

IDUNAS	NATURAL & APPLIED SCIENCES JOURNAL	2021 Volume:3 Special Issue, No:4
--------	---------------------------------------	--

Uyku Apnesi Tespitinde Yenilikler

Metin Yıldız^{1*} 

¹ İzmir Demokrasi Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği, İzmir, Türkiye

Author E-mails
metin.yildiz@idu.edu.tr

*Correspondance to: Metin Yıldız, İzmir Demokrasi Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği, İzmir, Türkiye

Özet

Yeme içme alışkanlıklarına bağlı olarak giderek artan obezite ve aşırı kilo günümüzde birçok kişinin uykuda solunum yollarının tıkanarak, horlama şeklinde kendini gösteren uyku apnesi sendromuna yakalanmasına yol açmaktadır. Klinik ve radyolojik muayene gibi teşhis araçları bulunmasına rağmen bu hastalığa teşhis koymada altın standart ölçüm yöntem, polisomnografidir. Polisomnografide; kişi hastanedeki uyku laboratuvarında bir gece misafir edilerek, EKG, EEG, EMG, EOG, ağız veya burundaki hava akımı, göğüs kafesi ve diyaframındaki genişleyip daralmalar gibi birçok fizyolojik parametrenin ölçümü ve uzman bir doktor tarafından değerlendirilmesi ile teşhis konmaktadır. Kişinin hastane ortamında uyumakta zorlanması, tetkiki yapan laboratuvarların sayısının az, tetkikin pahalı olması gibi dezavantajları sebebi ile yeni arayışlara girilmiştir. Bu çalışmada polisomnografiye alternatif olarak geliştirilen yeni yöntemlerin gözden geçirilmesi ve kıyaslanması yapılmıştır. Polisomnografiye alternatif olarak önce kişinin kendi evinde sadece birkaç parametreyi kendisinin ölçmesine dayanan yöntemler önerilmiştir. Sadece solunum sinyallerinin, EKG'nin, foto pletismografik veya pals oksimetrik sinyallerinin bir veya birkaçının kaydı ile apne tespitine dönük birçok çalışma yapılmıştır. Bu yöntemler hastanın kendi kendine kayıt yapmasındaki zorluklar sebebi ile beklenen klinik kullanım seviyesine ulaşmamıştır. Bu sorunun üstesinden gelmek üzere, kişiye elektriksel bir temas gerektirmeyen kişinin termal görüntüleme veya ultrasonik sensorlar ile takibine dayanan yöntemler önerilmiştir. Tüm gece boyunca hastanın takibini gerektiren bu yöntemlere alternatif olarak, kişi uyanırken hastane ortamında alınan birkaç dakikalık konuşma sesi kayıtlarından apne tespiti konusundaki çalışmalar ortaya çıkmıştır. İncelenen makalelerin

çoğundaki ortak çalışma protokolü; kaydedilen sinyallerden öz nitelik denilen apne tespitinde kullanılacak ayırt edici parametrelerin tespiti ve bunların sınıflandırıcı adı verilen yapay zeka uygulamalarına öğretilmesi ve bu uygulamaların apne tespiti yapılmak istenen kişinin verilerine göre apne var/yok veya apnenin seviyesinin tespiti şeklinde karar üretmesidir. Polisomnografiye alternatif olarak önerilen, kişinin kendi evinde uyuması sırasındaki kayıtları kullanılan yöntemler ile %90'ın, hasta uyanıkken yapılan ses kayıtlarından ise %80'in üzerinde bir başarı ile apne tespiti yapılabildiği görülmüştür. Sonuç olarak, kişi uyanıkken yapılacak birkaç dakikalık ses kaydından apnenin saptanmasının alanda büyük kolaylık sağlayacağı ancak yöntemin performansının artırılması ve kapsamlı klinik çalışmalarla doğrulanması gerektiği değerlendirildi.

Anahtar Kelimeler: Uyku apnesi, polisomnografi, elektrofizyolojik sinyaller, konuşa sesleri

Abstract

Nowadays, increasing obesity and overweight due to eating and drinking habits cause many people to have sleep apnea syndrome, which manifests itself in the form of snoring, by obstructing the airways during sleep. Although there are diagnostic tools such as clinical and radiological examination, the gold standard measurement method for diagnosing this disease is PolySomnoGraphy (PSG). For the diagnosis of sleep apnea with polysomnography, while the patient is sleeping in the sleep laboratory in the hospital, many physiological parameters such as ECG, EEG, EMG, EOG, air flow in the mouth or nose, the chest and diaphragm circumference should be measured and evaluated by a specialist. Due to disadvantages such as patients who have difficulty sleeping in the hospital environment, small number of laboratories performing the test and the cost of the test, a new quest has begun. In this study, new methods developed as an alternative to polysomnography were reviewed and compared. As an alternative to polysomnography, Firstly, the methods based on measuring only a few physiological parameters in one's own home have been proposed. Many studies have been conducted to detect apnea by recording one or more of the respiratory signals, ECG, photoplethysmography, or pulse oximetry signals. These methods did not reach the expected clinical usage level due to the difficulties in the patient's self-enrollment. To overcome this problem, methods based on thermal camera or ultrasonic tracking, of the person that do not require electrical contact to the person have been proposed. As an alternative to these methods that require follow-up of the patient throughout the night, studies on apnea detection from speech voice recordings taken in the hospital environment for a few minutes while the person is awake have emerged. Similar study protocols were conducted in most of the articles reviewed. The methods generally include determination of features from the recorded signals, applying them to classifiers, deciding as to whether the person has apnea or the level of apnea. Among the alternative methods to polysomnography; it has been observed that apnea detection can be achieved with a success rate of over 90% with the methods that use physiological signal recordings during the person's sleep at home. On the other hand, a success of around 80% has been achieved in apnea

detection studies from voice recordings made when the person was awake. As a result, it was evaluated that the detection of apnea from voice recordings of a few minutes while the person was awake would provide great convenience for the field, but its performance should be increased, and it should be confirmed by extensive clinical studies.

Keywords: Sleep apnea, polysomnography, electrophysiologic signals, speak sounds

1. GİRİŞ

Modern toplumlardaki bireylerin yeme alışkanlıklarındaki bozulmalara bağlı olarak daha sık görülmeye başlayan uyku apnesi çağımızın önemli sağlık problemlerinden biri haline gelmiştir. Temel olarak uykuda solunumun en az 10 sn süre ile durması şeklinde tanımlayabileceğimiz uyku apnesinin birçok çeşidi mevcuttur. Uyku apnesinden mustarip hastaların çoğunda sonunum yolu üzerindeki kasların gevşeyerek solunum yolunu tıkadığı, tıkaçıcı uyku apnesi görülmektedir. Uyku apnesinin daha az görülen çeşitleri ise merkezi ve mikst apne denilen apne çeşitleridir. Merkezi apnede solunumu kontrol eden sinir sistemi bileşenleri devre dışı kalıp solunumu sağlayan kas hareketleri (göğüs kafesi ve diyafram) durur veya iyice azalır. Mikst apne ise merkezi apne gibi başlayan, tıkaçıcı apne şeklinde devam eden apne çeşididir.

Özellikle tıkaçıcı uyku apnesi genellikle horlama ile kendini gösterir. Geceleri solunum tıkanmasına bağlı sık uyanmalar, hastaların günlük hayatta sürekli uykusuzluk çekmelerini ve buna bağlı çeşitli kazaları beraberinde getirebilmektedir. Bu hastaların çoğunda zamanla kalp ile ilgili sorunlar gelişmekte, hastalığın en ciddi sonucu olan uykuda ölümler görülebilmektedir.

Hastalığın tespitindeki altın standart yöntem olarak polisomnografi kabul görmüştür. Gece boyu hastalardan elektrokardiogram (EKG), elektromiyogram (EMG), elektrookülogram (EOG), elektroensefelogram (EEG) yanında uyku apnesi tespiti için büyük önem taşıyan, ağız veya burundaki hava akımı, göğüs kafesi ve diyaframındaki genişleyip daralmalar, horlama sinyalleri kaydedilmektedir. Ayrıca vücut pozisyonu ve video kaydı da yapılabilmektedir. Önceleri uyku tıbbı konusunda uzmanlaşmış doktorların bu kayıtları epok (30 sn sinyal parçaları) inceleyerek, koydukları uyku apnesi teşhisi, sinyal işleme ve yapay zeka tekniklerindeki gelişmeler ile otomatik teşhis koyup bu teşhislerin sonuçlarının doktor tarafından hızla kontrol edilmesini sağlayan karar destek sistemlerine dönüşmüştür.

Geliştirilen yeni teknolojiler doktorların işlerini kolaylaştırıp birkaç saatte koydukları teşhisi birkaç 10 dakikada koyma olanağı sunsa da polisomnografi testine giren kişilerin yaşadığı zorluklara bir çözüm getirmemiştir. Kişi gece boyunca alışık olmadığı hastane ortamında bulunmak ve üzerinde ilgili fizyolojik ölçümleri gerçekleştirmek üzere pek çok kablo bağlantısı yapılmasından dolayı iyi uyuyamamakta, tetkikin tekrarlanmasına gerek duyulabilmektedir. Sürekli bir teknisyenin gözetiminde olmayı gerektirdiğinden oldukça pahalı olan tetkik az sayıda klinik tarafından yapıldığı için uzunca bir beklemeden sonra tetkike girilebilmektedir.

Polisomnografinin hasta açısından bu dezavantajları yüzünden; son yıllarda daha az sayıda fizyolojik parametrenin hastaya minimum rahatsızlık verecek şekilde hastanın kendi evinde kendi kendine uygulayabileceği çözümler önerilmiştir [1]. Bu yöntemlerin oldukça başarılı sonuçlar vermesi, hastaya temas gerektirmeyen hatta birkaç dakika içinde uyanırken gerçekleştirilen uyku apnesi tespit yöntemlerinin önerilmesine ön ayak olmuştur. Bu çalışmada uyku apnesi tespiti için önerilen yeni yaklaşımlar gözden geçirilmiş, başarımları ve uygulama kolaylıkları açısından genel bir değerlendirme yapılmıştır.

2. UYKU APNESİ TESPİTİNDE YENİLİKLER

Hastaya Temas Gerektiren Ölçüm Yöntemleri ile APNE Tespit Çalışmaları

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde önceleri daha az fizyolojik parametre ile polisomnografinin ev ortamına taşınmasının hedeflendiği görülmektedir [1]. Ancak polisomnografi ile yapılan karşılaştırma sonuçları, polisomnografinin sağladığı uyku safhalarının belirlenmesi ve uykuda görülebilen diğer hastalıkların tespitinde evde kullanılacak cihazların yeterince başarı sağlamadığını göstermiştir. Bunun üzerinde çalışmalar polisomnografi incelemelerinin çoğunluğunu oluşturan uyku apnesi tespitini evde yapabilecek sistemlerin geliştirilmesi yönündeki çabalara dönüşmüştür.

Uyku apnesi tespiti için ilk akla gelen solunumla ilgili polisomnografi tarafından ölçülen parametrelerin, havayolu akışı, solunum eforu, pals oksimetri sinyallerinden uyku apnesi tespiti koymak olmuştur [2-7]. Çeşitli gruplar tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, sadece solunum parametrelerinin ölçümü ile tıkalı, merkezi ve mikst apne tespitinde %90 civarında bir başarı sağlandığı görülmüştür. Ancak kişilerin sensörleri kendi kendilerine bağlaması ve gece çıkan sensörler sebebi ile ciddi veri kayıpları olup, bu durum araştırmacıları yeni arayışlara itmiştir.

Solunumdaki değişiklikler direkt olarak kalp ve damar sisteminden takip edilebilecek değişimler oluşturur. Bu değişimlerin kişinin konforunu bozmadan parmağına takılan bir prob vasıtası ile tespitine dayanan, arteriel tonometri yöntemi klinik olarak çok sayıda denemesinin de yapıldığı başarılı bir apne tespit sistemi olarak göze çarpmaktadır [8-11]. Bu yöntem ve sistemle oldukça büyük popülasyonlar üzerinde yapılan çalışmalarda PSG ile karşılaştırmalı çalışmalar sonucunda sistemle Apne hipoanne indeksinin % 90 nın üzerinde bir doğruluk ile tespit edilebildiği gösterilmiştir [11].

Bu çalışma kardiovasküler parametrelerin daha basit ve ucuz yöntemler ile ölçümüne dayalı olarak apne tespiti yapmaya odaklanan çalışmalar ortaya çıkmasına yol açmıştır. Tek kanallı EKG den elde edilen kalp hızı değişkenliği parametrelerini ve çeşitli sınıflandırıcılar kullanan çeşitli çalışmalarda, apne tespit başarımları % 95'lerin üzerine çıkmıştır [12-14]. Bazı çalışmalarda sinyal işleme teknikleri kullanılarak EKG'den elde edilen solunum sinyalleri de, apne tespitine yardımcı olmak için kullanılmıştır [15].

Bazı araştırmacılar hastaya elektriksel olarak temas gerektirmeyen çeşitli sensörler ile apne tespiti üzerine yoğunlaşmışlardır. Solunum yolundaki hava akış hızı, solunum eforu ve parmağın ölçülen oksijen doygunluğu ile %79 hassasiyet ve % 79 özgüllük ile apne tespit edilebilmiştir [16]. Hastanın yatacağı yere

Polyvinylidene fluoride(PVDF) film sensor yerleştirilerek, solunumu ve kalp atım hızının takip edildiği çalışmada Hwang S.H. ve ark.2014 birer dakikalık sinyaller şeklinde ayırdıkları uyku sırasında kaydedilmiş sinyallerden apneli kısımları % 72.9 hassasiyet ve % 90.6 lık duyarlık ile tespit etmeyi başarmışlardır [17]. Son yıllarda boyun bölgesinden bir mikrofon ile kaydedilen seslerden apne tespitine yönelik çalışmalar görülmektedir. Önceleri solunum seslerinden apne tespiti hedeflenirken [18] an bir grup araştırmacı solunum ve kalp seslerini birlikte kullanarak, 10 kişi üzerinde yapılan denemelerde %93 hassasiyet %100 duyarlıkla apne tespiti yapabilmışlerdir [19]. Bu alanda son olarak, Bu alanda son olarak Nakano ve ark. 2019 derin öğrenme yapıları ile yaptıkları sınıflandırma sonucunda özellikle AHI indeksi 15 üstü olan hastalar için apneli ve apnesiz ses sinyali bölgelerini %90 nın üzerinde doğruluk ve hassasiyetle tespit edebilmiştir [20].

Hastaya Temas Etmeyen Ölçüm Yöntemleri ile APNE Tespit Çalışmaları

Özellikle tıkayıcı uyku apnesi horlama ile birlikte görüldüğünden hastaya herhangi bir temas gerektirmeden uyku ortamı seslerini kaydederek apne tespitine dönük bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Önceleri apne olan ve olmayan bölgelerin tespitine çalışılırken[21], daha sonraları horlama seslerinden apne tespiti yönünde çalışmalar yapılmıştır. Sınırlı hasta grupları üzerinde de olsa Karunajeewa ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışma ile % 89.3 hassasiyet, % 92.3 doğruluk ile apnesi olan ve olmayan kişiler ayrılabilmiştir [22]. Bazı çalışmalarda ise horlama yerine solunum seslerine odaklanılmış, Almazaydeh ve ark 2013 solunum seslerinden apne tespiti yapmaya çalışmıştır. Epok tabanlı yaptıkları değerlendirmede apneli bölgeleri %97 oranında belirleyebildiklerini belirtmişlerdir [23].

Solunum sırasındaki göğüs kafesi hareketlerinin dopler radar ile tespit etmeye çalışan Bamoli ve ark. 2020, apne ve hipoapneleri %86 duyarlık, % 91 özgüllük ve %92 doğruluk ile tespit edebilmişlerdir [24].

Diğer bir grup araştırmacı ise kişinin uykusu sırasındaki solunum hareketlerinin video görüntüleri ile algılamaya çalışmıştır. Hu ve ark. 2018 yakın kızıl ötesi ve kızıl ötesi kameraları birlikte kullanarak uyku sırasında kişinin solunum hızı ve kalp atım hızını tespite çalışmışlardır [25]. Zhu ve ark, 2019 ise solunum ve kalp atım hızı tespitinin apne tespitinde kullanılabileceğini belirterek, kızıl ötesi kamera görüntüleri ile solunumu 2.1 solunum/dakika, kalp atım hızını 7.47 atım/dakika civarında bir hata ile tespit edebildiklerini belirtmişlerdir [26].

Şimdiye kadar ele alınan tüm çalışmalar gece boyunca kaydedilen parametrelerin analizine dayanmaktadır. Buna alternatif olarak bazı araştırmacılar solunum sistemi ile eşgüdüm içerisinde çalışan ses üretme sisteminin apneden ve apne şiddetinden etkilenebileceği varsayımından hareketle kişi uyanırken alınan konuşma sesi kayıtlarından apne tespiti konulup konulamayacağı üzerinde çalışmışlardır. Bu konudaki ilk yayın 1993 yılında yapılmış ve OSA'lı hastalar ile sağlıklı kişilerin ürettikleri sesli harflerin temel bazı ses analiz parametreleri karşılaştırılmış ve aralarında istatistiksel farklar olduğu tespit edilmiştir [27]. Konu hakkında çalışan bir grup, 2009 ile 2017 yılları arasındaki çalışmalarda otomatik konuşma ve

konusmacı tespitinde kullanılan yöntemler ve çeşitli sınıflandırıcılar kullanarak OSA ve AHI indeksi belirleme ile ilgili pek çok çalışma yapmışlardır [28]. Son olarak ses ve görüntü analizlerini birleştirdikleri çalışmaları ile OSA tespit hassasiyetini arttırmayı (%92.92) başarmışlardır [29]. Ancak özgüllük değerleri %20'lerde, doğru tanıma oranları %70'lerde kalmıştır. Goldshtein ve ark., 2011, a, e, i, o, u ünlü harfleri ve n ile m nazal sessizlerinin, ses analizi alanında hesaplanan pek çok parametresini özellik vektörü olarak alıp, aslında sesin modellenmesinde kullanılan Gaussian Mixture Model'i kullanarak sağlıklı ve apneli kişileri %79 hassasiyet ve %83 özgüllük ile tespit edebilmişler [30]. Aynı çalışma grubu çalışmalarına devam ederek, değişik sınıflandırıcıların başarımlar üzerindeki etkisini [31] ve kayıt pozisyonunun başarımlar üzerindeki etkisini [32] incelemişlerdir. Ayrıca AHI indeksi belirleme ve son olarak da 2018 yılında solunum sesleri ile konuşma seslerinin bileşiminden OSA tespiti üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada en iyi sonuçta, Linear Discriminant Analysis (LDA) sınıflandırıcısı kullanarak, %92.7 hassasiyet ve %80.0 özgüllük ile ulaşılmıştır [33].

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Apnenin daha az fizyolojik parametre ile ev ortamında tespitine yönelik çalışmaların klinik araştırmalar ile daha çok desteklenmiş olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda PSG ile %90'ların üzerinde bir başarımlar sağlansa da, kişilerin ölçümleri kendi başlarına almaları sorunlar yaratmış, evde apne tespit cihazları geniş kitlelerce kullanılamamıştır. Bu sorunları ortadan kaldıracak hastaya temas etmeden çalışan yöntem ve sistemler ise henüz sınırlı sayıda denek gruplarında denenmiş olup daha geniş denek grupları üzerinde denenmelerine ihtiyaç vardır. Kişi uyanırken alınan birkaç dakikalık ses kayıtlarından yapılan apne tespit çalışmalarının ise apne şiddeti ve apne türlerinin belirlenmesi yönünde geliştirilmesi, başarımlarının klinik olarak kabul edilebilir seviyelere ulaştırılması gerekmektedir. Bunlar gerçekleştirilebildiği takdirde bu yöntem klinikte kullanım olanağı bulabilir.

4. KAYNAKLAR

1. Kapoor, Mukesh, and Glen Greenough. "Home sleep tests for obstructive sleep apnea (OSA)." *The Journal of the American Board of Family Medicine* 28.4 (2015): 504-509.
2. Mulgrew, Alan T., et al. "Diagnosis and initial management of obstructive sleep apnea without polysomnography: a randomized validation study." *Annals of internal medicine* 146.3 (2007): 157-166.
3. Collop, Nancy A. "Portable monitoring for the diagnosis of obstructive sleep apnea." *Current opinion in pulmonary medicine* 14.6 (2008): 525-529.
4. Shah, Parina, and Indira Gurubhagavatula. "Portable monitoring: practical aspects and case examples." *Sleep Medicine Clinics* 6.3 (2011): 355-366.

5. Masa, Juan F., et al. "Effectiveness of sequential automatic-manual home respiratory polygraphy scoring." *European Respiratory Journal* 41.4 (2013): 879-887.
6. Garg, Natasha, et al. "Home-based diagnosis of obstructive sleep apnea in an urban population." *Journal of Clinical Sleep Medicine* 10.8 (2014): 879-885.
7. Tan, Hui-Leng, et al. "Overnight polysomnography versus respiratory polygraphy in the diagnosis of pediatric obstructive sleep apnea." *Sleep* 37.2 (2014): 255-260.
8. Pittman, Stephen D., et al. "Using a wrist-worn device based on peripheral arterial tonometry to diagnose obstructive sleep apnea: in-laboratory and ambulatory validation." *Sleep* 27.5 (2004): 923-933.
9. Hedner, Jan, et al. "Sleep staging based on autonomic signals: a multi-center validation study." *Journal of clinical sleep medicine* (2011). 7:301– 6.
10. Yalamanchali, Sreeya, et al. "Diagnosis of obstructive sleep apnea by peripheral arterial tonometry: meta-analysis." *JAMA Otolaryngology–Head & Neck Surgery* 139.12 (2013): 1343-1350.
11. Hairston, Ilana S. "The Use of WatchPAT™ for Home Sleep Testing Assessment of Sleep-Related Disordered Breathing (SDB) in Heart Disease Patients—Clinical & Operational Benefits."
12. Yılmaz, Bülent, et al. "Sleep stage and obstructive apneic epoch classification using single-lead ECG." *Biomedical engineering online* 9.1 (2010): 39.
13. Babaeizadeh, Saeed, et al. "Automatic detection and quantification of sleep apnea using heart rate variability." *Journal of electrocardiology* 43.6 (2010): 535-541.
14. Almazaydeh, Laiali, Khaled Elleithy, and Miad Faezipour. "Detection of obstructive sleep apnea through ECG signal features." *2012 IEEE International Conference on Electro/Information Technology*. IEEE, 2012.
15. Babaeizadeh, Saeed, et al. "Electrocardiogram-derived respiration in screening of sleep-disordered breathing." *Journal of electrocardiology* 44.6 (2011): 700-706.
16. Gottlieb, Daniel J., and Naresh M. Punjabi. "Diagnosis and Management of Obstructive Sleep Apnea: A Review." *Jama* 323.14 (2020): 1389-1400.
17. Hwang, Su Hwan, et al. "Unconstrained sleep apnea monitoring using polyvinylidene fluoride film-based sensor." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 61.7 (2014): 2125-2134.
18. Penzel, Thomas, and AbdelKebir Sabil. "The use of tracheal sounds for the diagnosis of sleep apnoea." *Breathe* 13.2 (2017): e37-e45.
19. Kalkbrenner, Christoph, et al. "Apnea and heart rate detection from tracheal body sounds for the diagnosis of sleep-related breathing disorders." *Medical & biological engineering & computing* 56.4 (2018): 671-681.
20. Nakano, Hiroshi, Tomokazu Furukawa, and Takeshi Tanigawa. "Tracheal sound analysis using a deep neural network to detect sleep apnea." *Journal of Clinical Sleep Medicine* 15.8 (2019): 1125-1133.

21. Duckitt, W. D., S. K. Tuomi, and T. R. Niesler. "Automatic detection, segmentation and assessment of snoring from ambient acoustic data." *Physiological measurement* 27.10 (2006): 1047.
22. Karunajeewa, Asela S., Udantha R. Abeyratne, and Craig Hukins. "Multi-feature snore sound analysis in obstructive sleep apnea–hypopnea syndrome." *Physiological measurement* 32.1 (2010): 83.
23. Almazaydeh, Laiali, et al. "Apnea detection based on respiratory signal classification." *Procedia Computer Science* 21 (2013): 310-316.
24. Baboli, Mehran, et al. "Wireless Sleep Apnea Detection Using Continuous Wave Quadrature Doppler Radar." *IEEE Sensors Journal* 20.1 (2019): 538-545.
25. Hu, Menghan, et al. "Combination of near-infrared and thermal imaging techniques for the remote and simultaneous measurements of breathing and heart rates under sleep situation." *PloS one* 13.1 (2018): e0190466.
26. Zhu, Kaiyin, et al. "Vision-Based Heart and Respiratory Rate Monitoring During Sleep—A Validation Study for the Population at Risk of Sleep Apnea." *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine* 7 (2019): 1-8.
27. Fiz, José A., et al. "Acoustic analysis of vowel emission in obstructive sleep apnea." *Chest* 104.4 (1993): 1093-1096.
28. Fernández Pozo, Rubén, et al. "Assessment of severe apnoea through voice analysis, automatic speech, and speaker recognition techniques." *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2009 (2009): 1-11.
29. Espinoza-Cuadros, Fernando, et al. "Speech signal and facial image processing for obstructive sleep apnea assessment." *Computational and mathematical methods in medicine* 2015 (2015).
30. Goldshtein, Evgenia, Ariel Tarasiuk, and Yaniv Zigel. "Automatic detection of obstructive sleep apnea using speech signals." *IEEE Transactions on biomedical engineering* 58.5 (2010): 1373-1382.
31. Kriboy, Maya, Ariel Tarasiuk, and Yaniv Zigel. "A novel method for obstructive sleep apnea severity estimation using speech signals." *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, 2014.
32. Kriboy, Maya, Ariel Tarasiuk, and Yaniv Zigel. "Detection of Obstructive sleep apnea in awake subjects by exploiting body posture effects on the speech signal." *2014 36th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society*. IEEE, 2014.
33. Simply, Ruby M., Eliran Dafna, and Yaniv Zigel. "Obstructive sleep apnea (OSA) classification using analysis of breathing sounds during speech." *2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. IEEE, 2018.