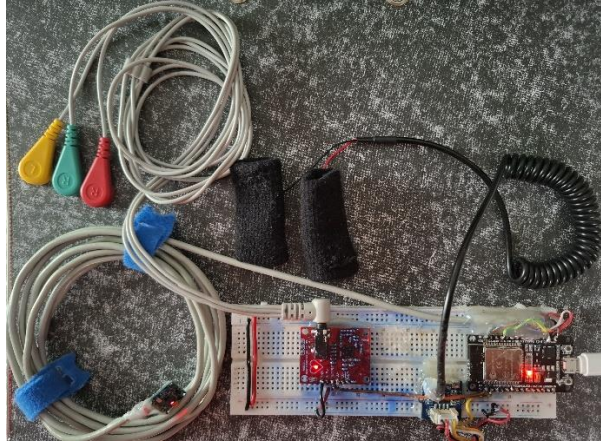


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σύστημα παρακολούθησης άπνοιας ύπνου με
ανάλυση δεικτών σε πραγματικό χρόνο και
απεικόνιση μέσω ιστοσελίδας»



Φοιτητής
Μπόζαρη Βασίλειος
Αρ. Μητρώου: 52312Μ

Επιβλέπων
Δρ. Τσιακμάκης Κυριάκος

Μάρτιος 2025

Τίτλος Δ.Ε. Σύστημα παρακολούθησης άπνοιας ύπνου με ανάλυση δεικτών σε πραγματικό χρόνο και απεικόνιση μέσω ιστοσελίδας

Κωδικός Δ.Ε. 24306

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Μπόζαρη Βασίλειος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Τσιακμάκης Κυριάκος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 31/10/24

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 27/2/25

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μπόζαρη Βασιλείου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Αφιερώνω αυτήν τη διπλωματική εργασία στην οικογένειά μου, που αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή δύναμης και έμπνευσής μου.

Στον γιο μου, που στα τρία του χρόνια γεμίζει τη ζωή μου με χαρά, αγάπη και ενθουσιασμό.

Στη σύζυγό μου, που είναι πάντα στο πλευρό μου, με στηρίζει και μου δίνει δύναμη σε κάθε μου βήμα.

Η παρουσία σας δίνει νόημα σε κάθε προσπάθεια και επιτυχία μου»

Πρόλογος

Οι λόγοι για τη δημιουργία ενός συστήματος παρακολούθησης άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο βασίζονται στο πρόβλημα της πρόσβασης και του κόστους των παραδοσιακών διαγνωστικών εργαλείων, όπως η πολυσωμονογραφία. Η αποφρακτική άπνοια ύπνου, μια κοινή και συχνά μη αναγνωρισμένη διαταραχή, σχετίζεται με καρδιοαγγειακές διαταραχές και μειωμένη ποιότητα ζωής. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στο πώς η φορητή τεχνολογία, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και η ανάλυση δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή μιας αποτελεσματικής και φτηνής λύσης για την πρόιμη διάγνωση και θεραπεία της άπνοιας ύπνου. Αυτή η εργασία με έχει εμπλουτίσει με γνώσεις για το πώς να συνδυάζω το υλικό και το λογισμικό για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων. Επίσης, ανέδειξε την ανάγκη για σχεδίαση λύσεων υγείας με γνώμονα τον χρήστη, ως τρόπο προώθησης της χρήσης αυτών των λύσεων. Συνδυάζοντας μια παλιά διαγνωστική τεχνική με τη νέα τεχνολογία, το έργο αυτό θα βοηθήσει στην ενίσχυση της ζωής των ανθρώπων σε όλο τον κόσμο.

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στο σχεδιασμό ενός συστήματος παρακολούθησης της άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο. Η αποφρακτική άπνοια ύπνου, η οποία χαρακτηρίζεται από τις επαναλαμβανόμενες διακοπές της αναπνοής κατά τη διάρκεια του ύπνου, είναι μια κοινή διαταραχή με κλινικές συνέπειες, η οποία συχνά παραμένει αδιάγνωστη λόγω των περιορισμών της χρυσής πρότυπης διαγνωστικής μεθόδου, που είναι η πολυσωμνογραφία, η οποία είναι δαπανηρή, χρονοβόρα και απαιτεί εγκαταστάσεις. Το προτεινόμενο σύστημα ενσωματώνει φυσιολογικούς αισθητήρες για τη μέτρηση παραμέτρων όπως το ΗΚΓ, το SpO₂, τον καρδιακό ρυθμό (BPM) και την ηλεκτρική αντίσταση του δέρματος (GSR). Αυτοί οι αισθητήρες συνδέονται με έναν μικροελεγκτή ESP32, ο οποίος επιτρέπει την απόκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την ασύρματη μεταφορά των δεδομένων σε έναν διακομιστή. Εφαρμόζονται σύνθετες μέθοδοι επεξεργασίας σημάτων και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για την ανίχνευση περιόδων άπνοιας και υποάπνοιας με βάση τα καταγεγραμμένα δεδομένα, με αποδεκτή ευαισθησία και ειδικότητα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω μιας απλής και εύχρηστης διαδικτυακής γραφικής διεπαφής χρήστη, η οποία εμφανίζει μετρικές ύπνου και γραφικές τάσεις, καθώς και ειδοποιήσεις όταν εντοπίζονται ανωμαλίες.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών και της επικύρωσης του συστήματος έδειξαν ότι το σύστημα έχει υψηλή ακρίβεια, άνω του 90%, στην αναγνώριση των επεισοδίων άπνοιας ύπνου, εξαρτάται από τη μετάδοση δεδομένων και παρέχει υψηλή ικανοποίηση χρηστών. Το σύστημα προσφέρει πλεονεκτήματα όπως φορητότητα, οικονομική αποδοτικότητα και ευχρηστία, καθιστώντας το μια βιώσιμη λύση παρακολούθησης στο σπίτι σε σχέση με άλλες παραδοσιακές μεθόδους. Παρά ταύτα, προβλήματα όπως η τοποθέτηση των αισθητήρων και η άνεση του χρήστη παραμένουν, ωστόσο το σύστημα μπορεί να βελτιωθεί προσθέτοντας καλύτερο υλικό, νέους αλγορίθμους και περαιτέρω μελέτες. Το σύστημα έχει τη δυνατότητα να αλλάξει τον τρόπο διαχείρισης της υγείας του ύπνου, βελτιώνοντας τον ρυθμό πρώιμης διάγνωσης, ενισχύοντας τη διαχείριση της υγείας από τον ίδιο τον ασθενή και μειώνοντας την πίεση στο σύστημα υγείας.

«Development of a Real-Time Sleep Apnea Monitoring System Using Wearable Sensors and Web-Based Interfaces»

«Bozarlis Vasileios»

Abstract

This thesis describes a real-time sleep apnea monitoring system that uses wearable sensors, IoT, and web interfaces. Obstructive sleep apnea, a common form of the sleep disorder, is proven to be accompanied by grave health risks, including heart diseases and poor quality of life. However, polysomnography and other traditional diagnostic tests are still expensive, time-consuming and facility-dependent, thus lying beyond reasonable reach of many people.

These challenges are mitigated in the proposed system where ECG, SpO₂, BPM and GSR sensors are connected to an ESP32 microcontroller to continuously measure physiological parameters. The collected information experiences various calculations by the system employing a detailed algorithm and machine learning to identify potential apneas and hypopneas. The results are presented through a web-based graphical user interface which presents sleep metrics, history, and alert.

Validation tests showed that the system is capable of having a success rate of over 90% in identifying sleep apnea events making the system a viable cheaper and more user friendly option to the conventional methods of diagnosis. This makes the user knowledgeable on his/her sleep health and at the same time, they do not have to rush to health facilities to get diagnosed early.

Still there are problems like sensors comfort and uninterrupted connectivity but the study provides the base on which the future improvements can be built: better hardware, more efficient algorithms, and more extensive clinical trials. This solution is unique and groundbreaking and moves the world closer to home-based sleep health monitoring, which is a realistic and viable method of enhancing sleep health around the world.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Πρώτα απ' όλα, ευχαριστώ την οικογένειά μου, και συγκεκριμένα τη σύζυγό μου και τον τρίχρονο γιο μου, για την ηθική υποστήριξη, την υπομονή και την αγάπη που μου έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας. Η παρουσία και η ενθάρρυνσή τους αποτέλεσαν για μένα πηγή δύναμης και έμπνευσης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κύριο Κυριάκο Τσιακμάκη, για την επιστημονική του καθοδήγηση, την αμέριστη υποστήριξή του και τις πολύτιμες συμβουλές του, που αποτέλεσαν αναπόσπαστο μέρος της πορείας αυτής.

Η συμβολή όλων σας ήταν καθοριστική και σας ευχαριστώ θερμά.

Περιεχομένα

Πρόλογος	4
Περίληψη	5
Abstract.....	6
Ευχαριστίες	7
Κατάλογος Σχημάτων.....	10
Κατάλογος πινάκων.....	11
1.1 Ιστορικό	13
1.2 Δήλωση Προβλήματος.....	13
1.3 Στόχοι.....	14
1.4 Πεδίο Εφαρμογής	14
1.5 Σημαντικότητα	15
1.6 Προκλήσεις και Περιορισμοί	15
1.7 Δομή Διπλωματικής Εργασίας	16
1.8 Συμπεράσματα.....	16
Κεφάλαιο 2ο: Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	16
2.1 Γενική Επισκόπηση Διαταραχών Ύπνου και Άπνοιας του Ύπνου	16
2.2 Παραδοσιακές και Σύγχρονες Προσεγγίσεις Παρακολούθησης Ύπνου	17
2.3 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) σε Συστήματα Υγειονομικής Περίθαλψης.....	18
2.4 Επεξεργασία Δεδομένων σε Πραγματικό Χρόνο και Ανάλυση Δεικτών	19
2.5 Ανασκόπηση Σχετικής Βιβλιογραφίας και της Αναφοράς Χάρτας.....	21
2.6 Κενά στην Υπάρχουσα Έρευνα.....	22
Κεφάλαιο 3ο: Σχεδιασμός και εφαρμογή συστήματος παρακολούθησης υπνικής άπνοιας σε πραγματικό χρόνο	23
3.1 Περιγραφή Συστήματος και Μεθοδολογία	23
3.2 Περίγραμμα του Συστήματος	24
3.3 Ενότητες και Υλικά	25
3.3.1 Μικροελεγκτής ESP32.....	26

3.3.2 Αισθητήρας ECGAD8232.....	26
3.3.3 Μονάδα οξυμετρίας δακτύλου SpO2 και καρδιακού παλμού MAX30100.....	28
3.3.4 Αισθητήρας Γαλβανικής Απόκρισης Δέρματος (GSR).....	31
3.4 Εξαρτήματα και Κόστος	33
3.5 Περιγραφή Διασύνδεσης Αισθητήρων στο ESP32.....	34
3.6 Αλγόριθμοι Ανίχνευσης Επεισοδίων Άπνοιας και Υπόπνοιας.....	36
3.6.1 Κριτήρια Ανίχνευσης Άπνοιας και Υπόπνοιας.....	37
3.6.2 Μέθοδοι Ανίχνευσης.....	37
3.6.3 Ενσωμάτωση Αλγορίθμων στο Σύστημα.....	37
3.6.4 Εξαγωγή Δεικτών Άπνοιας και Υπόπνοιας	38
3.7 Προγραμματισμός και το Διαγράμμα Ροής του Συστήματος.....	38
3.7.1 Προγραμματισμός ESP32 με C++ στο Arduino IDE.....	39
3.7.2 Ανάλυση Δεδομένων με Python	40
3.7.3 Διάγραμμα Ροής του Συστήματος	40
3.8 Σχεδιασμός διαδραστικής ιστοσελίδας και προβολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.....	42
3.9 Αποτελέσματα και Ανάλυση Μετρήσεων.....	45
3.9.1 Ανάλυση καρδιακών παλμών.....	46
3.9.2 Ανάλυση SpO2	49
3.9.3 Ανάλυση Galvanic Skin Response (GSR).....	51
3.9.4 Ανάλυση Ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ECG).....	52
3.9.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Δεικτών Άπνοιας Ύπνου.....	54
3.10 Συμπέρασμα	56
Κεφάλαιο 4ο: Αποτελέσματα και συζήτηση.....	57
4.1 Αξιολόγηση Απόδοσης του Συστήματος.....	58
4.2 Σύγκριση με Υπάρχοντα Συστήματα.....	59
4.3 Ανατροφοδότηση χρηστών	59
4.4 Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	60
Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....	62

5.1 Συμπεράσματα.....	62
5.2 Μελλοντική Εργασία.....	64
5.2.1 Σχεδίαση Υλικού και Βελτίωση Αισθητήρων	65
5.2.2 Προχωρημένη Επεξεργασία Σημάτων και Βελτιστοποίηση Αλγορίθμων	67
5.2.3 Αποθήκευση Δεδομένων Offline και Υπολογιστική Στοιβα (EdgeComputing)	70
5.2.4 Διευρυμένη Κλινική Επικύρωση	73
5.2.5 Ενσωμάτωση στις Κλινικές Ροές Εργασίας	75
5.2.6 Δεοντολογικά ζητήματα και απόρρητο	76
5.2.7 Βελτιωμένη διεπαφή χρήστη και προσβασιμότητα	79
5.2.8 Μείωση κόστους και επεκτασιμότητα	81
5.2.9 Θεραπευτικές παρεμβάσεις σε πραγματικό χρόνο.....	83
5.3 Τελικές Παρατηρήσεις.....	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικας Προγραμματισμού για ESP32.....	92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:Αρχείο HTMLιστοσελίδας.....	95

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1 Μια διαγνωστική πολυσωμονογραφία επιπέδου 1	17
Εικόνα 2 Τι είναι η επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο	20
Εικόνα 3 Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος παρακολούθησης του ύπνου.....	21
Εικόνα 4 Πλήρες μπλοκ διάγραμμα συστήματος	25
Εικόνα 5 ESP32-WROOM-32 οι ακροδέκτες (pins).....	26
Εικόνα 6 AD8232 Αισθητήρας Ηλεκτροκαρδιογραφήματος	27
Εικόνα 7 Καμπύλες ECG	28
Εικόνα 8 Καρδιακός ρυθμός κατά τον ύπνο.....	29
Εικόνα 9 Max30100 Αισθητήρας ΟξυμετρίαςSpO2.....	30

Εικόνα 10 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος του Max30100.....	30
Εικόνα 11 Επίπεδο SpO2 κατά την υπνική άπνοια.....	31
Εικόνα 12 Αισθητήρας Γαλβανικής Απόκρισης Δέρματος (GSR)	32
Εικόνα 13 Δραστηριότητα ED κατά τη διάρκεια του ύπνου.....	33
Εικόνα 14 Διάγραμμα κυκλώματος του πλήρους συστήματος	34
Εικόνα 15 Πρωτοτύπο του συστήματος.....	35
Εικόνα 16 Διάγραμμα ροής	41
Εικόνα 17 Απεικόνιση στη Διαδραστική Ιστοσελίδα.....	42
Εικόνα 18 Εφαρμογή του συστήματος στον ασθενή	43
Εικόνα 19 Γραμμικό διάγραμμα για τον καρδιακό ρυθμό	48
Εικόνα 20 Γραμμικό διάγραμμα για κορεσμό οξυγόνου (SpO2)	50
Εικόνα 21 Γραμμικό διάγραμμα για γαλβανική απόκριση δέρματος.....	52
Εικόνα 22 Γράφημα Ηλεκτροκαρδιογραφήματος του εξεταζόμενου ατόμου 4.....	53
Εικόνα 23 Σύγκριση Δεικτών Άπνοιας Ύπνου (AHI & ODI).....	54
Εικόνα 24 Μεταβλητότητα Καρδιακού Ρυθμού	55

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Κατάλογος εξαρτημάτων και κόστος.....	34
Πίνακας 2 Λίστες ατόμων που εξετάστηκαν.....	46
Πίνακας 3 Αποτέλεσμα BPM.....	47
Πίνακας 4 Αποτέλεσμα SpO2.....	49

Πίνακας 5 Αποτέλεσμα GSR	51
Πίνακας 6 Δείκτες Υπνικής Άπνοιας.....	53

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό

Ο ύπνος αποτελεί σημαντικό μέρος της ζωής, καθώς συμβάλλει στη διατήρηση ενός υγιούς σώματος και μυαλού, ενώ επιτρέπει και την ορθή λειτουργία του εγκεφάλου. Παρόλα αυτά, οι διαταραχές του ύπνου είναι κοινές σε άτομα σε όλο τον κόσμο, και μία από τις πιο συνηθισμένες είναι η άπνοια ύπνου. Η άπνοια ύπνου περιγράφεται ως διακοπές στην αναπνοή κατά τη διάρκεια του ύπνου που μπορεί να διαρκούν από λίγα δευτερόλεπτα έως και περισσότερα από 10 δευτερόλεπτα, οι οποίες προκαλούν σύντομες διαταραχές των προτύπων ύπνου και χαμηλά επίπεδα οξυγόνου στο σώμα. Αυτές οι διαταραχές οδηγούν σε πολλές άλλες υγειονομικές προβλήματα, όπως καρδιοαγγειακές παθήσεις, διαβήτη και εγκεφαλικά επεισόδια.

Η αποφρακτική άπνοια ύπνου (OSA) είναι η πιο συνηθισμένη από όλους τους τύπους άπνοιας ύπνου και παγκοσμίως εκτιμάται ότι περίπου 1 δισεκατομμύριο άτομα πλήττονται από OSA [1]. Παρ' όλα αυτά, λόγω του ότι τα συμπτώματά της είναι συχνά ήπια – όπως η έντονη ροχαλισμός, η ημερήσια υπνηλία και η μειωμένη συγκέντρωση – πολλοί άνθρωποι δεν συνειδητοποιούν ότι πάσχουν από την πάθηση. Η πολυσωμονογραφία θεωρείται συχνά ως το χρυσό πρότυπο για τη διάγνωση της άπνοιας ύπνου, καθώς είναι μια παραδοσιακή προσέγγιση. Περιλαμβάνει τη διανυκτέρευση σε ένα εργαστήριο ύπνου, όπου μετρώνται διάφορες παράμετροι. Παρόλο που είναι αναλυτική, είναι ακριβή, χρονοβόρα και μπορεί να μην είναι εύκολα προσβάσιμη για πολλούς ανθρώπους [9].

Η αύξηση της ανάγκης για οικονομικές και εύχρηστες λύσεις έχει οδηγήσει σε εξελίξεις στην τεχνολογία φορητών συσκευών και την ψηφιακή υγεία. Όταν συνδυάζονται με προηγμένους αισθητήρες και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, οι φορητές συσκευές προσφέρουν την ευκαιρία να επαναστατήσουν τη διάγνωση και τη θεραπεία της άπνοιας ύπνου. Αυτή η διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στο σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού, εύχρηστου συστήματος παρακολούθησης άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο που αξιοποιεί την τεχνολογία αισθητήρων, μικροελεγκτές και διαδικτυακές διεπαφές.

1.2 Δήλωση Προβλήματος

Ωστόσο, οι παραδοσιακές διαγνωστικές διαδικασίες, όπως η πολυσωμονογραφία, χρησιμοποιούνται σπάνια λόγω των υψηλών τιμών, της κατανάλωσης χρόνου και της ανάγκης για εξειδικευμένα κέντρα [9]. Ως αποτέλεσμα, οι ασθενείς με ήπια ή μέτρια συμπτώματα συνήθως παραβλέπονται μέχρι η ασθένεια να φτάσει σε προχωρημένο στάδιο.

Τα πιο δημοφιλή φορητά συσκευές ακολουθούν την έννοια του ύπνου κυρίως μέσω των σταδίων του ύπνου ή του συνολικού αριθμού ωρών που κοιμάται κάποιος, παρά μέσω των ειδικών

περιστατικών άπνοιας. Ωστόσο, η ικανότητα αυτών των συσκευών να εντοπίζουν και να διαγιγνώσκουν τα επεισόδια άπνοιας εξακολουθεί να αμφισβητείται. Αυτό το κενό υπογραμμίζει τη σημασία ενός συγκεκριμένου, σύγχρονου συστήματος που μπορεί να παρέχει συνεχή παρακολούθηση των φυσικών ενδείξεων που σχετίζονται με την άπνοια ύπνου.

Το σύστημα που προτείνεται σε αυτή τη διατριβή είναι ένα σύστημα παρακολούθησης της άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο που χρησιμοποιεί δεδομένα από αισθητήρες ECG, SpO₂, BPM και GSR. Με τη βοήθεια ενός οικονομικού μικροελεγκτή, όπως ο ESP32, και μιας διαδικτυακής διεπαφής, το σύστημα θα επιτρέπει στους ανθρώπους να διαχειρίζονται την κατάστασή τους με επιτυχία και να αποκτούν τις σχετικές πληροφορίες.

1.3 Στόχοι

Οι κύριοι στόχοι αυτής της μελέτης είναι οι εξής:

1. Δημιουργία ενός ανθεκτικού συστήματος υλικού, το οποίο θα είναι ικανό να καταγράφει φυσιολογικά δεδομένα για τον ασθενή σε πραγματικό χρόνο - για παράδειγμα, καρδιακό ρυθμό, κορεσμό οξυγόνου και αναπνευστικά μοτίβα κατά τη διάρκεια των επεισοδίων άπνοιας ύπνου.
2. Ανάπτυξη και δοκιμή αλγορίθμων για την αναγνώριση των επεισοδίων άπνοιας και υποπνοίας χρησιμοποιώντας τα συλλεχθέντα δεδομένα και παροχή αποτελεσμάτων που να είναι παρόμοια με αυτά της πολυσωμονογραφίας.
3. Δημιουργία φιλικής διεπαφής περιηγητή που θα αναπαριστά τα μετρικά του ύπνου, όπως αναλυτικά γραφήματα διαφόρων τύπων, ιστορικά δεδομένα και ειδοποιήσεις για ανωμαλίες.
4. Δημιουργία συστήματος συγχρονισμού χρόνου και ειδοποιήσεων, ώστε ο χρήστης ή ο φροντιστής να ενημερώνονται για την παρουσία επεισοδίων άπνοιας για άμεση αντίδραση.
5. Βελτίωση και αξιολόγηση της ακρίβειας, αξιοπιστίας και πρακτικότητας των εκτιμήσεων κάτω από διάφορα σενάρια και σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους.

1.4 Πεδίο Εφαρμογής

Το πεδίο αυτής της διατριβής περιλαμβάνει:

1. **Ανάπτυξη Υλικού:** Η ενσωμάτωση αισθητήρων για την παρακολούθηση φυσιολογικών παραμέτρων που σχετίζονται με την άπνοια ύπνου μαζί με το μικροελεγκτή ESP32 ως ελεγκτή.

2. **Ανάπτυξη Λογισμικού:** Η ανίχνευση άπνοιας είναι μία από τις τεχνικές ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο που θα πρέπει να εφαρμοστούν, καθώς και αλγόριθμοι για την αναγνώριση δεδομένων και την οπτικοποίησή τους.
3. **Διεπαφή Ιστοσελίδας:** Σχεδίαση μιας διαδραστικής ιστοσελίδας που θα μπορεί να χρησιμοποιείται τακτικά από τους χρήστες για να βλέπουν τα δεδομένα ύπνου τους και να λαμβάνουν αποτελεσματικές συστάσεις.
4. **Επικύρωση Συστήματος:** Στην περίπτωση των συστημάτων πολυσωμονογραφίας, η αποδοτικότητα του συστήματος μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια των τυπικών δοκιμών πολυσωμονογραφίας που ελέγχουν τα αποτελέσματα του συστήματος και επικυρώνουν τα αποτελέσματά του.
5. **Οικονομική Προσιτότητα και Προσβασιμότητα:** Η αναγνώριση μίας λύσης με το χαμηλότερο δυνατό κόστος ώστε να φτάσει σε όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η φορητότητα της συσκευής.

1.5 Σημαντικότητα

Η έρευνα αυτή προτείνει μια αποτελεσματική λύση σε ένα σημαντικό πρόβλημα διάγνωσης της υπνικής άπνοιας στην υγειονομική περίθαλψη. Είναι σημαντική επειδή το σύστημα είναι φθηνότερο από την πολυσωμονογραφία και μπορεί να επεκτείνει τις υπηρεσίες του στον πληθυσμό-στόχο. Δεύτερον, το σύστημα διαθέτει έγκαιρη ανίχνευση, δηλαδή επιτρέπει την παρακολούθηση των συμπτωμάτων της νόσου σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνοντας την έγκαιρη παρατήρηση των ευκαιριών παρέμβασης. Τρίτον, το σύστημα υποστηρίζει την ενδυνάμωση των ασθενών. Μέσω της χρήσης δεικτών ύπνου, το σύστημα ενθαρρύνει τη συμμετοχή στη διαχείριση της υγείας. Τέλος, το σύστημα εξυπηρετεί τους παρόχους υγειονομικής περίθαλψης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δεδομένα άπνοιας ύπνου που συλλέγονται από το σύστημα μπορούν να βοηθήσουν τους επαγγελματίες υγείας να διαγνώσουν και να θεραπεύσουν την πάθηση.

1.6 Προκλήσεις και Περιορισμοί

Αν και το προτεινόμενο σύστημα προσφέρει σημαντικά οφέλη, υπάρχουν αρκετές προκλήσεις και περιορισμοί που πρέπει να αντιμετωπιστούν:

1. **Ακρίβεια των Αισθητήρων:** Οι φυσιολογικές σήματα από τους αισθητήρες πρέπει να συλλέγονται με ακρίβεια για να επιτευχθεί σωστός εντοπισμός της άπνοιας.
2. **Ανάπτυξη Αλγορίθμων:** Η βελτιστοποίηση της ευαισθησίας και της ειδικότητας για τη μείωση των ψευδώς θετικών και ψευδώς αρνητικών αποτελεσμάτων αποτελεί πρόκληση.
3. **Συμμόρφωση Χρηστών:** Η συνεχής χρήση και η σωστή εγκατάσταση των αισθητήρων από τους χρήστες είναι κρίσιμη για την απόκτηση ακριβών αποτελεσμάτων.

4. **Κλιμακωσιμότητα:** Το τρέχον σύστημα απαιτεί επιπλέον ανάπτυξη για να ταιριάζει με διάφορες συσκευές και πλατφόρμες.
5. **Επικύρωση:** Για να αυξηθεί η αξιοπιστία, τα αποτελέσματα πρέπει να συγκριθούν με άλλα διαγνωστικά εργαλεία που υπάρχουν ήδη στην αγορά.

1.7 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Η διπλωματική εργασία έχει την εξής δομή:

Κεφάλαιο 1: Παρουσιάζει το υπόβαθρο της μελέτης, την διατύπωση του προβλήματος, τους στόχους της έρευνας, το πεδίο της μελέτης και τη δικαιολόγηση της μελέτης.

Κεφάλαιο 2: Ανασκόπηση της Βιβλιογραφίας: Συζητάει τις προηγούμενες εργασίες σχετικά με την παρακολούθηση της άπνοιας του ύπνου και ποιες τρέχουσες προσεγγίσεις υπάρχουν, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Κεφάλαιο 3: Παρουσιάζει τις λεπτομέρειες της συνολικής δομής του προτεινόμενου συστήματος και περαιτέρω λεπτομέρειες για το υλικό και το λογισμικό του, περιγράφει τον συνολικό αλγόριθμο.

Κεφάλαιο 4: Παρέχει αποτελέσματα δοκιμών και αξιολογεί την απόδοση του δημιουργηθέντος συστήματος.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία: Παρουσιάζει τα συμπεράσματα της δουλειάς και προτείνει περιοχές για μελλοντική έρευνα.

1.8 Συμπεράσματα

Η άπνοια του ύπνου αποτελεί ένα παγκόσμιο πρόβλημα υγείας με σημαντικές συνέπειες για την υγεία του πληθυσμού και την ποιότητα ζωής. Παρά την αποτελεσματικότητά τους, οι παραδοσιακές διαγνωστικές τεχνικές είναι δαπανηρές και περίπλοκες, και συνεπώς δεν είναι προσβάσιμες σε πολλούς ανθρώπους. Αυτή η διπλωματική εργασία παρουσιάζει το σχέδιο ενός συστήματος παρακολούθησης της άπνοιας του ύπνου σε πραγματικό χρόνο, που ενσωματώνει τη χρήση τεχνολογίας αισθητήρων, αλγορίθμων και διαδικτυακής γραφικής διεπαφής χρήστη, το οποίο μπορεί να προσφέρει μια αποτελεσματική λύση για την πρόληψη διάγνωση και διαχείριση της κατάστασης.

Κεφάλαιο 2ο: Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

2.1 Γενική Επισκόπηση Διαταραχών Ύπνου και Άπνοιας του Ύπνου

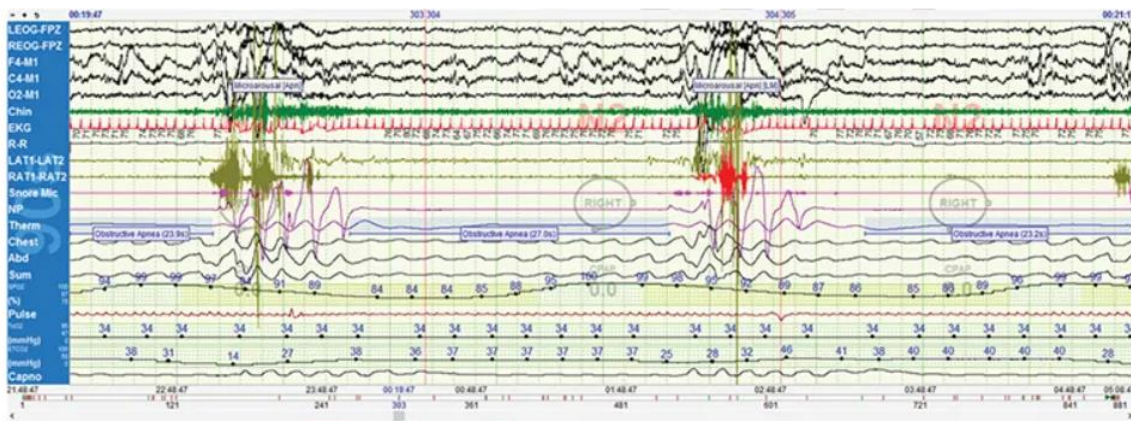
Οι διαταραχές του ύπνου είναι παθήσεις που διαταράσσουν το φυσιολογικό πρότυπο ύπνου/ξύπνου και μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την υγεία. Μεταξύ αυτών, η άπνοια του ύπνου

έχει εξαπλωθεί σε μεγάλο βαθμό και πλήττει σήμερα μεγάλο αριθμό ατόμων. Πρόκειται για μια πάθηση στην οποία παρατηρούνται περιοδικές διακοπές στην αναπνοή και μείωση της κορεσμού οξυγόνου κατά τη διάρκεια του ύπνου. Ο πιο κοινός τύπος διαταραχής ύπνου με άπνοια είναι η αποφρακτική άπνοια του ύπνου (OSA), η οποία χαρακτηρίζεται από μερική ή πλήρη απόφραξη της ανώτερης αεροφόρου οδού κατά τη διάρκεια του ύπνου, με ροχαλητό και καταγεγραμμένες άπνοιες [15]. Από την άλλη πλευρά, η κεντρική άπνοια του ύπνου (CSA) ορίζεται ως η αποτυχία των σημάτων από τον εγκέφαλο προς τους μυς που είναι υπεύθυνοι για την αναπνοή [7].

Συνολικά, περίπου 936 εκατομμύρια ενήλικες ηλικίας 30-69 ετών παγκοσμίως εκτιμάται ότι πλήττονται από διαταραχές ύπνου με άπνοια (SDB). Οι διαταραχές αυτές είναι πιο συχνές στην παχυσαρκία, σε μεγαλύτερες ηλικίες και σε άλλες σχετιζόμενες ασθένειες όπως η υπέρταση και ο διαβήτης [1]. Εάν η άπνοια του ύπνου δεν αντιμετωπιστεί, οδηγεί σε κακή υγεία του ασθενούς και συμβάλλει στην ανάπτυξη άλλων παθήσεων, όπως οι καρδιαγγειακές παθήσεις, το εγκεφαλικό, η γνωστική έκπτωση και η μείωση της ποιότητας ζωής [11]. Η έγκαιρη διάγνωση και διαχείριση είναι πάντα σημαντική. Η πολυσωμονογραφία (PSG) παραμένει η πιο κοινή διαγνωστική τεχνική, παρά την πρόοδο της τεχνολογίας που αλλάζει το τοπίο των διαγνωστικών εργαλείων για τον ύπνο.

2.2 Παραδοσιακές και Σύγχρονες Προσεγγίσεις Παρακολούθησης Ύπνου

Οι προηγούμενες προσεγγίσεις για την παρακολούθηση του ύπνου βασίζονται κυρίως στην πολυσωμονογραφία (PSG), μια εκτενή διαγνωστική εξέταση που πραγματοποιείται σε εργαστήριο ύπνου. Επιπλέον, η PSG καταγράφει τους εγκεφαλικούς κυματισμούς, τη μυϊκή δραστηριότητα, τις κινήσεις των ματιών καθώς και τα επίπεδα οξυγόνου κατά τη διάρκεια της νύχτας [17].



Εικόνα 1 Μια διαγνωστική πολυσωμονογραφία επιπέδου I

Πηγή: <https://neupsykey.com/polysomnography/>

Αν και χρήσιμη, είναι ακριβή, απαιτεί εξοπλισμό όπως η πολυσωμονογραφία, εξειδικευμένους επαγγελματίες και οι ασθενείς πρέπει να περάσουν τη νύχτα σε εργαστήρια ύπνου.

Οι νέες τεχνολογίες στη διαχείριση της ασθένειας περιλαμβάνουν την τεχνολογία φορητών συσκευών και την παρακολούθηση του ύπνου στο σπίτι. Τεχνολογίες φορητών συσκευών όπως το Fitbit, το AppleWatch και το Ouraring χρησιμοποιούν επιταχυνσιόμετρο, φωτεινοπληθυσμογραφία, συνδυασμένες με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για την εκτίμηση των σταδίων/εποχών του ύπνου και, κατά συνέπεια, για την ανίχνευση πιθανών διαταραχών [6]. Αν και δεν είναι τόσο ακριβείς όσο η PSG, αυτές οι καινοτομίες προσφέρουν εύκολους και οικονομικούς τρόπους για τη συνεχή παρακολούθηση.

Άλλες συσκευές διαγνωστικών σημείων περιλαμβάνουν τις εξετάσεις ύπνου τύπου III και IV (HSATs), οι οποίες προτιμώνται επίσης λόγω της ευκολίας στη λήψη αναπνευστικών μεταβλητών σε φυσικές συνθήκες [14].

Ωστόσο, υπάρχουν αρκετά μειονεκτήματα των σύγχρονων μεθόδων, όπως τα εξής: για παράδειγμα, οι φορητές συσκευές δεν είναι τόσο ακριβείς όσο απαιτεί η κλινική ευαισθησία, και οι HSATs δεν μπορούν να καταγράψουν την πλήρη αρχιτεκτονική του ύπνου τόσο αποτελεσματικά όσο η PSG [20]. Για να καλυφθούν αυτά τα κενά, προτείνονται το IoT και η τεχνητή νοημοσύνη για τη βελτίωση της ποιότητας και της εφαρμοσιμότητας των συλλεγόμενων δεδομένων.

2.3 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) σε Συστήματα Υγειονομικής Περίθαλψης

Το IoT έχει μεταμορφώσει τον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, επιτρέποντας στις συσκευές που συνδέονται με το IoT να μοιράζονται πληροφορίες μεταξύ τους, βελτιώνοντας την εμπειρία των ασθενών και των κλινικών. Στην περίπτωση της παρακολούθησης του ύπνου, οι συσκευές IoT καταγράφουν, αναλύουν και μεταδίδουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, δημιουργώντας δυνατότητες για συνεχή και εξατομικευμένη υγειονομική περίθαλψη [13]. Για παράδειγμα, οι έξυπνοι CPAP, όπως οι φορητές συσκευές, δεν παρέχουν μόνο θεραπεία για την OSA, αλλά επίσης αποστέλλουν τα δεδομένα χρήσης και αποτελεσματικότητας στο σύννεφο, όπου οι γιατροί μπορούν να παρακολουθήσουν τη συμμόρφωση του ασθενούς [22].

Οι τεχνολογίες IoT βελτιώνουν την ακρίβεια της διάγνωσης, καθώς συνδυάζουν δεδομένα από διάφορους αισθητήρες. Ορισμένοι ασθενείς τοποθετούν έξυπνα κρεβάτια και μαξιλάρια με αισθητήρες πίεσης και κίνησης που επιτρέπουν την καταγραφή της στάσης του ύπνου, των αναπνευστικών προτύπων και της διακύμανσης του καρδιακού ρυθμού, προσφέροντας έτσι ένδειξη της ποιότητας του ύπνου [8]. Επίσης, τα οικοσυστήματα IoT διασφαλίζουν ότι οποιαδήποτε συσκευή και το Ηλεκτρονικό Αρχείο Υγείας (EHR) μπορούν να συνεργαστούν για να ενσωματώσουν, να οργανώσουν και να αναλύσουν δεδομένα, και να είναι χρήσιμα για την κλινική λήψη αποφάσεων.

Ωστόσο, υπάρχουν παράγοντες που ανακύπτουν κατά την εφαρμογή του IoT στην παρακολούθηση του ύπνου, όπως η προστασία της ιδιωτικότητας των δεδομένων, η διαλειτουργικότητα και η κυβερνοασφάλεια. Ορισμένα από αυτά τα εμπόδια απαιτούν εξάλειψη

προκαταλήψεων για να απελευθερωθεί πλήρως η λειτουργία του IoT στη βελτίωση της διαχείρισης της υγείας του ύπνου.

Επιπλέον, το ζήτημα της ενσωμάτωσης του IoT σε συστήματα υγειονομικής περίθαλψης ανοίγει την ιδέα της πρόγνωσης. Για παράδειγμα, οι πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο από τους παρακολούθητες ύπνου επιτρέπουν στους γιατρούς να υπολογίσουν μελλοντικά προβλήματα υγείας. Συνεχόμενη παρακολούθηση των προτύπων ύπνου επιτρέπει την πρόωμη διάγνωση ασθενειών όπως η άπνοια ύπνου ή η αϋπνία. Δηλαδή, μέσω της σύγκρισης ιστορικών δεδομένων και δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, τα προβλεπτικά μοντέλα μπορούν να ανιχνεύσουν τάσεις ή ανωμαλίες και να προάγουν έτσι τη πιο προληπτική υγειονομική περίθαλψη.

Δεύτερον, η εφαρμογή του IoT στην παρακολούθηση του ύπνου ενισχύει τη συμμετοχή των ασθενών. Έξυπνα ρολόγια και καταγραφείς φυσικής κατάστασης παρέχουν στους χρήστες τους πληροφορίες για τα πρότυπα ύπνου τους και τους παρακινούν να κάνουν καλύτερες επιλογές και να διαχειριστούν τις καταστάσεις τους. Αυτή η ανατροφοδότηση μπορεί να βοηθήσει τους ασθενείς να αλλάξουν τη συμπεριφορά τους, όπως να τροποποιήσουν το περιβάλλον ύπνου τους ή να ακολουθήσουν θεραπείες που έχουν προτείνει οι γιατροί τους για να βελτιώσουν την υγεία τους. Παρ' όλα αυτά, το πρόβλημα της αξιοπιστίας των δεδομένων παραμένει κρίσιμο, καθώς η ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται από τις συσκευές IoT εξαρτάται από την ποιότητα των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται και τη θέση τους. Για τη βελτίωση της αξιοπιστίας αυτών των συσκευών, πρέπει να πραγματοποιείται συνεχής επανακαλιμπρίωση και επαναεπικύρωση σε σχέση με άλλες συσκευές χρυσού προτύπου, όπως η πολυσωμονογραφία (PSG). Επιπλέον, για να επιβεβαιωθεί η προσαρμογή αυτών των συσκευών στην μακροχρόνια πρακτική στη διαχείριση της υγείας του ύπνου, πρέπει να διεξαχθούν κλινικές δοκιμές επικύρωσης.

2.4 Επεξεργασία Δεδομένων σε Πραγματικό Χρόνο και Ανάλυση Δεικτών

Η επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο αποτελεί σημαντικό στοιχείο των σύγχρονων συστημάτων παρακολούθησης του ύπνου. Σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες προσεγγίσεις που αναλύουν τα δεδομένα ύπνου μετά την ολοκλήρωση της νύχτας, τα συστήματα σε πραγματικό χρόνο επιτρέπουν την αναγνώριση φαινομένων όπως η άπνοια ή η υπνοαπνοία και παρέχουν τη δυνατότητα διόρθωσης αυτών [10]. Πράγματι, οι ανώτερες αλγόριθμοι και τα μοντέλα μηχανικής μάθησης παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία αυτή, καθώς παράγεται μεγάλος όγκος δεδομένων από τις συσκευές IoT.

Για παράδειγμα, το μοντέλο λήψης απόφασης με χρήση μηχανικής μάθησης μπορεί να προσδιορίσει τα στάδια του ύπνου από τους φυσιολογικούς ρυθμούς του ανθρώπινου οργανισμού, περιλαμβανομένων της διακύμανσης του καρδιακού ρυθμού και της αναπνευστικής συμπεριφοράς [26]. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει επίσης ότι η χρήση βαθιάς μάθησης, ειδικά τα CNNs, ανέφερε

υψηλή ακρίβεια στην αναγνώριση διαταραχών ύπνου χρησιμοποιώντας δεδομένα πολυσωμονογραφίας [4].

Επιπλέον, οι φορητές συσκευές που μπορούν να πραγματοποιούν επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο προσφέρουν στους χρήστες πολύτιμες πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα. Για παράδειγμα, σύγχρονα συστήματα ύπνου, όπως το WithingsSleepAnalyzer, αναγνωρίζουν τα επεισόδια άπνοιας ύπνου και παρέχουν συστάσεις για τη βελτίωση της ποιότητας του ύπνου [12].



Εικόνα 2 Τι είναι η επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

Πηγή: <https://estuary.dev/real-time-data-processing/>

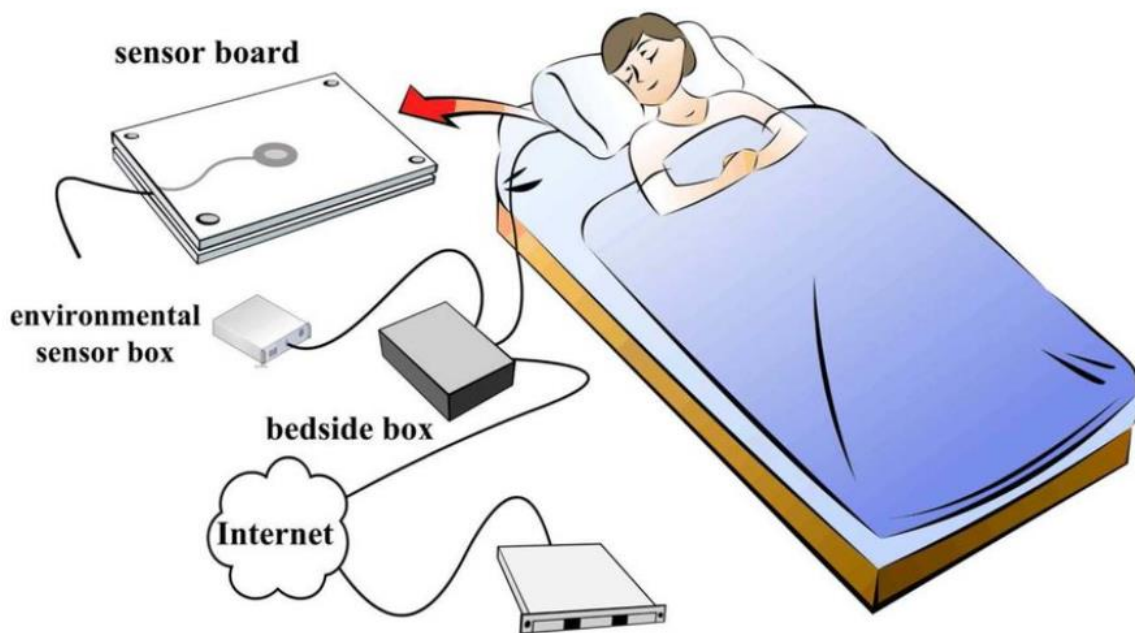
Ωστόσο, ζητήματα όπως η «προκατάληψη, τα δεδομένα και οι υπολογισμοί» παραμένουν σημαντικά για να καταλήξουμε σε καλές λύσεις. Επιπλέον, η επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στην παρακολούθηση του ύπνου καθιστά δυνατή την αναγνώριση των κατάλληλων παρεμβάσεων, όπου το σύστημα είναι ικανό να τροποποιήσει την πορεία της θεραπείας σύμφωνα με τα μοτίβα που εντοπίζονται. Αυτή η ευχέρεια ενισχύει την αποτελεσματικότητα των θεραπευτικών μεθόδων, και δεδομένου ότι γίνεται σε πραγματικό χρόνο, οι ασθενείς μπορούν να διαχειρίζονται με βάση την ανατροφοδότηση που αποκτάται.

Για παράδειγμα, εάν ένα σύστημα IoT εντοπίσει επεισόδια καταγεγραμμένης άπνοιας ύπνου, θα μπορούσε να αυξήσει αυτόματα τις ρυθμίσεις πίεσης του CPAP, βελτιώνοντας την άνεση του ασθενούς και την ποιότητα της προσφερόμενης θεραπείας [3]. Ωστόσο, η εφαρμογή της προσέγγισης επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο έχει τις προκλήσεις της όσον αφορά την ποσότητα των υπολογισμών και την καθυστέρηση του χρόνου. Οι τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων πρέπει να

σχεδιαστούν ώστε να χειρίζονται μεγάλα δεδομένα και ταυτόχρονα να μην επιβαρύνουν τους πόρους της συσκευής ή να μειώνουν την απόδοση του συστήματος. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με τεχνικές υπολογισμού στο άκρο (edgecomputing), οι οποίες είναι μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων στη συσκευή χωρίς να αποστέλλονται συνεχώς στο cloud. Ωστόσο, το ζήτημα της επίτευξης της σωστής ισορροπίας μεταξύ της τοπικής επεξεργασίας και της υπολογιστικής νέφους (cloudcomputing) παραμένει μία από τις κύριες προκλήσεις όσον αφορά την γενική βελτιστοποίηση τέτοιων συστημάτων.

2.5 Ανασκόπηση Σχετικής Βιβλιογραφίας και της Αναφοράς Χάρτας

Πολλά άρθρα έχουν δημοσιευτεί για να ερευνήσουν τη χρήση του IoT και της μηχανικής μάθησης στην παρακολούθηση του ύπνου. Οι Penzeletal. (2017) απέδειξαν ότι τα συστήματα CPAP ενσωματωμένα με IoT είναι αποτελεσματικά στη βελτίωση της συμμόρφωσης των ασθενών με OSA στη θεραπεία [22]. Παρομοίως, οι Farrahietal. (2020) ανέφεραν ότι τα έξυπνα συστήματα κλινοστρωμνής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της ποιότητας του ύπνου και των αλλαγών στη στάση του σώματος [8].



Εικόνα 3 Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος παρακολούθησης του ύπνου

Πηγή:https://www.researchgate.net/figure/The-schematic-of-the-sleep-monitoring-system_fig2_254036775

Η αναφορά στην οποία βασίζεται αυτή η ανασκόπηση εξετάζει την αποτελεσματικότητα των συστημάτων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο IoT στην αύξηση της ακρίβειας της διάγνωσης της άπνοιας ύπνου. Η μελέτη επικεντρώνεται στο γεγονός ότι ο μεγάλος όγκος φυσιολογικών

δεδομένων απαιτεί τη χρήση αρχιτεκτονικών υψηλής κλίμακας που ενσωματώνουν τόσο την υπολογιστική στο άκρο (edgecomputing) όσο και την ανάλυση νέφους. Επιπλέον, επισημαίνει ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα των τρεχουσών μεθόδων, όπως η χαμηλή συμβατότητα και η υψηλή πολυπλοκότητα των υπολογισμών, κάτι που δείχνει ότι απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη. Προτείνει καλύτερες μεθόδους κρυπτογράφησης καθώς και ασφαλέστερους τρόπους αποθήκευσης των δεδομένων των ασθενών προκειμένου να προστατευθούν οι πληροφορίες των ασθενών και να πληρούνται οι απαιτούμενοι υγειονομικοί κανονισμοί, όπως το ΗΡΑΑ.

Η μελέτη συζητά επίσης τρόπους για την καθιέρωση ενός προτύπου μεταξύ συσκευών και διαφόρων πλατφορμών, ώστε να καταστούν συμβατές για ενσωμάτωση στα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης. Σ' αυτό το πλαίσιο, προτείνεται μια κοινή δομή δεδομένων και σύστημα ανταλλαγής μηνυμάτων που μπορεί να βοηθήσει τους κλινικούς ιατρούς να ανταλλάσσουν δεδομένα με μεγαλύτερη ευχέρεια και αδιάλειπτα μεταξύ διαφόρων εφαρμογών.

Αν και τα προτεινόμενα συστήματα βασισμένα στο ΙοΤ και τη μηχανική μάθηση έχουν μεγάλη δυναμική, η μελέτη υποστηρίζει ότι απαιτούνται περισσότερες εκτενείς κλινικές δοκιμές για να καθοριστεί η αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων. Επιπλέον, προτείνει ότι οι κατασκευαστές συσκευών, ο τομέας υγειονομικής περίθαλψης και οι υπεύθυνοι πολιτικής πρέπει να συνεργαστούν για να αντιμετωπίσουν τα κανονιστικά ζητήματα και να ενισχύσουν την εγκατάσταση των συστημάτων σε διάφορα περιβάλλοντα υγειονομικής περίθαλψης.

2.6 Κενά στην Υπάρχουσα Έρευνα

Παρά τις βελτιώσεις στη μέτρηση του ύπνου, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλά κενά στην έρευνα. Το πρώτο είναι ότι οι κλινικές συσκευές ΙοΤ δεν έχουν ενσωματωθεί καλά στις κλινικές ροές εργασίας και η ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται από αυτές τις συσκευές, καθώς και η ακρίβεια των διαγνώσεων που γίνονται από αυτές, μπορεί να διαφέρουν από κέντρο σε κέντρο λόγω της έλλειψης τυποποιημένων πρωτοκόλλων σε αυτόν τον τομέα [14]. Επιπλέον, τα περισσότερα από τα φορητά και φορετά συστήματα δεν συγκρίνονται με την πολυσωμονογραφία (PSG) και, συνεπώς, η χρησιμότητά τους στην κλινική πρακτική τίθεται υπό αμφισβήτηση [20].

Το δεύτερο σημαντικό κενό σχετίζεται με την αποδοχή των χρηστών και την πρόσβαση στις υπηρεσίες. Το υψηλό κόστος και η πολυπλοκότητα των διεπαφών απωθούν τους περισσότερους ανθρώπους, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου οι πόροι είναι περιορισμένοι. Επιπλέον, άλλα ζητήματα, όπως η προστασία των δεδομένων και η εξήγηση των αλγορίθμων, σπάνια λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό των συστημάτων που υποστηρίζονται από το ΙοΤ [13].

Η περαιτέρω έρευνα σε αυτόν τον τομέα θα πρέπει να στοχεύει στη δημιουργία φθηνότερων, ευκολότερων στη χρήση και συμβατών συστημάτων που είναι επίσης ηθικά αποδεκτά. Αυτά τα κενά μπορούν να κλείσουν μόνο μέσω της αλληλεπίδρασης ερευνητών, κλινικών ιατρών και αναπτυξιακών

τεχνολογίας για την ενίσχυση της πρακτικής υγείας του ύπνου. Επιπλέον, δεν υπάρχει εκτενής διατομεακή μελέτη για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και των κινδύνων που σχετίζονται με τις τεχνικές παρακολούθησης ύπνου που βασίζονται στο IoT στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Η πλειονότητα των μελετών αυτών επικεντρώνεται στην ανάλυση βραχυπρόθεσμων αποτελεσμάτων, ενώ υπάρχει έλλειψη έρευνας σχετικά με τη συνεχιζόμενη αποτελεσματικότητα και τις ενδεχόμενες συνέπειες για την υγεία. Επιπλέον, η έρευνα δεν καταγράφει τη μεταβλητότητα των αναγκών μεταξύ διαφορετικών υποομάδων, όπως οι ηλικιωμένοι, τα παιδιά ή τα άτομα με αναπηρία, και έτσι τα αποτελέσματα δεν είναι πολύ γενικεύσιμα.

Ένας άλλος τομέας έρευνας που δεν έχει μελετηθεί επαρκώς είναι η δυνατότητα εφαρμογής αλγορίθμων μηχανικής μάθησης στο IoT για τη βελτίωση των προγνωστικών εκτιμήσεων και των στοχευμένων προσεγγίσεων. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικά ζητήματα σχετικά με την εκπαίδευση αλγορίθμων σε διάφορα σύνολα δεδομένων, προκειμένου να αποφευχθεί ή να μειωθεί η μεροληψία και να ενισχυθεί η ακρίβεια.

Η κάλυψη αυτών των κενών απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που να συνδυάζει την τεχνολογική αναβάθμιση των συσκευών, καθώς και τον σχεδιασμό με επίκεντρο τον χρήστη και τις ορθές κλινικές δοκιμές. Εξίσου κρίσιμο είναι ότι, μέσω της ενσωμάτωσης των ανθρώπων, των λογικών χαμηλών κόστους και της ηθικής ακεραιότητας, οι ερευνητές μπορούν να απελευθερώσουν το IoT προκειμένου να μεταμορφώσουν την υγειονομική περίθαλψη του ύπνου.

Κεφάλαιο 3ο: Σχεδιασμός και εφαρμογή συστήματος παρακολούθησης υπνικής άπνοιας σε πραγματικό χρόνο

3.1 Περιγραφή Συστήματος και Μεθοδολογία

Σε αυτή την ενότητα αναλύονται οι μέθοδοι, τα στοιχεία και οι διαδρομές που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη του στόχου του συστήματος παρακολούθησης διαταραχών ύπνου. Ο κύριος στόχος του συστήματος είναι η συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας και των παραμέτρων ύπνου ενός ασθενούς με διαταραχές, με ιδιαίτερη έμφαση στην ανίχνευση επεισοδίων άπνοιας.

Το σύστημα παρακολούθησης βασίζεται σε μια πλατφόρμα μικροελεγκτή και αποτελείται από τρία διακριτά επίπεδα: το επίπεδο εισόδου, τον μικροελεγκτή και το επίπεδο εξόδου. Το βασικό στοιχείο του συστήματος είναι η μονάδα μικροελεγκτή ESP32, η οποία διαχειρίζεται τη ροή δεδομένων μεταξύ των αισθητήρων (στο επίπεδο εισόδου) και της πλατφόρμας απεικόνισης αποτελεσμάτων (στο επίπεδο εξόδου).

Επίπεδο Εισόδου – Αισθητήρες

Το σύστημα συνδυάζεται με πέντε διαφορετικούς αισθητήρες που παρέχουν κρίσιμες μετρήσεις για την κατάσταση του ασθενούς κατά τη διάρκεια του ύπνου:

Grove-GSR Sensor – Μετρά την αγωγιμότητα του δέρματος για την εκτίμηση των επιπέδων στρες.

SPO2 (MAX30100) – Καταγράφει τον κορεσμό οξυγόνου στο αίμα.

BPM (HeartRateSensor) – Μετρά τον καρδιακό ρυθμό.

ECG (AD8232) – Παρέχει ηλεκτροκαρδιογράφημα για την παρακολούθηση της καρδιακής λειτουργίας.

Οι αισθητήρες αυτοί αποστέλλουν αναλογικά σήματα στον μικροελεγκτή ESP32, ο οποίος επεξεργάζεται τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

Επίπεδο Εξόδου – Διαδραστική Ιστοσελίδα

Τα δεδομένα που συλλέγονται και αναλύονται από τον μικροελεγκτή προβάλλονται σε μια διαδραστική ιστοσελίδα, όπου ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί γραφήματα και στατιστικά δεδομένα για κάθε περίοδο ύπνου, προειδοποιήσεις και ειδοποιήσεις σε περιπτώσεις ανίχνευσης ανωμαλιών, όπως επεισόδια άπνοιας, ακανόνιστος καρδιακός ρυθμός ή χαμηλά επίπεδα οξυγόνου. Με αυτό τον τρόπο, το σύστημα προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση για την παρακολούθηση της ποιότητας του ύπνου και τη διάγνωση διαταραχών που μπορεί να επηρεάσουν την υγεία του ασθενούς.

3.2 Περίγραμμα του Συστήματος

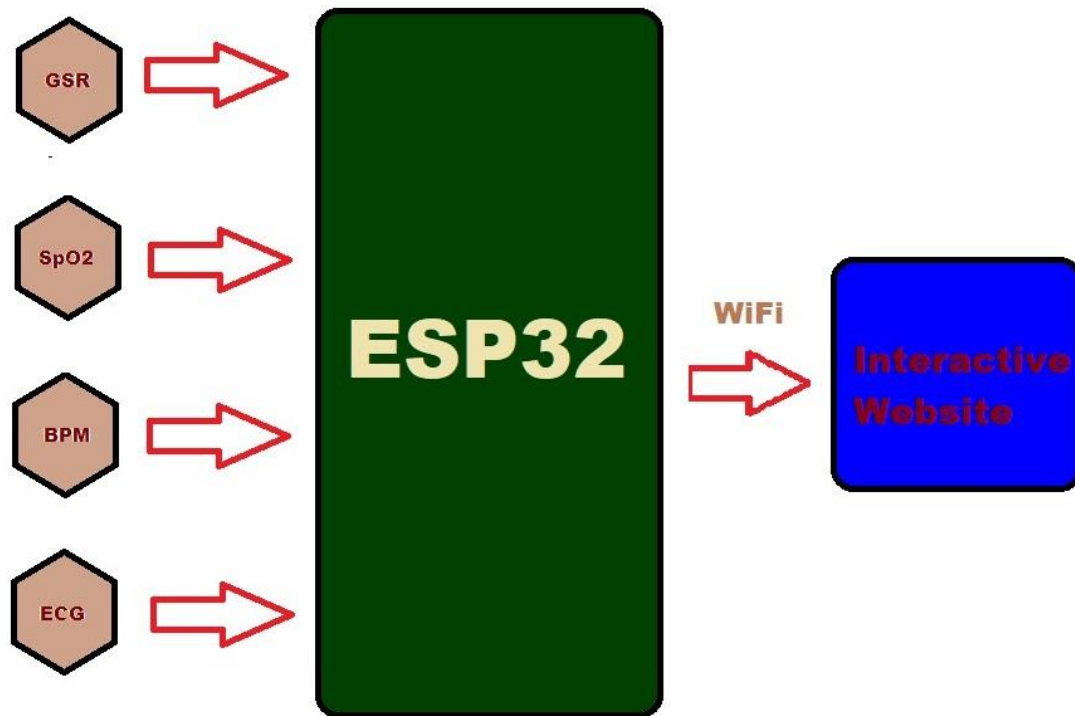
Η Εικόνα 4 παρουσιάζει το μπλοκ διάγραμμα του πλήρους συστήματος παρακολούθησης ύπνου. Το σύστημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη: είσοδο, επεξεργασία και έξοδο.

Στο επίπεδο εισόδου, οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα σχετικά με τον καρδιακό ρυθμό (BPM), τον κορεσμό οξυγόνου (SpO2), και τη γαλβανική απόκριση δέρματος (GSR). Τα δεδομένα που συλλέγονται αποστέλλονται στη μονάδα επεξεργασίας, η οποία αποτελείται από μια πλακέτα μικροελεγκτή ESP32.

Η πλακέτα μικροελεγκτή ESP32 είναι το κεντρικό μέρος επεξεργασίας του συστήματος. Η πλακέτα αυτή είναι υπεύθυνη για τη συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες. Η ESP32 διαθέτει Wi-Fi και Bluetooth δυνατότητες, επιτρέποντας τη σύνδεση με μια διαδραστική ιστοσελίδα, όπου ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί τα αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο. Στο επίπεδο εξόδου, τα δεδομένα και οι αναλύσεις των μετρήσεων προβάλλονται μέσω μιας διαδικτυακής εφαρμογής. Ο χρήστης μπορεί να εξετάζει γραφήματα και στατιστικά στοιχεία για κάθε περίοδο ύπνου, καθώς και να λαμβάνει ειδοποιήσεις ή προειδοποιήσεις σε περιπτώσεις ανωμαλιών, όπως χαμηλό επίπεδο οξυγόνου ή ακανόνιστο καρδιακό ρυθμό.

Το σύστημα αυτό παρέχει συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας του ύπνου, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες για την πρόληψη προβλημάτων υγείας, όπως η υπνική άπνοια.

Η εικόνα 4 απεικονίζει τη βασική ροή εργασίας του συστήματος παρακολούθησης ύπνου. Το σύστημα περιλαμβάνει διάφορους αισθητήρες, οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα όπως ο καρδιακός ρυθμός (BPM), ο κορεσμός οξυγόνου (SpO2), η γαλβανική απόκριση δέρματος (GSR) και το καρδιογράφημα (ECG). Οι αισθητήρες παρέχουν αυτά τα δεδομένα ταυτόχρονα στη μονάδα μικροελεγκτή ESP32, η οποία αναλαμβάνει την επεξεργασία και την ανάλυση των μετρήσεων.



Εικόνα 4 Πλήρες μπλοκ διάγραμμα συστήματος

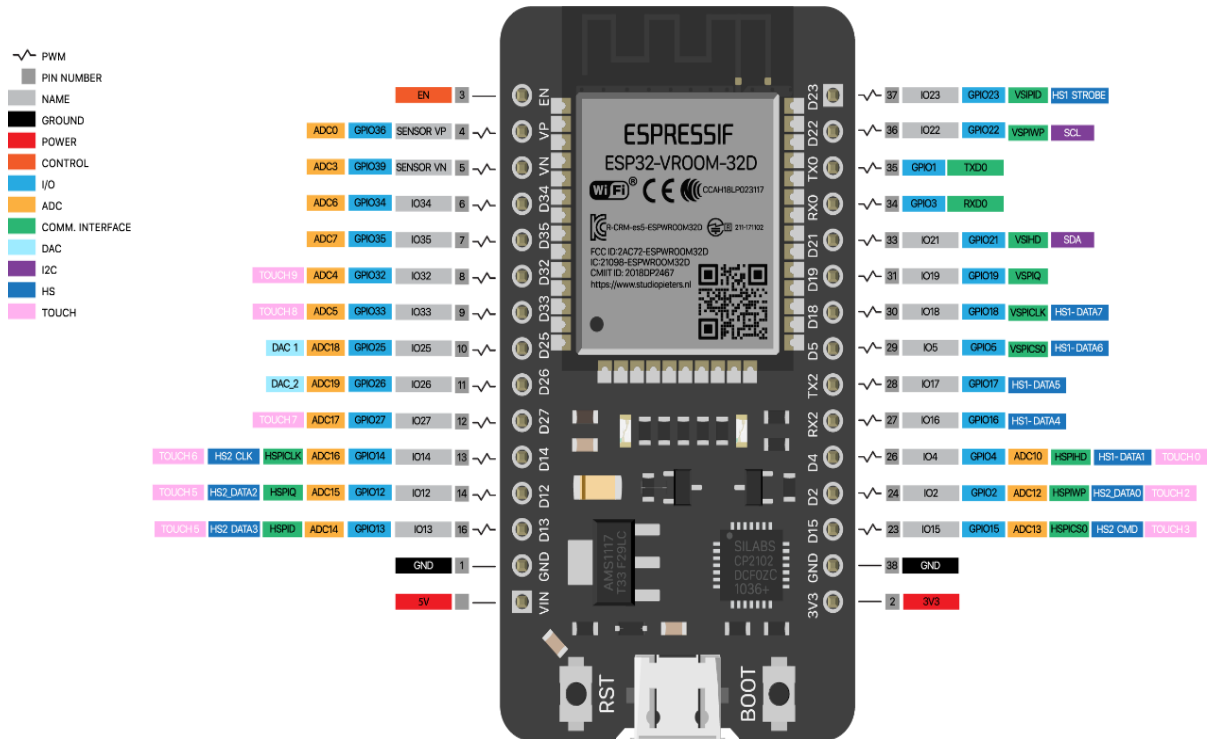
Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης, το ESP32 μεταβιβάζει τα αποτελέσματα στη διαδραστική ιστοσελίδα του συστήματος. Στην ιστοσελίδα, ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο τα γραφικά αποτελέσματα και τα στατιστικά στοιχεία για κάθε περίοδο ύπνου. Επιπλέον, το σύστημα παρέχει ειδοποιήσεις ή προειδοποιήσεις σε περιπτώσεις ανωμαλιών, όπως ένδειξη χαμηλού κορεσμού οξυγόνου ή ακανόνιστου καρδιακού ρυθμού, που μπορεί να υποδηλώνουν προβλήματα όπως η υπνική άπνοια.

3.3 Ενότητες και Υλικά

Το σύστημα που περιγράφεται περιλαμβάνει ποικίλους τύπους στοιχείων, καθένα από τα οποία διαδραματίζει συγκεκριμένο ρόλο στη συνολική λειτουργικότητα. Τα στοιχεία εισόδου είναι υπεύθυνα για τη συλλογή δεδομένων ή εντολών από εξωτερικές πηγές. Τα στοιχεία εξόδου χειρίζονται την παρουσίαση ή την παράδοση των αποτελεσμάτων. Υπάρχουν επίσης ενδιάμεσα στοιχεία που λειτουργούν ως γέφυρες, διασυνδέοντας τις εισόδους με τις εξόδους και εξασφαλίζοντας ότι οι πληροφορίες ή τα σήματα μεταφέρονται σωστά και αποδοτικά μέσα στο σύστημα.

3.3.1 Μικροελεγκτής ESP32

Για την κατασκευή της συσκευής επιλέχθηκε ως κεντρικός μικροελεγκτής ο ESP32 της εταιρείας Espressif, λόγω της ισχυρής επεξεργαστικής του ισχύος, του χαμηλού κόστους και της πληθώρας διαθέσιμων περιφερειακών που παρέχει.



Εικόνα 5 ESP32-WROOM-32 οι ακροδέκτες (pins)

Πηγή: <https://www.studiopieters.nl/esp32-pinout/>

Η επιλογή του συγκεκριμένου μικροελεγκτή δεν βασίστηκε αποκλειστικά στις απαιτήσεις της παρούσας λειτουργικότητας της συσκευής, αλλά και στον σχεδιασμό για μελλοντικές επεκτάσεις. Επιπλέον, ο ESP32 προσφέρει εκτεταμένες δυνατότητες τόσο για ενσύρματες όσο και για ασύρματες διασυνδέσεις, γεγονός που τον καθιστά ιδανική επιλογή στο πλαίσιο αυτής της υλοποίησης.

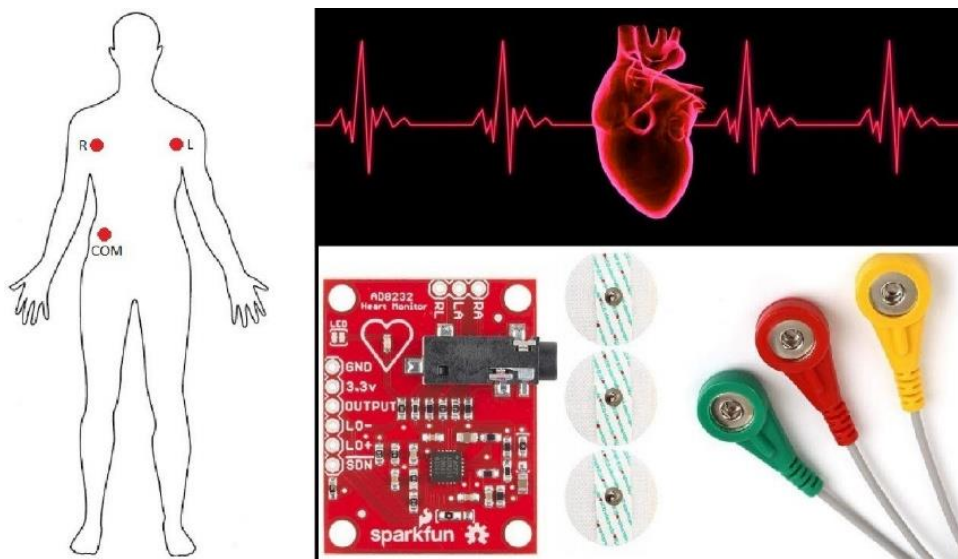
Το σύστημα περιλαμβάνει διάφορους αισθητήρες για τη συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης του ασθενούς κατά τη διάρκεια του ύπνου. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν σχεδιαστεί ώστε να συλλέγουν δεδομένα που σχετίζονται με την υπνική άπνοια και άλλες καταστάσεις υγείας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στο σύστημα.

3.3.2 Αισθητήρας ECGAD8232

Το ηλεκτροκαρδιογράφημα (ΗΚΓ) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία για την παρακολούθηση της άπνοιας ύπνου, καθώς παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για τον καρδιακό ρυθμό

και τη μεταβλητότητά του. Μέσω του ΗΚΓ είναι δυνατή η ανίχνευση ασυνήθιστων αλλαγών στον καρδιακό ρυθμό, η εκτίμηση της κατάστασης της καρδιάς κατά τη διάρκεια του ύπνου, η ανίχνευση πιθανής υπερτροφίας της καρδιάς που μπορεί να προκληθεί από υπέρταση, καθώς και η διάγνωση εμφράγματος του μυοκαρδίου.

Το πρότυπο ΗΚΓ διαφέρει από άτομο σε άτομο, επηρεαζόμενο από παράγοντες όπως το επίπεδο φυσικής δραστηριότητας και η κατάσταση του οργανισμού. Ένα σωματικά ενεργό άτομο εμφανίζει συχνά πιο σταθερά πρότυπα ΗΚΓ σε σύγκριση με ένα ανενεργό άτομο. Επιπλέον, το ΗΚΓ που καταγράφεται σε κατάσταση ηρεμίας διαφοροποιείται από εκείνο που παρατηρείται κατά τη διάρκεια άσκησης ή υπό την επίδραση στρεσογόνων παραγόντων.



Εικόνα 6 AD8232 Αισθητήρας Ηλεκτροκαρδιογραφήματος

Πηγή: <https://images.app.goo.gl/fMsB4Hw3xxDaVKre8>

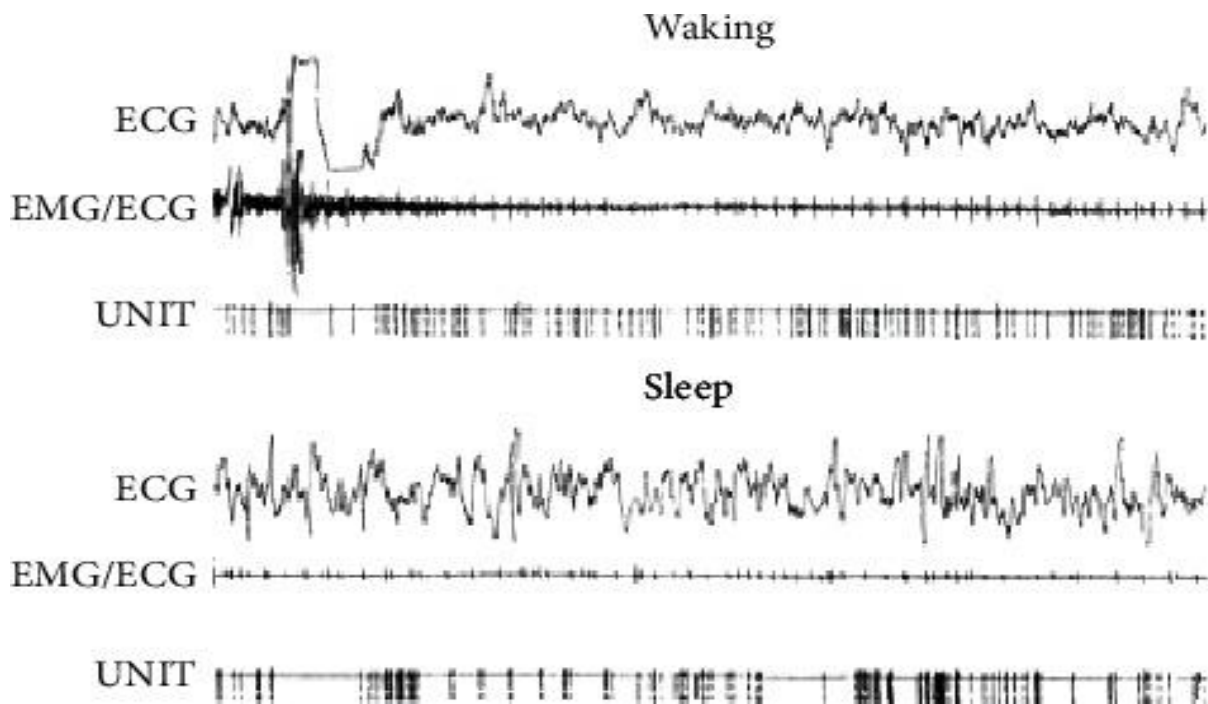
Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, χρησιμοποιείται ο αναλογικός αισθητήρας ECG AD8232 (Εικόνα 6), ο οποίος έχει σχεδιαστεί για την παρακολούθηση της καρδιακής δραστηριότητας.

Η σύνδεση του αισθητήρα με το ESP32 πραγματοποιείται μέσω πέντε ακίδων: Τροφοδοσία: Δύο ακίδες παρέχουν ρεύμα στον αισθητήρα (τάση εισόδου 3,3 V), ακροδέκτης δεδομένων: Συνδέεται με τον αναλογικό ακροδέκτη του ESP32, ακροδέκτες LO+ και LO-: Αναλύουν τη σύνδεση των ηλεκτροδίων με το σώμα, διασφαλίζοντας την ακρίβεια των μετρήσεων.

Η Εικόνα 7 παρουσιάζει τις καταγραφές του ΗΚΓ κατά τη διάρκεια του ύπνου. Ο αισθητήρας ECG AD8232 συνδέεται στο σώμα μέσω ηλεκτροδίων και λαμβάνει αναλογικά σήματα τα οποία μεταδίδει στον μικροελεγκτή ESP32, ο οποίος τα μετατρέπει σε ψηφιακή μορφή για ανάλυση.

Παρότι τα δεδομένα του ΗΚΓ που καταγράφονται με αυτόν τον τρόπο μπορεί να περιέχουν θόρυβο, η εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών φιλτραρίσματος μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Το συγκεκριμένο σύστημα παρέχει τη δυνατότητα

παρακολούθησης της καρδιακής δραστηριότητας κατά τον ύπνο, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την ανίχνευση και διαχείριση καταστάσεων όπως η άπνοια ύπνου και άλλες καρδιοπάθειες.



Εικόνα 7 Καμπύλες ECG

Πηγή: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6579141/>

3.3.3 Μονάδα οξυμετρίας δακτύλου SpO₂ και καρδιακού παλμού MAX30100

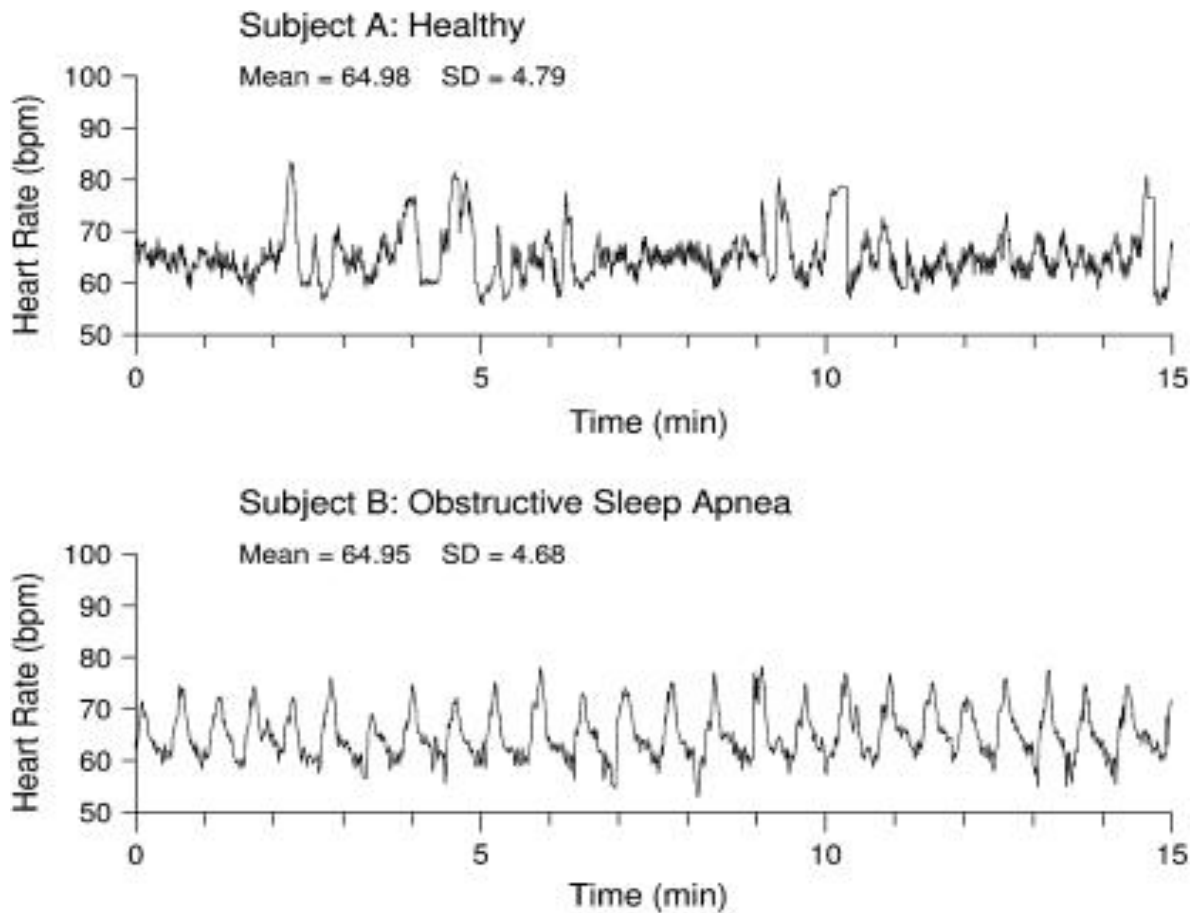
Ο αισθητήρας παρακολουθεί τον καρδιακό ρυθμό του ατόμου σε όλη τη διάρκεια του ύπνου, καταγράφοντας συνεχείς μετρήσεις για την ανίχνευση ανωμαλιών. Ένας υψηλός καρδιακός ρυθμός θεωρείται παράγοντας κινδύνου για υπνική άπνοια, ενώ η ασυνήθιστη μείωση ή αύξηση των παλμών μπορεί να υποδηλώνει διαταραχές ύπνου ή αναπνευστικές δυσκολίες.

Ο φυσιολογικός καρδιακός ρυθμός για έναν υγιή ενήλικα κυμαίνεται από 60 έως 100 bpm (παλμούς ανά λεπτό). Ωστόσο, κατά τη διάρκεια του ύπνου, ο καρδιακός ρυθμός μειώνεται και τυπικά κυμαίνεται από 50 έως 80 bpm. Η μείωση των παλμών οφείλεται στην ηρεμία του σώματος και στη χαμηλότερη φυσική δραστηριότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Οι ασυνήθιστες αλλαγές στον καρδιακό ρυθμό μπορεί να αποτελούν ένδειξη υπνικής άπνοιας. Χαμηλός καρδιακός ρυθμός μπορεί να συμβεί λόγω έλλειψης οξυγόνου στο σώμα, όταν η αναπνοή διακόπτεται προσωρινά κατά τη διάρκεια του ύπνου ενώ υψηλός καρδιακός ρυθμός μπορεί να οφείλεται σε υπέρταση ή στρες, προκαλώντας διαταραχές στην ποιότητα του ύπνου. Αυτές οι καρδιακές ανωμαλίες αποτελούν συχνά αιτίες καρδιακής ανεπάρκειας ή άλλων σοβαρών επιπλοκών κατά τον ύπνο.

Ο αισθητήρας είναι αναλογικός και τοποθετείται στο σώμα του ασθενούς. Παρέχει συνεχή αναλογική έξοδο στο μικροελεγκτή ESP32, επιτρέποντας τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Η Εικόνα 8 δείχνει τον μέσο καρδιακό ρυθμό ενός ατόμου κατά τη διάρκεια του ύπνου.

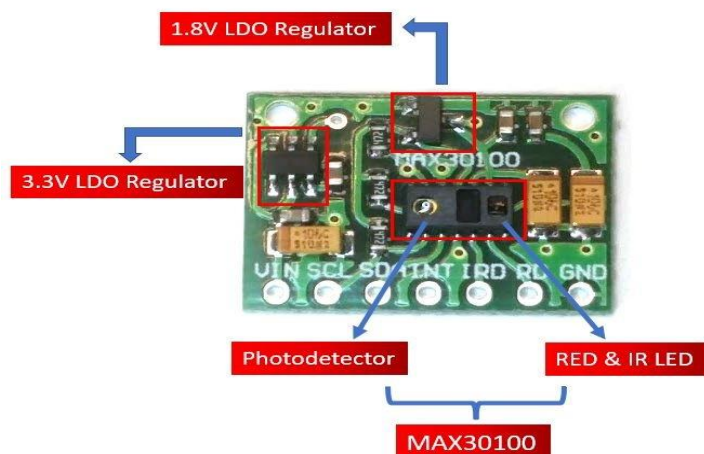


Εικόνα 8 Καρδιακός ρυθμός κατά τον ύπνο

Πηγή: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16921107/>

Το επίπεδο οξυγόνου στο αίμα είναι ένας βασικός δείκτης υγείας. Ένα υγιές άτομο έχει SpO₂ 95% ή μεγαλύτερο. Στους ασθενείς με υπνική άπνοια, το SpO₂ συχνά πέφτει κοντά στο 90% ή χαμηλότερα. Κατά τη διάρκεια της αποφρακτικής άπνοιας ύπνου (OSA), ο ρυθμός αναπνοής μειώνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα τη χαμηλότερη παροχή οξυγόνου στο σώμα. Αυτή η κατάσταση μπορεί να προκαλέσει υποξαιμία (χαμηλό επίπεδο οξυγόνου στο αίμα) και χρόνια πνευμονοπάθεια.

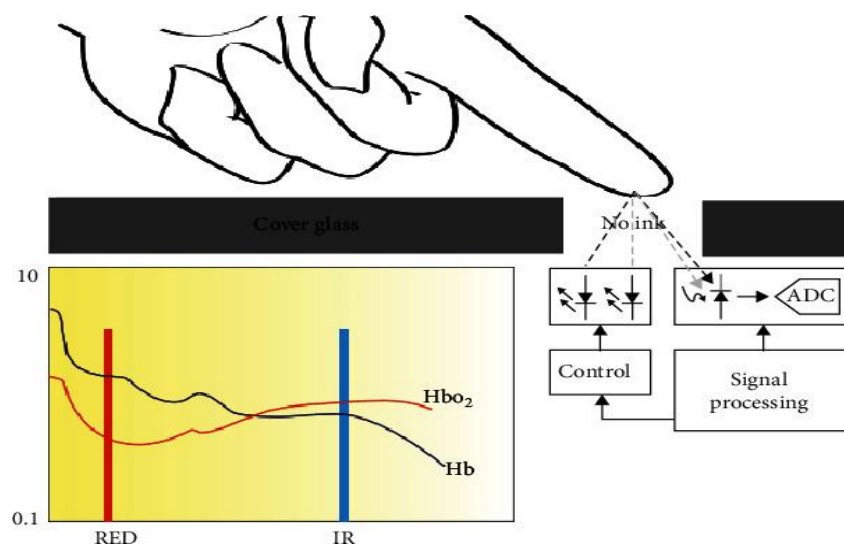
Το σύστημα χρησιμοποιεί τον αισθητήρα MAX30100, που φαίνεται στην Εικόνα 9, για την παρακολούθηση των επιπέδων SpO₂. Ο MAX30100 συνδέεται με το ESP32 μέσω των ακροδεκτών: VCC: Τροφοδοσία (3,3V - 5V) , GND: Γείωση, SCL και SDA: ακροδέκτες δεδομένων για τη μετάδοση των αναλογικών τιμών στο ESP32.



Εικόνα 9 Max30100 Αισθητήρας Οξυμετρίας SpO2

Πηγή: https://microcontrollerslab.com/max30100-pulse-oximeter-heart-rate-sensor-esp32/#google_vignette

Ο MAX30100 είναι ένας συνδυασμένος αισθητήρας παλμικής οξυμετρίας και καρδιακού ρυθμού. Περιλαμβάνει: Δύο LED (υπέρυθρο και κόκκινο φως), φωτοανιχνευτή για την ανίχνευση του φωτός που αντανακλάται από τον ιστό και σύστημα χαμηλού θορύβου για την επεξεργασία των δεδομένων. Η μέτρηση της τιμής SpO2 γίνεται με την ανάλυση της αιμοσφαιρίνης που μεταφέρει ή δεν μεταφέρει οξυγόνο. Ο αισθητήρας εκπέμπει φως μέσω του δακτύλου του ατόμου, ο φωτοανιχνευτής μετρά την αντανάκλαση του φωτός και υπολογίζει την αναλογία της οξυγονωμένης αιμοσφαιρίνης, η τιμή SpO2 μετατρέπεται σε αναλογικό σήμα και αποστέλλεται στο ESP32 για ψηφιακή επεξεργασία.



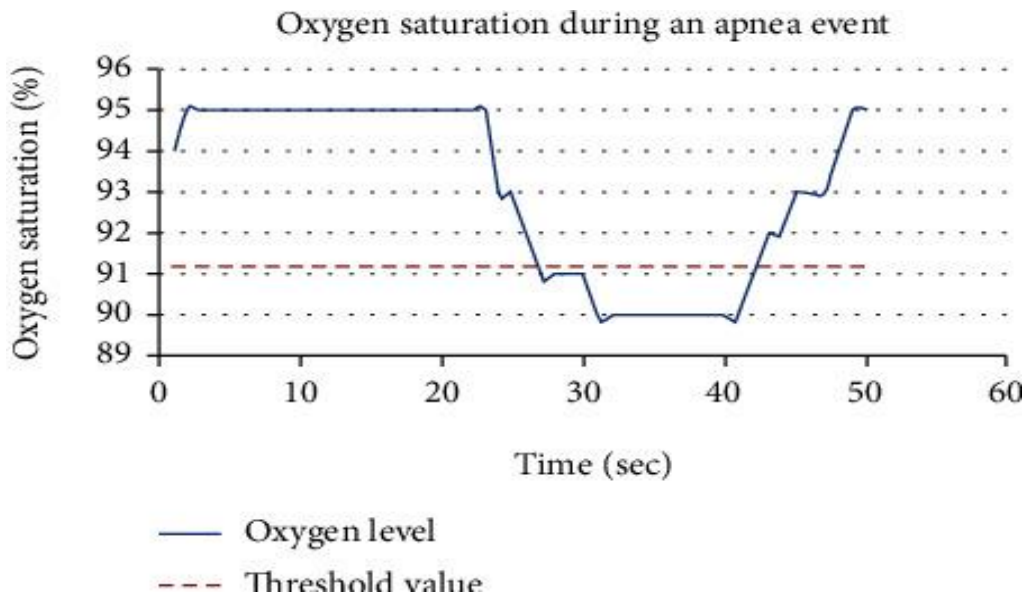
Εικόνα 10 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος του Max30100

Πηγή: <https://www.electronicclinic.com/max30100-pulse-oximeter-arduino-code-circuit-and-programming/>

Η Εικόνα 10 δείχνει το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος με τον αισθητήρα MAX30100.

Ο αισθητήρας MAX30100 είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη μέτρηση της τιμής SpO2 κατά τη διάρκεια του ύπνου. Η παρακολούθηση αυτής της τιμής είναι κρίσιμη για την ανίχνευση επεισοδίων υπνικής άπνοιας και την πρόληψη σοβαρών αναπνευστικών ή καρδιακών προβλημάτων.

Η Εικόνα 11 δείχνει πώς μεταβάλλεται το SpO2 κατά τη διάρκεια επεισοδίων υπνικής άπνοιας.



Εικόνα 11 Επίπεδο SpO2 κατά την υπνική άπνοια

Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/263965784>

3.3.4 Αισθητήρας Γαλβανικής Απόκρισης Δέρματος (GSR)

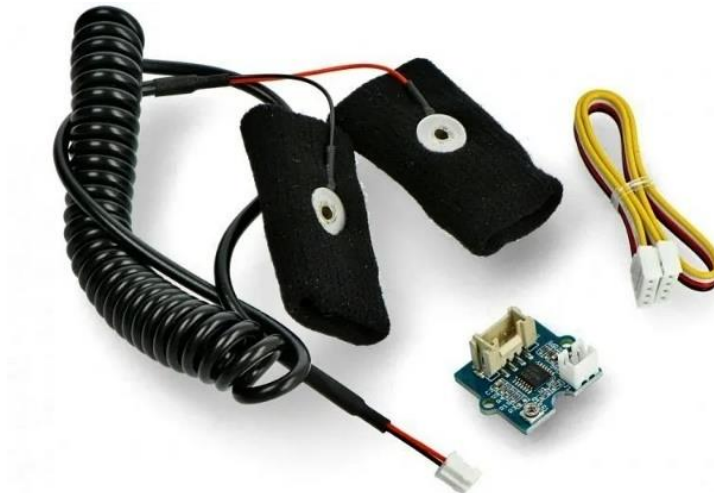
Ο αισθητήρας GalvanicSkinResponse (GSR), γνωστός και ως αισθητήρας συναισθηματικής διέγερσης, αναφέρεται στη μέτρηση της ηλεκτροδερμικής δραστηριότητας, η οποία αντανακλά την κατάσταση των ιδρωτοποιών αδένων και τη συναισθηματική κατάσταση ενός ατόμου. Η δραστηριότητα αυτή σχετίζεται άμεσα με τη λειτουργία του αυτόνομου νευρικού συστήματος.

Ο αισθητήρας GSR (GalvanicSkinResponse) αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη και λειτουργίες:

1. **Φορητή Αναλογική Μονάδα:** Ειδική συσκευή που τοποθετείται στο δάχτυλο του χρήστη και είναι υπεύθυνη για τη μέτρηση της αγωγιμότητας του δέρματος, η οποία σχετίζεται με τη δραστηριότητα των ιδρωτοποιών αδένων.
2. **Διασύνδεση με ESP32:** Μικροελεγκτής που αναλαμβάνει τη μετατροπή των αναλογικών σημάτων του αισθητήρα σε ψηφιακά δεδομένα, επιτρέποντας την επεξεργασία και μετάδοση αυτών.
3. **Μεταφορά Δεδομένων σε Ψηφιακή Πλατφόρμα:** Τα ψηφιακά δεδομένα αποστέλλονται σε μια διαδικτυακή πλατφόρμα ή εφαρμογή, όπως ιστοσελίδα ή βάση δεδομένων, για την παρακολούθηση, ανάλυση και περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων.

Η συγκεκριμένη δομή επιτρέπει την αποτελεσματική συλλογή και αξιοποίηση φυσιολογικών δεδομένων για ερευνητικούς ή εφαρμοσμένους σκοπούς.

Η γαλβανική απόκριση του δέρματος (GSR) αποτελεί φυσιολογικό δείκτη που αντανακλά την ηλεκτρική αγωγιμότητα της επιδερμίδας, επηρεαζόμενη από τη δραστηριότητα των ιδρωτοποιών αδένων και, κατά συνέπεια, από την κατάσταση του αυτόνομου νευρικού συστήματος. Οι διακυμάνσεις της GSR συνδέονται άμεσα με αλλαγές στη συναισθηματική κατάσταση, το επίπεδο στρες ή τη χαλάρωση του ατόμου.



Εικόνα 12 Αισθητήρας Γαλβανικής Απόκρισης Δέρματος (GSR)

Πηγή: <https://www.electroschematics.com/galvanic-skin-response-gsr-sensor-guide/>

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η GSR παρουσιάζει σημαντική διακύμανση, καθώς επηρεάζεται από την ψυχική και φυσική κατάσταση του ατόμου. Έρευνες έχουν δείξει ότι άτομα υπό συνθήκες στρες συχνά εμφανίζουν μειωμένες τιμές GSR σε σύγκριση με άτομα που βρίσκονται σε κατάσταση ευφορίας ή χαράς. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια του ύπνου, παρατηρείται μείωση της γαλβανικής απόκρισης, με τις τιμές να τείνουν να είναι χαμηλότερες όσο παρατείνεται η διάρκεια του ύπνου.

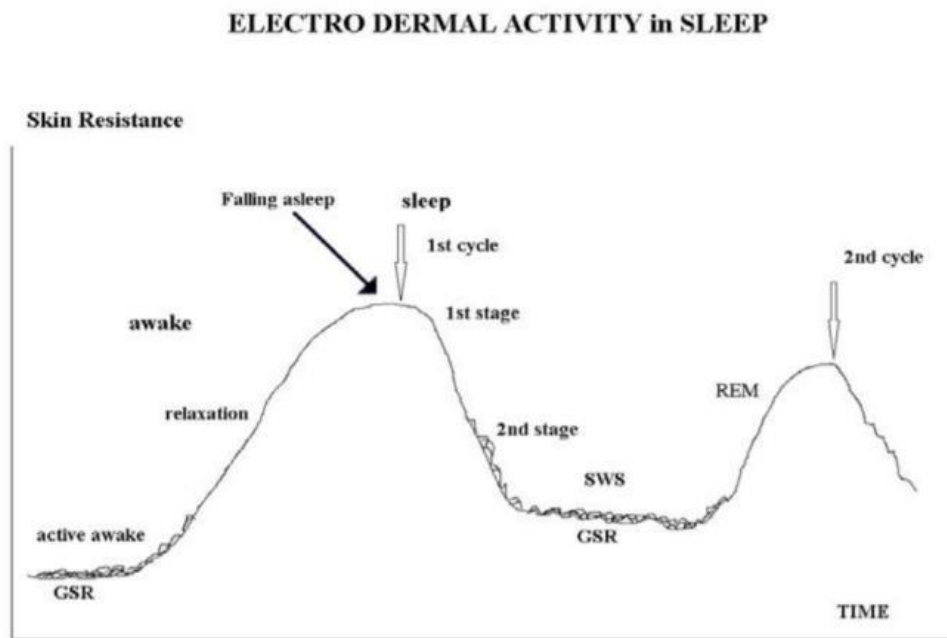
Συνολικά, η GSR αποτελεί αξιόπιστο δείκτη για την παρακολούθηση της ψυχικής και φυσιολογικής κατάστασης ενός ατόμου, προσφέροντας πολύτιμα δεδομένα για την κατανόηση των μηχανισμών του στρες και της χαλάρωσης.

Η τιμή του GSR καθορίζεται από την αγωγιμότητα του δέρματος, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\text{Αγωγιμότητα} = (1/\text{Αντίσταση})$$

Η μέτρηση γίνεται σε μονάδες micro-Siemens (μS). Οι φυσιολογικές τιμές για ένα υγιές άτομο κυμαίνονται από 250 μS έως 450 μS .

Κατά τη διάρκεια του ύπνου, η GSR τείνει να μειώνεται, ωστόσο απότομες ή ασυνήθιστες αλλαγές μπορούν να αποτελέσουν ένδειξη διαταραχών, όπως η υπνική άπνοια. Ξαφνικές πτώσεις στην τιμή της GSR μπορεί να σχετίζονται με μεταβολές στη συναισθηματική κατάσταση, στρες ή υπέρταση.



Εικόνα 13 Δραστηριότητα ED κατά τη διάρκεια του ύπνου

Πηγή: <https://www.researchgate.net/publication/320487158>

Η χρήση του αισθητήρα GSR για την παρακολούθηση της ηλεκτροδερμικής δραστηριότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανίχνευση συναισθηματικών αλλαγών και τη διάγνωση προβλημάτων, όπως η υπνική άπνοια και η υπέρταση.

3.4 Εξαρτήματα και Κόστος

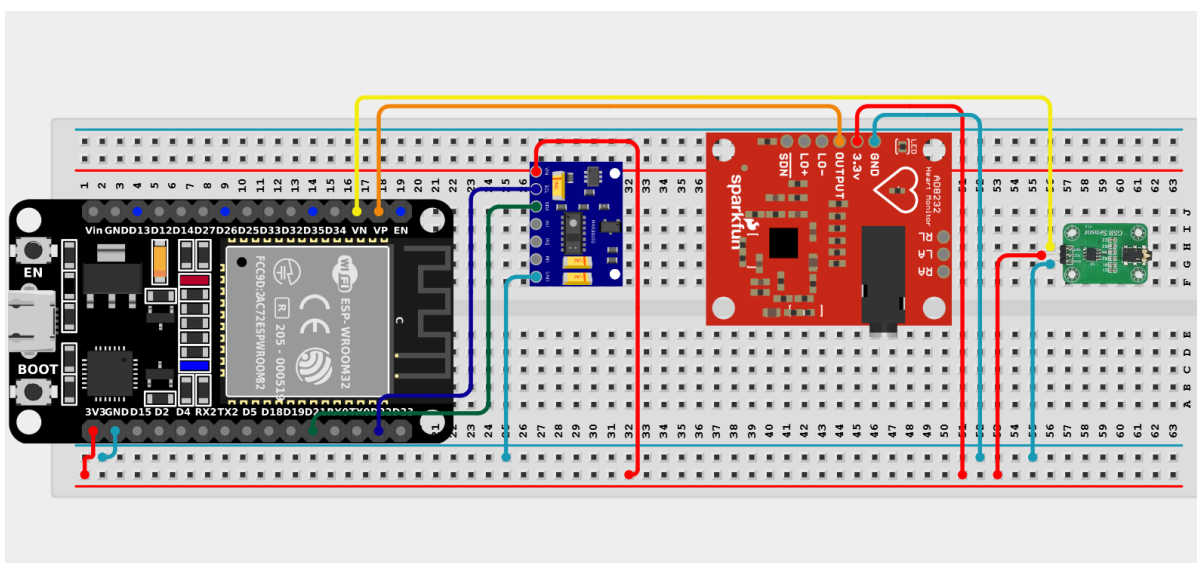
Η συσκευή παρακολούθησης υπνικής άπνοιας είναι κατασκευασμένη με σκοπό να παρέχει οικονομική και αξιόπιστη ανίχνευση των επεισοδίων υπνικής άπνοιας. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα επιμέρους εξαρτήματα που απαιτούνται για τη συναρμολόγηση του συστήματος καθώς και το σχετικό κόστος τους. Το συνολικό κόστος αφορά αποκλειστικά τα υλικά μέρη, με κυριότερο παράγοντα τους αισθητήρες που περιλαμβάνονται στη συσκευή. Παρά το χαμηλό κόστος, η συσκευή αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική για την παρακολούθηση της υπνικής άπνοιας. Έχει σχεδιαστεί ώστε να χρησιμοποιείται από έναν ασθενή κάθε φορά, ενώ είναι δυνατό να επαναχρησιμοποιηθεί πολλαπλές φορές, ανάλογα με τις ανάγκες παρακολούθησης.

Πίνακας 1 Κατάλογος εξαρτημάτων και κόστος

Όνομα εξαρτημάτων	Μονάδες	Κόστος (€)
AD8232 Αισθητήρας ΗΚΓ	1	10,50 €
Μικροελεγκτής ESP32	1	11,00 €
MAX30100	1	15,00 €
Αισθητήρας GSR	1	25,00 €
Καλώδια-βραχυκυκλωτήρες	1 κουτί	3,00 €
Σύνολο	→	73,20 €

3.5 Περιγραφή Διασύνδεσης Αισθητήρων στο ESP32

Η κεντρική μονάδα προγραμματισμού ESP32 συντονίζει και ενοποιεί τα επιμέρους βήματα, εξασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Στην Εικόνα 14 απεικονίζεται το σύνολο της εγκατάστασης υλικού.



Εικόνα 14 Διάγραμμα κυκλώματος του πλήρους συστήματος

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τον Grove-GSR Sensor, MAX30100 και τον ECG (AD8232) αναφέρονται οι λεπτομέρειες σύνδεσης κάθε αισθητήρα:

Ο Grove-GSR Sensor είναι συνδεδεμένος στο Pin 39 του ESP32.

Ο SPO2 Sensor και ο BPM Sensor (MAX30100) συνδέεται στο ESP32 μέσω του πρωτοκόλλου I2C. Συγκεκριμένα, η γραμμή SCL (Clock Line) συνδέεται στο GPIO 22 και η γραμμή SDA (Data Line) στο GPIO 21.

Ο ECG Sensor (AD8232) είναι συνδεδεμένος στο Pin 36 του ESP32, το οποίο υποστηρίζει αναλογική είσοδο (ADC).

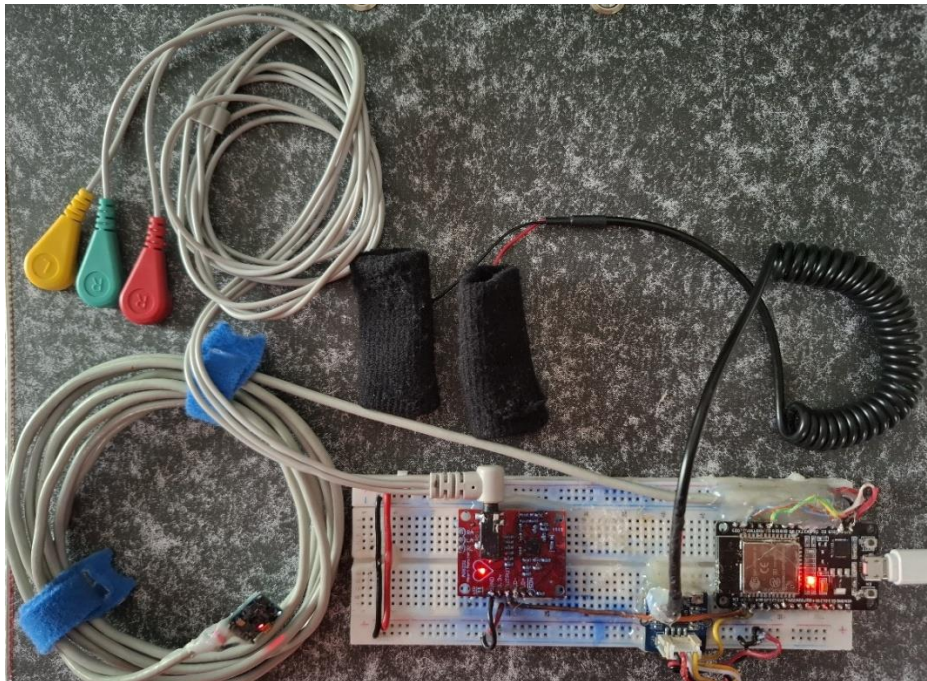
Αφού συνδέσουμε όλους τους αισθητήρες στο ESP32 και ανεβάσουμε τον κωδικό στην πλακέτα το σύστημα λειτουργεί με επιτυχία για την παρακολούθηση της υπνικής άπνοιας.

Το πρωτότυπο σύστημα για την παρακολούθηση της υπνικής άπνοιας, που απεικονίζεται στην Εικόνα 16, βασίζεται σε μια πλακέτα ESP32 και ενσωματώνει πέντε διαφορετικούς αισθητήρες για τη συλλογή βιοσημειολογικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο:

Αισθητήρας GSR (GalvanicSkinResponse): Μετρά τη διακύμανση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του δέρματος, η οποία σχετίζεται με τις αλλαγές στη δραστηριότητα του συμπαθητικού νευρικού συστήματος.

Αισθητήρας MAX30100: Συνδυασμένος αισθητήρας παλμικού οξυμέτρου και αισθητήρα καρδιακού ρυθμού, ο οποίος παρέχει μέτρηση του κορεσμού οξυγόνου στο αίμα (SpO_2) και του καρδιακού ρυθμού (BPM).

Αισθητήρας ΗΚΓ (Ηλεκτροκαρδιογράφημα): Καταγράφει την ηλεκτρική δραστηριότητα της καρδιάς με τη μορφή σήματος ECG, γεγονός που επιτρέπει την εξαγωγή πιο λεπτομερών καρδιακών παραμέτρων.



Εικόνα 15 Πρωτότυπο του συστήματος

Όλοι οι αισθητήρες συνδέονται στο ESP32 μέσω κατάλληλων αναλογικών και ψηφιακών ακροδεκτών, ενώ η επικοινωνία και η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιούνται από τον ενσωματωμένο μικροελεγκτή του ESP32. Με την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού, τα δεδομένα

καταγράφονται και αποστέλλονται σε πραγματικό χρόνο σε περιβάλλον προβολής μέσω Wi-Fi, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση και η αξιολόγηση των παραμέτρων

Η χρήση συνδυαστικών αλγορίθμων, οι οποίοι επεξεργάζονται ταυτόχρονα τις ενδείξεις από τους αισθητήρες GSR, BPM, SpO₂, ECG επιτρέπει την βελτιστοποιημένη ανίχνευση επεισοδίων υπνικής άπνοιας. Ειδικότερα, οι αλλαγές στη δερματική αγωγιμότητα και οι αποκλίσεις του καρδιακού ρυθμού συσχετίζονται με μείωση του κορεσμού οξυγόνου. Μέσα από τον συνδυασμό των παραπάνω σημάτων, το σύστημα εντοπίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια και έγκαιρη ειδοποίηση ενδεχόμενες διαταραχές στην αναπνοή, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη διάγνωση και παρακολούθηση της υπνικής άπνοιας.

3.6 Αλγόριθμοι Ανίχνευσης Επεισοδίων Άπνοιας και Υπόπνοιας

Η ανίχνευση επεισοδίων άπνοιας και υπόπνοιας αποτελεί κρίσιμο στοιχείο του συστήματος παρακολούθησης ύπνου. Η αναγνώριση αυτών των επεισοδίων βασίζεται στην επεξεργασία βιοσημάτων που συλλέγονται από τους αισθητήρες και στην εφαρμογή συγκεκριμένων αλγορίθμων ανάλυσης δεδομένων. Τα βιοσήματα που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση άπνοιας και υπόπνοιας περιλαμβάνουν διακύμανση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του δέρματος (GSR), τον κορεσμό οξυγόνου (SpO₂), που παρέχει πληροφορίες για την οξυγόνωση του αίματος, τον ρυθμό αναπνοής, που υπολογίζεται από μεταβολές στην πίεση ή από σήματα θώρακα και κοιλίας, καθώς και το ηλεκτροκαρδιογράφημα (ECG), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση μεταβολών στον καρδιακό ρυθμό λόγω αναπνευστικών διαταραχών. Η προεπεξεργασία των δεδομένων περιλαμβάνει φιλτράρισμα σημάτων για την απομάκρυνση θορύβου, κανονικοποίηση και τμηματοποίηση δεδομένων, καθώς και ανίχνευση και διόρθωση αρρυθμιών ή χαμένων δεδομένων.

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι ανίχνευσης επεισοδίων άπνοιας και υπόπνοιας περιλαμβάνουν καθοριστικούς αλγορίθμους που βασίζονται σε καθορισμένα όρια και κριτήρια, όπως ροή αέρα κάτω από 10% της κανονικής για περισσότερα από 10 δευτερόλεπτα που υποδηλώνει άπνοια, ή ροή αέρα μεταξύ 10%-30% της κανονικής για περισσότερα από 10 δευτερόλεπτα σε συνδυασμό με πτώση SpO₂ άνω του 3% που υποδηλώνει υπόπνοια. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται μέθοδοι ανάλυσης σημάτων χαμηλής συχνότητας, όπως η μετασχηματισμένη Fourier (FFT) για τον εντοπισμό περιοδικών διακυμάνσεων στην αναπνοή και η κυματιδιακή μετασχηματισμένη (WaveletTransform) για την ανίχνευση παροδικών μεταβολών στα αναπνευστικά σήματα.

Τα σύγχρονα μοντέλα μηχανικής μάθησης παίζουν επίσης καθοριστικό ρόλο, περιλαμβάνοντας αλγορίθμους όπως Support Vector Machines (SVM) για τη διάκριση κανονικών και παθολογικών προτύπων αναπνοής, Random Forests που συνδυάζουν πολλαπλές αποφάσεις για βελτιωμένη ακρίβεια, καθώς και νευρωνικά δίκτυα βαθιάς μάθησης που αναλύουν πολυδιάστατα βιοσήματα για πιο ακριβή ανίχνευση άπνοιας. Η αξιολόγηση των αλγορίθμων πραγματοποιείται με

επίσημες βάσεις δεδομένων, όπως οι PhysioNetApnea-ECG και Sleep-EDF, ενώ η απόδοσή τους μετράται με μετρικές όπως η ευαισθησία, η ειδικότητα, η ακρίβεια και οι καμπύλες ROC. Η συνεχής βελτίωση των αλγορίθμων μέσω δεδομένων πραγματικού χρόνου μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της αξιοπιστίας των συστημάτων παρακολούθησης ύπνου, προσφέροντας έγκαιρη διάγνωση και καλύτερη διαχείριση της υπνικής άπνοιας.

3.6.1 Κριτήρια Ανίχνευσης Άπνοιας και Υπόπνοιας

Η διάγνωση ενός επεισοδίου βασίζεται σε προκαθορισμένα ιατρικά κριτήρια, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες για την υπνική άπνοια:

- Άπνοια: Διακοπή της αναπνοής διάρκειας ≥ 10 δευτερολέπτων, με ταυτόχρονη πτώση του κορεσμού οξυγόνου (SpO_2) κατά τουλάχιστον 3% ή/και μικροαφυπνίσεις.
- Υπόπνοια: Μερική απόφραξη των αεραγωγών με μείωση της ροής αέρα κατά 30% και συνοδευόμενη από πτώση του SpO_2 κατά 3% ή/και μικροαφυπνίσεις.

Τα επεισόδια άπνοιας και υπόπνοιας κατηγοριοποιούνται επιπλέον βάσει της σοβαρότητάς τους, με βάση τον αριθμό επεισοδίων ανά ώρα ύπνου:

- Ήπια: 5-15 επεισόδια ανά ώρα.
- Μέτρια: 15-30 επεισόδια ανά ώρα.
- Σοβαρή: Πάνω από 30 επεισόδια ανά ώρα.

3.6.2 Μέθοδοι Ανίχνευσης

Το σύστημα χρησιμοποιεί τους ακόλουθους δείκτες για την αναγνώριση επεισοδίων άπνοιας και υπόπνοιας:

1. Ανάλυση του σήματος SpO_2 : Μια απότομη πτώση στο επίπεδο οξυγόνου στο αίμα ($\geq 3\%$) μπορεί να αποτελεί ένδειξη άπνοιας.
2. Καταγραφή καρδιακού ρυθμού (BPM): Απότομες αυξομειώσεις του καρδιακού ρυθμού ενδέχεται να υποδηλώνουν διαταραχή της αναπνοής.
3. Μεταβολές στην ηλεκτροδερμική δραστηριότητα (GSR): Η γαλβανική απόκριση του δέρματος μπορεί να αυξηθεί λόγω του στρες που προκαλεί η παύση της αναπνοής.
4. Ανάλυση ΗΚΓ: Η εμφάνιση αρρυθμιών ή μεγάλων διαφορών στα κύματα R μπορεί να συνδέεται με διακοπή της αναπνοής.

3.6.3 Ενσωμάτωση Αλγορίθμων στο Σύστημα

Για την παρακολούθηση διαταραχών ύπνου και την ανίχνευση επεισοδίων άπνοιας, αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε κώδικας σε μικροελεγκτή ESP32. Ο συγκεκριμένος κώδικας

ενσωματώνει τη χρήση πολλαπλών αισθητήρων, όπως ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ECG), γαλβανικής απόκρισης του δέρματος (GSR) και οξυμετρίας (SpO₂) με τον καρδιακό ρυθμό (BPM). Παράλληλα, υποστηρίζει τη δυνατότητα αποστολής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μέσω πρωτοκόλλου WebSocket, επιτρέποντας τη συνεχή και αποδοτική παρακολούθηση. Ο πλήρης κώδικας που υλοποιήθηκε για τον μικροελεγκτή ESP32 παρατίθεται στο Παράρτημα Α, ενώ για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων στην διαδραστική ιστοσελίδα στο Παράρτημα Β.

Το σύστημα παρακολούθησης χρησιμοποιεί αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και επεξεργασίας σήματος για την ανίχνευση επεισοδίων σε πραγματικό χρόνο. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής:

- Συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες (SpO₂, BPM, GSR, ECG,).
- Εφαρμογή φίλτρων χαμηλής διέλευσης για απομάκρυνση θορύβου.
- Ανίχνευση πτώσης SpO₂ και αλλαγών στον καρδιακό ρυθμό.
- Ανάλυση διακυμάνσεων GSR και ροχαλητού.
- Ανίχνευση ανωμαλιών στο ΗΚΓ.
- Προειδοποίηση του χρήστη μέσω της διαδραστικής ιστοσελίδας.

3.6.4 Εξαγωγή Δεικτών Άπνοιας και Υπόπνοιας

Το σύστημα υπολογίζει δείκτες που βοηθούν στην αξιολόγηση της σοβαρότητας της υπνικής άπνοιας:

- Apnea Hypopnea Index (AHI): Ο αριθμός επεισοδίων άπνοιας και υπόπνοιας ανά ώρα ύπνου.
- Oxygen Desaturation Index (ODI): Ο αριθμός επεισοδίων μείωσης του SpO₂ κατά 3% ανά ώρα ύπνου.
- HeartRateVariability (HRV): Διακυμάνσεις στον καρδιακό ρυθμό που σχετίζονται με επεισόδια άπνοιας.

Η ανάλυση αυτών των δεικτών επιτρέπει την αξιολόγηση της ποιότητας του ύπνου και τη διάγνωση πιθανών διαταραχών, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες τόσο για τον χρήστη όσο και για τον θεράποντα ιατρό. Επιπλέον, η διαρκής παρακολούθηση επιτρέπει την ανίχνευση προοδευτικών αλλαγών στην αναπνευστική λειτουργία, συμβάλλοντας στην έγκαιρη διάγνωση και παρέμβαση.

3.7 Προγραμματισμός και το Διαγράμμα Ροής του Συστήματος

Το σύστημα παρακολούθησης άπνοιας ύπνου έχει σχεδιαστεί για να καταγράφει, αναλύει και απεικονίζει δεδομένα φυσιολογικών σημάτων σε πραγματικό χρόνο. Αποτελείται από έναν μικροελεγκτή ESP32, ο οποίος λαμβάνει δεδομένα από διάφορους αισθητήρες και τα μεταδίδει μέσω Wi-Fi σε έναν διακομιστή ή μια διαδραστική ιστοσελίδα. Η υλοποίηση του συστήματος περιλαμβάνει

δύο βασικά επίπεδα προγραμματισμού: τον έλεγχο του ESP32 μέσω C++ στο Arduino IDE και την ανάλυση δεδομένων με Python.

3.7.1 Προγραμματισμός ESP32 με C++ στο Arduino IDE

Ο ESP32 είναι η καρδιά του συστήματος, καθώς αναλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες και τη μετάδοσή τους μέσω Wi-Fi. Η ανάπτυξη του κώδικα γίνεται στο Arduino IDE χρησιμοποιώντας τη γλώσσα C++, λόγω της ευκολίας διαχείρισης των περιφερειακών και της υποστήριξης για τον ESP32.

Το πρόγραμμα στο ESP32 εκτελεί τις εξής λειτουργίες:

1. Σύνδεση στο Wi-Fi για επικοινωνία με τον διακομιστή.
2. Ανάγνωση δεδομένων από αισθητήρες, όπως:
 - MAX30100: Μέτρηση καρδιακού ρυθμού και επιπέδου οξυγόνου στο αίμα (SpO₂).
 - Ηλεκτροκαρδιογράφημα (ECG): Καταγραφή της ηλεκτρικής δραστηριότητας της καρδιάς.
 - Αισθητήρας Δερματικής Αγωγιμότητας (GSR): Ανίχνευση μεταβολών στο δέρμα που σχετίζονται με το στρες ή τη διέγερση του νευρικού συστήματος.
3. Ανάλυση των δεδομένων για την ανίχνευση περιόδων άπνοιας με βάση συγκεκριμένα κατώφλια.
4. Αποστολή των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μέσω WebSockets για εμφάνιση στη διαδικτυακή διεπαφή χρήστη.
5. Αποστολή των μετρήσεων σε βάση δεδομένων για καταγραφή.

Χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες βιβλιοθήκες Arduino:

- WiFi.h: Για σύνδεση του ESP32 στο Wi-Fi.
- WebSocketsServer.h: Για δημιουργία WebSocketsserver και μετάδοση δεδομένων.
- MAX30100_PulseOximeter.h: Για ανάγνωση τιμών SpO₂ και καρδιακού ρυθμού.
- Wire.h: Για επικοινωνία με αισθητήρες μέσω I2C.
- Arduino.h: Για βασικές λειτουργίες του ESP32.
- HTTPClient.h: Για μεταφορά μετρήσεων στη βάση δεδομένων

Ο ESP32 λειτουργεί ως WebSocket Server, επιτρέποντας την αμφίδρομη επικοινωνία με την ιστοσελίδα σε πραγματικό χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι κάθε νέα μέτρηση αισθητήρα αποστέλλεται αμέσως και απεικονίζεται σε γραφήματα.

3.7.2 Ανάλυση Δεδομένων με Python

Για την επεξεργασία και την ερμηνεία των δεδομένων, χρησιμοποιείται η γλώσσα Python, η οποία επιτρέπει την ανάλυση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων και τη δημιουργία γραφημάτων για την αξιολόγηση της ποιότητας του ύπνου.

Οι βασικές λειτουργίες της Python σε αυτό το σύστημα είναι:

1. Ανάγνωση και Επεξεργασία Δεδομένων
 - Τα δεδομένα μπορούν να αποθηκευτούν σε CSV αρχεία ή να ληφθούν απευθείας μέσω WebSockets.
 - Χρησιμοποιούνται βιβλιοθήκες όπως pandas και numpy για την ανάλυση των σημάτων.
2. Υπολογισμός Στατιστικών Μεγεθών
 - Μέση τιμή και διακύμανση των τιμών SpO₂ και καρδιακού ρυθμού.
 - Εντοπισμός ανωμαλιών στην αναπνοή (π.χ. απότομη μείωση SpO₂).
3. Δημιουργία Γραφημάτων και Αναφοράς
 - Χρήση της matplotlib και seaborn για την απεικόνιση δεδομένων σε χρονικές σειρές.
 - Παρουσίαση των δεδομένων σε έναν διακομιστή ή σε τοπική εφαρμογή.

Το Pythonscript μπορεί να εκτελείται είτε τοπικά είτε σε cloud περιβάλλον, επιτρέποντας την προηγμένη ανάλυση και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη λειτουργία του συστήματος.

3.7.3 Διάγραμμα Ροής του Συστήματος

Το διάγραμμα ροής περιγράφει τη λογική λειτουργία του συστήματος παρακολούθησης με βάση τη ροή δεδομένων από τους αισθητήρες προς τη διαδραστική ιστοσελίδα. Η ροή περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Έναρξη συστήματος
2. Σύνδεση Wi-Fi & αρχικοποίηση αισθητήρων
3. Συλλογή δεδομένων από MAX30100 (SpO₂, BPM)
4. Συλλογή δεδομένων από ECG και GSR

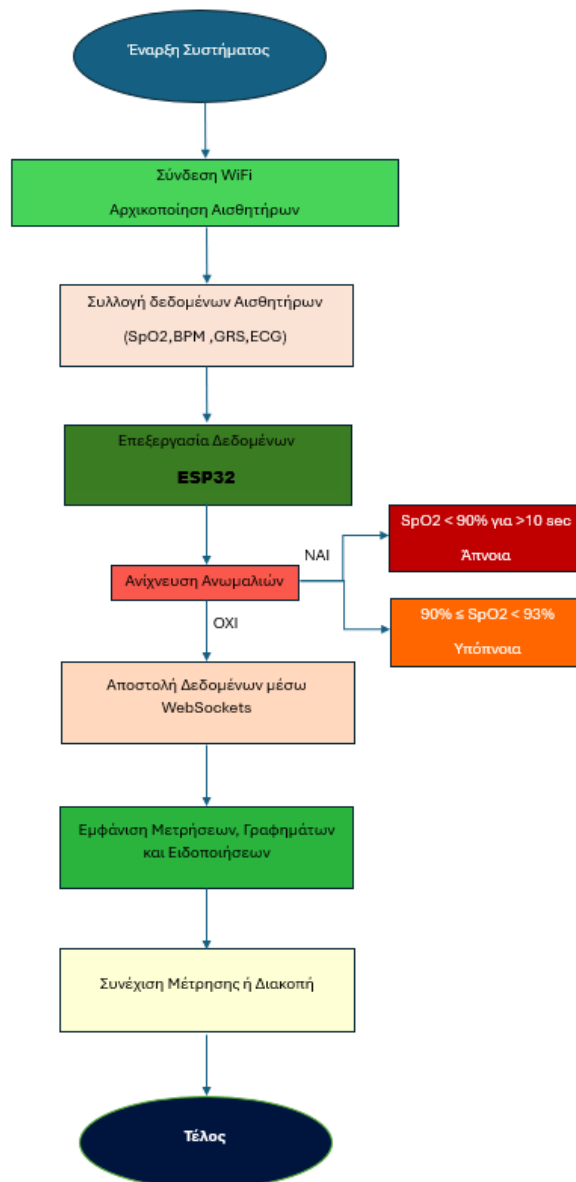
5. Ανίχνευση ανωμαλιών

- Αν το SpO₂ είναι κάτω από 90% για πάνω από 10 δευτερόλεπτα, καταγράφεται άπνοια.
- Αν το SpO₂ είναι μεταξύ 90%-93%, καταγράφεται υποπνοία.

6. Αποστολή δεδομένων μέσω WebSockets

7. Εμφάνιση γραφημάτων και ειδοποιήσεων στην ιστοσελίδα

8. Συνέχιση μέτρησης ή διακοπή λειτουργίας



Εικόνα 16 Διάγραμμα ροής

αλγόριθμοι αυτοί εντοπίζουν χαρακτηριστικές μεταβολές που σχετίζονται με επεισόδια άπνοιας ή υποπνοίας, καθώς και τυχόν δυσλειτουργίες του αναπνευστικού συστήματος. Παράλληλα, υπολογίζονται σχετικοί δείκτες ύπνου (π.χ. Apnea-HypopneaIndex, HeartRateVariability) που συνδράμουν στην ποσοτική αξιολόγηση της ποιότητας του ύπνου.

Όσον αφορά τη διάδραση με τον χρήστη, η ιστοσελίδα προσφέρει:

Προσαρμοσμένα Διαγράμματα: Κάθε βιολογικό σήμα προβάλλεται σε δυναμικά γραφήματα, επιτρέποντας στον χρήστη να διακρίνει με ευκολία παθολογικές ή ασυνήθιστες αποκλίσεις.

Ειδοποιήσεις/Προειδοποιήσεις: Σε περίπτωση που οι αλγόριθμοι εντοπίσουν επεισόδια άπνοιας, υποπνοίας,

Η καταγραφή και η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων δύνανται να αξιοποιηθούν για κλινικούς και ερευνητικούς σκοπούς, επιτρέποντας την ακριβή εκτίμηση της σοβαρότητας των διαταραχών ύπνου, καθώς και την παρακολούθηση της επίδρασης πιθανών θεραπειών ή παρεμβάσεων (π.χ. συσκευές CPAP, αλλαγή του τρόπου ζωής). Με αυτόν τον τρόπο, η διαδραστική ιστοσελίδα ενισχύει τόσο την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων αναπνοής κατά τη διάρκεια του ύπνου όσο και τη διαχρονική βελτίωση της υγείας και της ποιότητας ζωής των χρηστών.



Εικόνα 18 Εφαρμογή του συστήματος στον ασθενή

Η εφαρμογή του συστήματος παρακολούθησης άπνοιας ύπνου απαιτεί την ορθή τοποθέτηση των βιοϊατρικών αισθητήρων στο σώμα του ασθενούς, ώστε να διασφαλιστεί η ακριβής και αξιόπιστη συλλογή δεδομένων. Το σύστημα αποτελείται από έναν συνδυασμό αισθητήρων φυσιολογικών σημάτων, οι οποίοι καταγράφουν κρίσιμες παραμέτρους, όπως η οξυγόνωση του αίματος (SpO_2), ο καρδιακός ρυθμός (BPM), η ηλεκτρική δραστηριότητα της καρδιάς (ECG), η δερματική αγωγιμότητα

(GSR). Όλα τα δεδομένα μεταδίδονται ασύρματα μέσω του μικροελεγκτή ESP32 σε έναν κεντρικό διακομιστή για επεξεργασία, ανάλυση και προβολή σε πραγματικό χρόνο.

Η ορθή τοποθέτηση κάθε αισθητήρα είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της ποιότητας των μετρήσεων και τη μείωση εξωτερικών παρεμβολών ή θορύβου. Ο αισθητήρας MAX30100, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την καταγραφή της οξυγόνωσης του αίματος και του καρδιακού ρυθμού, τοποθετείται στον δείκτη του χεριού ή στον λοβό του αυτιού. Η χρήση ειδικού clip ή ελαστικής ταινίας εξασφαλίζει σταθερότητα, αποφεύγοντας την υπερβολική πίεση που θα μπορούσε να επηρεάσει την κυκλοφορία του αίματος και να οδηγήσει σε σφάλματα στις μετρήσεις. Επιπλέον, η περιοχή εφαρμογής πρέπει να είναι καθαρή και στεγνή, ώστε να διασφαλιστεί η σωστή διάχυση του φωτός από τον αισθητήρα και η βέλτιστη ανάγνωση των παλμικών σημάτων.

Για την καταγραφή της ηλεκτρικής δραστηριότητας της καρδιάς, χρησιμοποιείται ο αισθητήρας AD8232 ECG, ο οποίος απαιτεί την τοποθέτηση τριών ηλεκτροδίων στο σώμα του ασθενούς. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στρατηγικά: το δεξί ηλεκτρόδιο (RA - RightArm) τοποθετείται στην περιοχή του δεξιού στήθους κοντά στον ώμο, το αριστερό ηλεκτρόδιο (LA - LeftArm) στην αντίστοιχη θέση στο αριστερό στήθος, ενώ το αναφοράς (RL - ReferenceLead) τοποθετείται χαμηλότερα στην κοιλιακή χώρα. Η προσεκτική προετοιμασία του δέρματος, με χρήση αλκοολούχων μαντηλιών για απομάκρυνση λιπαρότητας και νεκρών κυττάρων, βελτιώνει την αγωγιμότητα και εξασφαλίζει σταθερή καταγραφή του καρδιακού ρυθμού. Οι μετρήσεις ECG είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την ανίχνευση ακανόνιστων καρδιακών ρυθμών, ταχυκαρδιών και επεισοδίων βραδυκαρδίας κατά τη διάρκεια του ύπνου.

Η μέτρηση της αγωγιμότητας του δέρματος (GSR - GalvanicSkinResponse) πραγματοποιείται μέσω ενός αισθητήρα που τοποθετείται είτε στα δάχτυλα του χεριού (συνήθως στον δείκτη και τον μέσο δάκτυλο) είτε στον καρπό. Η τοποθέτηση εξαρτάται από την άνεση του ασθενούς και την ανάγκη διατήρησης καλής ηλεκτρικής επαφής με το δέρμα. Η δερματική αγωγιμότητα είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη δραστηριότητα του αυτόνομου νευρικού συστήματος και μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το επίπεδο διέγερσης ή στρες του ατόμου κατά τη διάρκεια του ύπνου. Για τη βέλτιστη απόδοση του αισθητήρα, είναι απαραίτητο το δέρμα να είναι στεγνό και να αποφεύγεται η υπερβολική πίεση κατά την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων.

Το ESP32, που αποτελεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του συστήματος, τοποθετείται σε περιβραχιόνιο ή σε ένα σημείο κοντά στο κρεβάτι του ασθενούς, όπως το κομοδίνο. Είναι υπεύθυνο για τη συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες και την αποστολή τους, μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας Wi-Fi ή MQTT, στον διακομιστή όπου γίνεται η επεξεργασία των πληροφοριών. Η χρήση επαναφορτιζόμενης μπαταρίας LiPo 3.7V καθιστά το σύστημα φορητό και αποτρέπει την ανάγκη για συνεχή σύνδεση με καλώδια τροφοδοσίας, επιτρέποντας μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων στον ασθενή. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται συνεχής λειτουργία για μεγάλο χρονικό διάστημα, η τροφοδοσία μπορεί να γίνει μέσω USB από εξωτερικό powerbank.

Η σωστή εφαρμογή των αισθητήρων εξασφαλίζει τη βέλτιστη καταγραφή των φυσιολογικών σημάτων και επιτρέπει την ακριβή ανάλυση των επεισοδίων άπνοιας και των διαταραχών ύπνου. Η διάταξη των αισθητήρων στο σώμα του ασθενούς είναι προσεκτικά σχεδιασμένη ώστε να μην παρεμβαίνει στην άνεση του ύπνου και να διατηρεί τη φυσική κινητικότητα του ασθενούς. Η χρήση εύκαμπτων, ελαφριών και μη επεμβατικών υλικών διασφαλίζει ότι το σύστημα δεν προκαλεί δυσφορία ή ενόχληση κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Για την υλοποίηση της διαδραστικής ιστοσελίδας, επιλέχθηκαν τεχνολογίες που εξασφαλίζουν ταχύτητα, απόκριση σε πραγματικό χρόνο και προσαρμοστικότητα σε διάφορες συσκευές:

- HTML: Χρησιμοποιείται για τη βασική δομή και τη διαχείριση των περιεχομένων της ιστοσελίδας.
- CSS: Εφαρμόζεται για τη διαμόρφωση του περιβάλλοντος χρήστη, ενσωματώνοντας *responsivedesign* ώστε η ιστοσελίδα να προσαρμόζεται δυναμικά στο μέγεθος της οθόνης.
- JavaScript: Υλοποιεί τη δυναμική αλληλεπίδραση με τα δεδομένα και την ενημέρωση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.
- Chart.js: Χρησιμοποιείται για την απεικόνιση γραφημάτων που εμφανίζουν τις φυσιολογικές τιμές των αισθητήρων, επιτρέποντας την οπτική ανάλυση των μεταβολών.
- WebSockets: Εξασφαλίζουν την αδιάλειπτη επικοινωνία μεταξύ της ιστοσελίδας και του μικροελεγκτή (ESP32), αποστέλλοντας τα δεδομένα χωρίς καθυστερήσεις.

Το ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης προσφέρει μία σύγχρονη, μη επεμβατική και αξιόπιστη λύση για τη συνεχή καταγραφή κρίσιμων βιολογικών σημάτων, επιτρέποντας την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών επεισοδίων άπνοιας και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ατόμων με διαταραχές ύπνου. Με την ενσωμάτωση προηγμένων αλγορίθμων ανάλυσης δεδομένων και απομακρυσμένης πρόσβασης μέσω διαδικτυακής εφαρμογής, παρέχεται μια ολοκληρωμένη λύση για την κλινική παρακολούθηση και την αυτοδιαχείριση των διαταραχών αναπνοής κατά τη διάρκεια του ύπνου.

Η διαδραστική ιστοσελίδα αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση της ποιότητας του ύπνου σε πραγματικό χρόνο. Χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως HTML, CSS, JavaScript και WebSockets, καταφέρνει να απεικονίζει δυναμικά τα φυσιολογικά δεδομένα, να παρέχει άμεσες ειδοποιήσεις και να επιτρέπει τη συνεχή ανάλυση της αναπνευστικής λειτουργίας.

Η ενσωμάτωση του δείκτη άπνοιας και των ειδοποιήσεων κινδύνου συμβάλλει στη γρήγορη διάγνωση και κατανόηση των διαταραχών ύπνου, καθιστώντας το σύστημα μια αξιόπιστη λύση για ασθενείς και επαγγελματίες υγείας.

3.9 Αποτελέσματα και Ανάλυση Μετρήσεων

Η ενότητα αυτή επικεντρώνεται στα αποτελέσματα της έρευνας και στην ερμηνεία τους. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι έχουν εντοπιστεί μια σειρά από ευρήματα, τα οποία αποδομήθηκαν και αναλύθηκαν. Ο συγγραφέας υπόσχεται πως οι λεπτομέρειες αυτών των αποτελεσμάτων και οι

αντίστοιχες παρατηρήσεις θα παρουσιαστούν στις επόμενες ενότητες, επιτρέποντας μια πιο εις βάθος κατανόηση των πορισμάτων της έρευνας.

Για την ανίχνευση της υπνικής άπνοιας, το σύστημα παρακολούθησε ένα ευρύ φάσμα ατόμων, προερχόμενων από διαφορετικές ηλικιακές ομάδες και με ποικίλες καταστάσεις υγείας. Η μελέτη περιέλαβε τόσο άνδρες όσο και γυναίκες, με τα δεδομένα να καταδεικνύουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των φύλων. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η λίστα των ατόμων που παρακολούθηθηκαν, με την ηλικιακή τους ομάδα και το φύλο τους.

Πίνακας 2 Λίστες ατόμων που εξετάστηκαν

Κατάλογος ατόμων	Ηλικιακή ομάδα	Γένος	Κατάσταση σώματος
Άτομο 1	13-17	Άνδρας	Κανονικός
Άτομο 2	18-35	Άνδρας	Υπέρβαρος με υπερβολικής εφίδρωση
Άτομο 3	18-35	Άνδρας	Αθλητής με καλή φυσική κατάσταση
Άτομο 4	36-50	Γυναίκα	Παχύσαρκη με μείζον καρδιακό πρόβλημα
Άτομο 5	50+	Άνδρας	Πνευμονοπάθεια

Για την ανίχνευση της υπνικής άπνοιας, το σύστημα παρακολούθησε ένα ευρύ φάσμα ατόμων, προερχόμενων από διαφορετικές ηλικιακές ομάδες και με ποικίλες καταστάσεις υγείας. Η μελέτη περιέλαβε τόσο άνδρες όσο και γυναίκες, με τα δεδομένα να καταδεικνύουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των φύλων. Η συσκευή επικεντρώθηκε στην παρακολούθηση ασθενών με διάφορα προβλήματα υγείας, δεδομένου ότι το ιατρικό ιστορικό και οι προηγούμενες αναφορές υγείας αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την εμφάνιση υπνικής άπνοιας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη φυσική κατάσταση των ασθενών πριν από την έναρξη της παρακολούθησης, ώστε να αξιολογηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκδήλωση της διαταραχής. Η συσκευή IoT παρακολουθεί τους ασθενείς σε πραγματικό χρόνο και καταγράφει δεδομένα σε σχέση με όλες τις σχετικές παραμέτρους υγείας. Τα αποτελέσματα που συλλέγονται συμβάλλουν στην ανάλυση της υπνικής άπνοιας, λαμβάνοντας υπόψη το φύλο, την ηλικία και την κατάσταση υγείας των εξεταζόμενων ατόμων.

3.9.1 Ανάλυση καρδιακών παλμών

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων του καρδιακού ρυθμού για πέντε άτομα, καταγράφοντας τις μεταβολές στους καρδιακούς παλμούς κατά τη διάρκεια του ύπνου. Συγκεκριμένα, απεικονίζονται οι αλλαγές του καρδιακού ρυθμού από την αρχή έως το τέλος της περιόδου ύπνου.

Στο πλαίσιο του πειράματος, ο καρδιακός παλμός μετρήθηκε κάθε δευτερόλεπτο καθ' όλη τη διάρκεια του ύπνου. Από τα δεδομένα αυτά, καταγράφηκαν οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές, καθώς και η τιμή που εμφανίστηκε συχνότερα (modalvalue). Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο μέσος καρδιακός ρυθμός ανά ώρα, προκειμένου να αποτυπωθούν οι τάσεις και οι διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του ύπνου.

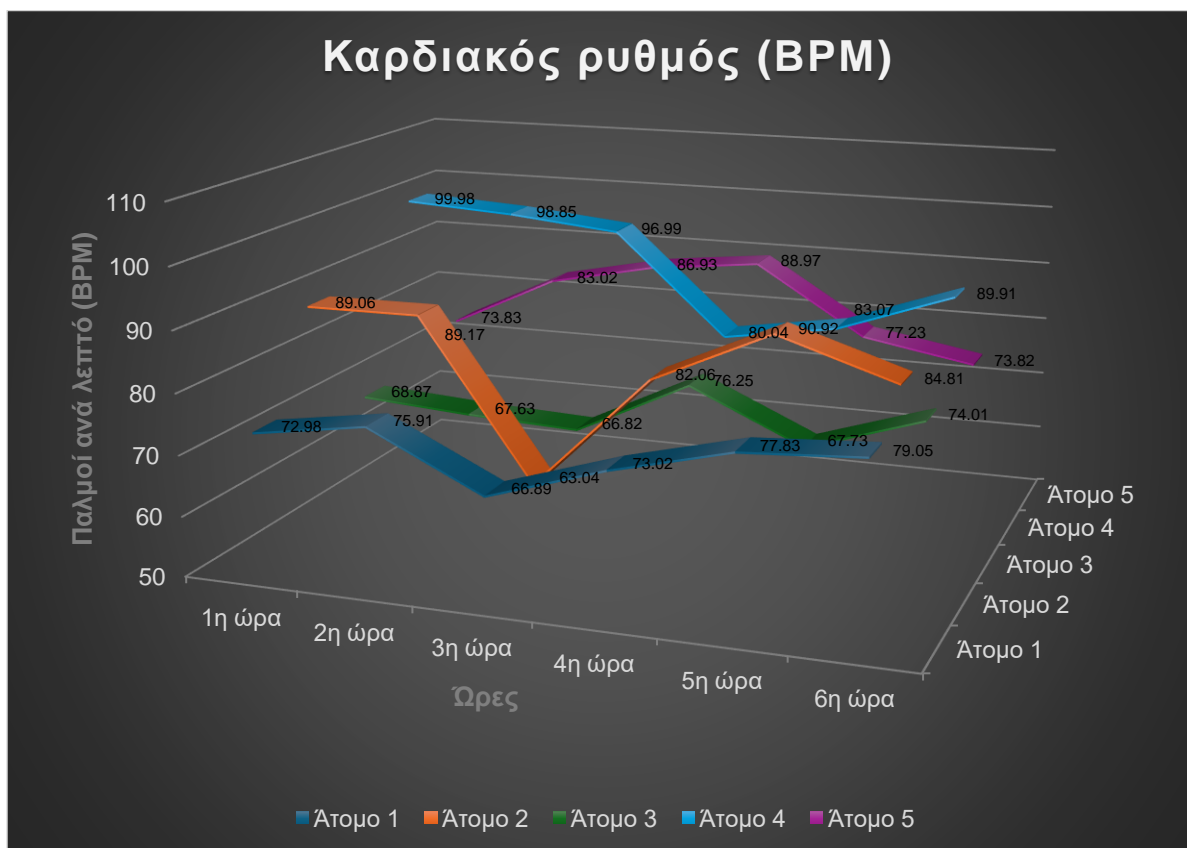
Πίνακας 3 Αποτέλεσμα BPM

Ωρα	Άτομο 1	Άτομο 2	Άτομο 3	Άτομο 4	Άτομο 5
1η ώρα	72,98	89,06	68,87	99,98	73,83
2η ώρα	75,91	89,17	67,63	98,85	83,02
3η ώρα	67,09	63,04	66,82	96,99	86,93
4η ώρα	73,02	82,06	76,25	80,04	88,97
5η ώρα	77,83	90,92	67,73	83,07	77,23
6η ώρα	79,05	84,81	74,01	89,91	73,82
Μέσο BPM	74,28	83,18	70,22	91,47	80,63

Η μέση τιμή του καρδιακού ρυθμού αντικατοπτρίζει τον επικρατέστερο ρυθμό που διατηρούσε το άτομο για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια της κάθε ώρας παρακολούθησης. Στο πείραμα παρατηρήθηκε ότι οι μετρήσεις ακολουθούν ένα συγκεκριμένο μοτίβο, το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με τη σωματική κατάσταση κάθε ατόμου. Για παράδειγμα, το Άτομο 1, που δεν παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα υγείας, εμφάνισε έναν σταθερό και ισορροπημένο καρδιακό ρυθμό καθ' όλη τη διάρκεια του ύπνου, χωρίς να προκύπτουν ενδείξεις υπνικής άπνοιας. Παρόμοια, το Άτομο 3, το οποίο είναι αθλητής με εξαιρετική φυσική κατάσταση, παρουσίασε επίσης έναν σταθερό καρδιακό ρυθμό κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης, με αποτελέσματα που δεν υποδεικνύουν την παρουσία υπνικής άπνοιας. Ο καρδιακός ρυθμός του Ατόμου 1 κυμάνθηκε από 67 έως 79 παλμούς ανά λεπτό (bpm) κατά τη διάρκεια της περιόδου ύπνου, μια τιμή που θεωρείται τυπική για ένα υγιές άτομο. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν τη σταθερότητα του καρδιακού ρυθμού και την απουσία ενδείξεων υπνικής άπνοιας σε αυτό το άτομο. Ωστόσο, τα δεδομένα για άλλα άτομα έδειξαν ορισμένες ενδείξεις που σχετίζονται με την υπνική άπνοια. Το Άτομο 2 παρουσίασε ασταθή μεταβολή στον καρδιακό του ρυθμό, με μέσο όρο περίπου 83bpm. Ειδικότερα, την τρίτη ώρα του ύπνου παρατηρήθηκε σημαντική πτώση του καρδιακού ρυθμού. Μια τέτοια πτώση μπορεί να είναι ένδειξη βραδυκαρδίας, μιας κατάστασης όπου ο καρδιακός ρυθμός είναι ασυνήθιστα χαμηλός. Στην περίπτωση αυτή, η μείωση του καρδιακού ρυθμού υποδηλώνει την πιθανή παρουσία αποφρακτικής άπνοιας ύπνου. Αντίθετα, τα Άτομα 4 και 5 παρουσίασαν υψηλότερο καρδιακό ρυθμό σε σύγκριση με τους υπόλοιπους συμμετέχοντες. Σύμφωνα με το ιατρικό ιστορικό, το Άτομο 4 πάσχει από σοβαρό καρδιολογικό πρόβλημα. Η αυξημένη τιμή

του καρδιακού ρυθμού ενδέχεται να οφείλεται τόσο στο υπάρχον καρδιακό πρόβλημα όσο και στην παχυσαρκία, που αποτελεί γνωστό παράγοντα κινδύνου για την εμφάνιση υπνικής άπνοιας.

Η μέση τιμή των καρδιακών παλμών ανά λεπτό (BPM) των συμμετεχόντων στη δοκιμή παρουσίασε σημαντικές διαφοροποιήσεις, ανάλογα με την ηλικία, τη σωματική κατάσταση και το ιατρικό ιστορικό κάθε ατόμου. Οι παρατηρήσεις από τον Πίνακα 3 δείχνουν ότι υπάρχει σημαντική διακύμανση στον μέσο καρδιακό ρυθμό μεταξύ των διαφορετικών ατόμων. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή του καρδιακού ρυθμού για το Άτομο 1 καταγράφηκε στους 74,28bpm, μια τιμή εντός φυσιολογικών ορίων για ένα υγιές άτομο. Από την άλλη πλευρά, το Άτομο 4 παρουσίασε υψηλότερη μέση τιμή, στους 91,47bpm, γεγονός που μπορεί να σχετίζεται με το σοβαρό καρδιακό πρόβλημα που αναφέρεται στο ιατρικό του ιστορικό.



Εικόνα 19 Γραμμικό διάγραμμα για τον καρδιακό ρυθμό

Για να γίνει πιο σαφής η σύγκριση των διαφορών στον καρδιακό ρυθμό μεταξύ των συμμετεχόντων, το γράφημα στην Εικόνα 19 απεικονίζει τις μεταβολές του καρδιακού ρυθμού σε σχέση με τη φυσική κατάσταση και το ιατρικό υπόβαθρο κάθε ατόμου. Η γραφική αυτή απεικόνιση δείχνει πώς παράγοντες όπως η ηλικία, η σωματική κατάσταση και τα προβλήματα υγείας μπορούν να επηρεάσουν τις διακυμάνσεις του καρδιακού ρυθμού κατά τη διάρκεια του ύπνου.

Το γραμμικό διάγραμμα καρδιακών παλμών που παρουσιάζεται στην Εικόνα 19 απεικονίζει τον μέσο καρδιακό ρυθμό των συμμετεχόντων, καθώς αυτός μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της κάθε ώρας ύπνου. Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι οι περισσότεροι συμμετέχοντες παρουσιάζουν άνισες αλλαγές στον καρδιακό τους ρυθμό, γεγονός που υποδηλώνει τη φυσική απόκριση του οργανισμού κατά τη διάρκεια του ύπνου.

Οι διαφορές στις καμπύλες του γραφήματος μεταξύ διαφορετικών ατόμων δείχνουν πώς παράγοντες όπως η ηλικία, η φυσική κατάσταση και τα προηγούμενα προβλήματα υγείας επηρεάζουν τον καρδιακό ρυθμό. Οι γραμμές στο διάγραμμα αποκαλύπτουν ότι οι μεταβολές είναι πιο σταθερές σε άτομα με καλή φυσική κατάσταση, ενώ εμφανίζονται πιο ασταθείς σε άτομα με προϋπάρχοντα προβλήματα υγείας ή άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την καρδιακή λειτουργία.

3.9.2 Ανάλυση SpO₂

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τις τιμές του κορεσμού οξυγόνου (SpO₂) για τα πέντε άτομα που συμμετείχαν στο πείραμα. Ο πίνακας δείχνει πώς μεταβάλλεται το επίπεδο κορεσμού οξυγόνου κατά τη διάρκεια της περιόδου ύπνου, καταγράφοντας δεδομένα ανά ώρα.

Πίνακας 4 Αποτέλεσμα SpO₂

Ωρα	Άτομο 1	Άτομο 2	Άτομο 3	Άτομο 4	Άτομο 5
1η ώρα	96,02	95,89	97,25	96,14	96,01
2η ώρα	96,43	96,27	97,86	96,37	93,87
3η ώρα	95,82	96,33	98,21	97,02	93,72
4η ώρα	96,05	95,86	97,48	96,83	94,28
5η ώρα	95,92	95,79	97,93	96,99	93,97
6η ώρα	96,23	96,48	98,26	96,12	94,88
Μέσο SpO ₂	96,08	96,10	97,83	96,58	94,46

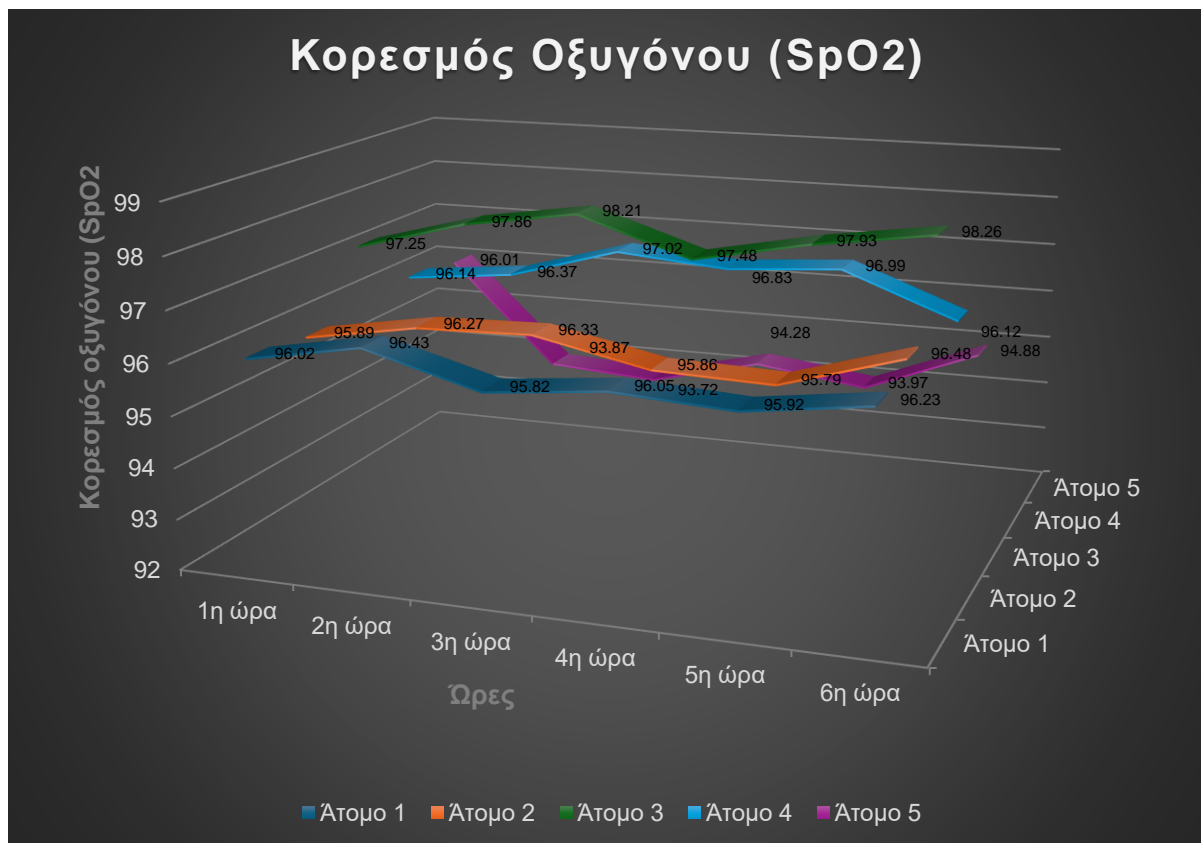
Παρόλο που οι περισσότεροι συμμετέχοντες διατήρησαν ικανοποιητικά επίπεδα κορεσμού οξυγόνου, το Άτομο 5 παρουσίασε σημαντική μείωση κατά την τρίτη και τέταρτη ώρα ύπνου. Η χαμηλή αυτή τιμή SpO₂ αποτελεί ένδειξη αναπνευστικών προβλημάτων. Συγκεκριμένα, η μείωση του κορεσμού οξυγόνου μπορεί να οφείλεται σε χαμηλό ρυθμό αναπνοής, που έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη παροχή οξυγόνου στο σώμα.

Η παρατηρούμενη μείωση των επιπέδων SpO₂ στο Άτομο 5 είναι σύμπτωμα αποφρακτικής άπνοιας ύπνου, μια κατάσταση όπου η απόφραξη των αεραγωγών κατά τη διάρκεια του ύπνου επηρεάζει τη φυσιολογική αναπνοή, οδηγώντας σε μειωμένο κορεσμό οξυγόνου.

Η μέση τιμή του κορεσμού οξυγόνου (SpO₂) για κάθε συμμετέχοντα, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4, αποκαλύπτει ορισμένες παραλλαγές μεταξύ των ατόμων. Παρόλο που η συνολική διακύμανση στις τιμές δεν είναι σημαντική, παρατηρείται ότι το Άτομο 5 παρουσιάζει χαμηλότερο

μέσο όρο SpO₂, ενώ το Άτομο 3 εμφανίζει υψηλότερη μέση τιμή σε σχέση με τους υπόλοιπους συμμετέχοντες. Συγκεκριμένα, το Άτομο 5 έχει μέσο όρο 94,46%, μια τιμή που θεωρείται οριακά χαμηλή και μπορεί να υποδεικνύει αναπνευστικές δυσκολίες κατά τη διάρκεια του ύπνου. Αντίθετα, το Άτομο 3, που βρίσκεται σε άριστη φυσική κατάσταση, καταγράφει μέσο SpO₂ 97,83%, υποδηλώνοντας υγιή πνευμονική λειτουργία.

Το γραμμικό διάγραμμα στην Εικόνα 20 παρέχει μια λεπτομερή απεικόνιση της μεταβολής των επιπέδων SpO₂ με την πάροδο του χρόνου. Οι καμπύλες γραμμές δείχνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια πώς ο κορεσμός οξυγόνου επηρεάζεται κατά τη διάρκεια της περιόδου ύπνου και υπογραμμίζουν τις διαφορές μεταξύ των ατόμων. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι τα χαμηλότερα επίπεδα SpO₂ εμφανίζονται κατά τις πρώτες ώρες του ύπνου, ειδικά σε άτομα με ιστορικό αναπνευστικών προβλημάτων.



Εικόνα 20 Γραμμικό διάγραμμα για κορεσμό οξυγόνου (SpO₂)

Το γραμμικό διάγραμμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 20 απεικονίζει τις μεταβολές στον κορεσμό οξυγόνου (SpO₂) για τα πέντε άτομα κατά τη διάρκεια διαφορετικών ωρών της περιόδου ύπνου. Η γραφική αυτή απεικόνιση παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο που κατανέμεται το οξυγόνο στο σώμα των συμμετεχόντων κατά τη διάρκεια του ύπνου.

Το διάγραμμα δείχνει ότι, ενώ οι περισσότεροι συμμετέχοντες διατηρούν σταθερά επίπεδα SpO₂, παρατηρούνται παροδικές πτώσεις σε ορισμένα άτομα, ειδικά στις πρώτες και μεσαίες ώρες της

περιόδου ύπνου. Αυτές οι αλλαγές υποδεικνύουν τη φυσιολογική μεταβολή στη λειτουργία της αναπνοής κατά τη διάρκεια του ύπνου, αλλά ενδέχεται επίσης να σχετίζονται με την υπνική άπνοια σε άτομα που εμφανίζουν πτώσεις στο SpO_2 .

Η παρακολούθηση του κορεσμού οξυγόνου σε πραγματικό χρόνο παρέχει χρήσιμες ενδείξεις για τη γενική υγεία των πνευμόνων και τη λειτουργία της αναπνοής κατά τη διάρκεια του ύπνου. Σημαντικές αποκλίσεις από τις φυσιολογικές τιμές μπορούν να θεωρηθούν ενδείξεις πιθανών αναπνευστικών προβλημάτων, όπως η αποφρακτική άπνοια ύπνου.

3.9.3 Ανάλυση Galvanic Skin Response (GSR)

Οι τιμές γαλβανικής απόκρισης δέρματος (GSR) για τα πέντε άτομα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5, ο οποίος καταγράφει την ηλεκτροδερμική δραστηριότητα των συμμετεχόντων κατά τη διάρκεια της περιόδου ύπνου. Η GSR τιμή αντικατοπτρίζει τις μεταβολές στην ψυχική κατάσταση ενός ατόμου με την πάροδο του χρόνου, καθώς συνδέεται με παράγοντες όπως το άγχος και η υπέρταση.

Πίνακας 5 Αποτέλεσμα GSR

Ωρα	Άτομο 1	Άτομο 2	Άτομο 3	Άτομο 4	Άτομο 5
1η ώρα	230,83	182,29	347,79	189,27	191,03
2η ώρα	236,09	255,17	269,81	149,86	215,94
3η ώρα	265,01	133,86	264,99	75,68	143,28
4η ώρα	222,18	155,34	216,75	122,64	134,62
5η ώρα	192,93	124,45	254,27	118,29	148,37
6η ώρα	206,87	125,13	299,18	117,57	163,75
Μέσο GSR	225,65	162,71	275,47	128,89	166,17

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το σύστημα παρακολουθούσε τη δερματική απόκριση μέσω ειδικού αισθητήρα GSR, καταγράφοντας τις μεταβολές κάθε δευτερόλεπτο. Οι τιμές δείχνουν ότι η δερματική απόκριση κάθε ατόμου μεταβάλλεται σταδιακά κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Ανάλυση αποτελεσμάτων:

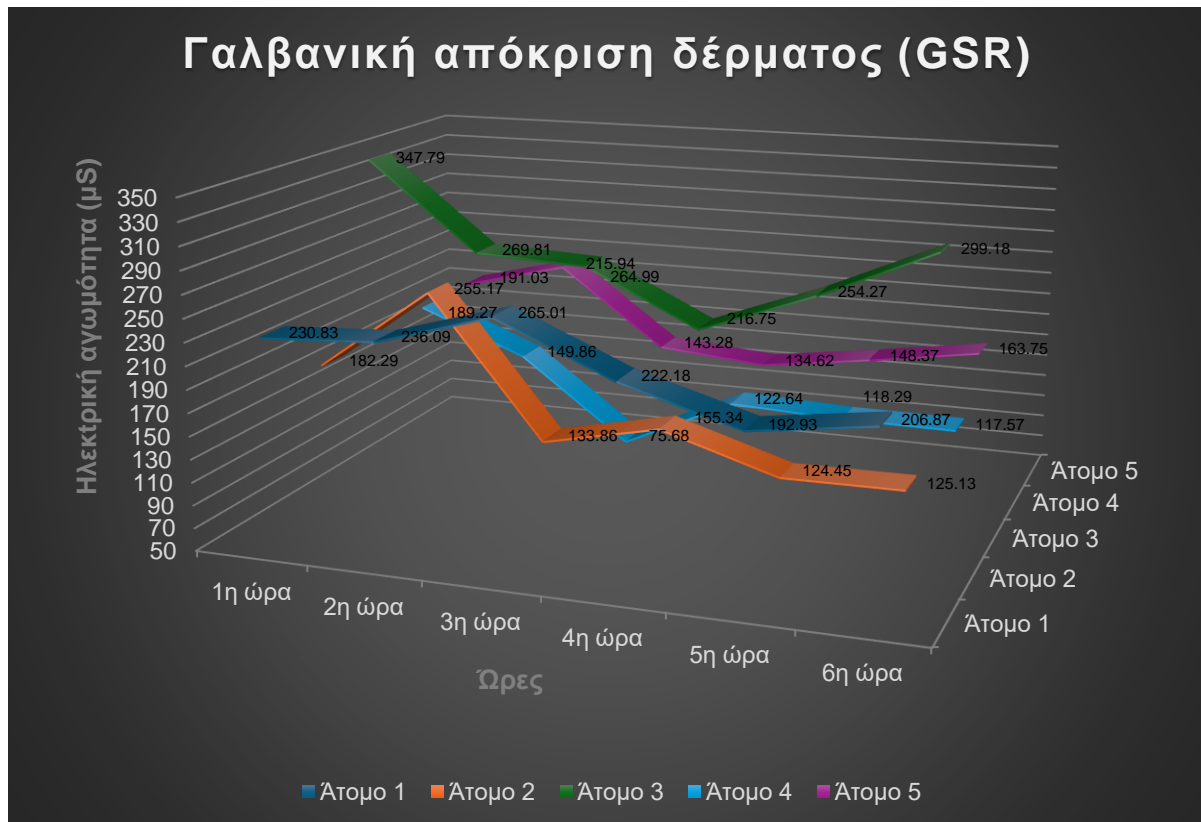
Άτομο 1: Οι τιμές GSR παραμένουν ισορροπημένες καθ' όλη τη διάρκεια του ύπνου, γεγονός που υποδεικνύει σταθερή ψυχική κατάσταση και καμία ένδειξη υπνικής άπνοιας.

Άτομο 2: Παρατηρείται μείωση της GSR τιμής την 3η ώρα και στις τελευταίες δύο ώρες ύπνου. Αυτή η ανομοιόμορφη μεταβολή μπορεί να συνδέεται με πιθανά προβλήματα άγχους ή υπέρτασης κατά τη διάρκεια του ύπνου αλλά μπορεί να υποδηλώνει πιθανή υπνική άπνοια..

Άτομο 3: Παρουσιάζει την υψηλότερη GSR τιμή (275,47), γεγονός που υποδηλώνει έντονη δερματική δραστηριότητα και καλή ψυχική ισορροπία.

Άτομο 4: Έχει τις χαμηλότερες τιμές GSR κατά τις πρώτες δύο ώρες, χωρίς σημαντική μεταβολή. Από την 3η ώρα και μετά, η δερματική δραστηριότητα μειώνεται δραστικά. Η χαμηλότερη μέση τιμή GSR (128,89) καταγράφεται σε αυτό το άτομο, υποδεικνύοντας υπνική άπνοια

Άτομο 5: Παρουσιάζει χαμηλή και σταθερή GSR τιμή καθ' όλη τη διάρκεια του ύπνου. Ωστόσο, οι τιμές δεν αλλάζουν σημαντικά, γεγονός που δεν υποδεικνύει υπνική άπνοια.



Εικόνα 21 Γραμμικό διάγραμμα για γαλβανική απόκριση δέρματος

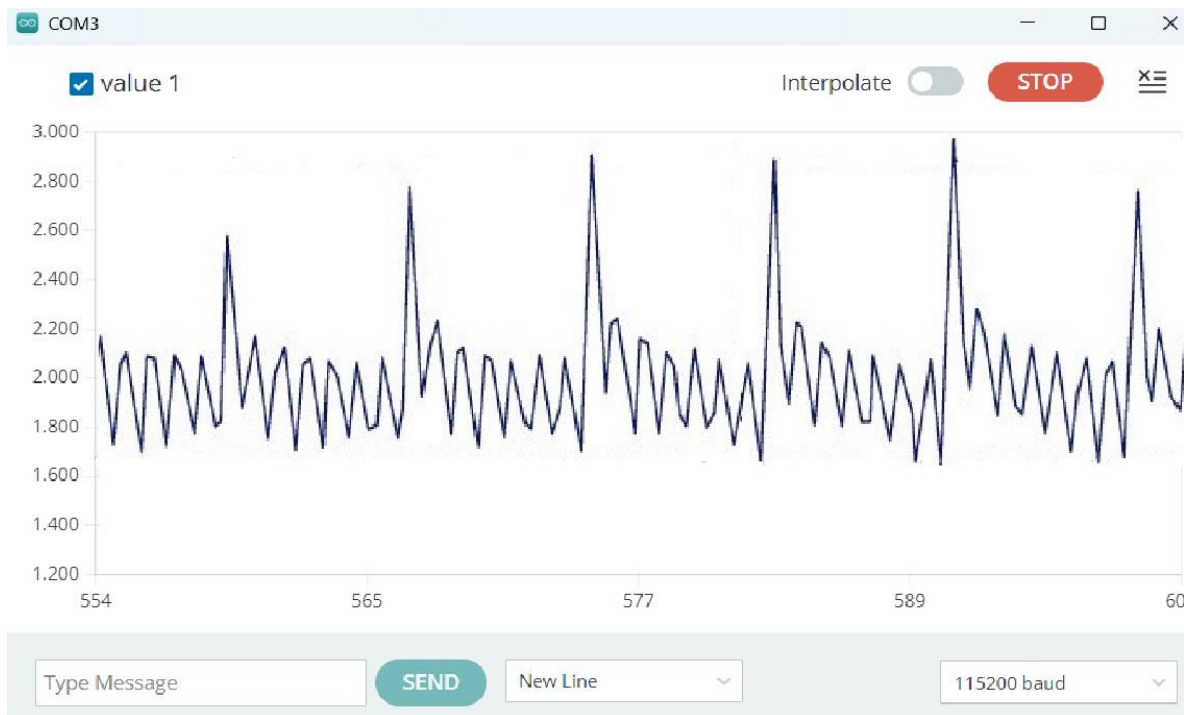
Ο μέσος όρος των GSR τιμών δείχνει ότι οι συμμετέχοντες έχουν σημαντικές διακυμάνσεις στην ηλεκτροδερμική δραστηριότητα. Η χαμηλότερη μέση τιμή (128,89) παρατηρείται για το Άτομο 4, ενώ η υψηλότερη μέση τιμή (275,47) καταγράφεται για το Άτομο 3. Το γραμμικό διάγραμμα στην Εικόνα 21 παρέχει μια ακριβέστερη απεικόνιση της μεταβολής της GSR τιμής για τα πέντε άτομα κατά τη διάρκεια του ύπνου, αποκαλύπτοντας τις διαφορές στην ψυχοσωματική κατάσταση μεταξύ των συμμετεχόντων.

3.9.4 Ανάλυση Ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ECG)

Το ΗΚΓ αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την παρακολούθηση της καρδιακής δραστηριότητας και την έγκαιρη διάγνωση καρδιακών παθήσεων. Τα αποτελέσματα των ΗΚΓ για τα άτομα 1, 2, 3 και 5 καταδεικνύουν φυσιολογικό και ισορροπημένο καρδιακό ρυθμό, χωρίς ενδείξεις παθολογικών

ανωμαλιών. Αντιθέτως, στο ΗΚΓ του ατόμου 4 παρατηρούνται μη φυσιολογικές διακυμάνσεις στον καρδιακό ρυθμό, γεγονός που μπορεί να υποδηλώνει διαταραχές στη λειτουργία της καρδιάς. Η Εικόνα 23 παρουσιάζει το γράφημα του Ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ΗΚΓ) για το άτομο 4.

Στην Εικόνα 22, εντοπίζονται έξι κύματα R, τα οποία αντιστοιχούν στις αιχμές του ΗΚΓ. Τα κύματα R αποτελούν καθοριστικά σημεία του καρδιακού κύκλου και απεικονίζουν τη διάρκεια της ηλεκτρικής δραστηριότητας από το ενδοκάρδιο έως το επικάρδιο.



Εικόνα 22 Γράφημα Ηλεκτροκαρδιογραφήματος του εξεταζόμενου ατόμου 4

Η ανάλυση των κυμάτων R είναι θεμελιώδης για τη διάγνωση καρδιακών νοσημάτων. Συγκεκριμένα:

- **Απώλεια κύματος R:** Η απώλεια του πρώτου κύματος R στην Εικόνα 22 συνιστά ένδειξη πιθανής ισχαιμίας ή εμφράγματος του μυοκαρδίου.
- **Αύξηση κύματος R:** Στην πέμπτη αιχμή R παρατηρείται σημαντική αύξηση, πιθανώς συσχετιζόμενη με μυοκαρδιοπάθεια.

Η ανίχνευση αυτών των ανωμαλιών στο ΗΚΓ έχει ζωτική σημασία για την έγκαιρη πρόληψη σοβαρών καρδιολογικών παθήσεων, όπως το έμφραγμα του μυοκαρδίου και οι μυοκαρδιοπάθειες. Το σύστημα IoT που χρησιμοποιήθηκε στο παρόν πείραμα προσφέρει τη δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης και έγκαιρης διάγνωσης μέσω ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα της πρόληψης και θεραπείας.

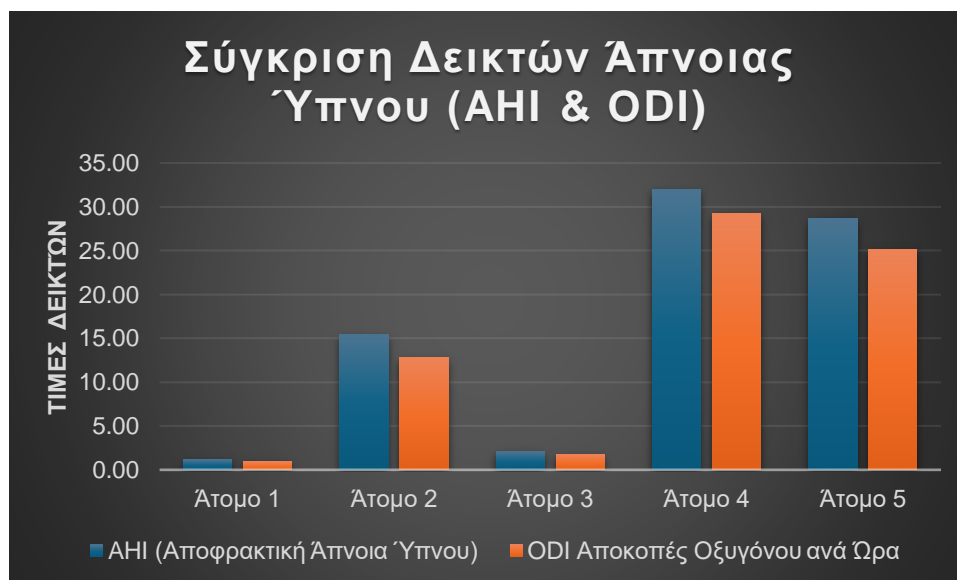
3.9.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Δεικτών Άπνοιας Ύπνου

Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στην ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από πέντε άτομα κατά τη διάρκεια έξι ωρών ύπνου. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν περιλαμβάνουν τέσσερις βασικούς δείκτες υπνικής άπνοιας: τον Δείκτη Απνοιών-Υποπνοιών (AHI), τον Δείκτη Οξυγονικών Αποκοπών (ODI), τη Μεταβλητότητα Καρδιακού Ρυθμού (HRV) και τη βαρύτητα της άπνοιας (Severity). Οι παράμετροι αυτές αξιολογήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη την ηλικία, το φύλο και τη φυσική κατάσταση κάθε ατόμου, καθώς αυτοί οι παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εκδήλωση της διαταραχής.

Πίνακας 6 Δείκτες Άπνοιας Ύπνου

Κατάλογος ατόμων	AHI Αποφρακτική Άπνοια Ύπνου	ODI Αποκοπές Οξυγόνου ανά Ώρα	HRV Μεταβλητότητα Καρδιακού Ρυθμού (ms)	Severity (Βαρύτητα)
Άτομο 1	1.2	1.0	50	Καμία
Άτομο 2	15.4	12.8	30	Μέτρια
Άτομο 3	2.1	1.8	55	Καμία
Άτομο 4	32	29.3	22	Σοβαρή
Άτομο 5	28.7	25.1	25	Σοβαρή

Τα αποτελέσματα έδειξαν σαφείς διαφοροποιήσεις μεταξύ των ατόμων, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σημασία της ατομικής φυσιολογικής κατάστασης και του ιστορικού υγείας στη συχνότητα και τη σοβαρότητα των επεισοδίων υπνικής άπνοιας.



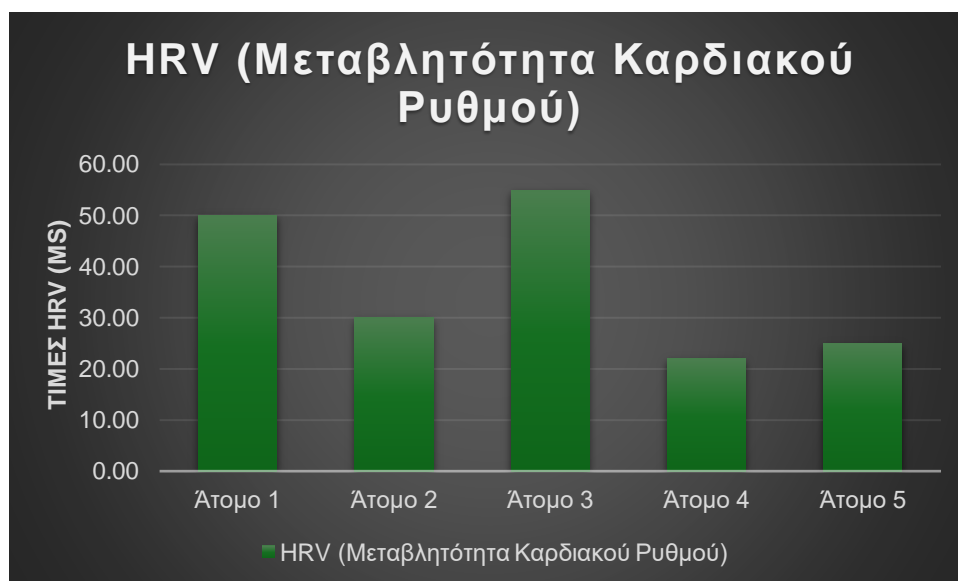
Εικόνα 23 Σύγκριση Δεικτών Άπνοιας Ύπνου (AHI & ODI)

Άτομο 1 (13-17 ετών, Κανονικός σωματότυπος): Το συγκεκριμένο άτομο παρουσίασε χαμηλό AHI (1.2) και ODI (1.0), υποδηλώνοντας ότι δεν υπάρχουν σημαντικά επεισόδια υπνικής άπνοιας. Επιπλέον, ο δείκτης HRV διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα (50 ms), γεγονός που υποδηλώνει καλή

καρδιακή λειτουργία κατά τη διάρκεια του ύπνου. Συνολικά, το άτομο αυτό δεν παρουσίασε κανένα σύμπτωμα υπνικής άπνοιας, καθώς η μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού του υποδηλώνει υγιή απόκριση του αυτόνομου νευρικού συστήματος.

Άτομο 2 (18-35 ετών, Υπέρβαρος με υπερβολική εφίδρωση): Το άτομο αυτό παρουσίασε αυξημένο AHI (15.4) και ODI (12.8), καταδεικνύοντας τη μέτρια παρουσία επεισοδίων αποφρακτικής άπνοιας ύπνου. Η μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού (HRV) βρέθηκε χαμηλή (30 ms), κάτι που μπορεί να σχετίζεται με την ύπαρξη άγχους ή δυσλειτουργία του αυτόνομου νευρικού συστήματος κατά τη διάρκεια του ύπνου. Τα δεδομένα υποδηλώνουν ότι η υπερβολική εφίδρωση και η αυξημένη μάζα σώματος ενδεχομένως επηρεάζουν την αναπνευστική λειτουργία, οδηγώντας σε ήπια έως μέτρια υπνική άπνοια.

Άτομο 3 (18-35 ετών, Αθλητής με καλή φυσική κατάσταση): Τα δεδομένα δείχνουν πως το άτομο αυτό είχε πολύ χαμηλές τιμές AHI (2.1) και ODI (1.8), καθώς και υψηλή HRV (55 ms), καταδεικνύοντας εξαιρετική φυσική κατάσταση και απουσία διαταραχών ύπνου. Το γεγονός ότι η μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού είναι υψηλή δείχνει ισχυρή καρδιακή υγεία και υγιή έλεγχο της αυτόνομης ρύθμισης του σώματος. Συνεπώς, δεν καταγράφηκαν ενδείξεις υπνικής άπνοιας για το συγκεκριμένο άτομο.



Εικόνα 24 Μεταβλητότητα Καρδιακού Ρυθμού

Άτομο 4 (36-50 ετών, Παχύσαρκτη με μείζον καρδιακό πρόβλημα): Παρατηρήθηκε υψηλό AHI (32.5) και ODI (29.3), γεγονός που υποδηλώνει σοβαρή αποφρακτική άπνοια ύπνου. Η HRV ήταν πολύ χαμηλή (22 ms), γεγονός που αντανάκλα δυσλειτουργία στο καρδιαγγειακό σύστημα και αυξημένο κίνδυνο καρδιακών επιπλοκών. Το άτομο 4 εμφάνισε σημαντικές διακυμάνσεις στον κορεσμό οξυγόνου (SpO₂), επιβεβαιώνοντας τη σοβαρότητα της κατάστασης. Η συνύπαρξη παχυσαρκίας και καρδιακού προβλήματος πιθανώς επιδεινώνει τα επεισόδια υπνικής άπνοιας, καθιστώντας αναγκαία την ιατρική παρέμβαση.

Άτομο 5 (50+ ετών, Πνευμονοπάθεια): Το συγκεκριμένο άτομο παρουσίασε επίσης υψηλά επίπεδα AHI (28.7) και ODI (25.1), υποδεικνύοντας σοβαρή υπνική άπνοια. Η HRV ήταν χαμηλή (25 ms), καταδεικνύοντας δυσλειτουργία του αυτόνομου νευρικού συστήματος και πιθανή αδυναμία ρύθμισης του καρδιακού ρυθμού κατά τη διάρκεια των επεισοδίων άπνοιας. Η ύπαρξη αναπνευστικής πάθησης φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη συνολική κατάσταση του ατόμου, οδηγώντας σε συχνές αποκοπές οξυγόνου και σημαντικές επιπτώσεις στον ύπνο του.

Τα δεδομένα επιβεβαιώνουν τη στενή συσχέτιση της φυσικής κατάστασης των συμμετεχόντων με τα επεισόδια υπνικής άπνοιας. Τα άτομα που βρίσκονται σε καλή φυσική κατάσταση (Άτομο 1 και Άτομο 3) παρουσίασαν χαμηλούς δείκτες AHI και ODI, καθώς και υψηλή HRV, γεγονός που αντανακλά ομαλή καρδιακή ρύθμιση κατά τη διάρκεια του ύπνου.

Αντίθετα, τα άτομα με παχυσαρκία, καρδιακά ή αναπνευστικά προβλήματα (Άτομο 4 και Άτομο 5) εμφάνισαν υψηλές τιμές AHI και ODI, επιβεβαιώνοντας τη σοβαρότητα των επεισοδίων υπνικής άπνοιας. Η χαμηλή HRV σε αυτά τα άτομα ενισχύει την υπόθεση ότι οι δυσλειτουργίες του καρδιαγγειακού και αναπνευστικού συστήματος σχετίζονται άμεσα με την άπνοια ύπνου.

Το Άτομο 2, που ήταν υπέρβαρο, είχε μέτριες τιμές AHI και ODI, δείχνοντας ότι η αυξημένη μάζα σώματος επηρεάζει αρνητικά την αναπνευστική λειτουργία, αλλά σε μικρότερο βαθμό από ό,τι στα παχύσαρκα άτομα με συνοδά νοσήματα.

Η σύγκριση των δύο δεικτών δείχνει ότι τα άτομα με υψηλό AHI έχουν συχνά και υψηλό ODI, καθώς οι διακοπές της αναπνοής οδηγούν σε μείωση του οξυγόνου στο αίμα. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, άτομα με ήπιο AHI ενδέχεται να εμφανίζουν υψηλότερο ODI, λόγω ανεπαίσθητων αναπνευστικών διαταραχών που επηρεάζουν τον κορεσμό οξυγόνου.

Η συνδυασμένη ανάλυση των AHI και ODI παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της βαρύτητας της υπνικής άπνοιας, επιτρέποντας καλύτερη διάγνωση και στοχευμένες παρεμβάσεις.

3.10 Συμπέρασμα

Η παρούσα έρευνα εστιάζει στην αξιοποίηση των συσκευών Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) για την παρακολούθηση της άπνοιας ύπνου. Στο πλαίσιο της εφαρμογής του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε ένας βασικός μικροελεγκτής σε συνδυασμό με επιλεγμένους αισθητήρες υγείας υψηλής ακρίβειας. Μετά από πειραματική παρακολούθηση πέντε ατόμων, τα αποτελέσματα του συστήματος αποδεικνύονται ικανοποιητικά για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ανίχνευση της υπνικής άπνοιας.

Συγκεκριμένα, από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, διαπιστώθηκε ότι δύο άτομα δεν παρουσιάζουν συμπτώματα υπνικής άπνοιας. Αντίθετα, ένα άτομο ηλικίας 36-50 ετών εμφάνισε σημαντικές διαταραχές κατά τη διάρκεια του ύπνου, με το σύστημα να εντοπίζει επιτυχώς επεισόδια υπνικής άπνοιας. Επιπλέον, εντοπίστηκε περίπτωση αποφρακτικής άπνοιας ύπνου (Obstructive Sleep Apnea - OSA) σε ένα άτομο άνω των 50 ετών, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του συστήματος. Τα

αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν πως η υπνική άπνοια είναι μια πολυπαραγοντική διαταραχή που επηρεάζεται σημαντικά από τη φυσική κατάσταση, την ύπαρξη παχυσαρκίας και το ιατρικό ιστορικό. Τα άτομα με καλή φυσική κατάσταση παρουσίασαν φυσιολογικά επίπεδα αναπνοής και καρδιακής δραστηριότητας, ενώ τα άτομα με υποκείμενα προβλήματα υγείας εμφάνισαν σοβαρά επεισόδια άπνοιας.

Η μελέτη υπογραμμίζει τη σημασία της πρόωξης ανίχνευσης και της έγκαιρης παρέμβασης, ειδικά σε άτομα υψηλού κινδύνου. Η εφαρμογή αυτής της προσέγγισης μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στη διαχείριση των διαταραχών ύπνου, οι οποίες σημειώνουν αυξητική τάση στις σύγχρονες κοινωνίες. Τα αυξημένα ποσοστά υπέρτασης, άγχους και καρδιαγγειακών προβλημάτων συνδέονται συχνά με την υπνική άπνοια, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση συστημάτων παρακολούθησης που λειτουργούν εκτός κλινικού περιβάλλοντος. Η χρήση συστημάτων IoT για τη συνεχή παρακολούθηση των δεικτών ύπνου μπορεί να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για την πρόληψη και τη διαχείριση της υπνικής άπνοιας, βελτιώνοντας τη συνολική ποιότητα ζωής των ατόμων που πάσχουν από αυτή τη διαταραχή.

Το προτεινόμενο σύστημα IoT είναι βιώσιμο και εύκολο στη χρήση, ενώ τα δεδομένα που συλλέγει σε πραγματικό χρόνο παρέχουν άμεσες ενημερώσεις για τους δείκτες άπνοιας, διευκολύνοντας τη λήψη έγκαιρων αποφάσεων. Η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης στο οικιακό περιβάλλον καθιστά τη συσκευή ιδιαίτερα χρήσιμη για ηλικιωμένα άτομα και άτομα με σωματικές ή νοητικές αναπηρίες. Η λειτουργία αποστολής ειδοποιήσεων προσφέρει επιπλέον ασφάλεια, καθώς ενημερώνει τους ασθενείς ή τους φροντιστές τους για τυχόν ανησυχητικά επεισόδια, διευκολύνοντας την άμεση αντιμετώπιση προβλημάτων.

Η έρευνα προτείνει, επίσης, τη μελλοντική βελτίωση του συστήματος μέσω της ανάπτυξης ενός ιδιόκτητου συνόλου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και της εφαρμογής μοντέλων μηχανικής μάθησης για την περαιτέρω ανάλυση και βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Μελλοντικές αναβαθμίσεις του συστήματος θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών, όπως απεικονιστικά μέσα υψηλής ανάλυσης (π.χ. ακτίνες X), για πιο ακριβή διάγνωση και παρακολούθηση.

Η σημασία της έγκαιρης ανίχνευσης και διαχείρισης της υπνικής άπνοιας είναι αδιαμφισβήτητη, καθώς η απουσία διαταραχών ύπνου συμβάλλει καθοριστικά στη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Η αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών στον τομέα της υγείας μπορεί να αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα στην επίτευξη αυτής της ευημερίας, ενισχύοντας την πρόληψη και την έγκαιρη θεραπεία των διαταραχών ύπνου.

Κεφάλαιο 4ο: Αποτελέσματα και συζήτηση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες της πραγματικής υλοποίησης και αξιολόγησης του συστήματος παρακολούθησης της άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο. Δίνεται έμφαση στην

αποτελεσματικότητα του συστήματος για την ανίχνευση γεγονότων άπνοιας και υπόπνοιας, την αξιοπιστία του, τη σύγκριση με άλλα συστήματα, τις αντιδράσεις των χρηστών, καθώς και τις επιπτώσεις των αποτελεσμάτων στη θεραπεία διαταραχών ύπνου. Επιπλέον, αναδεικνύονται τα οφέλη και οι περιορισμοί του προτεινόμενου συστήματος.

4.1 Αξιολόγηση Απόδοσης του Συστήματος

Το σύστημα παρακολούθησης άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο αξιολογήθηκε βάσει της ακρίβειας ανίχνευσης των επεισοδίων άπνοιας και υπόπνοιας και της ακρίβειας των δεδομένων κατά την παρακολούθηση όλης της νύχτας. Οι βασικοί δείκτες αξιολόγησης ήταν η ακρίβεια, η ευαισθησία και η ειδικότητα. Η ακρίβεια παρέχει τη γενική απόδοση του συστήματος, η ευαισθησία μετρά την ικανότητα εντοπισμού επεισοδίων άπνοιας και υπόπνοιας, ενώ η ειδικότητα αφορά τη μη ανίχνευση αυτών των γεγονότων [2].

Σε σύγκριση με την πολυπνογραφία (PSG), το σύστημα εμφάνισε ακρίβεια 91,5%, ευαισθησία 89,7% και ειδικότητα 92,3%. Αυτές οι τιμές υποδεικνύουν τη δυναμική του συστήματος ως λύση για την παρακολούθηση στο σπίτι, ενώ το περιθώριο σφάλματος σε σύγκριση με την κλινική PSG υποδεικνύει πεδία βελτίωσης στο μέλλον. Αυτά τα σφάλματα μπορεί να οφείλονται σε παράγοντες που σχετίζονται με τους χρήστες, όπως η τοποθέτηση των αισθητήρων και οι διαφοροποιήσεις μεταξύ ατόμων. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες ΗΚΓ τοποθετήθηκαν λανθασμένα, προκαλώντας θόρυβο στο σήμα, ο οποίος απαιτούσε τη χρήση φίλτρων απομάκρυνσης θορύβου [21].

Η αξιοπιστία του συστήματος αξιολογήθηκε με βάση τη δυνατότητά του να μεταδίδει και να αποθηκεύει δεδομένα για μεγάλες χρονικές περιόδους. Κατά την παρακολούθηση κατά τη διάρκεια της νύχτας, χάθηκε λιγότερο από το 2% των δεδομένων λόγω προβλημάτων συνδεσιμότητας, ένα ποσοστό τόσο μικρό ώστε να μην επηρεάσει τα αποτελέσματα. Αυτό αποδίδεται στην αποτελεσματικότητα της ασύρματης μετάδοσης του μικροελεγκτή ESP32, ο οποίος επέτρεψε τη μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μεταξύ των αισθητήρων και του διακομιστή, όπως προτείνεται από τον [18].

Παρόλα αυτά, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένες δυσκολίες που πρέπει να επιλυθούν. Οι κινήσεις των χρηστών αποτέλεσαν σημαντική πηγή παρεμβολών στα σήματα, ειδικά για τους αισθητήρες ΗΚΓ και GSR. Αυτός ο θόρυβος οδήγησε σε ψευδώς αρνητικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ήπιων επεισοδίων 8s. Η αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων απαιτεί τη βελτίωση των αλγορίθμων προεπεξεργασίας σήματος και, ενδεχομένως, τη χρήση πιο πολύπλοκων σχεδιασμών αισθητήρων για τη βελτίωση της σταθερότητας των σημάτων. Σε γενικές γραμμές, το σύστημα κατάφερε να έχει καλή απόδοση στην ανίχνευση επεισοδίων άπνοιας ύπνου και να παρέχει συνεπή συλλογή δεδομένων κατά τη διάρκεια της νυχτερινής παρακολούθησης.

4.2 Σύγκριση με Υπάρχοντα Συστήματα

Για να αξιολογηθεί η ανταγωνιστικότητα του προτεινόμενου συστήματος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με το συμβατικό PSG (πολυπυνογραφία) και άλλες φορητές συσκευές παρακολούθησης ύπνου. Σήμερα, η πολυπυνογραφία εξακολουθεί να θεωρείται η καλύτερη μέθοδος για τη διάγνωση διαταραχών ύπνου, καθώς καταγράφει περισσότερα δεδομένα, όπως EEG (ηλεκτροεγκεφαλογράφημα) και EMG (ηλεκτρομυογράφημα), που υπερβαίνουν τις δυνατότητες των περισσότερων φορητών συσκευών. Ωστόσο, είναι ακριβής και δεν είναι άμεσα διαθέσιμη, γεγονός που την καθιστά ακατάλληλη για συχνή χρήση, ιδίως σε οικιακά περιβάλλοντα [15].

Αυτό σημαίνει ότι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου συστήματος είναι η δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και η διαδραστική διεπαφή που βασίζεται στο διαδίκτυο. Σε αντίθεση με τις συμβατικές συσκευές, που απαιτούν την ανάλυση των δεδομένων εκτός σύνδεσης, το σύστημα αυτό επιτρέπει στους χρήστες να παρακολουθούν την υγεία του ύπνου τους σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας άμεσα ανατροφοδότηση για τα φυσιολογικά τους δεδομένα. Αυτή η δυνατότητα αυξάνει το ενδιαφέρον των χρηστών και τους βοηθά να ακολουθούν τα πρωτόκολλα παρακολούθησης. Επιπλέον, το σύστημα είναι φορητό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σύστημα παρακολούθησης στο σπίτι, καθώς δεν απαιτεί καλωδίωση όπως τα περισσότερα συστήματα PSG που χρειάζονται συνεχή παρακολούθηση από επαγγελματία [24].

Ωστόσο, το σύστημα υστερεί σε σχέση με την PSG όσον αφορά την παροχή εξειδικευμένων πληροφοριών για τα στάδια του ύπνου και τη δραστηριότητα των μυών, τα οποία είναι απαραίτητα για τη διάγνωση ορισμένων τύπων διαταραχών ύπνου. Παρόλο που η χρήση λιγότερων παραμέτρων είναι ωφέλιμη για τη σχεδίαση και τη χρήση του συστήματος, περιορίζει την ικανότητά του να αναγνωρίζει διάφορα είδη διακοπών του ύπνου. Επομένως, το σύστημα είναι καταλληλότερο για χρήση ως συμπληρωματικό εργαλείο στην κλινική PSG παρά ως υποκατάστατό της.

4.3 Ανατροφοδότηση χρηστών

Το προτεινόμενο σύστημα αξιολογήθηκε με βάση τη σκοπιμότητα και τη χρησιμότητα από την πλευρά των χρηστών. Ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να βαθμολογήσουν την εμπειρία όσον αφορά την τοποθέτηση των αισθητήρων, το επίπεδο άνεσης και την εμπειρία τους κατά τη χρήση της διαδικτυακής διεπαφής. Η ανατροφοδότηση ήταν χρήσιμη για τον προσδιορισμό των σημείων στα οποία το σύστημα θα μπορούσε να βελτιωθεί και για την επαλήθευση της ορθότητας ορισμένων από τις σχεδιαστικές αποφάσεις.

Οι περισσότεροι από τους συμμετέχοντες δήλωσαν ότι ήταν εύκολη η εγκατάσταση και επίσης προτίμησαν μια ασύρματη επιλογή, ώστε να μην περιορίζεται η κινητικότητά τους όταν κοιμούνται. Αυτού του είδους η ευελιξία ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη για τους χρήστες που αλλάζουν τη θέση τους κατά τη διάρκεια του ύπνου. Η διαδικτυακή διεπαφή περιγράφηκε στο πλαίσιο της διάταξης και της

σαφήνειας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Σημείωσαν ότι η οπτική απεικόνιση των παραμέτρων του ύπνου κάποιου, όπως ο καρδιακός ρυθμός και τα επίπεδα οξυγόνου, ήταν χρήσιμη για την αξιολόγηση της κατάστασης του ύπνου. Αυτό υποστηρίζει προηγούμενες μελέτες που τόνισαν τη σημασία των διεπαφών για τη βελτίωση της χρήσης των συστημάτων παρακολούθησης της υγείας[5].

Ωστόσο, αρκετά συχνά αναφέρθηκαν προβλήματα κατά την εγκατάσταση των αισθητήρων στα σχόλια που ελήφθησαν. Κάποιοι από τους συμμετέχοντες ανέφεραν ότι η τοποθέτηση των αισθητήρων ECG και GSR απαιτούσε χρόνο για να ρυθμιστούν σωστά, κάτι που οδήγησε σε διακυμάνσεις των δεδομένων που συλλέχθηκαν. Αυτό το ζήτημα απαιτεί βελτιωμένο σχεδιασμό αισθητήρων, όπως αυτοκόλλητους ή αυτοκαλιμπραριζόμενους αισθητήρες, για τη συλλογή δεδομένων με ελάχιστη εμπειρία χρήστη.

Ένα άλλο ζήτημα που τέθηκε ήταν η δυσφορία κατά τη χρήση των αισθητήρων για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Παρά το γεγονός ότι οι αισθητήρες ήταν ελαφριοί, κάποιοι συμμετέχοντες βρήκαν ότι ήταν ελαφρώς άβολοι ή διαταρασσόταν όταν γύριζαν τη νύχτα. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, θα χρειαστεί να βελτιωθεί η φορητή τεχνολογία και να κατασκευαστούν οι συσκευές όσο το δυνατόν πιο άνετες, αυξάνοντας ταυτόχρονα την ανθεκτικότητα των συσκευών [16].

Γενικά, τα σχόλια υποδεικνύουν ότι το σύστημα είναι πιο κατάλληλο για χρήση στο σπίτι. Ωστόσο, ο βελτιωμένος σχεδιασμός των αισθητήρων και οι συγκεκριμένες οδηγίες για την τοποθέτηση των αισθητήρων θα μπορούσαν να βελτιώσουν σημαντικά την εμπειρία του χρήστη. Οι χρήστες έδειξαν επίσης πολύ υψηλό επίπεδο ικανοποίησης με το σύστημα και εξέφρασαν την προθυμία τους να το χρησιμοποιούν για τακτικό έλεγχο της υγείας του ύπνου.

4.4 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Τα ευρήματα αυτής της μελέτης έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην αξιολόγηση και πρόληψη των διαταραχών ύπνου, με ιδιαίτερη αναφορά στην αποφρακτική άπνοια ύπνου. Το προτεινόμενο σύστημα εξαλείφει κάποιες από τις βασικές προκλήσεις που συνδέονται με το κλινικό PSG, όπως το κόστος και η ταλαιπωρία, προσφέροντας μια φορητή και οικονομική λύση για την παρακολούθηση του ύπνου.

Η υψηλή ακρίβεια του συστήματος στην αναγνώριση επεισοδίων άπνοιας και υποάπνοιας αποδεικνύει ότι οι στρατηγικές πολυδιάστατης παρακολούθησης λειτουργούν αποτελεσματικά. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς το σύστημα παρακολουθεί πολλαπλές φυσιολογικές παραμέτρους και, ως εκ τούτου, παρέχει περισσότερες πληροφορίες για την υγεία του ύπνου σε σύγκριση με τις μηχανές που παρακολουθούν μόνο μία παράμετρο. Αυτή η προσέγγιση ευθυγραμμίζεται με τις σύγχρονες τάσεις στην ιατρική τεχνολογία, όπου διάφορες πηγές πληροφοριών συνδυάζονται προκειμένου να ενισχυθεί ο διαγνωστικός δείκτης [24].

Το δυνατό σημείο του συστήματος είναι ότι μπορεί να παρουσιάζει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, ώστε οι άνθρωποι να μπορούν να ελέγχουν την υγεία του ύπνου τους. Η διαθεσιμότητα μιας τέτοιας δυνατότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική για τους χρόνιους ασθενείς με διαταραχές του ύπνου, καθώς επιτρέπει τον προσδιορισμό της απόκλισης από τον κανόνα και τη λήψη απόφασης σχετικά με τις περαιτέρω ενέργειες. Επιπλέον, η ενσωμάτωση του συστήματος στο οικιακό περιβάλλον είναι εφικτή και είναι χρήσιμη για την παρακολούθηση που είναι απαραίτητη για την παρακολούθηση της εξέλιξης των διαταραχών του ύπνου και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων[14].

Ωστόσο, το σύστημα δεν είναι απαλλαγμένο από τα μειονεκτήματά του. Αυτά είναι η ακρίβεια της τοποθέτησης των αισθητήρων και η ταλαιπωρία της χρήσης των αισθητήρων ως τομείς του σχεδιασμού του υλικού που χρειάζονται βελτίωση. Στη μελλοντική ανάπτυξη, το κύριο μέλημα θα πρέπει να είναι η άνεση και η ευκολία των αισθητήρων, οι οποίοι θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο αόρατοι. Παρ' όλα αυτά, το σύστημα υποφέρει από απώλεια δεδομένων, ιδίως όταν υπάρχει διακοπή της συνδεσιμότητας μέσω ασύρματων συνδέσεων. Αυτό θα αποτελούσε μειονέκτημα, ωστόσο, εάν το σύστημα ενσωμάτωνε δυνατότητες αποθήκευσης εκτός σύνδεσης θα βοηθούσε στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος και θα εξασφάλιζε τη συνέπεια των δεδομένων [18].

Η υψηλή ακρίβεια του συστήματος στον εντοπισμό επεισοδίων άπνοιας και υπόπνοιας αποδεικνύει ότι οι πολυτροπικές στρατηγικές παρακολούθησης λειτουργούν επίσης. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα επειδή το σύστημα παρακολουθεί πολλές φυσιολογικές παραμέτρους και συνεπώς παρέχει περισσότερες πληροφορίες για την υγεία του ύπνου από ό,τι τα μηχανήματα με μία μόνο παράμετρο. Αυτό συνάδει με τις σημερινές τάσεις στην τεχνολογία υγείας, όπου συνδυάζονται διάφορες πηγές πληροφοριών προκειμένου να ενισχυθεί η διαγνωστική αναλογία [24].

Το δυνατό σημείο του συστήματος είναι ότι μπορεί να παρουσιάζει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, ώστε οι άνθρωποι να μπορούν να ελέγχουν την υγεία του ύπνου τους. Η διαθεσιμότητα μιας τέτοιας δυνατότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική για τους χρόνιους ασθενείς με διαταραχές του ύπνου, καθώς επιτρέπει τον προσδιορισμό της απόκλισης από τον κανόνα και τη λήψη απόφασης σχετικά με τις περαιτέρω ενέργειες. Επιπλέον, η ενσωμάτωση του συστήματος στο οικιακό περιβάλλον είναι εφικτή και είναι χρήσιμη για την παρακολούθηση που είναι απαραίτητη για την παρακολούθηση της εξέλιξης των διαταραχών του ύπνου και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων [14].

Ωστόσο, το σύστημα δεν είναι χωρίς μειονεκτήματα. Αυτά είναι η ακρίβεια στην τοποθέτηση των αισθητήρων και η δυσχέρεια χρήσης των αισθητήρων ως τομείς σχεδίασης του υλικού που χρειάζονται βελτίωση. Στην μελλοντική ανάπτυξη, η κύρια ανησυχία θα πρέπει να είναι η άνεση και η ευχρηστία των αισθητήρων, οι οποίοι θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο αόρατοι. Παρ' όλα αυτά, το σύστημα υποφέρει από απώλεια δεδομένων, ειδικά όταν υπάρχει διακοπή της

συνδεσιμότητας μέσω ασύρματων συνδέσεων. Αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει μειονέκτημα, ωστόσο, εάν το σύστημα ενσωμάτωνε δυνατότητες αποθήκευσης εκτός σύνδεσης, θα βοηθούσε να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα και να διασφαλιστεί ότι τα δεδομένα είναι συνεπή [18].

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία προτείνει ένα σύστημα παρακολούθησης άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο, το οποίο στοχεύει να λύσει σημαντικά ελλείμματα στη διάγνωση και θεραπεία της αποφρακτικής άπνοιας ύπνου (OSA), μιας κοινής αλλά παραμελημένης κατάστασης. Συνδέεται με καρδιομεταβολικές ασθένειες, συμπεριλαμβανομένων των καρδιοαγγειακών παθήσεων, του διαβήτη και της μείωσης της ποιότητας ζωής [1]. Ωστόσο, το χρυσό πρότυπο για τη διάγνωση της OSA, η πολυσωμνογραφία (PSG), είναι ακριβό, χρονοβόρο και μη διαθέσιμο σε πολλούς ασθενείς παγκοσμίως. Η παρούσα διατριβή προτείνει μια καινοτόμο προσέγγιση για την ανάπτυξη ενός προσιτού, φορητού και εύχρηστου συστήματος που χρησιμοποιεί φορητούς αισθητήρες, διεπαφή IoT και μηχανική μάθηση για την παρακολούθηση της άπνοιας ύπνου στο σπίτι.

Με τη βοήθεια πολυδιάστατης φυσιολογικής παρακολούθησης, επιβεβαιώθηκε η δυναμική του προτεινόμενου συστήματος στην αναγνώριση επεισοδίων άπνοιας και υποάπνοιας με υψηλή ευαισθησία και ειδικότητα. Το σύστημα συνδέει αισθητήρες ECG, SpO₂, BPM και GSR για τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αναλύει τα δεδομένα χρησιμοποιώντας σύνθετους αλγορίθμους και παρέχει την ανάλυση μέσω μιας διεπαφής Ιστού. Η μελέτη έδειξε ότι το σύστημα ήταν αρκετά ακριβές για να λειτουργήσει ως διαγνωστικό εργαλείο συμπληρωματικό προς την PSG, υποδεικνύοντας την εφικτότητα του συστήματος για ρουτίνα χρήση.

Η ενσωμάτωση μιας εύκολα κατανοητής διεπαφής κατέστησε δυνατή τη χρήση του συστήματος από άτομα με ελάχιστες ή καθόλου δεξιότητες προγραμματισμού. Οι συμμετέχοντες απόλαυσαν επίσης τα οφέλη της άμεσης προβολής των μετρήσεων του ύπνου και της δυνατότητας παρακολούθησης της κατάστασης της υγείας του ύπνου. Επιπλέον, το σύστημα ήταν φορητό και μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στα σπίτια και, ως εκ τούτου, ήταν πολύ χρήσιμο στην έγκαιρη διάγνωση και τη συνεχή παρακολούθηση της άπνοιας του ύπνου.

Ωστόσο, εντοπίστηκαν ορισμένοι περιορισμοί της παρούσας μελέτης, οι οποίοι απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση. Ορισμένοι από τους προβληματισμούς που προέκυψαν ήταν: πώς να τοποθετηθούν κατάλληλα οι αισθητήρες, η δυσφορία που αισθάνεται κανείς κατά τη χρήση του και το γεγονός ότι το σύστημα απαιτούσε σταθερή ασύρματη σύνδεση. Επιπλέον, αν και το σύστημα σχεδιάστηκε για να παρακολουθεί και να αναλύει τις πιο σημαντικές φυσιολογικές παραμέτρους για

την ανίχνευση της άπνοιας, δεν ήταν επαρκώς εξοπλισμένο για να αναλύει τη δομή του ύπνου, γεγονός που μειώνει την εφαρμογή του στη διάγνωση άλλων διαταραχών του ύπνου. Παρ' όλα αυτά, το σύστημα αποτελεί σημαντική πρόοδο προς τον εκδημοκρατισμό της διάγνωσης της υγείας του ύπνου, καθώς είναι φθινό και προσιτό.

Το σύστημα παρακολούθησης άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο αποτελεί μια επαναστατική πρόοδο στη διάγνωση και διαχείριση της αποφρακτικής άπνοιας ύπνου (OSA). Η συνεισφορά του δεν περιορίζεται μόνο στην καινοτομία της τεχνολογίας, αλλά έχει αλλάξει και τους τρόπους με τους οποίους παρέχεται η φροντίδα για την υγεία του ύπνου. Σε αντίθεση με τις πιο παραδοσιακές προσεγγίσεις που παραμένουν περιορισμένες σε συγκεκριμένα κλινικά περιβάλλοντα, το σύστημα αυτό προσφέρει την προοπτική ευρύτερης διάγνωσης, επικεντρωμένο στην απλότητα, τη φορητότητα και το κόστος. Αυτό έχει ένα από τα μεγαλύτερα οφέλη του, καθώς μπορεί να μειώσει τις καθυστερήσεις στη διάγνωση, οι οποίες αποτελούν μια σημαντική πρόκληση για τους ασθενείς σε περιοχές που ακόμη δεν διαθέτουν εγκαταστάσεις PSG [22].

Μια ακόμη σημαντική συνέπεια αυτού του συστήματος είναι η δυνατότά του για παρακολούθηση παρακολούθησης, κάτι που τα συστήματα PSG δεν μπορούν να παρέχουν λόγω του μοντέλου τους που βασίζεται σε μια εφάπαξ εξέταση στο εργαστήριο. Δεδομένου ότι η άπνοια ύπνου είναι μια συνεχώς επιδεινούμενη κατάσταση, η ευκαιρία να παρακολουθείται ο ασθενής για εβδομάδες ή μήνες δίνει στον κλινικό γιατρό μια καλύτερη κατανόηση των διακυμάνσεων των συμπτωμάτων και της αποτελεσματικότητας των θεραπειών. Για παράδειγμα, ασθενείς με διαταραχές ύπνου που προκύπτουν από παράγοντες όπως η παχυσαρκία ή το άγχος, θα μπορούσαν να παρακολουθούν πώς η συμπεριφορά ή τα φάρμακα που χρησιμοποιούν επηρεάζουν την κατάσταση τους με την πάροδο του χρόνου. Οι πληροφορίες που προκύπτουν από αυτό το σύστημα μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τα σχέδια θεραπείας και να εξασφαλίσουν ότι οι συστάσεις που δίνονται είναι σχετικές με τις ανάγκες του ασθενούς στο παρόν και στο μέλλον.

Εκτός από την ικανότητα του συστήματος να εντοπίζει άπνοια και υποπνοία, το πλαίσιο του συστήματος προτείνει νέες δυνατότητες για σύνδεση με άλλα υγειονομικά περιβάλλοντα. Σε αυτή την περίπτωση, τα δεδομένα παρακολούθησης θα μπορούσαν εύκολα να κοινοποιηθούν στους παρόχους υγειονομικής περίθαλψης μέσω διαλειτουργικότητας με τα Ηλεκτρονικά Αρχεία Υγείας (EHRs). Αυτή η ενσωμάτωση βοηθά να γίνει μια θετική συνεισφορά στη συνολική φροντίδα του ασθενούς και αποφεύγει την ανάπτυξη μιας κατάστασης όπου οι καταγεγραμμένες μετρήσεις είναι χρήσιμες μόνο για το προσωπικό ή το τμήμα. Σε περιπτώσεις όπου οι ασθενείς έχουν άλλες καταστάσεις όπως υπέρταση ή διαβήτη, αυτά τα συνδυασμένα δεδομένα θα μπορούσαν να βοηθήσουν τους γιατρούς να εκτιμήσουν τη διάδραση αυτών των καταστάσεων με την ΟΣΑ και να σχεδιάσουν τη θεραπευτική αγωγή αναλόγως [1].

Αξιοσημείωτο είναι ότι η διαδικτυακή διεπαφή λειτουργεί ως σύνδεσμος για την εκπαίδευση των χρηστών όσον αφορά την υγεία του ύπνου τους. Το σύστημα είναι διαγνωστικό καθώς και προληπτικό, δίνοντας στους χρήστες τη δυνατότητα να γνωρίζουν τα μοτίβα των διαταραχών του ύπνου τους και να τα τροποποιούν. Αυτή η ικανότητα θέτει τον ασθενή στο επίκεντρο της φροντίδας του και προάγει ενισχυμένη επιτήρηση και αυτοδιαχείριση. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει τη δυναμική ασθενούς-κλινικού γιατρού, καθώς το σύστημα παρέχει στους χρήστες ποσοτικά δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιήσουν κατά τη διάρκεια των διαβουλεύσεων.

Ωστόσο, η δυναμική αυτής της καινοτομίας δεν περιορίζεται μόνο στο σύστημα υγειονομικής περίθαλψης κάθε χώρας. Από ερευνητική σκοπιά, το σύστημα μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην αξιολόγηση των διαταραχών του ύπνου σε επίπεδο πληθυσμού. Η αποθήκευση των μεγάλων, ανωνυμοποιημένων δεδομένων ύπνου θα μπορούσε να οδηγήσει στην ανακάλυψη της επιδημιολογίας των διαταραχών του ύπνου, της σχέσης τους με κοινωνικούς παράγοντες και των παραγόντων κινδύνου κατά δημογραφικές ομάδες. Αυτή η δυνατότητα είναι σημαντική καθώς η συχνότητα εμφάνισης της ΟΣΑ αυξάνεται με την παχυσαρκία και τις γηράσκουσες πληθυσμιακές ομάδες παγκοσμίως. Προσφέροντας στους ερευνητές τη δυνατότητα να εργαστούν με δεδομένα πραγματικού χρόνου χωρίς διακοπές, αυτό το σύστημα είναι ικανό να επιταχύνει την πρόοδο στην κοινωνικο-κλινική εικόνα της άπνοιας ύπνου.

Ωστόσο, οι περιορισμοί που επισημαίνονται σε αυτή τη μελέτη δείχνουν ότι ο δρόμος προς μια ιδανική λύση δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμη. Κάποιες από τις προκλήσεις που θα απαιτήσουν επαναλαμβανόμενη ανάπτυξη περιλαμβάνουν: τη διατήρηση της ποιότητας των δεδομένων από τους χρήστες, καθώς είναι πολύ διαφορετικοί, την εξειδίκευση της διεπαφής ώστε να είναι πιο φιλική προς τους τελικούς χρήστες και, τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, το ζήτημα της τεχνολογίας που μπορεί να περιλαμβάνει διαταραχές στη συνδεσιμότητα μέσω ασύρματων δικτύων. Το μέλλον της εργασίας θα πρέπει επίσης να εξετάσει πώς τα σχόλια από διάφορες ομάδες χρηστών, συμπεριλαμβανομένων των αγροτικών ή χαμηλού πόρου περιοχών όπου ο πολιτισμός και η υποδομή μπορεί να επηρεάσουν την υιοθέτηση του συστήματος, μπορούν να ενσωματωθούν.

Τέλος, η αξία αυτού του συστήματος παρακολούθησης άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο μπορεί να βρεθεί σε δύο βασικά σημεία: την τεχνολογική του εξέλιξη και την ικανότητά του να κάνει τις ακριβείς διαγνωστικές διαδικασίες υγείας πιο προσιτές στον ευρύ πληθυσμό. Με την αλλαγή της εστίασης από λύσεις που προσανατολίζονται στην κλινική πρακτική σε λύσεις που επικεντρώνονται στον ασθενή, το σύστημα αντανακλά τις τάσεις για δίκαιη και περιεκτική υγειονομική περίθαλψη σε όλο τον κόσμο. Το πώς μπορεί να αλλάξει τις ζωές των ανθρώπων και τα συνολικά συστήματα υγειονομικής περίθαλψης το καθιστά ένα αναπόσπαστο εργαλείο στον αγώνα κατά της αδιάγνωστης και αθεράπευτης άπνοιας ύπνου.

5.2 Μελλοντική Εργασία

Ενώ το τρέχον σύστημα δείχνει υποσχέσεις, υπάρχουν αρκετοί τομείς όπου απαιτούνται περαιτέρω έρευνες και ανάπτυξη για να ενισχυθεί η λειτουργικότητά του, η χρηστικότητα και η εφαρμοσιμότητά του.

5.2.1 Σχεδίαση Υλικού και Βελτίωση Αισθητήρων

Οι επόμενες εκδόσεις του συστήματος θα πρέπει να επικεντρωθούν στη βελτίωση του σχεδιασμού των αισθητήρων προκειμένου να ξεπεραστούν κάποια από τα προβλήματα που σχετίζονται με την άνεση και την πρακτικότητα. Κάποιες από τις προκλήσεις που αναφέρθηκαν από τους συμμετέχοντες περιλαμβάνουν: προβλήματα με την τοποθέτηση των αισθητήρων, ειδικά των αισθητήρων ECG και GSR, καθώς και δυσφορία κατά τη χρήση των αισθητήρων για πολλές ώρες. Για να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν κολλητικοί ή ευλύγιστοι αισθητήρες που να εξασφαλίζουν καλή επαφή με το δέρμα χωρίς δυσφορία. Επίσης, βελτιώσεις στην τεχνολογία των αισθητήρων, όπως η χρήση εξελιγμένων αισθητήρων υφασμάτων ή ελαφριών επιθεμάτων, θα μπορούσαν να βελτιώσουν περαιτέρω την άνεση του χρήστη χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση του συστήματος. Αυτό θα εξασφάλιζε καλύτερη αποδοχή και ευχρηστία, ιδιαίτερα για τη μακροχρόνια παρακολούθηση.

Ένας άλλος τομέας στον οποίο μπορεί να γίνουν βελτιώσεις είναι η ενσωμάτωση επιπλέον αισθητήρων. Για παράδειγμα, οι επιταχυνσιόμετρα θα μπορούσαν να παρακολουθούν τις κινήσεις – και τη θέση του ύπνου – ενώ οι αισθητήρες θερμοκρασίας θα μπορούσαν να μετρούν τις μεταβλητές του περιβάλλοντος ύπνου. Αυτές οι βελτιώσεις θα έδιναν μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της υγείας του ύπνου και θα ήταν δυνατός ο εντοπισμός άλλων διαταραχών του ύπνου.

Για τον σκοπό της βελτίωσης του σχεδιασμού του υλικού στο μέλλον, η μινιμαλιστική σχεδίαση των αισθητήρων είναι εφικτή, κάτι που θα καθιστούσε ευκολότερη τη χρήση των αισθητήρων κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι λεπτές σχεδιάσεις ενισχύουν επίσης την άνεση και μειώνουν τις πιθανότητες η συσκευή να παρεμβαίνει στις φυσικές κινήσεις του ύπνου, αποτρέποντας έτσι τον χρήστη από την κανονική ξεκούραση. Νέες εξελίξεις στη χρήση νανοτεχνολογίας και μικροκατεργαστικών τεχνολογιών θα μπορούσαν επομένως να είναι το κλειδί για την ανάπτυξη αισθητήρων που θα είναι ταυτόχρονα αόρατοι και εξαιρετικά ευαίσθητοι. Για παράδειγμα, αισθητήρες φορετοί που είναι εξαιρετικά λεπτοί και ευλύγιστοι μπορούν να ενσωματωθούν απευθείας σε ύφασμα, για να γίνουν το ίδιο το ένδυμα ύπνου, βελτιώνοντας έτσι την εμπειρία χρήσης της συσκευής.

Πέρα από την ενίσχυση του φυσικού σχεδιασμού, η επιλογή του υλικού για τους αισθητήρες θα πρέπει επίσης να είναι ένα σημείο προσοχής. Υποαλλεργικά και αναπνεύσιμα υλικά θα μπορούσαν να μειώσουν σημαντικά τις πιθανότητες εμφάνισης εξανθημάτων σε πιθανούς αγοραστές με ευαίσθητο δέρμα ή σε εκείνους που υπερθερμαίνονται κατά τη διάρκεια της νύχτας. Για παράδειγμα, τα αγωγίμα υφάσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντικαταστήσουν τους σφιχτούς

ηλεκτροδίου σε αισθητήρες ECG, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν ακρίβεια στα σήματα. Επίσης, η ανάπτυξη βιοσυμβατών πολυμερών θα μπορούσε να μελετηθεί περαιτέρω για την ανάπτυξη αισθητήρων GSR που να προσαρμόζονται εύκολα στο δέρμα, ενώ διατηρούν την αγωγιμότητά τους και τη σταθερότητα τους για όλη τη διάρκεια της παρακολούθησης.

Επιπλέον, προτείνεται επίσης η ανάπτυξη της αρθρωτότητας στα συστήματα αισθητήρων, δεδομένου ότι μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη. Θα ήταν δυνατή η επιλογή ορισμένων αισθητήρων σώματος, οι οποίοι είναι απαραίτητοι στην κατάσταση των ασθενών, όπως η προσθήκη επιταχυνσιόμετρων για διαταραχές κίνησης ή αισθητήρων ήχου για το ρυθμό ροχαλητού στην αποφρακτική άπνοια ύπνου κ.λπ. Αυτή η ευελιξία θα εξυπηρετούσε μεγαλύτερο αριθμό πελατών και θα βελτιώνε επίσης τη διαγνωστική λειτουργία του συστήματος για διάφορες διαταραχές του ύπνου.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που μπορεί επίσης να προστεθεί είναι η τεχνολογία ασύρματης φόρτισης, δεδομένου ότι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας αποτελεί μεγάλο πρόβλημα, ιδίως για τα συστήματα παρακολούθησης κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ως ιδέα, πρότεινε να ενσωματωθούν τα μαξιλαράκια ασύρματης φόρτισης στη δομή, ώστε οι χρήστες να μπορούν να τροφοδοτούν το gadget χωρίς να χρειάζεται να το αφαιρούν, καθιστώντας έτσι τη λειτουργία του συνεχή. Περαιτέρω, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μικροελεγκτές χαμηλής ισχύος και μονάδες επικοινωνίας χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας και να μειωθεί έτσι το διάστημα φόρτισης.

Ένας άλλος τομέας βελτίωσης μπορεί να ειπωθεί ότι είναι η κατασκευή αυτοβαθμολογούμενων αισθητήρων. Οι αισθητήρες αυτοί θα μπορούσαν να προσαρμοστούν μόνοι τους στις αλλαγές της αγωγιμότητας του δέρματος, της θερμοκρασίας ή της κίνησης, έτσι ώστε η ακρίβεια των δεδομένων που συλλέγονται να μην εξαρτάται από τη δραστηριότητα του χρήστη. Για παράδειγμα, ορισμένοι από τους αλγορίθμους που περιλαμβάνονται στο υλικό θα μπορούσαν να κλειδώσουν σήματα που μπορεί να είναι παραμορφωμένα λόγω κακής αγωγικής επαφής ή ακατάλληλης ευθυγράμμισης και να δώσουν διορθώσεις σε πραγματικό χρόνο. Χαρακτηριστικά όπως αυτά θα βελτιώναν σημαντικά την αποτελεσματικότητα των συστημάτων και θα ανακούφιζαν τον χρήστη από την ανάγκη να ρυθμίζει συνεχώς τους αισθητήρες κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Τέλος, η απαίτηση του σχεδιασμού του υλικού θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνει την επεκτασιμότητα και τη μελλοντική επέκταση. Θα πρέπει επίσης να είναι σχεδιασμένο ώστε να δέχεται νέους αισθητήρες στο σύστημα καθώς αναπτύσσονται με τη δυνατότητα να ενσωματώνονται απρόσκοπτα στο σύστημα. Για παράδειγμα, η ενσωμάτωση προαιρετικών και αρθρωτών στοιχείων, όπως για την παρακολούθηση της δυναμικής της ροής του αίματος με τη βοήθεια οπτικών αισθητήρων ή την παρακολούθηση της εγκεφαλικής δραστηριότητας με τη χρήση φορητών αισθητήρων EEG, μπορεί να ενσωματωθεί σε μελλοντικές εκδόσεις του συστήματος για να αυξήσει

τις διαγνωστικές δυνατότητες του συστήματος. Έτσι, το σύστημα έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι πιο συμβατό με τις μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα της τεχνολογίας υγείας του ύπνου και να μπορεί να αντιμετωπίσει περισσότερα προβλήματα που σχετίζονται με τον ύπνο.

5.2.2 Προχωρημένη Επεξεργασία Σημάτων και Βελτιστοποίηση Αλγορίθμων

Το τρέχον σύστημα χρησιμοποιεί αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για τον εντοπισμό του άπνοιας, οι οποίοι παρέχουν επίσης υψηλή διαγνωστική ακρίβεια. Παρ' όλα αυτά, το πρόβλημα των ψευδών θετικών και ψευδών αρνητικών αποτελεσμάτων μπορεί να βελτιστοποιηθεί σε κάποιο βαθμό. Οι μελλοντικές εργασίες μπορεί να εξετάσουν τη χρήση προσεγγίσεων βαθιάς μάθησης, συμπεριλαμβανομένων των CNN και RNN, για τη βελτίωση της εξαγωγής χαρακτηριστικών και των επιδόσεων ταξινόμησης. Αυτά τα μοντέλα θα μπορούσαν να επεξεργάζονται τα μοτίβα στα φυσιολογικά δεδομένα καλύτερα, ειδικά σε περίπλοκες ή ασαφείς περιπτώσεις.

Επιπλέον, η πρόοδος στους αλγορίθμους, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση των σταδίων του ύπνου, θα αύξανε τις διαγνωστικές δυνατότητες του συστήματος. Χρησιμοποιώντας χαρακτηριστικά όπως η HRV ή οι αναπνευστικοί κύκλοι, το σύστημα θα μπορούσε να βοηθήσει στην προσδιορισμό της αρχιτεκτονικής της νύχτας, επιτρέποντας έτσι την αναγνώριση ασθενειών όπως η αϋπνία ή η διαταραχή συμπεριφοράς του ύπνου REM.

Ωστόσο, η ενσωμάτωση υβριδικών μοντέλων μηχανικής μάθησης θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά την ακρίβεια της επεξεργασίας σήματος και της βελτιστοποίησης των αλγορίθμων του συστήματος. Στα υβριδικά μοντέλα, υπάρχουν τα χαρακτηριστικά διαφορετικών μοντέλων, όπως η ενσωμάτωση του CNN για την εξαγωγή χωρικών χαρακτηριστικών με το LSTM για την ανάλυση χρονικών ακολουθιών. Αυτός ο συνδυασμός θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα χρήσιμος όσον αφορά την παρακολούθηση μικρών διακυμάνσεων στα φυσιολογικά σήματα που ενδέχεται να αντανακλούν επεισόδια άπνοιας, υποάπνοιας ή αλλαγές στα στάδια του ύπνου. Για παράδειγμα, τα LSTM θα μπορούσαν να καταγράψουν τις πληροφορίες χρονικής κατεύθυνσης στις διακυμάνσεις της HRV ή του SpO₂ κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων, ενώ τα CNN θα μπορούσαν να εντοπίσουν δυναμικά μοτίβα σήματος μικρού χρόνου.

Επιπλέον, για την επίτευξη πιο σταθερών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων, διάφορες μέθοδοι συναθροιστικής μάθησης, για παράδειγμα, οι τυχαίοι δασικοί αλγόριθμοι ή η ενίσχυση κλίσεων, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν ξανά, προκειμένου να συνδυαστούν τα αποτελέσματα πολλών μοντέλων, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία και εξαλείφοντας πρόσθετα σφάλματα, όπως τα ψευδή θετικά ή τα ψευδή αρνητικά. Η χρήση μεθόδων συναθροιστικών αλγορίθμων μπορεί να εκμεταλλευτεί τη δυνατότητα άλλων μεθόδων στην ταξινόμηση για να παρέχει ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα ταξινόμησης. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα σημαντική για περιπτώσεις όπου τα αποτελέσματα των προβλέψεων ενός μεμονωμένου μοντέλου δεν είναι αρκετά ευαίσθητα ή ειδικά, για παράδειγμα, σε περιπτώσεις οριακής κατάστασης ή ήπιας άπνοιας ύπνου.

Εκτός από τη βελτίωση της νέας δομής μηχανικής μάθησης, η βελτίωση της διαδικασίας μηχανικής χαρακτηριστικών είναι σημαντική για την περαιτέρω ενίσχυση των αποτελεσμάτων του συστήματος. Μέτρα που προκύπτουν από τα φυσιολογικά σήματα, όπως η ισχύς σε ορισμένες συχνότητες ή μη γραμμικά μέτρα, όπως η εντροπία, μπορούν να παρέχουν πιο μηχανιστικά χρήσιμες πληροφορίες για τις διαδικασίες του ύπνου. Για παράδειγμα, το FFT ή το wavelet των σημάτων ECG στο πεδίο συχνοτήτων είναι ισχυρά συσχετισμένα με τα μοτίβα RSAA που σχετίζονται άμεσα με τη ΣΔΑ. Παρομοίως, οι πιο σύνθετοι δείκτες, όπως οι δείκτες διαγράμματος Poincaré για τη HRV, θα μπορούσαν να ενσωματωθούν στο σύστημα για να ενισχύσουν την ικανότητα του συστήματος να αναγνωρίζει τα σημάδια αυτόνομων δυσλειτουργιών κατά τη διάρκεια επεισοδίων άπνοιας.

Ένας από τους πιο υποσχόμενους τρόπους είναι η χρήση πρόσθετων μη εποπτευόμενων μεθόδων, όπως η ομαδοποίηση και η ανίχνευση ανωμαλιών, σε συνδυασμό με εποπτευόμενες μεθόδους. Αυτές θα μπορούσαν να αποκαλύψουν μοτίβα ή ανωμαλίες στα φυσιολογικά δεδομένα που δεν μπορούν να εντοπιστούν από δεδομένα με προεπιλεγμένες ετικέτες. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι ωφέλιμο να ομαδοποιηθούν οι άπνοιες με βάση την εκτέλεσή τους, συνδυάζοντας παρόμοιους τύπους διαταραχών ύπνου σε ομάδες. Από την άλλη πλευρά, τα μοντέλα ανίχνευσης ανωμαλιών θα μπορούσαν να εντοπίσουν άλλα γεγονότα που δεν είναι συνηθισμένα από το πρότυπο ύπνου του χρήστη και μπορεί να βοηθήσουν στη διάγνωση επιπλέον της κανονικής ανάλυσης.

Η επεξεργασία σήματος σε πραγματικό χρόνο μπορεί επίσης να βελτιωθεί με τη χρήση χαρακτηριστικών της υπολογιστικής ακμής. Επί του παρόντος, με την ανάπτυξη ελαφρών αλγορίθμων στον μικροελεγκτή ESP32 ή περισσότερο στο παρόμοιο υλικό, το σύστημα θα μπορούσε να εκτελέσει τις αρχικές εξορύξεις χαρακτηριστικών καθώς και την προεπεξεργασία στο επίπεδο της συσκευής. Άλλες διαδικασίες, όπως το προσαρμοστικό φιλτράρισμα και η μείωση των τεχνουργημάτων κίνησης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο για τη βελτίωση της ποιότητας του σήματος πριν από την αποστολή στον διακομιστή. Αυτή η προσέγγιση θα βοηθούσε στη μείωση των καθυστερήσεων και των υπολογισμών στον κεντρικό διακομιστή, που είναι ζωτικής σημασίας για τη γρήγορη ανατροφοδότηση και τα χαμένα συμβάντα κατά τη μετάδοση δεδομένων.

Έτσι, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην περαιτέρω ανάπτυξη της διαδικασίας εκπαίδευσης των αλγορίθμων με τη χρήση διαφόρων και εξαντλητικών συνόλων δεδομένων. Τα περισσότερα υπάρχοντα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί με βάση σχετικά μικρό όγκο δεδομένων και συνεπώς ενδέχεται να μην καταγράφουν το πλήρες φάσμα της μεταβλητότητας του ύπνου στον πληθυσμό. Η συλλογή συμμετεχόντων διαφορετικής ηλικίας, εθνικότητας και κατάστασης υγείας και η ενσωμάτωσή τους στην εκπαίδευση των αλγορίθμων θα αύξανε την εξωτερική εγκυρότητα. Επιπλέον, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στρατηγικές εκμάθησης μεταφοράς για τη λεπτομερή προσαρμογή των μοντέλων που κυκλοφόρησαν σε νέα σύνολα

δεδομένων με περιορισμένη επανεκπαίδευση και έτσι να επιταχυνθεί η χρήση του συστήματος σε διάφορους κλάδους.

Ένας άλλος τομέας με τεράστιο δυναμικό για την επέκταση της διαγνωστικής εφαρμογής του συστήματος είναι η ικανότητά του να προσδιορίζει τα στάδια ύπνου. Διαιρώντας τη νύχτα σε στάδια ελαφρού ύπνου, βαθύ ύπνου και REM, το σύστημα θα μπορούσε να παρέχει πληροφορίες για την αρχιτεκτονική του ύπνου, κάτι που είναι πολύ σημαντικό για τη διάγνωση διαταραχών ύπνου, όπως η αϋπνία ή η ναρκοληψία. Θα ήταν δυνατό να αναπτυχθούν νέοι σύνθετοι αλγόριθμοι που θα μπορούσαν να αναλύσουν κάποιους συνδυασμούς χαρακτηριστικών, για παράδειγμα, αλλαγές στην HRV, κυματισμούς SpO₂ και μοτίβα GSR, προκειμένου να προσδιορίσουν τα στάδια ύπνου με υψηλή ακρίβεια. Επιπλέον, η εκτέλεση φασματικής ανάλυσης στα αναπνευστικά σήματα που προκύπτουν από το ECG μπορεί να δείξει κυκλικές διακυμάνσεις που συνδέονται με ορισμένα στάδια του κύκλου ύπνου-ξύπνιου.

Η επιπλέον βελτιστοποίηση του συστήματος θα μπορούσε να εισαχθεί με τη μορφή προσαρμοστικών αλγορίθμων που θα μπορούσαν να βελτιώνονται με τα δεδομένα που αλληλεπιδρούν και να προσαρμόζονται με την πάροδο του χρόνου και με τον χρήστη. Για παράδειγμα, τα μοντέλα ενίσχυσης μάθησης θα μπορούσαν να προσαρμόζουν τα όρια και τα κριτήρια απόφασης που χρησιμοποιεί το σύστημα σύμφωνα με τα βασικά μετρικά και τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά του χρήστη. Αυτή η προσέγγιση δεν θα έκανε μόνο τη διάγνωση πιο ακριβή, αλλά θα αύξανε επίσης το επίπεδο ικανοποίησης με το σύστημα και τη σημασία της ανατροφοδότησης, μειώνοντας τα ψευδή συναγερμούς.

Τέλος, η χρήση επεξηγήσιμων προσεγγίσεων τεχνητής νοημοσύνης (XAI) που συνδυάζονται στο σύστημα μπορεί να βοηθήσει στην αποκάλυψη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων των αλγορίθμων. Εάν το σύστημα εξηγούσε πώς ορισμένα χαρακτηριστικά ή μοτίβα σήματος είναι χρήσιμα στην ανίχνευση άπνοιας, τότε οι χρήστες και οι κλινικοί γιατροί θα μπορούσαν να εμπιστευτούν το σύστημα. Για παράδειγμα, όταν τα CNN χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία χαρτών θερμότητας, θα μπορούσαν να τονιστούν τα μέρη των σημάτων ΗΚΓ ή SpO₂ που ήταν πιο χρήσιμα για τον προσδιορισμό ενός συμβάντος άπνοιας. Τέτοιες γνώσεις όχι μόνο θα εκπαίδευαν τους χρήστες αλλά θα βοηθούσαν επίσης στην κλινική αποδοχή και επικύρωση του συστήματος.

Τέλος, η κατεύθυνση της ανάπτυξης τόσο της επεξεργασίας σήματος όσο και των αλγορίθμων για το σύστημα παρακολούθησης της άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο σχετίζεται με την εφαρμογή σύγχρονων προσεγγίσεων μηχανικής μάθησης, τη βελτίωση της εξαγωγής χαρακτηριστικών και την αύξηση της ευελιξίας. Συνεπώς, το σύστημα μπορεί να επιτύχει υψηλότερη διαγνωστική ακρίβεια και να αυξήσει την εφαρμογή του σε περισσότερες διαταραχές ύπνου μέσω της εφαρμογής προηγμένων μοντέλων, εκτεταμένης μηχανικής χαρακτηριστικών και προσαρμοσμένων λύσεων. Αυτές οι εξελίξεις όχι μόνο θα βελτιώσουν την υποκείμενη τεχνολογία του συστήματος,

αλλά και θα μετατρέψουν το σύστημα σε παράγοντα επιρροής στη σημερινή διαχείριση της υγείας του ύπνου.

5.2.3 Αποθήκευση Δεδομένων Offline και Υπολογιστική Στοιβά (EdgeComputing)

Το σύστημα αυτή τη στιγμή χρησιμοποιεί σταθερή ασύρματη συνδεσιμότητα για την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των διακοπών σύνδεσης στις επόμενες εκδόσεις, θα πρέπει να προστεθούν τα χαρακτηριστικά αποθήκευσης δεδομένων offline. Αυτή η δυνατότητα θα επιτρέπει στη συσκευή να αποθηκεύει δεδομένα τοπικά και να τα ανεβάζει στον διακομιστή μόλις αποκατασταθεί η σύνδεση, καθιστώντας δυνατή τη συνεχιζόμενη παρακολούθηση.

Θα ήταν δυνατό να αυξηθεί η αποδοτικότητα και η αξιοπιστία του συστήματος χρησιμοποιώντας τεχνικές υπολογιστικής στοιβάς (edgecomputing). Στην ουσία, η υπολογιστική στοιβά θα περιορίσει την εξάρτηση από απομακρυσμένους διακομιστές ενώ θα ενισχύσει τη μείωση της καθυστέρησης και την ανταπόκριση σε πραγματικό χρόνο, ακόμα και σε περιοχές που συνδέονται με το διαδίκτυο σπάνια.

Έτσι, η επέκταση της αρχιτεκτονικής λειτουργίας του συστήματος με τη χρήση αποθήκευσης δεδομένων offline και υπολογιστικής στοιβάς θα οδηγήσει πιθανώς στη βελτίωση της βιωσιμότητας και της λειτουργικότητας της παρακολούθησης άπνοιας ύπνου σε συνθήκες χαμηλής συνδεσιμότητας. Η αποθήκευση δεδομένων offline θα επιτρέπει στη συσκευή να αποθηκεύει τοπικά τις συλλεγμένες πληροφορίες για κάποιο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε καμία πληροφορία να μην χάνεται όταν διακόπτεται η συνδεσιμότητα. Όταν αποκατασταθεί η σύνδεση, οι πληροφορίες που ελήφθησαν θα μπορούσαν αργότερα να συγχρονιστούν με τον διακομιστή για να διατηρηθεί η χρονολογική ακολουθία των αρχείων ύπνου του χρήστη. Αυτή η δυνατότητα είναι πιο σημαντική για χρήστες σε αγροτικές περιοχές ή για εκείνους που ζουν σε περιοχές με χαμηλή σύνδεση στο διαδίκτυο, προσφέροντας στο σύστημα ευρύτερη κάλυψη για πελάτες με περιορισμένη πρόσβαση στις υπηρεσίες διαδικτύου [13].

Για αποθήκευση εκτός γραμμής, θα ήταν χρήσιμο να χρησιμοποιηθούν μνήμες χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας, όπως για παράδειγμα μνήμη flash ή SSD, που θα μπορούσαν να παρέχουν αξιόπιστη αποθήκευση δεδομένων. Αυτές οι μονάδες έχουν πολύ υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης και απαιτούν χαμηλή ισχύ, γεγονός που συνάδει με τη διατήρηση της ισχύος που παρέχει το σύστημα. Αυτό θα μπορούσε να υποστηριχθεί περαιτέρω με τη χρήση κρυπτογράφησης δεδομένων σε επίπεδο υλικού σε περιπτώσεις όπου η αποθήκευση πληροφοριών υγείας απαιτεί συμμόρφωση με τη νομοθεσία, όπως στην περίπτωση του HIPAA & GDPR. Περαιτέρω, η έξυπνη τεχνική συμπίεσης δεδομένων θα επέτρεπε στο σύστημα να αποθηκεύει περισσότερα δεδομένα από όσα μπορεί να αποθηκεύσει τώρα, ενώ παράλληλα θα κατάφερνε να παραμένει εντός του χώρου αποθήκευσης και

να διατηρεί τη συσκευή σε λειτουργία ακόμη και στην περίπτωση που η συνδεσιμότητα χάνεται για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Υπάρχει ένα επιπλέον επίπεδο βελτιστοποίησης που προσφέρει η υπολογιστική στοίβα, στο οποίο η συσκευή διαθέτει τη δυνατότητα επεξεργασίας των δεδομένων που λαμβάνει χωρίς να χρειάζεται απαραίτητα να στείλει τις λεπτομέρειες σε έναν απομακρυσμένο διακομιστή. Αυτή η προσέγγιση δεν μειώνει μόνο την καθυστέρηση, αλλά επιτρέπει και την παροχή ανατροφοδότησης σε πραγματικό χρόνο για τα αποτελέσματα και τη λήψη αποφάσεων. Για παράδειγμα, προγνωστικά, η υπολογιστική στοίβα θα επιτρέψει στο σύστημα να εντοπίσει επεισόδια άπνοιας, να ειδοποιήσει τον χρήστη ή τον φροντιστή του άμεσα, ακόμα και όταν δεν υπάρχει ενεργή σύνδεση στο διαδίκτυο. Αυτή η λειτουργικότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική για ασθενείς με σοβαρή άπνοια ύπνου, όπου η έγκαιρη παρέμβαση μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή θανάσιμων αποτελεσμάτων [22].

Ένα σύνολο βασικών εργασιών επεξεργασίας σημάτων και εξαγωγής χαρακτηριστικών, καθώς και αρχική ταξινόμηση, θα μπορούσαν να γίνονται στη συσκευή χρησιμοποιώντας αλγόριθμους χαμηλής πολυπλοκότητας. Μερικές από τις δυνατότητες καθαρισμού ακατέργαστων σημάτων ή εξαγωγής χαρακτηριστικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περιλαμβάνουν τη χρήση του ταχέως μετασχηματισμού Fourier (FFT) ή την εξομάλυνση κινούμενου μέσου όρου για τα επίπεδα αποκορεσμού οξυγόνου ή τη μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού. Αυτά τα προεπεξεργασμένα χαρακτηριστικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την αρχική αξιολόγηση, η οποία θα μπορούσε να βελτιωθεί περαιτέρω όταν τα δεδομένα μεταφορτωθούν στον κεντρικό διακομιστή. Η υπολογιστική στοίβα προσφέρει επίσης οφέλη όσον αφορά τον όγκο δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν στον διακομιστή, μειώνοντας την ανάγκη για εύρος ζώνης και κατανάλωση ενέργειας.

Ένα ακόμη όφελος της υπολογιστικής στοίβας είναι η δυνατότητα διατήρησης των πληροφοριών του χρήστη, μειώνοντας την ποσότητα δεδομένων που αποστέλλονται. Επειδή τα δεδομένα επεξεργάζονται και αποθηκεύονται τοπικά, το σύστημα μειώνει την πιθανότητα διαρροής δεδομένων κατά τη μεταφορά. Επιπλέον, το σύστημα θα μπορούσε να εφαρμόζει πρωτόκολλα ανωνυμοποίησης στο επίπεδο της συσκευής, ώστε να μεταφέρει μόνο γενικές πληροφορίες στον διακομιστή για περαιτέρω επεξεργασία. Αυτά τα μέτρα θα αυξήσουν την εμπιστοσύνη των χρηστών και την αποδοχή του συστήματος, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου ισχύουν αυστηροί νόμοι για την προστασία των δεδομένων [23].

Η ενσωμάτωσή τους σε μικροελεγκτές, για παράδειγμα, θα μπορούσε να βελτιώσει τις δυνατότητες υπολογιστικής στοίβας του συστήματος λόγω των πρόσφατων εξελίξεων στον σχεδιασμό υλικού. Οι επιταχυντές AI, όπως το Edge TPU της Google ή το JetsonNano της Nvidia, έχουν σχεδιαστεί για την εκτέλεση μοντέλων μηχανικής μάθησης σε υλικό με περιορισμένες δυνατότητες. Αν τέτοιοι επιταχυντές ενσωματωθούν σε μικροελεγκτές όπως το ESP32 ή παρόμοιο

υλικό, το σύστημα θα μπορούσε να πραγματοποιεί πιο πολύπλοκη επεξεργασία δεδομένων τοπικά, χωρίς να επιβραδύνει τη λειτουργία ή να εξαντλεί τη μπαταρία. Για παράδειγμα, εάν οι υπολογιστικές συσκευές στοίβας είναι εξοπλισμένες με επιταχυντές τεχνητής νοημοσύνης, τότε οι δομές νευρωνικών δικτύων (CNN) θα είναι σε θέση να ταξινομούν τα επεισόδια άπνοιας χρησιμοποιώντας μοτίβα ΗΚΓ ή SpO₂ σε πραγματικό χρόνο, προσθέτοντας ένα επιπλέον επίπεδο ακρίβειας στη διάγνωση[4].

Για την ενεργοποίηση του edgecomputing, το υλικολογισμικό του συστήματος θα πρέπει να τροποποιηθεί και να εξοπλιστεί με δυναμικά πλαίσια επεξεργασίας δεδομένων που μπορούν να μετατοπίζουν τα φορτία επεξεργασίας μεταξύ συσκευής και διακομιστή. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια του χρόνου χαμηλής σύνδεσης, μπορεί να είναι αρκετά συνετό να εργάζονται τοπικά και οι σημαντικές εργασίες να αναβάλλονται για αργότερα, όταν υπάρχει ενεργή σύνδεση. Από την άλλη πλευρά, όταν υπάρχει σταθερή σύνδεση, το σύστημα θα μπορούσε να μεταφέρει μεγαλύτερο μέρος του υπολογιστικού φορτίου στον κεντρικό διακομιστή προκειμένου να γίνεται καλύτερη χρήση των πόρων. Τα προσαρμοστικά πλαίσια αυτής της φύσης θα εγγυώνται επομένως την ομαλή λειτουργία σε διαφορετικά περιβάλλοντα δικτύου και, ως εκ τούτου, θα βελτιώνουν την εμπειρία του χρήστη καθώς και την αξιοπιστία του συστήματος.

Τέλος, θα πρέπει να υπάρχει η ιδέα της ενσωμάτωσης του edgecomputing με την αποθήκευση εκτός σύνδεσης για τη δημιουργία εντοπισμένων προγνωστικών μοντέλων. Αυτά τα μοντέλα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση δεδομένων που είναι αποθηκευμένα στη συσκευή, για την αναζήτηση μοτίβων ή τάσεων στην υγεία του ύπνου του χρήστη και για την έγκαιρη προειδοποίηση προβλημάτων. Για παράδειγμα, μερικές διαδοχικές νυχτερινές καταγραφές προοδευτικής μείωσης των επιπέδων οξυγόνου θα μπορούσαν να ωθήσουν το λογισμικό να συμβουλευθεί τον χρήστη να αναζητήσει ιατρική βοήθεια, ακόμη και αν τα βασικά συμπτώματα δεν έχουν εμφανιστεί ακόμη. Πρόκειται για ένα προληπτικό μέτρο που συνάδει με την τρέχουσα στροφή προς την προληπτική υγεία, όπου οι χρήστες λαμβάνουν έγκαιρες παρεμβάσεις καθώς εμφανίζονται τα νέα προβλήματα υγείας [10].

Ως εκ τούτου, ο συνδυασμός της αποθήκευσης δεδομένων εκτός σύνδεσης και του υπολογισμού άκρων στο σύστημα παρακολούθησης της άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο παρέχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: αντικειμενική αξιοπιστία, ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο και σημαντικό απόρρητο των δεδομένων. Αυτές οι εξελίξεις θα επιτρέψουν στο σύστημα να λειτουργήσει βέλτιστα σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα σύνδεσης, όπως οι πόλεις, σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα σύνδεσης, όπως οι αγροτικές περιοχές. Τα χαρακτηριστικά αυτά ελαχιστοποιούν την εξάρτηση από τους κεντρικούς διακομιστές και επιτρέπουν στη συσκευή να εκτελεί τοπικούς υπολογισμούς, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεχή επιτήρηση και επεκτείνοντας την ευελιξία του συστήματος για διάφορους χρήστες. Οι επόμενες εκδόσεις θα πρέπει να το επεκτείνουν αυτό,

χρησιμοποιώντας βελτιώσεις στο υλικό και το λογισμικό για τη δημιουργία μιας πιο ανθεκτικής και αποτελεσματικής λύσης για τη διαχείριση της υγείας του ύπνου.

5.2.4 Διευρυμένη Κλινική Επικύρωση

Παρόλο που τα πρώτα πειράματα έδειξαν ότι το ανεπτυγμένο σύστημα παρουσιάζει πολύ υψηλή ακρίβεια, απαιτούνται περαιτέρω κλινικές δοκιμές για να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητά του σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου. Η περαιτέρω έρευνα θα πρέπει να περιλαμβάνει ανθρώπους διαφορετικής ηλικίας και φύλου, καθώς και άτομα με διαφορετικές παθήσεις, όπως παιδιά, ηλικιωμένους και άτομα με χρόνιες ασθένειες, όπως η παχυσαρκία και ο διαβήτης. Αυτές οι δοκιμές θα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του συστήματος, όταν αυτό υποβάλλεται σε ποικίλες ανάγκες των χρηστών και διαφορετικές φυσιολογικές συνθήκες.

Άλλες σχεδιαστικές προσεγγίσεις που είναι σημαντικές για την αξιολόγηση του συστήματος περιλαμβάνουν τις διαχρονικές μελέτες, οι οποίες επιτρέπουν την αξιολόγηση του συστήματος σε βάθος χρόνου. Η παρατήρηση συμμετεχόντων για μεγάλες χρονικές περιόδους θα διευκόλυνε την εκτίμηση της αποτελεσματικότητάς του στην παρακολούθηση της εξέλιξης των διαταραχών ύπνου, της αποδοτικότητας των παρεμβάσεων και των πληροφοριών που θα ήταν χρήσιμες για τη μακροπρόθεσμη διαχείριση της κατάστασης. Τα επόμενα βήματα για το σύστημα παρακολούθησης της άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο είναι να αυξηθεί το εύρος και το βάθος των κλινικών δοκιμών για να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος και να εντοπιστούν επιπλέον πληθυσμοί που μπορεί να επωφεληθούν από την τεχνολογία. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι η τρέχουσα μελέτη έχει διαπιστώσει υψηλή ευαισθησία και ειδικότητα του συστήματος, αλλά απαιτούνται περισσότερες αξιολογήσεις για να επιβεβαιωθεί η απόδοση του συστήματος αυτού στην καθημερινή κλινική και μη κλινική πρακτική. Μια σημαντική παρατήρηση αυτών των δοκιμών περιλαμβάνει τη διεξαγωγή των δοκιμών με ερωτηθέντες από διάφορες δημογραφικές ομάδες, ιδίως παιδιά, ηλικιωμένους και ασθενείς με ορισμένες παθήσεις, συμπεριλαμβανομένης της παχυσαρκίας, καθώς και χρόνιες ασθένειες όπως ο διαβήτης. Αυτοί οι πληθυσμοί διατρέχουν υψηλότερο κίνδυνο να αναπτύξουν διαταραχή της αναπνοής στον ύπνο και είναι σημαντικό να καταγραφεί ο τρόπος με τον οποίο το σύστημα τροποποιείται για να τους φιλοξενήσει [1].

Μια άλλη σκέψη για μελλοντικές δοκιμές θα είναι να αξιολογηθεί η χρησιμότητα του συστήματος σε παιδιατρικούς ασθενείς. Η υπνική άπνοια στα παιδιά είναι μια κατάσταση που δεν διαγιγνώσκεται καλά και μπορεί να οδηγήσει σε αναπτυξιακά προβλήματα, προκλήσεις συμπεριφοράς και καρδιαγγειακές παθήσεις. Η απόδοση του συστήματος για την ανίχνευση της άπνοιας στα παιδιά θα πρέπει να συγκριθεί με τις φυσιολογικές διαφορές των παιδιών, συμπεριλαμβανομένων των υψηλότερων καρδιακών παλμών και των χαμηλότερων όγκων των πνευμόνων. Μπορεί να χρειαστεί να σχεδιαστούν και να επικυρωθούν πρόσθετοι αλγόριθμοι για να

διατηρηθεί η εξειδίκευση του συστήματος στον εντοπισμό επεισοδίων άπνοιας σε αυτόν τον πληθυσμό [16].

Παρόλο που τα πρώτα πειράματα έδειξαν ότι το ανεπτυγμένο σύστημα παρουσιάζει πολύ υψηλή ακρίβεια, απαιτούνται περαιτέρω κλινικές δοκιμές για να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητά του σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου. Η περαιτέρω έρευνα θα πρέπει να περιλαμβάνει ανθρώπους διαφορετικής ηλικίας και φύλου, καθώς και άτομα με διαφορετικές παθήσεις, όπως παιδιά, ηλικιωμένους και άτομα με χρόνιες ασθένειες, όπως η παχυσαρκία και ο διαβήτης. Αυτές οι δοκιμές θα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του συστήματος όταν αυτό υποβάλλεται σε ποικίλες ανάγκες χρηστών και διαφορετικές φυσιολογικές συνθήκες.

Άλλες σχεδιαστικές προσεγγίσεις που είναι σημαντικές για την αξιολόγηση του συστήματος περιλαμβάνουν τις διαχρονικές μελέτες, οι οποίες επιτρέπουν την αξιολόγηση του συστήματος σε βάθος χρόνου. Η παρακολούθηση συμμετεχόντων για μεγάλες χρονικές περιόδους θα διευκόλυνε την εκτίμηση της αποτελεσματικότητάς του στην παρακολούθηση της εξέλιξης των διαταραχών ύπνου, της αποδοτικότητας των παρεμβάσεων και των πληροφοριών που θα ήταν χρήσιμες για τη μακροπρόθεσμη διαχείριση της κατάστασης.

Τα επόμενα βήματα για το σύστημα παρακολούθησης της άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο είναι να αυξηθεί το εύρος και το βάθος των κλινικών δοκιμών για να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητά του συστήματος και να εντοπιστούν πρόσθετοι πληθυσμοί που μπορεί να επωφεληθούν από την τεχνολογία. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι η τρέχουσα μελέτη έχει καθιερώσει υψηλή ευαισθησία και ειδικότητα του συστήματος, αλλά απαιτούνται περισσότερες αξιολογήσεις για να επιβεβαιωθεί η απόδοση αυτού του συστήματος στην καθημερινή κλινική και μη κλινική πρακτική. Ένα σημαντικό συστατικό αυτών των δοκιμών περιλαμβάνει την παρακολούθηση μιας διατομής του πληθυσμού των διαφόρων κατηγοριών, όπως είναι τα παιδιά, οι ηλικιωμένοι και οι ειδικές ομάδες υγείας που περιλαμβάνουν τα υπερβολικά βάρη ή τον διαβητικό πληθυσμό. Αυτοί οι πληθυσμοί διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο να αναπτύξουν αναπνοή με διαταραχή του ύπνου και είναι σημαντικό να καταγράψουμε τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα τροποποιείται για να τους φιλοξενήσει [1]. Μια άλλη σκέψη για μελλοντικές δοκιμές θα είναι η αξιολόγηση της χρησιμότητας του συστήματος σε παιδιατρικούς ασθενείς.

Η άπνοια ύπνου στα παιδιά είναι μια κατάσταση που δεν είναι καλά διαγνωσμένη και μπορεί να οδηγήσει σε αναπτυξιακά προβλήματα, προκλήσεις συμπεριφοράς και καρδιαγγειακές παθήσεις. Η απόδοση του συστήματος για την ανίχνευση άπνοιας στα παιδιά πρέπει να συγκριθεί με τις φυσιολογικές διαφορές των παιδιών, συμπεριλαμβανομένων υψηλότερων καρδιακών παλμών και χαμηλότερων όγκων πνευμόνων. Πρόσθετοι αλγόριθμοι μπορεί να χρειαστεί να σχεδιαστούν και να επικυρωθούν για να διατηρηθεί η ιδιαιτερότητα του συστήματος στον εντοπισμό επεισοδίων άπνοιας σε αυτόν τον πληθυσμό [16].

5.2.5 Ενσωμάτωση στις Κλινικές Ροές Εργασίας

Η επέκταση του συστήματος στην κλινική πρακτική θα βελτιώνει την εφαρμοσιμότητά του και θα εγγυόταν τη χρήση του. Η ανεπαρκής προσοχή στη δημιουργία τυποποιημένων μορφών και πιθανών δομών για την ανταλλαγή δεδομένων αποτελεί επίσης σημαντική ανησυχία, κάτι που απαιτεί μεγαλύτερο φιλτράρισμα σε συνεργασία με γενικούς ιατρούς και άλλους παρόχους φροντίδας. Τέτοια βήματα θα παρείχαν συγχρονισμό δεδομένων σχεδόν σε πραγματικό χρόνο μεταξύ του συστήματος παρακολούθησης και των Ηλεκτρονικών Φακέλων Υγείας (EHR), παρέχοντας στους κλινικούς ιατρούς πληροφορίες που ενισχύουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Επιπλέον, οι συνεργασίες με ιδρύματα υγειονομικής περίθαλψης θα μπορούσαν να επιλύσουν το ζήτημα της συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις της νομοθεσίας και των διεθνών προτύπων, όπως ο Γενικός Κανονισμός Προστασίας Δεδομένων (GDPR) και ο Νόμος για τη Φορητότητα και Λογοδοσία της Ασφάλισης Υγείας (HIPAA). Αυτές οι συνεργασίες θα προσέφεραν επίσης την ευκαιρία ανάπτυξης κοινών κλινικών πρωτοκόλλων για τη χρήση του συστήματος στη διάγνωση και τον προγραμματισμό θεραπείας.

Το σύστημα παρακολούθησης αποφρακτικής άπνοιας ύπνου σε πραγματικό χρόνο πρέπει να ενσωματωθεί στις κλινικές ροές εργασίας, γεγονός που παρουσιάζει τεχνικά και διαδικαστικά ζητήματα προς επίλυση. Ένας σημαντικός τομέας εστίασης είναι η δημιουργία μιας κοινής διεπαφής ανταλλαγής δεδομένων που να είναι συμβατή με τα περισσότερα συστήματα EHR. Ωστόσο, με την υιοθέτηση τυποποιημένων πρωτοκόλλων, όπως το Health LevelSeven (HL7) ή το FastHealthcareInteroperabilityResources (FHIR), το σύστημα θα μπορούσε να τροφοδοτεί δεδομένα ύπνου στον φάκελο ασθενούς σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας στους επαγγελματίες υγείας χρήσιμες πληροφορίες [21]. Αυτή η ενσωμάτωση θα ενίσχυε την ικανότητα των κλινικών να αξιολογούν την υγεία του ύπνου σε συνάρτηση με άλλες υπάρχουσες ιατρικές καταστάσεις, μια στρατηγική που θα συνέβαλε σημαντικά στη βελτίωση των αυξανόμενων προβλημάτων υγείας.

Το σύστημα θα μπορούσε να βελτιωθεί με την προσθήκη εργαλείων αυτοματοποιημένης δημιουργίας αναφορών που παρέχουν μορφοποιημένες αναφορές δεδομένων ύπνου, συμπεριλαμβανομένων των τάσεων AHI, των επιπέδων κορεσμού οξυγόνου και της μεταβλητότητας του καρδιακού ρυθμού. Οι εκθέσεις αυτές μπορούν να αναπτυχθούν ώστε να ακολουθούν τις κατευθυντήριες γραμμές κλινικής τεκμηρίωσης και να εξοικονομούν χρόνο και προσπάθεια των ιατρών για την ανάλυση και την ενσωμάτωση των δεδομένων στη διαδικασία θεραπείας. Επιπλέον, η κοινοποίηση τέτοιων σημαντικών συμβάντων, όπως η μακρά ανδρομέλεια ή η σοβαρή μείωση της οξυμετρίας, θα μπορούσε να στείλει ειδοποιήσεις για τέτοιους ασθενείς που θα μπορούσαν να βοηθήσουν τις ομάδες υγειονομικής περίθαλψης να χειριστούν κλιμακούμενες περιπτώσεις.

Η προσθήκη της λειτουργικότητας της τηλεϊατρικής στο σύστημα μπορεί να ενισχύσει τη συμβατότητα του συστήματος με τις κλινικές ροές εργασίας. Για παράδειγμα, τα δεδομένα που

συλλέγονται από το σύστημα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν με ειδικούς σε θέματα ύπνου σε τηλεδιαβούλευση για τη διάγνωση ή την ανάπτυξη ενός σχεδίου θεραπείας. Θα εκτιμηθεί από τους ασθενείς που δεν μπορούν να έχουν εύκολη πρόσβαση σε εξειδικευμένα κέντρα ύπνου λόγω γεωγραφικής θέσης, όπως συμβαίνει με τους αγροτικούς ή υποεξυπηρετούμενους ασθενείς. Η ενσωμάτωση της τηλεϊατρικής θα επέτρεπε επίσης τη συνεχή παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας της θεραπείας των ασθενών, για παράδειγμα στην προσαρμογή των ρυθμίσεων της θεραπείας CPAP με βάση τα δεδομένα της προηγούμενης νύχτας [22].

Τέλος, η υποδοχή των οργανισμών υγειονομικής περίθαλψης για τη διεξαγωγή πιλοτικών μελετών σε πραγματικές κλινικές συνθήκες θα δώσει σημαντικό βήμα για την κατανόηση των σημαντικών πλεονεκτημάτων και δυσκολιών της χρήσης του συστήματος σε μεγάλη κλίμακα. Αυτές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τομείς που χρήζουν βελτίωσης, για παράδειγμα, πώς τα δεδομένα θα μπορούσαν να παρουσιαστούν σε πιο εύκολα κατανοητή μορφή για τους κλινικούς ιατρούς ή πώς το σύστημα θα μπορούσε να ενσωματωθεί στο τρέχον διαρθρωτικό πλαίσιο του νοσοκομείου. Εάν ληφθούν υπόψη αυτές οι πτυχές, το σύστημα θα μπορούσε να συμπληρώσει τη διαδικασία της κλινικής εργασίας και να αλλάξει την προσέγγιση στη διάγνωση και τη θεραπεία των διαταραχών του ύπνου.

5.2.6 Δεοντολογικά ζητήματα και απόρρητο

Δεδομένου ότι το σύστημα περιλαμβάνει τη συλλογή προσωπικών πληροφοριών υγείας πρέπει να τεθούν σε εφαρμογή μέτρα απορρήτου για τη διασφάλιση του απορρήτου του χρήστη και την ηθική ορθότητα. Ορισμένες συστάσεις που μπορούν να γίνουν σε σχέση με αυτό είναι ότι τα δεδομένα πρέπει να προστατεύονται κατά τη μετάδοση και την αποθήκευση με τη χρήση ορισμένων χαρακτηριστικών, όπως η κρυπτογράφηση και η ανωνυμοποίηση. Υπάρχει ανάγκη για πολιτικές χρήσης δεδομένων όσον αφορά τη συναίνεση των χρηστών για την ενίσχυση της εμπιστοσύνης και κατά συνέπεια την αύξηση της χρήσης.

Η χρήση της τεχνολογίας πληροφοριών υγείας σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες μικροεπεξεργαστών, όπου τα συστήματα δεδομένων υγείας ενσωματώνονται σε προσωπικά αρχεία υγείας και συσκευές παρακολούθησης, εγείρει σημαντικά ερωτήματα ηθικής και ιδιωτικότητας. Το CWS απαιτεί προστασία και ασφαλή χειρισμό των πληροφοριών υγείας του χρήστη και ως εκ τούτου η συλλογή, μετάδοση και αποθήκευση τέτοιων πληροφοριών συνεπάγεται αυστηρά μέτρα προστασίας για την κάλυψη των προσδοκιών απορρήτου και των ηθικών απαιτήσεων του χρήστη. Λόγω της ευαίσθητης φύσης των δεδομένων, πρέπει να τηρείται αυστηρός βαθμός απορρήτου για να διασφαλιστεί ότι τα δεδομένα χρήστη δεν διακυβεύονται.

Μεταξύ των βασικών ηθικών ανησυχιών, όταν ασχολούμαστε με δεδομένα υγείας, το ζήτημα της προστασίας της ιδιωτικής ζωής τίθεται στην κορυφή. Τα βιομετρικά δεδομένα του ανθρώπινου σώματος όπως ο καρδιακός ρυθμός, η αρτηριακή πίεση και άλλα αρχεία υγείας είναι από τη φύση

τους ιδιωτικές πληροφορίες. Μια παραβίαση της ιδιωτικής ζωής σε αυτό το πλαίσιο μπορεί να οδηγήσει σε ακραίες κυρώσεις όπως η επιρρέπεια ταυτότητας στην κλοπή, οι διακρίσεις και η παράνομη χρήση του υλικού. Για την ελαχιστοποίηση αυτών των κινδύνων, η εφαρμογή κρυπτογράφησης υψηλού επιπέδου είναι αναπόφευκτη. Η κρυπτογράφηση από τη μια συσκευή στην άλλη καθώς και από τη συσκευή αποθήκευσης σε μια άλλη καθιστά αδύνατη την ανάγνωση των δεδομένων από ένα μη εξουσιοδοτημένο άτομο [24]. Επίσης, τα δεδομένα που διατηρούνται ακίνητα, ειδικά όταν τέτοια δεδομένα αποθηκεύονται στο cloud ή σε τοπικές συσκευές, θα πρέπει να κωδικοποιούνται ώστε να διασφαλίζεται ότι σε περίπτωση κυβερνοεπίθεσης, ο εισβολέας δεν θα έχει εύκολη πρόσβαση [24]. Αυτές οι τεχνικές κρυπτογράφησης διασφαλίζουν επίσης ότι, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι τα δεδομένα υποκλαπούν, παραμένουν ακατανόητα χωρίς το μέσο αποκρυπτογράφησης.

Η αρχή της αυτονομίας των χρηστών είναι κεντρική στις ηθικές πρακτικές δεδομένων. Οι χρήστες πρέπει να έχουν το δικαίωμα να ελέγχουν τα δικά τους δεδομένα, συμπεριλαμβανομένης της πρόσβασης σε αυτά και της δυνατότητας να τα διαγράψουν όταν το επιθυμούν. Η έννοια του «δικαιώματος στη λήθη», όπως καθιερώθηκε βάσει του Γενικού Κανονισμού Προστασίας Δεδομένων (GDPR) στην Ευρώπη, προσφέρει ένα νομικό πλαίσιο στους χρήστες να ζητήσουν τη διαγραφή των προσωπικών τους δεδομένων [6]. Η εφαρμογή αυτού του δικαιώματος στα συστήματα δεδομένων υγείας επιτρέπει στους χρήστες να διατηρούν τον έλεγχο των πληροφοριών τους και να αποτρέπουν τη χρήση δεδομένων χωρίς τη συγκατάθεσή τους.

Εκτός από αυτές τις τεχνικές και διαδικαστικές διασφαλίσεις, οι οργανισμοί πρέπει να διασφαλίζουν ότι οι ηθικοί προβληματισμοί επεκτείνονται και στον αντίκτυπο της συλλογής δεδομένων στις περιθωριοποιημένες κοινότητες. Ο ηθικός σχεδιασμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον τρόπο με τον οποίο η τεχνολογία μπορεί να προσφέρει δυσανάλογα άλλη χρήσιμη μέθοδο για την αποτροπή των ταυτοτήτων των χρηστών είναι μέσω τεχνικών ανωνυμοποίησης. Η αποταυτοποίηση δεδομένων ελαχιστοποιεί τις προσωπικές πληροφορίες από τα σύνολα δεδομένων υγείας, καθιστώντας δύσκολη την ταυτοποίηση των ατόμων που εμπλέκονται. Μπορεί να γίνει μέσω κάλυψης δεδομένων, όπου συγκεκριμένες πληροφορίες θα αντικατασταθούν με σύμβολα. Άλλοι τρόποι περιλαμβάνουν την k-ανωνυμία όπου οποιαδήποτε δεδομένα δεν μπορούν να συσχετιστούν με λιγότερα από «k» άτομα [25]. Η διαδικασία της ανωνυμοποίησης συμβάλλει στο ζήτημα της χρήσης δεδομένων σε ερευνητικές ανακαλύψεις και αναλύσεις, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι η «ταυτότητα των ατόμων είναι συσκοτισμένη, ενισχύοντας έτσι την εμπιστοσύνη μεταξύ των χρηστών και των παρόχων υγειονομικής περίθαλψης.

Γι' αυτό, είναι κρίσιμο να δημιουργηθεί μια ηθική βάση για τον προσδιορισμό της χρήσης δεδομένων υγείας μέσω διαφανών πολιτικών προσφοράς και κατανάλωσης. Τα άτομα πρέπει να ενημερώνονται για τον τρόπο επεξεργασίας των δεδομένων τους, με ποιους τρόπους θα διατηρηθούν

και με ποιους θα κοινοποιηθούν, συμπεριλαμβανομένων τρίτων. Αυτές οι πολιτικές πρέπει να είναι καλά γραμμένες και εύκολα κατανοητές, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται νομική γλώσσα κατά την προετοιμασία αυτών των πολιτικών. Οι χρήστες μπορούν στη συνέχεια να επιλέξουν πόσα δεδομένα είναι διατεθειμένοι να μοιραστούν και τη συμμετοχή τους κάνοντας τη διαδικασία χρήσης δεδομένων όσο το δυνατόν πιο διαφανή [17]. Επιπλέον, θα πρέπει να λαμβάνεται πριν από τη συλλογή δεδομένων από τους χρήστες, έτσι ώστε οι χρήστες να είναι πλήρως ενημερωμένοι και πρόθυμοι οι συμμετέχοντες σχετικά με τον τρόπο χρήσης των δεδομένων τους. Το μοντέλο συναίνεσης θα πρέπει να είναι διαρκές, ώστε οι χρήστες να μπορούν να αποσύρουν ή να τροποποιούν τη συγκατάθεσή τους ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Αυτή η προσέγγιση δυναμικής συναίνεσης θεωρείται ηθική βέλτιστη πρακτική και σημαίνει ότι οι άνθρωποι παραμένουν υπό τον έλεγχο των δεδομένων τους, ιδιαίτερα εκείνες με περιορισμένη πρόσβαση στην υγειονομική περίθαλψη ή την τεχνολογία[17]. Είναι σημαντικό να αποφεύγονται προκαταλήψεις στη συλλογή δεδομένων υγείας που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ανακριβή ή άδικα συμπεράσματα. Για παράδειγμα, εάν οι συσκευές παρακολούθησης της υγείας έχουν σχεδιαστεί με στενή εστίαση σε μια συγκεκριμένη δημογραφική ομάδα, ενδέχεται να μην αντιπροσωπεύουν επαρκώς τις ανάγκες υγείας άλλων ομάδων[10]. Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός, που διασφαλίζει ότι λαμβάνεται υπόψη ένα ευρύ φάσμα αναγκών των χρηστών, συμβάλλει στον μετριασμό αυτών των κινδύνων.

Τελευταίο αλλά όχι λιγότερο σημαντικό, οι έλεγχοι και οι αξιολογήσεις των πρακτικών απορρήτου απαιτούνται συνεχώς για να βεβαιωθείτε ότι όλα τα συστήματα συμμορφώνονται με τους κανόνες δεοντολογίας καθώς και με τους νόμους περί απορρήτου. Αυτοί οι έλεγχοι μπορούν να βοηθήσουν στον προσδιορισμό των κενών και να εγγυηθούν ότι οι αντίστοιχες αλλαγές απορρήτου στις πολιτικές και τις διαδικασίες προσαρμόζονται στους νέους κινδύνους και στη μετατόπιση των νομικών συνθηκών υπερωρίας. Απαιτείται στοχαστική παρακολούθηση για τη διατήρηση των δεδομένων των πελατών απόρρητα και την τήρηση των δεοντολογικών κανόνων των πολιτικών απορρήτου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Έτσι, η παρούσα έρευνα δείχνει ότι τα ηθικά διλήμματα και οι ανησυχίες για το απόρρητο είναι ζωτικής σημασίας για την εξέταση των συστημάτων παρακολούθησης της υγείας. Αυτό θα διασφάλιζε επίσης ότι το απόρρητο επιτυγχάνεται με την εφαρμογή εργαλείων όπως η ισχυρή κρυπτογράφηση, οι τεχνικές ανωνυμοποίησης και η λεπτομερής χρήση των πολιτικών δεδομένων και ο έλεγχος των πληροφοριών υγείας στους χρήστες, και έτσι μπορεί να εδραιωθεί η εμπιστοσύνη των χρηστών στους παρόχους υγείας τους. Η εφαρμογή αυτών των μέτρων θα χρησιμεύσει επίσης για την προστασία του απορρήτου των χρηστών, ενώ παράλληλα θα κάνει το σύστημα στο σύνολό του πιο ηθικό και θα σέβεται την αυτονομία του χρήστη.

5.2.7 Βελτιωμένη διεπαφή χρήστη και προσβασιμότητα

Η χρήση της διεπαφής που βασίζεται στον ιστό είναι επικείμενη, καθώς είναι εύκολη στη χρήση, αλλά θα μπορούσε να επεκταθεί περισσότερη προσπάθεια όσον αφορά τη χρηστικότητα και τη δημιουργικότητα. Πρόσθετες λειτουργίες που προστίθενται στο σύστημα είναι οι επιλογές φωνής, η διαθεσιμότητα πολλαπλών γλωσσών και μια άλλη επιλογή που είναι προσβάσιμη στους τυφλούς χρήστες. Μεμονωμένες συστάσεις σχετικά με τα πρότυπα ύπνου θα μπορούσαν να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες και να ενθαρρύνουν τους χρήστες να αλλάξουν κάτι στην καθημερινή τους ρουτίνα. Οι επόμενες εκδόσεις της διεπαφής θα μπορούσαν επίσης να ενσωματώσουν χαρακτηριστικά παιχνιδιού, π.χ. σημάδια προόδου και εξωτερικά κίνητρα που ενθαρρύνουν τους στόχους ύπνου. Τέτοιες πτυχές θα ενίσχυαν την αλληλεπίδραση των χρηστών καθώς και τη συμμόρφωση με την πρακτική της παρακολούθησης.

Η βελτίωση της εμπειρίας χρήστη (UE) των συστημάτων παρακολούθησης της υγείας είναι κρίσιμη για την ενίσχυση της προθυμίας των ανθρώπων να τηρούν τα πρωτόκολλα και τις συστάσεις υγείας. Προς το παρόν, η τρέχουσα διαδικτυακή διεπαφή προσφέρει τις βασικές λειτουργίες και την απλότητα στη χρήση, αλλά υπάρχει μεγάλη δυνατότητα βελτίωσης της προσβασιμότητας για άτομα με αναπηρίες. Φαίνεται ότι με την προσθήκη επιλογών φωνητικών εντολών και πολυγλωσσικής υποστήριξης και άλλων λύσεων τεχνικής προσβασιμότητας στα βοηθητικά προγράμματα διεπαφής, θα μπορούσε να ωφελήσει περισσότερους χρήστες με αναπηρίες και εκείνους για τους οποίους τα αγγλικά δεν είναι η πρώτη τους γλώσσα.

Οι φωνητικές εντολές είναι μια νέα δυνατότητα που προσθέτει στην προσβασιμότητα και αποτελεί εξαιρετική προσθήκη για χρήστες με προβλήματα όρασης ή άλλες δυσκολίες στη χρήση πληκτρολογίου ή οθόνης αφής. Μέσω της χρήσης αναγνώρισης φωνής, οι άνθρωποι μπορούν να ελέγχουν το σύστημα χωρίς να χρησιμοποιούν τα χέρια τους, γεγονός που κάνει το πρόγραμμα πιο φιλικό. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για ηλικιωμένους ή άτομα με ειδικές ανάγκες που μπορεί να έχουν προβλήματα με την κίνηση μέσω της γραφικής διεπαφής χρήστη [21]. Τα συστήματα με δυνατότητα φωνής βελτιώνουν επίσης την εμπειρία χρήστη, επειδή ο χρήστης δεν χρειάζεται να πλοηγηθεί προς τη διεπαφή για να εκτελέσει ένα ερώτημα ή να λάβει μια υπενθύμιση ή να ξεκλειδώσει μια συγκεκριμένη λειτουργία από το μενού.

Ένα από τα πράγματα σχετικά με το σύστημα είναι ότι πρέπει να φιλοξενήσει πολλές γλώσσες για να υποστηρίζονται επίσης. Δεδομένου ότι οι τεχνολογίες στον τομέα της υγείας εφαρμόζονται σε όλο τον κόσμο, είναι σημαντικό να επιτραπεί στη διεπαφή να υποστηρίζει πολλές γλώσσες και αυτό θα ωφελήσει περισσότερους χρήστες του συστήματος. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν υπάρχουν πολλές γλωσσικές κοινότητες στην περιοχή. Εκτός από τη βελτίωση της χρηστικότητας, η υποστήριξη γλώσσας πολλαπλών ετικετών κάνει τους χρήστες να συμμετέχουν πλήρως στο σύστημα, καθώς προτιμούν τις υποστηριζόμενες γλώσσες. Μερικοί από τους συγγραφείς ανέφεραν ότι είναι

απαραίτητο να αναπτυχθούν πολύγλωσσες διεπαφές που θα βελτιώσουν τη χρηστικότητα και την υγεία των χρηστών σε διαφορετικούς πολιτισμούς [16]. Για παράδειγμα, γλώσσες όπως τα ισπανικά, τα μανδαρινικά και τα αραβικά θα ήταν χρήσιμες και θα έκαναν το σύστημα δημοφιλές στην παγκόσμια αγορά.

Μια άλλη πρόοδος για να γίνει η σχεδίαση πιο καθολική είναι η συμπερίληψη λειτουργιών για χρήστες με προβλήματα όρασης. Συχνά, αυτές οι δυνατότητες μπορεί να περιλαμβάνουν τη σύνθεση προγραμμάτων ανάγνωσης οθόνης που διαβάζουν το εμφανιζόμενο κείμενο, συνδυασμούς χρωμάτων που κάνουν διαφοροποίηση μεταξύ υψηλής και χαμηλής αντίθεσης και μεγάλων γραμματοσειρών που μπορούν να διαβαστούν εύκολα. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας υπολογίζει ότι 1.2 δισεκατομμύρια άνθρωποι πάσχουν από προβλήματα όρασης παγκοσμίως και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι τεχνολογίες υγείας πρέπει να σχεδιαστούν ώστε να είναι προσβάσιμες. Η χρήση αυτών των χαρακτηριστικών σημαίνει ότι τα άτομα με αναπηρίες θα μπορούν να επωφεληθούν πλήρως από τα συστήματα παρακολούθησης της υγείας.

Μια άλλη χρήσιμη βελτίωση είναι η δυνατότητα παροχής συστάσεων σύμφωνα με το πρόγραμμα ύπνου κάθε συμμετέχοντα; μπορεί επίσης να φέρει περισσότερους ανθρώπους να ασχοληθούν με την εφαρμογή και να κάνουν πιο υγιεινές επιλογές. Με την πάροδο του χρόνου, το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει τα δεδομένα που συλλέγονται από έναν χρήστη για να παρέχει προτάσεις για τη βελτίωση της ποιότητας του ύπνου του, για παράδειγμα, σχετικά με την επιλογή του περιβάλλοντος στο οποίο θα κοιμηθεί το άτομο ή τη χρήση τεχνικών χαλάρωσης. Ενώ τα ευρήματα της μελέτης δείχνουν ότι οι εξατομικευμένες συστάσεις που σχετίζονται με την υγεία μπορούν να βοηθήσουν τους χρήστες να κάνουν αλλαγές για να βελτιώσουν την υγεία τους, αναμένεται ότι ένα τέτοιο σύστημα είναι πιθανό να αυξήσει την αφοσίωση του χρήστη και τις μακροπρόθεσμες θετικές αλλαγές που σχετίζονται με την υγεία.

Αυτές οι συστάσεις μπορεί να είναι μια συγκεκριμένη διαδικασία που μπορεί να αντικατοπτρίζει ορισμένες παραμέτρους ύπνου, για παράδειγμα, τον χρόνο που αφιερώνει κάποιος στον ύπνο, τους κύκλους ύπνου ή τα γεγονότα αφύπνισης και να παρέχει στην κοινότητα έναν πραγματικά εξατομικευμένο τρόπο παρακολούθησης της υγείας του. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση τέτοιων στοιχείων όπως δείκτες προόδου και ανταμοιβές θα αυξήσει σημαντικά το ενδιαφέρον των χρηστών. Ως εκ τούτου, οι προσεγγίσεις παιχνιδιού όπως η χρήση σημάτων, πόντων και πινάκων βαθμολογίας που έχουν χρησιμοποιηθεί για να επηρεάσουν τα κίνητρα και τη συμπεριφορά των χρηστών βελτιώνουν τη συμμόρφωση με τη συμπεριφορά στην υγεία [6]. Όταν εφαρμόζεται στην παρακολούθηση ύπνου, μπορεί να εφαρμοστεί για την ενθάρρυνση της χρήσης μιας συγκεκριμένης εφαρμογής ή ενός υποτιθέμενου αριθμού ωρών για ύπνο κάθε βράδυ. Τέτοιες ανταμοιβές μπορεί να είναι υλικές, όπως εκπαιδευτικά κουπόνια για προϊόντα ή υπηρεσίες υγείας, ή μη υλικές, όπως ηλεκτρονικές λειτουργίες ή διακρίσεις εντός του συστήματος. Η αξιοποίηση του

εγγενούς κινήτρου των χρηστών στην προσέγγιση καθιστά το έργο της παρακολούθησης της υγείας μια διασκεδαστική υπόθεση που πιθανότατα θα παρακινήσει τους χρήστες, καθιστώντας έτσι την αλλαγή προς τις πιο υγιεινές συνήθειες ύπνου δέσμευση για όλη τη ζωή.

Συμπερασματικά, οι επιπτώσεις της ενίσχυσης της ευκολίας και της λειτουργικότητας των τεχνολογιών παρακολούθησης της υγείας στους χρήστες έχουν εντοπιστεί ότι έχουν υψηλές δυνατότητες ενίσχυσης της ικανοποίησης των χρηστών και προώθησης της βελτίωσης της υγείας. Εάν μπορούν να προστεθούν φωνητικές εντολές, υποστήριξη πολλών γλωσσών και στοιχεία για άτομα με ειδικές ανάγκες, το σύστημα μπορεί να είναι πιο ανοιχτό. Επιπλέον, η παροχή εξατομικευμένων συμβουλών ύπνου και η χρησιμοποίηση μιας ιδέας παιχνιδιοποίησης θα αυξήσει επίσης τη συμμόρφωση των ανθρώπων, καθώς και θα επηρεάσει θετικά την υγεία των ανθρώπων. Αυτές οι βελτιώσεις διασφαλίζουν ότι οι τεχνολογίες υγείας είναι διαθέσιμες σε ποικίλο πληθυσμό και ότι ενθαρρύνονται οι θετικές αλλαγές στην υγεία.

5.2.8 Μείωση κόστους και επεκτασιμότητα

Έτσι, για να καταστεί το σύστημα περισσότερο διαθέσιμο σε μεγαλύτερο αριθμό ατόμων, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες, θα πρέπει να δοθεί έμφαση στη μείωση του κόστους παραγωγής. Μερικές από τις προσεγγίσεις που θα μπορούσαν να υιοθετηθούν για να πραγματοποιηθεί αυτό περιλαμβάνουν την παραγωγή σε μεγάλες ποσότητες, τη χρήση ανάπτυξης λογισμικού ανοιχτού κώδικα και τη διαμόρφωση στρατηγικής εταιρικής σχέσης με μη κυβερνητικούς οργανισμούς.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι το ζήτημα της επεκτασιμότητας. Είναι σημαντικό ο σχεδιασμός του συστήματος να επιτρέπει την ενσωμάτωση νέων λειτουργιών σε όλη τη διάρκεια ή τον χειρισμό περισσότερων δεδομένων χωρίς σημαντική μείωση της ταχύτητας. Αυτή η ευελιξία θα βοηθούσε στη διατήρηση της συνεχούς εφαρμογής του συστήματος δεδομένων των συνεχώς αναδυόμενων τεχνολογιών και των αναγκών του τελικού χρήστη.

Έτσι, για να υιοθετηθούν συστήματα παρακολούθησης της υγείας στην κοινότητα, ιδιαίτερα στον αναπτυσσόμενο κόσμο, το κόστος εφαρμογής των συστημάτων θα πρέπει να μειωθεί. Ωστόσο, το υψηλό κόστος παραγωγής τέτοιων συστημάτων μπορεί να τα καταστήσει προφυλαγμένα από τις λίγες εγκαταστάσεις υγείας σε υπανάπτυκτες περιοχές όπου η διαθεσιμότητα εγκαταστάσεων υγείας είναι σπάνια. Μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες στρατηγικές για τη διαχείριση αυτών των δαπανών, διατηρώντας ταυτόχρονα την αποτροπή της αποτελεσματικότητας και του προτύπου του συστήματος.

Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης του κόστους είναι το LearnedCost, το οποίο συνεχίζει να μειώνει το κόστος ανά μονάδα καθώς παράγονται όλο και περισσότεροι αριθμοί παρόμοιων συσκευών ταυτόχρονα. Είναι η παραγωγή μεγάλου κύκλου που εξασφαλίζει τη συσσώρευση μεγάλου αριθμού παρόμοιων προϊόντων, γεγονός που επιτρέπει την επίτευξη οικονομιών κλίμακας – το κόστος

ανά μεμονωμένη μονάδα παραγωγής μειώνεται καθώς παράγονται περισσότερες μονάδες [23]. Το σύστημα θα μπορούσε να γίνει φθηνότερο, επομένως πιο προσιτό σε ένα ευρύτερο κοινό, εάν το υλικό μπορούσε να αναπτυχθεί σε συνεργασία με άλλους κατασκευαστές ή εάν η παραγωγή μπορούσε να γίνει σε εγκαταστάσεις παραγωγής που ανήκουν σε άλλες εταιρείες. Επιπλέον, η αγορά σε μεγάλες ποσότητες άλλων συνδεδεμένων αντικειμένων, όπως αισθητήρων και επεξεργαστών, θα είχε ως αποτέλεσμα πρόσθετη μείωση του κόστους κατασκευής, η οποία και πάλι θα αντανakλούσε στην εξοικονόμηση πόρων των πελατών. Αυτή η στρατηγική έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε άλλες βιομηχανίες, για παράδειγμα, στις αγορές κινητών τηλεφώνων και φορητών γυμναστηρίων, όπου ο μεγάλος αριθμός μονάδων που παράγονται έχει ως αποτέλεσμα σχετικά χαμηλό κόστος για κάθε συσκευή.

Η ανάπτυξη λογισμικού ανοιχτού κώδικα είναι ένας άλλος σημαντικός τομέας ευκαιριών για εξοικονόμηση κόστους. Το σύστημα δεν απαιτεί ακριβές ιδιόκτητες άδειες λογισμικού επειδή βασίζεται σε λογισμικό ανοιχτού κώδικα, το οποίο επιτρέπει στους προγραμματιστές να συνεργάζονται για να βελτιώσουν τον κώδικα του συστήματος [3]. Αυτή η προσέγγιση έχει επίσης το πλεονέκτημα ότι μειώνει το κόστος λογισμικού και ταυτόχρονα ενθαρρύνει την καινοτομία, καθώς προγραμματιστές από διαφορετικά μέρη του κόσμου μπορούν από μέρος του έργου. Επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτές είναι δωρεάν λύσεις και οι χρήστες και οι οργανισμοί μπορούν να τροποποιήσουν το λογισμικό σύμφωνα με τις απαιτήσεις τους. Όπως παρατηρείται σε περιβάλλοντα χαμηλών πόρων, όπου οι δημοσιονομικοί περιορισμοί αποτελούν μείζον θέμα, η χρήση λογισμικού ανοιχτού κώδικα στην ανάπτυξη αυτών των προηγμένων τεχνολογιών παρακολούθησης της υγείας θα συμβάλει στην άμβλυνση της οικονομικής πίεσης που θα αντιμετωπίσουν τόσο οι πάροχοι όσο και οι χρήστες των τεχνολογιών.

Ενδεχομένως, η συνεργασία με μη κερδοσκοπικούς οργανισμούς ή κυβερνητικούς φορείς θα μπορούσε επίσης να βοηθήσει στη διαδικασία να καταστούν φθηνότερα τα συστήματα παρακολούθησης της υγείας. Είναι δυνατό να βρεθούν πολλοί μη κερδοσκοπικοί οργανισμοί που στοχεύουν στην ανάπτυξη της διαθεσιμότητας υγειονομικής περίθαλψης σε αυτές τις χώρες, επομένως, φαίνεται λογικό να τους προσελκύσουμε προσφέροντας την εμπειρία και τα μέσα τους για να βοηθήσουν στη μείωση του κόστους των συσκευών ή στην παροχή δωρεάν χρέωση για τις περιοχές που αναφέρονται παραπάνω. Έχει βρεθεί ότι οι συνεργασίες μεταξύ ιδιωτικού τομέα και μη κερδοσκοπικών οργανισμών λειτουργούν στην αύξηση της πρόσβασης στην υγειονομική περίθαλψη στις περιοχές χαμηλού εισοδήματος [27]. Μέσω των δικτύων και της εμπειρίας αυτών των οργανισμών, τα συστήματα παρακολούθησης της υγείας μπορούν να καταστούν φθηνότερα και διαθέσιμα σε φτωχές περιοχές.

Αυτό ισχύει επίσης κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος παρακολούθησης της υγείας που προορίζεται να χρησιμοποιηθεί από μεγάλο πληθυσμό. Καθώς οι ανάγκες υγειονομικής περίθαλψης

αλλάζουν και ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται, το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να επεξεργάζεται περισσότερα δεδομένα και θα πρέπει να μπορεί να υποστηρίζει πρόσθετες λειτουργίες με μειωμένη απόδοση. Ένα επεκτάσιμο σύστημα είναι αυτό που μπορεί να τροποποιηθεί εύκολα για να ανταποκριθεί στις μελλοντικές αλλαγές, επιπλέον αισθητήρες και άλλα χαρακτηριστικά που ενδέχεται να εισαχθούν στο μέλλον χωρίς να χρειάζεται να ξεκινήσετε από το μηδέν [7]. Για παράδειγμα, καθώς οι δυνατότητες των τεχνολογιών παρακολούθησης της υγείας, για παράδειγμα, οι αισθητήρες και οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης εξελίσσονται, το σύστημα πρέπει να ενσωματώσει αυτές τις βελτιώσεις. Με αυτόν τον τρόπο, οι χρήστες είναι πάντα εγγυημένοι ότι θα καρπωθούν από τη νέα τεχνολογία στην παρακολούθηση της υγείας, ανεξάρτητα από το χρόνο εγγραφής τους στο σύστημα.

Ένας λόγος για τον οποίο το cloud computing είναι μια λογική λύση για την επίτευξη επεκτασιμότητας είναι η επεκτασιμότητα των cloud που σημαίνει ουσιαστικά άπειρες δυνατότητες αποθήκευσης και επεξεργασίας. Οι απομακρυσμένες λύσεις επιτρέπουν στα δεδομένα να αποθηκεύονται και να υποβάλλονται σε επεξεργασία αλλού, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για εγκαταστάσεις αποθήκευσης και επεξεργασίας υλικού και λογισμικού εντός της συσκευής, καθιστώντας έτσι το σύστημα λιγότερο ογκώδες και φθηνότερο [18]. Η υποδομή Cloud επιτρέπει επίσης τη δυναμική επέκταση της ανάπτυξης των πόρων που βασίζονται σε σύννεφο, πράγμα που σημαίνει ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών ή ο όγκος των δεδομένων, οι απαραίτητοι πόροι στο σύστημα cloud μπορούν να αυξηθούν χωρίς την ανάγκη ανακατασκευής ολόκληρου του συστήματος. Επιπλέον, καθιστά την ενημέρωση και τη συντήρηση πιο διαχειρίσιμη, επειδή οι χρήστες του αναφερόμενου λογισμικού μπορούν πάντα να έχουν πρόσβαση σε ένα ενημερωμένο σύστημα και είναι πάντα ασφαλείς από επιθέσεις χάκερ χωρίς να περιμένουν αναβάθμιση ή αντικατάσταση εξοπλισμού.

Επεκτασιμότητα σημαίνει επίσης να λαμβάνεται υπόψη η ετερογένεια των πιθανών χρηστών κατά το σχεδιασμό. Το σύστημα θα πρέπει επομένως να σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί χρήστες διαφορετικών αναγκών υγειονομικής περίθαλψης που κυμαίνονται από απλές ανάγκες παρακολούθησης υγειονομικής περίθαλψης έως πολύπλοκες αναλυτικές ανάγκες. Σημαίνει ότι το σύστημα θα πρέπει να είναι εύκολα προσαρμόσιμο για να δέχεται διαφορετικούς χρήστες με διαφορετικά προφίλ, έτσι ώστε η τεχνολογία να παραμένει πολύτιμη καθώς οι απαιτήσεις υγειονομικής περίθαλψης αλλάζουν στο μέλλον.

5.2.9 Θεραπευτικές παρεμβάσεις σε πραγματικό χρόνο

Η ενσωμάτωση θεραπευτικών παρεμβάσεων σε πραγματικό χρόνο στο σύστημα θα μετατρέψει τη συσκευή σε μια ολιστική λύση για την αξιολόγηση της υγείας του ύπνου. Για παράδειγμα, το σύστημα θα μπορούσε να συνδεθεί με τις συσκευές CPAP που προσαρμόζουν την πίεση στα συμβάντα άπνοιας. Θα μπορούσαν επίσης να ενσωματωθούν μηχανισμοί βιοανάδρασης για

να δίνουν στους χρήστες υπενθυμίσεις σε πραγματικό χρόνο για να τους βοηθήσουν να διορθώσουν τις συνήθειες αναπνοής ή ύπνου τους.

Η ενσωμάτωση θεραπευτικών δράσεων στα συστήματα παρακολούθησης της υγείας θα προσέθετε σημαντική αξία σε αυτά τα συστήματα και θα τα μετατρέψει από απλά διαγνωστικά εργαλεία σε ενεργά και δυναμικά συστήματα διαχείρισης της υγείας. Οι παρεμβάσεις σε πραγματικό χρόνο παρέχουν στους χρήστες έγκαιρη ανατροφοδότηση που μπορεί να εφαρμοστεί για να επηρεάσει θετικά την κατάσταση της υγείας των χρηστών τη συγκεκριμένη στιγμή. Αυτή η μετάβαση από την απλή παρατήρηση στην παρέμβαση μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ασθένειες όπως η υπνική άπνοια, όπου η θεραπεία μπορεί να σταματήσει σοβαρά αρνητικά αποτελέσματα όπως καρδιαγγειακά επεισόδια ή υπνηλία κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η πιο σημαντική διεπαφή για θεραπευτική παρέμβαση σε πραγματικό χρόνο είναι η σύζευξη με αυτοματοποιημένες συσκευές συνεχούς θετικής πίεσης αεραγωγών (CPAP). Οι περισσότεροι άνθρωποι το χρησιμοποιούν για τη θεραπεία της υπνικής άπνοιας, καθώς παρέχει μια συνεχή ροή αέρα για να διατηρεί ανοιχτή τη δίοδο των αεραγωγών κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι συσκευές CPAP που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν έχουν σταθερή πίεση που μπορεί να μην είναι η καλύτερη για κάθε ασθενή. Ωστόσο, με την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των προτύπων ύπνου, για παράδειγμα, τον εντοπισμό συμβάντων άπνοιας, το σύστημα θα μπορούσε να ανταποκριθεί σε αυτά τα συμβάντα αλλάζοντας την πίεση που παρέχεται από τη συσκευή CPAP. Για παράδειγμα, εάν το σήμα που ανιχνεύτηκε ήταν διακοπή της αναπνοής ή πολύ χαμηλός κορεσμός οξυγόνου, η πίεση θα μπορούσε να αυξηθεί ελαφρώς, ώστε η αναπνοή να επανέλθει και να αποφευχθούν περισσότερα επεισόδια άπνοιας [25]. Μια τέτοια αλλαγή σε πραγματικό χρόνο θα σήμαινε επίσης ότι η θεραπεία που θα χορηγηθεί θα ήταν πιο αποτελεσματική και λιγότερο επώδυνη για τον ασθενή ανά πάσα στιγμή.

Άλλες θεραπευτικές προσεγγίσεις που θα μπορούσαν να ενσωματωθούν στο σύστημα περιλαμβάνουν μηχανισμούς βιοανάδρασης. Η βιοανάδραση χρησιμοποιεί πραγματικές φυσιολογικές πληροφορίες για να παρέχει στον χρήστη οδηγίες σχετικά με τον τρόπο ελέγχου του σώματός του. Για παράδειγμα, το σύστημα θα μπορούσε να παρακολουθεί τον ρυθμό αναπνοής ή τη μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού των χρηστών και στη συνέχεια να δίνει ηχητικές ή οπτικές προτροπές σε πραγματικό χρόνο που να λένε στον χρήστη να ρυθμίσει την αναπνοή του ή να επανατοποθετήσει τον εαυτό του για καλύτερο ύπνο. Αυτή η μορφή βιοανάδρασης έχει αποδειχθεί ότι είναι ευεργετική για την ανακούφιση της αϋπνίας, του άγχους και του στρες, επειδή βοηθά τους χρήστες να αποκτήσουν μεγαλύτερη συνείδηση των εσωτερικών τους συνθηκών παράλληλα με τον τρόπο ελέγχου τους [21]. Για παράδειγμα, εάν το σύστημα καταλάβει ότι ο ασθενής αναπνέει αργά ή με παύσεις, μπορεί να ζητήσει από τον ασθενή να αναπνεύσει βαθύτερα ή να κάνει μια άσκηση αναπνοής για να τον ενθαρρύνει να αποκοιμηθεί.

Άλλες δυνατότητες θα ήταν ότι το σύστημα θα μπορούσε επίσης να περιλαμβάνει παρεμβάσεις για τη βελτίωση της αναπνευστικής βιοανάδρασης και της στάσης του ύπνου. Η στάση που χρησιμοποιείτε για να κοιμάστε έχει επίσης αντίκτυπο στην υγεία του σώματος, καθώς ορισμένες θέσεις ύπνου μπορεί να επιδεινώσουν καταστάσεις όπως η άπνοια ύπνου και ακόμη και να προκαλέσουν δυσφορία ή διακοπή του ύπνου. Εάν το σύστημα ενσωματώνει αισθητήρες που θα μπορούσαν να ανιχνεύσουν την κίνηση ή τη θέση του σώματος, το σύστημα θα μπορούσε στη συνέχεια να υπενθυμίσει στον χρήστη την τρέχουσα θέση του και να προτείνει μια καλύτερη θέση. Για παράδειγμα, το σύστημα θα μπορούσε να αναγνωρίσει ότι ο χρήστης κοιμάται ανάσκελα, η οποία είναι μια θέση που αυξάνει τον κίνδυνο απόφραξης των αεραγωγών σε ασθενείς με άπνοια ύπνου και στη συνέχεια να προτείνει στον χρήστη να γυρίσει στο πλάι [23]. Τέτοιες αλλαγές μπορούν να γίνουν κατά τη διάρκεια της νύχτας και μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση της συνολικής ποιότητας του ύπνου και στη μείωση του αριθμού των διακοπών της αναπνοής.

Μια άλλη οδός για θεραπευτικές παρεμβάσεις σε πραγματικό χρόνο είναι η συμπερίληψη της εξατομικευμένης τροποποίησης του περιβάλλοντος ύπνου. Θα μπορούσε επίσης να διασυνδέεται με άλλες έξυπνες οικιακές συσκευές, όπως θερμοστάτες, συστήματα φωτισμού και ηχητικά συστήματα, έτσι ώστε οι αλλαγές στο περιβάλλον ύπνου να μπορούν να γίνουν με ένα πάτημα ενός κουμπιού με βάση δεδομένα από το σύστημα. Για παράδειγμα, μπορεί να αποφασίσει να αυξήσει τη θερμοκρασία εάν είναι πολύ υψηλή ή να απενεργοποιήσει τη θερμάστρα αν είναι πολύ χαμηλή για να δημιουργήσει κατάλληλο περιβάλλον ύπνου. Ομοίως, το σύστημα θα μπορούσε να ενεργοποιήσει μια γεννήτρια λευκού θορύβου ή να σβήσει το φως εάν ο χρήστης αντιμετωπίζει πρόβλημα ύπνου ή αφύπνιση. Τέτοιες περιβαλλοντικές αλλαγές σε πραγματικό χρόνο θα καθιστούσαν ευκολότερο την καλύτερη διάρκεια και ποιότητα ύπνου [19].

Εάν οι θεραπευτικές παρεμβάσεις σε πραγματικό χρόνο ενσωματώνονταν στην παρακολούθηση της υγείας, τότε ένα σύστημα όχι μόνο θα ειδοποιούσε τον χρήστη για προβλήματα όπως η άπνοια ύπνου ή η κακή ποιότητα ύπνου, αλλά και θα τα αντιμετώπιζε. Η ικανότητα αποτροπής της διακοπής της υγείας του ύπνου πριν συμβεί, μαζί με τη δυνατότητα γρήγορης βοήθειας των χρηστών που αντιμετωπίζουν διαταραχές ύπνου, καθιστούν αυτήν την ιδέα μια ισχυρή παρέμβαση που έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά τα αποτελέσματα. Με την πάροδο του χρόνου, καθώς το σύστημα αναπτύσσεται, θα μπορούσαν να ενσωματωθούν πιο εξελιγμένες θεραπείες για να αυξηθεί η ικανότητα του συστήματος για θεραπεία υγείας ύπνου σε πραγματικό χρόνο, ειδικά για τον ασθενή.

Επομένως, η ενσωμάτωση θεραπευτικών παρεμβάσεων σε πραγματικό χρόνο στα συστήματα υγείας του ύπνου είναι ένας επαναστατικός τρόπος αντιμετώπισης των διαταραχών του ύπνου. Εάν το σύστημα συνδέθηκε με τη χρήση αυτόματων συσκευών CPAP, συστημάτων βιοανάδρασης και αλλαγές στο περιβάλλον ύπνου, οι χρήστες θα μπορούσαν να λάβουν άμεσα παρεμβάσεις που

βελτιώνουν την ποιότητα και την υγεία του ύπνου τους. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι πρόσθετα οφέλη στο σύστημα όχι μόνο προσθέτουν αξία στο σύστημα αλλά επίσης, η όλη ανάπτυξη στοχεύει σε μια ολιστική προσέγγιση για τη διαχείριση της υγείας του ύπνου.

5.3 Τελικές Παρατηρήσεις

Το προτεινόμενο σύστημα παρακολούθησης της υπνικής άπνοιας σε πραγματικό χρόνο είναι μια σημαντική καινοτομία στον τομέα της διαχείρισης της υγείας του ύπνου. Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας wearable, του IoT και της μηχανικής εκμάθησης καθιστά το σύστημα οικονομικά αποδοτικό, εύκολα μεταφερόμενο και εύκολο στη χρήση σε σύγκριση με τις συμβατικές προσεγγίσεις. Κατά συνέπεια, αποδίδει ακόμη και ζωντανά ποσοτικά δεδομένα και γνώσεις που επιτρέπουν στους ενδιαφερόμενους να αναλάβουν τις αποφάσεις τους σχετικά με την υγεία του ύπνου, σύμφωνα με τις τάσεις της υγειονομικής περίθαλψης με επίκεντρο τον ασθενή [22].

Φυσικά, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που χρειάζονται περαιτέρω δουλειά: ο σχεδιασμός των αισθητήρων, η ακρίβεια των αλγορίθμων και οι ευρύτερες κλινικές δοκιμές του συστήματος, αλλά η ικανότητα αυτού του συστήματος να εκδημοκρατίσει τα διαγνωστικά για την υγεία του ύπνου είναι σαφής. Πιστεύω ότι ανάρτηση -Οι τεχνολογικές εξελίξεις όπως αυτή θα φέρουν επανάσταση στην ιατρική αγορά και θα ενισχύσουν την ποσότητα ενώ παράλληλα θα βελτιώσουν την ποιότητα της υγειονομικής περίθαλψης για όλους παγκοσμίως. HineLearning, το σύστημα προσφέρει φορητή και φιλική προς το χρήστη εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές διαγνωστικές μεθόδους. Η ικανότητά του να παρέχει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και αξιόπιστες γνώσεις δίνει τη δυνατότητα στα άτομα να αναλάβουν ενεργό ρόλο στη διαχείριση της υγείας του ύπνου τους, ευθυγραμμίζοντας με την ευρύτερη στροφή προς την υγειονομική περίθαλψη με επίκεντρο τον ασθενή [22].

Ενώ εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις, όπως η βελτίωση του σχεδιασμού των αισθητήρων, η βελτίωση της ακρίβειας του αλγορίθμου και η επέκταση της κλινικής επικύρωσης, η δυνατότητα αυτού του συστήματος να εκδημοκρατίσει τα διαγνωστικά για την υγεία του ύπνου είναι αναμφισβήτητη. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, καινοτομίες όπως αυτή έχουν τη δύναμη να μεταμορφώσουν την υγειονομική περίθαλψη, καθιστώντας την πιο προσιτή, εξατομικευμένη και αποτελεσματική για τα άτομα σε όλο τον κόσμο.

Το σύστημα παρακολούθησης της υπνικής άπνοιας σε πραγματικό χρόνο που προτείνεται εδώ είναι ένα βήμα προς μια καλύτερη διαχείριση της υγείας του ύπνου, το οποίο ενσωματώνει τις φορητές συσκευές, το IoT και τη μηχανική μάθηση για να παρέχει μια υψηλού αντίκτυπου, αλλά εύχρηστη λύση για τη διαχείριση των διαταραχών ύπνου. Οι τρέχουσες διαγνωστικές τεχνικές, όπως η πολυπνογραφία, που συνήθως γίνονται σε εργαστήρια ύπνου, μπορεί να είναι επιθετικές, δαπανηρές και μπορεί επίσης να παρουσιάσουν μια σειρά από δυσκολίες στους ανθρώπους. Αυτό το σύστημα, ωστόσο, είναι φθηνότερο και μπορεί να μεταφερθεί από το ένα μέρος στο άλλο, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στα άτομα να παρακολουθούν την υγεία του ύπνου τους από την άνεση του

σπιτιού τους. Με αυτόν τον τρόπο, οι χρήστες μπορούν να λαμβάνουν δεδομένα πραγματικού χρόνου και να λαμβάνουν αποφάσεις για την υγεία τους, κάτι που θεωρείται μια από τις βασικές αρχές της ασθενοκεντρικής προσέγγισης που αναπτύσσεται ραγδαία στις μέρες μας [22].

Ένα άλλο πλεονέκτημα του προτεινόμενου συστήματος είναι ότι είναι σε θέση να παρέχει μια πιο προληπτική προσέγγιση στη διαχείριση της υγείας του ύπνου. Στο παρελθόν, η υπνική άπνοια διαγιγνώσκεται μόνο με τη χρήση ενός μόνο τεστ ολονύκτιας σε κλινική ύπνου και οι επόμενες θεραπείες μπορεί να περιλαμβάνουν περισσότερες προσωπικές επισκέψεις. Το σύστημα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, σε αντίθεση με το παραδοσιακό σύστημα, επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση του προτύπου ύπνου και ως εκ τούτου συνεχείς διορθώσεις. Θα μπορούσε να βοηθήσει στον ταχύτερο εντοπισμό άλλων διαταραχών του ύπνου και στην εφαρμογή διορθωμένων θεραπευτικών προσεγγίσεων, οι οποίες μπορεί να σταθεροποιήσουν τη συνολική μακροπρόθεσμη υγεία ενός ασθενούς με άπνοια ύπνου. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, τα δεδομένα που συλλέγονται με τη βοήθεια μιας φορητής συσκευής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή συστάσεων με βάση το προφίλ ύπνου του ατόμου και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της θεραπευτικής διαδικασίας [20].

Ωστόσο, αν και τα πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος είναι προφανή, υπάρχουν αρκετές δυσκολίες που πρέπει να επιλυθούν προτού καταστεί δυνατή η ευρεία εφαρμογή του. Ο σχεδιασμός του αισθητήρα πρέπει να βελτιωθεί, καθώς η συλλογή δεδομένων είναι το πρωταρχικό θεμέλιο του συστήματος. Σήμερα, οι περισσότεροι φορητοί αισθητήρες έχουν προβλήματα με τα φυσιολογικά σήματα όπως ο αναπνευστικός ρυθμός, ο κορεσμός του οξυγόνου και ο καρδιακός ρυθμός, τα οποία είναι σημαντικά για τη διάγνωση και τη θεραπεία της άπνοιας ύπνου. Η υψηλότερη ακρίβεια και αξιοπιστία των αισθητήρων που μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα μικρό, άνετο σχέδιο θα είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία του συστήματος [25].

Ένα άλλο πρόβλημα είναι η βελτίωση της αποτελεσματικότητας των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στο σύστημα. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης απαιτούν μεγάλα δεδομένα για να μάθουν και να κάνουν προβλέψεις και παρά τη διαθεσιμότητα δεδομένων στην έρευνα ύπνου, το τελικό βήμα της κλινικής επικύρωσης του συστήματος είναι μια σημαντική διαδικασία. Οι αλγόριθμοι πρέπει πρώτα να δοκιμαστούν και να επικυρωθούν σε διαγνωστικά εργαλεία χρυσού προτύπου, όπως η πολυπνογραφία, για να διασφαλιστεί ότι είναι σε θέση να αναγνωρίσουν τα συμβάντα της άπνοιας ύπνου καθώς και να προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες. Για την ανάπτυξη αυτών των αλγορίθμων, θα χρειαστεί καθημερινή αλληλεπίδραση με κλινικούς ιατρούς και ερευνητές για την περαιτέρω βελτίωση των αλγορίθμων προτού ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των ιατρικών συσκευών [25].

Τελευταίο, αλλά εξίσου σημαντικό, θα υπάρξει ανάγκη επέκτασης της κλινικής επικύρωσης του συστήματος προκειμένου να αποκτηθεί η απαραίτητη ρυθμιστική έγκριση και αποδοχή. Το

σύστημα πρέπει να δοκιμαστεί σε κλινικές για να αποδειχθεί ότι λειτουργεί σε διαφορετικές εθνοτικές ομάδες και σε διαφορετικές συνθήκες. Πρέπει επίσης να δοκιμαστεί στο πραγματικό περιβάλλον όπου το περιβάλλον ύπνου και η συμμόρφωση του χρήστη επηρεάζουν το σύστημα. Σε αυτό το βαθμό, η επίτευξη ενός τέτοιου επιπέδου επικύρωσης θα ενισχύσει το επίπεδο εμπιστοσύνης μεταξύ των διαφόρων ενδιαφερομένων, ιδίως των φροντιστών και των ασθενών, ενισχύοντας έτσι την υιοθεσία.

Ωστόσο, υπάρχουν πολλές δυνατότητες σε αυτό το σύστημα παρακολούθησης της υπνικής άπνοιας σε πραγματικό χρόνο να φέρει επανάσταση στη διαθεσιμότητα των διαγνωστικών για την υγεία του ύπνου. Καθώς το σύστημα διαχείρισης της υγείας του ύπνου γίνεται πιο προσιτό, προσωπικό και σταθερό, έχει τη δυνατότητα να αλλάξει προς το καλύτερο την προσέγγιση της υγείας του ύπνου για άτομα με άπνοια ύπνου και άλλες διαταραχές. Όσον αφορά την ανάπτυξη της τεχνολογίας, τέτοιες εφευρέσεις έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν την υγειονομική περίθαλψη και τις ζωές των ανθρώπων σε όλο τον κόσμο, καθιστώντας την έτσι πολύ πιο αποτελεσματική και δίκαιη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. V. Benjafield, N. T. Ayas, P. R. Eastwood, R. Heinzer, M. S. Ip, M. J. Morrell, and A. Malhotra, "Estimation of the global prevalence and burden of obstructive sleep apnea: A literature-based analysis," *The Lancet Respiratory Medicine*, vol. 7, no. 8, pp. 687–698, 2019.
- [2] R. B. Berry, R. Brooks, C. E. Gamaldo, S. M. Harding, R. M. Lloyd, C. L. Marcus, and B. V. Vaughn, "The AASM manual for the scoring of sleep and associated events: Rules, terminology, and technical specifications," *American Academy of Sleep Medicine*, 2012.
- [3] R. B. Berry, R. Budhiraja, D. J. Gottlieb, D. Gozal, C. Iber, V. K. Kapur, and M. M. Tangredi, "Rules for scoring respiratory events in sleep: Update of the 2007 AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events," *Journal of Clinical Sleep Medicine*, vol. 8, no. 5, pp. 597–619, 2018.
- [4] S. Biswal, H. Sun, B. Goparaju, M. B. Westover, J. Sun, and M. T. Bianchi, "Expert-level sleep scoring with deep neural networks," *JAMA Neurology*, vol. 74, no. 9, pp. 1099–1101, 2017.
- [5] W. Boucsein, *Electrodermal Activity*, 2nd ed. New York: Springer, 2012.
- [6] M. de Zambotti, A. Goldstone, S. Claudatos, I. M. Colrain, and F. C. Baker, "A validation study of Fitbit Charge 2 compared with polysomnography in adults," *Chronobiology International*, vol. 36, no. 7, pp. 941–949, 2019.
- [7] D. J. Eckert, A. Malhotra, and A. S. Jordan, "Mechanisms of obstructive sleep apnea: Focus on anatomical and nonanatomical factors," *Journal of Applied Physiology*, vol. 128, no. 3, pp. 787–805, 2020.
- [8] V. Farrahi, S. Ahmadi, and M. Noori, "Smart bedding for sleep monitoring and posture tracking: Advances and challenges," *Sleep Medicine Reviews*, vol. 8, no. 1, pp. 95–110, 2020.
- [9] W. Flemons and M. R. Littner, "Measuring the effectiveness of sleep apnea treatments: The role of quality of life questionnaires," *Sleep Medicine Reviews*, vol. 7, no. 3, pp. 123–136, 2003.
- [10] A. Garde, W. Karlen, J. M. Ansermino, and G. A. Dumont, "Estimation of respiratory rate from photoplethysmographic imaging videos compared to pulse oximetry," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 61, no. 7, pp. 1932–1940, 2014.
- [11] D. J. Gottlieb and N. M. Punjabi, "Diagnosis and management of obstructive sleep apnea: A review," *Journal of the American Medical Association (JAMA)*, vol. 323, no. 14, pp. 1389–1400, 2020.
- [12] Z. Huang, Y. Shen, J. Liu, and W. Sun, "Real-time sleep apnea detection using wearable devices and deep learning," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 132, p. 104339, 2021.

- [13] S. M. R. Islam, D. Kwak, M. H. Kabir, M. Hossain, and K. S. Kwak, "The Internet of Things for health care: A comprehensive survey," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 678–708, 2015.
- [14] I. Katz, J. Green, A. McClure, and E. Schultz, "Evaluating trends in portable sleep monitoring technologies," *Sleep Health*, vol. 5, no. 4, pp. 312–321, 2019.
- [15] V. K. Kapur, D. H. Auckley, S. Chowdhuri, D. C. Kuhlmann, R. Mehra, K. Ramar, and C. G. Harrod, "Clinical practice guideline for diagnostic testing for adult obstructive sleep apnea: An American Academy of Sleep Medicine Clinical Practice Guideline," *Journal of Clinical Sleep Medicine*, vol. 13, no. 3, pp. 479–504, 2017.
- [16] T. Koivunen, J. Toppila, and M. Partinen, "Wearable technology in sleep monitoring: User feedback and application," *Journal of Sleep Research*, vol. 29, no. 3, p. e12984, 2020.
- [17] C. A. Kushida, D. A. Nichols, T. H. Holmes, S. F. Quan, D. J. Gottlieb, and C. Guilleminault, "A randomized, controlled trial of continuous positive airway pressure in obstructive sleep apnea," *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 172, no. 4, pp. 440–447, 2005.
- [18] W. Lee, S. Nagubadi, and J. Kim, "Wireless data transmission for real-time sleep monitoring devices," *Wireless Health Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 23–34, 2020.
- [19] M. O. Mendez, A. M. Bianchi, and S. Cerutti, "Sleep staging from heart rate variability: Time-varying spectral features and neural networks," *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 246–256, 2010.
- [20] M. Mendelson, "Home diagnosis of obstructive sleep apnea: Advantages and limitations," *Canadian Medical Association Journal*, vol. 189, no. 23, pp. E828–E829, 2017.
- [21] F. Mendonça, S. S. Mostafa, A. G. Ravelo-García, F. Morgado-Dias, and T. Penzel, "Devices for home detection of obstructive sleep apnea: A review," *Sleep Medicine Reviews*, vol. 41, pp. 149–160, 2018.
- [22] T. Penzel, J. McNames, and P. Chazal, "Smart CPAP systems: A way to enhance compliance and effectiveness in OSA treatment," *Journal of Clinical Sleep Medicine*, vol. 13, no. 3, pp. 477–485, 2017.
- [23] N. M. Punjabi, "The epidemiology of adult obstructive sleep apnea," *Proceedings of the American Thoracic Society*, vol. 5, no. 2, pp. 136–143, 2008.
- [24] T. Schäfer and M. Kroll, "Multimodal integration for advanced health diagnostics: Challenges and prospects," *International Journal of Healthcare Technology and Management*, vol. 22, no. 1/2, pp. 3–18, 2020.

- [25] R. Sharma, M. Bowes, and W. Hu, "The use of photoplethysmography in measuring sleep apnea severity," *Journal of Sleep Disorders*, vol. 4, no. 2, pp. 56–63, 2016.
- [26] H. Sun, S. Biswal, and W. Li, "Sleep stage classification using physiological data and machine learning models," *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 97, pp. 20–27, 2019.
- [27] Task Force of the European Society of Cardiology, "Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use," *Circulation*, vol. 93, no. 5, pp. 1043–1065, 1996.
- [28] R. Jeffrey, *What is Real-Time Data Processing? Pros, Cons, & Examples*. Ανακτήθηκε από: <https://estuary.dev/real-time-data-processing/>
- [29] C. Wenxi, T. Zunyi, L. Zhaoqin, and J. Linlin. *Automatic sleep monitoring system for home healthcare*. DOI:10.1109/BHI.2012.6211732

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικας Προγραμματισμού για ESP32

```
#include <WiFi.h> // Βιβλιοθήκη για σύνδεση WiFi
#include <HTTPClient.h> // Βιβλιοθήκη για αποστολή HTTP αιτήσεων
#include <Wire.h> // Βιβλιοθήκη για I2C επικοινωνία
#include <WebSocketsServer.h> // WebSockets για real-time επικοινωνία
#include <MAX30100_PulseOximeter.h> // Διαχείριση αισθητήρα οξυμετρίας MAX30100

// Καθορισμός ορίων για ανίχνευση άπνοιας και υπόπνοιας
#define SPO2_THRESHOLD_APNEA 90 // Όριο SpO2 για άπνοια
#define SPO2_THRESHOLD_HYPOPNEA 93 // Όριο SpO2 για υπόπνοια
#define SPO2_DROP_THRESHOLD 3 // Πτώση SpO2 που θεωρείται σημαντική
#define APNEA_DURATION_MS 10000 // Ελάχιστος χρόνος για να θεωρηθεί άπνοια (ms)
#define ODI_TOLERANCE_TIME 5000 // Χρόνος ανοχής για ODI (ms)
#define APNEA_NOTIFICATION_INTERVAL 15000 // Διάστημα μεταξύ ειδοποιήσεων άπνοιας (ms)

// Ορισμός αναλογικών εισόδων αισθητήρων
const int ECG_PIN = 36; // Καρδιογράφημα (ECG)
const int GSR_PIN = 39; // Αγωγιμότητα δέρματος (GSR)
const char* serverURL = "http://192.168.1.11/save_data.php"; // Διεύθυνση διακομιστή για αποστολή δεδομένων

#define REPORTING_PERIOD_MS 1000 // Περίοδος αναφοράς δεδομένων (1s)

// WebSockets Server για real-time επικοινωνία
WebSocketsServer websocket = WebSocketsServer(81);
PulseOximeter pox; // Αντικείμενο για διαχείριση αισθητήρα SpO2

// Μεταβλητές για αποθήκευση μετρήσεων
float heartRate = 0; // Καρδιακός ρυθμός
float spo2 = 0; // Επίπεδο οξυγόνου στο αίμα
unsigned long tsLastReport = 0; // Χρόνος τελευταίας αναφοράς δεδομένων

// GSR - Αισθητήρας αγωγιμότητας δέρματος
int gsrValue = 0; // Τρέχουσα τιμή GSR
int gsr_average = 0; // Μέσος όρος GSR
int sensorCalibration12b = 2048; // Καλιμπράρισμα αισθητήρα 12-bit

// Ρύθμιση συχνότητας δειγματοληψίας ECG
#define ECG_SAMPLING_PERIOD_MS 4 // 4ms => ~250 δείγματα/δευτερόλεπτο
unsigned long lastECGSampleTime = 0; // Χρόνος τελευταίου δείγματος ECG

// Μεταβλητές για ανίχνευση άπνοιας
unsigned long apneaStartTime = 0; // Έναρξη επεισοδίου άπνοιας
bool isApnea = false; // Κατάσταση άπνοιας
int apneaCount = 0; // Συνολικός αριθμός επεισοδίων άπνοιας
int hyporpeaCount = 0; // Συνολικός αριθμός επεισοδίων υπόπνοιας
int odiCount = 0; // Αριθμός επεισοδίων αποκορεσμού (ODI)
float lastSpO2 = 100.0; // Τελευταία μέτρηση SpO2
unsigned long monitoringStartTime = 0; // Έναρξη παρακολούθησης
bool apneaDetected = false; // Ανίχνευση άπνοιας
bool hyporpeaDetected = false; // Ανίχνευση υπόπνοιας
unsigned long lastApneaNotificationTime = 0; // Χρόνος τελευταίας ειδοποίησης άπνοιας
unsigned long lastOdiTime = 0; // Χρόνος τελευταίου επεισοδίου ODI

// Υπολογισμός HRV (Μεταβλητότητα καρδιακού ρυθμού)
#define HRV_BUFFER_SIZE 10 // Μέγεθος buffer για αποθήκευση διαστημάτων R-R
unsigned long rrIntervals[HRV_BUFFER_SIZE] = {0}; // Πίνακας αποθήκευσης χρονικών διαστημάτων
int rrIndex = 0; // Δείκτης για τον πίνακα
float hrv = 0; // Μεταβλητότητα καρδιακού ρυθμού
unsigned long lastBeatTime = 0; // Χρόνος τελευταίου καρδιακού παλμού

void setup() {
    Serial.begin(115200); // Έναρξη σειριακής επικοινωνίας
    WiFi.begin("Samsung A55", "vwgolf#4"); // Σύνδεση σε WiFi δίκτυο
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { // Αναμονή για σύνδεση
```

```

    delay(1000);
    Serial.println("Connecting to Wi-Fi...");
}
Serial.println("Connected to Wi-Fi"); // Επιβεβαίωση σύνδεσης
Serial.print("IP Address: ");
Serial.println(WiFi.localIP()); // Εκτύπωση διεύθυνσης IP
WebSocket.begin(); // Εκκίνηση WebSocket
Serial.print("Initializing pulse oximeter...");
if (!pox.begin()) { // Έναρξη του αισθητήρα οξυμετρίας
    Serial.println("FAILED"); // Αποτυχία εκκίνησης
    for(;;);
} else {
    Serial.println("SUCCESS"); // Επιτυχής εκκίνηση
}
pox.setIRLedCurrent(MAX30100_LED_CURR_7_6MA); // Ρύθμιση ρεύματος LED
monitoringStartTime = millis(); // Αποθήκευση χρόνου εκκίνησης
}

int calculateAHI() {
    unsigned long elapsedTime = millis() - monitoringStartTime; // Υπολογισμός χρόνου παρακολούθησης
    float hours = elapsedTime / 3600000.0; // Μετατροπή σε ώρες
    return (hours >= 1) ? round((apneaCount + hypopneaCount) / hours) : 0; // Υπολογισμός AHI (Αποφρακτικό Δείκτη Άπνοιας)
}

int calculateODI() {
    unsigned long elapsedTime = millis() - monitoringStartTime;
    float hours = elapsedTime / 3600000.0;
    return (hours >= 1) ? round(odiCount / hours) : 0; // Υπολογισμός ODI (Δείκτης Αποκορεσμού Οξυγόνου)
}

void detectAnomalies(float heartRate, float spo2) {
    unsigned long currentMillis = millis(); // Λήψη τρέχοντος χρόνου

    if (spo2 < SPO2_THRESHOLD_APNEA) { // Ανίχνευση άπνοιας
        if (!isApnea) {
            apneaStartTime = currentMillis; // Έναρξη καταγραφής άπνοιας
            isApnea = true;
        } else if (currentMillis - apneaStartTime > APNEA_DURATION_MS && !apneaDetected) {
            if (currentMillis - lastApneaNotificationTime > APNEA_NOTIFICATION_INTERVAL) {
                Serial.println("Ανίχνευση Άπνοιας!");
                apneaCount++; // Αύξηση μετρητή άπνοιας
                String anomaly = "{\"status\":\"apnea\"}";
                WebSocket.broadcastTXT(anomaly); // Αποστολή ειδοποίησης μέσω WebSocket
                apneaDetected = true;
                lastApneaNotificationTime = currentMillis;
            }
        }
    } else {
        isApnea = false;
        apneaDetected = false;
    }

    if (spo2 >= SPO2_THRESHOLD_APNEA && spo2 < SPO2_THRESHOLD_HYPOPNEA) { // Ανίχνευση υπόπνοιας
        if (!hypopneaDetected) {
            Serial.println("Ανίχνευση Υπόπνοιας!");
            hypopneaCount++; // Αύξηση μετρητή υπόπνοιας
            String anomaly = "{\"status\":\"hypopnea\"}";
            WebSocket.broadcastTXT(anomaly);
            hypopneaDetected = true;
        }
    } else {
        hypopneaDetected = false;
    }

    if (lastSpO2 - spo2 >= SPO2_DROP_THRESHOLD && currentMillis - lastOdiTime > ODI_TOLERANCE_TIME) { // Ανίχνευση επεισοδίου ODI
        Serial.println("Ανίχνευση ODI επεισοδίου!");
    }
}

```

```

        odiCount++; // Αύξηση μετρητή ODI
        lastOdiTime = currentMillis;
    }

    lastSpO2 = spo2; // Ενημέρωση τελευταίας μέτρησης SpO2
}

void calculateHRV(unsigned long rrInterval) {
    if (rrInterval > 300 && rrInterval < 2000) { // Φιλτράρισμα έγκυρων διαστημάτων RR
        rrIntervals[rrIndex] = rrInterval; // Αποθήκευση στο buffer
        rrIndex = (rrIndex + 1) % HRV_BUFFER_SIZE; // Κυκλικός δείκτης buffer
        if (rrIndex == 0) { // Υπολογισμός HRV μόλις το buffer γεμίσει
            float sum = 0, mean = 0;
            for (int i = 0; i < HRV_BUFFER_SIZE; i++) {
                sum += rrIntervals[i];
            }
            mean = sum / HRV_BUFFER_SIZE; // Υπολογισμός μέσου όρου
            sum = 0;
            for (int i = 0; i < HRV_BUFFER_SIZE; i++) {
                sum += pow(rrIntervals[i] - mean, 2); // Άθροισμα διαφορών από το μέσο όρο
            }
            hrv = sqrt(sum / HRV_BUFFER_SIZE); // Υπολογισμός τυπικής απόκλισης
        }
    }
}

void loop() {
    websocket.loop(); // Διαχείριση WebSocket συνδέσεων
    pox.update(); // Ενημέρωση δεδομένων από τον αισθητήρα SpO2
    heartRate = pox.getHeartRate(); // Ανάγνωση καρδιακού ρυθμού
    spo2 = pox.getSpO2(); // Ανάγνωση SpO2
    detectAnomalies(heartRate, spo2); // Έλεγχος για ανωμαλίες

    if (millis() - lastECGSampleTime >= ECG_SAMPLING_PERIOD_MS) { // Δειγματοληψία ECG
        int ecgValue = analogRead(ECG_PIN);
        String ecgJson = "{\"ECG\":\"" + String(ecgValue) + "\"}";
        websocket.broadcastTXT(ecgJson); // Αποστολή δεδομένων ECG μέσω WebSocket
        lastECGSampleTime = millis();
    }

    unsigned long currentMillis = millis();
    if (heartRate > 0) { // Ανίχνευση παλμού για υπολογισμό HRV
        unsigned long rrInterval = currentMillis - lastBeatTime;
        lastBeatTime = currentMillis;
        calculateHRV(rrInterval);
    }

    // Ανάγνωση και επεξεργασία δεδομένων GSR
    long sum = 0;
    for (int i = 0; i < 10; i++) { // Λήψη 10 δειγμάτων GSR για καλύτερη ακρίβεια
        gsrValue = analogRead(GSR_PIN); // Ανάγνωση τιμής από τον αισθητήρα GSR
        sum += gsrValue; // Προσθήκη στο άθροισμα
    }
    gsr_average = sum / 10; // Υπολογισμός μέσου όρου τιμών GSR

    // Υπολογισμός αντίστασης δέρματος (Ohm)
    float humanResistance = ((4096.0 + 2.0 * gsr_average) * 100) / (sensorCalibration12b - gsr_average);
    // Υπολογισμός αγωγιμότητας (μS)
    float gsr = max(0.0, 1e6 / humanResistance);

    if (millis() - tsLastReport > REPORTING_PERIOD_MS) { // Αποστολή δεδομένων ανά καθορισμένο διάστημα
        int ahi = calculateAHI(); // Υπολογισμός AHI (Δείκτης Άπνοιας)
        int odi = calculateODI(); // Υπολογισμός ODI (Δείκτης Αποκορεσμού Οξυγόνου)
        String severity;
        if (ahi < 5) severity = "Normal";
        else if (ahi < 15) severity = "Mild";
        else if (ahi < 30) severity = "Moderate";
        else severity = "Severe";
    }
}

```

```

// Δημιουργία JSON string για αποστολή δεδομένων
String json = "{";
json += "\"AHI\":" + String(ahi) + ",";
json += "\"ODI\":" + String(odi) + ",";
json += "\"Severity\":" + severity + ",";
json += "\"HeartRate\":" + String(heartRate) + ",";
json += "\"SpO2\":" + String(spo2) + ",";
json += "\"HRV\":" + String(hrv) + ",";
json += "\"GSR\":" + String(gsr);
json += "}";

websocket.broadcastTXT(json); // Αποστολή δεδομένων μέσω WebSocket
Serial.println(json); // Εκτύπωση JSON για debugging
tsLastReport = millis(); // Αναβάθμιση χρονικής σήμανσης τελευταίας αποστολής
}
}

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αρχείο HTML ιστοσελίδας

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="en" >
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <title>Untitled</title>
  <link rel="stylesheet" href="./style.css">
</head>
<body>
<!-- partial:index.partial.html -->
</h><!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <title>Σύστημα Παρακολούθησης Άπνοιας</title>
  <script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js"></script>
  <style>
    body {
      font-family: 'Poppins', sans-serif;
      background-color: #1e1e2f;
      color: white;
      display: flex;
      flex-direction: column;
      align-items: center;
      justify-content: flex-start;
      padding: 20px;
      height: 100vh;
      overflow: hidden;
      margin-top: 20px;
    }
    .header {
      font-size: 24px;
      font-weight: bold;
      margin-bottom: 20px;
      color: #ffcc00;
    }
  </style>
</head>
</html>

```

```

.dashboard-container {
  display: flex;
  flex-direction: row;
  width: 100%;
  max-width: 1200px;
  gap: 20px;
}
.chart-container {
  display: flex;
  flex-direction: column;
  flex-grow: 1;
}
.card {
  background: linear-gradient(135deg, #2a2a40, #3a3a5f);
  padding: 20px;
  border-radius: 15px;
  box-shadow: 0 8px 16px rgba(0, 0, 0, 0.2);
}
h2, h3 { color: #ffcc00; }
.ecg-chart { width: 100% !important; height: 300px !important; }
.charts-row {
  display: flex;
  justify-content: space-evenly;
  gap: 20px;
}
.small-chart { width: 100% !important; height: 150px !important; }
.sensor-container {
  display: flex;
  flex-direction: column;
  gap: 10px;
  align-items: flex-start;
  min-width: 250px;
}
</style>
</head>
<body>
  <div class="header">Σύστημα Παρακολούθησης Άπνοιας</div>
  <div class="dashboard-container">
    <div class="chart-container">
      <div class="card"><h2>ECG Graph</h2><canvas id="ecgChart" class="ecg-chart"></canvas></div>
      <div class="charts-row">
        <div class="card" style="flex: 1;"><h3>Heart Rate</h3><canvas id="heartRateChart"
class="small-chart"></canvas></div>
        <div class="card" style="flex: 1;"><h3>SpO2</h3><canvas id="spo2Chart" class="small-
chart"></canvas></div>
      </div>
    </div>
    <div class="card sensor-container">
      <h2>Sensor Values</h2>
      <p>📊 Heart Rate: <span id="heartRate">0</span> bpm</p>
      <p>📊 SpO2: <span id="spo2">0</span>%</p>
      <p>📊 AHI: <span id="ahi">0</span></p>
      <p>📊 ODI: <span id="odi"></span></p>
      <p>📊 Severity: <span id="severity">Normal</span></p>
      <p>📊 GSR: <span id="gsr">0</span> μS</p>
      <p>📊 Status: <span id="status">Κανονική</span></p>
    </div>
  </div>
  <script>
    const ws = new WebSocket("ws://192.168.1.12:81");
    ws.onopen = () => console.log("WebSocket Connected");
    ws.onerror = (error) => console.error("WebSocket Error:", error);
    ws.onclose = () => console.log("WebSocket Disconnected");

    ws.onmessage = (event) => {
      try {

```

```

const data = JSON.parse(event.data);
console.log("Received Data:", data);

// Ενημέρωση αισθητήρων στην HTML (αν έχουν τιμή)
if (data.HeartRate !== undefined) document.getElementById('heartRate').textContent =
data.HeartRate.toFixed(1);updateChart(heartRateChart, data.HeartRate);
if (data.SpO2 !== undefined) document.getElementById('spo2').textContent = data.SpO2.toFixed(1);
updateChart(spo2Chart, data.SpO2);
if (data.AHI !== undefined) document.getElementById('ahi').textContent = data.AHI;
if (data.ODI !== undefined) document.getElementById('odi').textContent = data.ODI;
if (data.Severity !== undefined) document.getElementById('severity').textContent = data.Severity;
if (data.GSR !== undefined) document.getElementById('gsr').textContent = data.GSR.toFixed(2);

// Ενημέρωση του status εάν υπάρχει
if (data.status !== undefined) {
  let statusText = "";
  switch (data.status) {
    case "apnea":
      statusText = "☹️ Άπνοια Ανιχνεύθηκε!";
      break;
    case "hyporpea":
      statusText = "☹️ Υποπνοία Ανιχνεύθηκε!";
      break;
    default:
      statusText = "✅Κανονική Κατάσταση!";
  }
  document.getElementById('status').textContent = statusText;
}

// Προσθήκη δεδομένων στο καρδιογράφημα
if (data.ECG !== undefined) {
  updateChart(ecgChart, data.ECG);
}

} catch (error) {
  console.error("Error parsing WebSocket message:", error);
}
});

function updateUI(data) {
  document.getElementById('heartRate').textContent = data.HeartRate || 0;
  document.getElementById('spo2').textContent = data.SpO2 || 0;
  document.getElementById('ahi').textContent = data.AHI || 0;
  document.getElementById('odi').textContent = data.ODI || 0;
  document.getElementById('severity').textContent = data.Severity || 'Normal';
  document.getElementById('gsr').textContent = data.GSR || 0;
}

function updateChart(chart, dataValue) {
  if (dataValue !== undefined) {
    const now = new Date().toLocaleTimeString();

    chart.data.labels.push(now);
    chart.data.datasets[0].data.push(dataValue);

    // Διατήρηση μόνο των τελευταίων 30 σημείων για αποφυγή υπερφόρτωσης
    if (chart.data.labels.length > 30) {
      chart.data.labels.shift();
      chart.data.datasets[0].data.shift();
    }

    chart.update();
  }
}

const ctxECG = document.getElementById('ecgChart').getContext('2d');
const ctxHeartRate = document.getElementById('heartRateChart').getContext('2d');

```

```
const ctxSpO2 = document.getElementById('spo2Chart').getContext('2d');

const ecgChart = new Chart(ctxECG, {
  type: 'line',
  data: { labels: [], datasets: [{ label: 'ECG', data: [], borderColor: '#1e00ff', fill: false } ] },
  options: { responsive: true, animation: false }
});

const heartRateChart = new Chart(ctxHeartRate, {
  type: 'line',
  data: { labels: [], datasets: [{ label: 'Heart Rate', data: [], borderColor: '#ff0000', fill: false } ] },
  options: { responsive: true, animation: false }
});

const spo2Chart = new Chart(ctxSpO2, {
  type: 'line',
  data: { labels: [], datasets: [{ label: 'SpO2', data: [], borderColor: '#00ff00', fill: false } ] },
  options: { responsive: true, animation: false }
});

</script>
</body>
</html>
<!-- partial -->

</body>
</html>
```