

Farklı Seyreklik Önsellerinin Sıkıştırılmış Foton Süzgeçli Spektral Görüntülemeye Etkisi Effect of Different Sparsity Priors on Compressive Photon-Sieve Spectral Imaging

Oğuzhan Fatih Kar ¹, Ulaş Kamacı ², Fatih Çağatay Akyön ³, Figen S. Oktem ¹

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye
{oguzhan.kar,figeno}@metu.edu.tr

²Dept. of Electrical and Computer Eng., Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, USA
ukamaci2@illinois.edu

³Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bilkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye
akyon@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe —Sıkıştırılmış spektral görüntüleme, klasik spektral görüntüleme tekniklerinden daha yüksek performans sunan ve yeni gelişmekte olan bir alandır. Sıkıştırılmış algılama teorisinden esinlenen bu görüntüleme sistemleri, seyrek sinyal geri kazanım algoritmaları kullanarak sıkıştırılmış ölçümlerden orijinal spektral görüntüleri elde etmeyi hedeflemektedir. Bu bildiride, ilk olarak, sıkıştırılmış foton süzgeçli spektral görüntüleme sisteminin görüntü oluşturma modeli ve seyrekliğe dayalı görüntü geri oluşturma yaklaşımı sunulmaktadır. Sonrasında farklı seyreklik önsellerinin spektral görüntülerin oluşturulmasına etkisi incelenmektedir. Bu sistemde, ışığın modülasyonu için kodlu açıklık, spektral ayırma için ise foton süzgeci kullanılmaktadır. Alınan ölçümlerde spektral bantların kodlanmış ve bulanık görüntüleri üst üste binmektedir. Benzetim sonuçları, bu sıkıştırılmış ölçümlerden umut verici görüntü geri oluşturma performansı elde edilebildiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler—spektral görüntüleme, sıkıştırılmış algılama, ters problemler, hesaplamalı görüntüleme, seyreklik önseli.

Abstract—Compressive spectral imaging is a rapidly growing area yielding higher performance novel spectral imagers than conventional ones. Inspired by compressed sensing theory, compressive spectral imagers aim to reconstruct the spectral images from compressive measurements using sparse signal recovery algorithms. In this paper, first, the image formation model and a sparsity-based reconstruction approach are presented for compressive photon-sieve spectral imager. Then the reconstruction performance of the approach is analyzed using different sparsity priors. In the system, a coded aperture is used for modulation and a photon-sieve for dispersion. In the measurements, coded and blurred images of spectral bands are superimposed. Simulation results show promising image reconstruction performance from these compressive measurements.

Keywords—spectral imaging, compressed sensing, inverse problems, computational imaging, sparsity prior.

I. GİRİŞ

Spektral görüntüleme, bir ortamın ışımaya şiddetinin dalga-boyuna göre algılanmasını sağlayan temel bir tanılayıcı araçtır.

Bu araç kullanılarak elde edilen uzamsal ve spektral veri, görüntülenen ortamın fiziksel ve kimyasal karakteristiği hakkında ayırtedici bilgiler sağlar [1], [2]. Spektral görüntüleme için dalga boyunda filtrelemeye dayalı geleneksel tekniklerin yanı sıra çeşitli hesaplamalı spektral görüntüleme teknikleri de önerilmiştir [3]–[7]. Foton süzgeçli spektral görüntüleme bu tekniklerden birisidir [8].

Fresnel merceğinin bir modifikasyonu olan foton süzgeci, spektral görüntüleme için basit ve düşük maliyetli bir optik sistem olanağı sunmaktadır. Bu sistemde görüntüleme işlevi bir foton süzgeci ve bilgisayar arasında paylaşırlır. Foton süzgeci, hareketli bir dedektör ile birlikte kullanılarak birden fazla ölçüm düzleminden veri alınır. Alınan ölçümlerde spektral bantların kodlanmış ve bulanık görüntüleri üst üste binmiş durumdadır. Bilgisayarda bir ters problem çözülerek, ölçümlerden orijinal spektral görüntüler geri kazanılır. Bu görüntüleme tekniği ile, kırınımla sınırlı uzamsal çözünürlüğün elde edilmesi ve filtrelemeye dayalı tekniklerle elde edilemeyecek yüksek spektral çözünürlüğe ulaşılması mümkün olmaktadır [8].

Doğal spektral görüntülerin üç boyutlu bir dönüşüm uzayında seyrek olarak ifade edilebildiği bilinmektedir [9]. İki boyutlu ayrık kosinüs gibi dönüşümler kullanılarak, görüntülerin uzamsal yönlerdeki seyreklik bilgisi elde edilebilir. Öte yandan, spektral görüntüler sürekli spektrum yönünde de ilintilidir. Bu nedenle üç boyutta uygulanan dönüşümler, spektral veriyi daha iyi sıkıştırmaya olanak sağlar. Dolayısıyla, dalgaboyu yönünü bir boyut, uzamsal yönleri iki boyut olarak seçtiğimizde elde ettiğimiz üç boyutlu spektral veri kübü, üç boyutlu bir dönüşüm uzayında seyrek olmaktadır. Sıkıştırılmış algılama teorisine dayanan sıkıştırılmış spektral görüntüleme tekniklerinde, üç boyutlu spektral veri küpü üstüste binmiş birkaç ölçümden seyrek sinyal yeniden oluşturma algoritmaları kullanılarak elde edilmektedir. Geleneksel spektral görüntüleme tekniklerine göre farklı avantajlar sağlayan ve bu prensiple çalışan çeşitli optik sistemler bulunmaktadır [3]–[7]. Bu bildiride, üç boyutlu veri kübünü sıkıştırılmış ölçümlerden geri oluşturmaya hedefleyen sıkıştırılmış foton süzgeçli görüntüleme tekniğine [10] odaklanılmaktadır.

Sıkıştırılmış foton süzgeçli görüntüleme tekniği, sıkıştırılmış algılama teorisinden faydalanarak hareketli dedektörle alınan ölçüm sayısını azaltmayı hedeflemektedir. Bu sistemde, foton süzgeçli spektral görüntüleme sistemine ek olarak görüntülenen ortamdaki gelen ışığı modüle eden bir kodlanmış (blokla-bloklama) maske kullanılmaktadır. Ortamdan gelen ışınım bir görüntüleme lensi vasıtasıyla bu maskeye düşürülmekte, sonrasında foton süzgecinden geçirilerek hareketli dedektörle ölçüm alınmaktadır. Maskenin gelen ışınım üzerinde uyguladığı modülasyonun, görüntüleme modelinin sıkıştırılmış algılama teorisine uygunluğunu artırdığı bilinmektedir [4], [6]. Elde edilen ölçümler, geliştirilen seyreklik tabanlı hızlı bir geriçatım yöntemi kullanılarak spektral görüntüler elde edilmektedir. Bu yöntemin performansında, seçilen seyreklik önseli oldukça kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada üç boyutlu tam ve yama-tabanlı ayırık kosinüs dönüşümleri kullanılarak, seyrekliğe dayalı görüntü geriçatım performansı incelenmektedir.

II. SIKIŞTIRILMIŞ FOTON SÜZGEÇLİ SPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ

Sıkıştırılmış foton süzgeçli spektral görüntüleme sistemi Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu sistemde, objeden gelen ışınım bir görüntüleme lensi kullanılarak maskenin olduğu düzleme düşürülmekte ve burada uzamsal olarak modüle edilmektedir. Modüle edilen ışınım foton süzgecinden geçtikten sonra hareketli dedektör kullanılarak ölçüm alınmaktadır. Burada K farklı düzlemde ölçüm alındığı düşünülmektedir. d_s ve d_k foton süzgecinin sırasıyla modülasyon yapılan maskeye ve k 'inci ölçüm düzlemine olan uzaklığını gösterir ($k = 1, \dots, K$). Görüntülenecek üç boyutlu spektral veri kübünün S spektral banda ayrıldığı varsayılır. Her bileşen λ_s ile gösterilen farklı dalga boyuna sahiptir ($s = 1, \dots, S$). $K < S$ olduğunda, sistem sıkıştırılmış durumda olmaktadır.

A. GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA MODELİ

Fresnel görüntüleme formülleri kullanılarak, elde edilen ölçümler ile spektral görüntüler arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir:

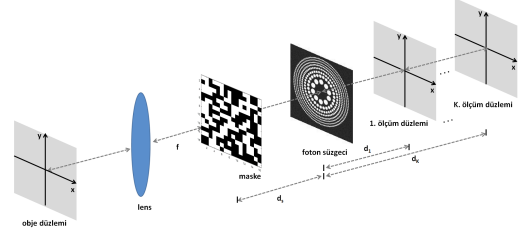
$$t_k[m, n] = \sum_{s=1}^S (x_s[m, n] c_s[m, n]) * h_{d_k, \lambda_s}[m, n] + w_k[m, n], \quad (1)$$

Burada $t_k[m, n]$ k 'inci ölçüm düzleminde $N \times N$ pikselden alınan gözlemdir ve her biri farklı dalga boyundaki yayılımdan kaynaklanan S adet terimden oluşur. $x_s[m, n]$ terimi λ_s dalga boyuna sahip spektral bileşenin ışıma şiddetinin dağılımını, $c_s[m, n]$ ise 1 ve 0'lerden oluşan maskeyi ifade etmektedir. $w_k[m, n]$ terimi ise ölçümlerdeki gürültüyü temsil etmektedir. Gelen ışınımdaki spektral bileşenler bu maskeyle modüle edildikten sonra, d_k uzaklığında ölçüm alındığında foton süzgeci sisteminin nokta yayılım fonksiyonu $h_{d_k, \lambda_s}[m, n]$ ile evriştirilir. Foton süzgecinin nokta yayılım fonksiyonu, foton süzgecinin açıklığına bağlıdır ve kapalı-form ifadesi aşağıdaki gibidir [11]:

$$h_{d_k, \lambda_s}(x, y) = \left| i \frac{\lambda_s}{\Delta_k} e^{-i\pi \frac{x^2 + y^2}{\Delta_k \lambda_s d_k^2}} * A \left(\frac{x}{\lambda_s d_k}, \frac{y}{\lambda_s d_k} \right) \right|^2 \quad (2)$$

Burada $\Delta_k = 1/d_s + 1/d_k$, ve $A(x, y)$ foton süzgecinin açıklık fonksiyonunun Fourier dönüşümüdür. Denklem (1)'de verilen

$h_{d_k, \lambda_s}[m, n]$ sinyali, sürekli $h_{d_k, \lambda_s}(x, y)$ sinyalinin Nyquist aralığından daha küçük eşit aralıklarla ayrıklaştırılmış halidir ($m, n = 0, \dots, N - 1$).



Şekil 1: Sıkıştırılmış foton süzgeçli spektral görüntüleme sistemi.

Denklem (1)'de verilen görüntü oluşturma modeli, matrisvektör formunda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$y = HCx + n, \quad (3)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_K \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_S \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} H_{1,1} & \dots & H_{1,S} \\ \vdots & & \vdots \\ H_{K,1} & \dots & H_{K,S} \end{bmatrix}.$$

$$C = \begin{bmatrix} \text{diag}(c_1) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \text{diag}(c_S) \end{bmatrix}.$$

Burada $y_k \in \mathbb{R}^{N^2}$ gürültülü k 'inci ölçüm vektörünü, $y \in \mathbb{R}^{KN^2}$ ise K adet ölçümün alt alta birleştirildiği toplam ölçüm vektörünü ifade etmektedir. Benzer şekilde, $x_s \in \mathbb{R}^{N^2}$ dalga boyu λ_s olan spektral bileşenin şiddet vektörünü, $x \in \mathbb{R}^{SN^2}$ ise tüm spektral bileşen vektörlerinin alt alta koyularak birleştirilmiş halini göstermektedir. $H_{k,s}$, $N^2 \times N^2$ boyutunda, dairesel bloklardan oluşan blok dolanır bir matristir ve h_{d_k, λ_s} fonksiyonu ile dairesel evrişim işlemine karşılık gelmektedir. H ise $KN^2 \times SN^2$ boyutunda olup foton süzgeçli spektral görüntüleme sisteminin genel sistem matrisidir. Maskeleye işlemi yapan C , $SN^2 \times SN^2$ boyutunda köşegen bir matristir ve köşegen elemanları 1 veya 0 değerlerini almaktadır. Tüm spektral bileşenler aynı modülasyona uğradığından dolayı, c_s fonksiyonları aynı elemanlara sahiptir. Son olarak, $n = [n_1^T \dots n_K^T]^T$ vektörü toplanır Gaussian gürültüyü temsil etmektedir ve $(n_k)_i \sim N(0, \sigma_k^2)$ dağılımına sahiptir.

B. SEYREKLİĞE DAYALI GÖRÜNTÜ GERİÇATIM YAKLAŞIMI

Ters problemde hedef, gürültülü, sıkıştırılmış, üstüste binmiş ve bulanıklaşmış ölçümleri, yani y 'yi, kullanarak, bilinmeyen spektral görüntüleri, yani x 'i, geri oluşturmaktır. Bu eksik belirtilmiş ters problem kötü konumlanmış ve seyrekliğe dayalı düzenleştirici kullanılarak şu şekilde formüle edilebilir:

$$\min_x \nu \|y - HCx\|_2^2 + \mathcal{R}(x) \quad (4)$$

Doğal görüntülerin belirli bir iki boyutlu dönüşüm uzayında seyrek olarak ifade edilebilmesi ve spektral görüntülerin sürekli spektrumda da ilintili olması, üç boyutta seyreklik tabanlı bir düzenleştirme fonksiyonu kullanmayı teşvik etmektedir.

Bu çalışma kapsamında, üç boyutlu tam ayırık kosinüs dönüşümü (3B-TAKD) ve yama-tabanlı ayırık kosinüs dönüşümü (3B-YAKD) içeren aşağıdaki düzenleştirme fonksiyonları kullanılmaktadır:

$$3\text{B-TAKD: } \mathcal{R}_T(x; b) = \|Qx - b\|_2^2 \quad s.t. \quad \|b\|_0 \leq \beta$$

$$3\text{B-YAKD: } \mathcal{R}_Y(x; v) = \sum_{j=1}^{SN^2} \|WP_jx - v_j\|_2^2 \quad s.t. \quad \|v\|_0 \leq \gamma$$

Yukarıda verilen 3B-TAKD formülasyonunda, $Q \in \mathbb{R}^{SN^2 \times SN^2}$ 3 boyutlu ayırık kosinüs dönüşüm (AKD) matrisi, $b \in \mathbb{R}^{SN^2}$ ise dönüşüm katsayılarını içeren seyrek kod vektörüdür. $\|b\|_0$ değeri b vektöründeki sıfırdan farklı elemanların sayısı ve β spektral görüntü kübünün seyreklik derecesine bağlı olan seyreklik parametresidir.

3B-YAKD formülasyonunda ise, spektral küpten $P_j \in \mathbb{R}^{L \times SN^2}$ işleci kullanılarak $n_1 \times n_1 \times n_2$ büyüklüğünde 3 boyutlu yamalar elde edilir ($L = n_1^2 n_2$), ve bunların tümünün $W \in \mathbb{R}^{L \times L}$ matrisiyle taşındıkları AKD uzayında seyrek olması teşvik edilir. Her $v_j \in \mathbb{R}^L$, j 'inci yamanın seyrek kodu iken; $v \in \mathbb{R}^{LSN^2}$ vektörü v_j 'lerin alt alta dizilmesiyle oluşturulur. γ ise ilgili seyreklik parametresidir.

Denklem (4)'te verilen eniyileme problemini çözmek için, görüntüyü güncelleme ve seyrek kodlama adımlarından oluşan bir almaşık enküçültme (alternating minimization) yöntemi geliştirilmiştir. Seyrek kodlama adımında, 3B-TAKD için $\mathcal{R}_T(x; b)$, 3B-YAKD için ise $\mathcal{R}_Y(x; v)$ düzenleştiricileri sırasıyla b ve v için enküçültülür. Bunun için, Qx 'in en büyük β elemanı korunup geri kalanı sıfırlanarak optimum b elde edilir. 3B-YAKD durumunda ise optimum v , AKD uzayındaki bütün yamaların ($\{WP_jx\}_{j=1}^{SN^2}$) elemanları arasındaki en büyük γ kadarının, v vektörünün karşılık gelen konumlarına atanıp gerisinin sıfırlanmasıyla elde edilir.

Almaşık enküçültme yönteminin görüntü güncelleme adımı için ise, aşağıdaki fonksiyonların enküçültülmesi gerekir:

$$\begin{aligned} 3\text{B-TAKD: } \nu \|y - HCx\|_2^2 + \|Qx - b\|_2^2 \\ 3\text{B-YAKD: } \nu \|y - HCx\|_2^2 + \sum_{j=1}^{SN^2} \|WP_jx - v_j\|_2^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Denklem (5)'teki iki problem de en küçük kareler problemidir ve normal denklemleri aşağıda verilmektedir:

$$\begin{aligned} 3\text{B-TAKD: } (\nu C^* H^* H C + I)x &= (\nu C^* H^* y + Q^* b) \\ 3\text{B-YAKD: } (\nu C^* H^* H C + G)x &= (\nu C^* H^* y + z) \end{aligned} \quad (6)$$

Denklem (6)'da $G = \sum_{j=1}^{SN^2} P_j^T W^* W P_j$ 'dir ve $SN^2 \times SN^2$ boyutundaki birim matrisin L ile çarpımına eşittir. Ayrıca, $z = \sum_{j=1}^{SN^2} P_j^T W^* x$ olan vektördür. Denklem (6)'dan x 'i elde etmek için iki durumda da eşlenik-gradyan yöntemi kullanılmaktadır. H matrisiyle olan vektör çarpımları hızlı Fourier dönüşümü (FFT) kullanılarak hızlı bir şekilde yapılmaktadır.

III. SAYISAL SONUÇLAR

Burada, sayısal benzetimler yoluyla, 3B-TAKD ve 3B-YAKD seyreklik önsellerinin görüntü geri oluşturma performansları incelenmektedir. Benzetimler için dalgaboyları 540

nm ve 590 nm aralığında 10 nm aralıkla seçilmiş altı spektral görüntü kullanılmıştır. Foton süzgecinin dış çapı 3.36 mm ve en küçük delik çapı 15 μm seçilmiştir. Bu dizayn sonucunda dalgaboyu 560 nm olan kaynak için odak uzaklığı 90 mm olmuştur. Spektral görüntüler olarak [7]'de yukarıda verilen dalgaboylarına karşılık gelen görüntülerden 128×128 boyutunda kesitler kullanılmıştır. Tüm benzetimler MATLAB ortamında 16 GB RAM ve i7 7700K 4.20 GHz işlemcili bir bilgisayarda yapılmıştır.

Deneyler için iki aşırı uçtaki peşpeşe dalgaboylarına karşılık gelen odak uzaklıklarının orta noktalarından ve ortadaki dalgaboyunun odak noktasından olmak üzere toplam üç noktada ölçüm alınmıştır. Altı spektral görüntünün üç ölçümden gericiatılacak olması sistemin sıkıştırma oranını % 50 yapmaktadır. Deneyler için (3)'te verilen model kullanılarak girdi sinyal-gürültü oranının (SNR) 20 dB, 30 dB ve sonsuz olduğu veri kümeleri oluşturulmuştur. Bu veriler kullanılarak (4)'teki eniyileme problemi 3B-TAKD ve 3B-YAKD seyreklik önselleri seçilerek numerik olarak çözülmüştür. Algoritmaların cpu-time'da çalışma süreleri Tablo I'de, geri kazanılan görüntülerin PSNR ve SSIM değerleri Tablo II'de verilmektedir. 30 dB girdi SNR'ının olduğu durumda gerikazanılan spektral görüntüler, orijinal görüntülerle birlikte Şekil 2'de gösterilmektedir.

Seyreklik önsellerinin farklı spektral görüntülerdeki performansını incelemek üzere, kullanılan spektral küpten farklı uzamsal ve spektral özelliklere sahip kesitler seçilmiştir. Bu kesitlerdeki spektral görüntüler üst üste eklendiği durumda elde edilecek görüntüler Şekil 3'te gösterilmektedir. Herbir kesit için, bir önceki deneyde olduğu gibi, üç adet ölçüm alınmış ve 20 dB ile 30 dB SNR durumlarında görüntü gericiatım başarımları incelenmiştir. Geri oluşturulan görüntülerin PSNR ve SSIM değerleri Tablo III'te verilmektedir.

TABLO I: Farklı seyreklik önsellerinin kullanıldığı durumlarda algoritmanın çalışma süresi.

SNR (dB)	3B-TAKD	3B-YAKD
20	697 s	1038 s
30	773 s	1449 s
Sonsuz	7195 s	7817 s

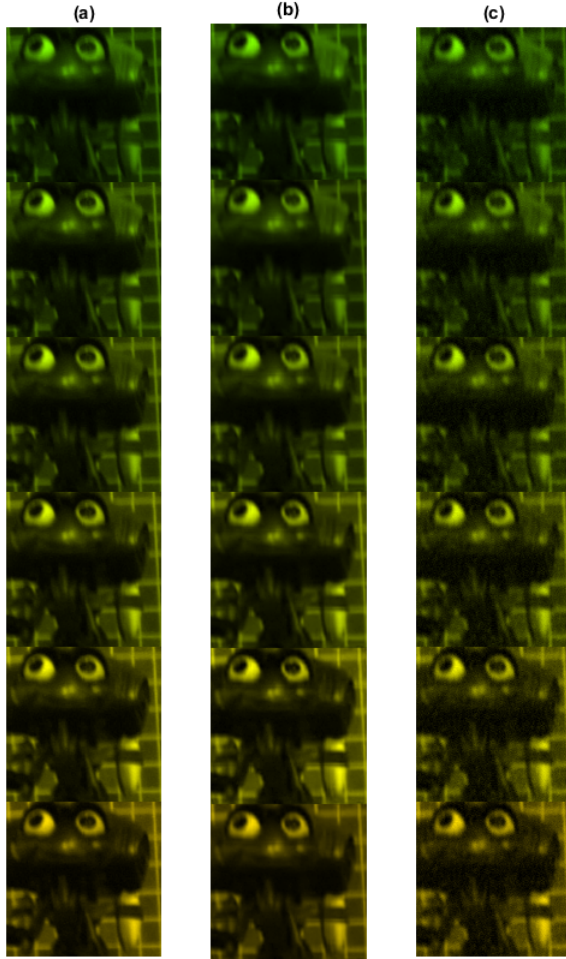
TABLO II: Farklı seyreklik önsellerinin kullanıldığı durumlarda geri oluşturulan görüntülerin PSNR(dB) ve SSIM değerleri (Veri seti 1 için).

SNR (dB)	3B-TAKD	3B-YAKD
20	25.5/0.63	33.2/0.93
30	32.9/0.85	35.1/0.96
Sonsuz	40.2/0.97	43.6/0.99

IV. DEĞERLENDİRME

Deney sonuçları, sıkıştırılmış ölçümlerden farklı uzamsal ve spektral özelliklere sahip orijinal spektral görüntülerin başarılı bir şekilde elde edilebildiğini göstermektedir. 3B-YAKD seyreklik önselinin kullanıldığı durumda orijinal spektral görüntülerin 3 ölçümden başarılı bir şekilde geri kazanıldığı görülmektedir. Ancak 3B-YAKD önselinin seyrek kodlama adımının hesaplama yükü, 3B-TAKD'ye göre daha fazladır.

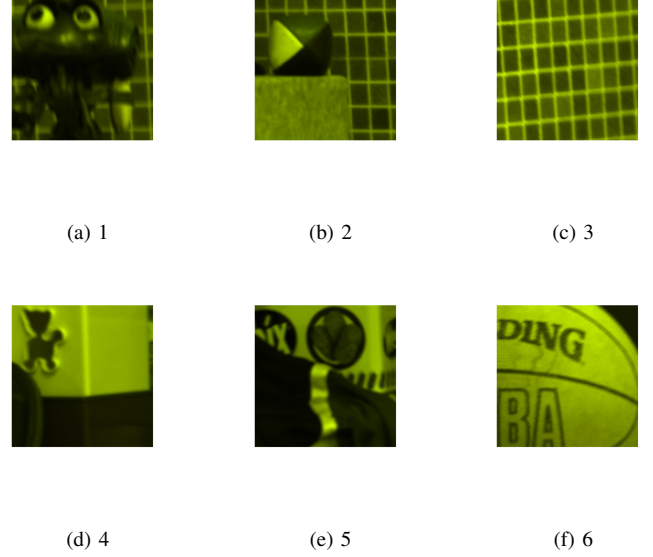
Bu durum Tablo 1’de verilen algoritmaların çalışma sürelerinden görülebilmektedir. İlerideki çalışmalarda, daha yüksek sıkıştırma oranları ve görüntünün olduğu durumlarda başarılı geri oluşturma için, öğrenme tabanlı seyreklik önsellerinin geliştirilmesi planlanmaktadır.



Şekil 2: 30 dB girdi SNR’nın olduğu durum için geri oluşturulan spektral görüntüler. (a) Referans görüntüler (b) 3B-YAKD kullanılan geri oluşturulmuş görüntüler (c) 3B-TAKD kullanılan geri oluşturulmuş görüntüler.

KAYNAKLAR

- [1] G. G. Shepherd, *Spectral Imaging of the Atmosphere*. Academic Press, 2002, vol. 82.
- [2] G. A. Shaw and H. K. Burke, “Spectral imaging for remote sensing,” *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 14, pp. 3–28, 2003.
- [3] F. S. Oktem, L. Gao, and F. Kamalabadi, “Computational spectral and ultrafast imaging via convex optimization,” in *Handbook of Convex Optimization Methods in Imaging Science*, V. Monga, Ed., pp. 105–127. Springer, New York, 2017.
- [4] G. R. Arce, D. J. Brady, L. Carin, H. Arguello, and D. S. Kittle, “Compressive coded aperture spectral imaging: An introduction,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 1, pp. 105–115, 2014.
- [5] Y. August, C. Vachman, Y. Rivenson, A. Stern, “Compressive hyperspectral imaging by random separable projections in both the spatial and the spectral domains,” *Applied Optics*, vol. 52, no. 10, pp. D46–D54, 2013.



Şekil 3: Farklı uzamsal ve spektral özelliklere sahip spektral görüntüler ve karşılık gelen veri seti numaraları.

TABLO III: Farklı uzamsal ve spektral görüntüler için farklı seyreklik önsellerinin kullanıldığı durumlardaki geri oluşturulan görüntülerin PSNR(dB)/SSIM değerleri.

Veri seti no	SNR (dB)	3B-TAKD	3B-YAKD
2	20	27.1/0.67	31.7/0.90
	30	30.9/0.83	34.4/0.95
3	20	29.9/0.89	29.2/0.94
	30	33.0/0.95	31.8/0.97
4	20	24.3/0.39	27.1/0.83
	30	30.5/0.74	31.4/0.89
5	20	27.1/0.59	33.2/0.92
	30	32.1/0.83	35.0/0.95
6	20	26.3/0.65	21.7/0.84
	30	28.2/0.77	31.4/0.91

- [6] H. Rueda, H. Arguello, and G. R. Arce, “DMD-based implementation of patterned optical filter arrays for compressive spectral imaging,” *JOSA A*, vol. 32, no. 1, pp. 80–89, 2015.
- [7] A. Rajwade, D. Kittle, T. H. Tsai, D. Brady, and L. Carin, “Coded hyperspectral imaging and blind compressive sensing,” *SIAM Journal on Imaging Sciences*, vol. 6, no. 2, pp. 782–812, 2013.
- [8] F. S. Oktem, F. Kamalabadi, and J. M. Davila, “High-resolution computational spectral imaging with photon sieves,” in *IEEE Int. Conf. on Image Processing (ICIP)*, 2014, pp. 5122–5126.
- [9] R. M. Willett, M. F. Duarte, M. A. Davenport, and R. G. Baraniuk, “Sparsity and structure in hyperspectral imaging: Sensing, reconstruction, and target detection,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 1, pp. 116–126, 2014.
- [10] O. F. Kar, U. Kamaci, F. C. Akyon, and F. S. Oktem, “Compressive Photon-Sieve Spectral Imaging,” To appear in *OSA Imaging and Applied Optics Congress*, 2018.
- [11] F. S. Oktem, J. M. Davila, and F. Kamalabadi, “Image formation model for photon sieves,” in *IEEE Int. Conf. on Image Processing (ICIP)*, 2013, pp. 2373–2377.