

## 3B Şekil Oluşturmak için Alt Örneklemesiz Shearlet Dönüşümüne Dayalı Yeni ve Yüksek Kaliteli Odaklama Ölçüm Operatörü

### A New High Quality Focus Measurement Operator Based on Nonsampled Shearlet Transform for 3D Shape Reconstruction

<sup>1</sup>Hülya DOĞAN , <sup>2</sup>Ramazan Özgür DOĞAN 

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

<sup>2</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

<sup>1</sup>hulya@ktu.edu.tr, <sup>2</sup>ramazan.dogan@gumushane.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 14 November 2022

Accepted : 3 January 2023

##### Keywords:

Focus Measurement Operator, Shape from focus, 3D Shape Reconstruction, Nonsampled Shearlet Transform

#### ABSTRACT

Shape From Focus (SFF), which does not require any additional hardware in the 3D shape creation process, is one of the most preferred strategies. The SFF strategy uses a series of 2D images with different focusing on the process of creating 3D shapes of objects and consists of three basic steps: (1) Obtaining a 2D image series with different focus, (2) Calculating the focus values of image pixels, and (3) Selection of maximum focused pixel. In order to create 3D shapes with high accuracy and lower noise, researchers often develop a pre- or post-processing algorithms instead of proposing new focus measurement operators in the second stage of SFF. In this study, a new and high-quality focusing measurement operator based on Nonsampled Shearlet Transform is proposed, which does not require any pre- or post-processing. Proposed focus measurement operator is analyzed under different conditions. Subjective and objective results show that the proposed focus measure operator achieves better performance.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 14 Kasım 2022

Kabul : 3 Ocak 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Odaklama Ölçüm Operatörü, Odaktan Şekil, 3B Şekil Oluşturma, Alt Örneklemesiz Shearlet Dönüşümü

#### ÖZET

3B şekil oluşturulma sürecinde herhangi ek donanım gerektirmeyen Odaktan Şekil (Shape From Focus- SFF) en çok tercih edilen stratejilerdendir. SFF stratejisi, 3B şekil oluşturma sürecinde farklı odaklı 2B görüntü serisi kullanmakta ve üç temel aşamadan oluşmaktadır: (1) Farklı odaklı 2B görüntü serisinin elde edilmesi, (2) Görüntü piksellerinin odaklama değerlerinin hesaplanması ve (3) Maksimum odaklı pikselin seçilmesi. Yüksek doğruluk ve daha düşük gürültü ile 3B şekil oluşturmak için, araştırmacılar SFF'nin ikinci aşamasında yeni odaklama ölçüm operatörü önermek yerine genellikle bir ön veya son işlem algoritmaları geliştirmektedirler. Literatür çalışmalarının aksine, bu çalışmada herhangi bir ön veya son işlem gerektirmeyen Alt Örneklemesiz Shearlet Dönüşümüne dayalı yeni ve yüksek kaliteli odaklama ölçüm operatörü önerilmektedir. Önerilen odaklama ölçüm operatörünün etkinliği sentetik görüntü serileri kullanılarak pencere boyutu ve gürültü seviyesi gibi farklı koşullar altında analiz edilmektedir. Elde edilen öznel ve nesnel sonuçlar önerilen odaklama ölçüm operatörünün daha iyi performans sağladığını göstermektedir.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

Herhangi bir objenin 3 boyutlu (3B) gerçek dünyadan 2 boyutlu (2B) görüntüye projeksiyonu sırasında bir boyut kaybı gerçekleşmektedir. Bu yüzden objelerin 2B görüntülerinden tekrar 3B şekillerinin oluşturulma süreci bilgisayarla görme alanında hem zorlayıcı hem uzun süredir çalışılan popüler konulardan biri olmaktadır. Literatürde objelerin 3B şeklinin oluşturulması için kullanılan ekipmanlar aktif ve pasif olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [1]. Objeye ile görüntüleme alanı arasındaki mesafeyi ölçmek için aktif ekipmanlar ultrasonik veya kızılötesi dalgalar kullanılmaktadır. Bu ekipmanlar yüksek maliyetli olmalarına rağmen, yüksek doğruluk ve gerçek zamanlı performansları sayesinde tercih edilmektedir. Pasif ekipmanlar objeye ile görüntüleme alanı arasındaki mesafeyi ölçmek için herhangi bir cihaz gerektirmemektedir. Literatürde objelerin 3B şeklinin oluşturulması için kullanılan stratejiler ise geometrik ve fotometrik olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Geometrik stratejiler, objenin 3B şeklini oluşturmak için yapı detaylarını ve kameranın iç ve dış parametrelerini kullanılmaktadır. Bu stratejilere örnek olarak iki veya üç oküler kameranın kullanıldığı stereo görüntüleme verilebilmektedir. Fotometrik stratejilerde 3B şekil oluşturmak için görüntülenen obje bölgesindeki piksellerin parlaklık değerleri kullanılmaktadır. Tek lensli bir kameranın kullanıldığı bu stratejilere örnek olarak SFF verilebilmektedir.

Literatür araştırmaları bilgisayarla görme alanında objenin 3B şeklinin oluşturulması için en çok tercih edilen stratejinin SFF olduğunu göstermektedir [2, 3]. SFF, objelerin 3B şekillerini oluşturma sürecinde aynı görüş alanına ve farklı odaklamalara sahip 2B görüntü serisi kullanan bir stratejidir. 3B şekil, objeye ile kamera merceği arasındaki mesafeleri içermektedir. Bu mesafelerin genel geometrisi Denklem 1 ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} \quad (1)$$

Denklem 1, Gauss nesne yasasını tanımlamaktadır. Denklem 1'de  $f$  kameranın odak uzaklığını,  $o$  ve  $i$  objeye ve görüntünün mesafelerini temsil etmektedir.

Görüntülenen bölge ile görüntüleme ekipmanı arasında herhangi bir fiziksel temas gerektirmeyen SFF stratejisi, üç temel aşamadan oluşmaktadır: (1) Farklı Odaklı 2B Görüntü Serisinin Elde Edilmesi: Bu aşamada aynı görüş alanına ve farklı odaklama değerlerine sahip 2B görüntüler oluşturulmaktadır. Bu görüntülerin oluşturulması için genelde odaklama derinliğinin artırılması kullanılmaktadır. (2) Görüntü Piksellerinin Odaklama Değerlerinin Hesaplanması: Bu aşamada 2B görüntü serisindeki her pikselin odaklama değeri hesaplanmaktadır. Piksellerin odaklama değerlerini hesaplamak için literatürde odaklama ölçüm operatörleri kullanılmaktadır. Odaklama ölçüm operatörleri altı sınıfa ayrılabilir [3]:

- (1) Gradyan Tabanlı Odaklama Ölçüm Operatörleri: Bu ölçüm operatörleri piksellerin odaklama bilgilerini hesaplamak için birinci dereceden türevlerini kullanılmaktadırlar. Gradyan tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine Gradyan Enerjisi [4], Tenengrad [3], Gradyan Karesi [3], Gauss Türevi [5], Eşikli Mutlak Gradyan [3], Tenengrad Varyansı [3] ve 3B Gradyan [6] örnek olarak verilebilmektedir.
- (2) Laplace Tabanlı Odaklama Ölçüm Operatörleri: Bu ölçüm operatörleri piksellerin odaklama bilgilerini hesaplamak için ikinci dereceden türevlerini kullanılmaktadırlar. Laplace tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine Değiştirilmiş Laplace [7], Laplace Varyansı [8], Laplace Enerjisi [6], 3B Laplace [9], Diyagonal Laplace [10] ve Çok Yönlü Değiştirilmiş Laplace [11] örnek olarak verilebilmektedir.
- (3) İstatistik Tabanlı Odaklama Ölçüm Operatörleri: Bu ölçüm operatörleri piksellerin odaklama bilgilerini hesaplamak için görüntünün histogram ve yoğunluk gibi niteliksel bilgileri kullanılmaktadırlar. İstatistik tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine Varyans [3], Histogram Entropisi [3], Öz Değerler [12], Değiştirilmiş Varyans [3], Chebyshev Momentleri [13], Yerel Varyans [8], Normalize Varyans [3] ve Histogram Aralığı [3] örnek olarak verilebilmektedir.
- (4) Ayrık Kosinüs Dönüşümü (AKD) Tabanlı Odaklama Ölçüm Operatörü: Bu ölçüm operatörleri piksellerin odaklama bilgilerini hesaplamak için görüntünün Ayrık Kosinüs Dönüşümü katsayılarını kullanılmaktadırlar. Ayrık Kosinüs Dönüşümü tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine Değiştirilmiş AKD [14], AKD Enerji Oranı [15] ve AKD Azaltılmış Enerji Oranı [16] örnek olarak verilebilmektedir.
- (5) Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) Tabanlı Odaklama Ölçüm Operatörü: Bu ölçüm operatörleri piksellerin odaklama bilgilerini hesaplamak için görüntünün Ayrık Dalgacık Dönüşümü katsayılarını kullanılmaktadırlar. Ayrık Dalgacık Dönüşümü tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine ADD Katsayıları Toplamı [17], ADD Katsayıları Oranı [17], ADD Katsayıları Varyansı [17] ve 3B ADD [18] örnek olarak verilebilmektedir.
- (6) Diğer Odaklama Ölçüm Operatörleri: Bu ölçüm operatörleri piksellerin odaklama bilgilerini hesaplamak için piksellerin çeşitli özelliklerini kullanılmaktadırlar. Bu gruptaki odaklama ölçüm operatörlerine Görüntü Eğriliği [19], Yerel İkili Model [20], Gabor Katsayıları [21], Helmlü ve Scherer'in Ortalama Metodu [19], Curvelet Katsayıları Oranı [22], 2B Yönlendirilebilir Filtreler [23], Görüntü Kontrastı [24], Uzamsal Frekans [3], Mutlak Merkezi Moment [25], Otokorelasyon [3] ve 3B Yönlendirilebilir Filtreler [26] örnek olarak verilebilmektedir.

(3) Maksimum Odaklı Pikselin Seçilmesi: Objenin 3B şekli 2B görüntü serisindeki her piksel koordinatının en yüksek odaklama değeri seçilerek oluşturulmaktadır.

Literatürde SFF stratejilerinin ana aşamaları Nayar [7] tarafından çalışmada belirtilmiş ve diğer araştırmacılar ise bu çalışmayı temel alarak yeni yaklaşımlar önermişlerdir [2, 3]. Bu çalışmada Nayar, pürüzlü yüzeylerdeki doku değişimlerinin daha yüksek frekanslara sahip olduğu fikrinden yola çıkarak iki farklı algoritma geliştirmiştir. İlk algoritmada tüm pikseller için odaklama bilgileri hesaplanmış ve bu bilgilerin en yükseği pikselin 3B ölçüsü olarak kabul edilmiştir. Çalışmada geliştirilen ikinci algoritmada ise Gauss dağılımı, elde edilen 3B şeklin düzeltilmesi (iyileştirilmesi) için kullanılmıştır. Ek olarak bu çalışmada farklı odaklı 2B görüntü serisi oluşturulmuş ve Değiştirilmiş Laplace Toplamı odaklama ölçüm operatörü kullanılarak piksellerin odaklama değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmayı temel alarak gerçekleştirilen literatür çalışmaları şu şekilde gruplandırılabilir: (1) Yeni odaklama ölçüm operatörünün geliştirilmesi: Bu grupta araştırmacılar farklı odaklı görüntülerdeki piksellerinin odaklama değerlerini hesaplamak için odaklama ölçüm operatörü önermektedirler [3-26]. (2) Literatürde önerilen odaklama ölçüm operatörlerinin gürültü, bozulma, yoğunluk ve pencere boyutu gibi çeşitli koşullar altında karşılaştırılması [3]. (3) Oluşturulmuş 3B şeklin iyileştirilmesi: Bu grupta araştırmacılar, yüksek doğruluk ve daha düşük gürültüye sahip 3B şekil oluşturmak için bir ön veya son işlem algoritması geliştirmektedirler. Bu algoritmalara örnek olarak 3B Ağırlıklı En Küçük Kareler [27], Maksimum Korrentropiye dayalı Kalman Filtreleme [28], Değiştirilmiş Kalman Filtresi [29], Bayes Filtresi tabanlı Jitter gürültüsünü giderme [30], yerel ağırlıklı parametrik olmayan regresyon [31], Kalman filtresine dayalı örnekleme [32], düşük sıralı yaklaşım [33], uyarlanabilir pencere seçimi [34], uyarlanabilir Sinir Ağı Filtresi [35], güvenilirlik ölçümü [36] verilebilmektedir. (4) Farklı odaklı 2B görüntüler arasındaki örnekleme adım boyutunun tahmini [37].

Önceki paragraflarda değindiğimiz gibi literatürde piksellerin odaklama derecesini hesaplamak için odaklama ölçüm operatörleri önerilmiştir. Birçok odaklama ölçüm operatörü, yoğun dokulu alanlarda yeterli performans elde etmektedir. Ancak zayıf dokulu alanlarda aynı verimliliğe sahip değildir. Klasik ölçüm operatörleriyle (Varyans, Tenengrad) karşılaştırıldığında, son zamanlarda ADD, Curvelet, 2B ve 3B Yönlendirilebilir filtreleme dayalı ölçüm operatörleri, SFF stratejisi için daha doğru bir odaklama derecesi sağlamaktadır. Ancak literatür çalışmaları, bu operatörlerin görüntülerdeki eğrilerin ve kenarların tanımlanmasında bazı kısıtlamalara sahip olduğunu göstermektedir [17, 22, 23, 26]. Araştırmacılar, daha yüksek doğrulukla 3B şekil oluşturmak için yeni bir odaklama ölçüm operatörü önermek yerine, bu kısıtlamaları en aza indirmek için genellikle bir ön veya son işlem algoritmasını geliştirmektedirler. Çalışmamız ise diğer stratejilerden daha yüksek hıza sahip olan ve piksellerin odaklama bilgilerinin çıkarılması için daha detaylı görüntü temsilleri sağlayan Alt Örnekleme Shearlet Dönüşümüne (AÖSD) dayalı yeni ve yüksek kaliteli odaklama ölçüm operatörü önermektedir. Önerilen odaklama ölçüm operatörü, daha yüksek kalitede 3B şekil oluşturmak için herhangi bir ön veya son işlem algoritmasına ihtiyaç duymamaktadır. Önerilen odaklama ölçüm operatörünün performans analizi gürültü seviyesi ve pencere boyutu gibi çeşitli koşullar altında değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın genel yapısı şu şekilde tasarlanmıştır. Bölüm 2’de önerilen odaklama ölçüm operatörünün temelini oluşturan Alt Örnekleme Shearlet Dönüşümünün yapısı ve matematiksel ifadesi tanımlanmaktadır. 3B şekil oluşturma için önerilen yaklaşımın uygulanması Bölüm 3’te sunulmaktadır. Bölüm 4’te çalışmada elde edilen bulgulardan bahsedilmekte ve bulgular hakkında genel tartışma gerçekleştirilmektedir. Son olarak Bölüm 5’te ise çalışmada elde edilen sonuçlara değinilmektedir.

## 2. ALT ÖRNEKLEMESİZ SHEARLET DÖNÜŞÜMÜ

2008 yılında Easley tarafından geliştirilen Shearlet dönüşümü diğer çok ölçekli dönüşümlerin (Dalgacık, Curvelet, Contourlet) üstün özelliklerini birleştirerek görüntünün matematiksel ve geometrik yapılarını oluşturabilen çok ölçekli bir dönüşümdür [38]. Ayrıntılı shearlet dönüşümü türü olan Alt Örnekleme Shearlet Dönüşümü (Non-Subsampled Shearlet Transform), yukarı- aşağı örnekleyicileri ve öteleme bağımlılığını kaldırarak önceki çok ölçekli dönüşümlerden ayrılmaktadır. AÖSD genellikle çok ölçekli ve çok yönlü ayrıştırımdan oluşan iki ana aşamada gerçekleştirilmektedir.

1. Çok ölçekli ayrıştırma Denklem 2’de görüldüğü gibi yinelemeli olarak hesaplanan Alt Örnekleme Shearlet Laplace Piramidi (AÖLP) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Denklem 2’de giriş görüntüsü ile aynı boyutta alçak ve yüksek frekans katsayıları hesaplanmaktadır.

$$AÖLP_{j+1} = A_j f = (Ah_j^1 \prod_{k=1}^{j-1} Ah_k^0) f \quad (2)$$

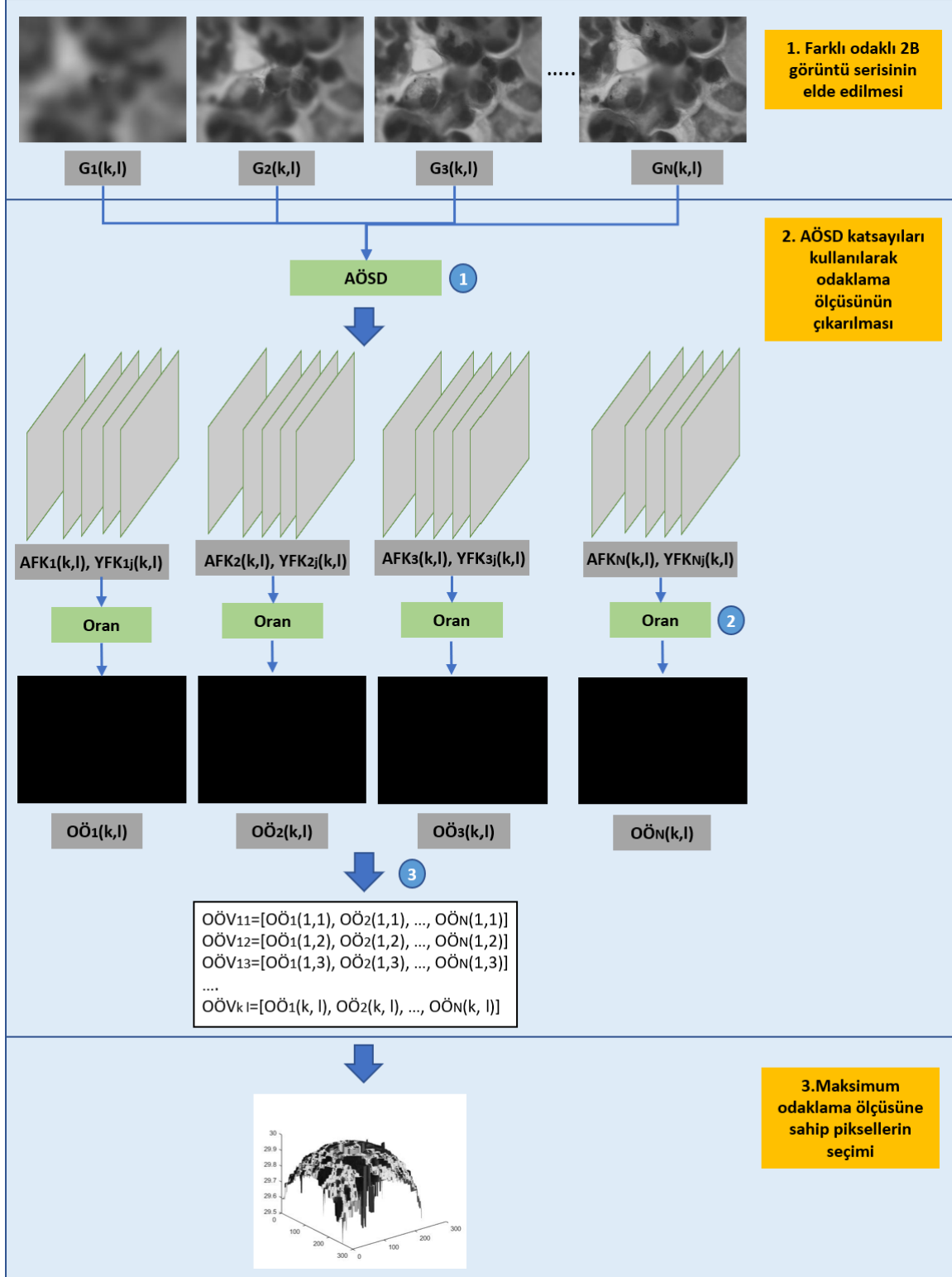
Denklem 2’de  $f$  giriş görüntüsünü,  $AÖLP_{j+1}$  giriş görüntüsünün Laplace Piramidi katsayılarını,  $Ah_j^1$  ve  $Ah_k^0$  ise  $j$  ölçeği ve  $k$  ötelemedeki alçak ve yüksek geçiş filtrelerini temsil etmektedir.

2. Çok yönlü ayrıştırma, psödo-polar koordinatta bazı özel kesme filtre konfigürasyonları kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Bir görüntünün AÖSD katsayılarının hesaplanması sürecinde gerçekleştirilen adımlar şu şekildedir:

1. Giriş görüntüsüne AÖLP uygulanmakta, alçak ve yüksek geçiş katsayıları elde edilmektedir.
2. Yüksek geçiş katsayılarına Hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) uygulanmaktadır.
3. FFT katsayıları psödo-polar koordinat sistemine dönüştürülmekte ve katsayılar elde edilmektedir.

4. Psödo-polar koordinat sistemindeki katsayılara bant geçiş filtresi uygulanarak AÖSD katsayılarının FFT dönüşüm katsayıları hesaplanmaktadır.
5. AÖSD katsayılarının FFT dönüşüm katsayılarına Ters FFT uygulanarak giriş görüntüsünün psödo-polar koordinat sistemindeki AÖSD katsayıları elde edilmektedir.
6. Giriş görüntüsünün psödo-polar koordinat sistemindeki AÖSD katsayıları kartezyen koordinat sistemine dönüştürülmektedir.



**Şekil 1.** Çalışmada sunulan SFF stratejisinin şematik temsili; (1) Farklı odaklı 2B görüntü serisinin elde edilmesi, (2) AÖSD katsayıları kullanılarak odaklama ölçüsünün çıkarılması ve (3) Maksimum odaklama ölçüsüne sahip piksellerin seçimi.

### 3. METODOLOJİ

Şekil 1'de görüldüğü gibi, çalışmada sunulan SFF stratejisi üç ana aşamada gerçekleştirilmektedir: (1) Farklı odaklı 2B görüntü serisinin elde edilmesi, (2) AÖSD katsayıları kullanılarak odaklama ölçüsünün çıkarılması ve (3) Maksimum odaklama ölçüsüne sahip piksellerin seçimi. Bu aşamalar şu şekilde açıklanabilmektedir:

#### 1. Farklı odaklı 2B görüntü serisinin elde edilmesi:

Önerilen SFF stratejisinin ilk aşamasında, aynı görüş alanına ve odaklama ölçüsüne sahip 2B görüntü serisi tanımlanmaktadır.

#### 2. AÖSD katsayıları kullanılarak odaklama ölçüsünün çıkarılması:

Önerilen SFF stratejisinin ikinci aşamasında AÖSD katsayıları kullanılarak görüntü serisindeki her pikselin odaklama bilgisi çıkarılmaktadır. SFF stratejileri seride bulunan farklı odaklama ölçülerine sahip 2B görüntülerin pikselleri arasında bire bir ilişki gerektirmektedir. Çok ölçekli dönüşümlerin kullanıldığı önceki çalışmalarda, katsayı temsillerinin boyutları (alçak ve yüksek geçiren katsayılar) giriş görüntüleri ile aynı olmadığından, farklı odaklı 2B görüntülerin katsayıları yeniden boyutlandırılmaktadır. Bu durum 2B görüntülerdeki kritik bilgilerin kaybolmasına sebep olabilmektedir. Bu çalışmada boyutları giriş görüntüsü ile aynı olan katsayı gösterimlerini (alçak ve yüksek geçiren katsayıları) sağlayan AÖSD kullanılarak bu problem çözülmektedir. Çalışmada önerilen SFF stratejisinin bu aşamasında gerçekleştirilen işlem adımları sırasıyla şu şekildedir:

1. Serideki her görüntüye ( $G_1(k, l), G_2(k, l), G_3(k, l), \dots, G_N(k, l)$ ) AÖSD uygulanarak alçak ( $AFK_1(k, l), AFK_2(k, l), AFK_3(k, l), \dots, AFK_N(k, l)$ ) ve yüksek ( $YFK_{11}(k, l), YFK_{12}(k, l), \dots, YFK_{1M}(k, l), YFK_{21}(k, l), YFK_{22}(k, l), \dots, YFK_{2M}(k, l), \dots, YFK_{N1}(k, l), YFK_{N2}(k, l), \dots, YFK_{NM}(k, l)$ ) frekans katsayıları hesaplanmaktadır.
2. Yüksek frekans katsayıları farklı odaklı 2B görüntülerle ilgili ayrıntılı bilgileri içermektedir. Alçak frekans katsayıları ise 2B görüntülerdeki odaklanmış ve odaklanmamış alanlar arasındaki farkı temsil etmektedir. Bu işlem adımında Denklem 3'te verildiği gibi farklı odaklı 2B görüntülerin her pikseli için yüksek frekans katsayılarının toplamının düşük frekans katsayılarına oranı hesaplanmakta ve her 2B görüntü için piksellerin odaklama ölçümlerinden oluşan 2B diziler ( $OÖ_1(k, l), OÖ_2(k, l), OÖ_3(k, l), \dots, OÖ_N(k, l)$ ) elde edilmektedir.

$$OÖ_N(k, l) = \frac{\sum YFK_N(k, l)}{AFK_N(k, l)} \quad (3)$$

3. Bu işlem adımında tüm piksel koordinatları için odaklama ölçüm vektörleri ( $OÖV_{11}, OÖV_{12}, OÖV_{13}, \dots, OÖV_{kl}$ ) oluşturulmaktadır.

#### 3. Maksimum odaklama ölçüsüne sahip piksellerin seçimi:

Önerilen SFF stratejisinin bu aşamasında odaklama ölçüm vektörleri üzerinde en yüksek odaklama değerine sahip piksel konumları seçilerek 3B şekil ( $Z(k, l)$ ) oluşturulmaktadır.

### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada önerilen odaklama ölçüm operatörünün etkinliğinin değerlendirmesi için sentetik görüntü serilerinden oluşan bir veri seti oluşturulmuştur. Sentetik görüntü serileri 50 mm'den 200 mm'ye kadar odak mesafesinden elde edilmişlerdir. Her seri farklı odaklamalara sahip 30 adet 2B görüntü içermektedir. Her 2B görüntünün boyutu 256 x 256 pikseldir. Çalışmada oluşturulan görüntü serilerine farklı 6 sınıftan seçilmiş çeşitli odaklama ölçüm operatörleri uygulanmaktadır. Tüm odaklama ölçüm operatörleri Intel (R) Core (TM) i7-4500U 2.40 GHz işlemci, 64 bit Windows 10 işletim sistemi ve 4GB belleğe sahip bir kişisel bilgisayar platformunda değerlendirilmiştir.

Çalışmada oluşturulan sentetik görüntü serileri, odaklama ölçüm operatörlerinin etkinliğini değerlendirmek için kullanılabilen referans 3B şekil görüntüsü içermektedirler. Bu kapsamda çalışmada odaklama ölçüm operatörlerinin performansını belirlemek için referans gerektiren kalite değerlendirme kriterleri tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan referans gerektiren kalite değerlendirme kriterleri şu şekildedir:

#### 1. Korelasyon Katsayısı (KK):

Korelasyon Katsayısı, SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil arasındaki ilişki hakkında bir değer vermektedir. İdeal odaklama ölçüm operatörü ile oluşturulmuş 3B şeklin KK değerinin diğer operatörlere göre daha yüksek olması beklenmektedir. KK'nın formülasyonu Denklem 4'te verilmektedir.

$$KK = \frac{\sum_k \sum_l (RZ_{k,l} - \bar{RZ})(Z_{k,l} - \bar{Z})}{\sqrt{(\sum_k \sum_l (RZ_{k,l} - \bar{RZ})^2)(\sum_k \sum_l (Z_{k,l} - \bar{Z})^2)}} \quad (4)$$

Denklem 4'te  $Z_{k,l}$  ve  $RZ_{k,l}$ , SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil değerleridir.  $\bar{Z}$  ve  $\bar{RZ}$  ise SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil değerlerinin ortalamalarını ifade etmektedir.



## 2. Tepe Sinyal Gürültü Oranı (TSGO):

Tepe Sinyal Gürültü Oranı, SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil arasındaki ilişkiyi temsil eden bir değerdir. İdeal odaklama ölçüm operatörü ile oluşturulmuş 3B şeklin TSGO değerinin diğer operatörlere göre daha yüksek olması beklenmektedir. TSGO'nun formülasyonu Denklem 5'te verilmektedir.

$$PSNR = 20 * \log \frac{M^2}{\sqrt{\frac{1}{KL} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (RZ_{k,l} - Z_{k,l})^2}} \quad (5)$$

Denklem 5'te  $Z_{k,l}$  ve  $RZ_{k,l}$ , SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil değerleridir.  $M$ , SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil değerlerinin maksimum olanını,  $K$  ve  $L$  ise 3B şekil boyutlarını ifade etmektedir.

## 3. Kök Ortalama Kare Hatası (KOKH):

Kök Ortalama Kare Hatası, SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil arasındaki benzerliği tanımlamaktadır. İdeal odaklama ölçüm operatörü ile oluşturulmuş 3B şeklin KOKH değerinin diğer operatörlere göre daha düşük olması beklenmektedir. KOKH'nin formülasyonu Denklem 6'da verilmektedir.

$$KOKH = \sqrt{\frac{1}{KL} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (RZ_{k,l} - Z_{k,l})^2} \quad (6)$$

Denklem 6'da  $Z_{k,l}$  ve  $RZ_{k,l}$ , SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil değerleridir.

## 4. Evrensel Kalite İndeksi (EKI):

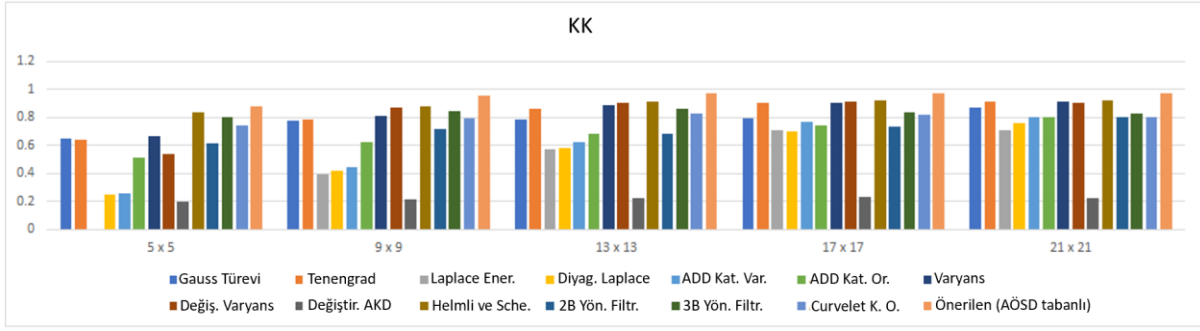
Evrensel Kalite İndeksi, SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil arasındaki bozukluğu ölçmek için kullanılmaktadır. İdeal odaklama ölçüm operatörü ile oluşturulmuş 3B şeklin EKI değerinin diğer operatörlere göre daha yüksek olması beklenmektedir. EKI'nın formülasyonu Denklem 7'de verilmektedir.

$$EKI = \frac{4\sigma_{Z,RZ}\bar{RZ}\bar{Z}}{(\sigma_{RZ}^2 + \sigma_Z^2)(\bar{RZ}^2 + \bar{Z}^2)} \quad (7)$$

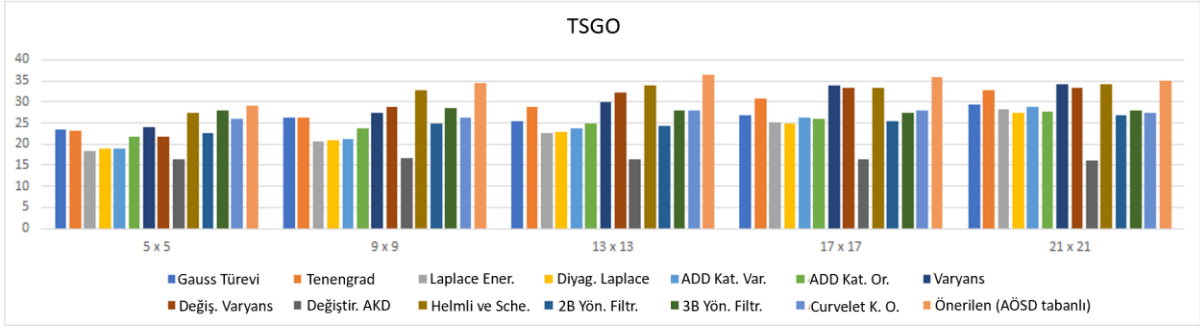
Denklem 7'de  $\bar{Z}$  ve  $\bar{RZ}$  SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil değerlerinin ortalamalarını,  $\sigma_{Z,RZ}$ ,  $\sigma_Z$  ve  $\sigma_{RZ}$  ise SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil değerlerinin kovaryans ve varyanslarını ifade etmektedirler.

Odaklama ölçüm operatörleri odaklama değerlerini hesaplama sürecinde piksellerin etrafındaki komşu pikselleri de işleme katmaktadırlar. Literatür çalışmaları yüksek doğruluklu 3B şekil oluşturmak için pencere (komşuluk) boyutunun etkili olduğunu göstermektedir [15, 22]. Bu kapsamda çalışmada görüntü serilerinde farklı odaklama ölçüm operatörleri ile beş farklı pencere boyutu (5 x 5, 9 x 9, 13 x 13, 17 x 17, 21 x 21) test edilmiştir. Sentetik görüntü serisi için kalite değerlendirme kriterlerinin sonuçları Şekil 2'de sunulmaktadır. Pencere boyutunun 13x13 olduğunda odaklama ölçüm operatörlerinin KK, TSGO ve EKI değerlerinin maksimum, KOKH değerlerinin ise minimum olduğu Şekil 2'de görülmektedir. Pencere boyutu 13x13 olana kadar, 3B Yönlendirilebilir Filtreler [26], Curvelet Katsayılarının Oranı [22] ve önerilen (AÖSD tabanlı) ölçüm operatörlerinin KOKH değerleri azalmaktadır. Bununla birlikte, pencere boyutunun büyüklüğü arttıkça diğer ölçüm operatörlerinin KOKH değerleri azalmaktadır. Benzer şekilde, pencere boyutu 13x13 olana kadar, 3B Yönlendirilebilir Filtreler [26], Curvelet Katsayılarının Oranı [22] ve önerilen (AÖSD tabanlı) ölçüm operatörlerinin KK, TSGO ve EKI değerleri artmaktadır. Bununla birlikte, pencere boyutunun büyüklüğü arttıkça diğer ölçüm operatörlerinin KK, TSGO ve EKI değerleri de artmaktadır. Bu kapsamda KK, TSGO, KOKH ve EKI değerlendirme kriterleri açısından, sentetik görüntü serisi için optimum pencere boyutunun 13x13 olduğu bildirilmektedir. AKD [14] tabanlı odaklama ölçüm operatörünün en yüksek KOKH ve en düşük KK, TSGO ve EKI değerleri ile en kötü performansı sağladığı dikkat çekmektedir. Ayrıca, objektif sonuçlar istatistik, ADD ve Laplace tabanlı odaklama ölçüm operatörlerinin pencere boyutunun azaltılmasına daha duyarlı olduklarını göstermektedir. Buna karşılık, 2B [23] ve 3B [26] Yönlendirilebilir Filtreler, Çok Yönlü Değiştirilmiş Laplace [11], Curvelet Katsayılarının Oranı [22] komşuluk boyutunun artmasından en az etkilenen odaklama ölçüm operatörleridir.

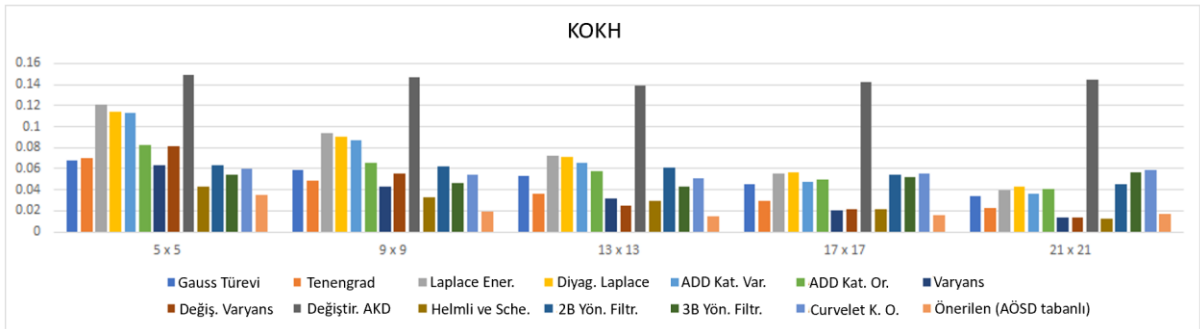
Şekil 3'te sentetik görüntü serisi için referans 3B şekil, 3B ADD [18], 3B Yönlendirilebilir Filtreler [26], Tenengrad [3], Varyans [3], Curvelet Katsayıları Oranı [22], Laplace Enerjisi [6], Çok Yönlü Değiştirilmiş Laplace [11] ve önerilen (AÖSD tabanlı) odaklama ölçüm operatörleri ile 13x13 pencere boyutunda oluşturulmuş 3B şekiller gösterilmektedir. Şekil 3.a'daki referans 3B şekil ile farklı odaklama ölçüm operatörleri ile oluşturulan 3B şekiller karşılaştırıldığında, önerilen odaklama ölçüm operatörünün etkinliğinin literatürdeki diğer operatörlere göre daha üstün olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 2 ve 3'te verildiği gibi, önerilen odaklama ölçüm operatörü ile oluşturulan 3B şekil, en düşük aykırı değerlere ve gürültüye sahiptir. Ek olarak, oluşturulan 3B şekil referans 3B şekle en çok benzeyendir.



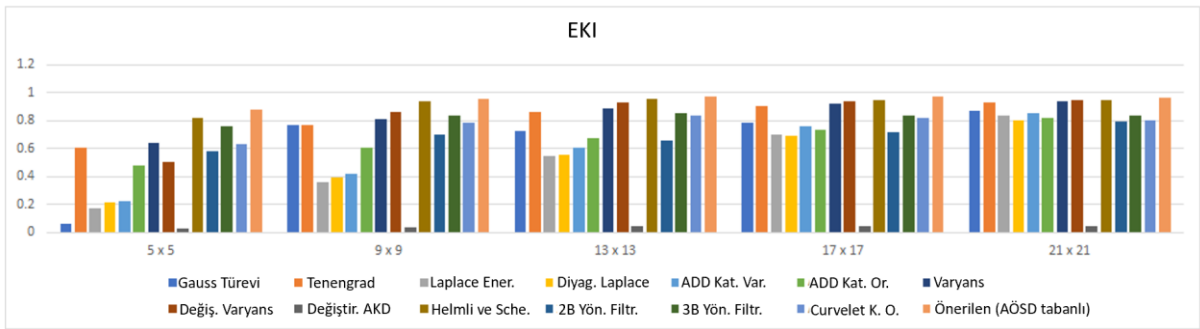
(a)



(b)

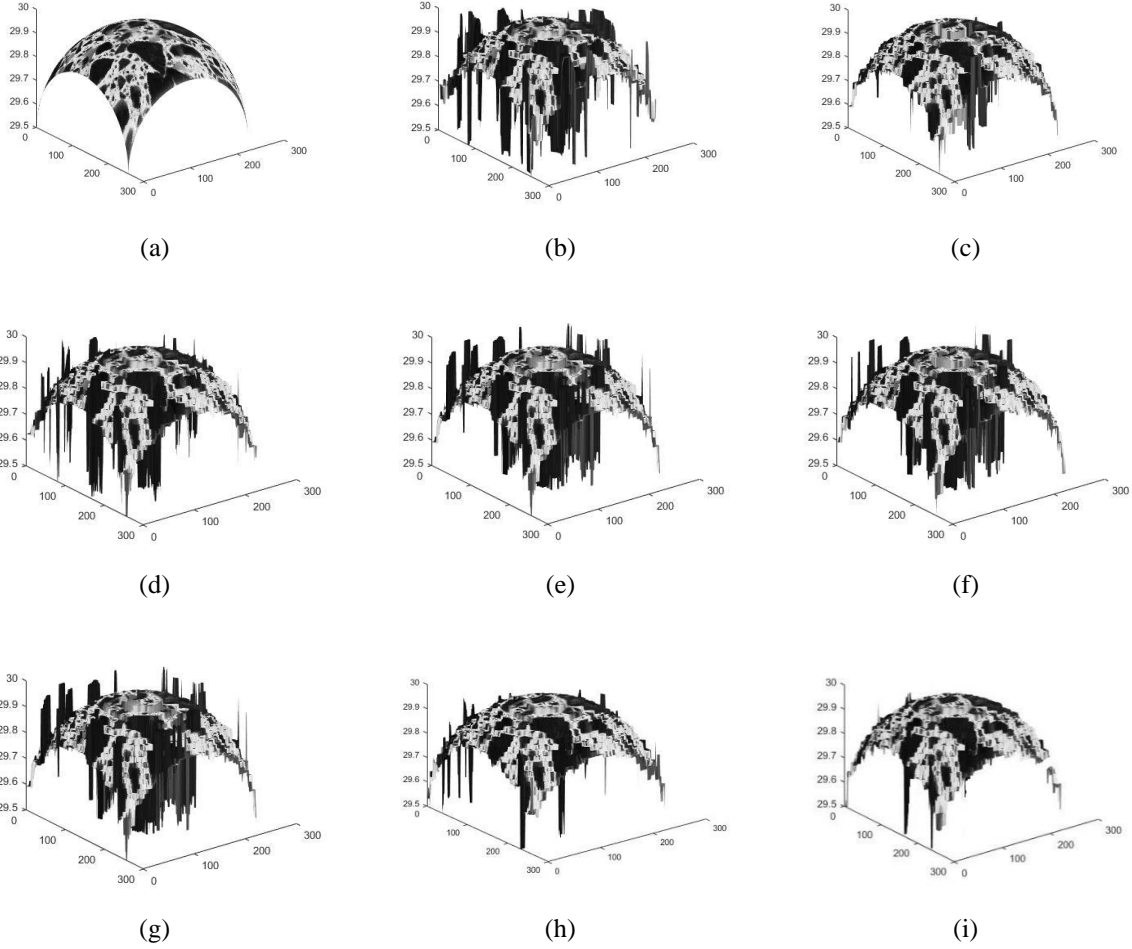


(c)



(d)

Şekil 2. Sentetik görüntü serisi için kalite değerlendirme kriterlerinin sonuçları; (a) Korelasyon Katsayısı (KK), (b) Tepe Sinyal Gürültü Oranı (TSGO), (c) Kök Ortalama Kare Hatası (KOKH), (d) Evrensel Kalite İndeksi (EKI).



**Şekil 3.** Sentetik görüntü serisi için (a) referans 3B şekil, (b) 3B ADD [18], (c) 3B Yönlendirilebilir Filtreler [26], (d) Tenengrad [3], (e) Varyans [3], (f) Curvet Katsayıları Oranı [22], (g) Laplace Enerjisi [6], (h) Çok Yönlü Değiştirilmiş Laplace [11] ve (i) önerilen (AÖSD tabanlı) odaklama ölçüm operatörleri ile 13x13 pencere boyutunda oluşturulmuş 3B şekiller.

Literatür çalışmalarında gürültünün, 3B şekil oluşturma sürecinde odaklama ölçüm operatörlerinin etkinliğini en çok etkileyen faktörlerden biri olduğu bahsedilmektedir [3, 22]. Bu çalışmada odaklama ölçüm operatörlerinin gürültüye dayanıklılığını ortaya çıkarmak amaçlanmaktadır. Bu kapsamda sentetik görüntü serileri Gauss gürültüleriyle bozularak 3B şekiller farklı gürültü seviyesi altında değerlendirilmektedir. Tablo 1, 0,001 ile 0,1 arasında çeşitli varyanslara sahip Gauss gürültüleri ile bozulan sentetik görüntü serileri için kalite değerlendirme kriterlerinin sonuçlarını göstermektedir. Optimum odaklama ölçüm operatörü ile oluşturulan 3B şeklin daha düşük KOKH ve daha yüksek KK, TSGO ve EKI değerlerine sahip olması beklenmektedir. Objektif değerlendirme sonuçlarında önerilen odaklama ölçüm operatörünün diğer odaklama ölçüm operatörlerinden daha yüksek etkinliğe sahip olduğu görülmektedir. Laplace, ADD ve AKD tabanlı ölçüm operatörlerinin KK, TSGO, KOKH ve EKI açısından en düşük performansa sahip olduğu açıktır. Gradyan ve istatistik tabanlı odaklama ölçüm operatörleri, daha düşük KOKH ve daha yüksek KK, TSGO ve EKI değerleriyle gürültüye karşı dayanıklıdır. Ayrıca, Gauss Türevi gürültü seviyeleri arasındaki daha büyük değişikliklerle gürültüye en duyarlı odaklama ölçüm operatörüdür.



**Tablo 1.** 0,001 ile 0,1 arasında çeşitli varyanslara sahip Gauss gürültüleri ile bozulan sentetik görüntü serileri için kalite değerlendirme kriterlerinin sonuçları.

<b>Odaklama Operatörü</b>	<b><math>\sigma = 0,1</math></b>	<b><math>\sigma = 0,01</math></b>	<b><math>\sigma = 0,001</math></b>
<b>Tenengrad [3]</b>	KK = 0,6 TSGO = 22,28 KOKH = 0,08 EKI = 0,56	KK = 0,53 TSGO = 21,39 KOKH = 0,09 EKI = 0,49	KK = 0,50 TSGO = 21,24 KOKH = 0,09 EKI = 0,46
<b>Gauss Türevi [5]</b>	KK = 0,18 TSGO = 14,05 KOKH = 0,2 EKI = 0,12	KK = 0,63 TSGO = 22,6 KOKH = 0,07 EKI = 0,59	KK = 0,65 TSGO = 23,21 KOKH = 0,07 EKI = 0,62
<b>Laplace Enerjisi [6]</b>	KK = 0,12 TSGO = 14,52 KOKH = 0,19 EKI = 0,08	KK = 0,11 TSGO = 14,77 KOKH = 0,18 EKI = 0,08	KK = 0,02 TSGO = 14,92 KOKH = 0,18 EKI = 0,05
<b>Diagonal Laplace [10]</b>	KK = 0,09 TSGO = 14,91 KOKH = 0,18 EKI = 0,06	KK = 0,05 TSGO = 15,38 KOKH = 0,17 EKI = 0,04	KK = 0,02 TSGO = 15,63 KOKH = 0,17 EKI = 0,02
<b>Çok Yönlü Değ. Lap.[11]</b>	KK = 0,68 TSGO = 22,97 KOKH = 0,07 EKI = 0,63	KK = 0,63 TSGO = 21,87 KOKH = 0,08 EKI = 0,57	KK = 0,64 TSGO = 21,95 KOKH = 0,08 EKI = 0,58
<b>Varyans [3]</b>	KK = 0,71 TSGO = 24,93 KOKH = 0,06 EKI = 0,70	KK = 0,68 TSGO = 24,36 KOKH = 0,06 EKI = 0,66	KK = 0,71 TSGO = 24,97 KOKH = 0,06 EKI = 0,70
<b>Değiştir. Varyans [3]</b>	KK = 0,62 TSGO = 22,76 KOKH = 0,07 EKI = 0,58	KK = 0,61 TSGO = 22,91 KOKH = 0,07 EKI = 0,59	KK = 0,61 TSGO = 22,87 KOKH = 0,07 EKI = 0,58
<b>Değiştir. AKD [14]</b>	KK = 0,02 TSGO = 15,38 KOKH = 0,17 EKI = 0,01	KK = 0,02 TSGO = 15,40 KOKH = 0,17 EKI = 0,01	KK = 0,02 TSGO = 15,33 KOKH = 0,17 EKI = 0,01
<b>ADD Kats. Oranı [17]</b>	KK = 0,06 TSGO = 14,92 KOKH = 0,18 EKI = 0,04	KK = 0,04 TSGO = 15,27 KOKH = 0,17 EKI = 0,03	KK = 0,04 TSGO = 13,19 KOKH = 0,17 EKI = 0,03
<b>3B ADD [18]</b>	KK = 0,14 TSGO = 14,58 KOKH = 0,19 EKI = 0,09	KK = 0,15 TSGO = 14,93 KOKH = 0,18 EKI = 0,10	KK = 0,15 TSGO = 14,67 KOKH = 0,18 EKI = 0,10
<b>Curvelet Kats. Oranı [22]</b>	KK = 0,57 TSGO = 19,25 KOKH = 0,08 EKI = 0,61	KK = 0,57 TSGO = 19,16 KOKH = 0,08 EKI = 0,60	KK = 0,57 TSGO = 19,32 KOKH = 0,08 EKI = 0,61
<b>2B Yönl. Filtreler [23]</b>	KK = 0,62 TSGO = 22,25 KOKH = 0,08 EKI = 0,57	KK = 0,62 TSGO = 22,53 KOKH = 0,07 EKI = 0,58	KK = 0,61 TSGO = 22,59 KOKH = 0,07 EKI = 0,57
<b>3B Yönl. Filtreler [26]</b>	KK = 0,60 TSGO = 20,08 KOKH = 0,07 EKI = 0,61	KK = 0,60 TSGO = 20,10 KOKH = 0,07 EKI = 0,61	KK = 0,59 TSGO = 20,16 KOKH = 0,07 EKI = 0,61
<b>Önerilen (AÖSD Tabanlı)</b>	<b>KK = 0,84</b> <b>TSGO = 27,43</b> <b>KOKH = 0,04</b> <b>EKI = 0,82</b>	<b>KK = 0,83</b> <b>TSGO = 27,50</b> <b>KOKH = 0,04</b> <b>EKI = 0,82</b>	<b>KK = 0,83</b> <b>TSGO = 27,33</b> <b>KOKH = 0,04</b> <b>EKI = 0,80</b>

## 5. SONUÇLAR

Literatürde 3B şekil oluşturmak için herhangi bir ek donanım gerektirmemesinden dolayı SFF stratejileri sıklıkla tercih edilmektedir. Klasik SFF stratejileri; farklı odaklı 2B görüntü serisinin elde edilmesi, görüntü piksellerinin odaklama değerlerinin hesaplanması ve maksimum odaklı pikselin seçilmesi olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda araştırmacılar yüksek doğruluklu ve daha düşük gürültülü 3B şekil oluşturmak için yeni bir odaklama ölçüm operatörü önermekte ya da ön veya son işlem algoritmaları geliştirmektedirler. Literatür çalışmalarının aksine, bu çalışmada herhangi bir ön veya son işlem gerektirmeyen 3B şekil oluşturma sürecinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda Alt Örnekleme Shearlet Dönüşümüne dayalı yeni ve yüksek kaliteli odaklama ölçüm operatörü önerilmiştir. Önerilen odaklama ölçüm operatörünün etkinliği sentetik görüntü serileri kullanılarak pencere boyutu ve gürültü seviyesi gibi farklı koşullar altında analiz edilmiştir. Önerilen odaklama ölçüm operatörünün literatürdeki yaklaşımlardan daha iyi performans sağladığı elde edilen öznel ve nesnel sonuçlar ile ispatlanmıştır. Önerilen AÖSD tabanlı odaklama ölçüm operatörü literatürdeki diğer SFF yaklaşımlarına benzer şekilde koşma süresi bakımından dezavantaja sahiptir. Bu durumu minimize etmek ve SFF sürecinde performansı daha da artırmak için gelecek çalışmalarda derin öğrenmeye dayalı stratejilerinin önerilmesi planlanmaktadır.

## Yazar Katkıları

Hülya Doğan çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, son onay ve tam sorumluluk kısımlarına, Ramazan Özgür Doğan çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, fikrinsel içeriğin eleştirel incelenmesi, son onay ve tam sorumluluk kısımlarına katkı sağlamışlardır.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## KAYNAKÇA

- [1] B. Billiot, F. Cointault, L. Journaux, J.C. Simon, and P. Gouton “3D image acquisition system based on shape from focus technique”, *Sensors*, vol. 13, no. 4, pp. 5040-5053, 2013.
- [2] S.O. Shim, A.S. Malik, and T.S. Choi “Accurate shape from focus based on focus adjustment in optical microscopy”, *Microscopy research and technique*, vol. 72, no. 5, pp. 362–370, 2009.
- [3] S. Pertuz, D. Puig, and M.A. Garcia “Analysis of focus measure operators for shape-from-focus”, *Pattern Recognition*, vol. 46, no. 5, pp. 1415–1432, 2013.
- [4] A.S. Malik, and T.S. Choi “A novel algorithm for estimation of depth map using image focus for 3d shape recovery in the presence of noise”, *Pattern Recognition*, vol. 41, no. 7, pp. 2200–2225, 2008.
- [5] J.M. Geusebroek, F. Cornelissen, A.W. Smeulders, and H. Geerts “Robust autofocusing in microscopy”, *Cytometry: The Journal of the International Society for Analytical Cytology*, vol. 39, no. 1, pp. 1–9, 2000.
- [6] M.B. Ahmad, and T.S. Choi “Application of three dimensional shape from image focus in lcd/tft displays manufacturing”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 53, no. 1, pp. 1–4, 2007.
- [7] S.K. Nayar “Shape from focus system”, *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings IEEE Computer Society Conference on. IEEE*, pp. 302–308, 1992.
- [8] J.L. Pech Pacheco, G. Cristóbal, J. Chamorro Martínez, and J. Fernández Valdivia “Diatom autofocusing in brightfield microscopy: a comparative study”, *Pattern Recognition*, 15th International Conference on. IEEE, pp. 314–317, 2000.
- [9] Y. An, G. Kang, I.J. Kim, H.S. Chung, and J. Park “Shape from focus through laplacian using 3d window”, *Future Generation Communication and Networking, 2008 Second International Conference on. IEEE*, pp. 46–50, 2008.
- [10] A. Thelen, S. Frey, S. Hirsch, and P. Hering “Improvements in shape-from-focus for holographic reconstructions with regard to focus operators, neighborhood-size, and height value interpolation”, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 18, no. 1, pp. 151–157, 2009.
- [11] T. Yan, Z. Hu, Y. Qian, Z. Qiao, and L. Zhang “3d shape reconstruction from multifocus image fusion using a multidirectional modified laplacian operator”, *Pattern Recognition*, vol. 98, p. 107065, 2020.
- [12] C.Y. Wee, and R. Paramesran “Measure of image sharpness using eigenvalues”, *Information Sciences*, vol. 177, no. 12, pp. 2533–2552, 2007.
- [13] P.T. Yap, and P. Raveendran “Image focus measure based on chebyshev moments”, *IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing*, vol. 151, no.2, pp. 128–136, 2004.
- [14] S.Y. Lee, Y. Kumar, J.M. Cho, S.W. Lee, and S.W. Kim “Enhanced autofocus algorithm using robust focus measure and fuzzy reasoning”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 18, no. 9, pp. 1237–1246, 2008.
- [15] C.H. Shen, and H.H. Chen “Robust focus measure for low-contrast images”, *Consumer Electronics, International Conference on. IEEE*, pp. 69–70, 2006.

- [16] S.Y. Lee, J.T. Yoo, Y. Kumar, and S.W. Kim “Reduced energy-ratio measure for robust autofocusing in digital camera”, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 16, no. 2, pp. 133–136, 2009.
- [17] H. Xie, W. Rong, and L. Sun “Construction and evaluation of a wavelet-based focus measure for microscopy imaging”, *Microscopy research and technique*, vol. 70, no. 11, pp. 987–995, 2007.
- [18] U. Ali, and M.T. Mahmood “3d shape recovery by aggregating 3d wavelet transform-based image focus volumes through 3d weighted least squares”, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, pp. 1–19, 2019.
- [19] F.S. Helmlı, and S. Scherer “Adaptive shape from focus with an error estimation in light microscopy”, *Image and Signal Processing and Analysis, Proceedings of the 2nd International Symposium on*. IEEE, pp. 188–193, 2001.
- [20] J. Lorenzo, M. Castrillon, J.M´endez, and O. Deniz “Exploring the use of local binary patterns as focus measure”, *Computational Intelligence for Modelling Control and Automation, International Conference on*. IEEE, pp. 855–860, 2008.
- [21] F. Mahmood, J. Mahmood, A. Zeb, and J. Iqbal “3d shape recovery from image focus using gabor features”, *Machine Vision, Tenth International Conference on*. IEEE, vol. 10696, pp. 106961F, 2018.
- [22] R. Minhas, A.A. Mohammed, and Q.J. Wu “Shape from focus using fast discrete curvelet transform”, *Pattern Recognition*, vol. 44, no. 4, pp. 839–853, 2011.
- [23] R. Minhas, A.A. Mohammed, Q.J. Wu, and M.A. Sid Ahmed “3d shape from focus and depth map computation using steerable filters”, *Image Analysis and Recognition, International Conference on*. IEEE, pp. 573–583, 2009.
- [24] H. Nanda, and R. Cutler “Practical calibrations for a real-time digital omnidirectional camera”, *CVPR Technical Sketch* vol. 20, no. 2, 2001.
- [25] M.V. Shirvaikar “An optimal measure for camera focus and exposure”, *System Theory, Thirty-Sixth Southeastern Symposium on*. IEEE, pp. 472– 475, 2004.
- [26] T. Fan, and H. Yu “A novel shape from focus method based on 3d steerable filters for improved performance on treating textureless region”, *Optics Communications*, vol. 410, pp. 254–261, 2018.
- [27] U. Ali, V. Pruks, and M.T. Mahmood “Image focus volume regularization for shape from focus through 3d weighted least squares”, *Information Sciences*, vol. 489, pp. 155–166, 2019.
- [28] M. Chen, Y. Zhong, Z. Li and J. Wu “A novel 3d shape reconstruction method based on maximum correntropy kalman filtering”, *Sensor Review*, 2018.
- [29] H.S. Jang, M.S. Muhammad and T.S. Choi “Optimal depth estimation using modified kalman filter in the presence of non-gaussian jitter noise”, *Microscopy Research and Technique*, pp. 1–8, 2018.
- [30] H.S. Jang, M.S. Muhammad and T.S. Choi “Bayes filter based jitter noise removal in shape recovery from image focus”, *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 63, no. 2, pp. 20501–1, 2019.
- [31] H.S. Jang, M.S. Muhammad and T.S. Choi “Optimizing image focus for shape from focus through locally weighted non-parametric regression”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 74393–74400, 2019.
- [32] H.S. Jang, M.S. Muhammad, G. Yun and D.H. Kim “Sampling based on kalman filter for shape from focus in the presence of noise”, *Applied Sciences*, vol. 9, no. 16, pp. 3276, 2019.
- [33] P.G. Kumar and R. Ranjan Sahay “Accurate structure recovery via weighted nuclear norm: A low rank approach to shape-from-focus”, *Computer Vision, Proceedings of the IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 563–574, 2017.
- [34] I. Lee, M.T. Mahmood and T.S. Choi “Adaptive window selection for 3d shape recovery from image focus”, *Optics and Laser Technology*, vol. 45, pp. 21–31, 2013.
- [35] S.A. Lee, H.S. Jang and B.G. Lee “Jitter elimination in shape recovery by using adaptive neural network filter”, *Sensors*, vol. 19, no. 11, pp. 2566, 2019.
- [36] S. Pertuz, D. Puig and M.A. Garcia “Reliability measure for shape-from-focus”, *Image and Vision Computing*, vol. 31, no. 10, pp. 725–734, 2013.
- [37] M. Muhammad and T.S. Choi “Sampling for shape from focus in optical microscopy”, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 34, no. 3, pp. 564–573, 2012.
- [38] G. Easley, D. Labate, and W.Q. Lim “Sparse directional image representations using the discrete shearlet transform”, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 25, no. 1, pp. 25– 46, 2008.