

# Fotoakustik Görüntüleme Dalgacık Dönüşümü ile Gürültü Azaltımı Noise Reduction in Photoacoustic Imaging using Wavelet Transform

Gökhan GÜNEY<sup>1</sup>, Nasire ULUÇ<sup>2</sup>, Aytaç DEMİRKIRAN<sup>2</sup>  
Esra AYTAÇ-KİPERGİL<sup>2</sup>, M. Burçin ÜNLÜ<sup>2</sup>, Özlem Birgül<sup>1</sup>

1. Biyomedikal Mühendisliği Bölümü,  
Ankara Üniversitesi  
{gguney,obirgul}@ankara.edu.tr

2. Fizik Bölümü,  
Boğaziçi Üniversitesi  
{nasire.uluc,aytac.demirkiran,esra.aytac,burcin.unlu}@boun.edu.tr

## Özetçe

Fotoakustik mikroskop (Photoacoustic Microscopy, PAM) fotoakustik etki temelinde dayanan ve son yıllarda geliştirilmeye başlayan hibrid bir görüntüleme tekniğidir. Optik kontrastı akustik olarak algılayan sistem yapısı sayesinde optik difüzyon sınırının ötesinde derin bir görüntülemeyi yüksek çözünürlükle sunabilmektedir. PAM sistemi ile görüntüleme kaydedilen sinyaller, sistem bileşenleri ve çevresel etkilerle gürültüye maruz kalmaktadır. Yapılan çalışmanın ilk aşamasında akustik dalga denkleminin çözümüyle oluşturulan akustik sinyal üzerine belirli oranlarda sentetik gürültüler eklenmiştir. Gürültülü sinyallere farklı ana dalgacıklar kullanılarak ayrık dalgacık dönüşümü ile filtreleme işlemi uygulanmış ve filtreleme performansının değerlendirilmesi için sinyaller üzerinde gürültü metrikleri hesaplanmıştır. İkinci aşamada, ilk aşamada elde edilen veriler doğrultusunda PA sinyallerin filtrelenmesi için uygun ana dalgacıklar seçilmiş filtrelenen sinyaller ile görüntüler oluşturularak, görüntüler üzerinde gürültü metrikleri incelenmiştir.

## Abstract

Photoacoustic microscopy (PAM) is a hybrid imaging technique based on the photoacoustic effect and which has begun to develop in recent years. Thanks to the system structure that senses the optical contrast acoustically, it is able to present deep imaging with high resolution beyond the optical diffusion limit. Signals recorded in imaging with the PAM system are exposed to noise by system components and environmental effects. In the first stage of the work, a synthetic noise is added at a certain rate on the acoustic signal generated by the solution of the acoustic wave equation. Noisy signals are filtered using discrete wavelet transforms using different main wavelets and noise metrics are calculated on the signals to evaluate the filtering performance. In the second step, the noise metrics are examined on the images by generating the images with the filtered wavelet signals, which are suitable for filtering the PA signals in the direction of the data obtained in the first stage.

## 1. Giriş

Fotoakustik (Photoacoustic, PA) görüntüleme teknikleri, son yıllarda daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Optik görüntülemenin yüksek kontrast özelliğini ve ultrasonik görüntülemenin yüksek çözünürlük özelliğini birleştiren yapısı ve iyonlaştırıcı radyasyon içermemesi sayesinde PA görüntüleme teknikleri bir çok görüntüleme sistemine alternatif oluşturabilmektedir.

Günümüzde, Pozitron emisyon tomografisi (PET), X-ışını bilgisayarlı tomografisi (X-BT), manyetik rezonans görüntüleme (MR) ve ultrason (US) gibi görüntüleme yöntemleri, kanser tanısında sıklıkla kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu tekniklerin avantajlarının yanı sıra belirli dezavantajları da bulunmaktadır. PET ve X-BT sistemleri için en büyük dezavantaj yüksek maliyetlerin yanı sıra iyonlaştırıcı radyasyon içermeleridir. MR görüntüleme sistemi için yine yüksek maliyetin yanı sıra, yüksek manyetik ve elektrik alan implant kullanan hastalar için dezavantaj oluşturmaktadır [1]. US görüntüleme sistemi ve diğer sistemler için diğer bir dezavantaj ise düşük kontrasta sahip olmaları olarak göze çarpmaktadır [2]. PA görüntüleme teknikleri, bahsedilen geleneksel görüntüleme yöntemlerinin dezavantajlarının üstesinden gelebilen teknikler olarak kullanılmaya başlamıştır. PA görüntüleme sistemleri, mikrovasküler yapılar gibi anatomik yapılar hakkında bilgi sağlayabilmesinin yanı sıra, kan oksijen saturasyonu, kan akışı ve sıcaklık gibi fonksiyonel bilgiler de sağlayabilmektedir. Bu özellikler PA görüntülemeyi klinik ve klinik öncesi araştırmalar, kanser araştırmaları vb. bir çok alanda kullanılabilir hale getirmektedir [3].

Fotoakustik mikroskop (PAM), PA etki prensibine dayanan bir PA görüntüleme tekniğidir. Sistem akustik saçılmanın dokularda az olması avantajını kullanarak optik difüzyon sınırının (yumuşak dokuda ~ 1 mm) aşılmasını sağlamaktadır ve ölçeklenebilirlik özelliği ile birkaç milimetreye kadar görüntüleme derinliğinde yüksek çözünürlük sunabilmektedir. Sistem optik uyartım kaynakları ile uyarılan dokularda, farklı dalga boylarındaki elektromanyetik radyasyonun farklı dokularda farklı oranda soğurulması temelinde dayanmaktadır. PAM sisteminde,

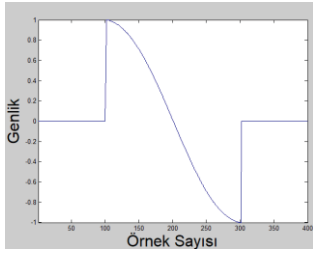
dokunun uyarılması sonucu oluşan akustik basınç, ultrasonik prob yardımıyla ölçülmekte ve bu ölçümleri oluşturan optik soğurma dağılımı bulunmaktadır [4].

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu bölümde öncelikle akustik sinyal oluşumu ve veri toplamada kullanılan deney düzeneği hakkında bilgi verilmiştir. Ardından görüntü oluşturma algoritması anlatılmış ve gürültü analizi ile filtre performanslarının değerlendirilmesi için kullanılan metrikleri tanımlanmıştır.

### 2.1. Akustik Sinyal Oluşumu

PA etki ve sinyal oluşumunun temel ilkesi basitçe şu şekilde açıklanabilir: Doku EM radyasyon enerjisini soğurur, soğurulan enerji ısıya dönüşür ve dokunun sıcaklığı artar. Sıcaklık arttıkça ısı genleşme gerçekleşir ve ortamda akustik basınç meydana gelir. Akustik sinyalin oluşumu; lazerin darbe süresi, enerjisi, dalga boyu vb. parametrelere bağlı bulunmaktadır. Teorik olarak akustik sinyal akustik dalga denkleminin çözümü ile elde edilebilmektedir [5]. Akustik dalga denkleminin çözümü ile elde edilen akustik sinyal örneği şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1: Oluşturulan akustik sinyal

### 2.2. Veri Toplanan Deney Düzeneği

Bu çalışmada, akustik dalga denklemi çözümüyle elde edilen sinyallerin yanısıra, Boğaziçi Üniversitesi Medikal ve Biyoloji Fiziki Araştırma Grubu Labrotuvarları’nda geliştirilmiş olan fotoakustik mikroskop sisteminden alınan sinyaller kullanılmıştır. PAM sistemine ait görüntüler Şekil 2’de verilmiştir. Sistemde fiber tabanlı, parametreleri ayarlanabilir bir lazer, filtre, kolimatör, yansıtıcı ayna, mikroskop objektifi, ultrason probu, ön yükselteç, üretici/alıcı ve motor sürücüsü bileşenleri bulunmaktadır. Sistem ile ilgili detaylı bilgiler Aytac-Kiperil vd. [6]’da verilmiştir.

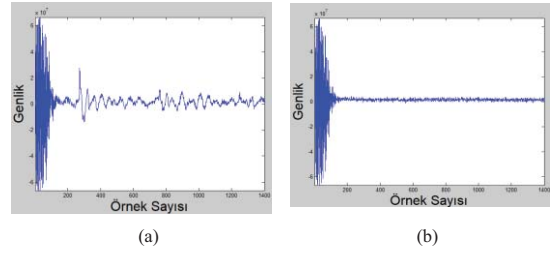


Şekil 2: PAM sistemi

### 2.3. Görüntü Oluşturma Algoritması

Çalışma kapsamında test cisminin (USAF Resolution Test Target) farklı dalga boylarında uyarım kaynakları kullanılarak PAM sistemi ile görüntülenmesinden elde edilen

sinyaller kullanılmıştır. PAM sinyallerinde sadece lazer – obje etkileşimi bulunan sinyaller soğurma bilgisi içermektedir. Şekil 3’de arkaplan ve objeye karşılık gelen piksellerden alınan örnek PAM sinyalleri gösterilmektedir.



Şekil 3: PAM sinyalleri (a) Objeye karşılık gelen piksellerden alınan sinyal (b) Arka plana karşılık gelen piksellerden alınan sinyal

Görüntü oluşturma algoritması aşağıdaki basamakları takip etmektedir.

1.  $P_i$  için spektrogram oluşturun.
2. Tetikleme sinyalini bul ve maskeleyin.
3. ‘N’ dalga şekli modelini kullanarak korelasyon hesaplayın.
4. Korelasyonun maksimum olduğu aralığı bulun.
5. Filtre seçeneğini uygulayın.
6.  $i = i_{max}$  mı? Evet ise devam et, Hayır ise 1. basamağa dön.
7. I matrisinden  $I_{max}$ ,  $I_{min}$  hesaplayın ve dinamik aralığı ayarlayarak normalize görüntüyü oluşturun.

$i$  örnek sayısı olmak üzere  $P_i$  i. örnek için ise piksellerden alınan sinyali ifade etmektedir.

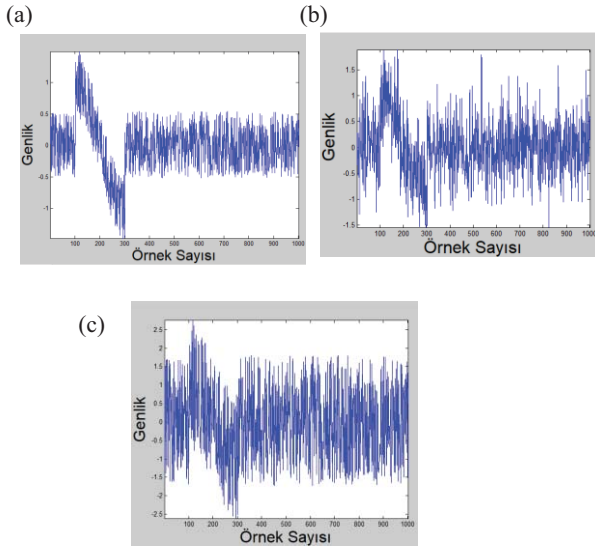
Algoritma adımları ile ilgili detaylı bilgilere daha önceki çalışmamızda yer verilmiştir [7]. Bu çalışmada filtreleme adımında ayrık dalgacık dönüşümü ile filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

### 2.4. Gürültü Analizi ve Performans Ölçüm Metrikleri

Çalışmada gürültü analizi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada akustik dalga denkleminin [4] çözümüyle oluşturulan akustik sinyal, ikinci aşamada PAM sisteminden elde edilen sinyaller ve oluşturulan görüntüler kullanılmıştır.

İlk aşamada oluşturulan akustik sinyal üzerine MATLAB® ortamında ‘uniform’ ve ‘gaussian’ sentetik gürültüler eklenmiştir. Gürültülerin standart sapması, oluşturulan akustik dalganın maksimum değerinin %30, %50 ve %100’ü olacak şekilde ayarlanmıştır. Gürültü eklenmiş sinyal örnekleri şekil 4’de gösterilmektedir.

Gürültü eklenmiş sinyallerin filtrelenmesinde MATLAB® Wavelet Toolbox’ta ‘bior3.5’, ‘bior3.7’ ve ‘sym7’ dalgacıkları kullanılmıştır. Kullanılan dalgacıklar, akustik dalga ile benzerlikleri göz önüne alınarak belirlenmiş ve filtreleme işlemi yapılırken ‘rigrsure’, ‘universal’, ‘heursure’ ve ‘minimaxi’ eşik değer belirleme algoritmaları her bir dalgacık için kullanılmıştır [8]. Daha sonra her bir eşik değer üzerinden sinyallere yumuşak ve sert eşikleme uygulanıp filtrelenmiş sinyaller elde edilmiştir.



Şekil 4: Gürültülü sinyaller (a) % 30 uniform gürültü eklenmiş sinyal (b) % 50 gaussian gürültü eklenmiş sinyal (c) %100 uniform gürültü eklenmiş sinyal

İlk aşamada filtre performanslarının değerlendirilmesi için, elde edilen filtrelenmiş sinyaller ve dalga denklemi çözümü ile elde edilen sinyal arasındaki farklar zaman uzayında incelenmiş ve karekök ortalama karesel hata (root mean square error, RMSE) hesabı yapılmıştır.

RMSE hesabı için kullanılan formül aşağıda verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N (x_i - x'_i) \right)^2} \quad (1)$$

N sinyalin örnek sayısını,  $x_i$  orijinal sinyali,  $x'_i$  filtrelenmiş sinyali ve  $i$  örnek sayısını ifade etmektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, ayrık dalgacık dönüşümü ile filtreleme işlemi PAM sinyallerine uygulanmış ve algoritma akışına göre görüntü oluşturulmuştur. Elde edilen görüntüler üzerinde ilgi alanları seçilerek, yaygın olarak kullanılan sinyal-gürültü-oranı (signal-to-noise ratio, SNR) ve kontrast-gürültü-oranı (contrast-to-noise ratio, CNR) metrikleri hesaplanmıştır:

$$CNR = \frac{2 \left( |ort(obje) - ort(arka plan)| \right)}{std(obje) + std(arka plan)} \quad (2)$$

$$SNR = \frac{ort(obje)}{std(arka plan)} \quad (3)$$

Yukarıdaki ifadelerde, 'std' standart sapma, 'ort' ortalama değeri ifade etmektedir.

### 3. Bulgular

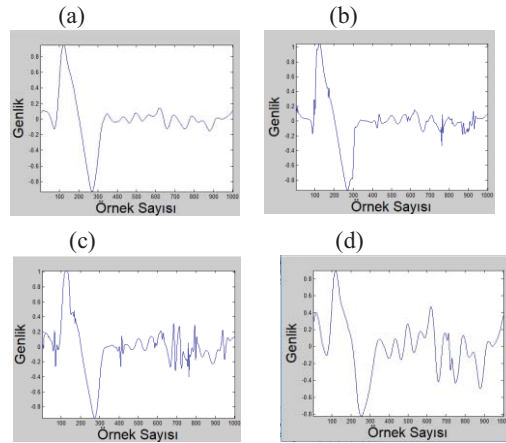
Çalışmanın ilk aşamasında akustik dalga denkleminin çözümüyle elde edilen zaman sinyali üzerine sentetik olarak farklı yüzdelerde gürültüler eklenmiş ve dalgacık dönüşümü ile filtreleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gaussian gürültüsü için filtrelenmiş sinyaller ve oluşturulan orijinal sinyal

üzerinden hesaplanan RMSE değerleri Tablo 1'de, filtrelenmiş sinyallere ait örnekler ise Şekil 5 'de verilmiştir.

Tablo 1: Gaussian gürültü için hesaplanan RSME değerleri

Filtre	Eşik	%30		%50		%100	
		RMSE		RMSE		RMSE	
		Y*	S*	Y*	S*	Y*	S*
bior3.5	Uni.	0.1271	0.1883	0.1821	0.3404	0.3084	0.6481
	Rigr.	0.2049	0.2857	0.3442	0.4761	0.6873	0.9517
	Heurs.	0.1919	0.2194	0.3223	0.3651	0.6432	0.7293
	Minim.	0.1368	0.2575	0.2218	0.4294	0.4103	0.8557
bior3.7	Uni.	0.1299	0.1497	0.1830	0.2673	0.3036	0.5191
	Rigr.	0.1912	0.2829	0.3233	0.4729	0.6356	0.9457
	Heurs.	0.1762	0.2130	0.2982	0.3564	0.5843	0.7128
	Minim.	0.1223	0.2334	0.2025	0.3839	0.3624	0.7749
sym7	Uni.	0.1457	0.1323	0.1926	0.1774	0.3092	0.3092
	Rigr.	0.1311	0.2120	0.1955	0.3423	0.3699	0.6908
	Heurs.	0.1354	0.1147	0.1866	0.1740	0.3092	0.3104
	Minim.	0.1282	0.1799	0.1810	0.2906	0.3071	0.5502

\*Y : Yumuşak Eşikleme, S : Sert eşikleme



Şekil 5: Filtrelenmiş sinyaller (a) uniform %30 gürültü – sym7- universal soft filtreli (b) uniform %30 gürültü – bior3.5- universal yumuşak filtreli (c) uniform %50 gürültü – bior3.7- rigrsure yumuşak filtreli (d) gaussian %100 gürültü – sym7- rigrsure yumuşak filtreli

İlk aşamada elde edilen sonuçlar Tablo 1'de incelendiğinde düşük gürültü seviyesi için yumuşak eşikleme uygulandığında bütün ana dalgacıklar ve eşik değer belirleme yöntemleri göz önüne alındığında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sert eşikleme uygulandığında en iyi sonucu sym7-heursure, hesaplanan 0.115 RMSE değeri ile vermiş ve yumuşak eşiklemeye göre daha iyi performans sergilemiştir. Orta gürültü seviyesinde bior3.5 ve bior3.7 dalgacıkları yumuşak ve sert eşikleme uygulandığında benzer sonuçlar verirken sym7 dalgacığının filtreleme performansının diğer iki dalgacığa oranla daha iyi olduğu gözlenmiştir. Yüksek gürültü seviyesinde ise bior3.7 ve sym7 dalgacıkları için yumuşak eşiklemede benzer ve sert eşiklemeye oranla daha iyi sonuçlar elde edilirken, bior3.5 dalgacığının filtreleme performansı olarak diğer iki dalgacığın gerisinde kaldığı gözlenmiştir.

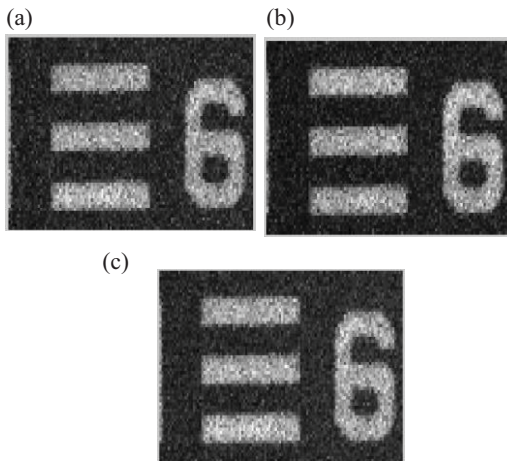
Çalışmanın ikinci aşamasında, dalga boyu/lazer gücü parametrelerine göre iki farklı veri seti kullanılmıştır. Her bir veri seti için 'bior3.7' ve 'sym7' dalgacıkları ile dört farklı eşik değeri belirleme algoritması üzerinden yumuşak ve sert

eşikleme yapılmıştır. Filtrelenmiş sinyaller kullanılarak elde edilen görüntüler için dalga boyu/lazer gücü parametreleri, (G1): 785 nm–32 mW, (G2) : 880 nm – 33 mW şeklindedir. Oluşturulan görüntüler için hesaplanan SNR ve CNR değerleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2: Oluşturulan görüntüler üzerinden hesaplanan metrikler

	Filtre	Eşik	Yumuşak		Sert			
			SNR	CNR	SNR	CNR		
G1	-	--	5.2890	1.5650	5.2890	1.5650		
		bior3.7	Uni.	12.0295	6.0733	11.5410	4.9744	
			Rigr.	12.5953	6.2324	11.8920	5.8225	
			Heurs.	11.1096	5.4065	12.1297	5.2823	
			Minim.	11.5190	5.2475	12.8001	5.8340	
			sym7	Uni.	12.2606	6.2310	8.2557	5.1587
	Rigr.	12.3719		6.1829	11.7221	5.4065		
	Heurs.	8.2940		4.3188	9.8221	4.5849		
	G2	-	--	7.7997	3.5443	7.7997	3.5443	
			bior3.7	Uni.	16.8304	8.7184	17.1516	7.0546
				Rigr.	16.6577	7.0545	17.2214	9.1824
				Heurs.	15.8134	8.9491	17.2256	7.2811
Minim.				15.8091	9.1823	17.9535	8.9486	
sym7				Uni.	16.3920	8.5502	11.4414	7.3536
		Rigr.	16.8952	8.7715	16.3382	8.6916		
		Heurs.	14.1261	7.3019	14.0515	7.0960		
-		Minim.	19.5070	8.3532	15.0884	7.9111		

Tablo 2’de elde edilen sonuçlar incelendiğinde G1 görüntüsü için bior3.7 dalgacığında tüm eşik değer belirleme yöntemleri için yumuşak ve sert eşiklemede genel olarak benzer SNR ve CNR iyileştirmeleri elde edilirken, sym7 dalgacığı için ise yumuşak eşiklemenin sert eşiklemeye oranla daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. G1 görüntüsü için en iyi sonuçlar minimaxi-sert eşikleme ile elde edilmiştir. G2 görüntüsü için ise bior3.7 dalgacığı kullanıldığında sert eşikleme ile elde edilen, sym7 dalgacığı kullanıldığında ise yumuşak eşikleme ile elde edilen sonuçların görece daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. G1 görüntüsü için örnekler Şekil 6’da gösterilmektedir.



Şekil6: G1 görüntü örnekleri (a) orijinal görüntü (b) sym7-minimaxi yumuşak filtrelenmiş görüntü (c) bior3.7 minimaxi sert filtrelenmiş görüntü

## 4. Sonuçlar

Çalışmanın ilk aşamasında üç farklı dalgacık seçimi yapılmış ve bu dalgacıklar ile oluşturulan gürültülü sinyallerin filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada elde edilen bulgular doğrultusunda ‘sym7’ dalgacığı ve ‘bior3.7’ dalgacığının RMSE iyileştirmesi yönünden ‘bior3.5’ dalgacığına göre daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ‘bior3.7’ ve ‘sym7’ dalgacıkları ile filtreleme işlemi PAM sinyallerine uygulanmış ve bu sinyallerden görüntü oluşturma algoritması yardımıyla görüntüler elde edilmiştir. İkinci aşamada elde edilen bulgular doğrultusunda SNR ve CNR iyileştirmesi için ‘bior3.7’ dalgacığı kullanılırsa ‘minimaxi’ eşik belirleme algoritması ile ‘sert eşikleme’ yapılması, ‘sym7’ dalgacığı kullanılırsa ‘minimaxi’ eşik belirleme algoritması ile ‘yumuşak eşikleme’ yapılması uygun bulunmuştur.

## Teşekkür

Bu çalışma Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Projeleri Koordinatörlüğü 17L0443010 numaralı projesi ve Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı’nın 2009 K120520 numaralı projesi tarafından desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Y. Zhou and L. V. Wang, “Translational Photoacoustic Microscopy,” in *Frontiers in Biophotonics for Translational Medicine: In the Celebration of Year of Light (2015), 2016*, pp. 47–73.
- [2] Esenaliev, Rinat O., Alexander A. Karabutov, and Alexander A. Oraevsky. "Sensitivity of laser opto-acoustic imaging in detection of small deeply embedded tumors." *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 5.4 (1999): 981-988.
- [3] Beard, Paul. "Biomedical photoacoustic imaging". *Interface focus* (2011): rsfs20110028.
- [4] M. Xu and L. V. Wang, “Photoacoustic imaging in biomedicine,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 77, no. 4, 2006.
- [5] Wang, Lihong V. "Tutorial on photoacoustic microscopy and computed tomography." *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 14.1 (2008): 171-179.
- [6] Aytac-Kiperçil, E., Demirkiran, A., Uluc, N., Yavas, S., Kayıkcıoğlu, T., Salman, S., ... & Unlu, M. B. (2016). Development of a Fiber Laser with Independently Adjustable Properties for Optical Resolution Photoacoustic Microscopy. *Scientific Reports*, 6
- [7] Güney, G., Birgül, Ö., Aytac-Kiperçil, E., Demirkiran, A., Uluç, N., & Ünlü, M. B. (2017, May). Image reconstruction in photoacoustic microscopy and noise analysis. In *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2017 25th* (pp. 1-4). IEEE.
- [8] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. M. Poggi, *Matlab wavelet toolbox user guide*. [Online] Available [http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/wavelet/wavelet Ug.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/wavelet/wavelet Ug.pdf)