman eşit olmayacağını göz önüne alarak karşılaştırmalar yapar (Galdran, Araújo, Mendonça, & Campilho, 2017; Mittal, Soundararajan, & Bovik, 2012a)

NIQE için genel mantık, iyi görüntülerin özelliği olan belirli değerlerdir. Yani sağlıklı görüntü diğer sağlıklı görüntüler gibi sağlıklı sonuçlar verebilmektedir ancak sağlıksız görüntüler sağlıklı görüntülerden farklı sonuçlar üretmektedir. Bu literatürde Doğal Sahne İstatistikleri (NSS) olarak isimlendirilmektedir. Bir görüntünün NSS özelliklerinin değerlendirilmesi için, $m \times n$ boyutlu bir pencerenin kaydırılması ile, pikselin yerelde gösterdiği değişikliği de inceler (Mittal, Moorthy, & Bovik, 2012b).

Tüm bunlar sonucunda NIQE skoru;

$$NIQE = \sqrt{(\mu_n - \mu_t)^T \left(\frac{(\Sigma_n + \Sigma_t)}{2}\right)^{-1} (\mu_n - \mu_t)} \tag{13}$$

olarak elde edilmektedir. Skor hesaplanırken hesaplanan AGGD değerlerinin ortalaması μ_t'yi, kovaryans matrisi Σ_t 'yi oluşturmaktadır. NIQE skoru için referansa gerek yoktur ancak daha önceden kalitesi yüksek görseller üzerinden elde edilmiş özellikler ile mevcut görüntünün arasındaki uzaklığı ölçerek karşılaştırmalar yapılmaktadır. Mesafe az ise görsel kaliteli demektir. Dolayısıyla kalitesi yüksek görsellerin ortalaması μ_n'yi ve kovaryans matrisleri Σ_n'yi oluşturmaktadır (Nacereddine & Goumeidane, 2019; Mittal, Moorthy, & Bovik, 2012b). NIQE skoru ile kalite ters orantılıdır. Bu sebeple NIQE skoru ne kadar düşükse, görüntünün kalitesi o kadar yüksektir. Çünkü NIQE skoru arttıkça görüntünün dağılımı ile sağlıklı görüntülerin dağılımının benzerliği düşmektedir (Mittal, Soundararajan, & Bovik, 2012a).

1.3.5. Kalite Farkındalıklı Kontrast (QAC)

Kalite Farkındalıklı Kontrast (QAC), görüntülerin kontrastını hesaplayan ve NIQE gibi doğal sahne istatistiklerini kullanarak çalışan referanssız bir yöntemdir. İnsan gözü kaliteli görselleri algılayacak bir algoritmaya sahiptir. NSS, kaliteli görsellerin bilgilerinin

kendi aralarında benzer olduklarını yani her kaliteli görselin ortak özellikleri olduğunu ifade etmektedir. QAC'de bu özelliklere ait istatistikleri kullanarak görüntülerin kalitesini belirlemektedir. QAC'yi NIQE'den farklı kılan özelik, QAC'nin sadece görüntünün insan gözünde ne kadar kaliteli olduğunu değerlendiren bir yöntem olmasıdır. NIQE ise sadece kaliteyi değil, görüntünün dağılımı, netliği gibi daha fazla NSS özelliğini bir araya getiren bir yöntemdir. Bu sebeple NIQE kendi başına bir yöntem olup, görüntünün kalitesini belirleyen, daha kapsamlı NSS özelliklerini de kullanan bir yöntem iken (AGGD, yönsel çarpımlar, …), QAC diğer referanssız yöntemler için temel oluşturan ve NIQE'ye kıyasla daha az NSS özelliğini değerlendiren bir yöntemdir.

QAC hesaplanırken tıpkı NIQE'de olduğu gibi, görüntü pencerenin kaydırılmasıyla incelenmektedir ve piksel değerleri MSCN ile normalleştirilerek kullanılmaktadır. NSS'ye göre kaliteli görüntülerde MSCN katsayılarının dağılımı belirgin ve öngörülebilir bir şekilde olduğu için, NSS tabanlı yöntemlerde MSCN kullanılmaktadır. QAC hesaplanırken de elde edilen MSCN değerleri üzerinden belirli istatistikler ve özellikler elde edilir ve QAC için girdi olarak kullanılır. Daha sonra bu girdiler kalitelerine göre kümelendirilir ve yeni gelen görüntüler bu kümeleme sonuçlarıyla karşılaştırılır. Bu kümeleme gerçekleştirilirken daha önceden belirlenmiş kaliteli görsel sınıflarından elde edilen bilgiler kullanılır ve her bir pencere için bir skor elde edilerek bu skorların ortalaması hesaplanır. Elde edilen ortalama değeri görüntünün kontrast kalitesini ifade eden bir skordur. Her görüntü,

$$x_i = [f_1(I), f_2(I), \dots, f_n(I)] \tag{14}$$

gibi bir özellik vektörüyle ifade edilir. Burada $f_i(I)$, görüntünün i'nci özelliğini ifade etmektedir. Bu skorlar kullanılarak görüntüler, kalitesine göre kümelenir. Burada gerçekleşen kümeleme, hiyerarşik kümeleme yöntemlerinden ve hiyerarşik olmayan kümeleme yöntemlerinden farklıdır. Klasik kümeleme yöntemlerinde konum ve mesafe bilgisi yeterli iken, QAC içinde kullanılan kümeleme yönteminde konum ve mesafe bilgisinin yanı sıra kalite bilgisi gerekmektedir (Xue, Zhang, & Mou, 2011; Yue, ve diğerleri, 2024).

1.3.6. Uyuşmazlık Ölçüsü

Uyuşmazlık ölçüsü (D_n), bir veri kümesinin dağılımını kontrol eder ve istenilen bir dağılıma ne kadar benzer olduğunu ölçer. Kalitesi yüksek bir görüntüde pikseller her rengi eşit ya da yaklaşık olarak barındırır ve böyle bir görüntünün dağılımı tekdüze dağılıma benzer bir şekilde eşit ve düzgün elde edilir. Uyuşmazlık ölçüsü bu benzerliği değerlendirmek için kullanılmaktadır. Eğer her aralıkta piksel sayısı eşit veya yaklaşık ise bu görüntünün dağılımının düzgün olduğu sonucu elde edilmektedir. Yani aralıktaki piksel sayılarının farkı minimum ise dağılımın o kadar düzgün olduğu ve uyuşmazlık ölçüsünün düşük olduğu, minimum olmadığı takdirde ise dağılımın düzgünlükten uzaklaştığı ve uyuşmazlık ölçüsünün yüksek olduğu sonucu elde edilmektedir. (Dick & Pillichshammer, 2010)'nin söylemiyle, [a, b] aralığındaki n adet verinin [c, d] aralığındaki veri sayısı, aralığın genişliğiyle orantılı ise uyuşmazlık ölçüsü düşük ve dağılım düzgündür. Büyük sayılar yasasına göre ise deneme sayısı çok kez yapıldığında elde edilen sonuçlar [c, d] aralığının uzunluğunun [a, b] aralığının uzunluğuna oranına eşit hale gelmektedir ve bu aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$\lim_{n\to\infty} \frac{s(\{x_1, x_2, \cdots, x_n\} \cap [c, d])}{n} = \frac{d-c}{b-a} \tag{15}$$

Dolayısıyla uyuşmazlık ölçüsü,

$$D_n = \sup_{a\le c\le d\le b} \left| \frac{s(\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \cap [c, d])}{n} - \frac{d-c}{b-a} \right| \tag{16}$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Dick & Pillichshammer, 2010).

1.4. Kontrast İyileştirilmesi İçin Kullanılan Yöntemler

Kontrast iyileştirmesi için günümüze kadar birçok yöntem geliştirilmiştir (Celona, Leonardi, Napoletano, & Rozza, 2022; Agaian, Panetta, & Grigoryan, 2001). Geliştirilen bu yöntemler uygulama alanlarına göre dönüşüm tabanlı ve uzaysal alan tabanlı yöntemler olarak; matematiksel işleyişlerine göre doğrusal yöntemler ve doğrusal olmayan yöntemler

olarak sınıflandırılmaktadır (Maragatham & Roomi, 2015; Agaian, Silver, & Panetta, 2007; Chandpa, Jani, & Prajapati, 2014).

Mevcut yöntemler uygulama alanları bakımından incelendiğinde; dönüşüm tabanlı yöntemler, görüntüyü matematiksel işlemlerle frekans veya dalga boyu gibi farklı bir uzayda analiz eder. Örneğin, Fourier veya Dalgacık dönüşümü gibi tekniklerle görüntü, düşük frekanslı ve yüksek frekanslı bileşenlere ayrılır. Düşük frekanslar, görüntünün genel parlaklık bilgisini taşır ve aşırı yüksek olmaları detay kaybına yol açar. Yüksek frekanslar ise kenarlar, dokular gibi detayları temsil eder. Bu yöntemler, düşük frekansları baskılayıp yüksek frekansları güçlendirerek kontrastı artırır. Çünkü insan gözü Bölüm 1.3'de bahsedildiği gibi, kontrastı değerlendirirken kenar, köşe gibi detaylara duyarlı davranmaktadır. Bu sebeple dönüşüm tabanlı yöntemler uygulandığında bu detaylar değerlendirilir. Homomorfik filtreleme, Fourier dönüşümü ve Retinex gibi teknikler, bu bileşenleri ayrıştırarak doğal bir kontrast dengesi sağlar (Agaian, Panetta, & Grigoryan, 2001; Patel & Bhandari, 2019; Maragatham & Roomi, 2015). Bu yöntemler, tıbbi görüntülerde tümör sınırlarının belirginleştirilmesi veya uydu görüntülerinde topografik detayların ortaya çıkarılması gibi alanlarda yaygın kullanılır (Pu & Ni, 2000). Özetle dönüşüm tabanlı yaklaşımlar, piksellerdeki değişim hızlarının frekansları üzerinden frekans bileşenlerini manipüle ederek hem aydınlatma sorunlarını çözer hem de detayları ön plana çıkarır. Bu sayede doğal görünümü koruyan ve insan gözüne uyumlu kontrast iyileştirme sağlanır.

Uzaysal alan tabanlı yöntemler dönüşüm tabanlı yöntemlerin aksine görüntü piksellerini doğrudan dönüştürmektedir. Bu işlem gerçekleşirken görüntüdeki piksellerin parlaklık yani yoğunluk değerleri bilgisi kullanılır. Yoğunluklar üzerinde iyileştirmeler yapılırken görüntünün tüm pikselleri üzerinde aynı anda işlem yapılabileceği gibi, görüntü bloklara ayrıldıktan sonra her bir blok için ayrı ayrı kontrast iyileştirme yapılabilmektedir (Rahman, Rahman, Hussain, Khaled, & Shoyaib, 2014). Bu sebeple kullanılan yöntemler Global Uzay Tabanlı Yöntemler, Lokal Uzay Tabanlı Yöntemler ve Hibrid Uzay Tabanlı Yöntemler olarak alt başlıklara ayrılmaktadır (Agaian, Silver, & Panetta, 2007). Kontrast germe ve parlaklık düzenlemeleri, kenar zenginleştirme, histogram eşitleme gibi uygulamalar, kişinin görsel algılamasını etkilemeyi hedefleyen ve bu konuda başarı sağlayan en temel uzaysal alan tabanlı görüntü iyileştirme teknikleridir (Rahman, Rahman, Hussain, Khaled, & Shoyaib, 2014; Agaian, Panetta, & Grigoryan, 2001; Patel & Bhandari, 2019).

Mevcut yöntemler matematiksel işleyişleri bakımından incelendiğinde; doğrusal yöntemler, görüntüdeki piksellerin tamamına aynı anda bir doğru üzerinde ölçeklendirme ve öteleme yapmaktadır. Ancak bu durumda dağılımı dengesiz olan görüntülerde doğrusal işlemler yetersiz kalabilmekte ve gürültüde artış gerçekleşebilmektedir. Çünkü uygulanan işlem, görüntüyü global olarak işleme sokup, görüntüye ait parlaklık, keskinlik gibi özellikleri önemsemeden, her piksel için aynı şekilde aynı anda gerçekleşmektedir. Dolayısıyla globalde görüntüde iyileşme gerçekleşmiş gibi görünse de lokalde meydana gelen değişiklik ilgili bölgeye göre fazla iyileştirilmiş hale gelebilmekte ve bunun sonucunda gürültü gibi istenmeyen durumlar oluşabilmektedir. Kontrast iyileştirmenin temel amacı, görüntüdeki gri seviyelerin dağılımını tüm alana dengeli olarak dağıtmak ve bu dağıtma işlemini gerçekleştirirken kontrastı artıracak şekilde gerçekleştirmektir. Bu yöntemde bu işlem doğrudan yapılmaktadır (Chandpa, Jani, & Prajapati, 2014; Liang, Liu, & Yao, 2015). Doğrusal yöntemlerden en bilineni kontrast germedir. Görüntü kontrastının artırılmasına yönelik literatürde farklı kontrast germe yöntemleri önerilmiştir. Bu yöntemlerin temelini, Otokontrast ve ayarlanmış kontrast olarak adlandırılan temel yaklaşımlar oluşturmaktadır (Radha & Tech, 2012). Otokontrast yöntemi, görüntüdeki en düşük yoğunluk değerini 0 noktasına, en yüksek yoğunluk değerini ise 255 noktasına eşleyerek, bu iki uç değer arasındaki tüm piksel değerlerini;

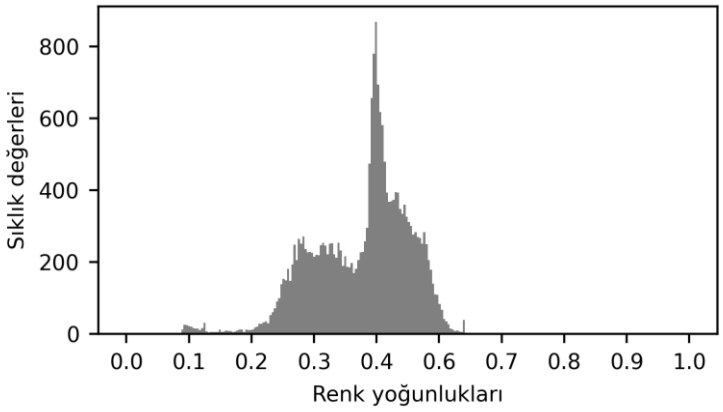
$$J(x,y) = L\left(\frac{I(x,y) - I_{low}}{I_{high} - I_{low}}\right) \tag{17}$$

yardımıyla yeniden ölçeklendirir. Bu sayede görüntü kontrastı, mevcut dinamik aralığın tamamına yayılmış olur. Ayarlanmış kontrast yöntemi ise kullanıcıya iyileştirilmiş görüntüde kullanılacak minimum ve maksimum gri seviye değerlerini tanımlama olanağı sağlar. Bu kullanıcı tanımlı aralık temel alınarak, yöntem otokontrast yaklaşımını uygular ve görüntü kontrastını belirlenen dinamik aralık içerisinde;

$$J(x,y) = \left(J_{high} - J_{low}\right)\left(\frac{I(x,y) - I_{low}}{I_{high} - I_{low}}\right) + J_{low} \tag{18}$$

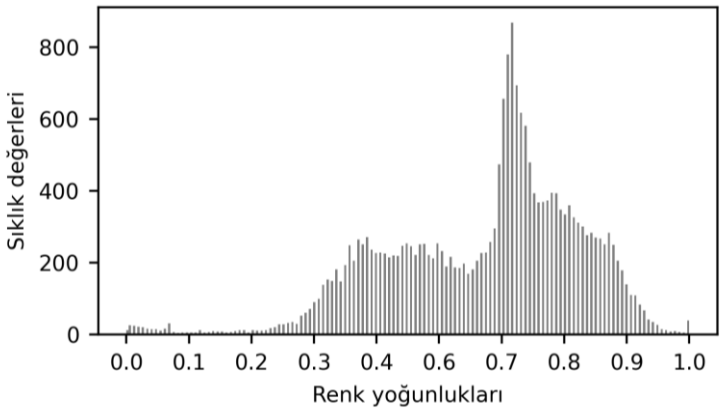
yardımıyla optimize eder (Gonzalez, 2009; Radha & Tech, 2012). Aşağıda otokontrast ve ayarlanmış kontrast yöntemlerinin uygulamasının karşılaştırılması sunulmaktadır.





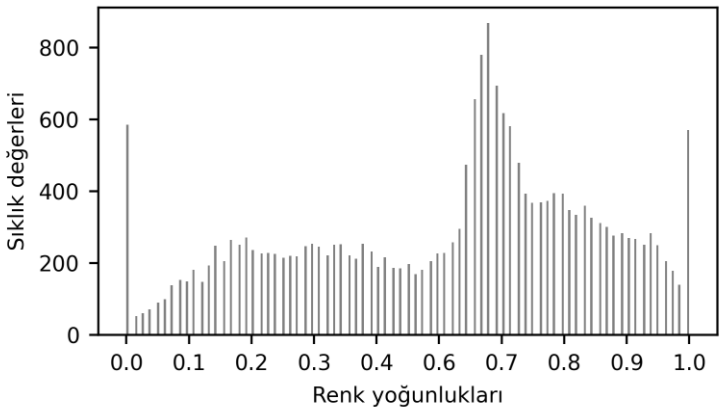
(a) (b)





(c) (d)

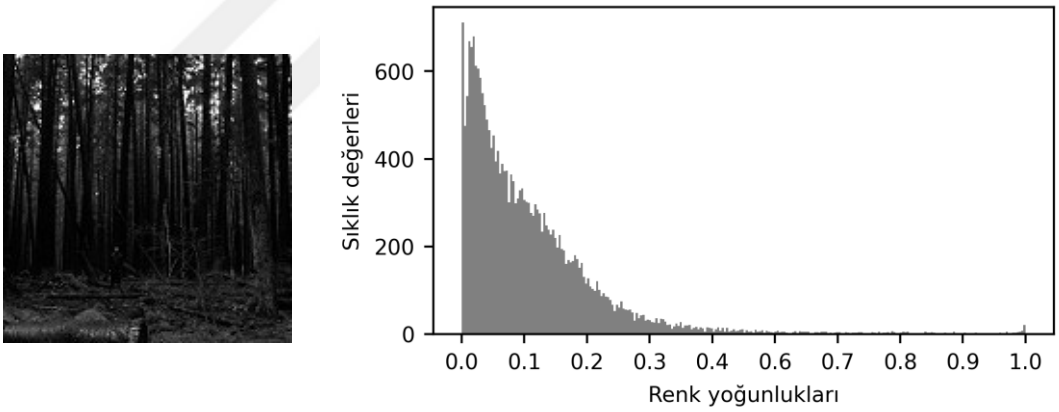




(e) (f)

Şekil 8. Kontrast germe yöntemlerinin uygulanması; (a, b) Orijinal görüntü ve histogramı; (c, d) Otokontrast uygulanmış görüntü ve histogramı; (e, f) Ayarlanmış kontrast germe uygulanmış görüntü (Aralık = [0.25-0.55]) ve histogramı

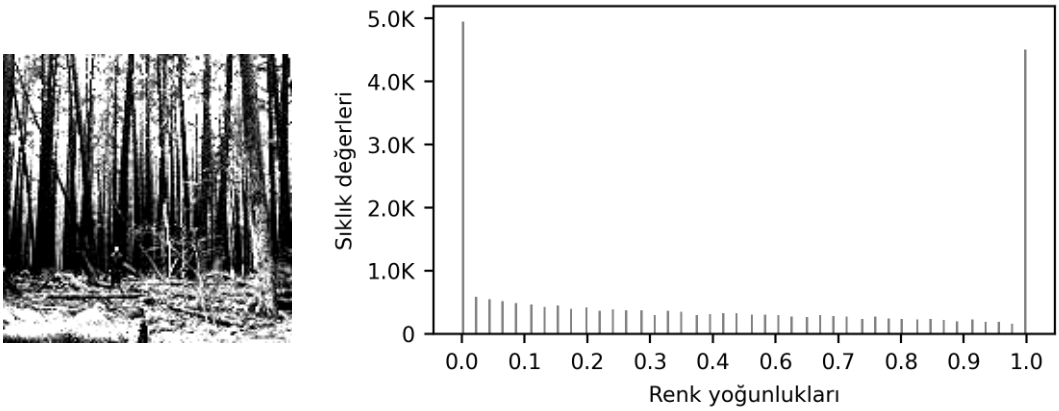
Doğrusal olmayan yöntemlerde ise pikseller doğrusal olmayan yani eğrisel bir fonksiyonla eşlenmektedir. HVS doğrusal olmayan bir tepki mekanizmasına sahip olduğundan, doğrusal olmayan görüntü işleme yöntemleri, bu sistemin algısal karakteristiğini daha iyi yansıtarak HVS'ye daha uygun sonuçlar sunmaktadır. Bu yöntemler, mevcut bölgenin durumuna göre doğrusal olmayan bir işlem uyguladığı için hesaplama maliyeti daha yüksek olsa da gürültüye ve dengesiz dağılımlara karşı daha hassas davranmaktadır. Çünkü, eğer bir bölge karanlıksa o bölgenin aydınlatılması gerekmektedir. Aynı şekilde aydınlık bölgelerinde uygun bir şekilde parlaklığının düşürülmesi gerekmektedir. Doğrusal olmayan yöntemler bu durumun farkını göz önüne alarak işlemleri gerçekleştirdiği için, maliyet açısından doğrusal yöntemlere göre dezavantajlıdır. Ancak doğrusal yöntemlerin oluşturduğu gürültü gibi bozulmaları daha az oluşturmaktadır. Literatürde en çok yer alan doğrusal yöntemler histogram eşitleme ve histogram eşitleme tabanlı yöntemlerdir (Chandpa, Jani, & Prajapati, 2014; Radha & Tech, 2012).



(a) (b)

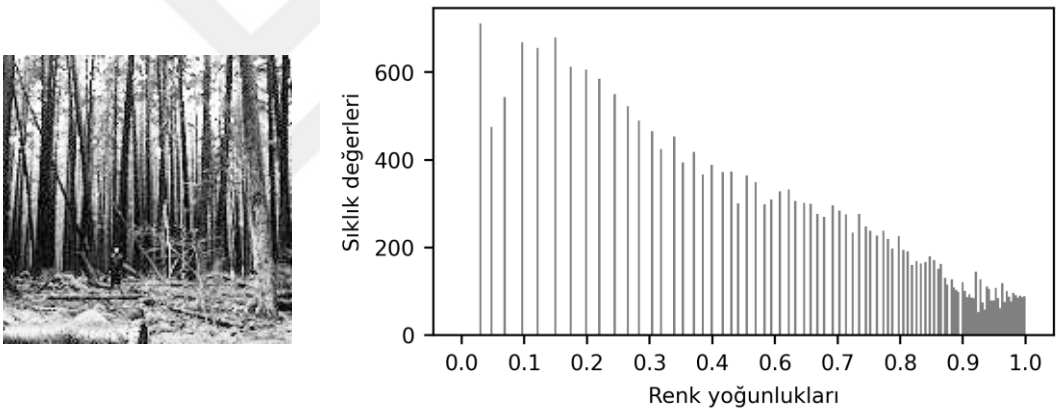
Şekil 9. Orijinal görüntü ve histogramı

Şekil 9'de doğrusal ve doğrusal olmayan kontrast iyileştirme yöntemleri arasındaki farkı göstermek amacıyla kullanılan görüntünün orijinal hâli ve buna ait yoğunluk histogramı sunulmaktadır. Şekil 10 ve Şekil 11'de ise aynı görüntüye, doğrusal yöntemlerden otokontrast ve doğrusal olmayan yöntemlerden histogram eşitleme uygulanması sonucunda elde edilen görüntüler yer almaktadır. Bu görseller üzerinden, her iki yöntemin yoğunluk dağılımı üzerindeki etkileri ve görüntü kontrastına katkıları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.



(a) (b)

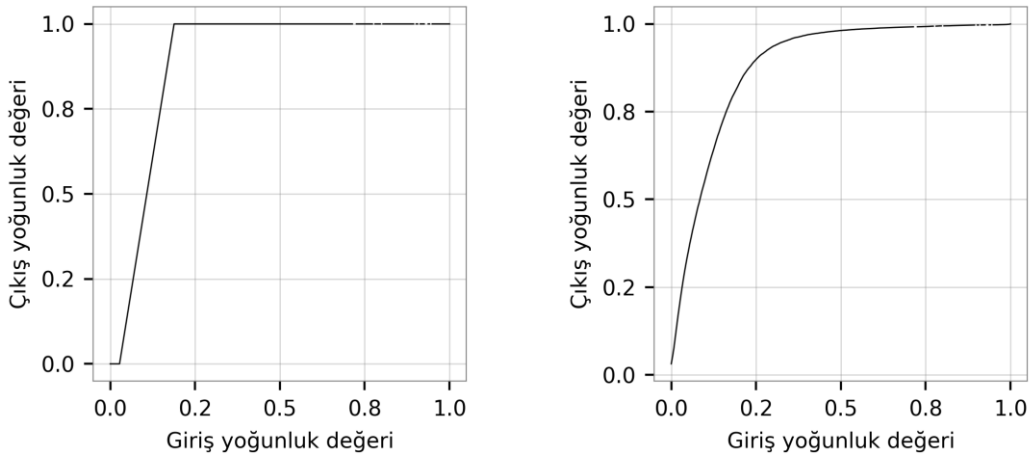
Şekil 10. Şekil 9'da yer alan görüntüye otokontrast uygulaması



(a) (b)

Şekil 11. Şekil 9'da yer alan görüntüye HE uygulaması

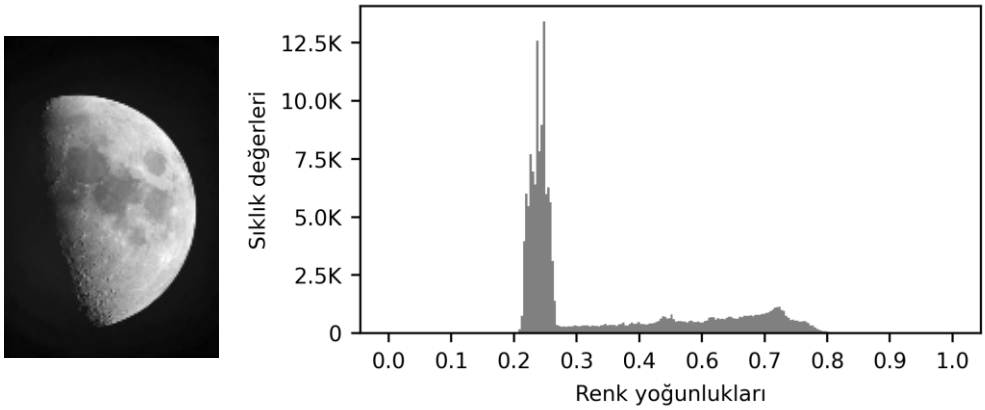
Şekil 10 ve Şekil 11 incelendiğinde, otokontrast yönteminin mevcut gri seviye aralığını doğrusal olarak genişlettiği ve görüntünün genel parlaklığını artırdığı, ancak histogram dağılımının karakteristik biçimini büyük ölçüde koruduğu görülmektedir. Buna karşılık histogram eşitleme yöntemi, gri seviyeleri tüm dinamik aralığa daha dengeli biçimde yayarak histogramı daha tekdüze bir yapıya dönüştürmektedir. Bu yöntemlerin piksel yoğunluklarında nasıl değişikliğe sebep oldukları ise Şekil 12'de gösterilmektedir.



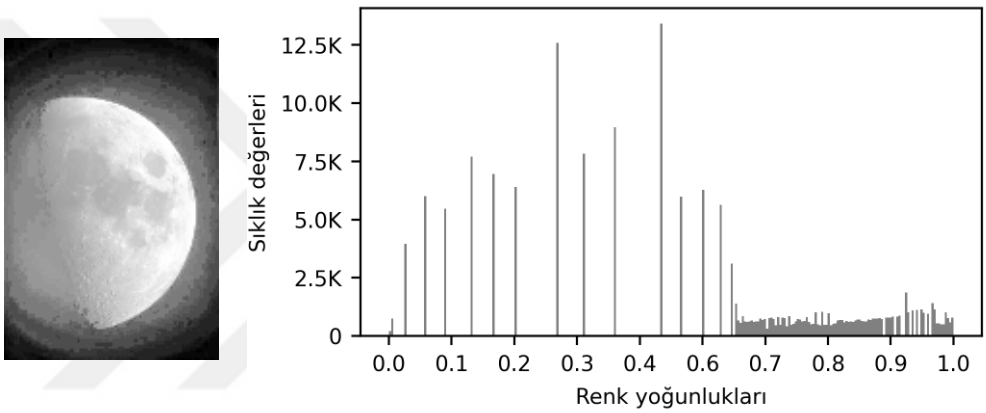
(a) (b)

Şekil 12. Şekil 9'da yer alan görüntü üzerinde farklı kontrast iyileştirme yöntemlerinin etkileri; (a) Otokontrast yöntemi için yoğunluk değerlerinin değişim eğrisi; (b) Histogram eşitleme yöntemi için yoğunluk değerlerinin değişim eğrisi

Doğrusal olmayan yöntemler ile doğrusal yöntemlerin etkileri, kontrast germesi ile histogram eşitleme üzerinden tartışıldığında, kontrast germesi renk değerlerini tüm renk aralığına eşit aralıklarda dağıtmasına rağmen belli bir bölgeye yığılmış renk değerlerini dengeli bir şekilde tüm renk aralığına yayamamaktadır. Kontrast germesinin aksine, histogram eşitleme uygulandığında yüksek sıklık değerine sahip olan renk değerleri daha seyrek konumlara yerleşirken, daha az sıklığa sahip renk değerleri birbirlerine daha yakın konumlara yerleşerek renk dağılımında bir denge ortaya koymaktadır. Diğer bir söyleyişle kontrast germesi renk değerlerinin dağılımının varyansını değiştirmesine rağmen histogram eşitleme renk değerlerinin dağılımını düzgün dağılıma yaklaştırmaktadır. Böylelikle histogram eşitleme renk değerlerinin tüm renk aralığına dengeli bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır. Buna rağmen renk değerlerinin dar bir aralıkta olması durumunda histogram eşitleme bazen istenen sonucu verememektedir. Şekil 13 ve Şekil 14, bu durumu özetlemektedir.

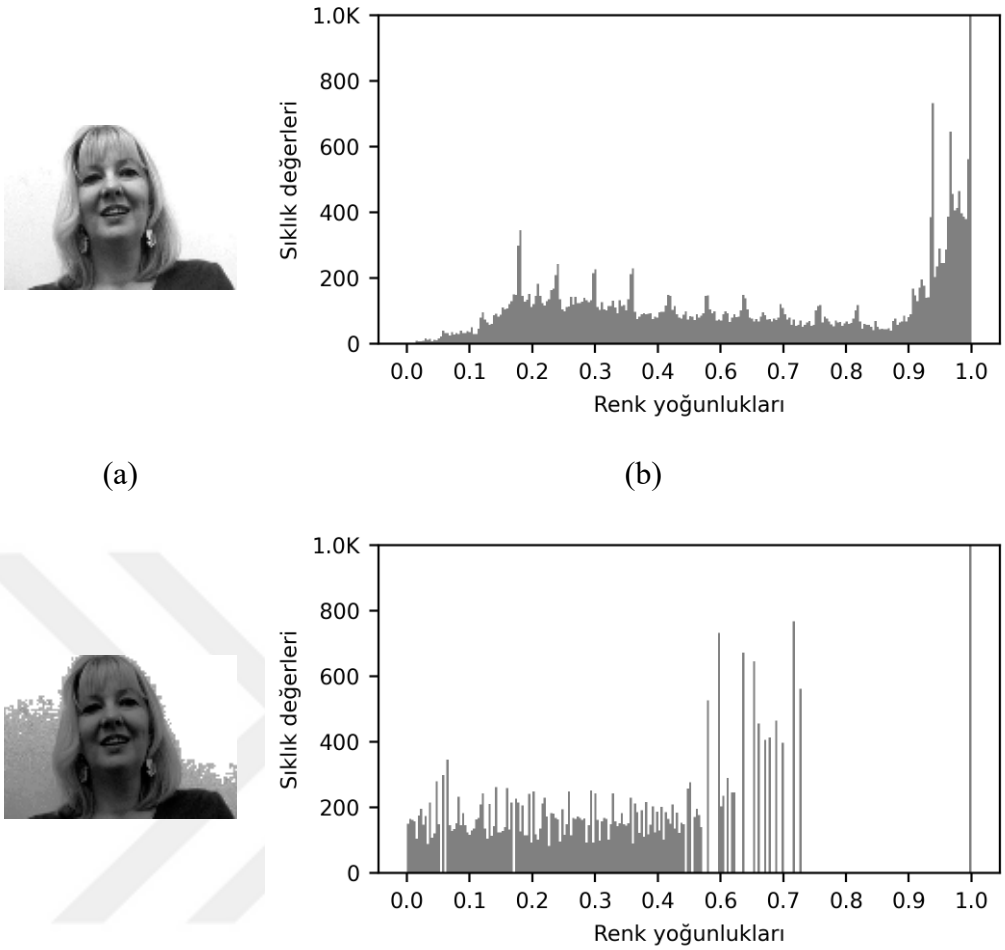


(a) (b)



(c) (d)

Şekil 13. Görüntüye göre histogram eşitleme yönteminin performansı; (a,b) Sağa çarpık dağılıma sahip görüntü ve histogramı; (c,d) Histogram eşitleme sonrası görüntü ve ilgili histogram



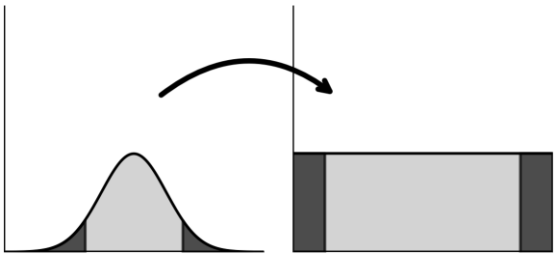
Şekil 14. Görüntüye göre histogram eşitleme yönteminin performansı; (a,b) Sola çarpık dağılıma sahip görüntü ve histogramı; (c,d) Histogram eşitleme sonrası görüntü ve ilgili histogram

Bu doğrultuda, histogram eşitleme temelli yaklaşımlar üzerine geliştirilen ve literatürde sıklıkla başvurulan çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada da uzaysal alan tabanlı ve doğrusal olmayan yöntemlerden histogram eşitleme ve histogram eşitleme tabanlı olan yöntemler kullanılacaktır.

1.4.1. Klasik Histogram Eşitleme (HE)

Bir görüntünün piksel yoğunluklarının dağılımını gösteren grafiğe histogram denir. Histogram eşitleme ise, uzaysal alan tabanlı yöntemlere örnek olarak verilebilecek doğrusal olmayan, kontrast iyileştirmesi için kullanılan yöntemlerden bir tanesi olup, aynı amaçlar için geliştirilen yeni yöntemlerinde temelini oluşturmaktadır. Görüntünün gri seviyelerinin

dağılımı veya başka bir deyişle piksel yoğunluklarının dağılımı kullanılmaktadır. Histogram eşitleme bu piksel yoğunluklarının dağılımını, tüm piksel bilgisini kullanarak tekdüze dağılıma yaklaştırmaktadır (Şekil 15) (Rahman, Rahman, Hussain, Khaled, & Shoyaib, 2014).



Şekil 15. Histogram eşitlemenin piksel yoğunluklarının dağılımına etkisi

Dağılım tekdüze dağılıma yaklaşırken, yığın oluşturan bölgeler daha geniş aralığa yayılır ve kontrastı düşük bölgelerde yer alan detaylar göz önüne çıkar. Bu işlem gerçekleştirilirken piksellerin yoğunluklarına karşılık gelen kümülatif dağılım fonksiyonu kullanılır. Histogram eşitlemenin algoritması Algoritma 1'de gösterilmektedir (Lu, Zhou, Panetta, & Agaian, 2010).

Algoritma 1. Histogram eşitleme algoritması

Adım 1. Her piksel değeri için sıklıklar;

$$f_i = \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} \delta(I(x,y) - i), \quad (i = 0,1,2,\dots,L) \tag{19}$$

eşitliği ile hesaplanır (Tablo 1-Sütun 2). Burada, f_i değeri i. renk değerinin görüntüdeki sıklığını göstermektedir. 8 bitlik bir görüntünün en büyük renk değeri $L = 2^8 = 256$ ile gösterilmektedir. $\delta(t)$ fonksiyonu;

$$\delta(t) = \begin{cases} 1\,, & t = 0 \\ 0\,, & t \neq 0 \end{cases} \tag{20}$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Adım 2. Hesaplanan sıklıkların birikimli sıklıkları Eşitlik (21) ile hesaplanır (Tablo 1- Sütun 3).

$$s_i = \sum_{k=0}^{i} f_k \tag{21}$$

Adım 3. Birikimli sıklıklar, en büyük birikimli sıklık değerine (toplam piksel sayısına) bölünerek göreli sıklıklar elde edilir (Tablo 1- Sütun 4). Göreli sıklıklar Eşitlik (22)'de verilmektedir.

$$p_i = \frac{s_i}{s_L} \tag{22}$$

Adım 4. Göreli sıklık değerleri en büyük renk değeriyle çarpılarak yeni renk değerleri elde edilir. Yeni renk değerleri Eşitlik (23)'de verilmektedir.

$$F_i = L \cdot p_i \tag{23}$$

Adım 5. Görüntüdeki renk değerleri kendilerine karşılık gelen yeni renk değeri ile yer değiştirilerek işlem tamamlanır (Eşitlik (24)).

$$J(x, y) = F\big(I(x, y)\big) \tag{24}$$

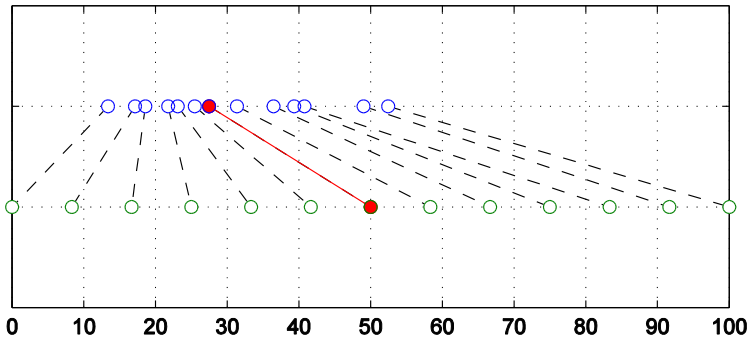
Burada I giriş görüntüsünün (x, y) renk değerini temsil ederken, J ise aynı konumdaki çıkış görüntüsünü temsil etmektedir. Görüntüde kullanılan renk değerleri tam sayı olup, histogram eşitleme işlemi sırasında ortaya çıkan küsuratlı yeni değerler yuvarlanarak tam sayıya çevrilir ve histogram eşitleme tamamlanır.

Aynı işlemin tablo üzerinde gösterimi ise Tablo 1'de özet olarak sunulmaktadır.

Tablo 1. Histogram eşitleme adımları

Renk Dizini (i)	Sıklıklar $f(i)$	Birikimli Sıklıklar (s_i)	Göreceli Sıklıklar (p_i)	Yeni Renk Dizini (F_i)
0	f_0	s_0	p_0	F_0
1	f_1	s_1	p_1	F_1
2	f_2	s_2	p_2	F_2
3	f_3	s_3	p_3	F_3
…	…	…	…	…
L	f_L	s_L	p_L	F_L

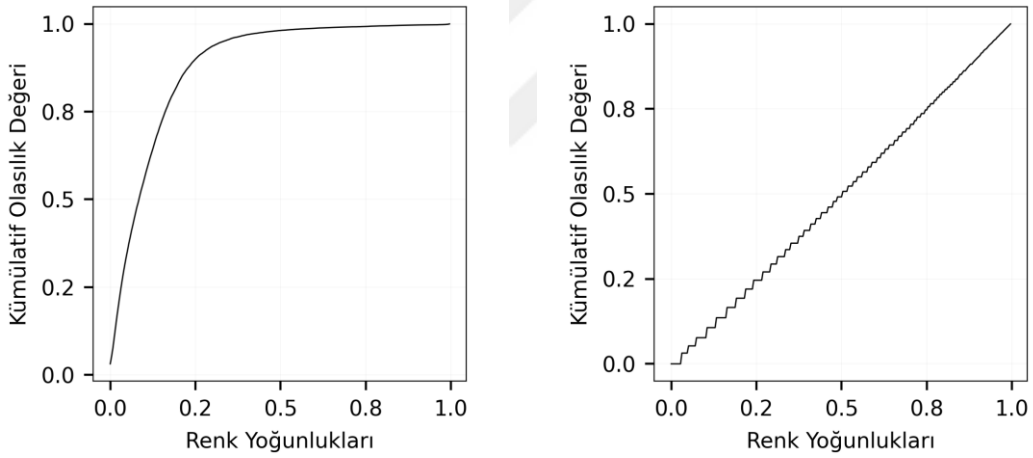
Görüntü çok kanallı bir renk uzayında yer alıyorsa, histogram eşitleme işlemi her kanal için ayrı ayrı gerçekleştirilmelidir. Ancak her kanalın bağımsız olarak işlenmesi, renk kanalları arasındaki dengenin bozulmasına ve görüntünün doğallıktan uzaklaşmasına neden olabilir. Bu nedenle, çok kanallı görüntülerde doğallığın korunması amacıyla, görüntü LAB veya HSV renk uzayına dönüştürülerek yalnızca parlaklık (L veya V) kanalı üzerinde histogram eşitleme işlemi uygulanabilir. Buna karşılık, görüntü tek kanallı bir yapıya sahipse, histogram eşitleme işlemi yalnızca bu kanal üzerinden gerçekleştirilir ve gri ton dağılımı esas alınarak sıklık değerleri hesaplanır.



Şekil 16: Histogram eşitleme sonucunda görüntü piksellerinin tüm renk aralığına yayılması

Histogram eşitleme, görüntü piksellerinin verilen renk aralığında eşit oranda dağılımını gerçekleştirmektedir. Böylelikle verilerin yaklaşık olarak birinci çeyreği $L/4$ renk değerine, ikinci çeyreği (ortanca) $L/2$ renk değerine ve üçüncü çeyreği ise $3L/4$ renk değerine karşılık gelmektedir. Örneğin Şekil 16'de, mavi noktalar orijinal görüntünün piksel değerlerini ve kırmızı noktalar histogram eşitleme sonrası pikselin karşılık geldiği yeni

değeri ifade etmektedir. Bu şekil incelendiğinde, orijinal görüntünün 12 ile 62 aralığına sıkışmış 13 tane renk değerinden oluştuğu ve histogram eşitleme sonrası 13 noktanın, 0 ile 100 arasında yer alan renk değerlerine eşit şekilde dağıtılarak yerleştirildiği görülmektedir. Kırmızı renkli değer örneklerin ortancasını vermektedir. Bu ortancanın ilk durumda 50/100 olmadığı ancak düzeltme sonucunda 50/100 değerine karşılık geldiği görülmektedir. Histogram eşitleme, görüntü piksellerini örnekteki gibi tüm aralığa yayarak, görüntü histogramını tekdüze dağılıma yaklaştırır. Bu işlem sonucunda, görüntünün ortanca değeri başlangıçtaki seviyesinden bağımsız olarak 50/100 seviyesine karşılık gelecek şekilde yeniden ölçeklendirilmekte ve böylece görüntü kontrastında belirgin bir iyileşme sağlanmaktadır. Ancak histogram eşitleme bu işlemleri gerçekleştirirken tüm görüntüyü aynı anda değerlendirmektedir. Dolayısıyla piksel yoğunluğunun olduğu bölgeler ile yoğunluğun olmadığı bölgeler dağıtılırken eşit değerlendirilerek dağıtılmaktadır. Bu durum aşağıda kümülatif dağılım eğrileri üzerinden gösterilmektedir.

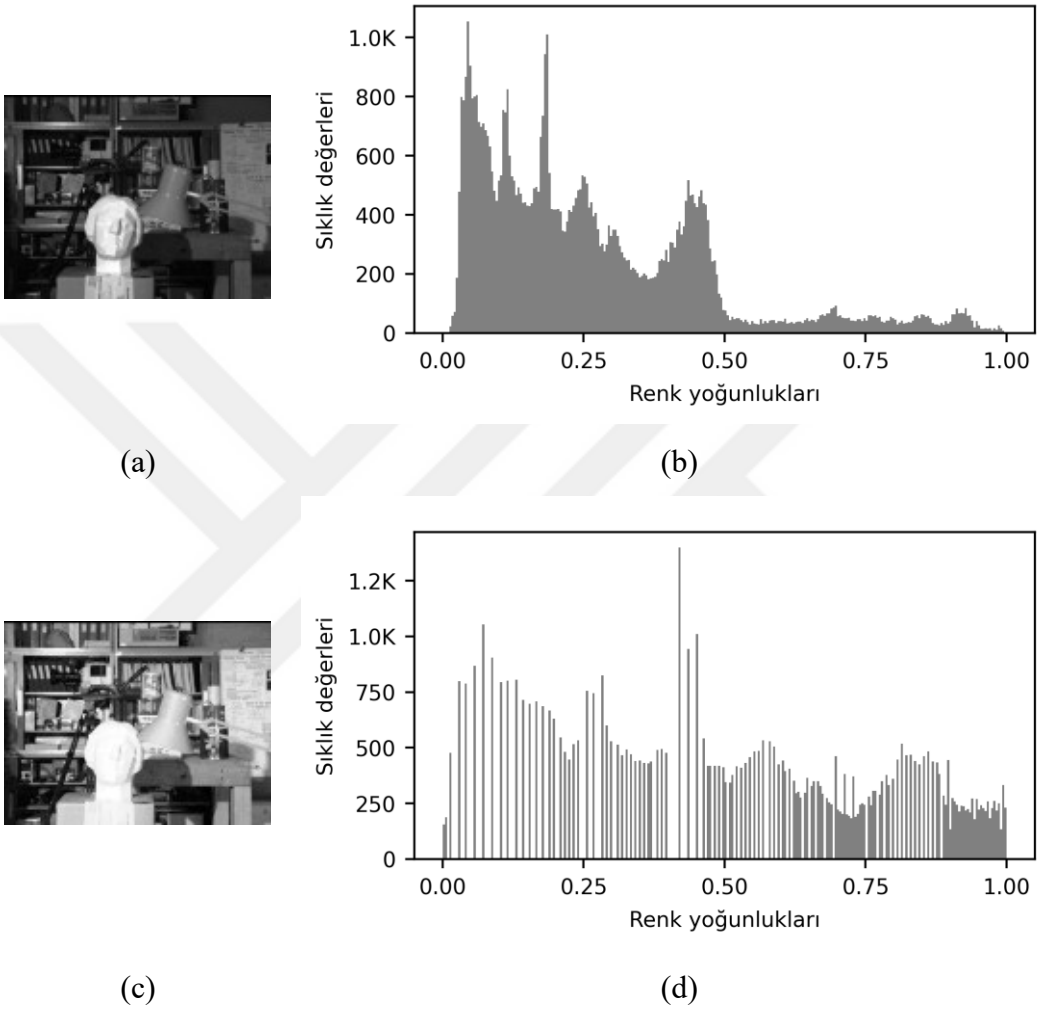


(a) (b)

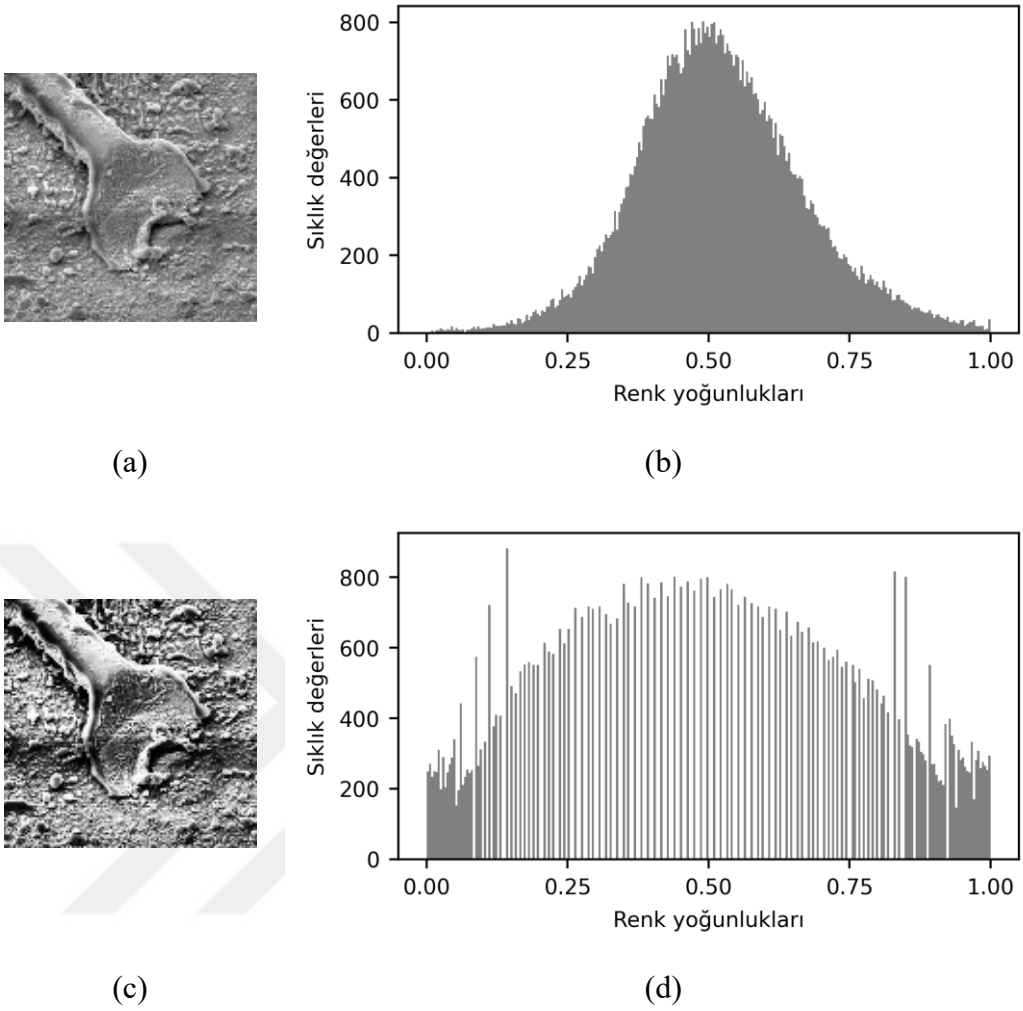
Şekil 17. Histogram eşitlemenin meydana getirdiği değişimin gösterimi; (a) Şekil 9a için kümülatif dağılım eğrisi (b) Şekil 11a için kümülatif dağılım eğrisi

Histogram eşitleme diğer kontrast artırım yöntemlerinden farklı olarak doğrusal olmayan bir işlem yapmaktadır. Diğer yöntemler veriden bağımsız bir fonksiyona bağlı kalarak renk değerleri üzerinde bir germe yaparken, histogram eşitleme renk değerlerinin sıklıklarını kullandığından görüntü renk değerlerine bağımlı hareket etmektedir. Ancak işlem sonucunda, görüntünün histogramı her ne kadar tekdüze bir dağılıma yaklaşsa da

karanlık bölgelerin daha karanlık, aydınlık bölgelerin ise daha aydınlık hâle gelmesi, görüntüde gürültü artışı, bilgi kaybı, parlaklık dengesinin bozulması ve düşük seviyeli piksellerin yüksek seviyelere dönüştürülmesi gibi olumsuz etkiler ortaya çıkabilmektedir ve bu Şekil 18 ve Şekil 19'de gösterilmektedir.



Şekil 18. Oda görüntüsü için histogram eşitleme sonucu ortaya çıkan bozulmalar



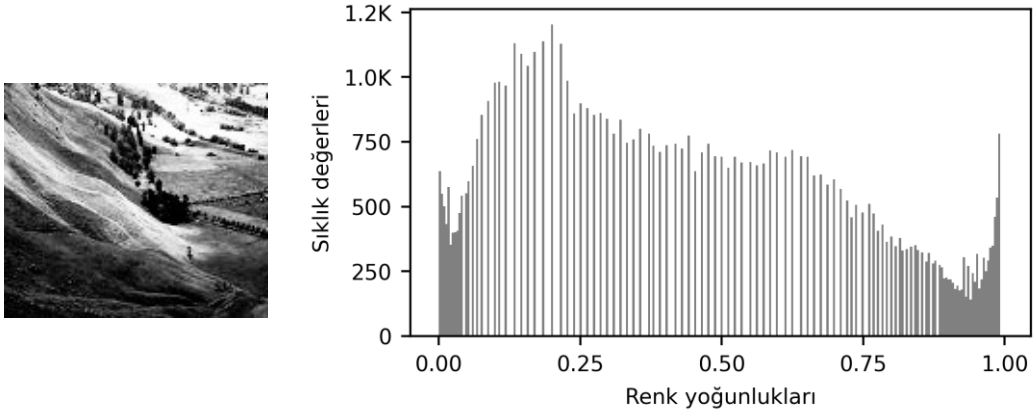
Şekil 19. Bakteri görüntüsü için histogram eşitleme sonucu ortaya çıkan bozulmalar

Şekil 18 ve Şekil 19'de, histogram eşitleme yönteminin farklı içeriklere sahip görüntüler üzerindeki etkileri ve bu işlem sonucunda oluşabilen bozulmalar gösterilmektedir. Şekil 18a, Şekil 18b, Şekil 19a ve Şekil 19b görsellerinde, başlangıç görüntülerinin histogramlarının belirli yoğunluk aralıklarında yoğunlaştığı, sınırlı bir dinamik aralık kullandığı görülmektedir. Histogram eşitleme sonrasında elde edilen görüntülerde (Şekil 18c ve Şekil 19c) yoğunluk değerlerinin tüm aralığa yayılması sağlanmış olsa da bu genişletme işlemi beraberinde yerel kontrast artışıyla birlikte istenmeyen aydınlanma etkileri ve yapay gürültü oluşumuna neden olmuştur. Özellikle düşük kontrastlı ve homojen bölgelerde, orijinal görüntüde fark edilmeyen aydınlık dalgalanmalar ve doku benzeri bozulmaların belirgin hâle geldiği gözlemlenmektedir. Ayrıca histogramların (Şekil 18d ve Şekil 19d) düzensiz ve keskin dağılımlar sergilemesi, bu yöntemin görüntüdeki her noktaya aynı anda bir dönüşüm uygulaması nedeniyle yerel yapıları dikkate almadığını ve

farklı içerik türlerine aynı şekilde uygulanmasının görüntü kalitesini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Bu durum, histogram eşitlemenin her tür görüntü için uygun bir kontrast iyileştirme yöntemi olmadığını ve özellikle medikal, mikroskobik veya homojen sahnelerde dikkatle kullanılmasını gerektiğini ortaya koymaktadır. Bunların aksine histogram eşitleme, görüntünün aşırı iyileştirilmesine de neden olabilmektedir. Bu sebeple, histogram eşitleme çok fazla tercih edilmemektedir ve literatürde histogram eşitlemeden elde edilmiş çok fazla histogram eşitleme yöntemi bulunmaktadır (Rahman, Rahman, Hussain, Khaled, & Shoyaib, 2014; Kim Y.-T. , 1997; Moniruzzaman, Shafuzzaman, & Hossain, 2014; Agaian, Silver, & Panetta, 2007).

1.4.2. Ağırlıklandırılmış Histogram Eşitleme (WHE)

HE ’nin her piksele aynı işlemi uygulaması, karanlık bölgeleri daha karanlık, aydınlık bölgeleri daha aydınlık ve görüntüyü doğallıktan uzak hale getirebilmektedir. Bu sebeple her gri seviyeyi birbirinden farklı koşullar altında görüntü işleme sürecine sokmanın daha olumlu sonuçlar verebileceği düşünülerek Ağırlıklandırılmış Histogram Eşitleme (WHE) önerilmiştir. Görüntünün gri seviye sayısı kadar ağırlıklandırma katsayısı kullanan bu yöntem, her gri seviyesini ait olduğu katsayı ile ağırlıklandırma yaparak HE uygular. Kullanılan ağırlıklandırma katsayısını ise araştırmacı belirlemektedir. Dolayısıyla WHE genel bir yaklaşım olup, yöntemden ziyade yeni yöntemler için bir yaklaşım olarak değerlendirilebilmektedir. WHE ile görüntünün genel parlaklık dengesi korunur ve aşırı kontrast artışı önlenir (Şekil 20). Gri seviyelere göre ağırlıklandırma yapıldığı için, GHE ‘de meydana gelen dengesiz kontrast ve doğallıktan uzaklaşma problemi, WHE’de azaltılmıştır (Kim & Chung, 2008).

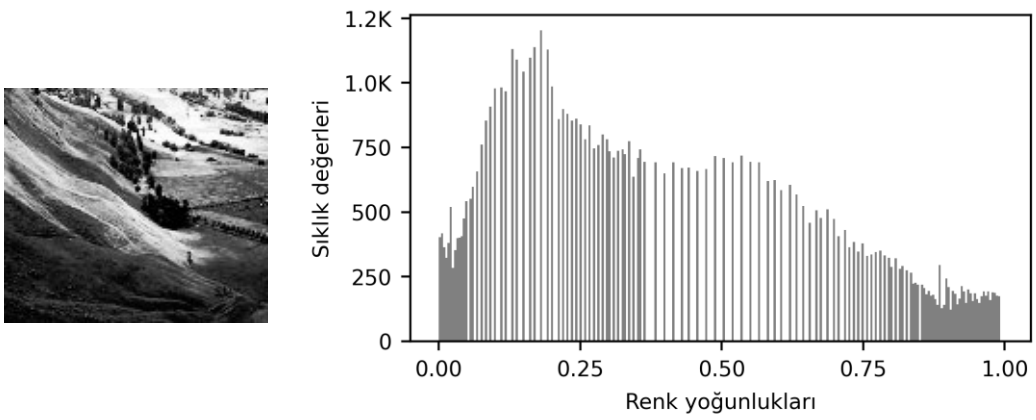


(a) (b)

Şekil 20. WHE uygulanmış bir görüntü ve histogramı

1.4.3. Parlaklık Koruyan Çift Histogram Eşitleme (BBHE)

Histogram eşitleme, kontrastta iyileştirme yaparken, parlaklığı önemsememektedir. Görüntü karanlık bölgelerin çoğunluklu olduğu bir görüntü ise (8 bit görüntülerde piksellerin ortalamasının 0'a yakın olduğu durumlar) eşitleme sonrası bu pikseller daha yüksek değerlere çekileceği için ortalama parlaklık artacaktır. Görüntü aydınlık bölgelerin çoğunluklu olduğu bir görüntü ise (8 bit görüntülerde piksellerin ortalamasının 255'e yakın olduğu durumlar) eşitleme sonrası bu pikseller daha düşük değerlere çekileceği için ortalama parlaklık düşecektir. Yani histogram eşitleme sonucu görüntünün parlaklık merkezi değişebilmektedir. Parlaklığı koruyarak işlem yapabilmek ve ortalama kaymasını önlemek amacıyla Parlaklık Koruyan Çift Histogram Eşitleme (BBHE) önerilmiştir. BBHE normal histogram eşitleme gibi görüntünün tamamında işlem yapmaktadır ancak işlemi gerçekleştirmeden önce görüntüyü ortalama yoğunluk değerinden iki parçaya böler. Yoğunluk değeri ortalamadan büyük olanlar için ayrı, yoğunluk değeri ortalamadan küçük olanlar için ayrı histogram eşitleme uygular (Şekil 21) (Rahman, Rahman, Hussain, Khaled, & Shoyaib, 2014). Ancak bütüncül tabanlı bir yöntem olduğu için, görüntüyü iki parçaya bölüp HE uygulamak yerel detaylarda her zaman iyileşme sağlamayabilir. Aynı zamanda ikiye ayırmak için kullanılan eşik tüm görüntüler için ortalama olduğundan, her görüntüde ortalama, doğru ve esnek bir eşik olmayabilir. Ortalamadan yüksek yoğunlukta bölgeler ile düşük yoğunluklu bölgeler arasında simetri yoksa BBHE ayrımlılık iyileştirmesini sınırlı veya dengesiz gerçekleştirebilmektedir (Maragatham & Roomi, 2015; Kim Y.-T. , 1997; Moniruzzaman, Shafuzzaman, & Hossain, 2014).

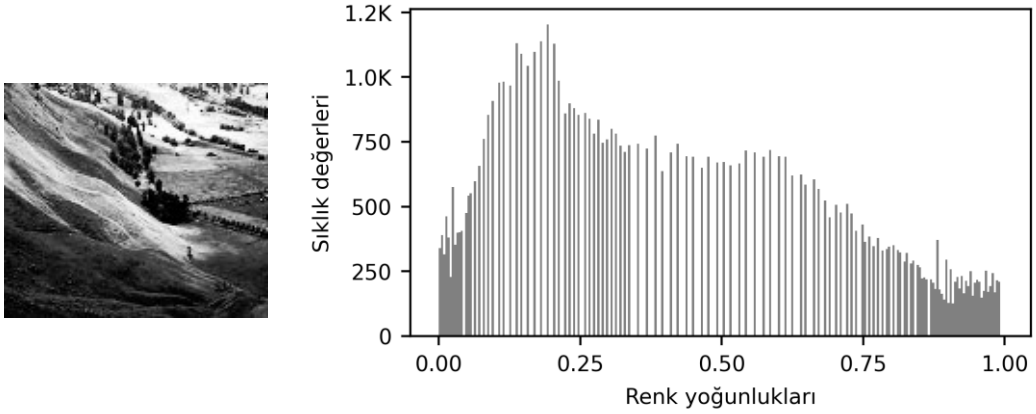


(a) (b)

Şekil 21. BBHE uygulanmış görüntü ve histogramı

1.4.4. İkili Alt Görüntü Histogram Eşitleme (DSIHE)

Parlaklık kontrolü için geliştirilen BBHE, görüntüyü ortalamadan ikiye bölmektedir. Ancak bu durum görüntünün aykırı veya uç değerlere sahip olduğu durumlarda doğru bir yöntem olmamaktadır. Çünkü ortalama değeri verideki aykırı ve uç değerlerden etkilenmektedir. Görüntüdeki yoğunluk değerleri de aykırı ve uç değer veya değerler içerdiğinde, BBHE'nin gerçekleştirdiği kontrast iyileştirmesi yeterince başarılı olamayabilir. Bu sebeple ortalama yerine ortanca kullanmak daha dengeli sonuçlar verebilmektedir çünkü ortanca aykırı değerlerden ortalama kadar etkilenmez. İkili Alt-Görüntü Histogram Eşitleme (DSIHE) bunu göz önüne alarak işlem yapan bir yöntem olup, görüntüyü ortancadan ikiye böldükten sonra elde edilen iki parça için HE uygulayarak kontrastta iyileştirme yapmayı amaçlamaktadır (Şekil 22). Ortalama ile ayrılan görüntüde ortalamadan yüksek yoğunluktaki piksel sayısı ile düşük yoğunluktaki piksel sayısı eşit olmayabilir ve bu durum kontrast iyileştirmesini etkileyebilir. Oysa ortanca, görüntüdeki pikselleri sayısal olarak iki eşit parçaya böldüğü için daha dengeli bir histogram eşitleme sağlar. Yapılan bu kontrast iyileştirmesi, uç değerlerden daha az etkilendiği için BBHE'ye göre daha başarılı sonuç verebilmektedir (Rahman, Rahman, Hussain, Khaled, & Shoyaib, 2014; Wang, Chen, & Zhang, 1999).

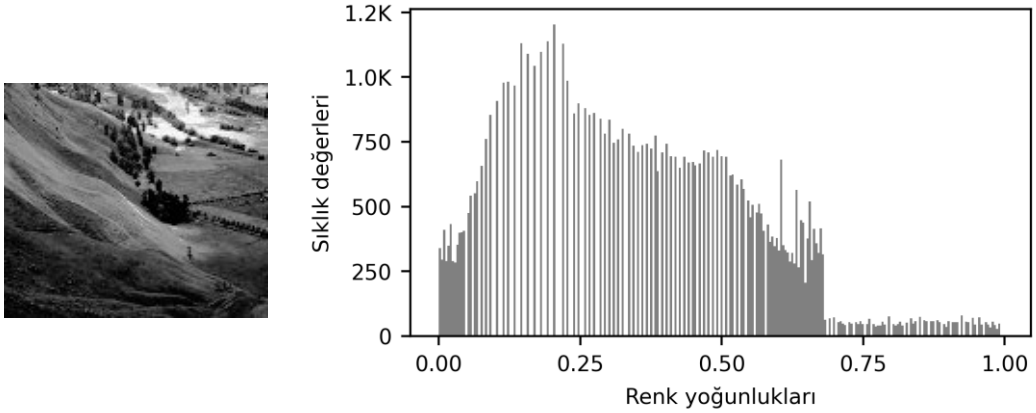


(a) (b)

Şekil 22. DSIHE uygulanan görüntü ve histogramı

1.4.5. En Küçük Ortalama Parlaklık Hatalı Çift Histogram Eşitleme (MMBEBHE)

BBHE ve DSIHE yöntemlerinin geliştirilmesiyle elde edilen En Küçük Ortalama Parlaklık Hatalı Çift Histogram Eşitleme (MMBEBHE), yine görüntü histogramını ikiye ayırarak histogram eşitleme yapmaktadır. Burada diğer yöntemlerden farklı olarak mevcut yoğunluk aralığında yer alan her değer ikiye ayırmak için eşik değeri olarak değerlendirilir ve giriş ve çıkış görüntülerinin ortalama değerleri arasındaki mutlak fark olarak tanımlanan Ortalama Parlaklık Hatası (AMBE) skoru her eşik değerinde ölçülür. En düşük AMBE değerine sahip eşik değeri, optimal olan eşik değeri olarak belirlenir. Eşik değerinin mevcut aralıktaki her değer için incelenmesi bu yöntemin BBHE ve DSIHE'ye göre daha yavaş olmasına sebep olmaktadır. Ancak girdi görüntüsü ile çıkış görüntüsü AMBE ile karşılaştırıldığı için, optimal eşik değeri sayesinde girdi ile çıktı birbirine çok yakın olmaktadır. Bu işlemler sırasında ise hem parlaklık korunmakta hem kontrast iyileştirmesi diğer yöntemlere göre daha başarılı gerçekleşmektedir (Şekil 23) (Rahman, Rahman, Hussain, Khaled, & Shoyaib, 2014; Chen & Ramli, Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement, 2003).

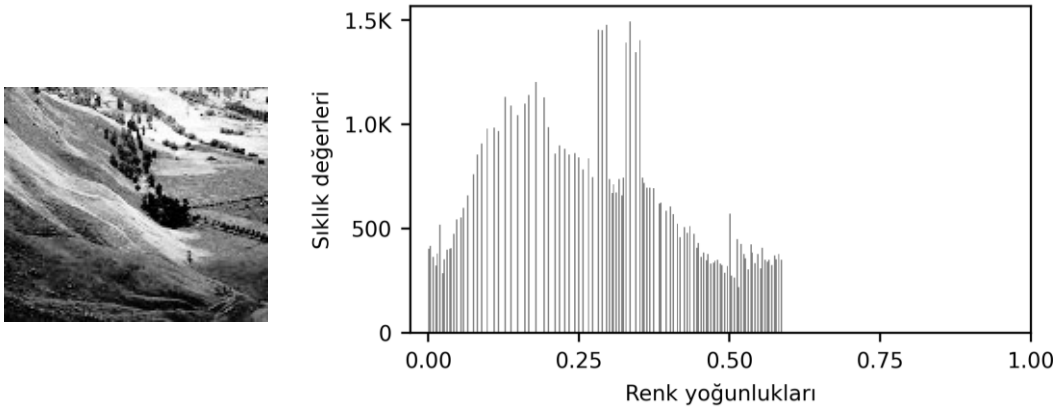


(a) (b)

Şekil 23. MMBEBHE uygulanan görüntü ve histogramı

1.4.6. Ağırlıklı Ortalama ile Ayrılmış Histogram Eşitleme (WMSHE)

Ağırlıklı Ortalama ile Ayrılmış Histogram Eşitleme (WMSHE), diğer histogram eşitleme yöntemleri gibi görüntünün histogramını ikiye böler ve iki parça için HE uygular. Eşik değerini diğer yöntemlerden farklı olarak ağırlıklı ortalama olarak seçmektedir. BBHE yöntemi için, ortalamanın uç ve aykırı değerlerden etkilenmesinden dolayı başarısız olabileceğinden bahsedilmişti. Bu yöntem bu problemi, her gri seviyeyi yoğunluğu ile çarparak çözmektedir çünkü bu çarpım uç değer probleminin etkisini azaltmaktadır. DSIHE' de bu sorun ortanca kullanarak azaltılsa da parlaklık kaymasına yani ışık patlamalarının olduğu yerlere çözüm olamamıştır. Ancak WMSHE ağırlıklı ortalama ile parlaklık kaymasının önlenmesinde katkı sağlamıştır (Şekil 24). MMBEBHE yöntemi de parlaklık kaymasına çözüm sağlamaktadır ancak işlem maliyeti WMSHE için daha azdır (Wu, Cheng, & Chen, 2010).

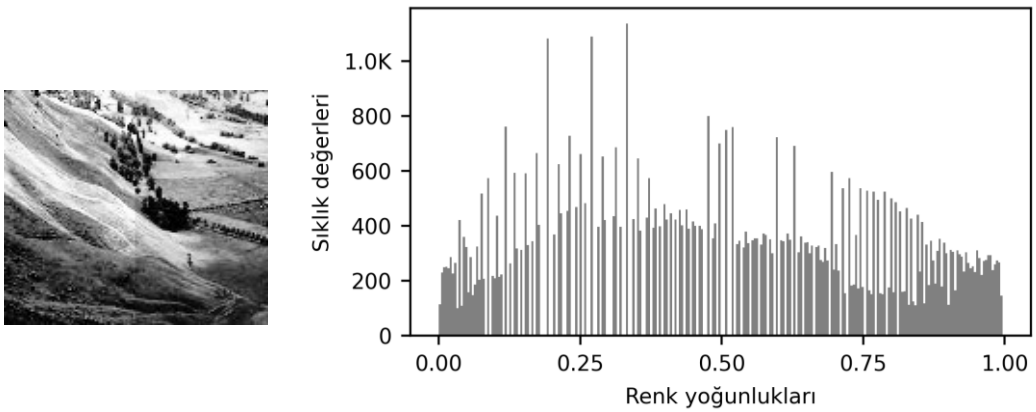


(a) (b)

Şekil 24. WMSHE uygulanmış görüntü ve histogramı

1.4.7. Yinelemeli Ayrılmış ve Ağırlıklı Histogram Eşitleme (RSWHE)

Yinelemeli Ayrılmış ve Ağırlıklı Histogram Eşitleme (RSWHE), BBHE, DSIHE ve WMSHE yöntemlerinin birleşiminden türetilmiş bir histogram eşitleme yöntemidir. Görüntünün histogramı yine parçalara ayrılır ancak diğer yöntemlerin aksine histogram iki veya daha fazla parçaya ayırılır ve her parçaya HE yerine WHE uygulanır. Burada ikiye ayırma işlemi rekürsif olarak ağaç yapısı oluşturacak şekilde gerçekleştirilir. Yani görüntünün histogramı iki parçaya ayrıldıktan sonra her ayrılan parça tekrar iki parçaya ayrılır. Ayrılan her parçaya WHE uygulanması, nadir veya sık bulunan piksel bilgilerini yoğunluklarına göre düzenlemeyi sağlamaktadır (Şekil 25).



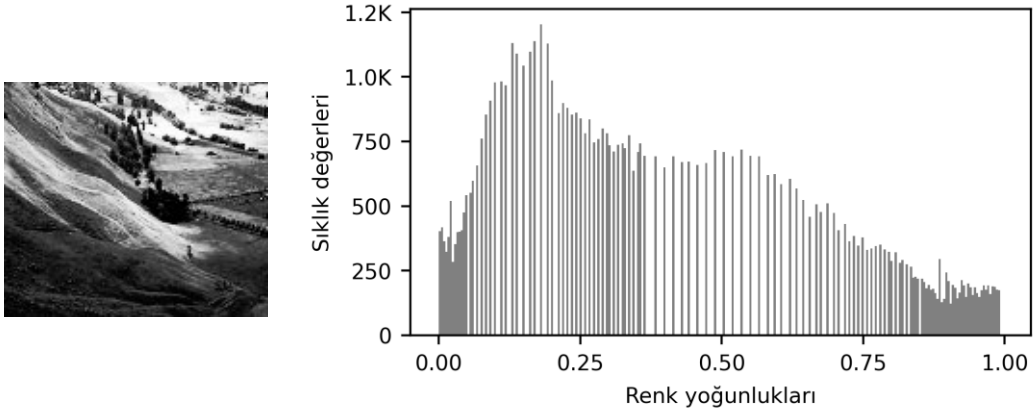
(a) (b)

Şekil 25. RSWHE uygulanmış görüntü ve histogramı

Örneğin küçük pikseller daha büyük hale getirilir ve detay kaybı önlenmiş olur. Her parçaya ayrı eşitleme uygulaması parça içinde kontrastı düzenlerken, görüntünün tamamında parlaklığı korur. Görüntü histogramının parçalara ayrılmasını durdurmak için durdurma kriteri araştırmacı tarafından belirlenir. Önceden belirlenen adım sayısına ulaşıldığında, artık kontrast iyileştirmesi gerçekleşmediğinde ya da piksel sayısı bölünmesi zor ve gürültüyü artıracak miktarda olduğunda ikiye ayırma durdurulabilir. Bu yöntem diğer yöntemlere göre daha iyi performans göstermektedir ancak rekürsif yapıda olmasından dolayı hesaplama karmaşıklığı yüksektir (Rahman, Rahman, Hussain, Khaled, & Shoyaib, 2014; Kim & Chung, 2008).

1.4.8. Yinelemeli Ortalama ile Ayrılmış Histogram Eşitleme (RMSHE)

RSWHE yönteminde olduğu gibi diğer yöntemlerin birleşiminden oluşan Yinelemeli Ortalama ile Ayrılmış Histogram Eşitleme (RMSHE) yöntemi, RSWHE mantığı ile çalışmaktadır. Farklı olarak burada görüntünün histogramı ikiye ayrılırken eşik değeri olarak ortalama kullanılır ve işlem rekürsif olarak devam eder. RSWHE' den farklı olarak döngünün durdurulması için derinlik değeri (r) kullanılır ve alt histogram derinliği 2^r'ye ulaştığında durdurulur. Parçalara ayırma işlemi tamamlandıktan sonra her parçaya HE uygulanır. RMSHE ile RSWHE yöntemi karşılaştırıldığında esnekliğinden dolayı RSWHE yöntemi daha kullanışlı bir yöntemdir (Şekil 26) (Kim & Chung, 2008).

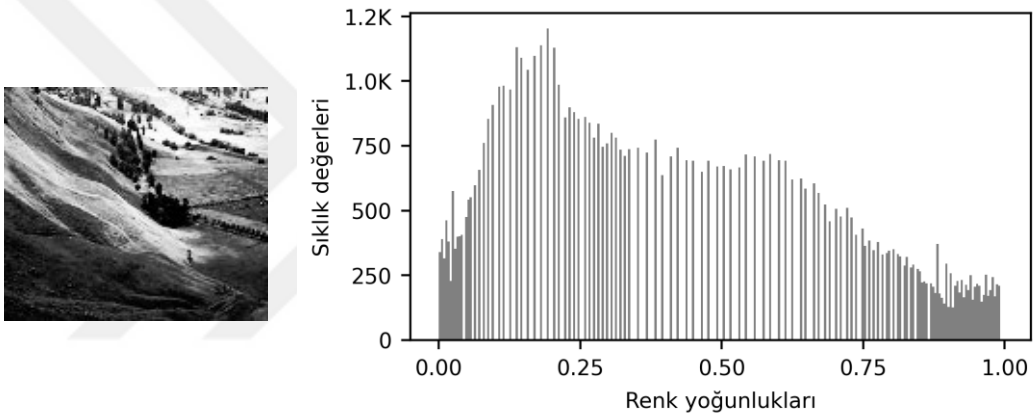


(a) (b)

Şekil 26. RMSHE uygulanmış görüntü ve histogramı

1.4.9. Yinelemeli Alt Görüntü Histogram Eşitleme (RSIHE)

Yinelemeli Alt-Görüntü Histogram Eşitleme (RSIHE) yöntemi, RSWHE ve RMSHE yöntemleri gibi rekürsif bir algoritmadır ve histogramı alt parçalara ayırıp ağaç yapısı oluşturularak ilerler. Durdurma kriteri ve algoritması RMSHE ile aynıdır ancak eşik değeri için ortanca kullanılmaktadır. Ortalama ile yapılan ayrımlarda gözlemler aykırı değerlerden etkilenmektedir. Ancak ortanca aykırı değerlerden ortalamaya göre daha az etkilendiği için RMSHE yöntemine göre daha etkili sonuçlar vermektedir ve RMSHE genel parlaklığı korumada daha etkili iken, RSIHE kontrast artırımını daha dengeli gerçekleştirmektedir (Şekil 27) (Kim & Chung, 2008).



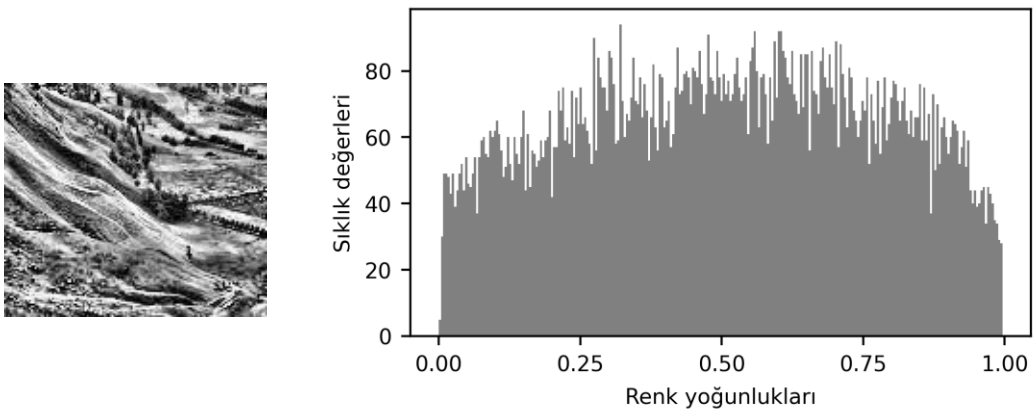
(a) (b)

Şekil 27. RSIHE uygulanmış görüntü ve histogramı

1.4.10. Kontrast Sınırlı Uyarlanabilir Histogram Eşitleme (CLAHE)

Uyarlanabilir Histogram Eşitleme (AHE), HE kullanılarak türetilmiş ve yerel kontrast iyileştirmesi gerçekleştiren bir yöntemdir. HE tüm görüntüye aynı anda histogram eşitleme uygularken, AHE görüntüye ait piksel matrisini daha küçük matrislere ayırır ve her parçaya birbirinden bağımsız HE uygular. Ancak görüntüde gürültülü bölge bulunması durumunda, parça parça işlem yapılması ve bu işlemlerin birbirinden bağımsız gerçekleştirilmesi mevcut gürültünün artmasına sebep olabilmektedir (Pizer, ve diğerleri, 1987; Zimmerman, ve diğerleri, 1988). Bu problemi önleyebilmek amacıyla Kontrast Sınırlı Uyarlamalı Histogram Eşitleme (CLHE) yöntemi önerilmiş ve bu yöntem için bir sınır değeri tanımlanmıştır. Söz konusu sınır değeri, piksel yoğunluklarının frekans bilgisine karşılık gelmektedir. Histogram

eşitleme işleminin ardından, frekansı bu sınır değerini aşan piksel gruplarının fazla kısımları komşu aralıklara eşit biçimde dağıtılır (Zhu, Chan, & Lam, 1999). Kontrast Sınırlı Uyarlanabilir Histogram Eşitleme (CLAHE) yöntemi, AHE ve CLHE yaklaşımlarının birleşiminden oluşmaktadır. CLAHE yönteminde, görüntüye ait piksel matrisi belirli bir n×n boyutuna sahip alt bloklara ayrılmaktadır. Her bir blok için HE işlemi bağımsız olarak uygulanır. Bu işlemin ardından, bloklar arasında oluşabilecek keskin geçişleri önlemek amacıyla interpolasyon yöntemiyle birleştirme ve yumuşatma işlemleri gerçekleştirilir. AHE yönteminden farklı olarak CLAHE yönteminde kontrast iyileştirmesi sürecine bir sınır değeri dâhil edilmiştir. Bu sınır, piksellerin bireysel değerlerinden ziyade, histogram üzerindeki frekans dağılımlarını esas alır. Böylece yüksek frekansa sahip piksellerin, kontrast artırma işlemi sırasında aşırı baskın hâle gelmesi engellenir. Sınır değerinin seçimi yöntemin başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Sınır değeri çok yüksek seçildiğinde, görüntüdeki gürültü de kontrastla birlikte artar ve görüntü kalitesi düşer. Sınır değeri çok düşük seçildiğinde ise kontrast iyileştirme performansı azalır ve ayrıntı kaybı meydana gelir. Bu nedenle, sınır değeri belirlenirken görüntünün karakteristiği dikkate alınmalıdır. Örneğin, gürültüsüz ve net görüntülerde daha yüksek sınır değerleri tercih edilebilirken, gürültü oranı yüksek görüntülerde daha düşük sınır değerleri kullanılmalıdır. Sınır değeri aşıldığında, ilgili histogram aralığındaki frekanslar kesilir ve aşan kısım komşu aralıklara eşit veya ağırlıklandırılmış şekilde dağıtılır (Şekil 28). Bu dağıtım işleminin ardından normalizasyon uygulanır ve böylece görüntünün kontrastı kontrollü bir biçimde artırılmış olur (Sahu, Singh, Ghrera, Elhoseny, & Sahu, Sima, 2019).

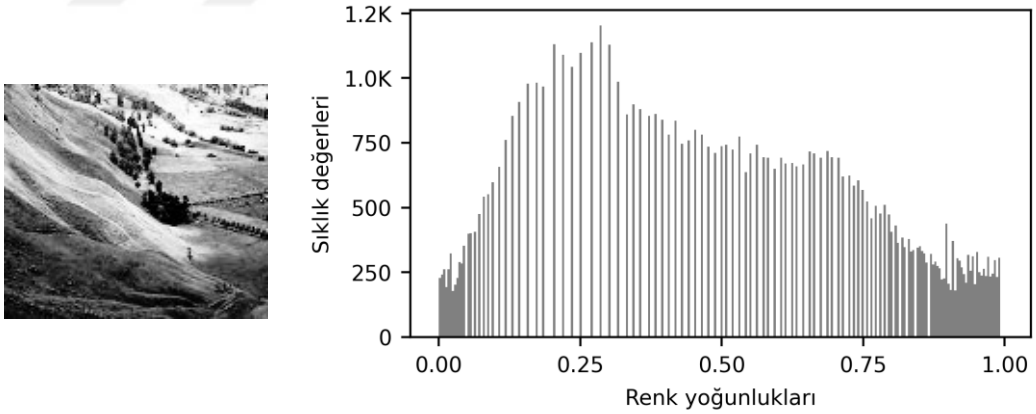


(a) (b)

Şekil 28. CLAHE uygulanmış görüntü ve histogramı

1.4.11. Dinamik Histogram Eşitleme (DHE)

Kontrast iyileştirmesi için geliştirilen Dinamik Histogram Eşitleme (DHE), yerel bir yöntemdir. Histogramın tamamında eşitleme yapmak yerine histogramı dinamik alt parçalara ayırır. Ayırma işlemini kendisi görüntü üzerinde değil, histogram üzerinde gerçekleştirir. Görüntünün histogram dağılımında baskın olan bölgeler alt histogram oluşturmak için kullanılır. Böylece baskın olan bölgeler tespit edilerek baskınlığı azaltılmış olmaktadır. Yani yapılan bu işlem histogramın ağırlıklandırılarak şekillendirilmesi olarak adlandırılabilir. Parçalama işlemi yapıldıktan sonra her parçaya birbirinden bağımsız HE uygulanır ve bütünlüğün sağlanması amacıyla normalizasyon uygulanarak parçalar birleştirilir. Bu yöntemin avantajı, dinamik olmasıdır. Yani parçalara ayırırken her parçayı kendi içinde inceleyip, parçanın özelliklerine göre işlem yapmasıdır. Bu yöntemi diğerlerinden ayıran bir özelliği ise baskın bölgelerden ayırma işlemi yaptığı için, aydınlık ve karanlık yerleri doğru tespit edebilmesidir (Şekil 29). Dolayısıyla CLAHE ve DHE karşılaştırıldığında, CLAHE kontrollü bir şekilde, DHE bölgeye göre dinamik bir şekilde gerçekleştirir (Abdullah-Al-Wadud, Kabir, Dewan, & Chae, 2007).



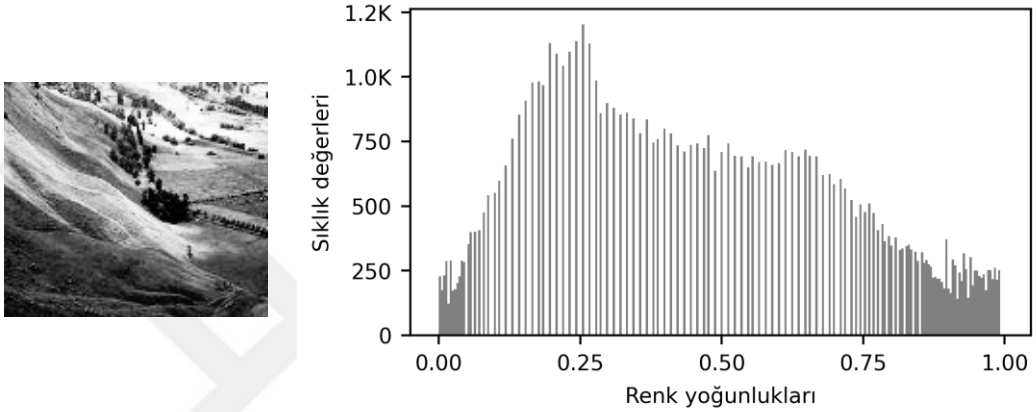
(a) (b)

Şekil 29. DHE uygulanmış bir görüntü ve histogramı

1.4.12. Çoklu Tepe Noktalı Histogram Eşitleme (MPHE)

Bir görüntünün histogramında tepe noktalar çok aydınlık ya da çok karanlık yerleri temsil eder. Bu özellikler kontrastı etkileyen özelliklerdir. Bir görüntüde bunların hepsi aynı anda bulunursa klasik histogram eşitleme yöntemleri (HE, AHE gibi) yetersiz

kalabilmektedir. Bunun için tepe noktaların türevsel yöntemler kullanılarak yerlerinin tespit edilmesiyle, bölgeye göre işlem yapabilen Çoklu Tepe Noktalı Histogram Eşitleme (MPHE) geliştirilmiştir. MPHE yöntemi, diğer yöntemler gibi histogramı alt parçalara ayırmaktadır ancak diğer yöntemlerden farklı olarak histogramı tepe nokta sayısı kadar alt histogramlara ayrıştırır ve her bir alt histograma HE uygular. Eşitleme bittikten sonra görüntüyü birleştirir ve kontrast iyileştirilmesi gerçekleşmiş bir görüntü elde eder (Şekil 30) (Chen, 2012).



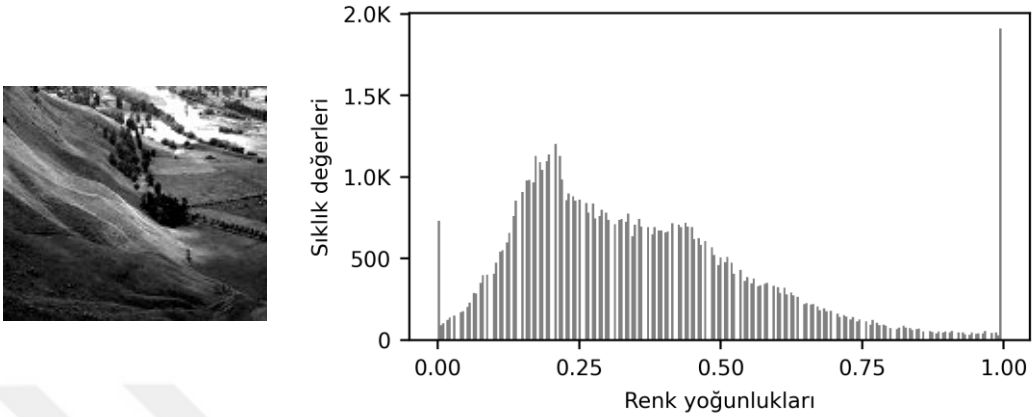
(a) (b)

Şekil 30. MPHE uygulanmış görüntü ve histogramı

1.4.13. İnsan Görsel Sistemi Tabanlı Histogram Eşitleme (HVS_HE)

Kontrast iyileştirmesi sırasında, HVS'nin en iyi algılayabileceği kontrast düzeyine ulaşması amaçlanır. Bu sebeple kontrast iyileştirmesi için sık sık yeni yöntemler önerilmektedir. Bunlardan birisi ise İnsan Görsel Sistemi Tabanlı Histogram Eşitleme (HVS_HE) yöntemidir. İnsan gözü parlaklık ve ışığa hassasiyet gösterdiği için, ışığın çok olduğu yani parlaklığın fazla olduğu yerlerde ve ışığın az yani parlaklığın düşük olduğu yerlerde detay kaybı yaşayabilmektedir. Bu yöntem HVS kullanarak geliştirilmiştir. Görüntüdeki parlaklık bilgisi ortalama, varyans gibi araştırmacının tercih ettiği yöntemle belirlendikten sonra, düşük parlaklık, orta parlaklık ve yüksek parlaklık bölgeleri ayrılır. Daha sonra her bölgeye ayrı ayrı HE uygulanarak kontrast iyileştirmesi gerçekleştirilir. Daha sonra her parça birleştirilir ve keskin geçişleri önlemek amacıyla maskeleme, filtreleme, interpolasyon gibi yöntemlerle yumuşatma işlemi uygulanır. Kontrast iyileştirmesi gerçekleşirken parlaklık korunmaktadır ve HVS kullanıldığı için insan gözüne yakın

görseller elde edilmektedir (Şekil 31). İşlem yoğunluğu diğer yöntemlere göre daha karmaşıktır (Lu, Zhou, Panetta, & Agaian, 2010; Wharton, Panetta, & Agaian, 2007).

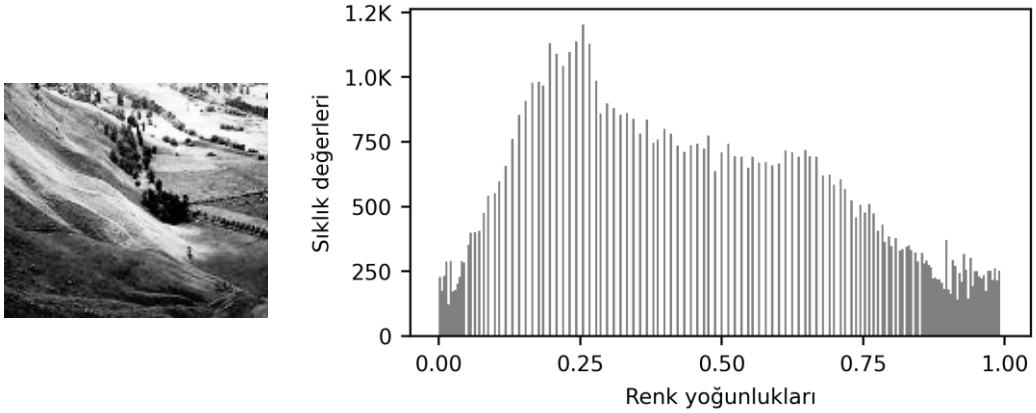


(a) (b)

Şekil 31. HVS_HE uygulanmış görüntü ve histogramı

1.4.14. Taban (Plato) Sınırlı Histogram Eşitleme (PLHE)

Görüntüde mevcut olan gürültü bileşenleri, uygulanan iyileştirme işlemleri sırasında da büyük ölçüde korunmakta ve bu nedenle iyileştirilmiş görüntüde de gürültü probleminin devam etmesine yol açmaktadır. Görüntü histogramında çok yüksek olan yerleri keserek azaltan Taban (Plato) Sınırlı Histogram Eşitleme (PLHE) yöntemi, aşırı kontrastı ve gürültüyü önleyerek işlem yapar. Histogram ortalaması ya da ortancayı eşik değeri olarak kullanılabilir. Bu parametreler haricinde araştırmacı başka bir parametreyi de eşik olarak seçebilmektedir ve bu eşiğe Plato Limit adı verilmektedir. Piksel değerlerinin frekansı limit değerini geçiyorsa piksel değerleri limite eşitlenir ve kesilen pikseller histogramdaki diğer piksellere eşit veya ağırlıklandırılmış şekilde paylaştırılarak plato (düz) bölgeler oluşturulur. PLHE algoritması sona erdiğinde elde edilen son piksellerin kümülatif dağılım bilgisi kullanılarak histogram eşitleme işlemi tamamlanmaktadır (Şekil 32) (Singh, Sahil, Kumar, & Singh, 2023).



(a) (b)

Şekil 32. PLHE uygulanmış görüntü ve histogramı

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın amacı, kontrast iyileştirmesinde yaygın olarak kullanılan histogram eşitleme yönteminin neden olabileceği olası sorunların giderilmesine yönelik yeni bir yöntem önermektir. Histogram eşitleme ile, görüntünün renk değerlerinin düzgün dağılıma yaklaştırılmasıyla homojen dağılması sağlanır. Böylece görüntüde iyileştirme elde edilmiş olur. Ancak, bazı görüntülerin histogramında belli bir noktaya çok fazla yığılıp diğer yerlerde boşluklar olursa, histogram eşitleme görüntüde istemeyen bozulmalara neden olabilir. Bu bozulmalar özellikle iç aykırı ve dış aykırı değerin yoğun olduğu görüntülerde söz konusudur. Bu çalışmada istenmeyen bozulmaları önlemek için kontrollü histogram eşitleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu amaçla Simetrik Histogram Eşitleme (SHE) ve Esnek Histogram Eşitleme (SOHE) yöntemleri önerilmiştir. Önerilen yöntemlerin temel amacı, histogram eşitlemenin tüm görüntü bölgelerine aynı ölçüde müdahale etmesi sonucu ortaya çıkan dengesiz ve kontrolsüz kontrast artışını azaltarak daha dengeli bir iyileştirme sağlamaktır.

2.1. Simetrik Histogram Eşitleme (SHE)

Histogram eşitleme işlemi sırasında, görüntüde yoğun biçimde kümelenmiş gri seviye değerlerinin bulunması histogramın belirli bölgelerinde frekansların yığılmasına neden olmaktadır. Bu yığılmayı gidermek amacıyla histogram eşitleme yöntemi, söz konusu yoğunluk aralıklarını daha geniş bir dinamik aralığa yayarak histogramı düzleştirmeyi hedeflemektedir. Ancak bu yeniden dağıtım süreci, düşük frekanslı bölgeler ile yüksek frekanslı bölgelerin birbirine yaklaşmasına ve bazı aralıklarda üst üste binmesine yol açabilmektedir. Bu durum, ilgili bölgelerde kontrastın azalmasına neden olurken, özellikle yüksek frekanslı komşu gri seviyelerin aşırı biçimde ayrılması renkler arasındaki doğal geçişlerin bozulmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak histogram eşitleme, kontrastı küresel olarak artırsa da yerel düzeyde uyumsuzluk ve yapay görünüm oluşturabilmektedir (Wong vd., 2016). Bu sebeple geliştirilen yöntemler parlaklık, komşuluk uyumluluğu gibi bozulmaları göz önünde bulundurarak, dengeli kontrast artışını hedeflemektedir. Bu bölümde, bu amaçla önerilen Simetrik Histogram Eşitleme (SHE) yöntemi açıklanacaktır.

Simetrik histogram, histogramda seçilen bir simetri noktasının sol tarafı sağ tarafına, sağ tarafı da sol tarafına göreceli olarak eklenerek elde edilen bir histogramdır. Bu histogram yardımıyla yapılan histogram eşitlemeye ise Simetrik Histogram Eşitleme adı verilmiştir. Simetrik histogram kullanmak, görüntünün histogramında mevcut düşük frekanslı bölgelerin yüksek frekanslı bölgeler tarafından bastırılmamasını ve görüntünün komşuluk bilgilerinin korunmasını sağlamaktadır. Simetri noktası üç farklı yöntemle belirlenmektedir. Simetri noktası belirlendikten sonraki süreç, HE yöntemi ile aynı şekilde ilerler. Renk değerlerinin frekansı f_i olarak ifade edildiğinde, SHE yöntemi bu aşamada HE 'den ayrılmaktadır.

2.1.1. Gerçek Ortancayla Simetrik Histogram Eşitleme

Gerçek ortanca ile gerçekleştirilen SHE, görüntünün histogramına ait ortancayı kullanmaktadır. Ortanca, bir veri dizisindeki elemanlar sıraya dizildiklerinde dizinin ortasında kalan elemandır ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla elde edilmektedir.

$$m = \begin{cases} (I_k + I_{k+1})/2, & k = \mathrm{n}/2\ (Çift) \\ I_k, & k = (\mathrm{n}+1)/2\ (Tek) \end{cases} \tag{25}$$

SHE yöntemi, görüntüye ait ortanca değerini belirledikten sonra, görüntünün renk değerlerine ilişkin simetrik değerlerini aşağıdaki gibi elde etmektedir.

$$f_i' = f_{2m-i} \tag{26}$$

Elde edilen simetrik değerler, yeni frekanslar elde edebilmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu sebeple eski frekanslar üzerine simetrik değerler eklenerek yeni SHE frekansları;

$$f_i^* = f_i + f_{2m-i} \tag{27}$$

eşitliği ile elde edilmektedir. Frekanslar elde edildikten sonra geriye kalan kısımlar HE ile aynıdır. Yani yeni frekanslar elde edildikten sonra gerçekleşecek adımlar HE adımlarıdır. Daha net olması için SHE algoritması Algoritma 2'de verilmiştir.

Algoritma 2. Simetrik histogram eşitleme algoritması

Adım 1. Her piksel değeri için sıklıklar aşağıda verilen şekilde hesaplanır.

$$f_i = \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} \delta(I(x,y) - i), \quad (i = 0,1,2,\dots,L) \tag{28}$$

Buradaki $\delta(t)$ fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$\delta(t) = \begin{cases} 1, t = 0 \\ 0, t \neq 0 \end{cases} \tag{29}$$

Adım 2. Görüntünün ortancası Eşitlik (25) ile elde edilir. Elde edilen ortanca değeri kullanılarak, sıklıkların simetrik değerleri Eşitlik (26) ile bulunur.

Adım 3. Elde edilen simetrik sıklık değerleri, Eşitlik (27) ile yeni sıklık değerlerini elde etmek için kullanılır. Hesaplanan simetrik sıklıkların birikimli sıklıkları;

$$s_i = \sum_{k=0}^{i} f_k^* \tag{30}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Adım 4. Birikimli sıklıklar, en büyük birikimli sıklık değerine (toplam piksel sayısına) bölünerek göreli sıklıklar aşağıda verilen eşitlik yardımıyla elde edilir.

$$p_i = \frac{s_i}{s_L} \tag{31}$$

Adım 5. Göreli sıklık değerleri en büyük renk değeriyle çarpılarak yeni renk değerleri;

$$F_i = L.p_i \tag{32}$$

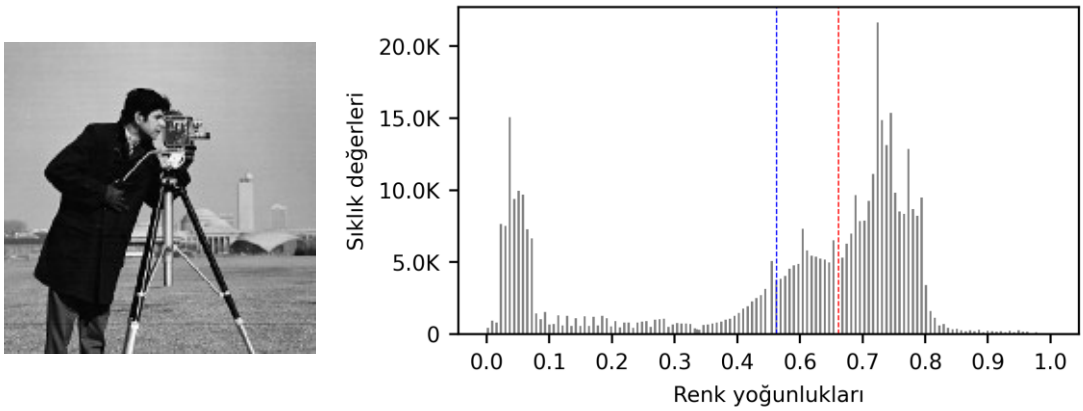
olarak elde edilir.

Adım 6. Görüntüdeki renk değerleri kendilerine karşılık gelen yeni renk değeri ile yer değiştirilerek işlem tamamlanır (Eşitlik (33)).

$$J(x,y) = F\big(I(x,y)\big) \tag{33}$$

Burada I giriş görüntüsünün (x, y) renk değerini temsil ederken, J ise aynı konumdaki çıkış görüntüsünü temsil etmektedir. Görüntüde kullanılan renk değerleri tam sayı olup, histogram eşitleme işlemi sırasında ortaya çıkan küsuratlı yeni değerler yuvarlanarak tam sayıya çevrilir ve histogram eşitleme tamamlanır.

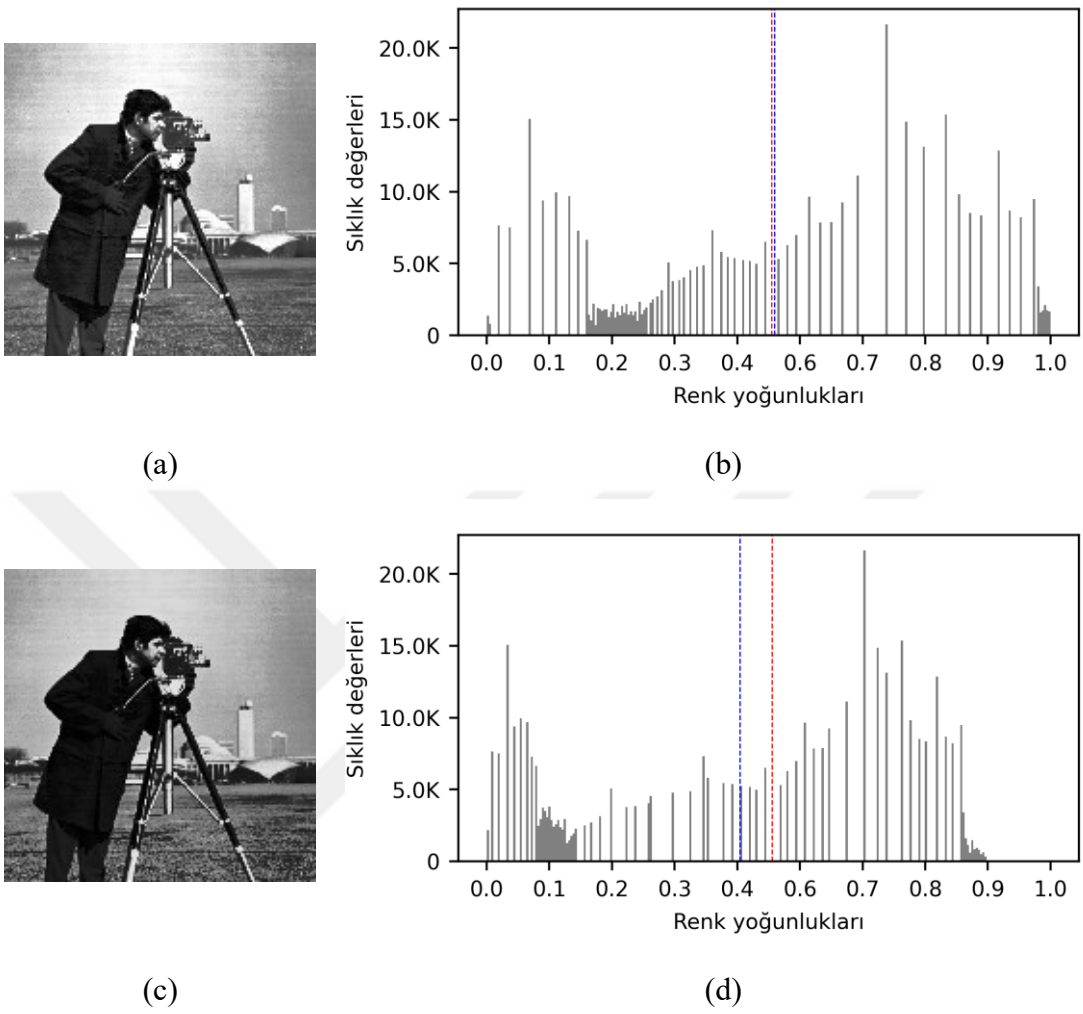
Şekil 33a'da histogram özgün görüntü Şekil 33b'de görülen kırmızı kesikli çizgi, giriş görüntüsünün piksel yoğunluk dağılımına ait ortanca değerini, mavi kesikli çizgi ise giriş görüntüsünün piksel yoğunluk dağılımına ait ortalamayı temsil etmektedir. Ortalama değerinin ortancadan daha solda konumlanması, yoğunluk dağılımının düşük gri seviye değerlerine doğru sola çarpık (negatif çarpıklık) bir yapı sergilediğini göstermektedir. Bu durum, görüntüde az sayıda fakat çok düşük yoğunluklu piksellerin ortalama değeri aşağı çektiğini, buna karşın piksellerin büyük bölümünün daha yüksek yoğunluk düzeylerinde toplandığını ifade etmektedir. Ortancanın ortalamadan daha yüksek olması, görüntünün genel parlaklık yapısının orta–yüksek seviye tonlara baskın olduğunu ve karanlık bölgelerin istatistiksel etkiyi sınırlı ölçüde değiştirdiğini ortaya koymaktadır.



(a) (b)

Şekil 33. Orijinal görüntü ve histogramı

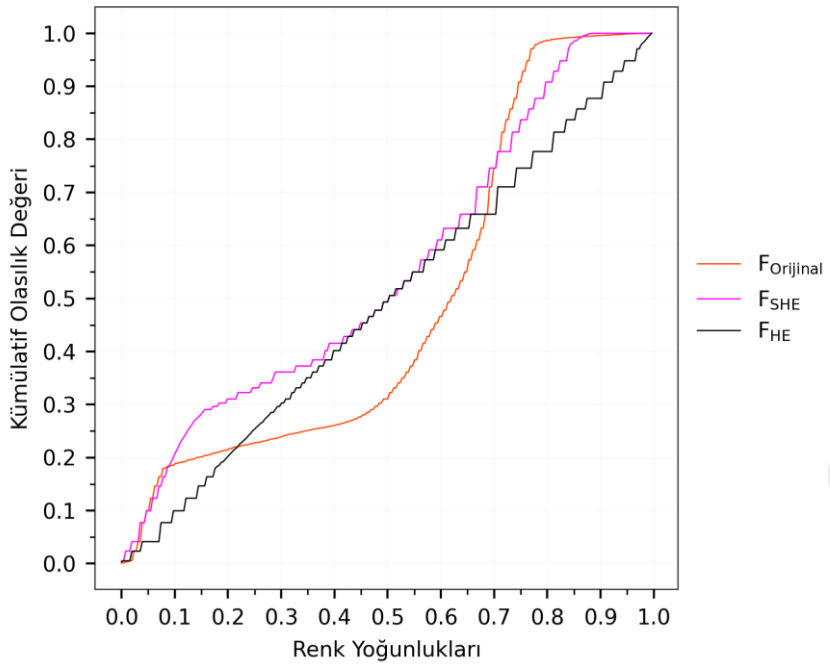
İlgili görüntüye HE ve SHE yöntemleri uygulanmış olup, elde edilen çıktılar aşağıda karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 34. SHE ve HE yönteminin karşılaştırılması; (a, b) HE yönteminin uygulanması ve histogramı; (c, d) SHE yönteminin uygulanması ve histogramı

Şekil 34'te ki histogramlar, uygulanan HE ve SHE kontrast iyileştirme yöntemlerinin piksel yoğunluk dağılımını nasıl dönüştürdüğünü göstermektedir. Ortanca çizgisi, histogramın simetri durumu, tonların yoğunlaşma eğilimi ve görüntüdeki genel parlaklık dengesinin anlaşılması açısından kritik bir referans noktasıdır. Histogram eşitleme yöntemi ile elde edilen sonuçlar Şekil 34a ve Şekil 34b görsellerinde verilmiştir. Bu yöntemde histogram tüm gri seviye aralığına mümkün olduğunca eşit yayılmaya zorlandığından ortanca değerin konumu görüntüdeki gerçek ton dağılımını temsil etmekten uzaklaşabilmektedir. Şekil 34b'de yer alan histogram incelendiğinde, ortancanın bulunduğu noktada çevresel yoğunluk değişimleri düzensizdir; HE yoğunluk bilgilerini bütüncül olarak gerdiği için ortanca çizgisinin iki tarafı arasında aşırı oynamalar gözlenmektedir. Bu durum

görüntüdeki tonal yapının bozulmasına ve bazı bölgelerde doğal olmayan kontrast etkilerine yol açmaktadır. Önerilen yöntemde elde edilen sonuçlar ise Şekil 34c ve Şekil 34d görsellerinde görülmektedir. Bu yöntemin en dikkat çekici yanı, histogramın tamamen düzleştirilmesi yerine ton dağılımının daha kontrollü biçimde yeniden şekillendirilmesidir. Bu durum yöntemin görüntünün orta tonlarını koruduğunu, aşırı parlama veya gölge kaybı yaratmadan kontrastı iyileştirdiğini göstermektedir. Gerçek ortancayla gerçekleştirilen SHE yönteminin kümülatif birikimli dağılım üzerindeki etkisi ise Şekil 35'te verilmektedir.

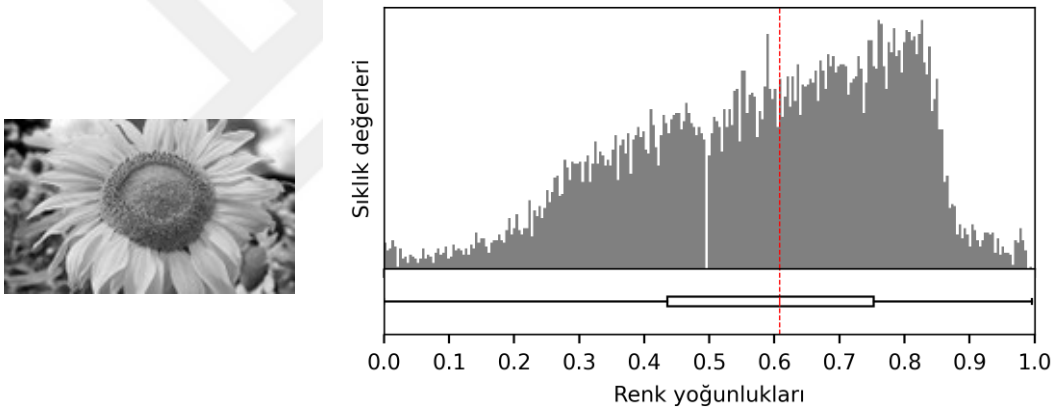


Şekil 35. Orijinal, HE ve SHE uygulanmış görüntülere ait kümülatif dağılım fonksiyon eğrileri

Şekil 35 incelendiğinde, orijinal görüntüye ait eğri (turuncu), yoğunluk değerlerinin belirli aralıklarda yoğunlaştığını ve tüm aralığa homojen dağılmadığını ortaya koymaktadır. HE sonrası elde edilen kümülatif dağılım fonksiyon eğrisinin daha doğrusal bir yapıya yaklaşması, gri seviye dağılımının tüm değer aralığına daha dengeli yayıldığını ve kontrastın artırıldığını göstermektedir. SHE yöntemi ise yoğunluk dağılımını kısmen düzenlerken, orijinal görüntünün yapısal karakteristiklerini daha fazla koruyan bir dönüşüm sağlamıştır. Bu durum, SHE yönteminin detay kaybını sınırlarken kontrast iyileştirme sağladığını, HE'nin ise daha agresif bir yeniden dağılım gerçekleştirdiğini ortaya koymaktadır.

2.1.2. Kaydırmalı Ortancayla Simetrik Histogram Eşitleme

HE ve HE kullanılarak geliştirilen yöntemler, görüntünün ortancasını eşitleme yardımıyla $L/2$ renk değerine getirir ve geriye kalanlar için dengeli bir dağıtım sağlar. Ancak görüntü ortancasının her zaman $L/2$ renk değerine denk gelmesi, belirli bölgelerde yoğun renk değerlerine sahip bir görüntüde parlaklık bozulmaları gibi bozulmalara sebep olmaktadır. Bu bozulmalardan önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Gerçek ortancayla gerçekleştirilen SHE, görüntünün ortancasını $L/2$ renk değerine getirip simetrik değerler üreterek histogram eşitleme yaparken, $L/2$ renk değerinin etrafında simetrik değerler elde ederek dengeli bir şekilde dağıtım yapmayı amaçlamaktadır. Değişen ortalama ise görüntünün ortancasına dokunmayarak, araştırmacıya simetrinin uygulanacağı ortanca noktasını seçme imkânı sunmaktadır. Yani (25'te yer alan m değerine araştırmacı karar vermektedir.

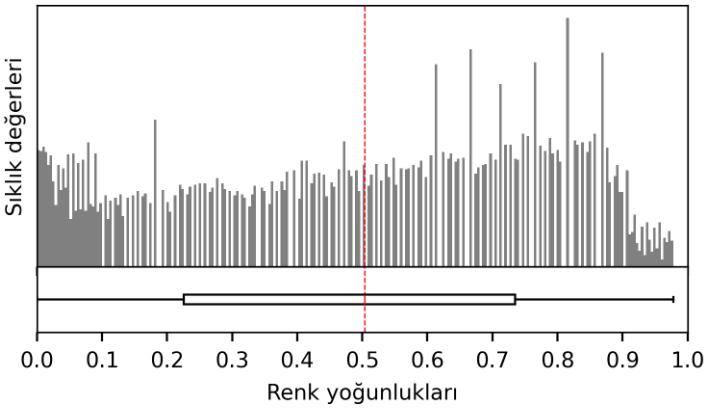


(a) (b)

Şekil 36. Örnek görüntü ve histogramı

Şekil 36'da yer alan görüntünün ortancası 0.61 olup, gerçek ortanca ile gerçekleştirilen SHE aşağıda verilmektedir. Histogram üzerinde yer alan kırmızı kesikli çizgi, görüntünün yoğunluk dağılımına ait ortanca değerini ifade etmektedir.



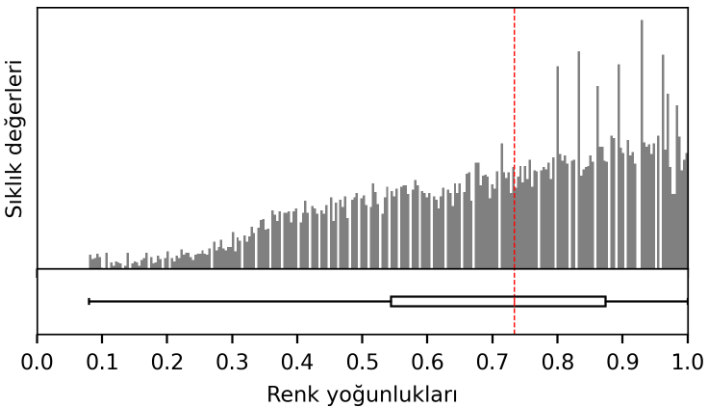


(a) (b)

Şekil 37. Gerçek ortanca ile SHE uygulanmış görüntü ve histogramı

Araştırmacı gerçek ortanca yerine değişen keyfi bir ortanca kullanarak görüntü histogramının daha yavaş ve dengeli dağılmasını sağlayabilmektedir. Bu sebeple araştırmacının doğru ortanca değeri seçmesi önemlidir. Görüntünün gerçek ortancasından daha düşük bir ortanca seçmek, görüntünün renk değerlerinin L'ye yakın konumlarında yoğunlaşmasına ve iyileştirilmiş görüntünün ortancasının 0.5'ten büyük olmasına sebep olmaktadır. Şekil 38, ortancanın gerçek ortancadan küçük (0.4) seçildiği durumda uygulanmış SHE sonuçlarını içermektedir.

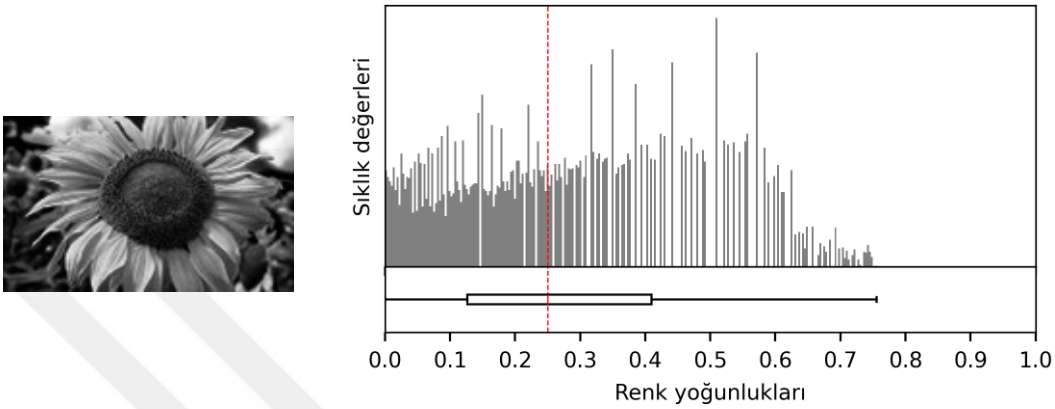




(a) (b)

Şekil 38. Düşük ortanca (0.4) ile gerçekleştirilen SHE ve histogramı

Görüntünün gerçek ortancasından daha büyük bir ortanca seçmek ise, renk değerlerinin 0'a yakın konumlarında yoğunlaşmasına ve iyileştirilmiş görüntünün ortancasının 0.5'ten küçük olmasına sebep olmaktadır. Şekil 39, ortancanın gerçek ortancadan büyük (0.8) seçildiği durumda uygulanmış SHE sonuçlarını içermektedir.



(a) (b)

Şekil 39. Yüksek ortanca (0.8) ile gerçekleştirilen SHE ve histogramı

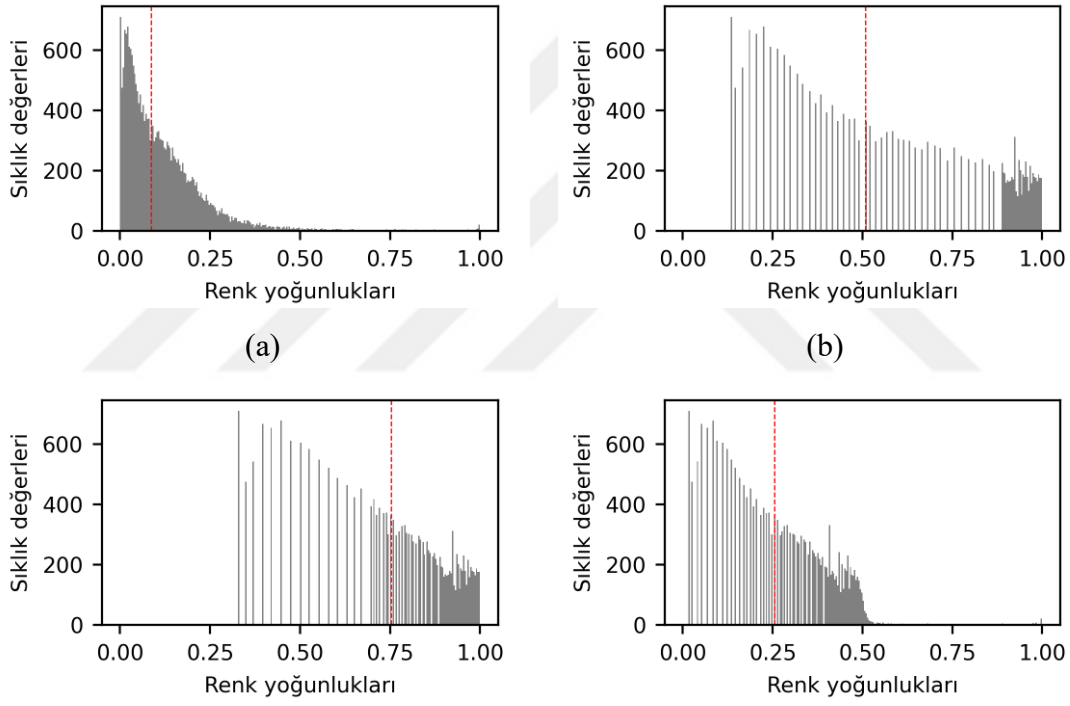
Ortanca değerinin seçimi, özellikle görüntünün karanlık ve aydınlık bölgelerinin nasıl temsil edileceği üzerinde doğrudan etkilidir. Düşük ortanca değerleri, karanlık bölgelerin baskın hale gelmesine neden olurken, aydınlık alanlardaki detayların bastırılmasına yol açabilmektedir. Buna karşılık, yüksek ortanca değerleri aydınlık bölgeleri öne çıkarırken, düşük yoğunluklu alanlardaki bilgilerin kaybolmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle ortancanın yanlış belirlenmesi, görüntünün belirli bölgelerinde kontrast kaybına veya detay yitimine yol açarak görsel algıyı olumsuz etkileyebilmektedir. Uygun ortanca seçimi ise hem karanlık hem de aydınlık bölgelerdeki yapısal bilgilerin dengeli biçimde korunmasını sağlayarak daha anlamlı ve ayırt edilebilir bir sonuç üretmektedir.

Bu bağlamda, Şekil 40 ve Şekil 41'de, karanlık bölgelerin baskın olduğu (sağa çarpık) yoğunluk dağılımına sahip görüntülerde, ortanca değerinin görüntü çıktısı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir.



(a) (b) (c) (d)

Şekil 40. Karanlık bölgenin baskın olduğu görüntü için SHE; (a) Orijinal görüntü; (b) Gerçek ortanca ile SHE (m=0.086); (c) Düşük ortanca ile SHE (m=0.03); (d) Yüksek ortanca ile SHE (m=0.5)



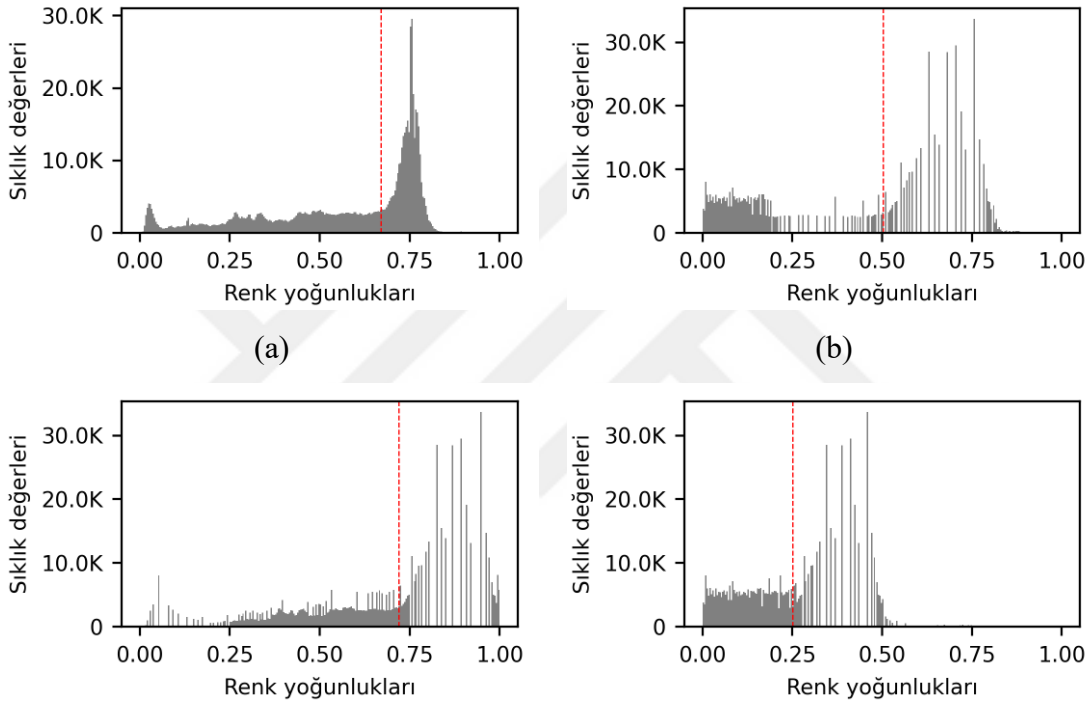
Şekil 41. Şekil 40'ta verilen görüntülerin yoğunluk dağılımlarının histogram gösterimleri

Şekil 42 ve Şekil 43'te, aydınlık bölgelerin baskın olduğu (sola çarpık) yoğunluk dağılımına sahip görüntülerde, ortanca değerinin görüntü çıktısı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir.



(a) (b) (c) (d)

Şekil 42. Aydınlık bölgenin baskın olduğu görüntü için SHE; (a) Orijinal görüntü; (b) Gerçek ortanca ile SHE (m=0.67); (c) Düşük ortanca ile SHE (m=0.4); (d) Yüksek ortanca ile SHE (m=0.8)

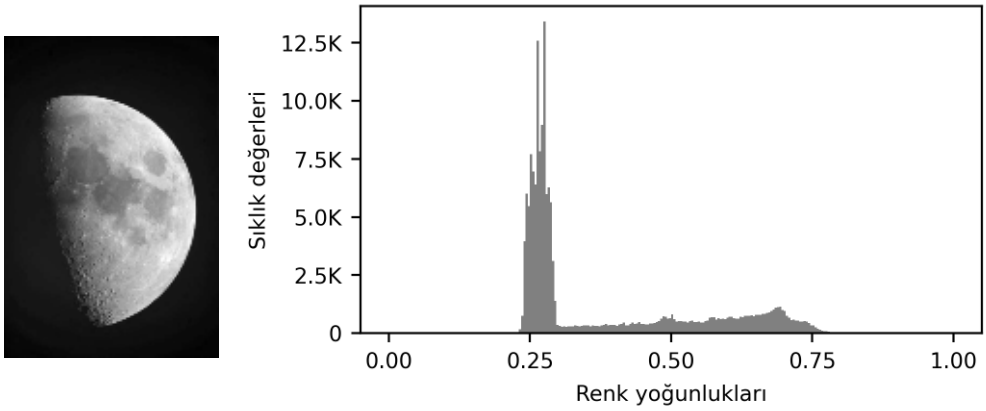


Şekil 43. Şekil 42'de verilen görüntülerin yoğunluk dağılımlarının histogram gösterimleri

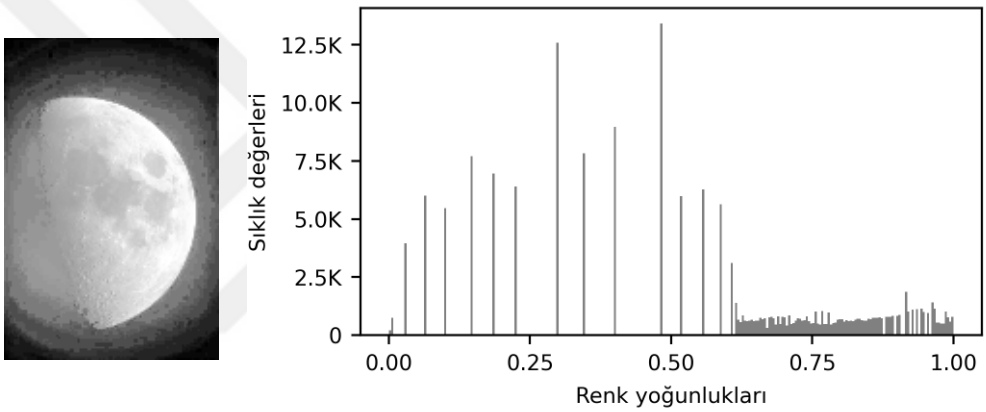
2.2. Esnek Histogram Eşitleme (SOHE)

Histogram eşitlemenin bozulmalarını gidermek amacıyla çeşitli yöntemler önerilmektedir. Bu bölümde de bu amaçla önerilen Esnek Histogram Eşitleme (SOHE) yöntemi açıklanacaktır.

HE, görüntünün tamamını aynı anda işleyerek, histogramın tamamını daha geniş aralığa yaymaktadır. Ancak yoğun bölgelerin olduğu durumlarda, histogramın tamamını daha geniş bir aralığa yaymak, yoğun bölgelerin aralarında açılmalar olmasına sebep olmaktadır ve bu durumun bir örneği aşağıda gösterilmektedir.



(a) (b)



(c) (d)

Şekil 44. Histogram eşitlemenin aralığı tamamen açma problemi

Şekil 44 incelendiğinde, histogramın aralığı tamamen açmasından kaynaklı görüntüde ortaya çıkan bozulmalar görülmektedir. Şekil 44a orijinal görüntü olup, Şekil 44b görüntünün histogramını içermektedir. İçerdiği renk yoğunlukları bakımından eksenin ortasında yoğun bir bölge var gibi görünse de 0.25 etrafında sıklık değerlerinin çok fazla olduğu ve o bölgedeki renk yoğunluklarının diğer bölgedeki renk yoğunluklarına göre daha çok olduğu görülmektedir. Şekil 44c ise HE uygulandıktan sonraki görüntü olup, Şekil 44d bu görüntünün histogramıdır. HE uygulanmış görüntünün histogramında meydana gelen açılma sonucu, görüntünün aydınlık olan renk yoğunlukları daha aydınlık hale gelmiş ve yoğun bölgelerin açılması ile görüntüde gürültü artışı oluşmuştur.

Bu probleme istinaden Esnek Histogram Eşitleme (SOHE) önerilmiştir. Bu yöntem histogramı HE gibi tamamen değil, bir yere kadar açmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla HE

tabanlı ilerleyerek, esneklik parametresi (λ) yardımıyla histogramı sınırlı şekilde geniş aralığa yaymaktadır. Yöntemin algoritması ise Algoritma 3'te verilmektedir.

Algoritma 3. Esnek histogram eşitleme algoritması

Adım 1. Her piksel değeri için sıklıklar aşağıda verilen şekilde hesaplanır.

$$f_i = \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} \delta(I(x,y) - i), \quad (i = 0,1,2, \dots, L) \tag{34}$$

Buradaki $\delta(t)$ fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$\delta(t) = \begin{cases} 1, t = 0 \\ 0, t \neq 0 \end{cases} \tag{35}$$

Adım 2. Hesaplanan sıklıkların birikimli sıklıkları Eşitlik (36) ile hesaplanır.

$$s_i = \sum_{k=0}^{i} f_k \tag{36}$$

Adım 3. Birikimli sıklıklar, en büyük birikimli sıklık değerine (toplam piksel sayısına) bölünerek göreli sıklıklar elde edilir. Göreli sıklıklar Eşitlik (37)'da verilmektedir.

$$p_i = \frac{s_i}{s_L} \tag{37}$$

Adım 4. Göreli sıklık değerleri en büyük renk değeriyle çarpılarak yeni renk değerleri elde edilir. Yeni renk değerleri Eşitlik (38)'de verilmektedir.

$$F_i = L \cdot p_i \tag{38}$$

Adım 5. Görüntüdeki renk değerleri kendilerine karşılık gelen yeni renk değeri ile yer değiştirilir (Eşitlik (39)). Buraya kadar gerçekleştirilen HE yöntemidir.

$$J(x,y) = F\big(I(x,y)\big) \tag{39}$$

Adım 6. Görüntü için optimal λ parametresi seçilir ve Eşitlik (40) yardımıyla SOHE tamamlanır.

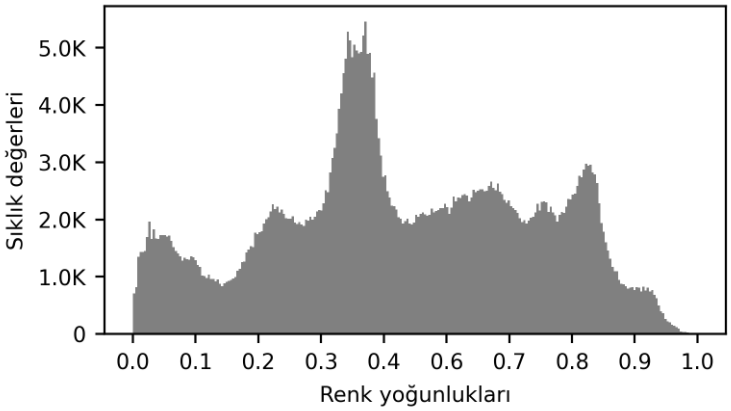
$$J_{SOHE} = I[y,x] \cdot (1-\lambda) + J[y,x] \cdot \lambda \quad (40)$$

Bu yöntem histogramı tamamen ve aniden geniş aralığa yaymak yerine, yavaş yavaş kontrolü ve sınırlı bir şekilde yayar. Görüntüde iyileştirmeler yaparken, orijinal halini unutmadan işlem yapar. Çeşitli karşılaştırma metrikleri (FSIM, NIQE, …) bunu kriter benimseyerek geliştirilmiştir. Çünkü görüntü iyileştirilirken, ortaya çıkan bozulmalar görüntüyü doğallıktan uzaklaştırabilmektedir. Bu sebeple SOHE, görüntünün piksellerini görüntüyü yapay bir hale getirerek geniş aralığa yaymak yerine, doğallıktan uzaklaşmayacak şekilde sınırlı olarak geniş bir aralığa yayar. Geniş aralığın yayılma durumunu ise seçilen λ parametresinin değeri belirler.

λ parametresinin seçimi görüntü işleme sürecinin sonucunu etkileyecektir. Bu sebeple görüntülerin özellikleri λ parametresinin seçiminde önemli rol oynamaktadır. Diğer yöntemlerde de olduğu gibi görüntünün karanlık bölgelerinin yoğunlukta olması, aydınlık bölgelerinin yoğunlukta olması veya görüntünün homojen bir dağılıma sahip olması sonucu etkileyebilmektedir. Bu durumun görüntü üzerinde gösterilebilmesi için homojen dağılıma sahip bir görüntü, karanlık bölgelerin baskın olduğu bir görüntü ve aydınlık bölgelerin baskın olduğu bir görüntü seçilmiş ve giriş görüntüsünün yoğunluk değerlerinin 0 ile 1 aralığında normalize edildiği varsayımı altında, λ parametresinin 0.2 artımlarla aldığı farklı değerlerin, çıktı görüntüsü üzerindeki etkisi incelenmiştir.

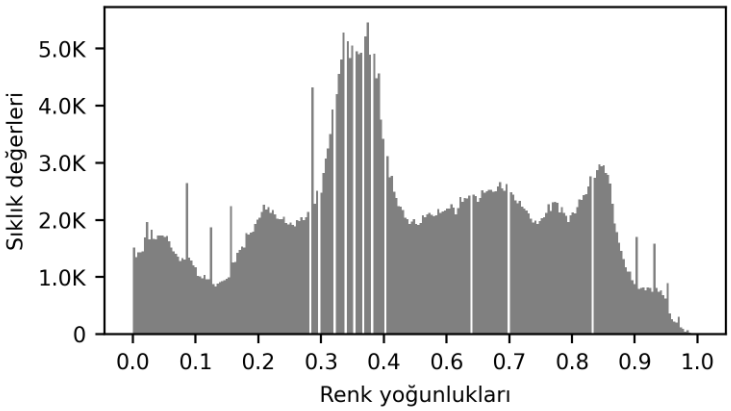
Şekil 45, Şekil 46 ve Şekil 47'de, homojen yoğunluk dağılımına sahip "Biber" görüntüsü için, parametre λ'nın etkisi gösterilmektedir.





(a) (b)

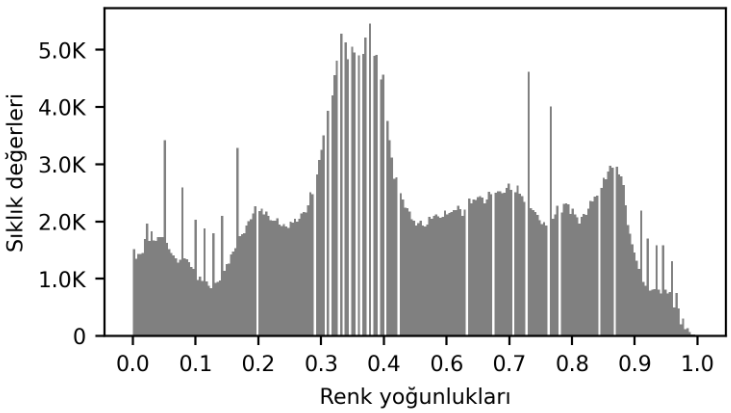




(c) (d)

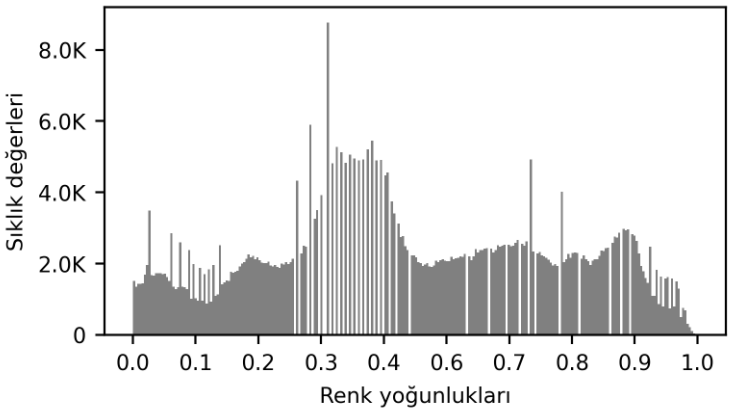
Şekil 45. Biber görüntüsü için λ parametresinin farklı değerleri için elde edilen görüntüler ve histogramları; (a,b) $\lambda = 0$ (Orijinal); (c,d) $\lambda = 0.2$





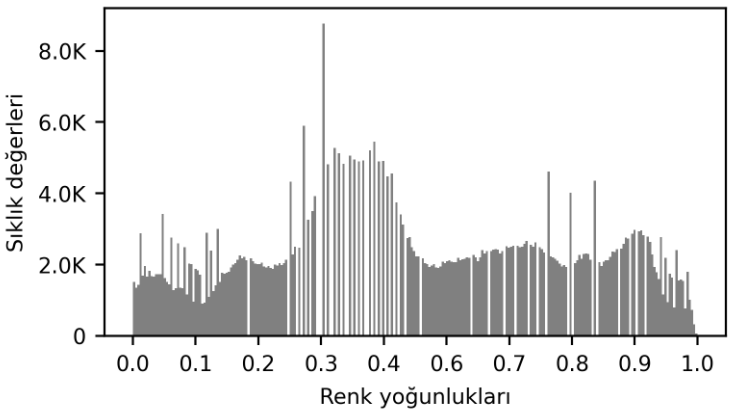
(a) (b)





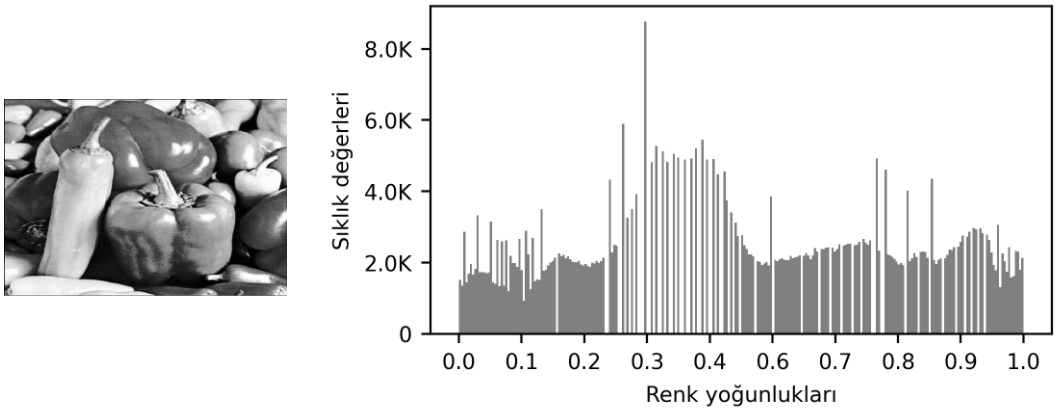
(c) (d)





(e) (f)

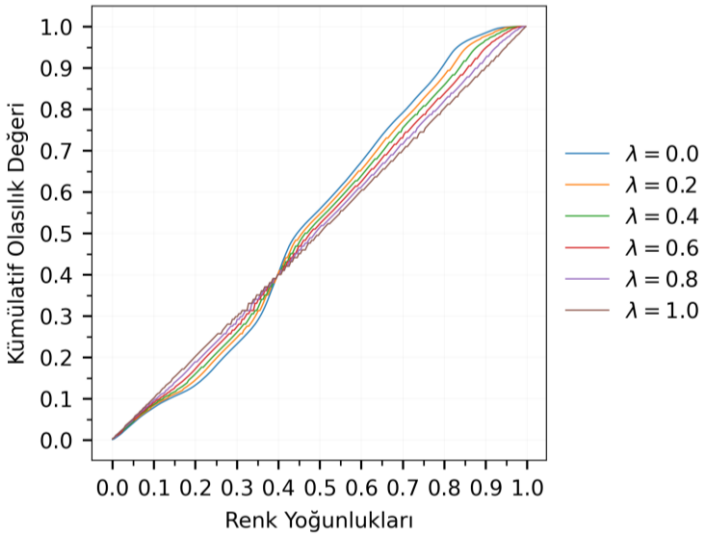
Şekil 46. Şekil 45'in devamı; (a,b) $\lambda = 0.4$; (c,d) $\lambda = 0.6$; (e,f) $\lambda = 0.8$



(a) (b)

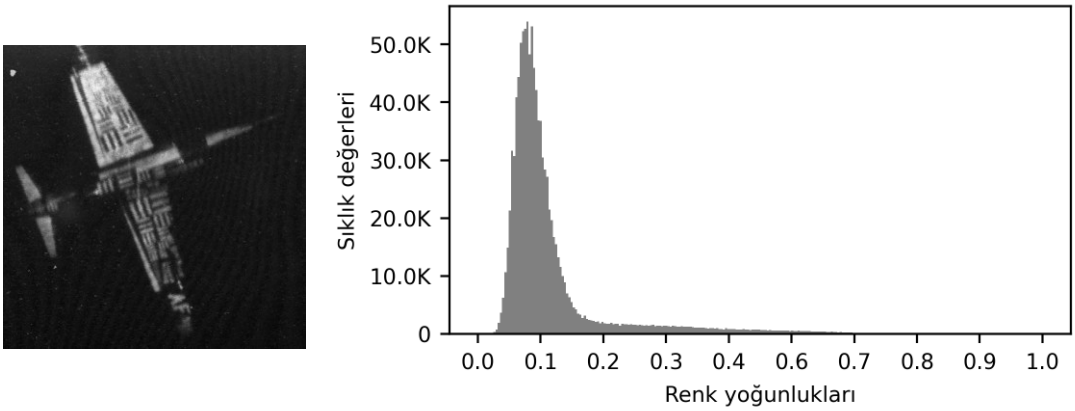
Şekil 47. Şekil 45'in devamı; (a,b) $\lambda = 1$ (HE)

Şekil 45, Şekil 46 ve Şekil 47 incelendiğinde, λ parametresinin ara değerlerinde de kabul edilebilir sonuçlar üretildiği ve klasik histogram eşitleme yönteminin de belirli durumlarda etkili olduğu gözlemlenmiştir. λ parametresine ait kümülatif birikimli dağılım fonksiyon eğrisinin değişimi ise aşağıda verilmektedir.

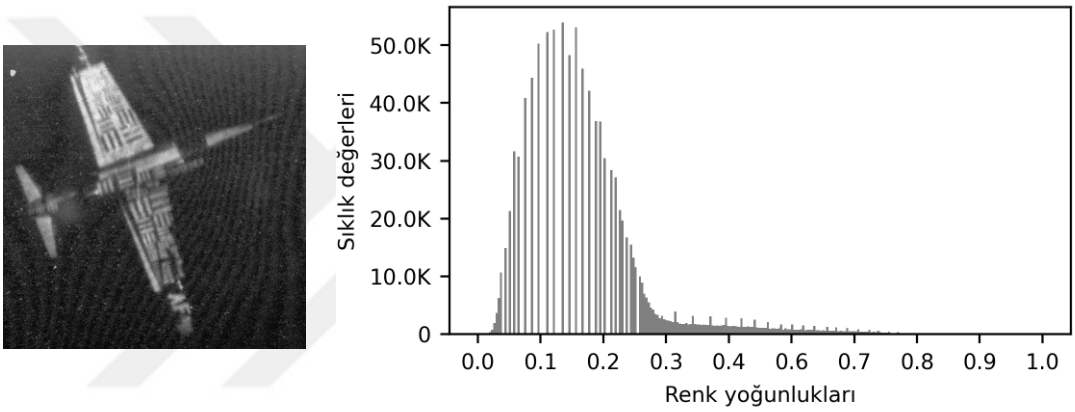


Şekil 48. Biber görüntüsü için λ parametresinin farklı değerleri için elde edilen kümülatif birikimli dağılım fonksiyon eğrileri

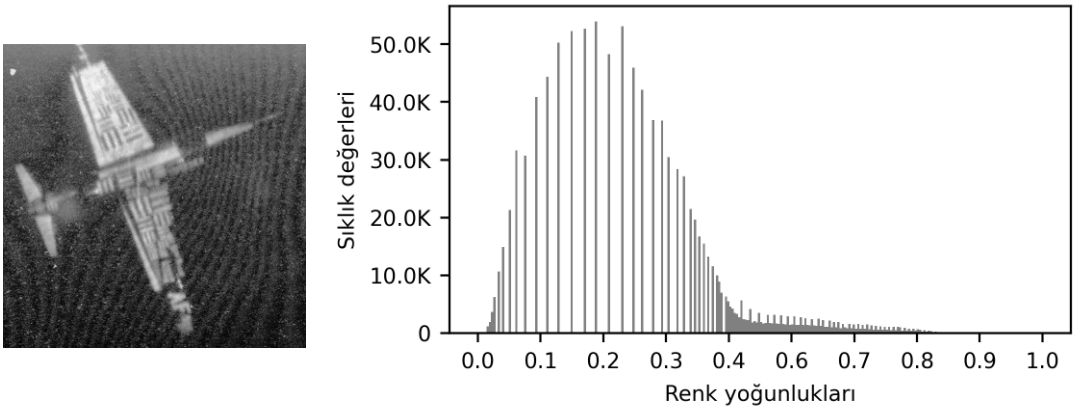
Şekil 49 ve Şekil 50'de, karanlık bölgelerin baskın olduğu (sağa çarpık) yoğunluk dağılımına sahip "Uçak" görüntüsü için, parametre λ'nın etkisi gösterilmektedir.



(a) (b)

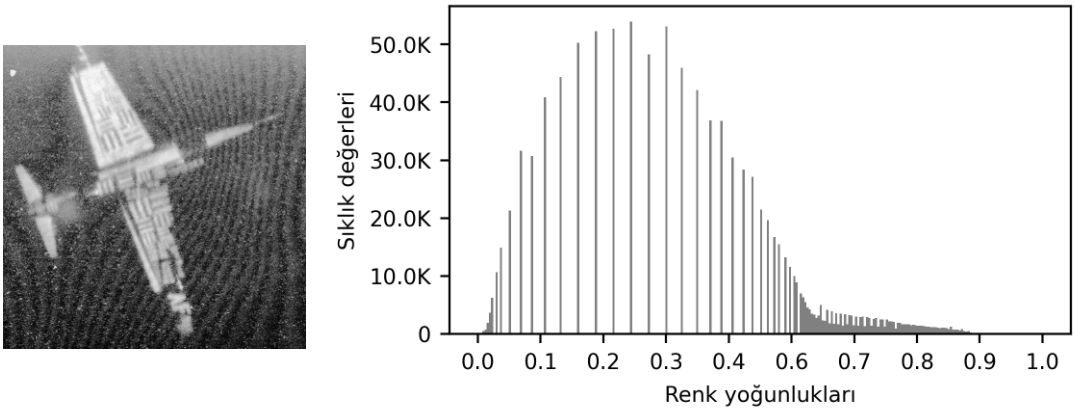


(c) (d)

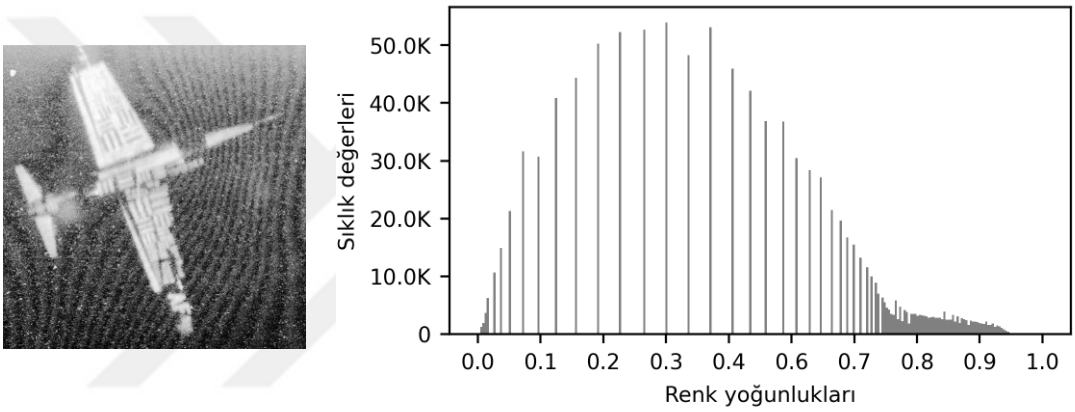


(e) (f)

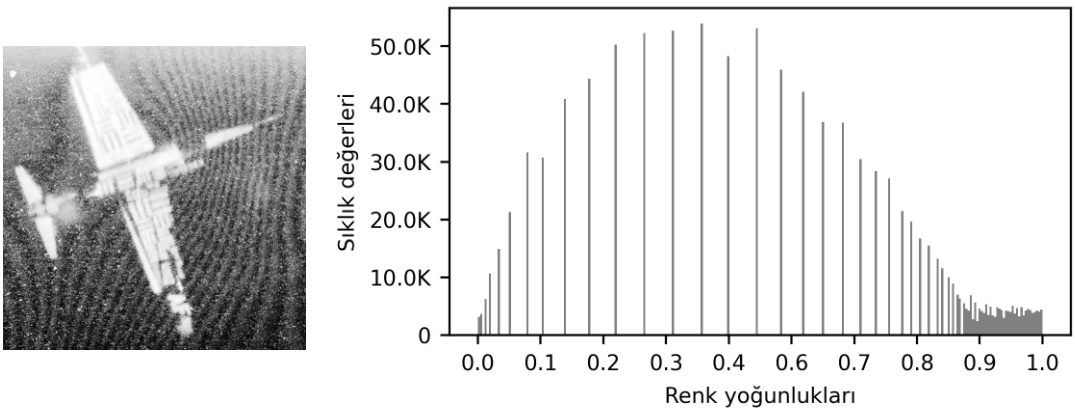
Şekil 49. Uçak görüntüsü için λ parametresinin farklı değerleri için elde edilen görüntüler ve histogramları; (a,b) $\lambda = 0$ (Orijinal); (c,d) $\lambda = 0.2$; (e,f) $\lambda = 0.4$



(a) (b)



(c) (d)

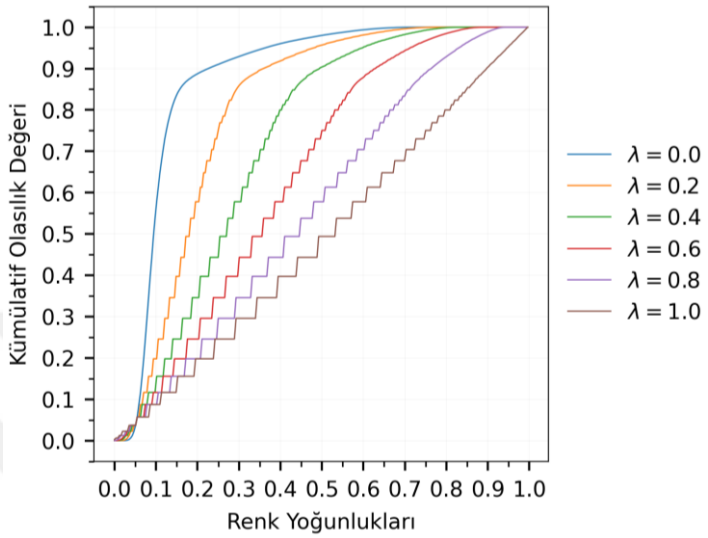


(e) (f)

Şekil 50. Şekil 49'un devamı; (a,b) $\lambda = 0.6$; (c,d) $\lambda = 0.8$; (e,f) $\lambda = 1$ (HE)

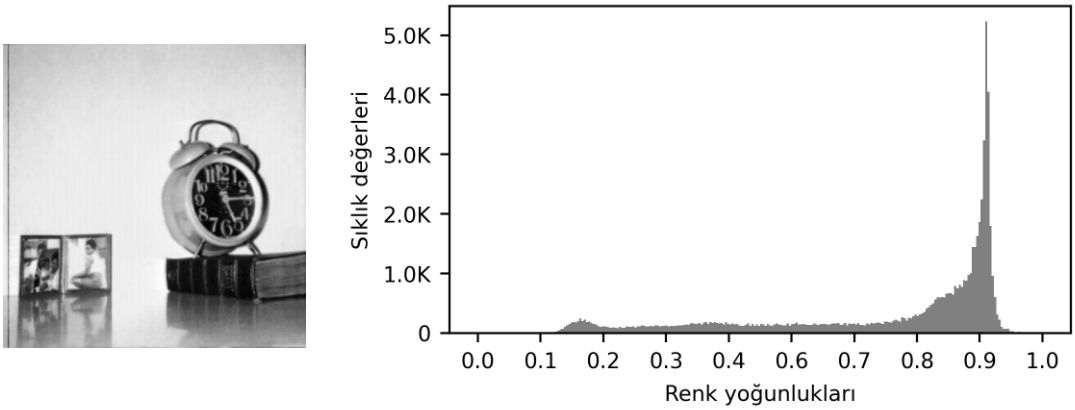
Şekil 49 ve Şekil 50 incelendiğinde, λ parametresinin artması, karanlık bölgelerin yoğun veya başka bir deyişle renk yoğunluklarının düşük olması sebebiyle histogramda

gereksiz yayılmaya sebep olmaktadır. Bu durum uçak görüntüsünde gürültüler oluştururken, görüntüyü doğallıktan uzaklaştırmaktadır. λ parametresine ait kümülatif birikimli dağılım fonksiyon eğrisinin değişimi ise aşağıda verilmektedir.



Şekil 51. Uçak görüntüsü için λ parametresinin farklı değerleri için elde edilen kümülatif birikimli dağılım fonksiyon eğrileri

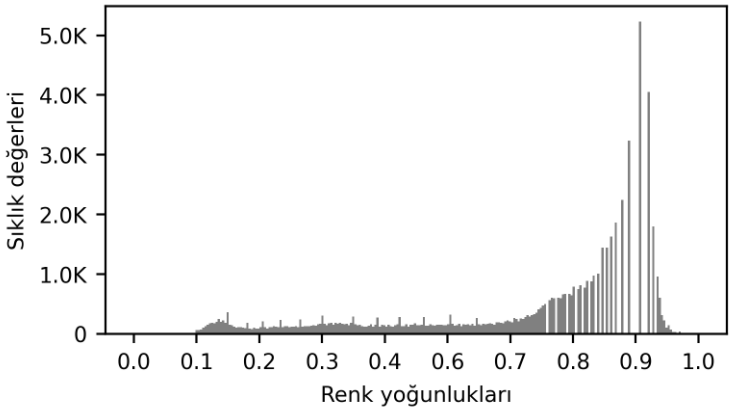
Şekil 52, Şekil 53 ve Şekil 54'te, aydınlık bölgelerin baskın olduğu (sola çarpık) yoğunluk dağılımına sahip "Saat" görüntüsü için, parametre λ'nın etkisi gösterilmektedir.



(a) (b)

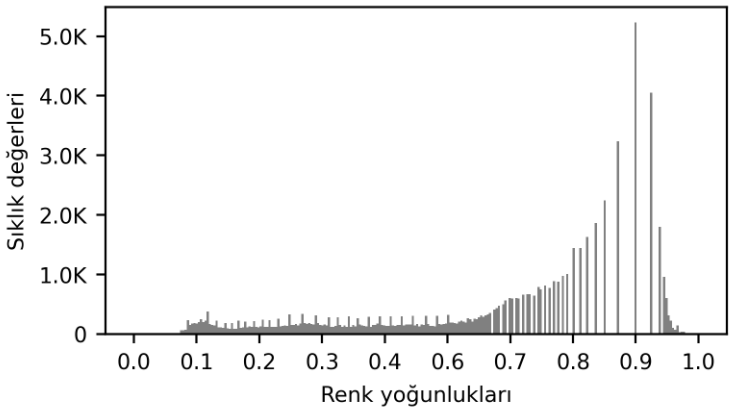
Şekil 52. Saat görüntüsü için λ parametresinin farklı değerleri için elde edilen görüntüler ve histogramları; (a,b) $\lambda = 0$ (Orijinal)





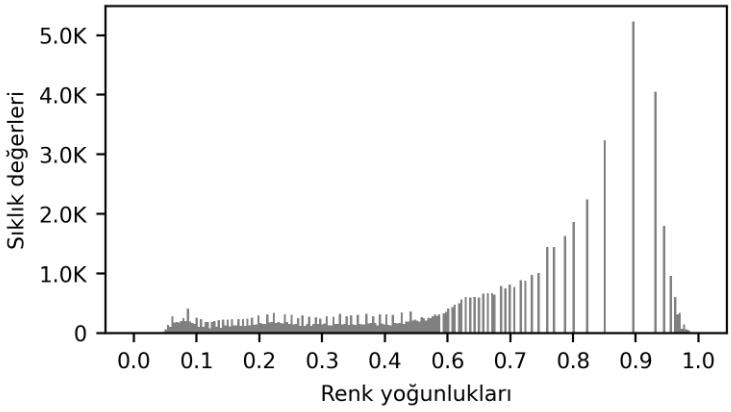
(a) (b)





(c) (d)



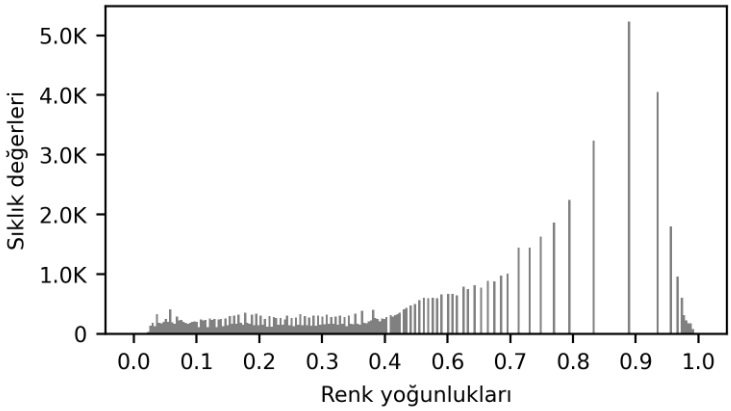


(e) (f)

Şekil 53. Şekil 52'nin devamı; (a,b) $\lambda = 0.2$; (c,d) $\lambda = 0.4$; (e,f) $\lambda = 0.6$



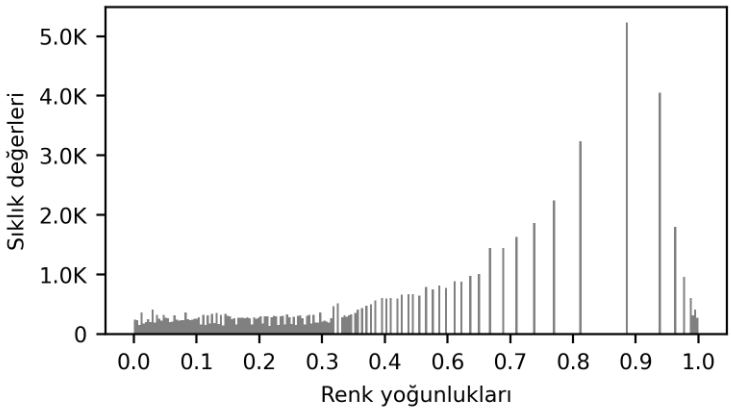
(a)



(b)



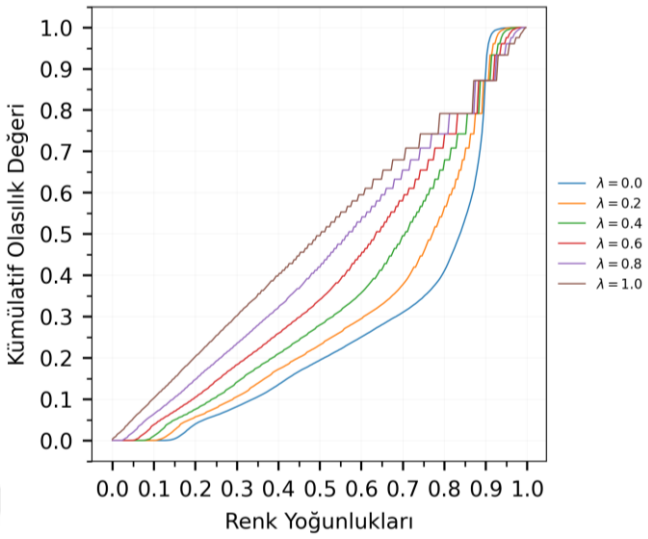
(c)



(d)

Şekil 54. Şekil 52'nin devamı; (a,b) $\lambda = 0.8$; (c,d) $\lambda = 1$ (HE)

Şekil 52, Şekil 53 ve Şekil 54 incelendiğinde, λ parametresinin artması, aydınlık bölgelerin yoğun veya başka bir deyişle renk yoğunluklarının yüksek olması sebebiyle histogramda, uçak görüntüsünde olduğu gibi gereksiz yayılmaya sebep olmaktadır. Bu durum saat görüntüsünde gürültüler oluştururken, görüntüyü doğallıktan uzaklaştırmaktadır. λ parametresine ait kümülatif birikimli dağılım fonksiyon eğrisinin değişimi ise aşağıda verilmektedir.

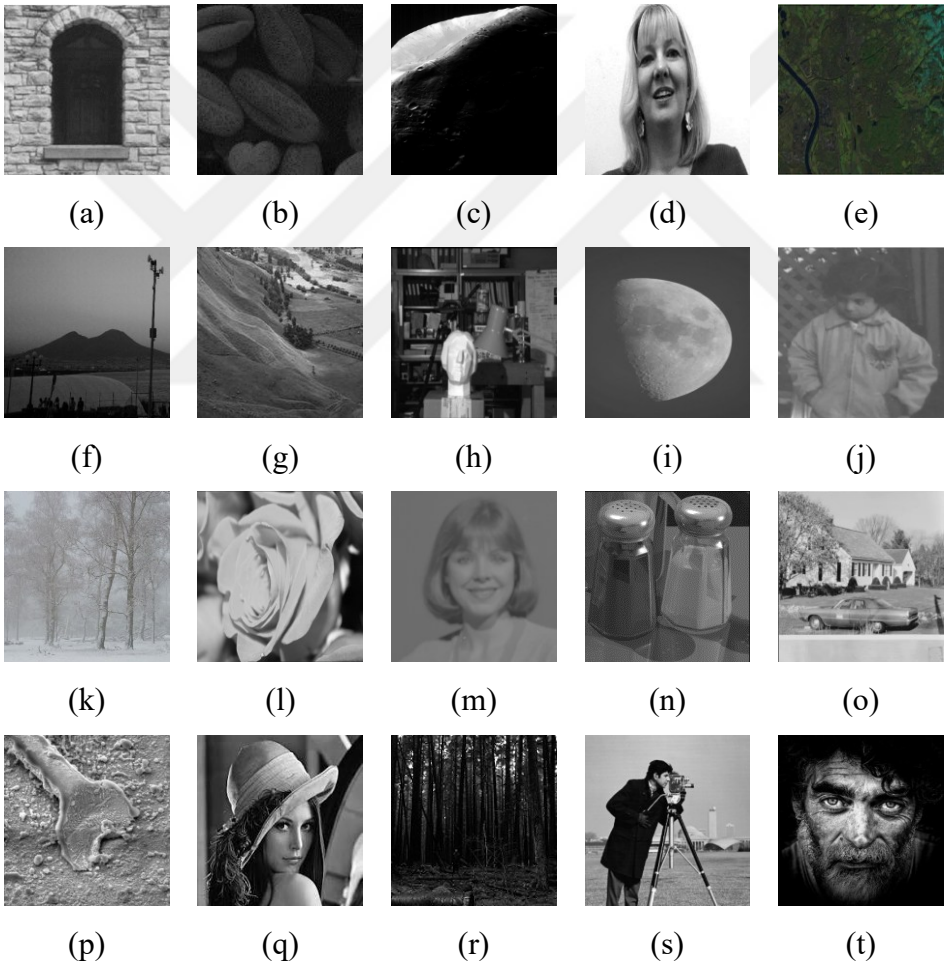


Şekil 55. Saat görüntüsü için λ parametresinin farklı değerleri için elde edilen kümülatif birikimli dağılım fonksiyon eğrileri

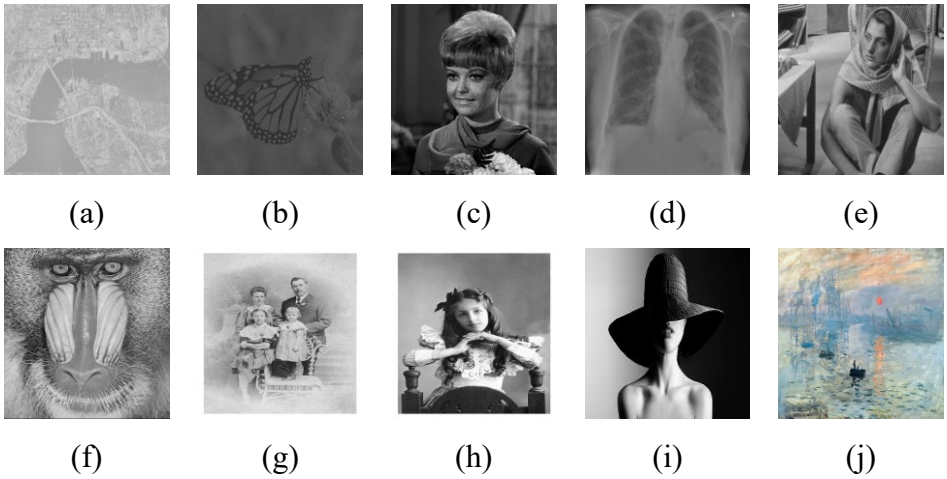
Yapılan deneysel incelemeler sonucunda, görüntülerin yoğunluk dağılım özelliklerinin SOHE yöntemi üzerindeki etkisi açıkça görülmüştür. Bu doğrultuda, yoğunluk dağılımını tanımlayan çeşitli istatistiksel ölçütler kullanılarak bir model oluşturulmuş ve λ parametresinin otomatik ve optimal biçimde belirlenmesi hedeflenmiştir. Önerilen modelin, görüntünün yoğunluk dağılımı dikkate alındığında HE 'ye kıyasla daha başarılı sonuçlar üreteceği öngörülmektedir. Bu yaklaşıma ilişkin deneysel sonuçlar 3.2 bölümünde ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada önerilen yöntemlerin performansının değerlendirilmesi için literatürde sıkça karşılaşılan toplam 30 görüntü kullanılmış ve yöntemlere göre görüntüler değerlendirilmiştir. Kullanılan görüntülerin bir bölümü RGB renk uzayında, diğer bölümü ise gri tonlamalı formattadır. Analiz aşamasına geçilmeden önce, tüm görüntüler gri tonlamalı formata dönüştürülerek veri bütünlüğü ve karşılaştırılabilirlik sağlanmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan görüntüler Şekil 56 ve Şekil 57'de verilmektedir.



Şekil 56. Çalışma kapsamında kullanılan görüntüler



Şekil 57. Şekil 56'nın devamı

Kullanılan tüm giriş görüntüleri PNG formatında olup, algoritmaların tutarlı biçimde değerlendirilebilmesi amacıyla analiz öncesinde ortak bir uzamsal boyuta getirilmiştir. Önerilen yöntemler görüntüler üzerinde uygulanmış ve her görüntü için Kontrast İyileştirme İndeksi, Ayrık Gri Seviye Enerjisi , Yapısal Benzerlik İndeksi Ölçütü , Doğal Görüntü Kalitesi Değerlendiricisi (NIQE), Kalite Farkındalıklı Kontrast (QAC) ve Uyuşmazlık Ölçüsü skorları elde edilmiş ve görüntülerin karşılaştırılması için bu skorlar kullanılmıştır. Elde edilen skorlar doğrultusunda, uyuşmazlık teorisi temel alınarak histogramın dağılımı ile kontrast artırma sonuçları arasındaki ilişkiyi modellemek amacıyla (Şekil 45-Şekil 55), optimal parametrelerin belirlenmesi için bir regresyon modeli kurulmuştur. Bunun nedeni önerilen yöntemlerin, yoğunluğun kümelendiği bölgelerde ortaya çıkan dengesiz kontrastı sınırlamak üzere tasarlanmış yaklaşımlar olmasıdır. Görüntüde yüksek ve düşük yoğunluklu bölgelerin varlığı, dağılımın sağa veya sola çarpık (pozitif veya negatif çarpıklık) ve normallikten uzak bir karakter sergilediğine işaret eder; bu durum yöntemin etkisini görünür kılmak açısından kritik önemdedir. Aynı zamanda önerilen yöntemlerin performansı, literatürde yer alan histogram eşitleme tabanlı yöntemlerle de karşılaştırılmış ve yöntemler arasında elde edilen skorlar bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu bağlamda, Klasik Histogram Eşitleme (HE), Ağırlıklandırılmış Histogram Eşitleme (WHE), Parlaklık Koruyan Çift Histogram Eşitleme (BBHE), İkili Alt Görüntü Histogram Eşitleme (DSIHE), En Küçük Ortalama Parlaklık Hatalı Çift Histogram Eşitleme (MMBEBHE), Ağırlıklı Ortalama ile Ayrılmış Histogram Eşitleme (WMSHE), Yinelemeli Ayrılmış ve Ağırlıklı Histogram Eşitleme (RSWHE), Yinelemeli Ortalama ile Ayrılmış Histogram Eşitleme (RMSHE), Yinelemeli Alt Görüntü Histogram Eşitleme

(RSIHE), Kontrast Sınırlı Uyarlanabilir Histogram Eşitleme (CLAHE), Dinamik Histogram Eşitleme (DHE), Çoklu Tepe Noktalı Histogram Eşitleme (MPHE), İnsan Görsel Sistemi Tabanlı Histogram Eşitleme (HVS_HE) ve Taban (Plato) Sınırlı Histogram Eşitleme (PLHE) yöntemleri kullanılmıştır. Tüm analizler 11. nesil Intel® Core™ i5-1135G7 @ 2.40 GHz işlemci ve 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda, Windows 11 üzerinde Python 3.13.5 (Anaconda, geliştirme ortamı: Spyder 6.0.7) kullanılarak; NumPy 2.2.6, pandas 2.2.3, SciPy 1.15.3, scikit-learn 1.6.1, scikit-image 0.25.2, OpenCV 4.12.0, Matplotlib 3.10.0 ve niqe 0.1.1 kütüphaneleriyle tarafımızca geliştirilen kodlar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Önerilen yöntemlerin sonuçlarının görsel olarak sunulabilirliğini sağlamak amacıyla, yoğunluk dağılımı özelliklerine göre normal dağılıma yakın, sola çarpık ve sağa çarpık histogram yapısına sahip olan 3 temsilî görüntü seçilmiştir. Bu seçim ile yöntemlerin farklı istatistiksel yapıdaki görüntüler üzerindeki davranışı görsel ve ayrıntılı tablolar üzerinden açık biçimde gösterilmiştir. Diğer 27 görüntüye ait sonuçlar ise tez kapsamını gereksiz şekilde uzatmamak amacıyla ayrıntılı görsel ve tablo halinde verilmemiş; yöntemin genel başarımını göstermek üzere, optimal parametreye sahip uyuşmazlık ölçüsüne ait görüntülerin sonuçları tablo olarak ayrıca sunulmuştur.

Temsili olarak seçilen görüntülerin normal dağılımdan ne kadar uzak olduklarını değerlendirebilmek için normallik kontrolü sağlayan istatistiksel testler uygulanamamaktadır. Çünkü normallik testlerinin uygulanması için bağımsızlık şartı mevcuttur. Ancak pikseller komşuluklarından dolayı birbirine yakın ve bağımlıdır. Dolayısıyla görüntülerin çarpıklık katsayılarına bakılmış ve çarpıklık durumları kontrol edilmiştir. Şekil 56 ve Şekil 57'de ki görüntülerin çarpıklık katsayıları Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

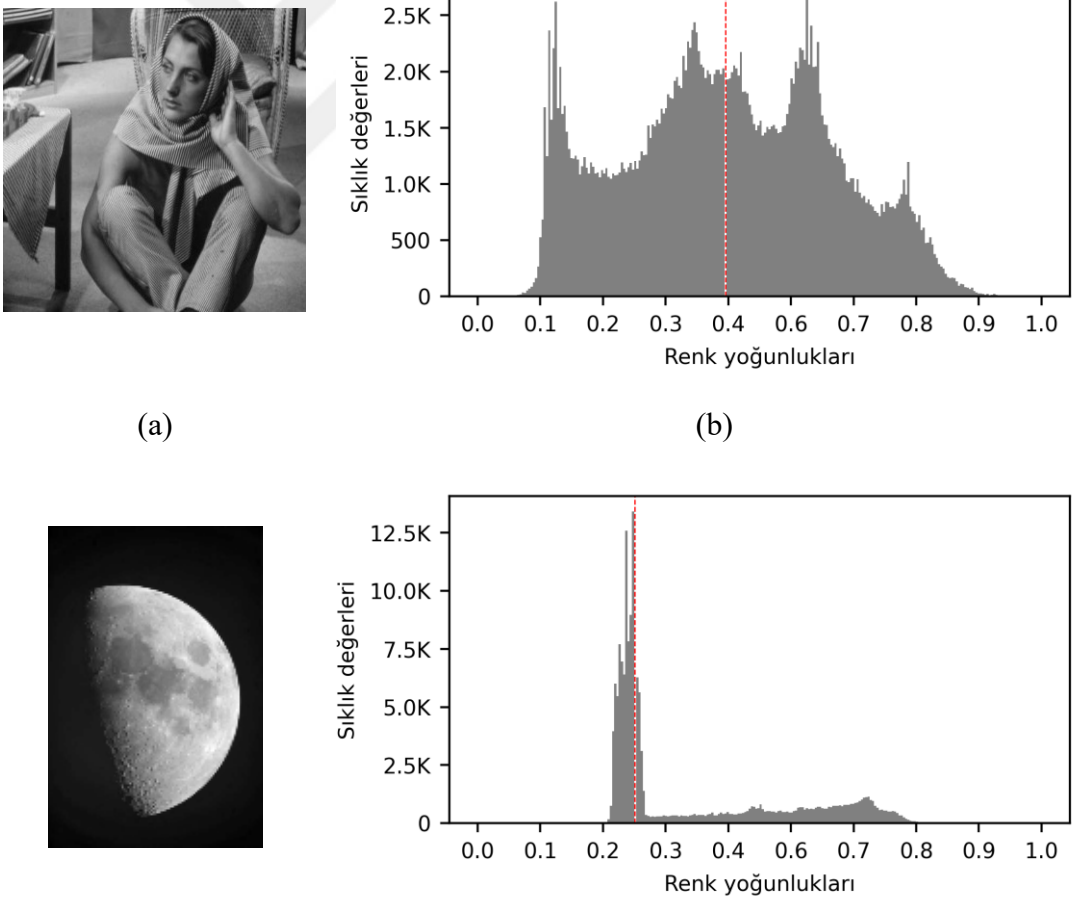
Tablo 2. Şekil 56'da yer alan görüntülerin çarpıklık katsayısı

a	-0.25	**f**	-0.2	**k**	-0.12	**p**	0.21
b	0.18	**g**	1.18	**l**	-0.93	**q**	0.46
c	2.13	**h**	1.24	**m**	-0.74	**r**	2.65
d	-0.6	**i**	0.98	**n**	0.63	**s**	-0.89
e	3.17	**j**	0.45	**o**	-0.89	**t**	1.44

Tablo 3. Şekil 57'de yer alan görüntülerin çarpıklık katsayısı

a	0.25	**f**	-0.31
b	-0.99	**g**	-1.04
c	0.91	**h**	-0.04
d	-0.66	**i**	0.34
e	0.05	**j**	-1.12

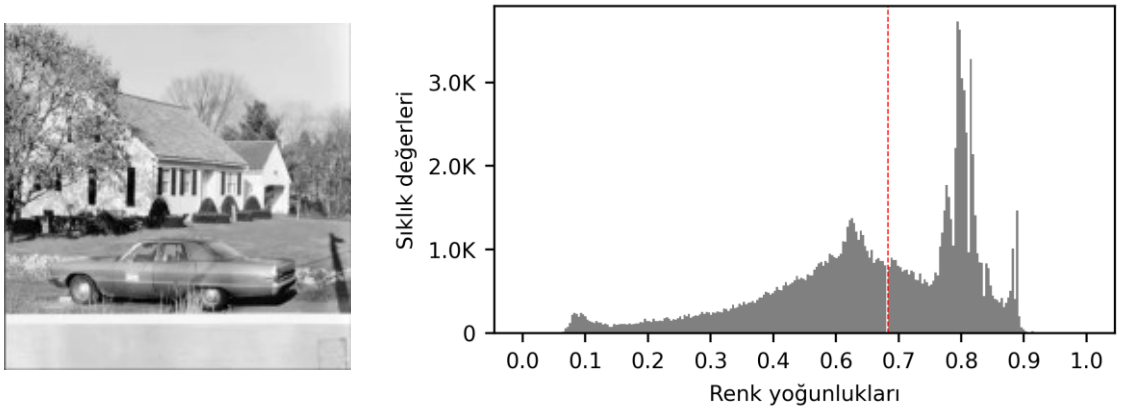
Çarpıklık katsayılarına göre düzgün dağılıma en yakın olan görüntü 0.05 ile Şekil 57e, sağa çarpık dağılım için 0.98 ile Şekil 56i ve sola çarpık dağılım için -0.89 ile Şekil 56o seçilmiştir. Şekil 58 ve Şekil 59'ta seçilen görüntüler, bu görüntülere ait histogramlar ve ortanca konumları sunulmaktadır.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 58. Temsili seçilen görüntüler



(a) (b)

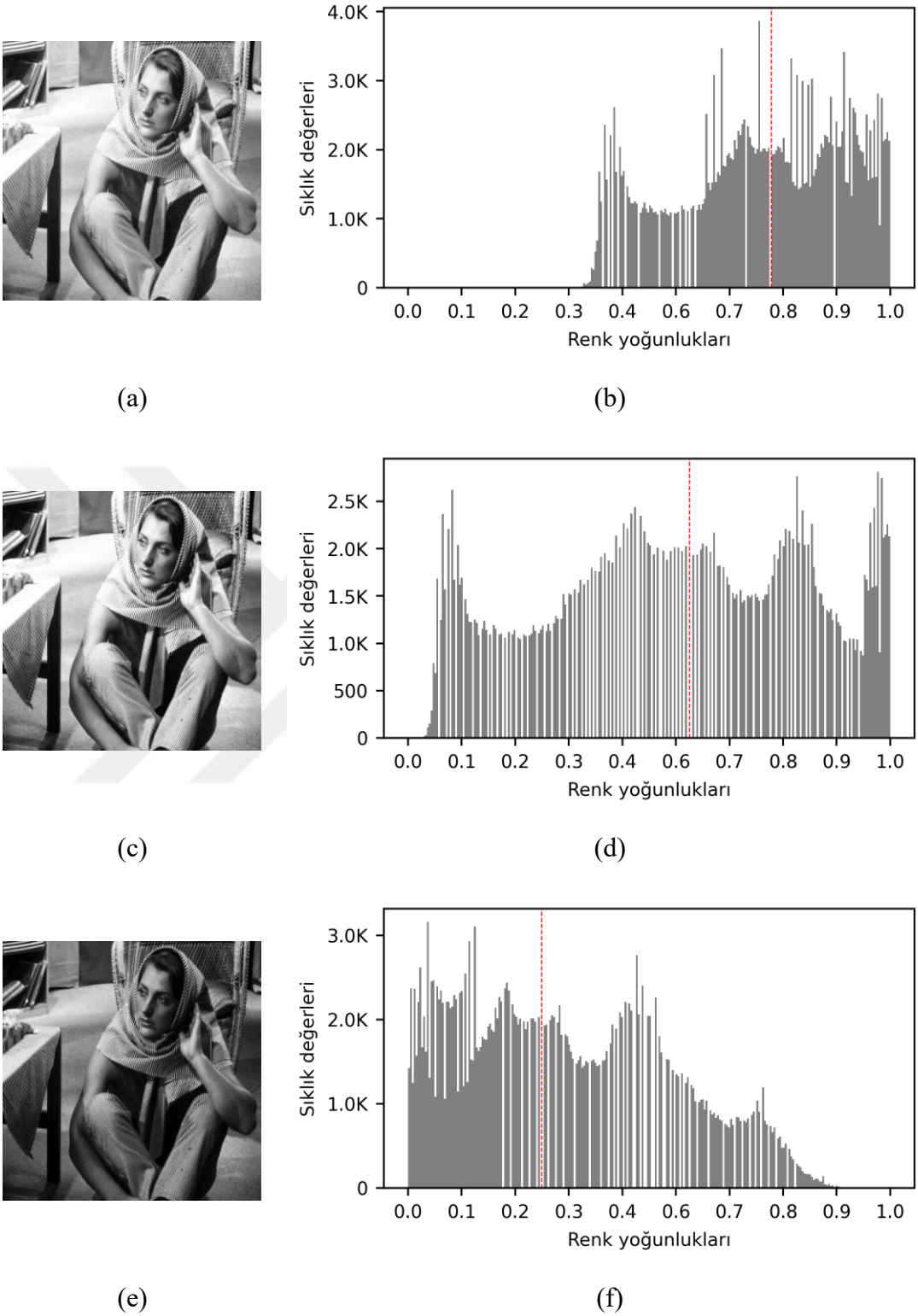
Şekil 59. Şekil 58'in devamı

3.1. Simetrik Histogram Eşitleme (SHE) Bulguları

Bu bölümde, önerilen Simetrik Histogram Eşitleme yönteminin, çeşitli metrikler kullanılarak diğer yöntemlerle karşılaştırılması ve performansının örnek görüntüler üzerinden değerlendirilip yorumlanmasına yer verilmiştir.

Simetrik histogram kullanılarak geliştirilen SHE, görüntüde yoğun veya kümeli bölgelerin bulunması durumunda, uygulanan işlemler sonucu görüntüde ortaya çıkan problemleri engellemek amacıyla önerilmiştir ve yoğun bölgelerin daha düşük yoğunluktaki bölgelerini baskılamadan histogram eşitleme gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla kullanılan simetri noktası ortanca olup, yöntemin başarısı için önemli bir kriterdir. Simetri noktası görüntünün gerçek ortancası olabileceği gibi, değişen keyfi bir ortanca değeri olabilmektedir. Optimal simetri noktasının seçimi görüntünün dağılımı ile ilişkilidir. Görüntüde yoğun bölgelerin mevcut olması görüntünün dağılımını etkilemektedir. Bu sebeple dağılımlarına göre seçilen 3 görüntü için SHE'nin performansı değerlendirilmiştir.

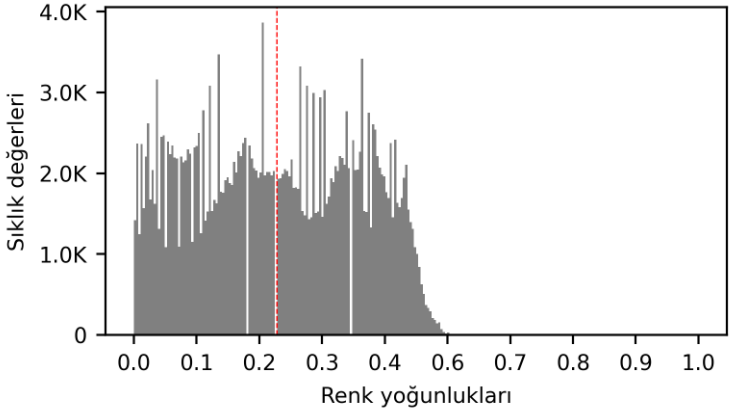
Düzgün dağılıma yakın bir dağılıma sahip görüntülerde, görüntü mevcut aralıktaki her yoğunluk değerini hemen hemen içermektedir. Bu amaçla Şekil 58a görüntüsünün simetri noktasına göre SHE sonuçları, Şekil 60 ve Şekil 61'de verilmektedir.



Şekil 60. Simetri noktasına göre SHE yönteminin etkisi; (a,b) $m = 0.2$ (c,d) $m = 0.4$; (e,f) $m = 0.6$



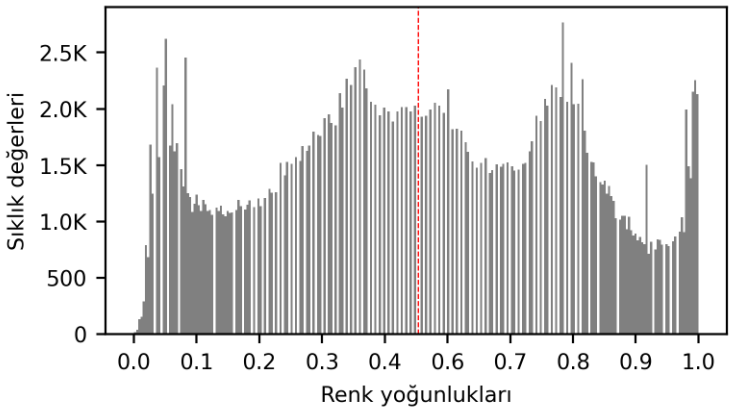
(a)



(b)



(c)



(d)

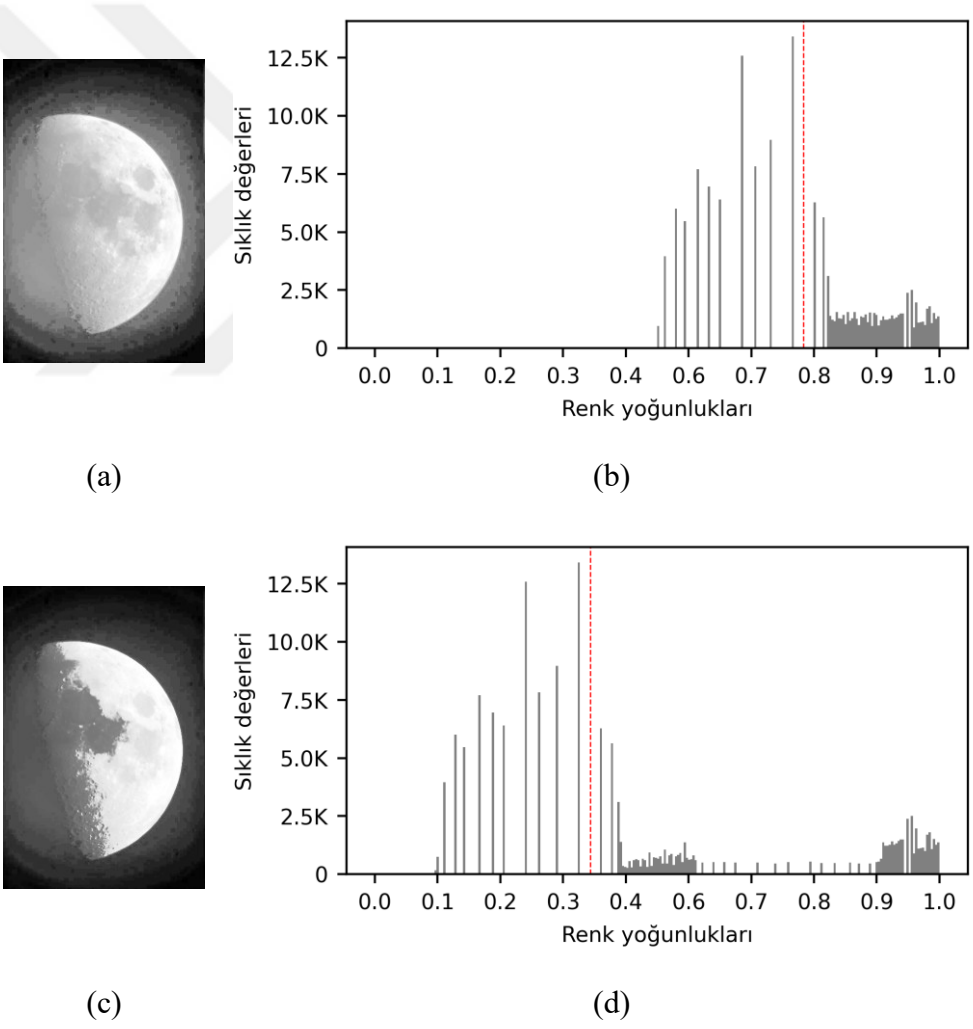
Şekil 61. Şekil 60'ın devamı; (a,b) $m = 0.8$; (c,d) $m = 0.43$(Gerçek ortanca)

Dağılımın normal dağılıma yakın olduğu görüntüler için SHE yönteminin performansı incelendiğinde, gerçek ortancası 0.43 olan bir görüntünün simetri noktası daha düşük belirlendiğinde görüntünün parlaklığı artarken, daha büyük simetri noktası görüntünün parlaklığını azaltmaktadır. Şekil 58a'da verilen görüntü için gerçek ortancanın simetri noktası olarak seçilmesi durumunda, uygulanan SHE işlemi sonucunda ortanca değeri 0.5 olarak elde edilmiştir. Diğer simetri noktaları için elde edilen ortanca değerleri ise sırasıyla; simetri noktası 0.2 için 0.75, 0.4 için 0.58, 0.6 için 0.27 ve 0.8 için 0.25 olarak hesaplanmıştır.

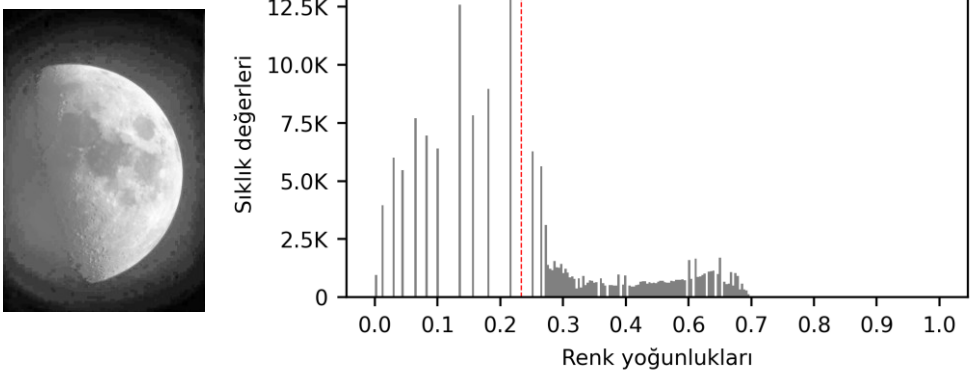
Uyuşmazlık ölçüsü kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda, orijinal görüntünün uyuşmazlık ölçüsü 0.21 olarak bulunmuştur. Uyuşmazlık teorisi tanımına göre bu değerin düşük olması, ilgili dağılımın düzgün dağılıma yakın olduğunu göstermektedir. Simetri noktalarına bağlı olarak elde edilen uyuşmazlık ölçüsü değerleri incelendiğinde;

$m = 0.2$ için 0.23, $m = 0.4$ için 0.08, $m = 0.6$ için 0.28, $m = 0.8$ için 0.48 ve gerçek ortanca için ise 0.02 değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, dağılımı düzgün dağılıma yakın görüntülerde, gerçek ortanca değerinin simetri noktası olarak seçilmesi durumunda uyuşmazlık ölçüsünün en düşük seviyeye ulaştığını ve dolayısıyla en uygun dağılımın bu durumda elde edildiğini göstermektedir.

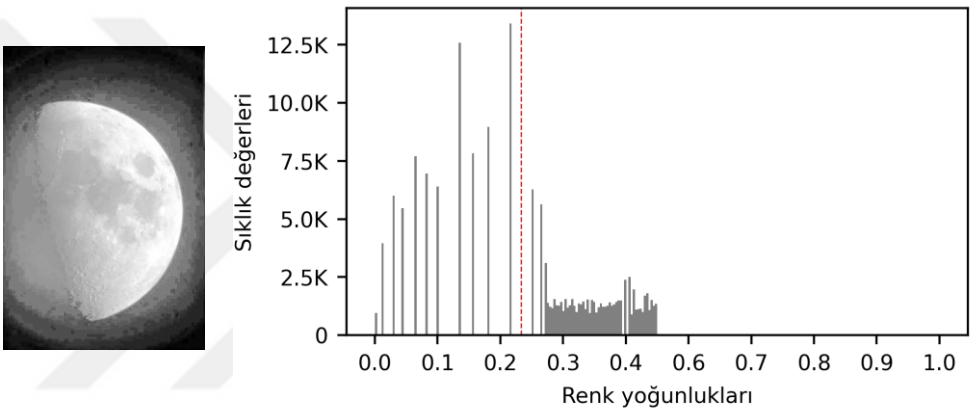
Sağa çarpık dağılıma sahip görüntülerde, görüntü mevcut aralıktaki her yoğunluk değerini içermeyerek düşük renk yoğunluklarında yığılmalarına sahip olmaktadır. Bu amaçla Şekil 58c görüntüsünün simetri noktasına göre SHE sonuçları, Şekil 62 ve Şekil 63'te verilmektedir.



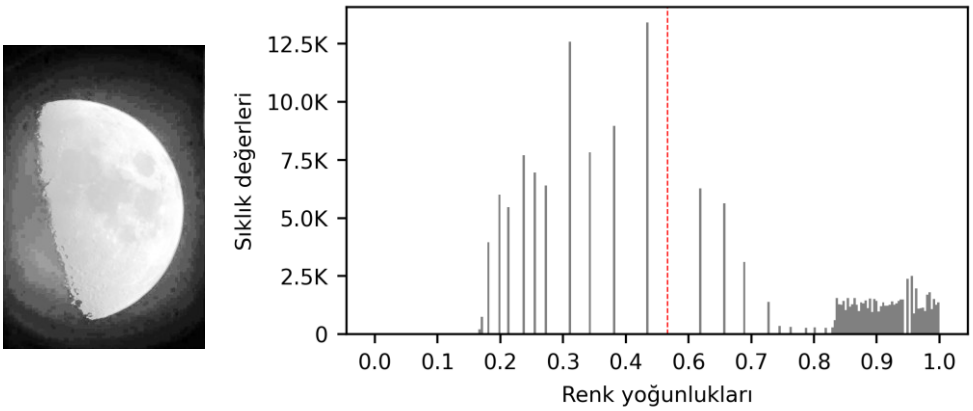
Şekil 62. Simetri noktasına göre SHE yönteminin etkisi; (a,b) $m = 0.2$; (c,d) $m = 0.4$



(a) (b)



(c) (d)



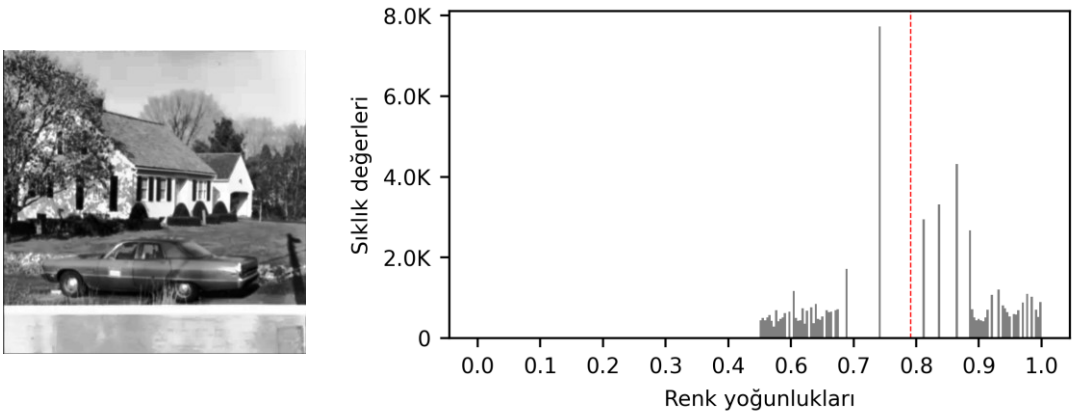
(e) (f)

Şekil 63. Şekil 62'nin devamı; (a,b) $m = 0.6$; (c,d) $m = 0.8$; (e,f) $m = 0.27$ (Gerçek ortanca)

Şekil 58c'de verilen görüntü için gerçek ortancanın yani $m = 0.27$'nin simetri noktası olarak seçilmesi durumunda, uygulanan SHE işlemi sonucunda ortanca değeri 0.51 olarak elde edilmiştir. Diğer simetri noktaları için elde edilen ortanca değerleri ise sırasıyla; simetri noktası 0.2 için 0.75, 0.4 için 0.38, 0.6 ve 0. 8 için 0.25 olarak hesaplanmıştır.

Uyuşmazlık ölçüsü kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda, orijinal görüntünün uyuşmazlık ölçüsü 0.50 olarak bulunmuştur. Uyuşmazlık teorisi tanımına göre bu değerin yüksek olması, ilgili dağılımın düzgün dağılımdan uzak olduğunu göstermektedir. Simetri noktalarına bağlı olarak elde edilen uyuşmazlık ölçüsü değerleri incelendiğinde; $m = 0.2$ için 51, $m = 0.4$ için 0.24, $m = 0.6$ için 0.17, $m = 0.8$ için 0.07 ve gerçek ortanca için ise 0.14 değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, simetri noktası m değerinin büyüdükçe uyuşmazlık ölçüsünün genel olarak azaldığını, özellikle $m = 0.8$ durumunda histogram dağılımının düzgün dağılıma en yakın yapıya ulaştığını göstermektedir. Buna karşılık, simetri noktasının düşük değerlere yakın seçildiği durumda ($m = 0.2$) uyuşmazlık ölçüsünün belirgin biçimde arttığı ve histogramın düzgünlükten ciddi ölçüde uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, bu görüntü için optimal simetri noktasının $m = 0.8$ civarında seçilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

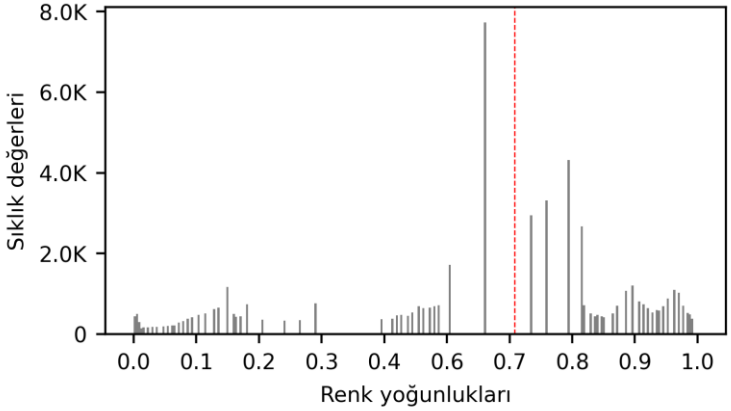
Sola çarpık dağılıma sahip görüntülerde, görüntü mevcut aralıktaki her yoğunluk değerini içermeyerek yüksek renk yoğunluklarında yığılmalarına sahip olmaktadır. Bu amaçla Şekil 59a görüntüsünün simetri noktasına göre SHE sonuçları, Şekil 64, Şekil 65 ve Şekil 66'de verilmektedir.



(a) (b)

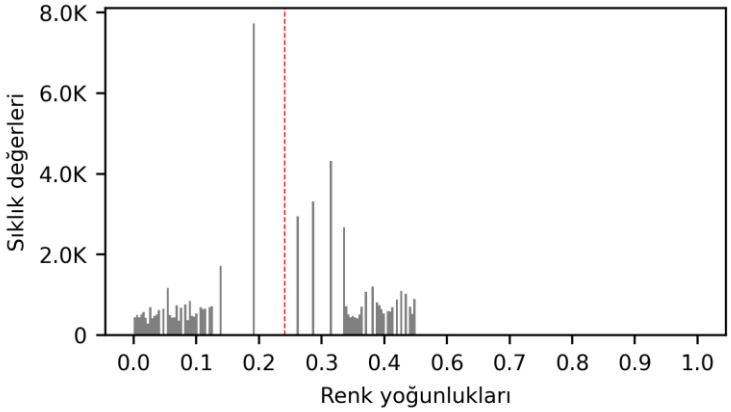
Şekil 64. Simetri noktasına göre SHE yönteminin etkisi; (a,b) m=0.2





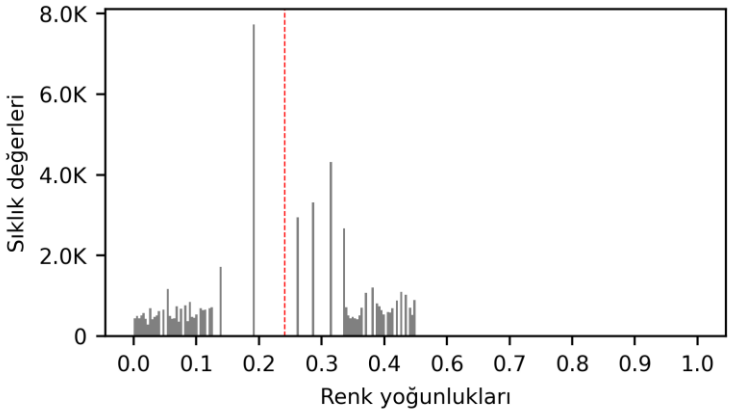
(a) (b)





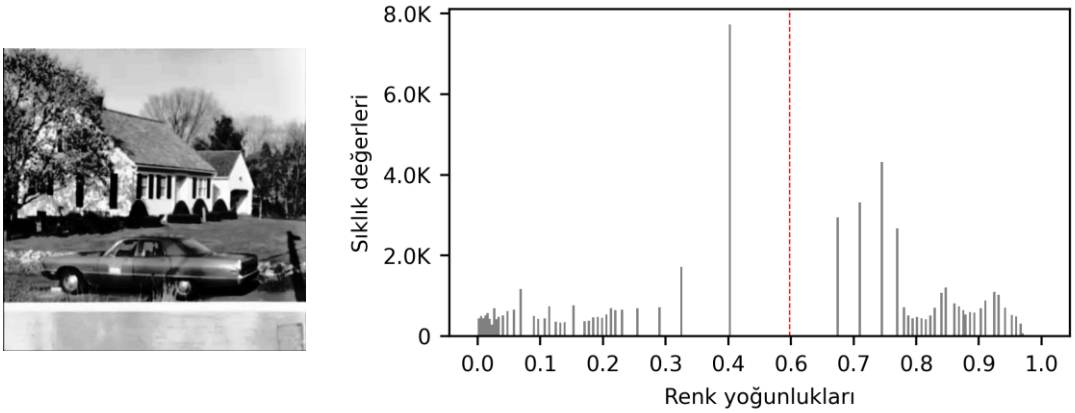
(c) (d)





(e) (f)

Şekil 65. Şekil 64'ün devamı; (a,b) m=0.4; (c,d) m=0.6; (e,f) m = 0.8



(a) (b)

Şekil 66. Şekil 64'ün devamı; (a,b) m=0.64 (Gerçek Ortanca)

Şekil 59a'da verilen görüntü için gerçek ortancanın yani m=0.64'ün simetri noktası olarak seçilmesi durumunda, uygulanan SHE işlemi sonucunda ortanca değeri 0.50 olarak elde edilmiştir. Diğer simetri noktaları için elde edilen ortanca değerleri ise sırasıyla; simetri noktası 0.2 için 0.75, 0.4 için 0.73, 0.6 için 0.60 ve 0.8 için 0.25 olarak hesaplanmıştır.

Uyuşmazlık ölçüsü kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda, orijinal görüntünün uyuşmazlık ölçüsü 0.30 olarak bulunmuştur. Uyuşmazlık teorisi tanımına göre bu değerin yüksek olması, ilgili dağılımın düzgün dağılımdan uzak olduğunu göstermektedir. Simetri noktalarına bağlı olarak elde edilen uyuşmazlık ölçüsü değerleri incelendiğinde; $m = 0.2$ için 0.07, $m = 0.4$ için 0.27, $m = 0.6$ için 0.13, $m = 0.8$ için 0.19 ve gerçek ortanca için ise 0.07 değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, özellikle uyuşmazlık ölçüsünün daha düşük olduğu durumlarda, simetri noktasının gerçek ortanca değerine yakın seçilmesinin, histogram dağılımının düzgün dağılıma daha yakın bir yapı kazanmasını sağladığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, simetri noktasının uç değerlere yaklaştığı durumlarda ($m = 0.4$ ve $m = 0.8$) uyuşmazlık ölçüsünün belirgin biçimde arttığı ve bu nedenle dağılımın düzgünlükten uzaklaştığı gözlemlenmiştir.

SHE'de simetri noktasının araştırmacı tarafından gerçek ortanca veya keyfi ortanca olarak seçilmesi, yöntemin genellenebilirliği ve yorumlanabilirliği açısından risklidir. Bu sebeple, Şekil 56 ve Şekil 57'de yer alan görüntülerin tamamı için optimal simetri noktasının belirlenmesi amacıyla, ortancanın 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ve gerçek ortanca olduğu sonuçlar elde edilmiş ve Bölüm 1.3'te bahsedilen karşılaştırma metrikleri ile değerlendirilmiştir. Tablonun okunabilirliği açısından tüm skorlar uyuşmazlık ölçüsü baz alınarak aşağıda sunulmuştur.

Tablo 4. Kullanılan görüntülerin en düşük uyuşmazlık ölçüsüne ait skorları

Görüntü	D_I	m	CII	GLE	SSIM	NIQE	QAC	D_J
Şekil 56a	0.19	0.4	0.97	0.01	0.85	20.78	0.46	0.13
Şekil 56b	0.2	0.4	0.99	0.02	0.73	20.63	0.49	0.03
Şekil 56c	0.67	0	0.11	0.33	0.1	2.26	0.36	0.57
Şekil 56d	0.4	0.2	0.44	0.09	0.73	2.11	0.4	0.28
Şekil 56e	0.55	0.6	1	0.04	0.42	20.18	0.42	0.06
Şekil 56f	0.15	0.8	0.99	0.01	0.92	19.65	0.51	0.01
Şekil 56g	0.34	0.8	1.1	0.01	0.79	39.07	0.49	0.04
Şekil 56h	0.42	0.21	0.81	0.01	0.59	26.12	0.48	0.11
Şekil 56i	0.51	0.8	1.76	0.03	0.78	8.17	0.51	0.08
Şekil 56j	0.48	0.8	1.99	0.02	0.72	2.54	0.5	0.04
Şekil 56k	0.33	0.8	2.31	0.02	0.52	19.32	0.48	0.03
Şekil 56l	0.18	0.6	1	0.02	0.79	0.44	0.52	0.11
Şekil 56m	0.3	0.2	0.75	0.04	0.67	116.16	0.39	0.12
Şekil 56n	0.4	0.4	0.99	0.09	0.77	34.66	0.52	0.19
Şekil 56o	0.3	0.2	0.42	0.01	0.91	19.99	0.39	0.07
Şekil 56p	0.25	0.51	1	0.01	0.74	20.81	0.44	0.02
Şekil 56q	0.25	0.34	0.76	0.01	0.79	3.18	0.5	0.07
Şekil 56r	0.62	0.09	0.66	0.02	0.19	50.06	0.44	0.1
Şekil 56s	0.2	0.6	1	0.02	0.88	0.42	0.52	0.12
Şekil 56t	0.51	0.03	0.43	0.14	0.18	0.49	0.44	0.36
Şekil 57a	0.23	0.2	1.77	0.03	0.73	18.2	0.37	0.05
Şekil 57b	0.62	0.31	1	0.04	0.28	48.65	0.49	0.05
Şekil 57c	0.38	0.8	0.99	0.01	0.89	291.49	0.5	0.04
Şekil 57d	0.43	0.8	1.23	0.02	0.7	23.87	0.51	0.04
Şekil 57e	0.21	0.44	1	0.01	0.89	0.61	0.5	0.02
Şekil 57f	0.2	0.55	1	0.01	0.83	18.21	0.47	0.03
Şekil 57g	0.44	0.2	0.37	0.03	0.9	0.69	0.39	0.14
Şekil 57h	0.18	0.6	1.01	0.02	0.85	0.64	0.53	0.14
Şekil 57i	0.34	0.4	0.61	0.03	0.48	0.71	0.51	0.21
Şekil 57j	0.42	0.2	0.35	0.01	0.88	16.56	0.37	0.03

Tablo 4, her görüntü için m değerlerinin incelenmesi ve en düşük uyuşmazlık ölçüsüne sahip olan görüntünün (D_J) simetri noktası için kullanılan ortanca değerini ve skor bilgilerini içermektedir. Tabloda yer alan sonuçlar incelendiğinde, önerilen yöntemin farklı görüntüler üzerinde genel olarak kontrast artışı ve yapısal korunum açısından başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. CII değerlerinin birçok görüntü için 1'e yakın ve bazı örneklerde 2'nin üzerine çıktığı gözlemlenmiş olup, bu durum kontrastın anlamlı biçimde iyileştirildiğini göstermektedir. GLE değerlerinin genel olarak düşük aralıkta (0.01–0.04) seyretmesi, kontrast artırma işlemi sonrasında görüntülerin bilgi içeriğinde ani ve dengesiz bir artış meydana gelmediğini ve gürültü kaynaklı yapay detay oluşumunun sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. SSIM sonuçları değerlendirildiğinde, birçok görüntü için 0.70–0.90 aralığında yüksek yapısal benzerlik değerleri elde edildiği görülmektedir. Bu durum, önerilen yöntemin kontrastı artırırken görüntünün temel yapısal özelliklerini büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir. NIQE değerleri incelendiğinde ise bazı görüntülerde görece yüksek değerler elde edilmesine karşın, birçok görüntüde 20 civarı ve altında değerler elde edilerek kabul edilebilir doğal görüntü kalitesinin korunduğu görülmektedir. QAC metriği açısından bakıldığında, değerlerin genellikle 0.39–0.53 aralığında yoğunlaştığı ve kontrast temelli kalite değerlendirmesinde yöntemler arasında istikrarlı bir performans sergilendiği anlaşılmaktadır. Genel olarak elde edilen tüm metrikler birlikte değerlendirildiğinde, önerilen yöntemin farklı histogram karakterlerindeki görüntüler üzerinde kontrast artırımı, yapısal korunum ve algısal kalite açısından dengeli ve tutarlı bir performans sunduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Tablo 4 verilerine göre, optimal m değeri olarak seçilen simetri noktaları ile her görsel, Bölüm 1.4'de bahsedilen yöntemlerle karşılaştırılmıştır. İlgili yöntemlere ilişkin uyuşmazlık ölçüleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.SHE yönteminin diğer yöntemlerle uyuşmazlık ölçüsü skoru ile karşılaştırılması

Görüntü	**Orijinal**	**SHE**	**WHE**	**BBHE**	**DSIHE**	**MMBEB**	**WMSHE**	**RSWHE**	**RMSHE**	**RSIHE**	**CLAHE**	**DHE**	**MPHE**	**HVS_HE**	**PLHE**
Şekil 56a	0.19	0.13	0.02	0.2	0.02	0.03	0.16	0.21	0.02	0.02	0.12	0.12	0.02	0.08	0.29

Tablo 5'in devamı

Görüntü	Şekil 56b	Şekil 56c	Şekil 56d	Şekil 56e	Şekil 56f	Şekil 56g	Şekil 56h	Şekil 56i	Şekil 56j	Şekil 56k
Orijinal	0.2	0.67	0.4	0.55	0.15	0.34	0.42	0.51	0.48	0.33
SHE	0.03	0.57	0.28	0.06	0.01	0.04	0.11	0.08	0.04	0.03
WHE	0.03	0.57	0.28	0.06	0.01	0.02	0.02	0.08	0.04	0.03
BBHE	0.1	0.36	0.31	0.07	0.14	0.1	0.22	0.3	0.25	0.11
DSIHE	0.04	0.66	0.3	0.31	0.07	0.21	0.35	0.4	0.33	0.11
MMBEB	0.05	0.48	0.4	0.22	0.12	0.16	0.3	0.44	0.31	0.12
WMSHE	0.11	0.67	0.4	0.42	0.09	0.27	0.42	0.5	0.48	0.22
RSWHE	0.19	0.54	0.44	0.17	0.29	0.08	0.21	0.26	0.21	0.33
RMSHE	0.01	0.35	0.3	0.04	0.02	0.01	0.02	0.06	0.03	0.01
RSIHE	0.03	0.62	0.29	0.27	0.07	0.19	0.31	0.38	0.27	0.11
CLAHE	0.11	0.61	0.38	0.36	0.13	0.22	0.21	0.48	0.33	0.22
DHE	0.11	0.61	0.38	0.36	0.13	0.22	0.21	0.48	0.33	0.22
MPHE	0.01	0.53	0.29	0.05	0.01	0.02	0.02	0.08	0.04	0.02
HVS_HE	0.01	0.52	0.29	0.15	0.05	0.06	0.04	0.34	0.1	0.04
PLHE	0.1	0.7	0.49	0.5	0.25	0.28	0.35	0.58	0.38	0.24

Tablo 5'in devamı

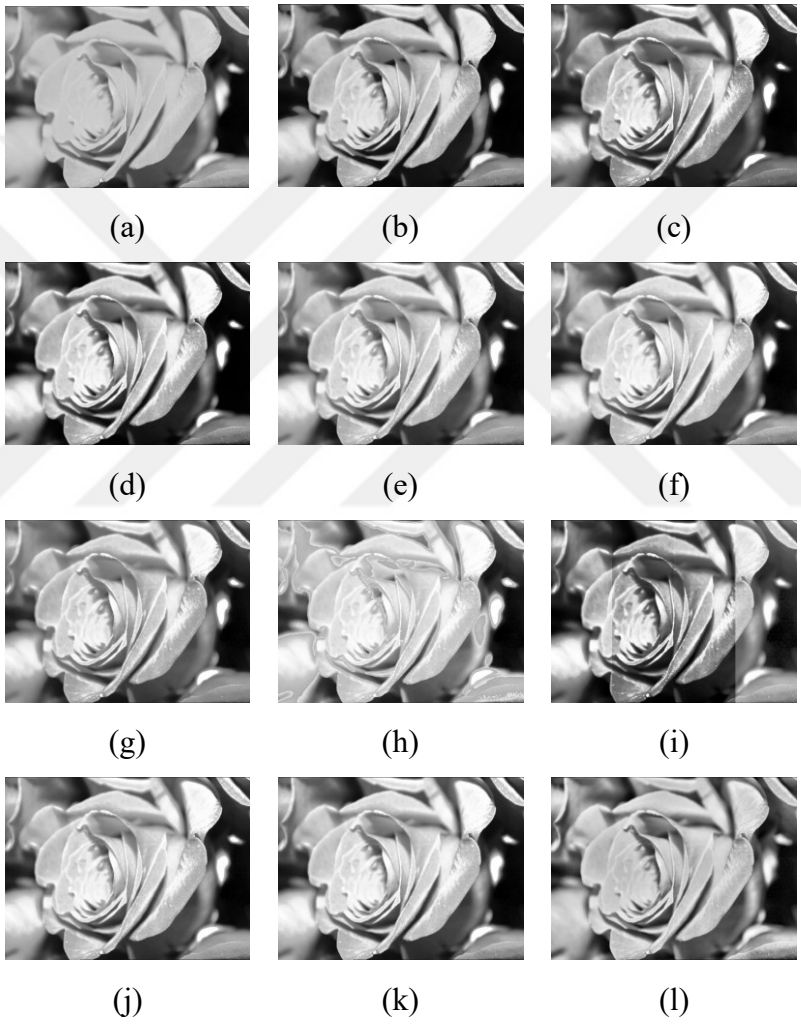
Görüntü	Şekil 56l	Şekil	Şekil 56n	Şekil 56o	Şekil 56p	Şekil 56q	Şekil 56r	Şekil 56s	Şekil 56t	Şekil 57a
Orijinal	0.18	0.3	0.4	0.3	0.25	0.25	0.62	0.2	0.51	0.23
SHE	0.11	0.12	0.19	0.07	0.02	0.07	0.1	0.12	0.36	0.05
WHE	0.05	0.12	0.18	0.05	0.01	0.01	0.02	0.05	0.35	0.05
BBHE	0.09	0.16	0.12	0.17	0.06	0.15	0.16	0.15	0.47	0.1
DSIHE	0.18	0.36	0.21	0.21	0.02	0.13	0.44	0.2	0.58	0.1
MMBEB	0.18	0.18	0.22	0.19	0.02	0.13	0.36	0.13	0.5	0.1
WMSHE	0.14	0.21	0.37	0.3	0.04	0.24	0.63	0.05	0.55	0.17
RSWHE	0.37	0.5	0.2	0.41	0.24	0.1	0.33	0.38	0.53	0.16
RMSHE	0.04	0.15	0.12	0.03	0.01	0.01	0.03	0.04	0.35	0.03
RSIHE	0.18	0.41	0.12	0.2	0.02	0.11	0.38	0.18	0.55	0.08
CLAHE	0.18	0.32	0.36	0.22	0.11	0.13	0.38	0.19	0.43	0.18
DHE	0.18	0.32	0.36	0.22	0.11	0.13	0.38	0.19	0.43	0.18
MPHE	0.04	0.12	0.17	0.03	0.01	0.01	0.04	0.05	0.35	0.05
HVS_HE	0.16	0.23	0.15	0.09	0.02	0.03	0.17	0.15	0.41	0.11
PLHE	0.24	0.29	0.33	0.24	0.16	0.18	0.58	0.21	0.56	0.13

Tablo 5'in devamı

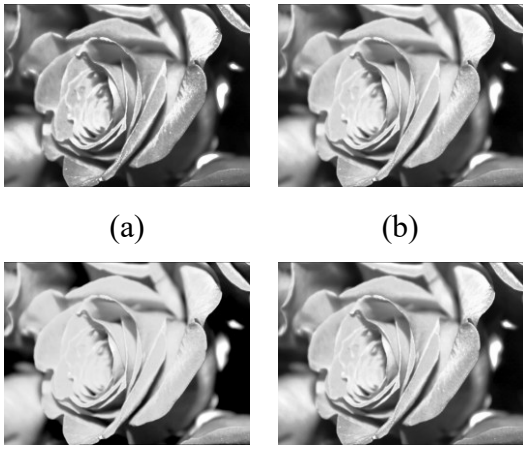
Görüntü	Şekil 57b	Şekil 57c	Şekil 57d	Şekil 57e	Şekil 57f	Şekil 57g	Şekil 57h	Şekil 57i	Şekil 57j
Orijinal	0.62	0.38	0.43	0.21	0.2	0.44	0.18	0.34	0.42
SHE	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	0.14	0.14	0.21	0.03
WHE	0.08	0.02	0.04	0.01	0.01	0.14	0.14	0.12	0.02
BBHE	0.05	0.18	0.08	0.1	0.08	0.19	0.17	0.19	0.11
DSIHE	0.05	0.29	0.03	0.07	0.07	0.32	0.14	0.16	0.24
MMBEB	0.25	0.26	0.11	0.07	0.06	0.28	0.14	0.34	0.19
WMSHE	0.42	0.39	0.23	0.12	0.1	0.44	0.15	0.23	0.33
RSWHE	0.19	0.16	0.2	0.17	0.29	0.44	0.28	0.13	0.43
RMSHE	0.06	0.02	0.03	0.01	0.01	0.14	0.14	0.11	0.01
RSIHE	0.09	0.25	0.05	0.06	0.07	0.29	0.14	0.15	0.23
CLAHE	0.45	0.21	0.22	0.09	0.09	0.33	0.16	0.29	0.25
DHE	0.45	0.21	0.22	0.09	0.09	0.33	0.16	0.29	0.25
MPHE	0.08	0.02	0.04	0.01	0.01	0.14	0.14	0.11	0.02
HVS_HE	0.3	0.07	0.14	0.01	0.01	0.15	0.14	0.23	0.07
PLHE	0.59	0.31	0.36	0.12	0.12	0.38	0.21	0.46	0.35

Elde edilen skorlar incelendiğinde, SHE yönteminin genel performans açısından başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Sonuçların daha anlaşılır biçimde sunulabilmesi amacıyla, Tablo 4'te belirtilen optimal ortanca (m) değerine bağlı olarak yöntemler arası

değişimi göstermek üzere Şekil 67 ve Şekil 68, ilgili görüntülerin histogramlarındaki değişimi göstermek amacıyla Şekil 69, Şekil 70 ve Şekil 71, ayrıca daha önce açıklanan diğer metrikler kullanılarak tüm yöntemlerle karşılaştırılmasını sunmak amacıyla ise Şekil 72'de verilmiştir. Karşılaştırmalar Şekil 56l üzerinden gösterilmiştir. Tüm görseller üzerinden gösterilmemesinin sebebi tezin okunabilirliğinin azalmamasıdır. Bu görseller sayesinde, yöntemlerin performans farkları hem nicel hem de görsel olarak daha açık biçimde ortaya konulmuştur.



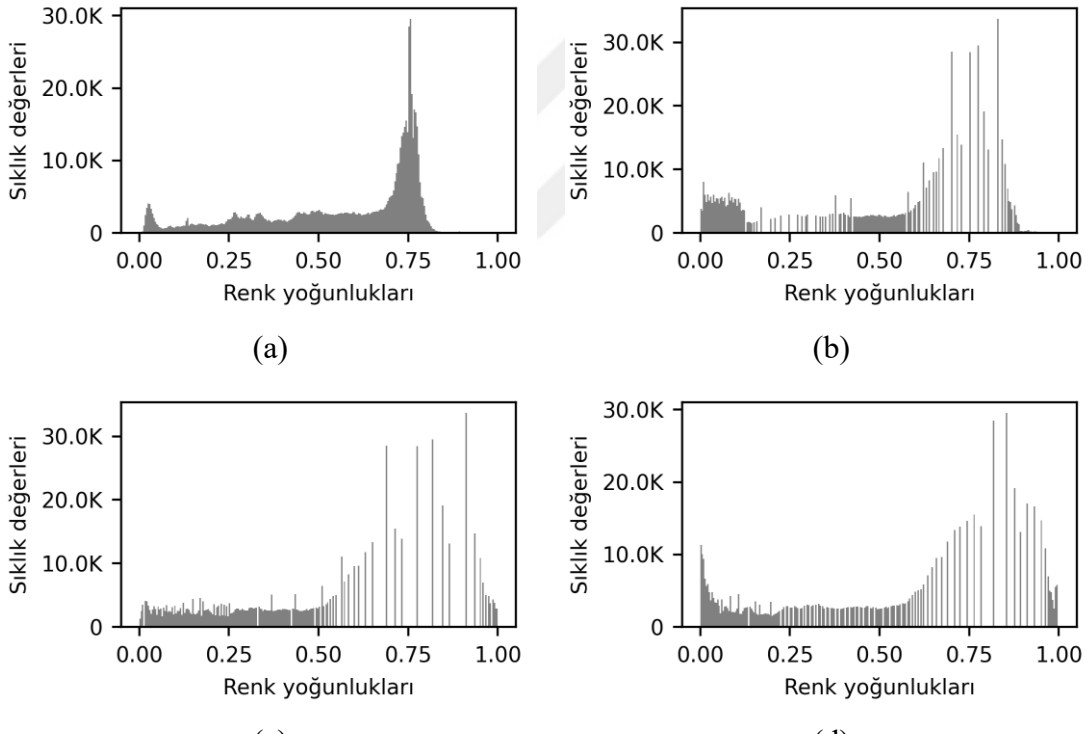
Şekil 67. (a) Orijinal Görüntü (Şekil 56l) ; (b) SHE ($m = 0.67$); (c) HE; (d) WHE; (e) BBHE; (f) DSIHE; (g) MMBEBHE; (h) WMSHE; (i) RSWHE; (j) RMSHE; (k) RSIHE; (l) CLAHE;



(a) (b)

(c) (d)

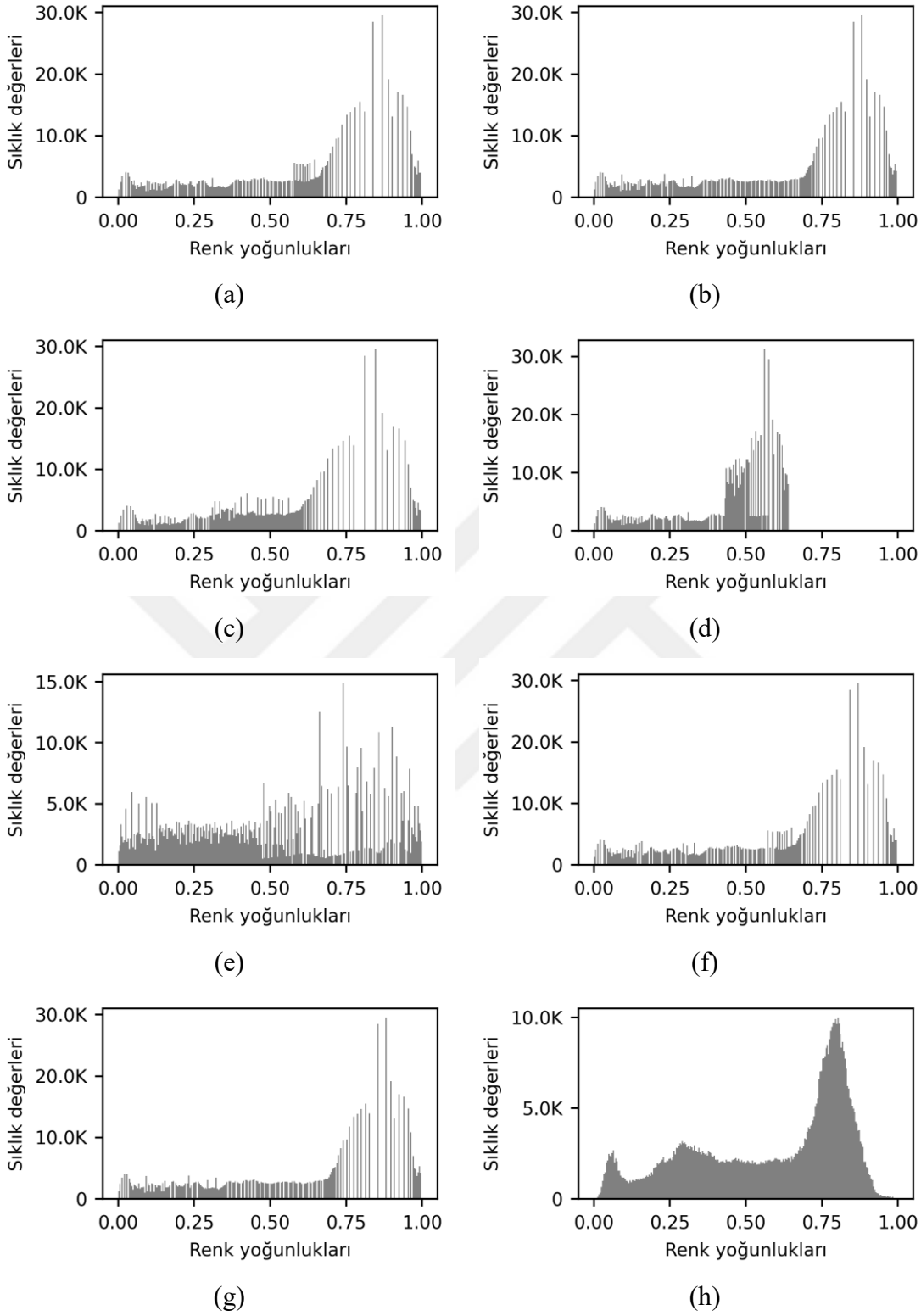
Şekil 68. (a) DHE; (b) MPHE; (c) HVS_HE; (d) PLHE



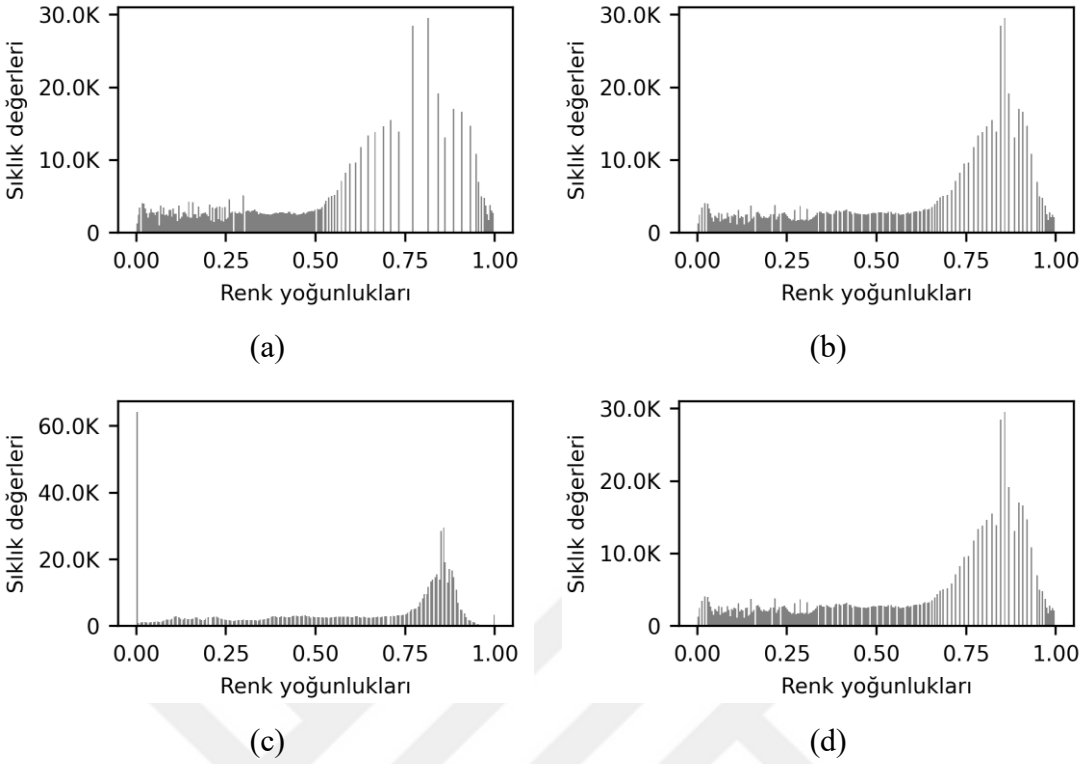
(a) (b)

(c) (d)

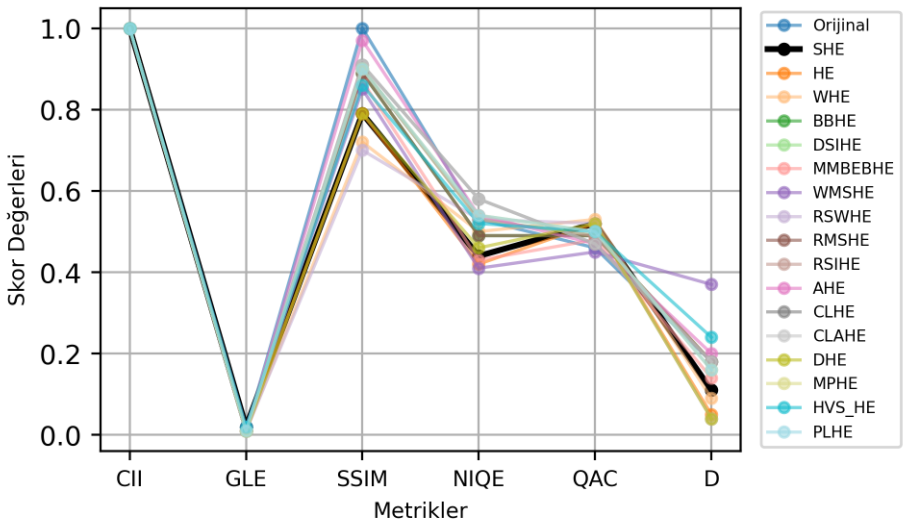
Şekil 69. (a) Orijinal Görüntü (Şekil 56l); (b) SHE ($m = 0.67$); (c) HE; (d) WHE



Şekil 70. Şekil 69'un devamı; (a) BBHE; (b) DSIHE; (c) MMBEBHE; (d) WMSHE; (e) RSWHE; (f) RMSHE; (g) RSIHE; (h) CLAHE



Şekil 71. Şekil 69'un devamı; (a) DHE; (b) MPHE; (c) HVS_HE; (d) PLHE



Şekil 72. Şekil 67 ve Şekil 68'de ki görüntülere ait skor değerlerinin eğrisi

Şekil 72'de sunulan metrik bazlı sonuçlar incelendiğinde, SHE yönteminin görüntü iyileştirme açısından yüksek düzeyde bir başarı sağladığı açıkça görülmektedir. Özellikle SSIM metriğinde 1'e oldukça yakın bir değer elde edilmesi, yöntemin görüntünün yapısal bütünlüğünü koruma konusunda oldukça etkili olduğunu ve detay kaybı oluşturmadan

iyileştirme gerçekleştirdiğini göstermektedir. NIQE metriğinde elde edilen değer, SHE yönteminin algısal kalite açısından da başarılı bir performans sunduğunu ortaya koymaktadır. QAC metriğinde yaklaşık 0.50 seviyesinde bir sonucun elde edilmesi, kontrast artırımı ile görsel doğallık arasında başarılı bir dengenin kurulduğunu göstermektedir. Ayrıca, uyuşmazlık ölçüsü değerinin görece düşük seviyede kalması, gri seviye dağılımının doğal yapısından aşırı sapma göstermediğini ve histogramın kontrollü bir biçimde düzenlendiğini ortaya koymaktadır. Diğer histogram eşitleme yöntemleri incelendiğinde, bazı yöntemlerin belirli metriklerde daha yüksek değerler üretebildiği görülmekle birlikte, SHE yönteminin tüm metrikler genelinde tutarlı, dengeli ve kararlı bir performans sergilediği, özellikle yapısal benzerlik, algısal kalite ve dağılım korunumu kriterlerini birlikte sağlayabilen nadir yöntemlerden biri olduğu anlaşılmaktadır. Bu yönüyle SHE, yalnızca tek bir metriğe bağlı kalmadan, çok ölçütlü başarı açısından güçlü bir iyileştirme yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır.

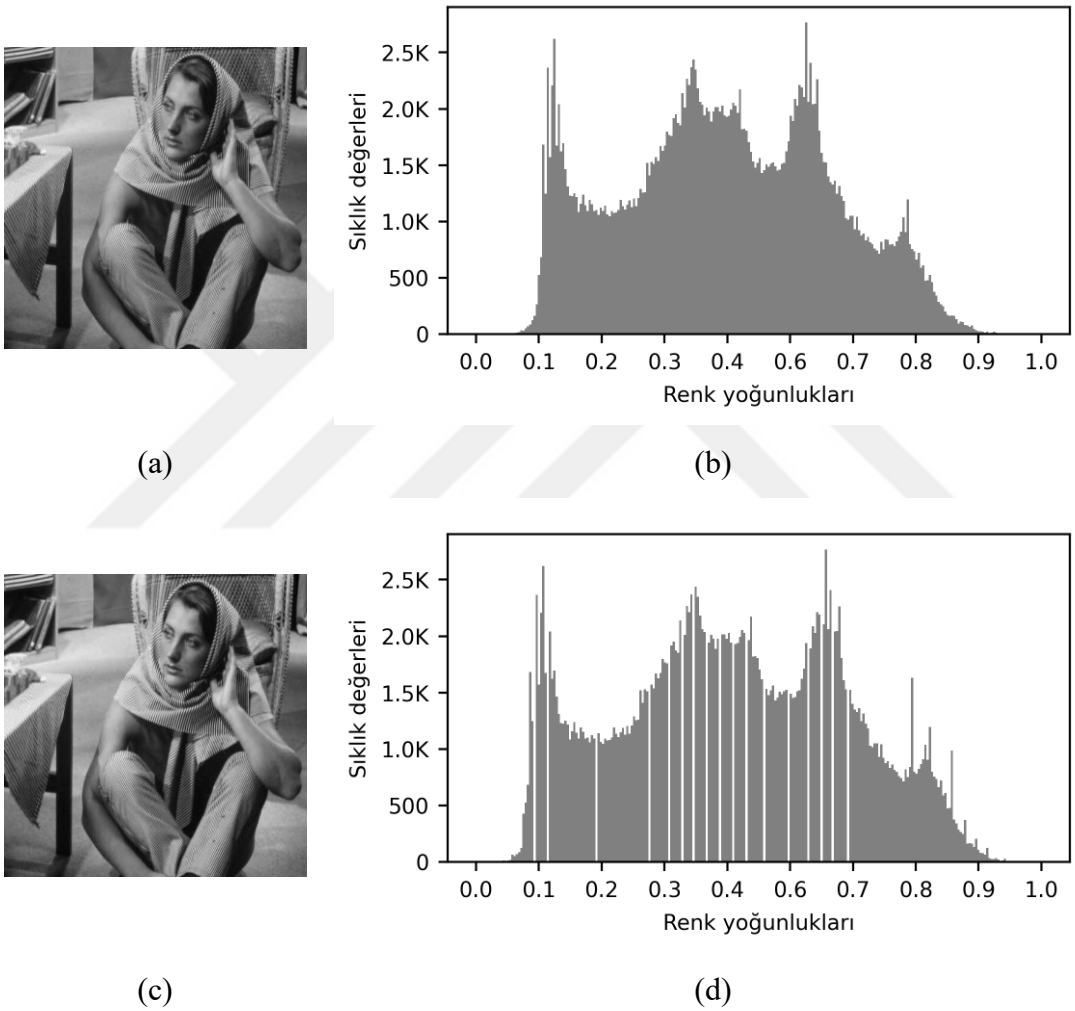
3.2. Esnek Histogram Eşitleme (SOHE) Bulguları

Bu bölümde, önerilen Esnek Histogram Eşitleme yönteminin, çeşitli metrikler kullanılarak diğer yöntemlerle karşılaştırılması ve performansının örnek görüntüler üzerinden değerlendirilip yorumlanmasına yer verilmiştir.

Esneklik parametresi (λ) kullanılarak gerçekleştirilen SOHE, görüntüde yoğun veya kümeli bölgelerin bulunması durumunda, uygulanan işlemler sonucu görüntüde ortaya çıkan problemleri engellemek amacıyla önerilmiştir ve SHE'de olduğu gibi yoğun bölgelerin daha düşük yoğunluktaki bölgelerini baskılamadan ve gereksiz geniş bir aralığa yayılmadan histogram eşitleme gerçekleştirmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla kullanılan esneklik parametresi yöntemin başarısı için önemli bir kriterdir. Bu parametrenin belirlenmesi için renk yoğunlukları [0,1] aralığında olan 30 görüntünün her biri için 10 farklı versiyon oluşturulmuştur. Bu versiyonlar parametrenin 0 ile 1 aralığında 0.1'er artarak elde edilmesi ile oluşan görüntülerdir. Elde edilen her bir görüntü arasından en iyi görüntüyü seçebilmek amacıyla, rastgele seçilmiş 62 kişiye anket uygulanmış ve en çok seçilen parametreler ve bu parametrelere ilişkin uyuşmazlık ölçüleri üzerinden model kurularak parametre tahmini gerçekleştirilmiştir. Modelde uyuşmazlık ölçüsünün kullanılmasının sebebi, yoğun bölgelerin mevcutluğunun görüntünün dağılımını etkilemesidir. Bu sebeple dağılımlarına göre seçilen 3 görüntü için SOHE'nin performansı, parametrenin 0 ile 1 aralığında 0.2'şer

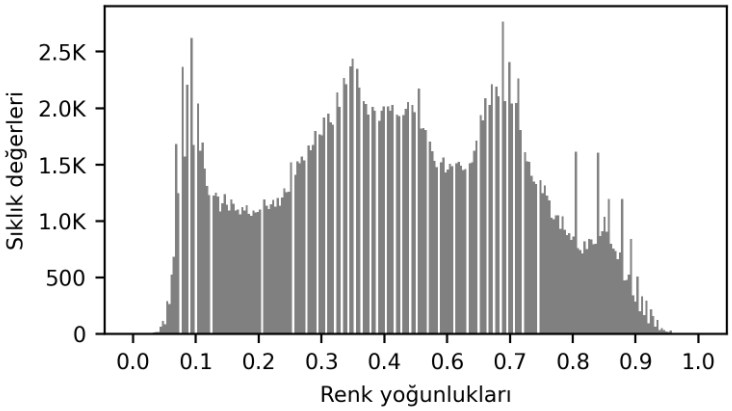
değişmesiyle değerlendirilmiştir. Temsil olarak seçilen görüntüler Şekil 58a, Şekil 58c ve Şekil 59a'da verilmiş olup, parametre ve dağılım arasındaki durumu gözlemlemek amacıyla aşağıda açıklanmaktadır.

Düzgün dağılıma yakın dağılıma sahip görüntülerde, görüntü mevcut aralıktaki her yoğunluk değerini hemen hemen içermektedir. Bu amaçla Şekil 58a görüntüsünün esneklik parametresine göre SOHE sonuçları, Şekil 74, Şekil 75 ve Şekil 75'te verilmektedir.



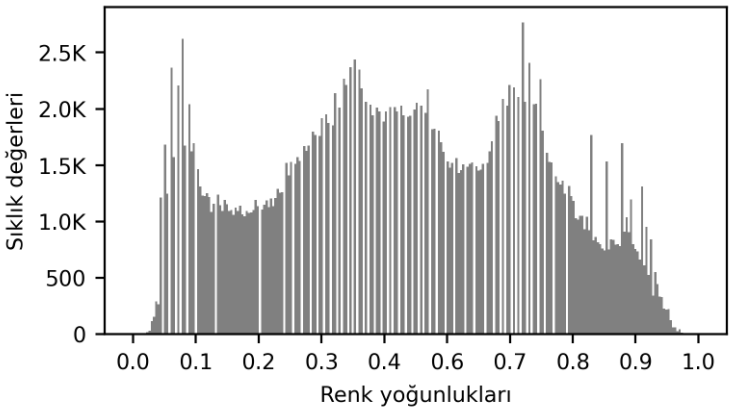
Şekil 73. Esneklik parametresine göre SOHE yönteminin etkisi; (a,b) $\lambda = 0.0$ (Orijinal görüntü); (c,d) $\lambda = 0.2$





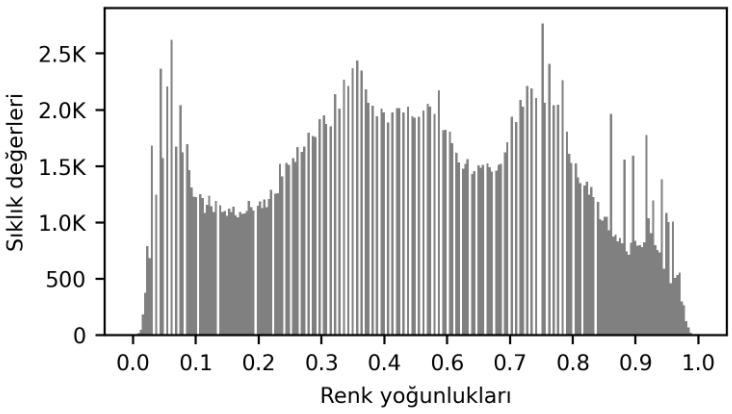
(a) (b)





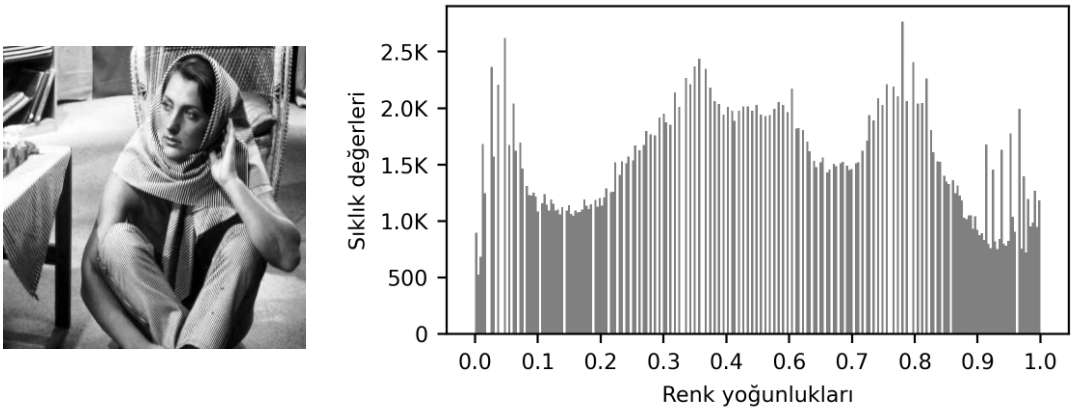
(c) (d)





(e) (f)

Şekil 74. Şekil 73'ün devamı; (a,b) $\lambda = 0.4$; (c,d) $\lambda = 0.6$; (e,f) $\lambda = 0.8$

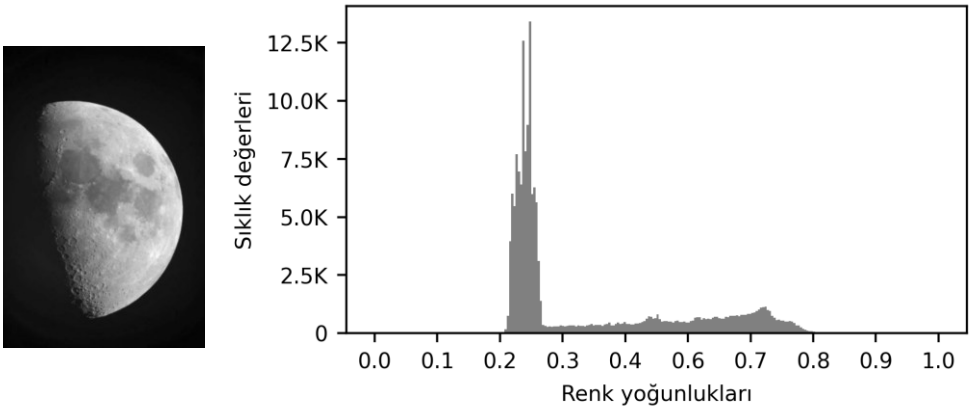


(a) (b)

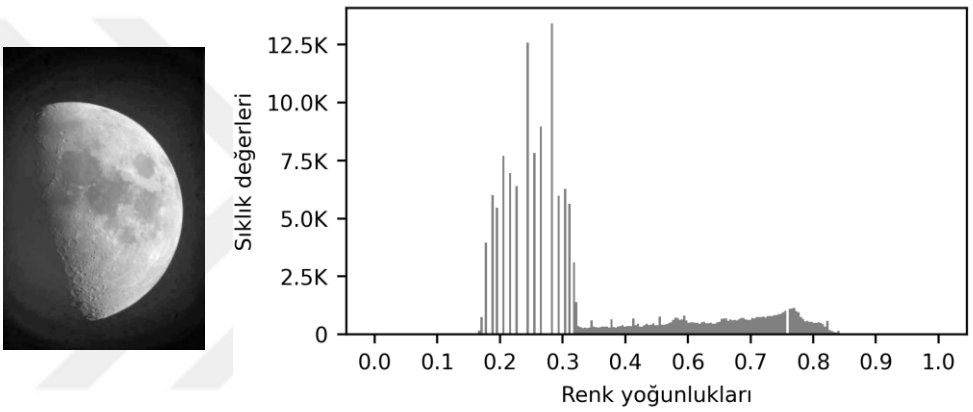
Şekil 75. Şekil 73'ün devamı; (a,b) $\lambda = 1.0$ (HE)

Uyuşmazlık ölçüsü kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda, orijinal görüntünün $(\lambda = 0.0)$ uyuşmazlık ölçüsü 0.21 olarak bulunmuştur. Uyuşmazlık teorisi tanımına göre bu değerin düşük olması, ilgili dağılımın düzgün dağılıma yakın olduğunu göstermektedir. Esneklik parametresine bağlı olarak elde edilen uyuşmazlık ölçüsü değerleri incelendiğinde; $\lambda = 0.2$ için 0.16, $\lambda = 0.4$ için 0.12, $\lambda = 0.6$ için 0.08, $\lambda = 0.8$ için 0.04 ve $\lambda = 1.0$ için 0.01 elde edilmiştir.

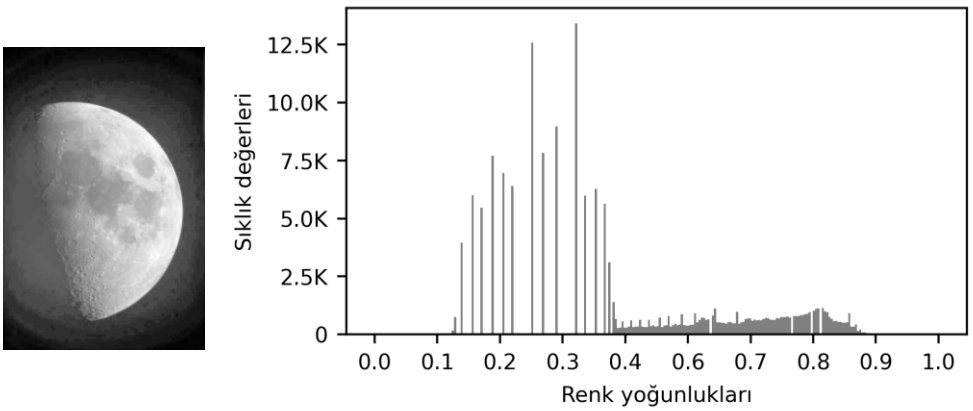
Sağa çarpık dağılıma sahip görüntülerde, görüntü mevcut aralıktaki her yoğunluk değerini içermeyerek düşük renk yoğunluklarında yığılmalarına sahip olmaktadır. Bu amaçla Şekil 58c görüntüsünün simetri noktasına göre SOHE sonuçları, Şekil 76 ve Şekil 77'de verilmektedir.



(a) (b)

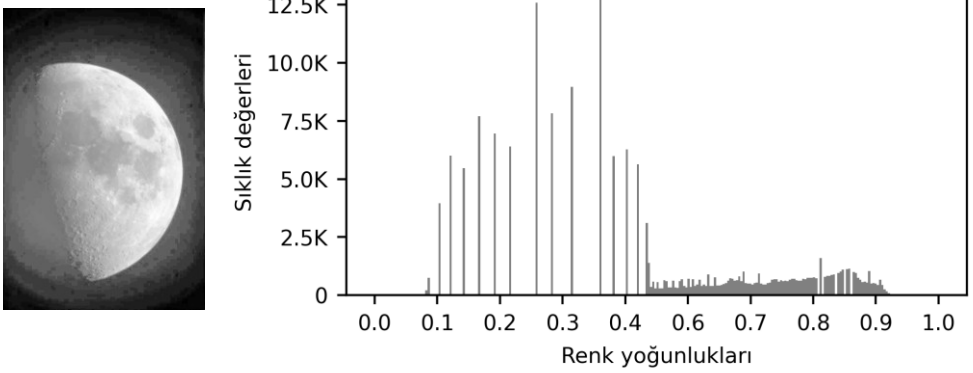


(c) (d)

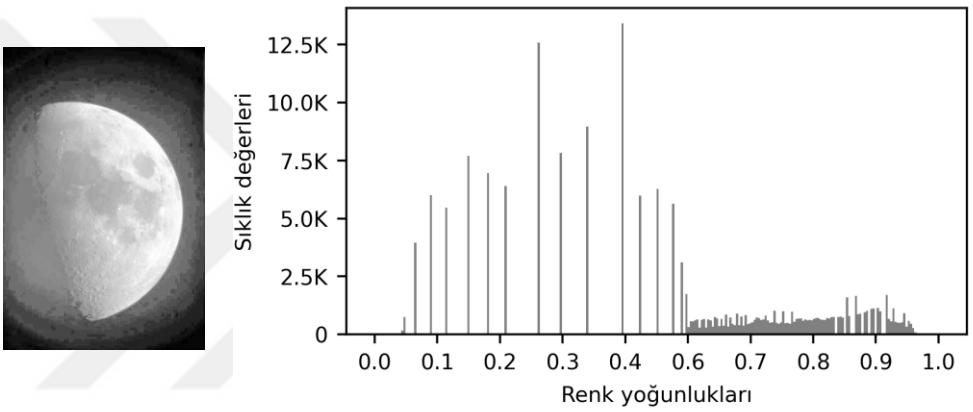


(e) (f)

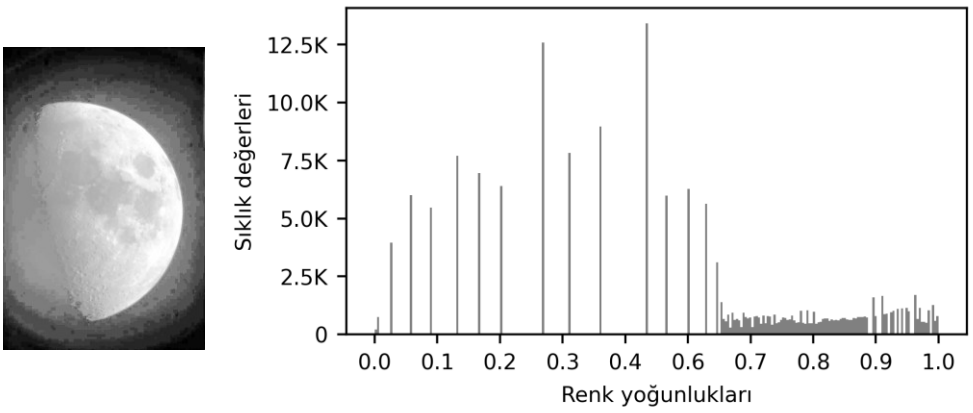
Şekil 76. Esneklik parametresine göre SOHE yönteminin etkisi; (a,b) $\lambda = 0.0$ (Orijinal görüntü); (c,d) $\lambda = 0.2$; (e,f) $\lambda = 0.4$



(a) (b)



(c) (d)

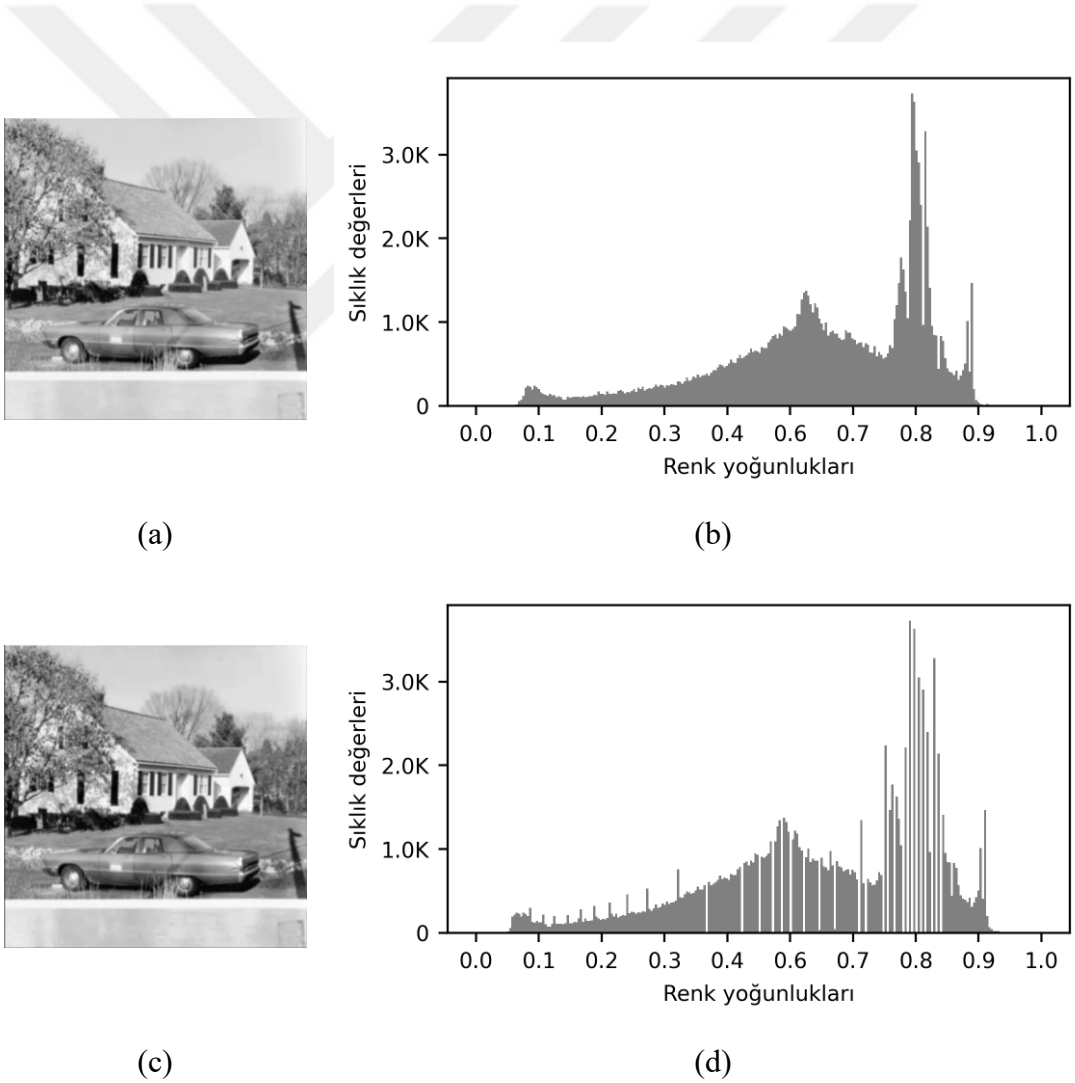


(e) (f)

Şekil 77. Şekil 76'nın devamı; (a,b) $\lambda = 0.6$; (c,d) $\lambda = 0.8$; (e,f) $\lambda = 1.0$ (HE)

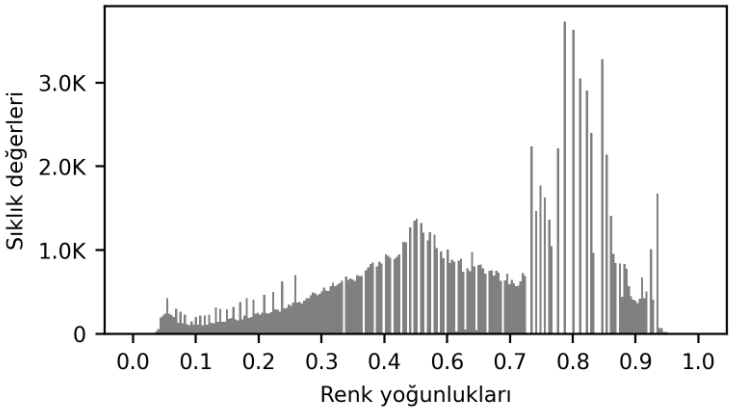
Uyuşmazlık ölçüsü kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda, orijinal görüntünün ($\lambda = 0.0$) uyuşmazlık ölçüsü 0.50 olarak bulunmuştur. Uyuşmazlık teorisi tanımına göre bu değerin yüksek olması, ilgili dağılımın düzgün dağılıma uzak olduğunu göstermektedir. Esneklik parametresine bağlı olarak elde edilen uyuşmazlık ölçüsü değerleri incelendiğinde; $\lambda = 0.2$ için 0.35, $\lambda = 0.4$ için 0.23, $\lambda = 0.6$ için 0.14, $\lambda = 0.8$ için 0.06 ve $\lambda = 1.0$ için 0.08 elde edilmiştir.

Sola çarpık dağılıma sahip görüntülerde, görüntü mevcut aralıktaki her yoğunluk değerini içermeyerek yüksek renk yoğunluklarında yığılmalarına sahip olmaktadır. Bu amaçla Şekil 59a görüntüsünün simetri noktasına göre SOHE sonuçları, Şekil 78, Şekil 79 ve Şekil 80'de verilmektedir.



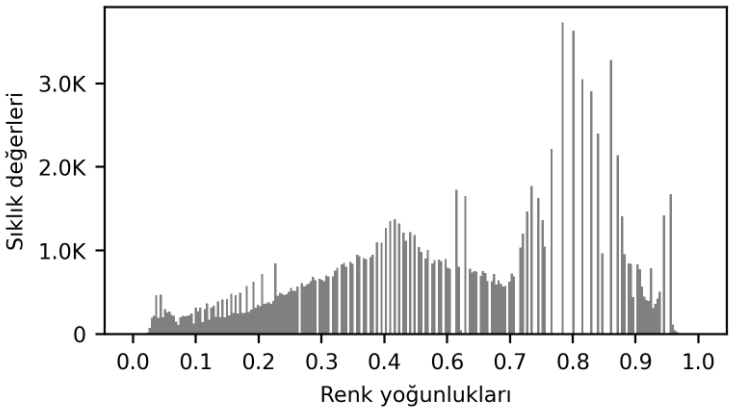
Şekil 78. Esneklik parametresine göre SOHE yönteminin etkisi; (a,b) $\lambda = 0.0$ (Orijinal görüntü); (c,d) (a,b) $\lambda = 0.2$





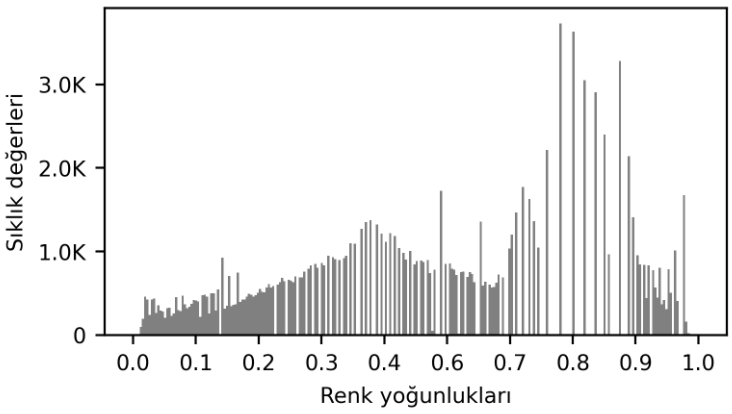
(a) (b)





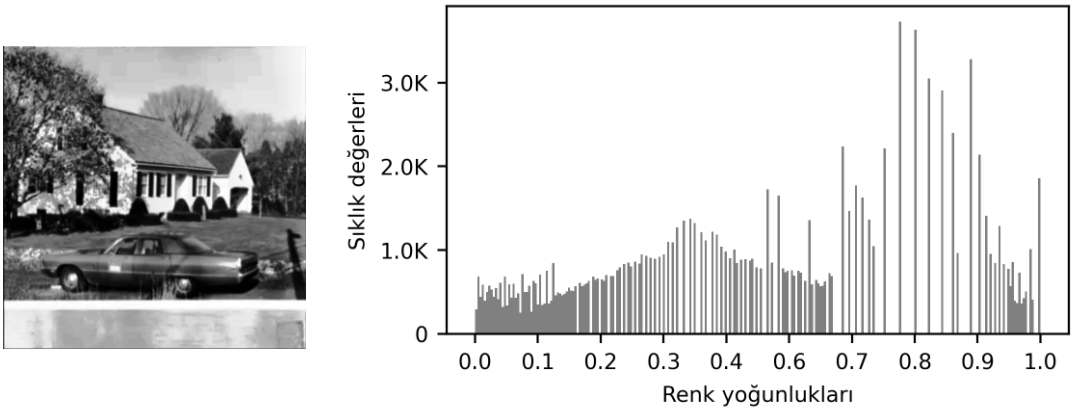
(c) (d)





(e) (f)

Şekil 79. Şekil 78'in devamı; (a,b) $\lambda = 0.4$; (c, d) $\lambda = 0.6$; (e,f) $\lambda = 0.8$



(a) (b)

Şekil 80. Şekil 78'in devamı; (a,b) $\lambda = 1.0$ (HE)

Uyuşmazlık ölçüsü kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda, orijinal görüntünün $(\lambda = 0.0)$ uyuşmazlık ölçüsü 0.30 olarak bulunmuştur. Uyuşmazlık teorisi tanımına göre bu değerin yüksek olması, ilgili dağılımın düzgün dağılıma uzak olduğunu göstermektedir. Esneklik parametresine bağlı olarak elde edilen uyuşmazlık ölçüsü değerleri incelendiğinde; $\lambda = 0.2$ için 0.23, $\lambda = 0.4$ için 0.17, $\lambda = 0.6$ için 0.11, $\lambda = 0.8$ için 0.05 ve $\lambda = 1.0$ için 0.02 elde edilmiştir.

Dağılıma göre elde edilen görüntüler ve ilgili uyuşmazlık ölçüleri incelendiğinde, sunulan temsili görüntülerde en düşük uyuşmazlık ölçüsü hep HE uygulandıktan sonra yani $\lambda = 1.0$ iken elde edilmiştir. Ancak görüntüler incelendiğinde, düzgün dağılıma yakın görüntü için Şekil 73 incelendiğinde, renk yoğunluklarının zaten geniş bir aralıkta olduğu ($\lambda = 1.0$ olduğu durum) ve HE sonucu ($\lambda = 1$, Şekil 75) görüntüde istenmeyen durumların olmadığı gözlemlenmektedir. Dolayısıyla görüntünün orijinalinde yığılmalar olmadığı için, HE görüntünün renk yoğunluklarında gereksiz açılmalar ve görüntüde gereksiz düşük veya yüksek parlaklık oluşturmamıştır. Ancak sağa çarpık ve sola çarpık dağılımlara sahip olan görüntülerin durumları incelendiğinde HE'nin görüntülerin yoğun bölgelerinde gereksiz açılmalar oluşturduğu ve görüntüde ani karanlık veya ani aydınlık bölgeleri artırdığı görülmektedir. Ancak buna rağmen en uygun uyuşmazlık ölçüsü $\lambda = 1.0$ iken elde edilmiştir. SOHE, bu durumun böyle olmaması gerektiğini ve histogramın tamamen aralığa yayılmasının kontrast artırmak olmadığını savunmaktadır. Bu sebeple λ parametresi sırasıyla $0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ seçilerek görüntülerin versiyonları oluşturulmuş ve 62 kişiye yüz yüze anket yoluyla her bir görüntünün en iyi esneklik

parametresinin ait olduğu görüntüyü seçmelerini isteyen deneysel bir anket formu kullanılmıştır. Sunulan görüntüler, karşılaştırmanın adil yapılabilmesi için aynı çözünürlükte ve aynı ekranda gösterilmiştir. Katılımcıların bağımsız ve bireysel tercihleri esas alınmış olup, değerlendirmeler herhangi bir yönlendirme yapılmaksızın gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sayısal puanlama yerine, her bir görüntünün katılımcılar tarafından tercih edilme sıklığı esas alınmıştır. Katılımcılara anket uygulanmadan önce kontrast hakkında gerekli bilgilendirmeler yapılmıştır.

Anket sonucunda elde edilen veriler genel olarak uyuşmazlık ölçüsü üzerinden değerlendirilmiş ve modellenmiş olup, diğer metrikler sadece karşılaştırma için kullanılmıştır. Tablo 6, katılımcıların görüntülerde λ parametrelerinin tercih edilme sayısını ve ilgili D_I değerini vermektedir.

Tablo 6. Anket sonuçlarına göre parametrelerin tercih edilme sayısı

	D_I	λ 0.0	λ 0.1	λ 0.2	λ 0.3	λ 0.4	λ 0.5	λ 0.6	λ 0.7	λ 0.8	λ 0.9	λ 1.0
Şekil 56a	0.19	0	0	0	0	0	3	5	19	28	3	4
Şekil 56b	0.2	11	3	4	9	8	5	5	6	7	1	3
Şekil 56c	0.67	0	2	0	0	1	3	5	16	16	6	13
Şekil 56d	0.4	19	4	8	8	10	5	4	3	1	0	0
Şekil 56e	0.55	3	1	5	1	5	9	6	7	15	0	10
Şekil 56f	0.15	24	4	5	6	3	4	6	6	1	1	2

Tablo 6'nın devamı

	D_I	λ 0.0	λ 0.1	λ 0.2	λ 0.3	λ 0.4	λ 0.5	λ 0.6	λ 0.7	λ 0.8	λ 0.9	λ 1.0
Şekil 56g	0.34	4	1	7	6	10	15	8	5	2	1	3
Şekil 56h	0.42	1	3	6	8	16	5	8	9	4	1	1
Şekil 56i	0.51	19	3	3	14	10	6	4	1	1	1	0
Şekil 56j	0.48	0	0	2	2	12	5	19	13	6	0	3
Şekil 56k	0.33	4	4	0	4	6	20	5	9	3	2	5
Şekil 56l	0.18	5	1	0	4	0	5	10	9	10	8	10
Şekil 56m	0.3	17	20	8	9	2	1	1	1	2	1	0
Şekil 56n	0.4	2	2	3	3	10	7	7	10	8	3	7
Şekil 56o	0.3	3	2	3	11	10	14	7	6	3	1	2
Şekil 56p	0.25	3	0	7	14	13	5	9	5	3	1	2

Tablo 6'nın devamı

	D_I	λ 0.0	λ 0.1	λ 0.2	λ 0.3	λ 0.4	λ 0.5	λ 0.6	λ 0.7	λ 0.8	λ 0.9	λ 1.0
Şekil 56q	0.25	9	3	4	10	6	8	7	3	7	0	5
Şekil 56r	0.62	3	1	2	5	2	13	10	4	13	5	4
Şekil 56s	0.2	17	7	7	11	6	6	2	4	0	1	1
Şekil 56t	0.51	8	5	4	7	12	11	4	4	3	2	2
Şekil 57a	0.23	4	5	8	11	5	5	5	2	6	4	7
Şekil 57b	0.62	0	0	4	4	5	12	9	11	12	3	2
Şekil 57c	0.38	1	0	4	5	21	18	2	6	2	0	3
Şekil 57d	0.43	0	2	1	8	17	6	10	4	4	3	7
Şekil 57e	0.21	14	1	5	9	10	6	9	4	3	0	1
Şekil 57f	0.2	1	3	3	8	11	8	8	2	8	2	8

Tablo 6'nın devamı

	D_I	λ 0.0	λ 0.1	λ 0.2	λ 0.3	λ 0.4	λ 0.5	λ 0.6	λ 0.7	λ 0.8	λ 0.9	λ 1.0
Şekil 57g	0.44	4	3	4	7	18	12	9	2	2	0	1
Şekil 57h	0.18	21	6	7	4	5	9	4	3	1	1	1
Şekil 57i	0.34	12	1	1	6	10	4	6	6	7	6	3
Şekil 57j	0.42	0	0	2	8	15	16	6	9	4	2	0

Tablo 6'dan elde edilen bilgiler kullanılarak optimal esneklik parametresini tahmin eden model kurmak amaçlanmaktadır. Problemlerin görülme sıklığı dağılıma göre değiştiği için modelde yer alan bağımsız değişkenler girdi görüntüsünün uyuşmazlık değeri (D_I) ve girdi görüntüsü için en çok tercih edilen esneklik parametresidir (λ). Bağımlı değişken ise ilgili esneklik parametresi ile elde edilen çıktı görüntüsünün uyuşmazlık değeridir (D_J). Sonuç olarak elde edilen veri seti Tablo 7'de sunulmaktadır.

Tablo 7. Esneklik parametresi tahmini için anketten elde edilen veri seti

D_I	λ_I	D_J	D_I	λ_I	D_J	D_I	λ_I	D_J
0.19	0.8	0.03	0.34	0.5	0.16	0.3	0.1	0.25
0.2	0	0.2	0.42	0.4	0.25	0.4	0.4	0.24
0.67	0.7	0.57	0.51	0	0.51	0.3	0.5	0.14
0.4	0	0.4	0.48	0.6	0.14	0.25	0.3	0.18
0.55	0.8	0.07	0.33	0.5	0.11	0.25	0.3	0.19
0.15	0	0.15	0.18	0.6	0.08	0.62	0.5	0.34

Tablo 7'nin devamı

D_I	λ_I	D_J	D_I	λ_I	D_J	D_I	λ_I	D_J
0.2	0	0.2	0.62	0.5	0.31	0.38	0.4	0.23
0.51	0.4	0.42	0.43	0.4	0.24	0.42	0.5	0.21
0.23	0.3	0.09	0.18	0	0.18	0.2	0.4	0.12
0.21	0	0.21	0.44	0.4	0.26	0.34	0	0.34

Elde edilen veri seti %20 test ve %80 eğitim verisi olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Eğitim veri seti üzerinde eğitim gerçekleştirilmiş ve rastgele orman regresyon modeli eğitilmiştir. Rastgele orman modeli doğrusal katsayılar üretmemekte olup, karar ağaçlarına dayalı yapısı gereği değişkenlerin hedef çıktı üzerindeki görece etkisi öznitelik önemi üzerinden değerlendirilmiştir. Rastgele orman regresyon modeli, doğrusal bir ilişki varsayımı içermemesi ve doğrusal katsayılar üretmemesi nedeniyle, giriş değişkenleri ile hedef çıktı arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilmektedir. Elde edilen öznitelik önemi değerleri, optimizasyon sürecinde parametre değişkeninin belirleyici bir role sahip olduğunu göstermiştir. Model gereğince, orijinal uyuşmazlık ölçüsünün değeri 0.66 iken, esneklik parametresinin önemi 0.33 elde edilmiştir. Özetle orijinal uyuşmazlık ölçüsünün değerinin işlem sonrası skor üzerindeki etkisinin, esneklik parametresinin etkisine kıyasla daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir.

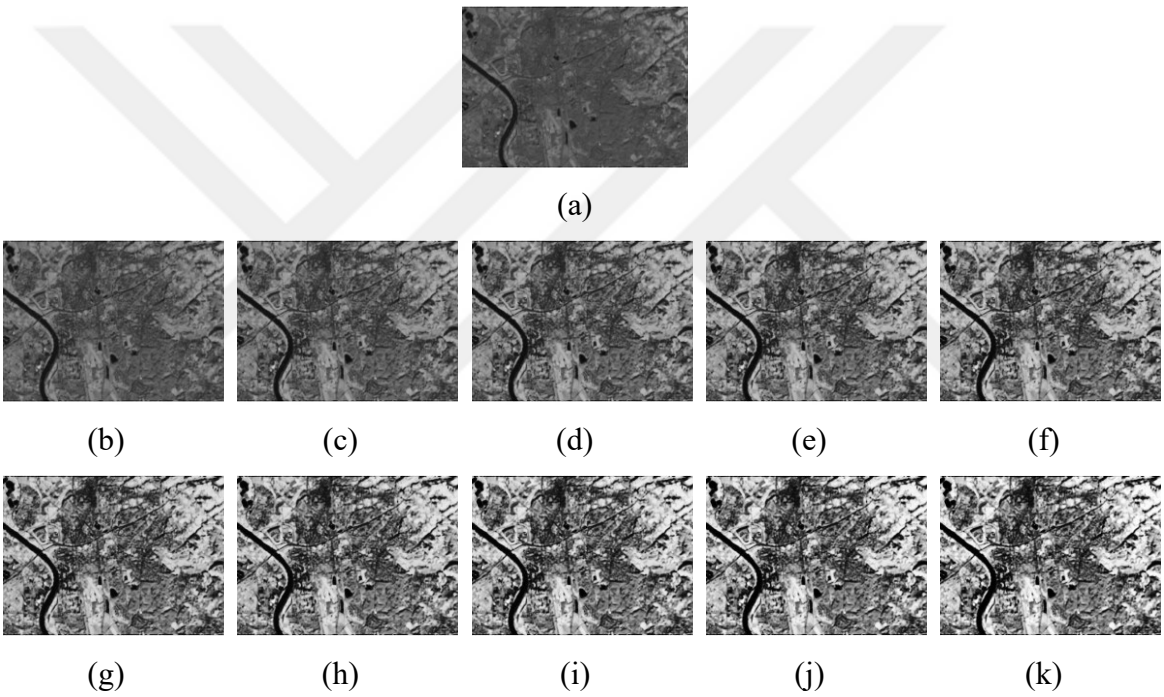
Eğitilen modelin başarımı test veri seti üzerinden değerlendirilmiş ve belirleme katsayısı (R^2) değeri 0.68, hata ortalama karesi (MSE) 0.005 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, modelin işlem sonrası skor değişimini orta düzeyde bir doğrulukla tahmin edebildiğini göstermektedir.

Eğitilen regresyon modeli kullanılarak, parametre taranmış ve her bir görüntü için işlem sonrası skor değerini minimize eden optimum parametre değeri belirlenmiştir. Bu işlem sırasında, sabit tutulan orijinal uyuşmazlık değeri için farklı parametre değerleri modele giriş olarak verilmiş ve karşılık gelen tahmini skor değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen tahmini skorlar arasından en küçük değeri üreten parametre, ilgili görüntü için optimum parametre olarak kabul edilmiştir. Modelin orta düzeyde bir tahmin başarımına sahip olması nedeniyle, elde edilen optimum parametre değerleri yaklaşık çözümler olarak değerlendirilmiş olup, model destekli bir parametre seçimi yaklaşımı sunulmuştur. Bu yaklaşım sayesinde, işlem sonrası skorun minimize edilmesi hedeflenmiş ve manuel

parametre seçimine kıyasla daha sistematik ve otomatik bir optimizasyon süreci gerçekleştirilmiştir.

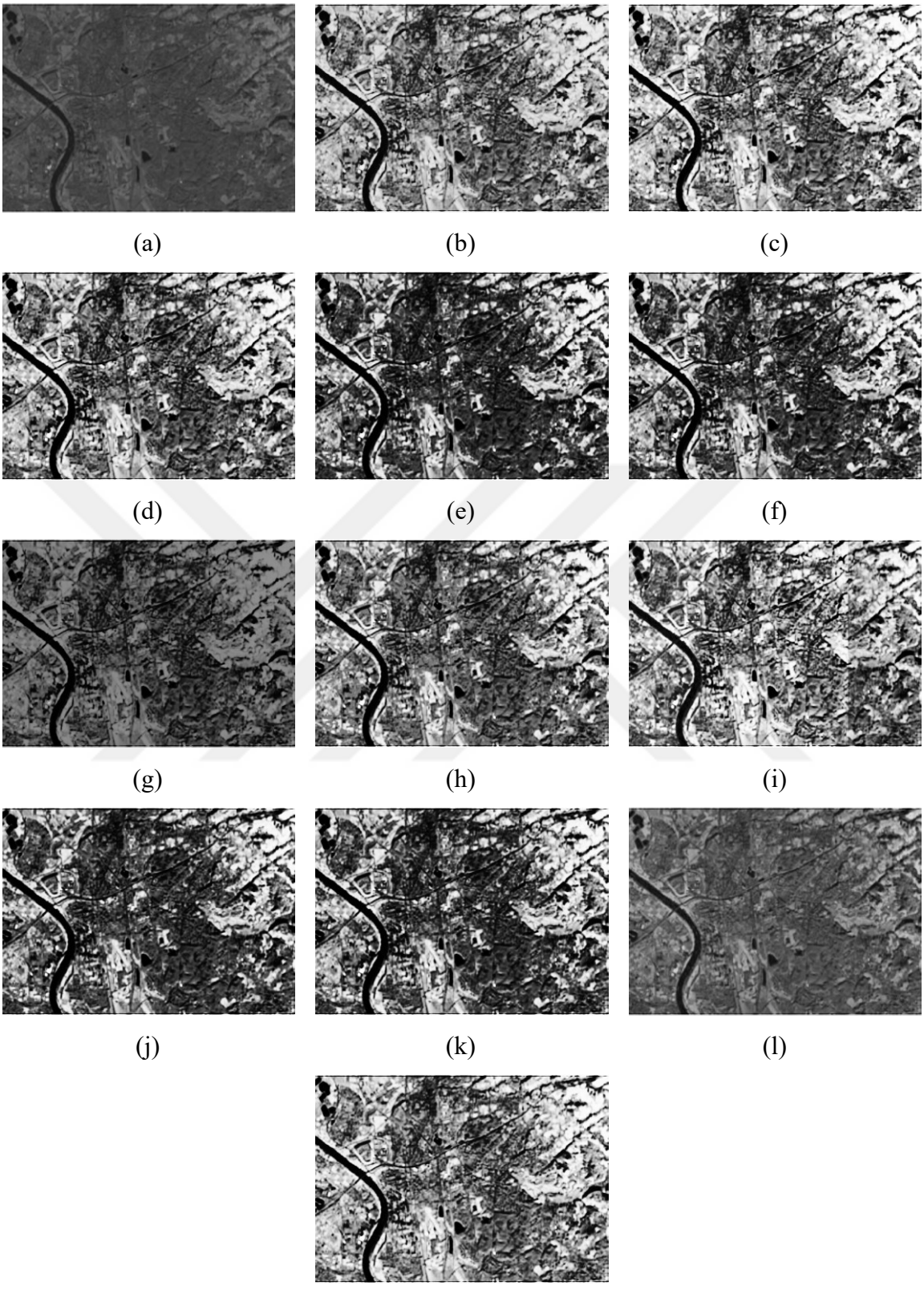
Modelin başarımının görsel olarak daha etkili bir şekilde sunulabilmesi ve tüm görüntülerin ayrı ayrı verilmesiyle tezin okunabilirliğinin düşürülmemesi amacıyla, model performansı ve yöntemler arası karşılaştırma temsili örnekler üzerinden gösterilmiştir. Bu kapsamda, uyuşmazlık ölçüsü 0.52 olan Şekil 56e kullanılarak modelin performansı görsel olarak sunulmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 56h'nin λ parametresi olarak [0,1] aralığında 0.1'er artarak seçilmesiyle SOHE uygulama sonuçları aşağıda verilmektedir.



Şekil 81. Şekil 56e için SOHE sonuçları (a) Orijinal görüntü ($\lambda = 0$); (b) $\lambda = 0.1$; (c) $\lambda = 0.2$; (d) $\lambda = 0.3$; (e) $\lambda = 0.4$; (f) $\lambda = 0.5$; (g) $\lambda = 0.6$; (h) $\lambda = 0.7$; (i) $\lambda = 0.8$; (j) $\lambda = 0.9$; (k) $\lambda = 1$

Anket sonuçlarında Şekil 56e için en çok seçilen esneklik parametresi 0.8 olup, 0.8 parametresine ait görüntünün uyuşmazlık ölçüsü ise 0.07'dir. Geliştirilen model sonucu ise optimal parametre yine 0.8, uyuşmazlık ölçüsü ise 0.16 tahmin edilmiştir. Bu sonuçlara göre, Şekil 56e'nin diğer HE tabanlı yöntemlerle karşılaştırılması ve histogramları aşağıda verilmiştir.



(a) (b) (c)

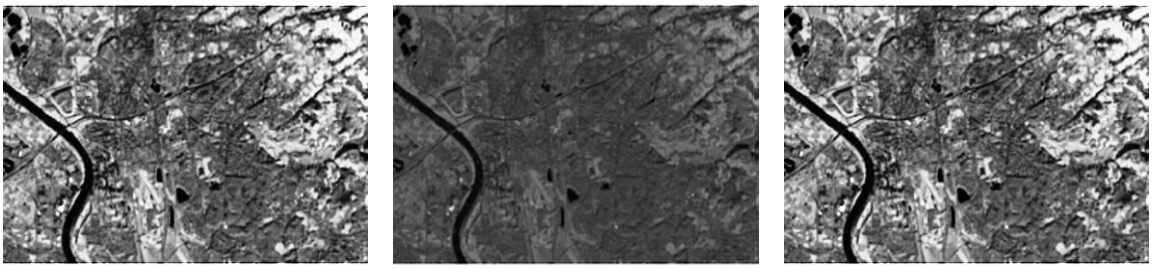
(d) (e) (f)

(g) (h) (i)

(j) (k) (l)

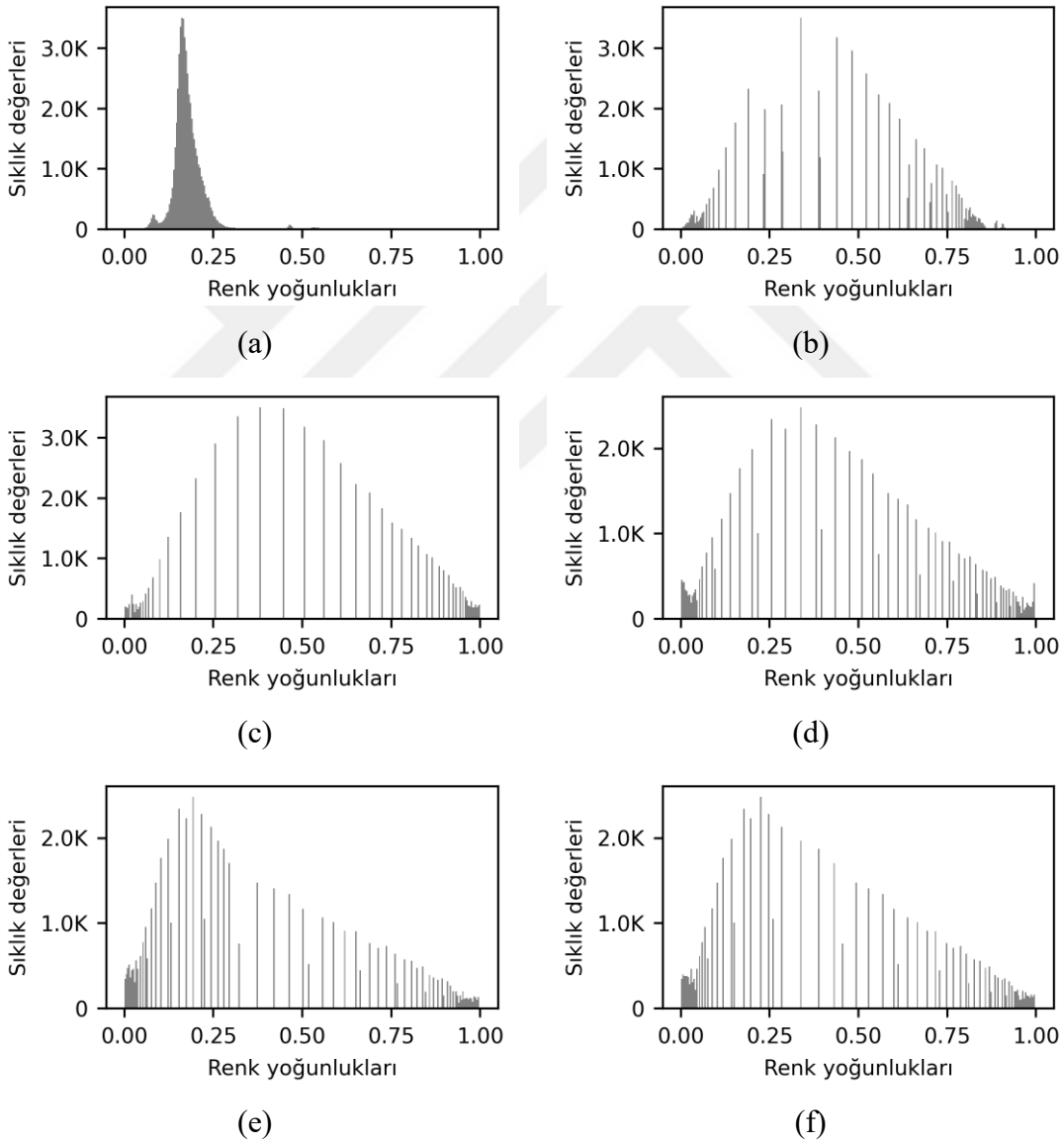
(m)

Şekil 82. (a) Orijinal Görüntü (Şekil 56e) ; (b) SOHE ($\lambda = 0.8$) (c) HE; (d) WHE; (e) BBHE; (f) DSIHE; (g) MMBEBHE; (h) WMSHE; (i) RSWHE; (j) RMSHE; (k) RSIHE; (l) CLAHE; (m) DHE

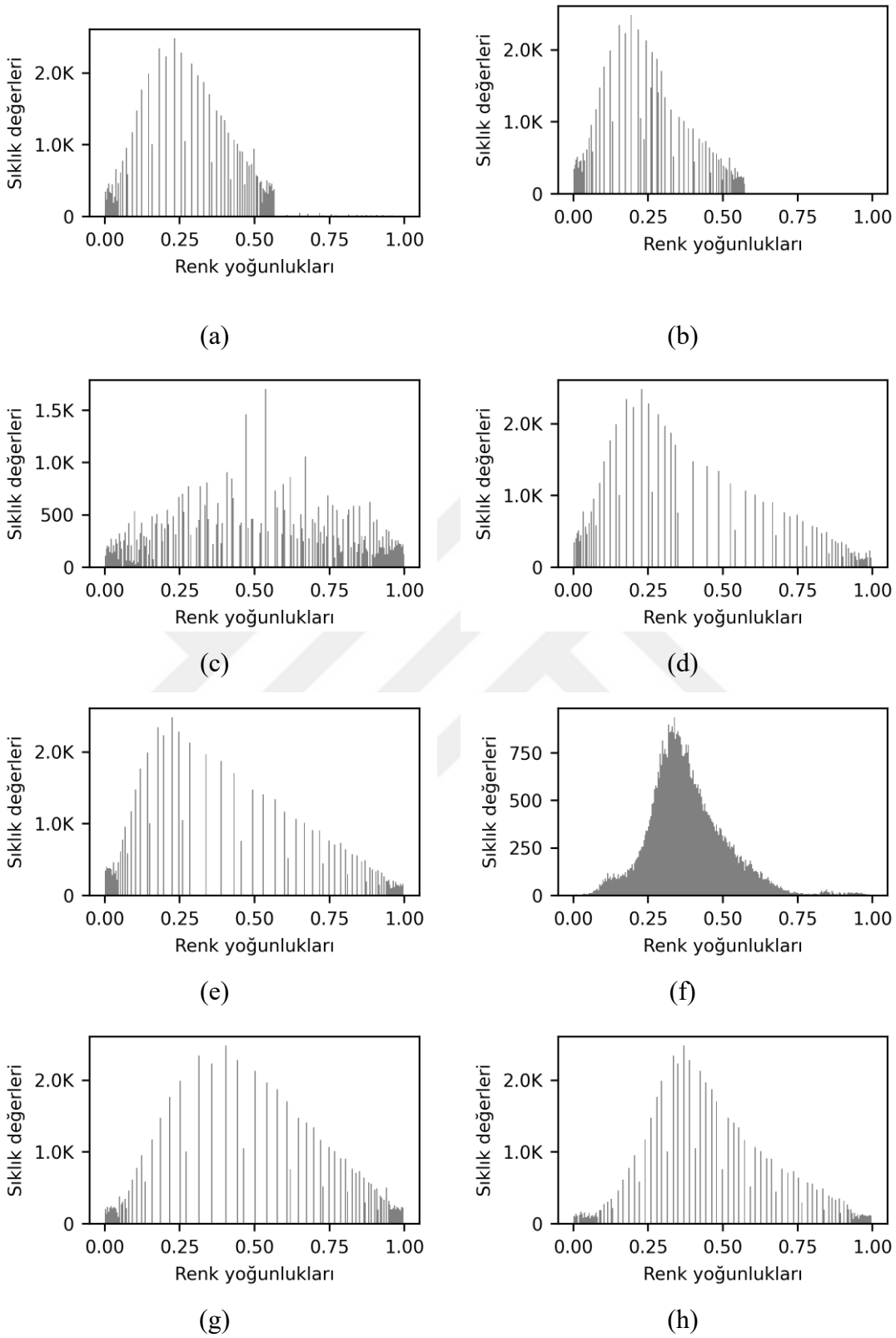


(a) (b) (c)

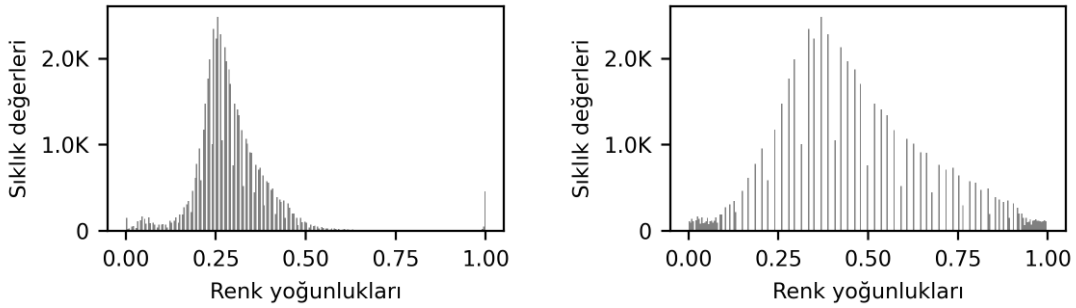
Şekil 83. Şekil 82'in devamı; (a) MPHE; (b) HVS_HE; (c) PLHE



Şekil 84. Şekil 82'de ki görüntülere ait histogramlar; (a) Orijinal Görüntü (Şekil 56e) ; (b) SOHE ($\lambda = 0.8$); (c) HE; (d) WHE; (e) BBHE; (f) DSIHE



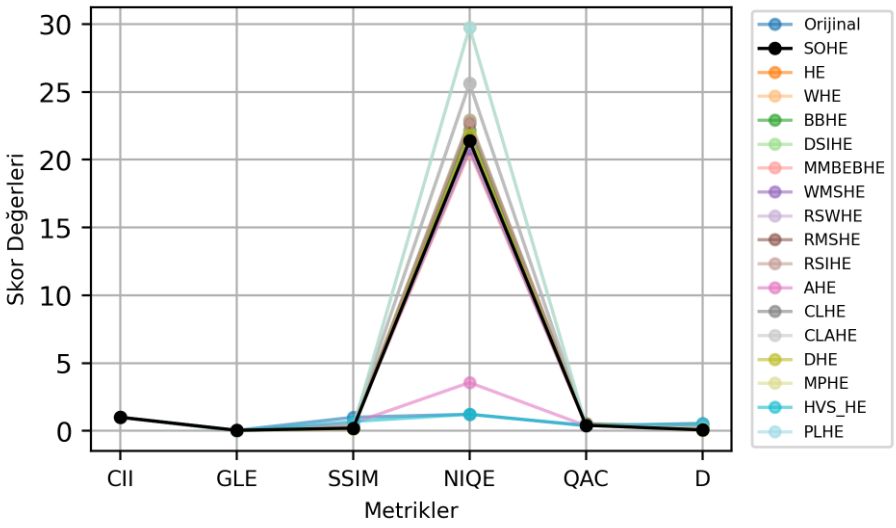
Şekil 85. Şekil 84'ün devamı; (a) MMBEBHE; (b) WMSHE; (c) RSWHE; (d) RMSHE; (e) RSIHE; (f) CLAHE; (g) DHE; (h) MPHE



(a) (b)

Şekil 86. Şekil 84'ün devamı; (a) HVS_HE; (b) PLHE

Yöntemlerin metrikler bakımından Şekil 56e üzerinden karşılaştırılması aşağıda verilmektedir.



Şekil 87. Şekil 82 ve Şekil 83'te ki görüntülere ait skor değerlerinin eğrisi

Şekil 87'de sunulan metrik bazlı karşılaştırma sonuçları incelendiğinde, SOHE yönteminin görüntü iyileştirme açısından genel olarak dengeli ve kararlı bir performans sergilediği açıkça görülmektedir. Özellikle SSIM metriğinde 1'e oldukça yakın bir değer elde edilmesi, SOHE yönteminin görüntünün yapısal bütünlüğünü yüksek oranda koruduğunu ve detay kaybı oluşturmadan iyileştirme gerçekleştirdiğini göstermektedir. NIQE metriği açısından değerlendirildiğinde, SOHE yönteminin birçok klasik histogram eşitleme yöntemine kıyasla daha düşük ve makul seviyede bir değer ürettiği görülmekte

olup, bu durum yöntemin algısal kalite açısından başarılı bir performans sunduğunu ortaya koymaktadır. QAC metriğinde yaklaşık 0.5 seviyesinde elde edilen sonuç, kontrast artırımı ile görsel doğallık arasında başarılı bir dengenin kurulduğunu göstermektedir. Ayrıca, uyuşmazlık ölçüsü (D_n) değerinin düşük seviyede kalması, gri seviye dağılımının doğal yapısından aşırı sapma göstermediğini ve histogramın kontrollü bir biçimde düzenlendiğini ortaya koymaktadır. CII ve GLE metriklerindeki görece dengeli değerler de SOHE yönteminin kontrast iyileştirmesini aşırıya kaçmadan gerçekleştirdiğini göstermektedir. Şekil 87 genel olarak değerlendirildiğinde, bazı yöntemlerin belirli metriklerde daha yüksek veya daha düşük değerler üretebildiği görülmekle birlikte, SOHE yönteminin tüm metrikler genelinde tutarlı, dengeli ve kararlı bir performans sergilediği; özellikle yapısal benzerlik (SSIM), algısal kalite (NIQE) ve dağılım korunumu (D_n) kriterlerini birlikte sağlayabilen güçlü yöntemlerden biri olduğu anlaşılmaktadır. Bu yönüyle SOHE, yalnızca tek bir metriğe bağlı kalmadan, çok ölçütlü başarı açısından etkili ve güvenilir bir görüntü iyileştirme yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, sayısal görüntülerde kontrast iyileştirilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan histogram eşitleme yönteminin neden olduğu aşırı kontrast artışı, parlaklık kayması ve yapay bozulma oluşumu gibi temel problemler ele alınmış; bu problemlere çözüm getirmek üzere Simetrik Histogram Eşitleme (SHE) ve Esnek Histogram Eşitleme (SOHE) olmak üzere iki yeni yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemler, histogram eşitlemenin tüm gri seviye aralığını kontrolsüz biçimde genişletmesi yerine, görüntünün istatistiksel dağılım özelliklerini dikkate alan daha dengeli ve kontrollü bir kontrast iyileştirme yaklaşımı sunmaktadır.

SHE yöntemi, histogram eşitleme sürecine simetri kavramını dâhil ederek, yoğun biçimde kümelenmiş gri seviye değerlerinin düşük frekanslı bölgeleri baskılamasını engellemeyi amaçlamaktadır. Bu yöntemde simetri noktası olarak görüntünün gerçek ortancası veya araştırmacı tarafından belirlenen kaydırmalı bir ortanca değeri kullanılmakta ve histogram bu nokta etrafında simetrik biçimde yeniden düzenlenmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlar, özellikle sağa ve sola çarpık dağılıma sahip görüntülerde, gerçek ortancanın simetri noktası olarak seçilmesinin histogram dağılımını düzgün dağılıma daha fazla yaklaştırdığını ve kontrast iyileştirmesi sırasında görüntünün yapısal özelliklerinin daha iyi korunduğunu göstermiştir. Uyuşmazlık ölçüsü sonuçları, SHE yönteminin klasik histogram eşitlemeye kıyasla dağılımı daha dengeli hâle getirdiğini ve aşırı kontrast artışını sınırladığını açıkça ortaya koymaktadır.

SOHE yöntemi ise histogram eşitlemenin “tam açılma” problemine odaklanarak geliştirilmiş olup, histogramın tamamen geniş aralığa yayılması yerine esneklik parametresi yardımıyla kontrollü bir genişleme sağlamaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, yoğun bölgelerde oluşan ani açılmalar ve buna bağlı gürültü artışı önemli ölçüde azaltılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar, özellikle karanlık veya aydınlık bölgelerin baskın olduğu çarpık dağılıma sahip görüntülerde, SOHE yönteminin klasik histogram eşitlemeye göre daha doğal ve dengeli sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Parametre değerinin artmasıyla birlikte kontrastın kademeli biçimde iyileştirildiği, ancak aşırı parlama veya kararma gibi istenmeyen etkilerin sınırlandığı gözlemlenmiştir.

Önerilen yöntemlerin performansı, literatürde yaygın olarak kullanılan CII, GLE, SSIM, NIQE, QAC ve uyuşmazlık ölçüsü gibi hem HVS tabanlı hem de dağılım odaklı

metrikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, SHE ve SOHE yöntemlerinin tek bir metriğe göre değil, çoklu ölçütler altında dengeli ve tutarlı bir performans sergilediğini göstermektedir. Özellikle SSIM değerlerinin yüksek olması, önerilen yöntemlerin kontrast iyileştirmesi yaparken görüntünün yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde koruduğunu ortaya koymaktadır. NIQE ve QAC sonuçları ise algısal kalite açısından önerilen yöntemlerin birçok klasik histogram eşitleme tabanlı yönteme kıyasla daha doğal görünümler sunduğunu desteklemektedir.

SOHE yöntemi için gerçekleştirilen kullanıcı temelli anket çalışması ve bu çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak kurulan regresyon modeli, esneklik parametresinin otomatik olarak belirlenmesine yönelik sistematik bir yaklaşım sunmuştur. Modelin orta düzeyde bir tahmin başarımı göstermesine rağmen, manuel parametre seçimine kıyasla daha tutarlı ve tekrarlanabilir sonuçlar ürettiği görülmüştür. Bu durum, SOHE yönteminin pratik uygulamalarda kullanıcı müdahalesini azaltabilecek bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu tezde önerilen SHE ve SOHE yöntemleri, histogram eşitleme tabanlı kontrast iyileştirme yaklaşımlarının bilinen sınırlamalarını azaltarak; kontrast artışı, yapısal korunum ve algısal kalite arasında dengeli bir çözüm sunmaktadır. Elde edilen deneysel ve nicel sonuçlar, önerilen yöntemlerin farklı histogram karakterlerine sahip görüntüler üzerinde tutarlı biçimde çalıştığını ve literatürdeki birçok yöntemle rekabet edebilir bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu yönüyle çalışma, sayısal görüntü işleme alanında histogram tabanlı kontrast iyileştirme yöntemlerine istatistiksel dağılım temelli yeni bir bakış açısı kazandırmaktadır.

5. ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında önerilen Simetrik Histogram Eşitleme (SHE) ve Esnek Histogram Eşitleme (SOHE) yöntemleri, histogram eşitleme tabanlı kontrast iyileştirme yaklaşımlarının bilinen sınırlamalarını azaltmaya yönelik olarak geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, bu alanda yapılabilecek ileri çalışmalar ve uygulamalara yönelik öneriler aşağıda sunulmuştur.

Öncelikle, SHE yönteminde kullanılan simetri noktasının belirlenmesi, yöntemin başarımını doğrudan etkileyen temel unsurlardan biridir. Bu tez kapsamında simetri noktası, gerçek ortanca ve önceden tanımlanmış kaydırmalı ortanca değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Gelecek çalışmalarda, simetri noktasının görüntünün çarpıklık katsayısı, entropi değeri veya yerel yoğunluk dağılımı gibi istatistiksel ölçütler kullanılarak tamamen otomatik biçimde belirlenmesi, yöntemin genellenebilirliğini ve uygulama kolaylığını artıracaktır. Ayrıca simetri noktasının uzaysal olarak değişken olduğu, yani farklı görüntü bölgeleri için farklı simetri noktalarının tanımlandığı yerel SHE yaklaşımları geliştirilebilir.

SOHE yöntemi için önerilen esneklik parametresinin otomatik seçimi, bu tezde kullanıcı tercihleri ve uyuşmazlık ölçüsüne dayalı olarak modellenmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda, bu parametrenin tahmini için daha büyük ve çeşitlendirilmiş veri kümeleri kullanılarak derin öğrenme tabanlı regresyon modelleri veya adaptif optimizasyon yöntemleri (örneğin evrimsel algoritmalar veya Bayesçi optimizasyon) değerlendirilebilir. Böylece SOHE yöntemi, tamamen parametresiz veya kendi kendini ayarlayabilen bir kontrast iyileştirme algoritmasına dönüştürülebilir.

Bu tezde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ağırlıklı olarak gri seviye görüntüler üzerinde yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda, SHE ve SOHE yöntemlerinin renkli görüntülere uyarlanması önemli bir araştırma alanı olarak değerlendirilebilir. Özellikle LAB, HSV veya YCbCr gibi renk uzaylarında yalnızca parlaklık bileşeni üzerinde uygulanacak uyarlamalar, renk bozulmalarını önleyerek yöntemlerin gerçek dünya uygulamalarında kullanılabilirliğini artıracaktır.

Önerilen yöntemlerin performansı, bu çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan çeşitli nicel metrikler ve sınırlı bir kullanıcı çalışması ile değerlendirilmiştir. Gelecek araştırmalarda, daha kapsamlı görsel algı deneyleri, farklı yaş ve uzmanlık düzeylerine sahip katılımcılarla ve kontrollü deney ortamlarında gerçekleştirilebilir. Bu sayede, yöntemlerin

insan görsel sistemi ile olan uyumu daha güçlü biçimde ortaya konabilir ve algısal kalite değerlendirmeleri istatistiksel olarak daha sağlam temellere oturtulabilir.

SHE ve SOHE yöntemlerinin hesaplama maliyetleri bu tez kapsamında ayrıntılı olarak analiz edilmemiştir. İleride yapılacak çalışmalarda, algoritmaların zaman karmaşıklığı ve bellek kullanımı detaylı biçimde incelenerek, gerçek zamanlı uygulamalar için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir. Özellikle donanımsal hızlandırma (GPU tabanlı uygulamalar) veya gömülü sistemlere uyarlama, yöntemlerin medikal görüntüleme, gözetim sistemleri ve endüstriyel görüntü işleme gibi alanlarda kullanımını mümkün kılabilir.

Son olarak, bu tezde önerilen yaklaşımlar klasik histogram eşitleme tabanlı yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Gelecek çalışmalarda, SHE ve SOHE yöntemlerinin öğrenme tabanlı kontrast iyileştirme yöntemleri ile hibrit modeller hâlinde kullanılması veya bu yöntemlerin derin öğrenme mimarilerine ön işleme adımı olarak entegre edilmesi hem algısal kalite hem de üst düzey görüntü analiz görevlerindeki (nesne tespiti, segmentasyon vb.) performansın artırılmasına katkı sağlayabilir.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında geliştirilen yöntemler, histogram tabanlı kontrast iyileştirme alanında yeni ve esnek yaklaşımlar sunmakta olup; önerilen geliştirme alanları doğrultusunda ilerletilecek çalışmalarla hem teorik hem de uygulamalı açıdan daha geniş bir etki alanına sahip olabilecek niteliktedir.

6. KAYNAKLAR

Abdoli, M., Nasiri, F., Brault, P., & Ghanbari, M. (2019). Quality assessment tool for performance measurement of image contrast enhancement methods. *IET Image Processing, 13*(5), 833-842.

Abdullah-Al-Wadud, M., Kabir, M., Dewan, M., & Chae, O. (2007). A dynamic histogram equalization for image contrast enhancement. *IEEE transactions on consumer electronics, 53*(2), 593-600.

Agaian, S., Panetta, K., & Grigoryan, A. (2001). Transform-based image enhancement algorithms with performance measure. *IEEE Transactions on image processing, 10*(3), 367-382.

Agaian, S., Silver, B., & Panetta, K. (2007). Transform coefficient histogram-based image enhancement algorithms using contrast entropy. *IEEE transactions on image processing, 16*(3), 741-758.

Arend, L., & Spehar, B. (1993). Lightness, brightness, and brightness contrast: 1. Illuminance variation. *Perception & Psychophysics, 54*(4), 446-456.

Arici, T., Dikbas, S., & Altunbasak, Y. (2009). A histogram modification framework and its application for image contrast enhancement. *IEEE Transactions on image processing, 18*(9), 1921-1935.

Celona, L., Leonardi, M., Napoletano, P., & Rozza, A. (2022). Composition and style attributes guided image aesthetic assessment. *IEEE Transactions on Image Processing, 31*, 5009-5024.

Chandpa, K., Jani, A., & Prajapati, G. (2014). Comparative study of linear and non-linear contrast enhancement techniques. *International Journal of Research and Scientific Innovation, 1*(VI), 37-41.

Chen, S.-D. (2012). A new image quality measure for assessment of histogram equalization-based contrast enhancement techniques. *Digital Signal Processing, 22*(4), 640-647.

Chen, S.-D., & Ramli, A. (2003). Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement. *IEEE transactions on Consumer Electronics, 49*(4), 1310-1319.

Dick, J., & Pillichshammer, F. (2010). *Digital nets and sequences: discrepancy theory and quasi-Monte Carlo integration* (Cilt 1). Cambridge University Press.

Galdran, A., Araújo, T., Mendonça, A., & Campilho, A. (2017). Retinal image quality assessment by mean-subtracted contrast-normalized coefficients. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, (s. 844-853).

Ghadiyaram, D., & Bovik, A. (2017). Perceptual quality prediction on authentically distorted images using a bag of features approach. *Journal of vision, 17*(1), 32-32.

Gonzalez, R. (2009). *Digital image processing* (Cilt 1). Pearson education india.

Gupta, S., & Porwal, R. (2016). Appropriate contrast enhancement measures for brain and breast cancer images. *International journal of biomedical imaging, 2016*(1), 4710842.

Hore, A., & Ziou, D. (2010). Image quality metrics: PSNR vs. SSIM. *2010 20th international conference on pattern recognition*, (s. 2366-2369).

Kim, M., & Chung, M. (2008). Recursively separated and weighted histogram equalization for brightness preservation and contrast enhancement. *IEEE Transactions on Consumer Electronics, 54*(3), 1389-1397.

Kim, Y.-T. (1997). Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization. *IEEE transactions on Consumer Electronics, 43*(1), 1-8.

Liang, Z., Liu, W., & Yao, R. (2015). Contrast enhancement by nonlinear diffusion filtering. *IEEE Transactions on Image Processing, 25*(2), 673-686.

Lu, L., Zhou, Y., Panetta, K., & Agaian, S. (2010). Comparative study of histogram equalization algorithms for image enhancement. *Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications 2010, 7708*(6), 337-347.

Maragatham, G., & Roomi, S. (2015). A review of image contrast enhancement methods and techniques. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 9*(5), 309-326.

Maurya, L., Lohchab, V., Mahapatra, P., & Abonyi, J. (2022). Contrast and brightness balance in image enhancement using Cuckoo Search-optimized image fusion. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 34*(9), 7247-7258.

Mittal, A., Moorthy, A., & Bovik, A. (2012b). No-reference image quality assessment in the spatial domain. *IEEE Transactions on image processing, 21*(12), 4695-4708.

Mittal, A., Soundararajan, R., & Bovik, A. (2012a). Making a “completely blind” image quality analyzer. *IEEE Signal processing letters, 20*(3), 209-212.

Moniruzzaman, M., Shafuzzaman, M., & Hossain, M. (2014). Brightness preserving Bi-histogram equalization using edge pixels information. *2013 international conference on electrical information and communication technology (EICT). 43*, s. 1-5. IEEE.

Nacereddine, N., & Goumeidane, A. (2019). Asymmetric Generalized Gaussian Distribution Parameters Estimation based on Maximum Likelihood, Moments and Entropy. *2019 IEEE 15th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP). 43*, s. 343-350. Elsevier.

Panetta, K., Gao, C., & Agaian, S. (2013). No reference color image contrast and quality measures. *IEEE transactions on Consumer Electronics, 59*(3), 643-651.

Panetta, K., Wharton, E., & Agaian, S. (2008). Human visual system-based image enhancement and logarithmic contrast measure. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 38*(1), 174-188.

Patel, P., & Bhandari, A. (2019). A review on image contrast enhancement techniques. *Int. J. Online Sci, 5*(5), 14-18.

Peli, E. (1990). Contrast in complex images. *Journal of the Optical Society of America A, 7*(10), 2032-2040.

Pizer, S., Amburn, E., Austin, J., Cromartie, R., Geselowitz, A., Greer, T., . . . Zuiderveld, K. (1987). Adaptive histogram equalization and its variations. *Computer vision, graphics, and image processing, 39*(3), 355-368.

Pu, T., & Ni, G. (2000). Contrast-based image fusion using the discrete wavelet transform. *Optical engineering, 39*(8), 2075-2082.

Radha, N., & Tech, M. (2012). Comparison of contrast stretching methods of image enhancement techniques for acute leukemia images. *Int. J. Eng. Res. Technol, 1*(6), 1-9.

Rahimi-Nasrabadi, H., Jin, J., Mazade, R., Pons, C., Najafian, S., & Alonso, J.-M. (2021). Image luminance changes contrast sensitivity in visual cortex. *Cell reports, 34*(5), 368-373.

Rahman, S., Rahman, M., Hussain, K., Khaled, S., & Shoyaib, M. (2014). Image enhancement in spatial domain: A comprehensive study. *2014 17th international conference on computer and information technology (ICCIT). 54*, s. 368-373. Springer.

Sahu, S., Singh, A., Ghrera, S., Elhoseny, M., & Sahu, Sima. (2019). An approach for de-noising and contrast enhancement of retinal fundus image using CLAHE. *Optics & Laser Technology, 110*(2), 87-98.

Saravanan, C. (2010). Color image to grayscale image conversion. *2010 second international conference on computer engineering and applications. 2*, s. 196-199. IEEE.

Singh, R., Unni, K., Solanki, A., & Singh, Ranbir. (2012). Improving the contrast ratio of OLED displays: An analysis of various techniques. *Optical Materials, 34*(4), 716-723.

Singh, S., Sahil, M., Kumar, B., & Singh, H. (2023). Performance Evaluation of Various Histogram Equalization Techniques on Thermal Images. *2023 IEEE International Conference on Computer Vision and Machine Intelligence (CVMI)*, (s. 1-6).

Starck, J.-L., Murtagh, F., Candès, E., & Donoho, D. (2003). Gray and color image contrast enhancement by the curvelet transform. *IEEE Transactions on image processing, 12*(6), 706-717.

Strickland, R., Kim, C.-S., & McDonnell, W. (1987). Digital color image enhancement based on the saturation component. *Optical Engineering, 26*(7), 609-616.

Tang, J., Peli, E., & Acton, S. (2003). Image enhancement using a contrast measure in the compressed domain. *IEEE signal processing LETTERS, 10*(10), 289-292.

Wang, B., Wang, Z., Liao, Y., & Lin, X. (2008). HVS-based structural similarity for image quality assessment. *2008 9th International Conference on Signal Processing*, (s. 1194-1197).

Wang, Y., Chen, Q., & Zhang, B. (1999). Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method. *IEEE transactions on Consumer Electronics, 45*(1), 68-75.

Wharton, E., Panetta, K., & Agaian, S. (2007). Human visual system based multi-histogram equalization for non-uniform illumination and shoadow correction. *2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-ICASSP'07. 1*, s. I-729. Elsevier.

Wu, P.-C., Cheng, F.-C., & Chen, Y.-K. (2010). A weighting mean-separated sub-histogram equalization for contrast enhancement. *2010 International Conference on Biomedical Engineering and Computer Science. 49*, s. 1-4. IEEE.

Xue, W., Zhang, L., & Mou, X. (2011). Learning without human scores for blind image quality assessment. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 20*, s. 995-1002. IEEE.

Yue, G., Zhang, S., Zhou, T., Jiang, B., Liu, W., & Wang, T. (2024). Pyramid network with quality-aware contrastive loss for retinal image quality assessment. *IEEE Transactions on Medical Imaging, 20*(8), 995-1002.

Zhu, H., Chan, F., & Lam, F. (1999). Image contrast enhancement by constrained local histogram equalization. *Computer vision and image understanding, 73*(2), 281-290.

Zimmerman, J., Pizer, S., Staab, E., Perry, J., McCartney, W., & Brenton, B. (1988). An evaluation of the effectiveness of adaptive histogram equalization for contrast enhancement. *IEEE Transactions on Medical Imaging, 7*(4), 304-312.

ÖZGEÇMİŞ

Buket Nur ALTUN, 2018-2019 eğitim-öğretim yılında Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik bölümünde lisans programına başladı. 2022 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik Anabilim dalında yüksek lisans programına başladı. Eylül 2023'te Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim dalına yatay geçiş yaptı. Eylül 2023'ten tarihinden beri Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Bilgisayar Bilimleri Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. İyi derece İngilizce bilmektedir.