

Dental Radyografi Görüntülerine Ön İşleme Tekniklerinin Etkisi

The Effect of Preprocessing Techniques on Dental Radiography Images

Neslihan Sogur, Nihan Kazak Çerçevik

Bilgisayar Mühendisliği

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

7487576@ogrenci.bilecik.edu.tr, nihan.kazak@bilecik.edu.tr

Özetçe—Diş radyografi görüntüleri, dental teşhis ve analizde yaygın olarak kullanılan tıbbi görsellerdir. Ancak, gürültü, düşük kontrast ve artefaktlar nedeniyle kalite kaybına uğrayarak otomatik analiz yöntemlerinin doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir. Ön işleme yöntemleri, bu görüntülerin kalitesini artırarak manuel ve derin öğrenme tabanlı analizlerde önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, Tufts Dental veri seti kullanılarak çeşitli ön işleme teknikleri uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Gürültü azaltma, kontrast iyileştirme ve keskinleştirme yöntemlerinin etkileri, MAE, MSE, PSNR ve SSIM metrikleri ile değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, belirli ön işleme yöntemlerinin diş radyografi görüntü kalitesini artırmada etkili olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler — diş radyografisi, görüntü iyileştirme, ön işleme, medikal görüntüler.

Abstract— Dental radiography images are widely used medical images in dental diagnosis and analysis. However, they can suffer from quality degradation due to noise, low contrast and artifacts, which can negatively affect the accuracy of automated analysis methods. Preprocessing methods play an important role in manual and deep learning-based analysis by improving the quality of these images. In this study, various preprocessing techniques were applied using the Tufts Dental Database and the results were compared. The effects of noise reduction, contrast enhancement and sharpening methods are evaluated with MAE, MSE, PSNR and SSIM metrics. Experimental results show that certain preprocessing methods are effective in improving dental radiography image quality.

Keywords — dental radiography, image enhancement, preprocessing, medical images.

I. GİRİŞ

Diş radyografileri, çürük tespiti, kemik kaybı analizi ve implant planlaması gibi klinik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan önemli bir görüntüleme yöntemidir. Ancak, gürültü, düşük kontrast ve artefaktlar gibi faktörler teşhis doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir. Bu sorunların giderilmesi amacıyla kontrast iyileştirme, gürültü azaltma ve segmentasyon gibi çeşitli ön işleme teknikleri geliştirilmiş ve bu yöntemlerin görüntü kalitesini artırmada etkili olduğu gösterilmiştir [1], [2]. Özellikle kontrast iyileştirme yöntemleri, diş radyografilerindeki anatomik yapıların daha belirgin hale

gelmesine katkıda bulunarak segmentasyon başarısını artırmaktadır

Örneğin, panoramik diş radyografilerinde Jeodezik Rekonstrüksiyonlu Çok Ölçekli Top-Hat Dönüşümü (MSTHGR) kullanılarak, kontrast iyileştirme oranı ve entropi metrikleri açısından histogram eşitleme yöntemlerinden daha yüksek performans elde edilmiştir [3]. Benzer şekilde, farklı kontrast iyileştirme teknikleri karşılaştırılmış ve hibrit metasezgisel algoritmaların görüntü detaylarını koruyarak kontrast geliştirmede başarılı olduğu belirlenmiştir [4]. Gürültü azaltma teknikleri de dental radyografi analizlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Morfolojik operatörler ve BM3D filtreleme kombinasyonunun düşük doz BT görüntülerinde gürültüyü etkili bir şekilde azalttığı gösterilmiştir [5]. Benzer şekilde, seçici medyan filtreleme yönteminin, diş çürüğü sınıflandırma doğruluğunu %85,07'den %96,15'e yükselttiği rapor edilmiştir [6].

Son yıllarda, derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar ön işleme süreçlerinde önemli gelişmeler sağlamış ve yapay zeka destekli görüntü iyileştirme modelleri sayesinde kontrast ayarlama, gürültü giderme ve görüntü netliği optimizasyonu otomatik hale getirilmiştir [7]. Özellikle panoramik radyografilerde histogram eşitleme ve filtreleme teknikleri ile entegre edilen derin öğrenme modelleri, diş çürüğü tespitinde yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır [8].

Bu çalışmada, dental radyografilerde kullanılan çeşitli ön işleme yöntemlerinin etkinliği kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Tufts Dental Database kullanılarak belirlenen 14 farklı ön işleme yöntemi, görüntü kalitesi üzerindeki etkileri açısından değerlendirilmiş; kontrast, parlaklık, keskinlik ve gürültü seviyeleri gibi temel metrikler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, dental radyografilerde teşhis doğruluğunu artırmada en etkili ön işleme tekniklerinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

II. ÖN İŞLEME YÖNTEMLERİ

Diş radyografi görüntülerinin analizi sırasında, ham görüntülerin doğrudan işlenmesi bazı hatalara neden olabilir. Bu durumu önlemek ve görüntü kalitesini artırarak analiz sürecini daha güvenilir hale getirmek amacıyla çeşitli ön işleme teknikleri kullanılmaktadır. Her yöntemin temel amacı, diş

radyograflerindeki önemli detayları daha belirgin hale getirerek sonraki işlemler için uygun bir görüntü formatı sunmaktadır. Aşağıda, çalışmada kullanılan 14 farklı ön işleme tekniği ve bu tekniklerin radyografi görüntülerine etkileri detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

A. Kontrast Germe

Kontrast germe (Contrast stretching, CS), piksel yoğunluklarını belirli bir aralığa genişleterek kontrastı artırır. Düşük kontrastlı bölgelerde detayları öne çıkarır [9].

B. Kontrast Sınırlı Uyarlanabilir Histogram Eşitleme

Kontrast sınırlı uyarlanabilir histogram eşitleme (Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE), Yerel kontrastı artırırken gürültüyü sınırlı düzeyde tutar. Diş yapılarının daha net görünmesini sağlar [10].

C. Tuz Biber Gürültüsü

Tuz ve biber gürültüsü (Salt and Pepper Noise, SPN), Rastgele siyah-beyaz piksellerle görüntü bozulur. Filtreleme yöntemlerinin etkinliğini test etmek için kullanılmıştır [11].

D. Gauss Gürültüsü

Gauss Gürültüsü (Gaussian Noise, GN), Sensör kaynaklı veya düşük ışıklı durumlarda oluşur. Filtreleme sonrası doku görünürlüğü artırılabilir [12].

E. Histogram Eşitleme

Histogram eşitleme (Histogram Equalization, HE), piksel yoğunluklarını tüm aralığa yayarak kontrast artırır. Özellikle koyu görüntülerde detayları açığa çıkarır [13].

F. Gauss Bulanıklığı

Gaussian bulanıklığı (Gaussian Blur, GB), Görüntüyü yumuşatarak yüksek frekanslı gürültüyü azaltır. Netlik kaybını önlemek için dikkatle uygulanmalıdır.

G. Gürültü Giderme + Gauss Bulanıklığı

Önce gürültü azaltılır, ardından GB ile dengeleme yapılır. Detaylar korunarak daha temiz bir görüntü elde edilir.

H. CLAHE + HE

CLAHE yerel kontrastı artırırken HE genel kontrastı yükseltir. İkili kombinasyon daha dengeli iyileştirme sağlar [14].

I. CLAHE + Gama Düzeltmesi

CLAHE kontrastı artırır, gamma düzeltme (Gama Correction, GC) ise parlaklığı düzenler. Özellikle karanlık bölgelerde başarılı sonuçlar verir [14].

J. CLAHE + Ortanca Filtre

CLAHE kontrastı iyileştirirken, Ortanca Filtre (Medyan Filter, MF) gürültüyü azaltarak detayları korur. Birlikte kullanıldığında, tıbbi görüntülerde kontrast artırma ve gürültü giderme açısından etkilidir [15].

K. CLAHE + Gauss Bulanıklığı

CLAHE, yerel kontrastı artırarak diş yapılarının belirginliğini artırır, Gaussian bulanıklığı ise yüksek frekanslı gürültüyü azaltarak görüntü kalitesini iyileştirir. Bu

kombinasyon, diş radyograflerinde kontrast ve gürültü azaltmada etkili olmaktadır.

L. Kontrast Germe + Gauss Bulanıklığı

Kontrast germe, piksel yoğunluklarını ölçekleyerek kontrastı artırır, ardından Gaussian bulanıklığı rastgele gürültüyü azaltır. Bu işlemler, diş radyograflerinde kontrastı güçlendirip gürültüyü minimize eder.

M. CLAHE + Ortanca Filtre + Gama Düzeltmesi

CLAHE ile lokal kontrast artırılır, medyan filtre tuz ve biber gürültüsünü giderir, gamma düzeltme ise parlaklığı dengeler. Bu kombinasyon, diş radyograflerinde detayları daha belirgin ve gürültüsüz hale getirir.

N. CLAHE + Ortanca Filtre + Kontrast Germe

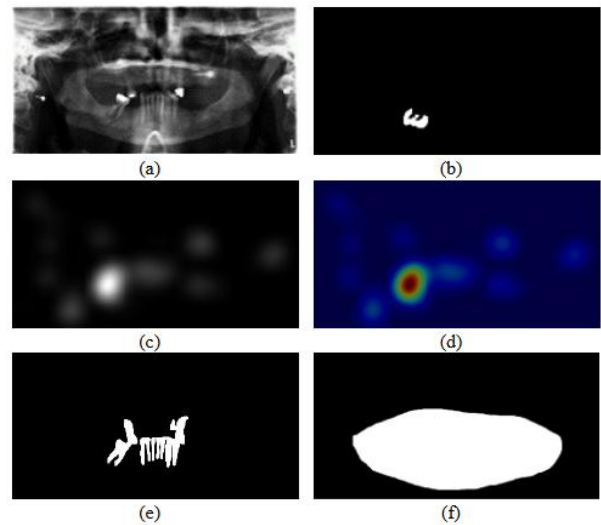
CLAHE ile yerel kontrast iyileştirilir, medyan filtre rastgele gürültüyü temizler ve kontrast germe genel kontrastı artırır. Bu yöntemlerin birleşimi, diş radyograflerinde kontrast artışı ve gürültü azaltmada etkilidir.

III. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, kullanılan veri seti, değerlendirme metrikleri ve performans analizleri sunulmuştur. Ön işleme yöntemlerinin etkilerini incelemek için Tufts Dental Database (TDD) [16] kullanılmış; karşılaştırma için MAE, MSE, PSNR ve SSIM gibi yaygın metrikler tercih edilmiştir. Elde edilen bulgular, yöntemlerin görüntü kalitesine katkılarını analiz ederek en etkili teknikleri belirlemeyi amaçlamaktadır.

A. Veri Seti

Diş radyografi görüntülerinin ön işleme yöntemleri ile iyileştirilmesi ve değerlendirilmesi amacıyla Tufts Dental Database (TDD) [16] kullanılmıştır. 1000 panoramik dental radyografi içeren bu veri seti, diş hekimliği alanındaki bilgisayarlı görü uygulamaları için kapsamlı bir kaynak sunmaktadır. TDD, radyografik anormallikler, diş etiketleri, çene bölgesi maskeleri ve göz hareketi izleme verileri gibi ek açıklamalar içermektedir.



Şekil 1. TDD örnek görüntüler [16], (a) Panoramik Radyografi, (b) Anormalliği özetleyen bölümlenmiş maske, (c) Gri tonlamalı göz izleme bakış grafiği, (d)

Renkli nicelleştirilmiş göz izleme bakış grafiği, (e) Diş maskesi, (f) Maksillomandibular ilgi bölgesi

Bu veri seti, radyografik görüntüler üzerinde uygulanan ön işleme tekniklerinin etkinliğini değerlendirmek için uygundur. Çalışmamızda, kontrast artırma, gürültü azaltma ve keskinlik iyileştirme yöntemlerinin performansları analiz edilmiştir. Şekil 1'de veri setindeki radyografi görüntüleri ve anotasyon örnekleri sunulmaktadır.

B. Değerlendirme Metrikleri

Diş radyografi görüntülerinde uygulanan ön işleme yöntemlerinin değerlendirilmesi amacıyla Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE), Ortalama Hatalar Karesi (Mean Squared Error, MSE), Tepe Sinyal Gürültü Oranı (Çeak Signal-to-Ration, PSNR) ve Yapısal Benzerlik İndeksi Ölçümü (Structural Similarity Index SSIM) kullanılmıştır.

1) Ortalama Mutlak Hata

Tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasını ölçer. Büyük hatalara karşı daha az duyarlıdır ve kolay yorumlanabilir [17]. Eşitlik 1'de gösterilen N toplam piksel sayısını, $I_{true}(i)$ gerçek piksel ve $I_{pred}(i)$ tahmin edilen piksel sayısını temsil etmektedir.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_1^N |I_{true}(i) - I_{pred}(i)| \quad \square \square \square$$

2) Ortalama Hatalar Karesi

Tahmin hatalarının karesinin ortalaması alınarak hesaplanan bir metriktir. Büyük hatalara daha fazla ağırlık verdiği için yaygın olarak kullanılır [17]. Hatanın karesini alarak büyük hataların etkisini vurgular. Eşitlik 2'de bu metriğin matematiksel ifadesi gösterilmektedir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_1^N (I_{true}(i) - I_{pred}(i))^2 \quad (2)$$

3) Tepe Sinyal Gürültü Oranı

Tahmin hatalarının karesinin ortalaması alınarak hesaplanan bir metriktir. Büyük hatalara daha fazla ağırlık verdiği için yaygın olarak kullanılır [18]. Hatanın karesini alarak büyük hataların etkisini vurgular. Eşitlik 3'te bu metriğin matematiksel ifadesi sunulmaktadır.

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) \quad (3)$$

4) Yapısal Benzerlik İndeksi

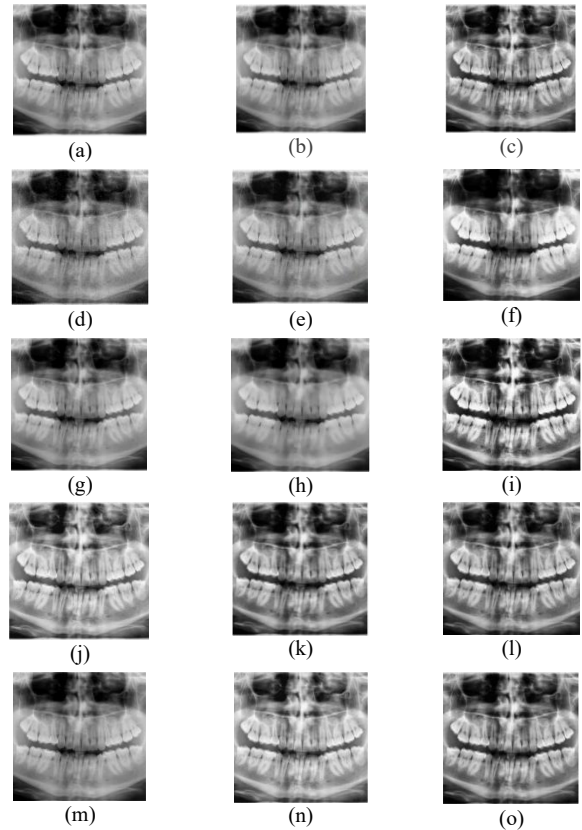
SSIM, iki görüntü arasındaki benzerliği parlaklık, kontrast ve doku açısından değerlendirir; 1'e yakın değerler yüksek benzerliği gösterir [19]. Eşitlik 4'te bu metriğin matematiksel ifadesi sunulmaktadır. Burada, μ_x ve μ_y görüntülerin ortalama parlaklığını; σ_x^2 ve σ_y^2 varyansı; σ_{xy} ise kovaryansı temsil eder. C_1 ve C_2 sabitleri ise bölme hatalarını önlemek amacıyla eklenmiştir.

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (4)$$

SSIM teorik olarak -1 ile 1 arasında değer alabilir [19]. Ancak bazı çalışmalarda, özellikle görsel kalite değerlendirme amaçlı uygulamalarda, negatif SSIM değerleri ihmal edilerek [0, 1] aralığında normalize edilmektedir [20].

C. Performans Analizi

Görüntü iyileştirme yöntemlerinin dental radyografi görüntü kalitesine etkisini değerlendirmek amacıyla çeşitli ön işleme teknikleri uygulanmış ve sonuçları farklı metriklerle analiz edilmiştir. Şekil 2'de TDD'de uzman görüntüleri içerisinde bulunan rasgele bir diş radyografi görüntüsü seçilerek, belirlenen ön işleme yöntemleri uygulanmıştır.



Şekil 2. (a) Orjinal, (b) CS, (c) CLAHE, (d) SPN, (e) GN, (f) HE, (g) GB, (h) De + GB, (i) CLAHE + HE, (j) CLAHE + GC, (k) CLAHE + MF, (l) CLAHE + GB, (m) CS + CLAHE, (n) CLAHE + MF + GC, (o) CLAHE + MF + CS

Elde edilen bulgular, uygulanan ön işleme yöntemlerinin dental radyografi görüntü kalitesini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Tablo 1'deki değerlendirme metrikleri dikkate alındığında, özellikle Kontrast Germe (CS), Gauss Bulanıklığı (GB) ve bu iki yöntemin birleşimi olan CS + GB tekniklerinin öne çıktığı görülmektedir. CS yöntemi, görüntülerin kontrastını artırarak anatomik yapıların daha belirgin hale gelmesini sağlamış, böylece detayların kaybolmasını önlemiştir. Öte yandan GB yöntemi, yüksek frekanslı gürültüyü azaltarak daha pürüzsüz ve homojen bir görüntü yapısı sunmuştur. Bu iki yöntemin birlikte uygulanması, hem kontrast iyileştirme hem de gürültü bastırma işlevlerini bir arada sağlayarak sinyal-gürültü oranını optimize etmiş ve görüntü netliğini en üst düzeye çıkarmıştır. Bu sonuçlar, hem görsel analiz hem de derin öğrenme tabanlı segmentasyon gibi sonraki işlemlerin başarısı

açısından kritik olan görüntü kalitesinin, uygun ön işleme teknikleriyle doğrudan ilişkilendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

TABLO I. ÖNİŞLEME DEĞERLENDİRME SONUÇLARI

	MAE ↓	MSE ↓	PSNR ↑	SSIM ↑
CS	0,0395	0,0031	28,9664	0,9739
CLAHE	0,3913	0,2236	6,5914	-0,1035
SPN	0,0250	0,0155	18,0951	0,2692
GN	0,0765	0,0093	20,2989	0,1950
HE	0,4232	0,2544	5,9652	-0,0652
GB	0,0056	0,0001	40,828	0,9736
De + GB	0,3905	0,2240	6,6469	0,2030
CLAHE + HE	0,4162	0,2474	6,0891	-0,118
CLAHE + GC	0,3944	0,2371	6,4618	-0,0478
CLAHE + MF	0,3908	0,2231	6,6021	-0,0571
CLAHE + GB	0,3895	0,2207	6,6492	-0,0423
CS + GB	0,0401	0,0031	28,1604	0,9553
CLAHE + MF + GC	0,3938	0,2368	6,4685	-0,0165
CLAHE + MF + CS	0,6468	0,2573	6,0000	-0,0707

IV. SONUÇ

Diş radyografi görüntülerine uygulanan çeşitli ön işleme yöntemlerinin etkileri incelenmiş ve performansları farklı metrikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler, GB yönteminin en iyi sonuçları verdiğini ortaya koymuştur. Bu yöntem, görüntülerin gürültüsünü azaltırken yapısal bütünlüğü koruyarak daha net ve segmentasyon gibi işlemler için daha uygun çıktılar elde edilmesini sağlamaktadır.

Ayrıca, CS ve CS+GB teknikleri de görüntü kalitesini iyileştirme açısından etkili sonuçlar sunmuştur. Ancak genel performans değerlendirmesi dikkate alındığında, GB'nin en etkili yöntem olarak öne çıktığı görülmüştür.

Bu bulgular, diş radyografi görüntülerinin işlenmesinde uygun ön işleme tekniklerinin belirlenmesine önemli bir katkı sunacaktır. Gelecek çalışmalarda, öğrenme tabanlı yaklaşımlar ile ön işleme yöntemlerinin entegrasyonu araştırılarak mühendislik problemlerinin doğruluğunun artırılması için çeşitli çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] N. Nafi'iyah, C. Faticah, E. Renwi Astuti, ve D. Herumurti, "The Use of Pre and Post Processing to Enhance Mandible Segmentation using Active Contours on Dental Panoramic Radiography Images", *2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, Ara. 2020, ss. 661-666. doi: 10.1109/ISRITI51436.2020.9315438.

[2] A. H. Setianingrum, A. S. Rini, ve N. Hakiem, "Image segmentation using the Otsu method in Dental X-rays", *2017 Second International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, Kas. 2017, ss. 1-6. doi: 10.1109/IAC.2017.8280611.

[3] J. C. M. Román vd., "Panoramic Dental Radiography Image Enhancement Using Multiscale Mathematical Morphology", *Sensors*, c. 21, sy 9, Art. sy 9, Oca. 2021, doi: 10.3390/s21093110.

[4] A. Sukanya, K. Krishnamurthy, ve T. Balakrishnan, "Comparison of Preprocessing Techniques for Dental Image Analysis", *Current Medical Imaging*, c. 16, sy 7, ss. 776-780, 2020, doi: 10.2174/1573405615666191115101536.

[5] R. Marconato Stringhini, D. Welfer, D. F. Tello Gamarra, ve G. Nogara Dotto, "Noise Reduction with Detail Preservation in Low-Dose Dental CT Images by Morphological Operators and BM3D", *Intelligent Systems Design and Applications*, A. Abraham, P. Siarry, K. Ma, ve A. Kaklauskas, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2021, ss. 309-317. doi: 10.1007/978-3-030-49342-4_30.

[6] L. M. Leo, T. K. Reddy, ve A. J. Simla, "Impact of Selective median filter on dental caries classification system using deep learning models", *J. Auton. Intell.*, c. 6, sy 2, s. 560, Tem. 2023, doi: 10.32629/jai.v6i2.560.

[7] H. A. Khan vd., "Automated feature detection in dental periapical radiographs by using deep learning", *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol.*, c. 131, sy 6, ss. 711-720, 2021.

[8] S. Bhat, G. Birajdar, ve M. Patil, "Enhanced Diagnostic Accuracy for Dental Caries and Anomalies in Panoramic Radiographs Using a Custom Deep Learning Model", *Cureus*, Ağu. 2024, doi: 10.7759/cureus.67315.

[9] H. B. Widodo, A. Soelaiman, Y. Ramadhani, ve R. Supriyanti, "Calculating Contrast Stretching Variables in Order to Improve Dental Radiology Image Quality", *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, c. 105, sy 1, s. 012002, Oca. 2016, doi: 10.1088/1757-899X/105/1/012002.

[10] S. A. Ahmad, M. N. Taib, N. E. A. Khalid, ve H. Taib, "An Analysis of Image Enhancement Techniques for Dental X-ray Image Interpretation", *Int. J. Mach. Learn. Comput.*, ss. 292-297, 2012, doi: 10.7763/IJMLC.2012.V2.133.

[11] G. E. Güraksin, "Tuz Biber Gürültülerinin Giderilmesi için k-Ortalama Algoritması Tabanlı Filtre Tasarımı", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, c. 22, sy 2, s. 972, Mar. 2018, doi: 10.19113/sdufbed.59275.

[12] P. Çivicioğlu, ve M. Alçı., "Görüntülerdeki Gauss Gürültüsünü Gidermek İçin Akım Taşıyıcı Ortalama Alıcı Süzgeç Devresinin Tasarımı", *ELECO'2002, Elektrik-Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye. 2002.

[13] Ü. Ünsal ve K. Adem, "Diş Görüntüleri Üzerinde Görüntü İşleme ve Derin Öğrenme Yöntemleri Kullanılarak Çürük Seviyesinin Sınıflandırılması", *Uluslar. Sivas Bilim Ve Teknol. Üniversitesi Derg.*, c. 2, sy 2, Art. sy 2, Ara. 2023.

[14] Y. Chang, C. Jung, P. Ke, H. Song, ve J. Hwang, "Automatic Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization With Dual Gamma Correction", *IEEE Access*, c. 6, ss. 11782-11792, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2797872.

[15] C. Yakut ve S. Ulukaya, "Görüntü Filtreleme İle Denetimsiz Retina Damar Bölütlenmesi İçin Parametre Eniyileştirilmesi", *Mühendis. Bilim. Ve Tasar. Derg.*, c. 10, sy 3, ss. 844-855, Eyl. 2022, doi: 10.21923/jesd.1033339.

[16] K. Panetta, R. Rajendran, A. Ramesh, S. P. Rao, ve S. Agaian, "Tufts Dental Database: A Multimodal Panoramic X-Ray Dataset for Benchmarking Diagnostic Systems", *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, c. 26, sy 4, ss. 1650-1659, Nis. 2022, doi: 10.1109/JBHI.2021.3117575.

[17] T. Chai ve R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature", *Geosci. Model Dev.*, c. 7, sy 3, ss. 1247-1250, 2014.

[18] A. Horé ve D. Ziou, "Image Quality Metrics: PSNR vs. SSIM", *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*, Ağu. 2010, ss. 2366-2369. doi: 10.1109/ICPR.2010.579.

[19] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, ve E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity", *IEEE Trans. Image Process.*, c. 13, sy 4, ss. 600-612, 2004.

[20] G. Zhai, W. Zhang, X. Yang, and Y. Xu, "Is there a relationship between peak-signal-to-noise ratio and structural similarity index?", *IET Image Processing*, vol. 7, no. 1, pp. 12–20, 2013. doi: 10.1049/iet-ipr.2012.0489.