



Polisomnografi Sinyallerinin İşlenmesi ile Uyku Apnesinin Otomatik Teşhisi

Automatic Detection of Sleep Apnea by Processing of Polysomnography Signals

Gözde Karamustafaoglu¹, Aydın Akan¹, Esra Saatçi²

¹ Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Üniversitesi
gozdekmo@gmail.com, akan@istanbul.edu.tr,

² Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Kültür Üniversitesi
esra.saatci@iku.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmanın amacı uykuda solunum durması olarak adlandırılan uyku apnesi için polisomnografi sinyalleri incelenerek apne kestirim yöntemleri ortaya koymaktır. Çalışmada, uyku laboratuvarı kayıtlarından elde edilen Elektrokardiyografi (EKG), Elektroensefalografi (EEG) ve Elektromiyografi (EMG) sinyalleri kullanılmıştır. Sinyallere çeşitli sinyal işleme teknikleri uygulanarak apne teşhisi için kestirimlerde bulunulması hedeflenmiştir. Tıkayıcı apneli, hipopneli ve apnesiz dönemlerdeki sinyaller, Matlab grafiksel kullanıcı ara yüzünde oluşturulan bir sistemle eş zamanlı olarak işlenmiştir. Çalışmada uygulanan yöntemlerle elde edilen verilerin, hekimler tarafından tanısı konulan verilerle karşılaştırılarak doğruluk dereceleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yöntem olarak sinyallerin güç spektral yoğunluğunun belirlenmesi amacıyla Yule Walker, Welch ve Periyodogram yöntemleri kullanılmıştır. Sonuç olarak EKG sinyallerinin güç spektral yoğunluğunun bulunması ile tıkayıcı apne ve hipopne durumlarında apne kestirimi %88,3 oranında başarıya ulaşmıştır. İleride yapılabilecek uyku apnesi belirleme çalışmalarında, bu çalışmada oluşturulan sinyal işleme ara yüzü kullanılarak EKG sinyalleri otomatik olarak işlenebilecek, polisomnografi kayıtlarına gerek kalmadan hastalık tanısı konusunda hekime destek sağlanabilecektir.

Abstract

The aim of the present study is to manifest apnea prediction methods by investigating polysomnography signals for respiratory arrest during sleep, named as sleep apnea. Electrocardiography (ECG), electroencephalography (EEG) and electromyography (EMG) signals which were obtained from the records of sleep laboratory, were used in the current study. We aimed to predict apnea diagnosis by applying several signal processing techniques to the signals. The signals during obstructive apnea, hypoapnea periods and during period without apnea were simultaneously processed by a system which was developed in Matlab graphical user interface. The data obtained by the applied methods in the study were compared with the data diagnosed by the doctors and their degree of accuracy was determined. Yule Walker, Welch and Periodogram methods were used as the methods to determine the power spectral density of the signals. In

conclusion; determination of power spectral density of ECG signals has succeeded in prediction of apnea in obstructive and hypoapnea conditions at a rate of 88.3%. In the future sleep apnea determination studies, by using signal processing interface produced in this hypothesis, ECG signals would be automatically processed and without any need for polysomnography records, assistance regarding diagnosis of disease would be provided to the doctors.

1. Giriş

Uyku doğal dinlenme yöntemidir. İnsan ömrünün 1/3'ünün uykuda geçtiği düşünüldüğünde uyku veriminin vücudumuzun ruhsal ve fiziksel gelişimi için ne kadar önemli olduğunu daha net anlamaktayız. Dolayısıyla uyku esnasında yaşanan sorunlar da insan sağlığı için hayati öneme sahiptir. Bir çeşit uyku bozukluğu olarak nitelendirilen uyku apnesinin oluşumu, uyku esnasında üst solunum yolunu kontrol eden kasların gevşemesi ile üst solunum yollarının daralması ya da tamamen tıkanması, beynin solunumu kontrol eden kaslara sinyal göndermemesi sonucu solunumun geçici olarak kesilmesi şeklinde tanımlanabilir. Tedavi edilmediğinde kalp rahatsızlıkları, hipertansiyon, felç gibi ciddi hastalıklara da sebep olabilmektedir. Uykuda solunumun durması üzerine yapılan çalışmaların artmasıyla uykuda yaşanan ani ölüm olayları ve yaşanan diğer rahatsızlıkların nedenleri daha iyi anlaşılmaktadır. Uykuda ölüm özellikle bebek ve yaşlılarda sık görülen, nedeni açıklanamayan tablolar olup, günümüzde bunların büyük bir kısmının uyku apnesi sonucunda gerçekleştiği ortaya konmuştur [1]. Uyku apnesi oluşumuna göre sınıflandırıldığında 3 farklı türle karşılaşıyoruz. Bunlar obstrüktif (tıkayıcı) uyku apnesi, santral(merkezi) uyku apnesi ve mikst apnedir. Obstrüktif uyku apnesi, üst solunum yollarında özellikle gırtlak bölgesinde bulunan dokuların uyku esnasında sarkarak solunum yolunu tıkaması sonucu oluşmaktadır. Santral Apne beynin, solunumu kontrol eden kaslara sinyal göndermemesi sonucunda görülen bir apne çeşididir. Mikst apnede ise hastada hem santral uyku apnesi hem de obstrüktif uyku apnesinin olması durumudur. Başlangıçta hastada hem solunum çabası hem de hava akımı yoktur, daha sonra hastanın nefes alma çabasına rağmen devam eder. Uykuda horlama, solunumun geçici olarak durması, nefes almada güçlük yaşanması gibi olayların altında yatan sebeplerin araştırılmasında kullanılan yöntemlerden birisi polisomnografi testidir. Bu test hastanelerin uyku laboratuvarlarında gerçekleştirilmektedir.



Sinyal İşleme 3

3. Gün 27 Eylül 2014 Cumartesi (11.45-13.00)

Hastaların ağız, burun, çene, göz, baş, göğüs, karın, bacak bölgelerine yerleştirilen elektrotlar sayesinde tüm gece boyunca uykularında kayıtlar alınır. Uyku esnasında kalp atımındaki değişiklikler, oksijen saturasyonundaki değişim, solunum eforu, hava akımı, beynin elektriksel aktivitesi, gözdeki hareket değişiklikleri, kasların hareketleri incelenerek hastanın apne durumu hakkında bilgi elde edilmesi hedeflenir. Polisomnografi testinde kalbin elektriksel aktivitesindeki değişiklikler Elektrokardiyografi (EKG) elektrotları ile, kasların elektriksel aktivitesindeki değişiklikler Elektromiyografi (EMG) elektrotları ile, göz hareketleri Elektrookulografi (EOG) elektrotları ile, beynin elektriksel aktivitesindeki değişiklikler ise Elektroensefalografi (EEG) elektrotları ile gözlemlenir. Hasta apneye girmeden önce, apne esnasında ve apneden çıktığı dönemlerde vücudunda meydana gelen değişiklikler incelenir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek hasta için en iyi tedavi yöntemine karar verilir. Uyku bozukluklarının en önemli örneklerinden biri olan apne hastalığının tespit edilmesi amacıyla literatürde birçok çalışma mevcuttur. EKG sinyallerinin işlenmesinde en sıklıkla kullanılan yöntem kalp atım hızı değişkenlik sinyalinin zaman ve frekans düzleminde incelenmesidir [2].

Bu çalışmada Polisomnografi kayıtlarından EKG, EMG ve EEG sinyallerine uygulanan farklı sinyal işleme yöntemleri ile apne teşhisi için kestirimlerde bulunulması hedeflenmiştir. EKG sinyallerine ilk olarak istenilen zaman aralığında Teager Enerji Operatörü uygulanmış, RR aralıkları bulunmuştur. Ardında da Yule Walker yöntemi ile kalp atım hızı değişkenliğinin güç spektral yoğunluğu elde edilmiştir. EMG sinyalinin istenilen zaman aralığında Welch yöntemi ile güç spektral yoğunlukları bulunmuştur. EEG sinyallerine ise Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanarak güç spektral yoğunluğu elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Verilerin Elde Edilmesi

Bu çalışmada St. Vincent's University Hospital'in PhysioNet'ten ulaşılan uyku hastalıkları kliniğinin verileri kullanılmıştır. Kayıtlar 6 aylık dönemde kliniğe başvuran hastalardan rastgele seçilmiş olup, olası tıkaçıcı ve merkezi apne varlığı değerlendirilmiştir. Çalışma, bilinen kalp rahatsızlığı olmayan ve 18 yaş üstü 21 bay, 4 bayanın verilerinden oluşmaktadır. 28 ila 68 yaş aralığında, kiloları ise 77 kg ila 109 kg aralığında değişmektedir.

2.2. EKG Sinyallerinin İşlenmesi

EKG sinyallerine ilk olarak Teager Enerji İşleyici uygulanarak EKG sinyalindeki R tepelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Bunun amacı uyku apnesine giren bir hastanın kalp atım sayısındaki değişikliklerin araştırılmasıdır. EKG sinyalinin Teager Enerji İşleyici Operatörü 1'de belirtilen denklemle hesaplanır.

$$\psi/Ts(n) = \psi/s^2(n) - \psi/s(n-1)\psi/s(n+1) \quad (1)$$

Burada; ψ/Ts , sinyalin Teager Enerji Operatörünü (TEO), ψ/s ise orijinal sinyali temsil eder [3]. n ise zaman indisidir. Bir sinyale Teager Enerji İşleyici uygulandığında işaretteki süresizlikler, sıçramalar gibi ani değişiklikler kuvvetlenirken, örnekler arasındaki yumuşak geçişler zayıflar [4]. EKG sinyallerine Teager

Enerji İşleyici uygulanması ile hastaların apne esnasında ve normal uyku durumlarında, girilen zaman aralığında, oluşan ortalama RR zamanları ve kalp atım hızı değişkenliklerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Öte yandan kalp atım hızı değişkenlik sinyaline spektral analiz yapılması hastanın apne durumuna girdiği zaman oluşabilecek EKG dalga formu değişikliklerini yorumlama açısından oldukça faydalıdır [4]. Bu çalışmada kalp atım hızı değişkenlik sinyallerinin güç spektral yoğunluğunun bulunmasında parametrik yöntemlerden AR (AutoRegressive) model parametrelerine dayanan Yule Walker yöntemi kullanılmıştır. AR tabanlı parametrik yöntemlerde güç spektral yoğunluğu hesabı için öncelikle oto-korelasyon hesabı yapılır. Yule Walker yönteminde sinyallerin oto korelasyonları, ergodik olma koşulu altında eşitlik 2 ile hesaplanır [5].

$$\hat{r}(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{n=k+1}^N y(n)y'(n-k) \quad , \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2)$$

$y(n)$ = ölçülen sinyal

N = sinyal uzunluğu

k = oto-korelasyon indeksi

$y'(n-k)$ = $y(n)$ sinyalinin $(n-k)$ 'daki kompleks eşleniği

Hesaplanan oto-korelasyon eşitlik 3'de belirtilen Yule Walker denklemine yerleştirilerek AR parametreleri hesaplanır [5].

$$\begin{bmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(n) \\ r(-1) & r(0) & \dots & r(n-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(n) & r(n-1) & \dots & r(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_p(1) \\ \vdots \\ a_p(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$a_p(k)$ = AR parametreleri, $1 \leq k \leq p$

ϵ^2 = Beyaz gürültü varyansı

(3) eşitliğinden elde edilen AR parametreleri 4'de belirtilen denklemde kullanılarak güç spektral yoğunluğu hesaplanır.

$$P_{AR}(f) = \frac{1}{f_s} \frac{\epsilon^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a_p(k) e^{-\frac{2\pi j k f}{f_s}} \right|^2} \quad (4)$$

f_s = örnekleme frekansı

f = frekans

Polisomnografi sinyallerinden elde edilen EKG sinyallerinin ham halleri ve işlenmiş halleri, Matlab Gui ile oluşturulmuş bir ara yüzde incelenebilmektedir. Hastaların tüm gece boyunca hangi zaman aralıklarında ne kadar süre ile apneye girdiği ve apnelerin çeşitleri polisomnografi kayıtlarında mevcuttur. Bu bilgilerden yararlanarak, EKG sinyallerine hastanın apnede ve apnede olmadığı zaman aralıklarında yukarıda bahsedilen sinyal işleme yöntemleri uygulanmıştır. 30sn'yi geçmeyen epoklarla sinyaller incelenerek apne hakkında bilgi elde edilmesi hedeflenmiştir.. Güç spektral yoğunluğu hesaplanan EKG sinyallerinin yüksek frekans

Sinyal İşleme 3

3. Gün 27 Eylül 2014 Cumartesi (11.45-13.00)

(HF) ve düşük frekanslardaki (LF) güç değerlerinin hesaplanması ile LF/HF oranı hakkında bilgi elde edilmiştir. Tıkayıcı apneli, hipopneli ve apnesiz durumdaki EKG sinyallerinin LF/HF oranları arasında karşılaştırmalar yapılarak apneli sinyallerin kestirimi için genellemeler yapılmıştır.

2.3. EMG Sinyallerinin İşlenmesi

Polisomnografi kayıtlarından hastaların çenelerine yerleştirilen yüzey elektrotlarla elde edilen EMG sinyallerinin karmaşık yapısından kurtulup daha anlamlı ve yorumlanabilir hale getirilmesi için, sinyallerin zaman domeninden frekans domenine çevrilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla EMG sinyallerinin spektral yoğunlukları Welch yöntemi ile hesaplanmıştır. Welch tarafından iyileştirilmiş yapısı önerilen Periyodogram yöntemi parametrik olmayan yaklaşıma dayanan, Hızlı Fourier Dönüşümü temelli bir yöntem olup, klasik spektral kestirim yöntemlerindedir. Periyodogram frekansa karşı enerjinin yoğunluğunu ifade eden enerji spektral yoğunluğu, güç spektral yoğunluğu veya güç spektrumu ifadeleriyle isimlendirilir. Bu yöntemde işaret üst üste çakışabilecek bölümlere ayrılır. Her bölümün iyileştirilmiş periyodogramı alınır, sonrada elde edilen bu bölümlere ait periyodogramların ortalaması alınır. İyileştirilmiş periyodogramların ortalaması tüm verinin tek bir periyodogram kestirimine göre varyansını azaltır [6]. Eşitlik 5'de i'inci iyileştirilmiş periyodogram ifadesi görülmektedir [7].

$$\hat{S}_{xx}(f) = \frac{T_S}{K.M} \left| \sum_{n=0}^{M-1} y_i(n)w(n).e^{-j2\pi fn} \right|^2 \quad (5)$$

Burada $f = f_s$ ile normalize edilmiş frekans değişkeni ve M bölünmüş sinyal parçası uzunluğudur. Ölçekleme faktörü T_S ayrık-zaman işaret spektrumunun genliğini analog işaret spektrumuna eşit olmasını sağlar. Eşitlik 6'daki $w(n)$ ise pencereleme fonksiyonu ve K normalize [7].

$$K = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w^2(n) \quad (6)$$

Ortalama Güç spektral yoğunluğu kestirimi 7'deki denklem ile hesaplanır [7].

$$\hat{P}_{Welch}(f) = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} \hat{S}_{xx}(f) \quad (7)$$

Burada L pencere sayısıdır, yani $N=L \times M$ dir. Çalışmada EMG sinyallerinin güç spektral yoğunlukları incelenerek, EKG sinyallerinin işlenmesi ile apne kestirimi yapılabilmesi için elde edilen verilere yardımcı ek bilgilerin ortaya çıkması hedeflenmiştir. Bu amaçla EMG sinyalleri, EKG sinyalleri ile eş zamanlı olarak güç spektral yoğunlukları hesaplanmıştır. Matlab

Gui'de oluşturulan ara yüzde EMG sinyallerinin hem ham halleri hem de işlenmiş halleri gözlenmiştir.

2.4. EEG Sinyallerinin İşlenmesi

Polisomnografi sinyallerinden elde edilen EEG sinyallerine frekans bölgesi analizi yapabilmek için Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanmıştır. Eşitlik 8'de verilen Fourier dönüşümü, sinyali zaman bölgesinden frekans bölgesine taşır. Güç spektrum yoğunluğunun en temel kestirim yöntemi olan Periyodogram, sonlu uzunluktaki bir sinyalin Fourier dönüşümünün genlik karesi ile elde edilir. Çalışmamızda EEG sinyallerine ait güç spektrum yoğunlukları Periyodogram yöntemi ile hesaplanmıştır.

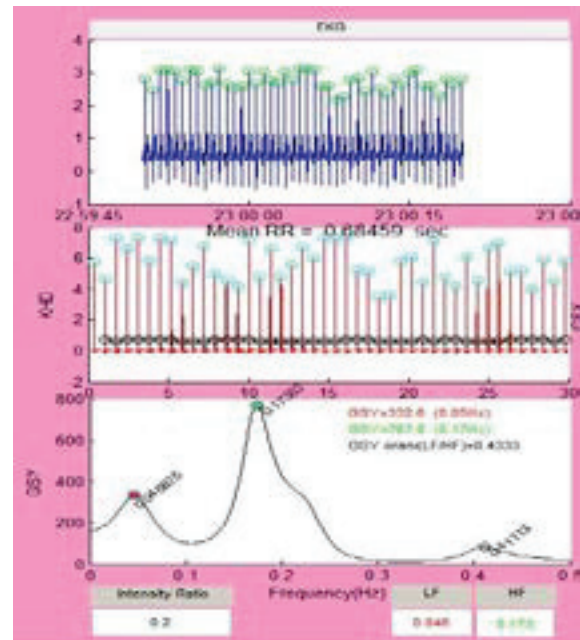
$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{jw t} dt \quad (8)$$

$$\hat{S}_{PER}(w) = \frac{1}{N} |F(w)|^2$$

EEG sinyalleri de EKG sinyalleri ile eş zamanlı olarak en fazla 30 saniyelik epoklar halinde apneli ve apnesiz durumlarda incelenmiştir. EEG sinyallerinin işlenmesindeki amaç EKG sinyallerinin işlenmesi ile elde edilebilecek tespitlere destek olabilecek verilerin elde edilmesidir.

3. Sonuçlar

Çalışmada polisomnografi sinyallerinden EKG, EEG ve EMG sinyallerine çeşitli sinyal işleme yöntemleri uygulanmıştır. Matlab Gui (grafiksel kullanıcı ara yüzü) ile oluşturulan ara yüzde tüm sinyallerin seçilen zaman aralıklarında ham ve işlenmiş halleri görülmektedir. 3 farklı sinyal için yapılan tıkayıcı apneli, hipopneli dönemlerin incelenmesinde spesifik farklılık gösteren kısım EKG sinyallerinin güç spektral yoğunluğu olmuştur. Hastanın tıkayıcı apneye ve hipopneye girdiği zaman ile apne olmadıkları zamanların işlenmiş EKG sinyalleri karşılaştırıldığında önemli farklılıklar gözlenmiştir. Şekil 1'de apnesiz dönemde EKG sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluğu (GSY) görülmektedir.

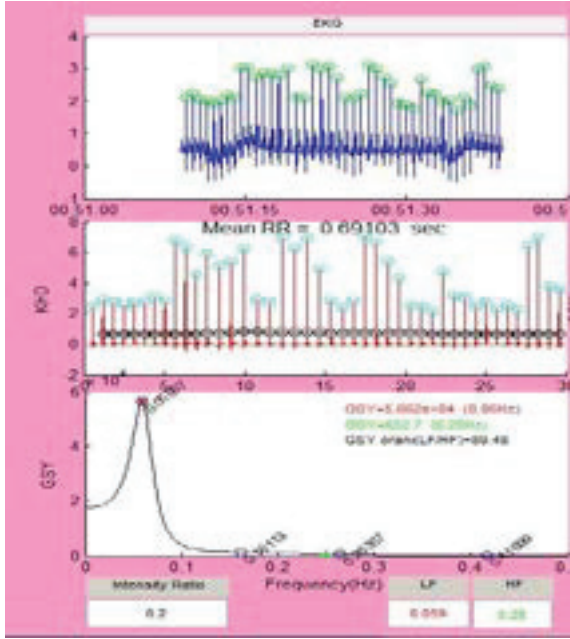


Şekil 1: Apnesiz Döneme Ait İşlenmiş EKG sinyali

Sinyal İşleme 3

3. Gün 27 Eylül 2014 Cumartesi (11.45-13.00)

Şekil 2'de ise apneli dönemde EKG sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluğu (GSY) görülmektedir.



Şekil 2: Tıkayıcı Apneli Döneme Ait İşlenmiş EKG sinyali

Hasta apneye girmeden önce veya apne sonrasında 0.15 Hz-0.4 Hz bölgesinde yani HF (high frequency) bölgesinde [8] baskın olan frekans dağılımının, hastanın apneye girmesiyle baskınlığının azaldığı, söndüğü görülmektedir. Hastanın apnede olduğu dönemlerde 0,04 Hz- 0,15 Hz bölgesinde yani LF (low frequency) bölgesinde [8] pik yapan frekansın gücü fazla olduğu için LF/HF oranı fazla çıkmaktadır. Hasta apneden çıkması ile solunumu düzenlendiğinde yüksek frekans bölgesinde bir enerji artışı görülmektedir. Bu durum LF/HF oranının azalmasına sebep olur. Polisomnografide çene EMG sinyallerinin incelenmesindeki amaç hastanın uyku evreleri hakkında bilgi elde etmek içindir. Bu çalışmada apne varlığında EMG sinyallerinde ne gibi değişikliklerin meydana geldiği araştırılmıştır. Tıkayıcı apneli, hipopneli ve apnesiz durumlardaki işlenmiş EMG sinyalleri karşılaştırıldığında, sinyaller arasında spesifik farklılıklar gözlenmemiştir. Apne kestirim yöntemleri için işlenen EMG sinyallerinin, uyku dönemlerini belirleme amaçlı incelenmesinin daha uygun olduğu, apne kestirimi yapılabilmesi için Welch yönteminin yeterli olmadığı görüşü doğmuştur. Uyku esnasında beynin elektriksel aktivitesi sonucu oluşan EEG sinyalleri polisomnografi sinyalleri kapsamında olup kafanın belli bölgelerine yerleştirilen elektrotlarla elde edilen sinyallerin incelenmesi sonucu, tıkayıcı apneli, hipopneli ve apnesiz durumlarda EEG sinyallerinde de, EMG sinyallerinde olduğu gibi önemli değişimler gözlenmemiştir. Uyku esnasında çok düşük frekansta olan EEG sinyallerinin güç spektral yoğunluklarında belli bölgelerde pikler rastlanmış ama istatistiksel bir veri elde edilememiştir. Literatürde bahsedildiği üzere EEG sinyalleri, uyku evrelerinin incelenmesinde ve hastanın hangi uyku evresinde apneye girdiğinin tespitinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada apne kestirimi yapılabilmesi için yardımcı veriler elde edilmesi amacı ile EEG sinyallerine Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanmış ancak apne kestiriminde bulunabilmek için yeterli ek veriler elde

edilememiştir. 0.5 Hz-3.5 Hz aralığında sinyallerin genliklerinin çok düşük olması neticesinde hastanın apneli ya da apnesiz dönemde derin uykuda olmadığı kanısına varılmıştır. Tablo 1'de çalışma verileri ve sonuçlar görülmektedir.

Tablo 1: Çalışma verileri ve Sonuçlar.

Çalışma Verileri ve Sonuçlar			
Örnek Sayısı	Örnek Çeşidi	DT	YT
300	Apneli-Hipopneli	265	35
600	Apnesiz	600	-

DT: Hekim tanısı ile çalışmada elde edilen sonucun aynı olması. Doğru tespit.

YT: Hekim tanısı ile çalışmada elde edilen sonuç arasında farklılık olması. Yanlış tespit.

Bu çalışma genel olarak göstermiştir ki, apne kestirimi yapılabilmesi için EKG sinyallerinin güç spektral yoğunluğunun hesaplanmasında Yule Walker yöntemi kullanılabilir bir yöntemdir.

4. Kaynakça

- [1] Aydın, H., Özgen, F., Yetkin, S., Sütçügil, L., 2005, Uyku ve Uykuda Solunum Bozuklukları, *Gülhane Askeri Tıp Akademisi Yayınları*, 63, 17.
- [2] Bayrak, T., Koçak, O., Erdamar, A., 2011, Uyku Bozukluklarının Araştırılmasında Biyomedikal Mühendislik Yaklaşımları, *TMMOB EMO Ankara Şubesi Haber Bülteni*, 2011/2, 12-14
- [3] Uçar, E., Süt, N., Gülyazar, T., Umut, T., Öztürk, L., 2011, Can obstructive apnea and hypopnea during sleep be differentiated electroencephalographic frequency bands? Statistical analysis of receiver operator curve characteristics, *Turkish Journal of Medical Sciences*, 41(4), 571-580
- [4] Erdamar, A., Eroğlu, O., Duman, F., Yetkin, S., Tanyolac, A., 2006, Polisomnografi Kayıtlarından Obstruktif Uyku Apnesinin Belirlenmesi, *IEEE 14. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları*, 17-19 Nisan 2006 Antalya, ISBN:1-4244-02387,1-4.
- [5] Yazgı, S., 2010, Yutkunmanın Kalp Hızı Değişkenliği Analizlerine Etkisi, Tez (Yüksek Lisans), Başkent Üniversitesi.
- [6] Çevikcan, B., 2007, Bel Fıtığı Bulunan Bireylerin Bel ve Karın Kası Fonksiyonlarının Elektromyografik Analizi, Tez (Yüksek Lisans), Erciyes Üniversitesi.
- [7] Alkan, A. ve Kıymık, M.K., 2006, Comparison of AR and Welch Methods in Epileptic Seizure Detection, *Journal of Medical Systems*, 30, 413-419.
- [8] Yıldız, M. ve Yılmaz, D., 2007, *Cep Telefonlarının Kalp Hızı Değişkenliğinin (KHD) Güç Spektral Yoğunluğu (GSY) Üzerindeki Etkileri*, http://www.emo.org.tr/ekler/f7d2ec2127998db_ek.pdf [Ziyaret Tarihi: 25.03.2015].