



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Flaş ERG Sinyallerinin İşlemede Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü ve Sürekli Dalgacık Dönüşümü Tekniklerinin Karşılaştırılması

 İrem ŞENYER YAPICI ^a,  Rukiye UZUN ARSLAN ^{a,*},  Okan ERKAYMAZ ^b

^a *Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, TÜRKİYE*

^b *Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, TÜRKİYE*

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: rukiyeuzun67@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.759239

ÖZET

Flaş Elektoretinogram sinyalleri gözün retina tabakasının flaş bir ışık ile uyarılması sonucu ortaya çıkan elektriksel potansiyellerdir. Bu sinyale ait iki temel bileşeni olan 'a' ve 'b' dalgaları retina tabakasının değerlendirilmesinde önem arz etmektedir. Bunun için farklı sinyal işleme tekniklerinden yararlanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada sağlıklı bireylerden kaydedilen flaş Elektoretinogram sinyallerinin rod, maksimum kombine ve kon yanıtları kullanılarak Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü ve Sürekli Dalgacık Dönüşümü yöntemleriyle sinyallerin 'a' ve 'b' dalgaları analizi edilmiştir. Bu doğrultuda dalgaların lokasyonlarının tespit edilmesinde hangi yöntemin daha başarılı olduğu irdelenmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç yanıtta da dalgaların analizi için Sürekli Dalgacık Dönüşümünün daha başarılı bir yöntem olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra Sürekli Dalgacık Dönüşümünde rod ve kon yanıtları için Coiflet, Gauss, Meksika şapka ve Morlet dalgacıklarının, maksimum kombine yanıtı için ise Morlet dalgacığının kullanılması halinde dalgaların lokasyonlarının daha doğru bir şekilde tespit edebileceği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Elektoretinogram, Sürekli dalgacık dönüşümü, Kısa zamanlı fourier dönüşümü*

Comparison among Short Time Fourier Transform and Continuous Wavelet Transform Techniques in Flash Erg Signals Processing

ABSTRACT

Flash Electroretinogram signals are the electrical potentials that result from the stimulation of the retina layer of the eye with a flash light. The two main components of these signals, "a" and "b" waves, are great of significance in the evaluation of the retina layer. Therefore, different signal processing techniques are utilized. In this study, the analysis of 'a' and 'b' waves in the rod, maximum combined and cone responses of flash Electroretinogram signals recorded from healthy individuals have been performed by using the Short Time Fourier Transform and Continuous Wavelet Transform methods. In this context, it has been studied which method is more proper in determining the waves localizations. As a result of analyses, it has been determined that the Continuous Wavelet Transform is more successful for all three responses. In addition, it has been found that the localizations of the waves can be determined more accurately by using Coiflet, Gauss, Mexican hat and Morlet wavelets in rod and cone responses, and Morlet wavelet in maximum combined response.

Keywords: *Electroretinogram, Continuous wavelet transform, Short time fourier transform*

I. GİRİŞ

Biyomedikal sinyaller, karmaşık sistemlerin davranışları hakkında bilgi içeren zamana bağlı bir fizyolojik süreçler bütünüdür. Bu sinyallerin analizlerinin yapılması sistemlerin işlevselliğinin anlaşılmasında ve olası hastalıkların erken teşhisinde büyük önem taşımaktadır. Fakat doğrusal olmayan bu sinyallerin çoklu zamansal bileşenlerden meydana gelmesi, sinyallerin işlenmesini ve yorumlanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle sinyallerdeki anlamlı özelliklerin çıkarılmasında uygun sinyal işleme ve tanımlama tekniklerinin kullanımı klinikte büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda tıbbın birçok alanında Elektrokardiyogram (EKG), Elektroensefalogram (EEG) ve Elektromiyogram (EMG) gibi biyo-sinyallerin içsel özellikleri ve teşhis potansiyelleri araştırılmaya devam etmektedir [1-5].

Göz ve tabakalarının işlevselliğinin incelendiği oküler fizyolojide Elektrookülogrm (EOG), flaş Elektrotretinogram (fERG), multifokal Elektrotretinogram (mfERG), Patern Elektrotretinogram (PERG) ve Görsel uyarılmış potansiyel (GUP) sinyalleri kullanılmaktadır. Bu sinyallerden fERG, retina tabakasının flaş bir ışıkla uyarılması sonucu elde edilen biyoelektriksel yanıtların kayıt altına alınmasıdır. Retinal hücrelerin toplam aktivitesini temsil eden bu yanıt gözdeki farklı tabakaların sebep olduğu bir dizi gecikmeli potansiyellerden meydana gelmektedir [6,7]. Bu potansiyellerden ilki uyartım verildikten sonra ortaya çıkan en büyük negatif genliğe sahip olan 'a' dalgası olup fotoreseptör hücrelerin hiperpolarizasyonunu temsil etmektedir. Ardından bipolar hücrelerin yanıtını içeren en büyük pozitif genlikli 'b' dalgası gelmektedir [8-10]. Bu iki ana bileşenin dışında fERG yanıtında, sırasıyla retina pigment epiteli ve bipolar-off hücreleriyle ilgili bilgi içeren 'c dalgası' ve 'd dalgası' olarak isimlendirilen potansiyeller de mevcuttur. Ancak bu iki dalga klinikteki rutin araştırmalarda çoğunlukla göz ardı edilmektedir [11].

Klinik araştırmalarda fERG testi kapsamında farklı renk ve şiddetteki flaş uyarıların olduğu 11 farklı ölçüm yapılabilmektedir. Bunların içerisinde Uluslararası Elektrotretinografi Standardizasyon Komitesi (ISCEV) standartlarına göre rod, kon ve maksimum kombine yanıtları fERG sinyallerinin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Rod yanıtı karanlık adaptasyon sonrasında fERG ölçümlerinde elde edilen ilk sinyaldir. Kon yanıtı aydınlık adaptasyon sonrası kon hücrelerinden, maksimum kombine yanıtı ise karanlık adaptasyon sonrası hem rod hem de kon hücrelerinden elde edilen yanıtlardır [12].

Literatürde yapılan çalışmalar irdelendiğinde fERG'yi oluşturan 'a' ve 'b' bileşenlerinin başlangıç zamanı, genlik değeri ve zamanda gecikme süresi gibi özelliklerinin retina kaynaklı hastalıkların tanı ve teşhisinin konulmasında önemli olduğu tespit edilmiştir [13-18]. Bu bağlamda; fERG sinyallerinin analizinde Temel Bileşen Analizi (TBA), Fourier Analizi (FA) ve Dalgacık Analizi (DA) gibi çeşitli sinyal işleme yöntemleri kullanılmaktadır [19]. Örneğin; Barraco ve ark.'ları akromatopsi ve doğuştan sabit gece körlüğü bireylerden alınan fERG sinyallerinin 'a' bileşenini DA yöntemi kullanılarak analiz etmişlerdir. Analizlerinde sinyallerin zamana bağlı özelliklerinde meydana gelen değişimleri ortaya koymuşlardır. Bunun yanı sıra fotoreseptör hücrelerinin durumunun kararlı frekans sayısına ve meydana geldikleri zamana bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Patolojik durumunlar ise frekans bileşenlerine ait değerleri düşüştüğü ve oluşum zamanlarının da değiştiği görülmüştür [20]. Barraco ve ark.'larının gerçekleştirdiği bir diğer çalışmada Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) yöntemi kullanılarak herhangi bir göz rahatsızlığı bulunmayan bireylerden farklı şiddetlerdeki flaş ışıklarında alınan fERG sinyallerinin 'a' bileşeni analiz edilmiştir. Meksika şapka dalgacığının kullanıldığı yöntemin, sinyallere ait kararlı frekans bileşenlerinin ve bunların oluşum zamanlarının tespit edilmesinde etkili olduğu görülmüştür [21]. 2014 yılında yapılan başka bir çalışmada herhangi bir göz rahatsızlığı bulunmayan sağlıklı bireylerden ve akromatopsi ile doğuştan sabit gece körlüğü bulunan bireylerden alınan fERG sinyallerinin 'a' bileşenlerinin analizinde farklı sinyal işleme tekniklerinin (PCA, FA ve DA) başarımlarını karşılaştırmışlardır. Yöntemlerin içerisinde Meksika şapka dalgacığının kullanıldığı DA yönteminin diğer yöntemlere kıyasla daha başarılı olduğu tespit edilmiştir [19]. Mathieu Gauvin ve ark.'ları da herhangi bir göz rahatsızlığı olmayan sağlıklı bir bireye ait fotopik fERG sinyallerini FA, SDD ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) yöntemleriyle analiz etmişlerdir.

Analizlerde sinyallere ait piklerin genlik değerleri ve oluşum zamanları tespit edilerek yöntemlerin performansı karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda Haar dalgacığının SDD yönteminin diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek başarımla sergilediği tespit edilmiştir [10]. Ayrıca Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD), SDD ve ADD yöntemleriyle sağlıklı bir bireyin fotopik ERG yanıtlarını zaman-frekans bölgesinde incelenmiştir. Sinyallerin analizinde SDD yönteminin daha başarılı sonuçlar verdiği belirlenmiştir [22].

Son yıllarda fERG sinyallerine dayalı olarak yapılan çalışmalarda rod, maksimum kombine ve kon yanıtlarının kullanıldığı görülmektedir. Ancak bildiğimiz kadarıyla söz konusu yanıtlara dayalı olarak fERG sinyallerinin yorumlanmasında önem taşıyan 'a' ve 'b' dalgalarının analizi sinyal işleme teknikleriyle irdelenmemiştir. Bu bağlamda çalışmada üç farklı yanıt için fERG sinyalinin temel bileşeni olan 'a' ve 'b' dalgalarının analizi KZFD ve SDD yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

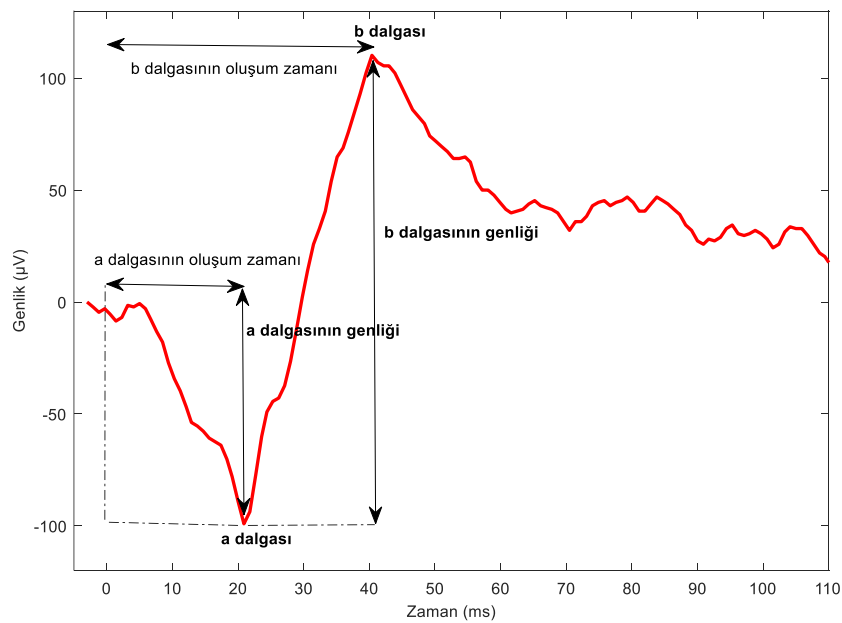
II. MATERYAL METOD

A. FLAS ELEKTRORETİNOGRAM (fERG)

A. 1. fERG Sinyalinin Temel Özellikleri

fERG, retinanın bir ışık flaşıyla uyarılması sonucu içerdiği farklı tabakalardan (amakrin, fotoreseptör, gangliyon ve bipolar hücrelerden) kaynaklanan kitlesel yanıtları içeren ve zamana bağlı değişim sergileyen bir sinyaldir. Bu sinyal 'a', 'b', 'c' ve 'd' olarak adlandırılan dört farklı dalgadan meydana gelmektedir. Bunlardan 'a' dalgası fotoreseptör hücrelerinin, 'b' dalgası bipolar ve müller hücrelerinin, 'c' dalgası pigment epitelyum tabakasının ve 'd' dalgası da uyarımın kesildiği andaki kapanma yanıtını temsil etmektedir [24-26]. Karanlığa adapte bir göze orta şiddette bir beyaz flaş uyararı verilmesi sonucu elde edilen normal bir fERG sinyali, başlangıçtaki negatif sapmadan ('a' dalgası) ve bunu takiben görülen pozitif sapmadan ('b' dalgası) oluşmaktadır (Şekil 1).

'a' dalgasının genliği izoelektrik hat ile a dalgasının pik yaptığı nokta arasındaki değer iken, 'b' dalgasının genliği 'a' dalgasının tepe noktası ile 'b' dalgasının pik yaptığı nokta arasındaki değerdir. Bu iki dalganın genlik ve latans (dalgaların pik yapmasına kadar geçen süre veya dalgaların oluşum zamanları) değerleri retina hastalıklarının tanı ve takibinde önem taşımaktadır.



Şekil 1. Sağlıklı bir bireye ait fERG sinyal örneği

A. 1. fERG Veri Seti

Çalışma kapsamında yaşları 18 ila 70 arasında değişen 10 sağlıklı bireyden kaydedilen fERG sinyalleri kullanılmıştır. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Obezite ve Diyabet Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilen ölçümlerde bireylere gerekli tüm bilgilendirmeler yapılmıştır. Yanı sıra oftalmolojik muayenesi yapılan her bir bireyin fERG sinyallerinin ölçümü Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi İnsan Araştırmaları Etik Kurulu ve Helsinki Deklarasyonuna uygun olacak şekilde uzman hekimler tarafından gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında yaşları 18 ila 70 arasında değişen 10 sağlıklı bireyden kaydedilen fERG sinyalleri kullanılmıştır. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Obezite ve Diyabet Uygulama ve Araştırma Merkezinde uzman hekimler tarafından gerçekleştirilmiş olan ölçümlerde her bir bireyin oftalmolojik muayenesi de yapılmıştır. Ölçüm için gerekli tüm bilgilendirmeler yapılan bireylerin fERG sinyalleri, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi İnsan Araştırmaları Etik Kurulu ve Helsinki Deklarasyonuna uygun olacak şekilde kaydedilmiştir. Sinyallerin alımı, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi (BAP) kapsamında temin edilen Metrovision MonPackOne Elektrookülografi cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda başlangıçta önceden dilate edilmiş olan her iki gözün alt konjonktival kesesine Dawson-Trick-Litzkow (DTL) plus tip elektrotlar yerleştirilmiştir. Referans ve toprak elektrotları ise sırasıyla alının yan kısımlarına ve ortasına konumlandırılmıştır. Ardından 20 dakikalık bir karanlık adaptasyon süresi sonunda cihazdan gönderilen çeşitli seviyelerdeki flaş uyarana karşı gözün vermiş olduğu elektriksel yanıtlar kayıt altına alınmıştır. Daha sonra 15 dakikalık bir aydınlık adaptasyon sürecinden sonra test tekrarlanmıştır [23].

B. SİNYAL İŞLEME YÖNTEMLERİ

İnsan vücudunda bulunan sistemler fonksiyonlarını yerine getirirken çeşitli işaretler üretmektedir. Biyoelektrik işaret olarak adlandırılan bu işaretler çoğunlukla kolay anlaşılmayan karmaşık bilgiler içermektedirler. Vücuttaki olayları incelemek için bu işaretlerin doğru bir şekilde işlenip yorumlanması gerekmektedir. Bu kapsamda farklı sinyal işleme tekniklerinden yararlanılmaktadır. ERG sinyallerinin analizlerinin incelenmesinde çoğunlukla TBA, FA ve DA gibi yöntemler kullanılmaktadır [10,19-22]. Bu çalışma kapsamında 10 sağlıklı bireyden kaydedilen fERG sinyallerinin analizleri ise KZFD ve SDD yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

B. 1. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD)

Sinyallerin frekans domenindeki karakteristiklerini incelemek için sıklıkla Fourier Dönüşümü (FD) kullanılmaktadır. Ancak frekans bilgisinin yanı sıra zaman bilgisinin de önem arz ettiği sinyallerin analizinde bu dönüşüm tekniği yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı hem frekans hem de zaman bilgisini tespit edebilen KZFD yaklaşımı ortaya konulmuştur. Bu yöntem sayesinde frekansı zamana bağlı olarak değişen sinyallerin zaman-frekans domeninde analizleri yapılabilmektedir. KZFD matematiksel ifadesi [28]:

$$KZFD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [f(t) \cdot w^*(t - \tau)] \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

tanımlanmaktadır. Burada f frekansı, τ zamanda öteleme miktarını, $f(t)$ analiz edilecek olan sinyali, $w(t)$ pencereleme fonksiyonunu ve $*$ da sinyalin karmaşık eşleniğini ifade etmektedir. Bu yöntemde sinyal pencerelenerek durağan parçalara ayrıştırılmaktadır. Daha sonra her bir ayrıştırılmış sinyal parçasının FD alınmaktadır [27,29]. Bu sayede sinyalin zaman ve frekans bilgisi arasında bağlantı kurularak, hangi frekans değerinde nasıl bir durumla karşılaşılacağına ilişkin bilgiye ulaşılabilmektedir [20].

B. 2. Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD)

Sinyallerin zaman-frekans bölgesinde analizlerini gerçekleştiren bir diğer yöntem de SDD' dir. KZFD'de pencere uzunluğunun sabit olmasından dolayı sinyallerin zaman ve frekans bölgesindeki

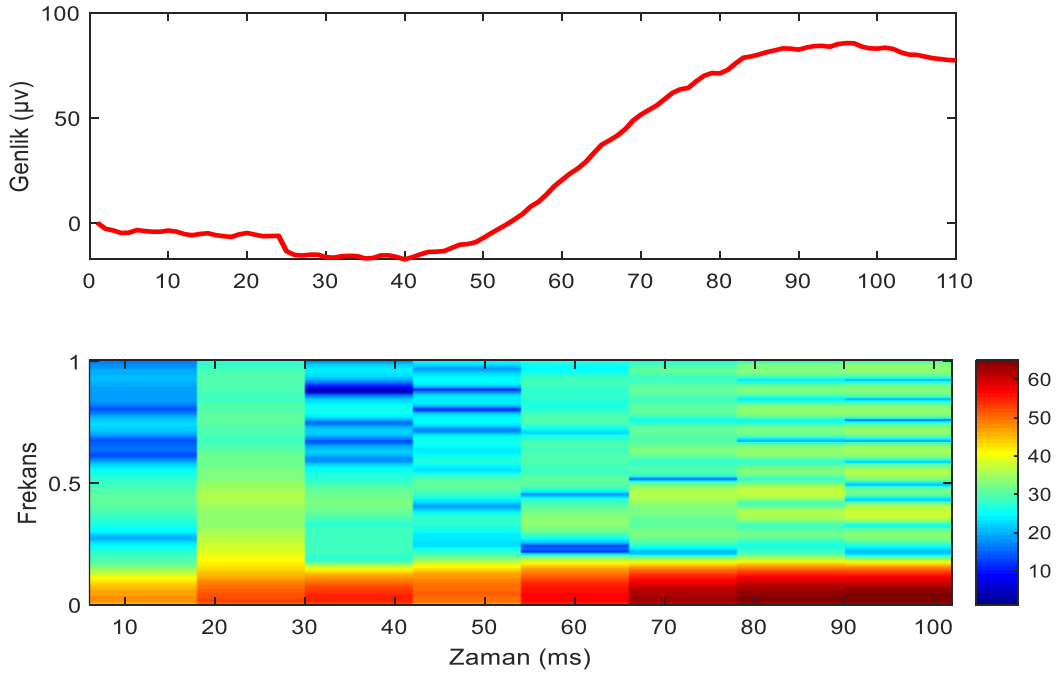
analizi etkili bir şekilde gerçekleştirilememektedir. Buna istinaden değişken pencereleme tekniği içeren SDD yöntemi ortaya koyulmuştur. Bu yöntem ile yüksek frekanslarda geniş zaman ve dar frekans çözünürlüğü, alçak frekanslarda ise dar zaman ve geniş frekans çözünürlüğü elde edilmektedir [29,30]. SDD matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$SDD(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

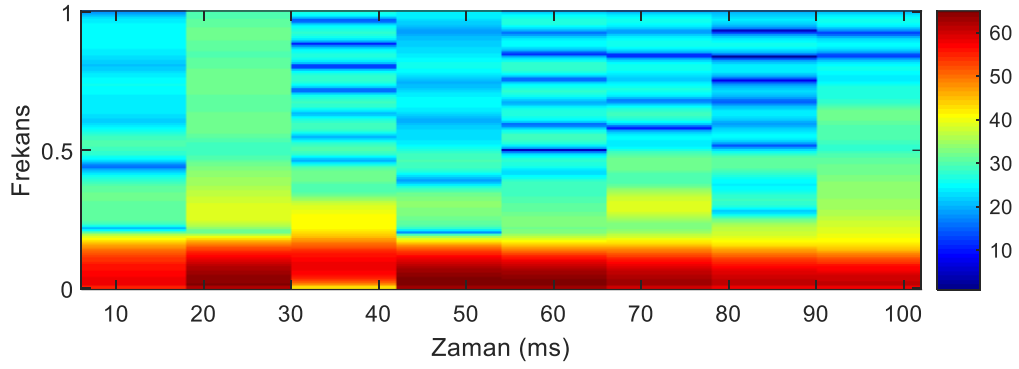
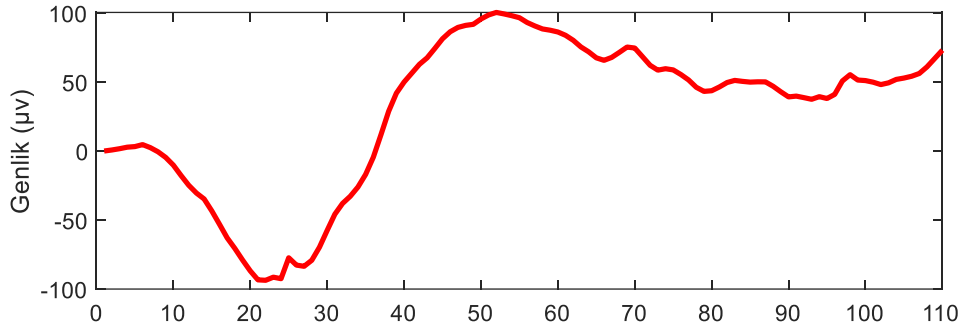
Burada $x(t)$ sinyali, $\psi(t)$ dalgacığı, b öteleme (zaman) parametresini, a ise ölçekleme (frekans) parametresini temsil etmektedir. Dalgacığın Haar, Daubechies, Meksika şapka, Morlet, Coiflet gibi çeşitli türleri mevcut olup, hangisinin kullanılacağı yapılacak olan uygulamaya bağlı olarak değişiklik göstermektedir [30,31]. Bu çalışmada fERG sinyallerinin analizi için farklı dalgacık türleri (Coiflet, Daubechies, Gauss, Haar, Meksika şapka, Meyer, Morlet) denenmiş olup içlerinden analizler için en uygun olanı tespit edilmiştir.

III. SONUC

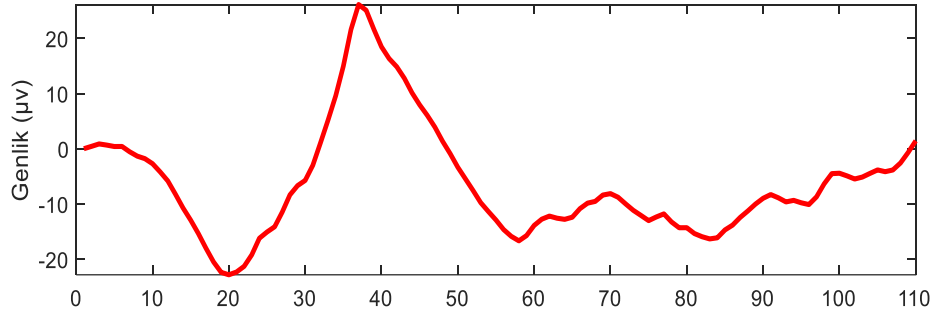
Bu çalışmada 10 sağlıklı bireyden kaydedilen fERG sinyallerinin ortalaması alınarak rod, maksimum kombine ve kon yanıtlarındaki 'a' ve 'b' dalgalarının oluşum zamanları iki farklı sinyal işleme tekniğiyle (KZFD ve SDD) analiz edilmiştir. Bu doğrultuda ilk olarak KZFD yöntemiyle üç farklı yanıtta (rod, maksimum kombine ve kon yanıtları) 'a' ve 'b' dalgalarının analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen skalogram grafikleri Şekil 2'de verilmiştir. Skalogram grafikleri genel olarak ortak zaman-frekans bilgisi olan sinyallerin enerjilerini farklı frekans bantlarında sinyal enerji ölçümleri sağladığından ve yüksek frekans aralığında daha doğru sonuçlar verdiği için karmaşık davranışların analizinde kullanılmaktadır. fERG sinyalinde negatif ve pozitif alternanslarda en büyük mutlak genliğe sahip olan 'a' ve 'b' dalgaları sinyal içerisinde en yüksek enerjiye sahiptirler. Buna göre elde edilen skalogram grafikleri irdelendiğinde enerji yoğunluğunun en yüksek olduğu yerler sırasıyla 'a' ve 'b' dalgalarına ait bilgileri içermektedir.



(a)



(b)

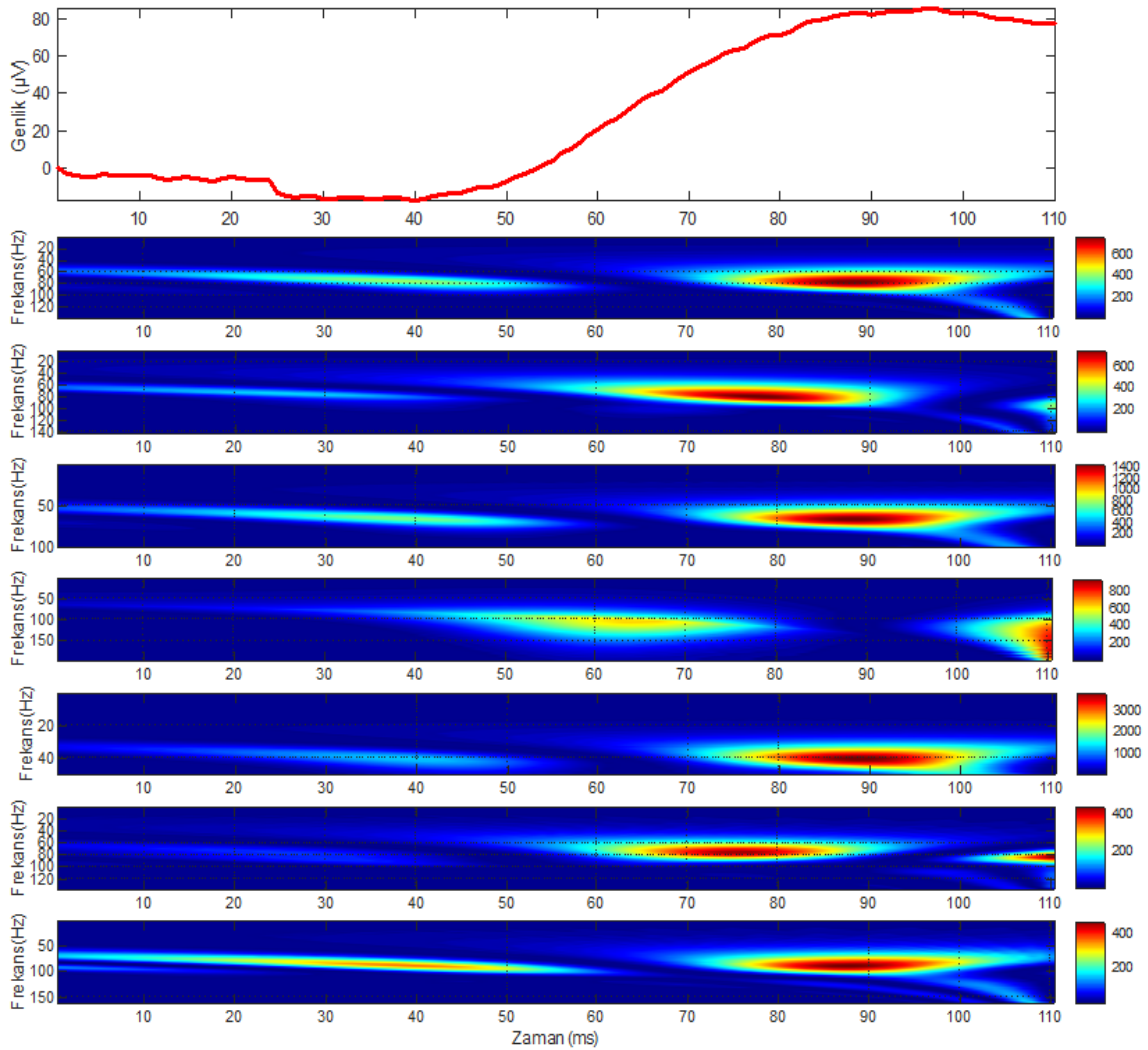


(c)

Şekil 2. Sağlıklı on bireye ait fERG sinyallerinin ortalaması alınarak elde edilen (a) rod, (b) maksimum kombine ve (c) kon yanıtlarının KZFD analizi

Rod yanıtı göz önüne alındığında en yüksek enerjinin olduğu yerler 'a' ve 'b' dalgalarının lokasyonunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda dalgaların oluşum zamanları sırasıyla 30-40 ms ve 80-100 ms aralıklarında tespit edilmiştir. Maksimum kombine yanıtında 'a' dalgasının oluşum zamanı 18-30 ms arasında iken, 'b' dalgasının oluşum zamanı ise 42-65 ms arasındadır. Kon yanıtında ise a ve b dalgasının 18 ila 42 ms' ler arasında olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, rod ve maksimum kombine yanıtlarında 'a' ve 'b' dalgalarının lokasyonu belirlenebilmekte iken, kon yanıtında dalgaların lokasyonu ayrı ayrı tespit edilememektedir. Bunun yanı sıra kon yanıtında 55-90 ms arasında gözlemlenen yüksek enerji seviyeleri analizlerin doğru bir şekilde yorumlanmasına engel olmaktadır.

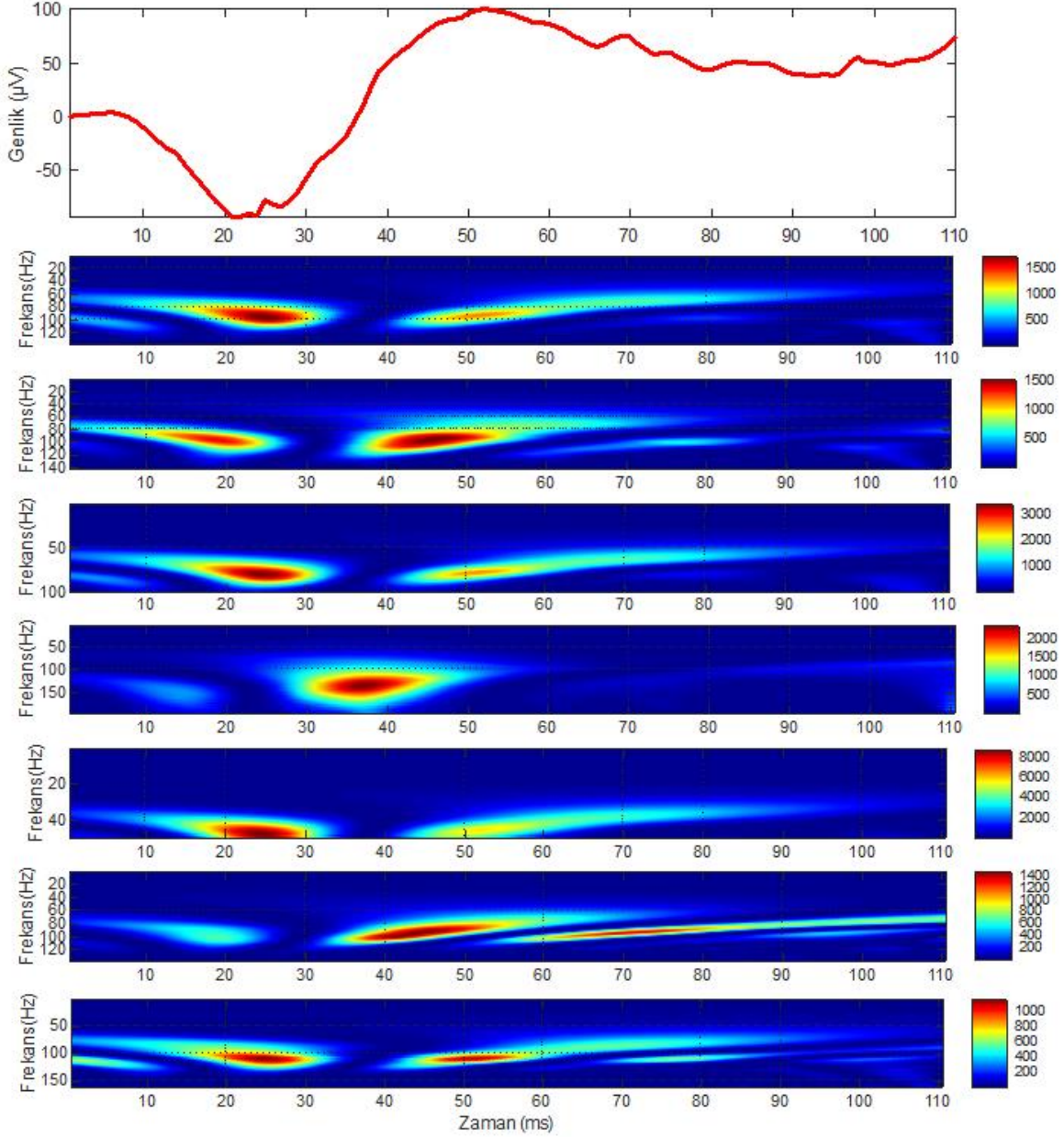
KZFD ile gerçekleştirilen analizlerin ardından bir diğer sinyal işleme tekniği olan SDD yöntemiyle üç farklı yanıt için 'a' ve 'b' dalgalarının analizleri gerçekleştirilmiştir. Yöntemde her bir yanıtı Coiflet, Daubechies, Gauss, Haar, Meksika şapka, Meyer, Morlet dalgacık tipleri uygulanarak dalgalara ait zaman-frekans bilgileri incelenmiştir. Rod, maksimum kombine ve kon yanıtları için elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 3. Sağlıklı on kişiden alınan fERG sinyalinin ortalaması alınmış rod yanıtının SDD analizi (sırasıyla Coiflet, Daubechies, Gauss, Haar, Meksika şapka, Meyer, Morlet dalgacık tipleri)

Rod yanıtında; dalgacık tipine bakılmaksızın 'a' dalgasının lokalizasyonu tespit edilemezken, sadece 'b' dalgasının lokalizasyonu belirlenebilmektedir (Şekil 3). Bu doğrultuda 'b' dalgası zaman ekseninde Coiflet ve Meksika şapka dalgacıklarında 84-93 ms, Daubechies dalgacığında 73-81 ms, Gauss ve Morlet dalgacıklarında 85-93 ms, Haar dalgacığında 109-110 ms ve Meyer dalgacığında ise

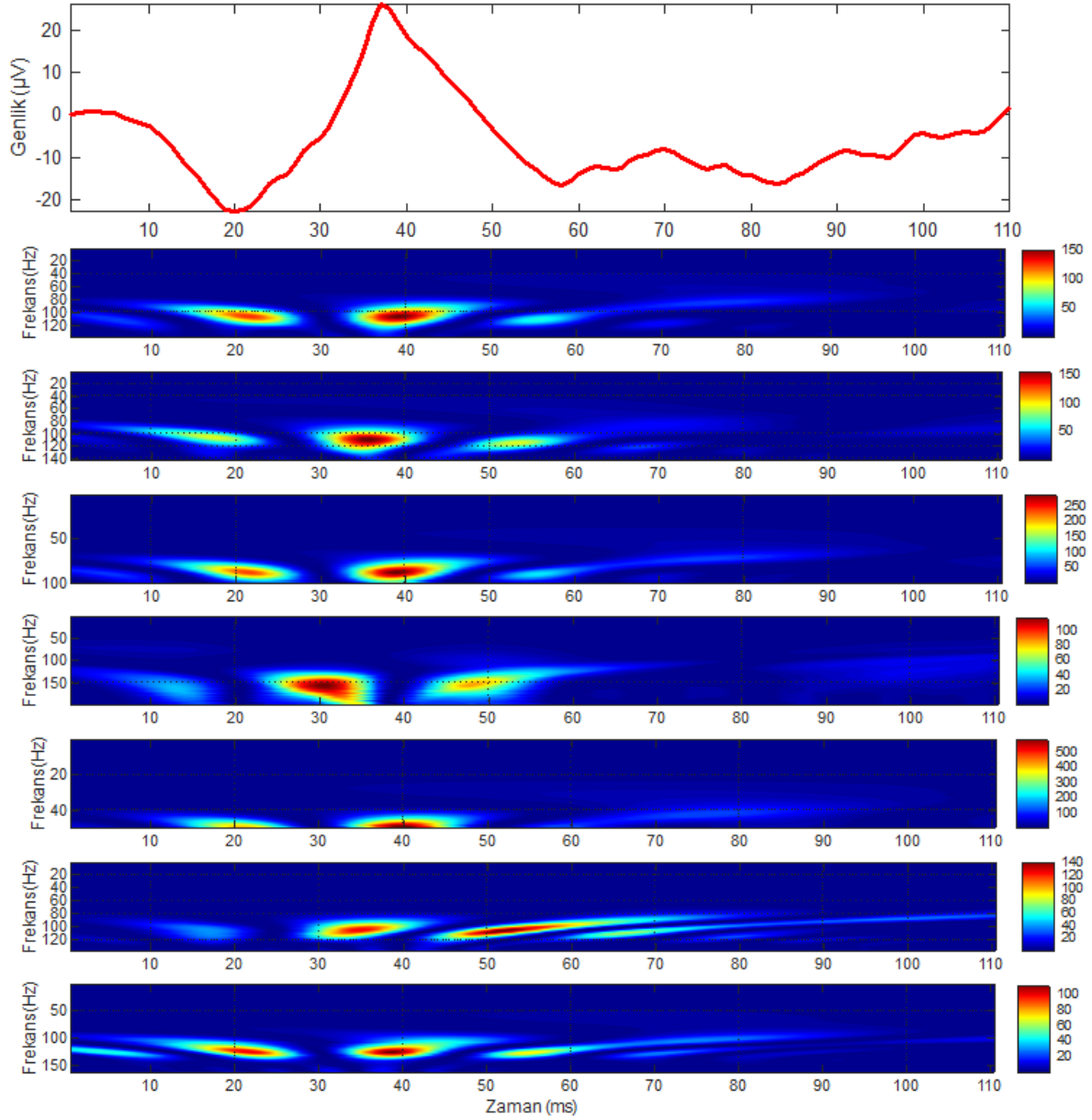
72-79 ms aralığındadır. Öte yandan söz konusu dalgaya ait frekans değerleri; Coiflet dalgacığında 75-85 Hz, Daubechies dalgacığında 78-86 Hz, Gauss dalgacığında 64-73 Hz, Haar dalgacığında 180-200 Hz, Meksika şapka dalgacığında 39-44 Hz, Meyer dalgacığında ise 74-83 Hz ve Morlet dalgacığında da 86-99 Hz olarak tespit edilmiştir. Rod yanıtının kullanıldığı analizlerin sonuçlarına göre 'b' dalgasının lokasyonunun tespit edilmesinde en uygun dalgacık tipinin Coiflet, Gauss, Meksika şapka ve Morlet olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Sağlıklı on kişiden alınan fERG sinyalinin ortalaması alınmış maksimum kombine yanıtının SDD analizi (sırasıyla Coiflet, Daubechies, Gauss, Haar, Meksika şapka, Meyer, Morlet dalgacık tipleri)

Şekil 4' den de görüleceği üzere maksimum kombine yanıtta SDD yönteminde Haar dalgacık tipi hariç diğer dalgacıkların kullanılması halinde 'a' ve 'b' ait lokasyon bilgilerine ulaşmak mümkündür. Coiflet, Daubechies, Gauss, Meksika şapka, Meyer, Morlet dalgacık tipleri için a dalgası sırasıyla 22-27 ms, 16-22 ms, 21-28 ms, 22-27 ms, 40-47 ms, 23-27 ms aralıklarında iken; b dalgasının 49-54 ms, 42-50 ms, 47-56 ms, 48-57 ms, 67-75 ms, 48-54 ms aralıklarında belirlenmiştir. Frekans boyutunda ise a ve b dalgaları sırasıyla Coiflet dalgacığında 90-105 Hz ve 96-100 Hz, Daubechies dalgacığında 94-106 Hz ve 92-106 Hz, Gauss dalgacığında 78-86 Hz ve 78-82 Hz, Meksika şapka dalgacığında 40-50

Hz ve 46-48 Hz, Meyer dalgacığında 90-105 Hz ve 94-102 Hz iken Morlet dalgacığında ise 110-120 Hz ve 112-116 Hz aralıklarında saptanmıştır. Ancak Haar dalgacık tipinde 35-40 ms ve 130-150 Hz zaman-frekans aralığında görülen yüksek enerjili bölgenin hangi dalgaya ait bilgiyi içerdiği tespit edilememiştir. Elde edilen zaman-frekans bilgilerinden ve enerji seviyelerinden yararlanılarak maksimum kombine yanıt için fERG sinyal bileşenlerinin konumlarını en doğru tespit eden dalgacık tipinin Morlet olduğu ortaya koyulmuştur.



Şekil 5. Sağlıklı on kişiden alınan fERG sinyalinin ortalaması alınmış kon yanıtının SDD analizi (sırasıyla Coiflet, Daubechies, Gauss, Haar, Meksika şapka, Meyer, Morlet dalgacık tipleri)

Son olarak kon yanıtına SDD yöntemi uygulanması durumunda ‘a’ ve ‘b’ dalgalarının zamansal olarak konumunu en doğru şekilde ortaya koyan dalgacık tiplerinin Coiflet, Gauss, Meksika şapka, Morlet olduğu görülmektedir (Şekil 5). Analizler sonucunda; ‘a’ ve ‘b’ dalgaları sırasıyla Coiflet dalgacığında 15-26 ms, 34-46 ms, Daubechies dalgacığında 15-20 ms ve 34-38 ms, Gauss dalgacığında 19-24 ms ve 37-41 ms, Haar dalgacığında 29-31 ms ve 47-51 ms, Meksika şapka dalgacığında 18-22 ms ve 37-43 ms, Meyer dalgacığında 32-37 ms ve 36-42 ms zaman aralıklarında saptanmıştır. Zaman bilgisinin yanı sıra Coiflet, Daubechies, Gauss, Haar, Meyer, Morlet dalgacık tipleri için ‘a’ ve ‘b’ dalgalarına

ait frekans bilgileri sırasıyla 104-115 Hz ve 106-114 Hz, 105-110 Hz ve 108-116 Hz, 86-94 Hz ve 87-93 Hz, 152-170 Hz ve 150-162 Hz, 104-114 Hz ve 107-113 Hz, 124-132 Hz ve 125-132 Hz olarak belirlenmiştir. Meksika şapka dalgacık tipi için hem 'a' hem de 'b' dalgasının frekans değeri 49-50 Hz tespit edilmiştir. Tüm bu bilgiler ışığında kon yanıtı için dalgaların bileşenlerinin tespitinde Coiflet, Gauss, Meksika şapka, Morlet tipi dalgacıkların daha uygun olduğu saptanmıştır.

Sonuç olarak bu çalışmada; fERG sinyalleri kullanılarak retinal kaynaklı göz hastalıklarının tanı ve teşhisinin koymasında önemli bir yeri olan 'a' ve 'b' dalgalarının lokasyonu tespit edilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda ISCEV tarafından önerilen rod, maksimum kombine ve kon yanıtlarına KZFD ve SDD yöntemleri uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde SDD yönteminin dalgaların lokasyonunun belirlenmesinde daha etkin bir yöntem olduğu ortaya koyulmuştur. Söz konusu olan yöntemde; rod ve kon yanıtında Coiflet, Gauss, Meksika şapka ve Morlet dalgacıklarının, maksimum kombine yanıtta ise Morlet dalgacığının kullanılması halinde dalgaların lokasyonlarının tespit edilebileceği ortaya koyulmuştur. Bunun yanı sıra KZFD' nin 'a' ve 'b' dalgaların lokasyonlarının saptanmasında yetersiz kaldığı belirlenmiştir. Bu bağlamda, çalışmada elde edilen sonuçların fERG üzerine yapılacak olan çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir. İlerleyen çalışmalarda ise retina kaynaklı göz rahatsızlıklarının olması durumunda fERG sinyallerinde SDD yönteminin uygulanabilirliğinin araştırılması planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR: Bu araştırma Klinik Araştırmalar Etik Kurulu tarafından onaylanmış ve Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu (BAP) tarafından desteklenmiştir. (Proje no: 2016-75737790-04).

V. KAYNAKLAR

- [1] A. Bagheri, D.P. Adorno, P. Rizzo, R. Barraco and L. Bellomonte, "Empirical mode decomposition and neural network for the classification of electroretinographic data," *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 52, no. 7, pp. 619-628, 2014.
- [2] S. Pal and M. Mitra, "Detection of ECG characteristic points using multiresolution wavelet analysis based selective coefficient method," *Measurement*, vol. 43, no. 2, pp. 255-261, 2010.
- [3] Z. Yinhong, L. Quanlu and W. Jing, "The study of time-frequency analysis the nocturnal snoring signal based on the wavelet transform," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 4, pp. 255-261, 2012.
- [4] Q. Yuan, W. Zhou, J. Zhang, S. Li, D. Cai and Y. Zeng, "EEG classification approach based on the extreme learning machine and wavelet transform," *Clinical EEG and Neuroscience*, vol. 43, no. 2, pp. 127-132, 2012.
- [5] X. Zhang and P. Zhou, "Filtering of surface emg using ensemble empirical mode decomposition," *Clinical EEG and Neuroscience*, vol. 77, no. 1, pp. 207-239, 1933.
- [6] R. Granit, "The components of the retinal action potential in mammals and their relation to the discharge in the optic nerve," *The Journal of Physiology*, vol. 35, no. 1, pp. 537-542, 2012.
- [7] T. Tomita, "Studies on the intraretinal action potential 1. relation between the localization of micropipette in the retina and the shape of the intraretinal action potential," *The Journal of Physiology*, vol. 1, no. 1, pp. 110-117, 1950.

- [8] F. B. Vialatte, M. Maurice, J. Dauwels and A. Cichocki, "Steady-state visually evoked potentials: focus on essential paradigms and future perspectives," *Progress in Neurobiology*, vol. 90, no. 1, pp. 418-438, 2010.
- [9] J. Lavoie, M. Maziade and M. Hébert, "The brain through the retina: The flash electroretinogram as a tool to investigate psychiatric disorders," *Progress in Neuro-Psychopharmacol and Biological Psychiatry*, vol. 48, no. 1, pp. 129-134, 2014.
- [10] M. Gauvin, J. M. Lina and P. Lachapelle, "Advance in ERG Analysis: From Peak Time and Amplitude to Frequency, Power, and Energy," *Biomed Research International*, 2014, pp 1-11.
- [11] S. Aksu, A. Kurt, A.Z. Soyata, K.T. Saçar, S. Taşdelen ve S. Karamürsel, "Elektroretinografi ve görsel uyarılmış potansiyel ölçümlerinde zenon ve led ışık kaynaklarının karşılaştırılması," *Anadolu Kliniği Tıp Bilimleri Dergisi*, c. 24, s. 2, ss. 78-86, 2019.
- [12] S.S. Nair and K.P. Joseph, "Chaotic analysis of the electroretinographic signal for diagnosis," *BioMed Research International*, 2014.
- [13] S.M. Saszik, J.G. Rabson and L.J. Frishman, "The scotopic threshold response of the dark adapted electroretinogram of the mouse," *The Journal of Physiology*, vol. 543, no. 1, pp. 899-916, 2002.
- [14] A.B. Fulton, R.M. Hansen and C.A. Westall, "Development of ERG responses: The ISCEV rod, maximal and cone responses in normal subjects," *Documenta Ophthalmologica*, vol. 107, no. 3, pp. 235-241, 2003.
- [15] R. Hamilton, M.A. Bees, C.A. Chaplin and D.L. McCulloch, "The luminance–response function of the human photopic electroretinogram: a mathematical model," *Vision Research*, vol. 47, no. 23, pp. 2968-2972, 2007.
- [16] J. Nilsson, T. Wright and C. Westall, "Rod a-wave analysis using high intensity flashes adds information on rod system function in 25% of clinical ERG recordings," *Vision Research*, vol. 48, no. 3, pp. 1920-1925, 2008.
- [17] A.J. Roman, S.B. Schwartz, T.S. Aleman, A.V. Cideciyan, J.D. Chico, E.A. Windsor and S.G. Jacobson, "Quantifying rod photoreceptor-mediated vision in retinal degenerations: dark-adapted thresholds as outcome measures," *Experimental Eye Research*, vol. 80, no. 2, pp. 259-272, 2005.
- [18] L.S. Sandmeyer, B.H. Grahn and C.B. Breaux, "Diagnostic ophthalmology," *The Canadian Veterinary Journal*, vol. 47, no. 11, pp. 1131-1133, 2006.
- [19] R. Barraco, D.P. Adorno, M. Brai and L. Tranchina, "A comparison among different techniques for human ERG signals processing and classification," *Physica Medica*, vol. 30, no. 1, pp. 86-95, 2014.
- [20] R. Barraco, D.P. Adorno and M. Brai, "Wavelet analysis of human photoreceptor response," presented at 2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010). IEEE, Roma, Italy, 2010.
- [21] R. Barraco, D.P. Adorno and M. Brai, "ERG signal analysis using wavelet transform," *Theory in Biosciences*, vol. 130, no. 3, pp. 155-163, 2011.
- [22] A.M. Alaql, "Analysis and processing of human electroretinogram," M.S. thesis, Science in Electrical Engineering Department, University of South Florida, Tampa, FL, USA, 2016.

- [23] R. Uzun, Y. İşler, İ. Şenyer Yapıcı ve O. Erkeymaz, “Dalgacık tabanlı temel bileşen analizi ile elektoretinogram sinyallerinde gürültü bastırılması,” 2nd International Symposium on Multidisciplinary and Innovative Technologies (ISMSIT-2018), Kızılcıhamam, Ankara, 2018.
- [24] P. A. Sieving, K. Murayama, and F. Naarendorp, “Push-pull model of the primate photopic electroretinogram: a role for hyperpolarizing neurons in shaping the b-wave,” *Visual Neuroscience*, vol. 11, no. 3, pp. 519–532, 1994.
- [25] D. C. Hood and D. G. Birch, “Human cone receptor activity: the leading edge of the a-wave and models of receptor activity,” *Visual neuroscience*, vol. 10, no. 5, pp. 857–871, 1993.
- [26] A. Öztürk Öner, “Okuler elektrofizyoloji,” *Erciyes Tıp Dergisi*, c. 26, s. 1, ss. 33–38, 2004.
- [27] A. Altınbaş, “EMG sinyallerinin kısa zamanlı fourier dönüşümü ve dalgacık dönüşümü kullanarak analiz edilmesi,” Yüksek Lisans tezi, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [28] M. Coşkun ve A. İstanbullu, “EEG işaretlerinin FFT ve dalgacık dönüşümü ile analizi,” XIV. Akademik Bilişim Konferansı, Uşak, Türkiye, 2012.
- [29] E. Kılıç ve A. Erdmar, “Automatic classification of respiratory sounds during sleep,” 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). IEEE, Çeşme, İzmir, Türkiye, 2018.
- [30] A. Erdamar, “Uyku apnesinin öngörülmesi ve dil kasının uyarılması için model geliştirilmesi,” Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- [31] B. K. Karaca, B. Oltu, T. Kantar, E. Kılıç, M. F. Akşahin ve A. Erdamar, “Classification of heart sound recordings with continuous wavelet transform based algorithm,” 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Çeşme, İzmir, Türkiye, 2018.