ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ ΣΤΗ ΝΟΣΟ ΤΟΥ ΠΑΡΚΙΝΣΟΝ: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ»

Αποστολία Πάνου

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Τζαλλας

Άρτα, Δεκέμβριος, 2025

MONITORING AND ASSESSMENT OF MOTOR DISORDERS IN PARKINSON ’s DISEASE: A REVIEW OF TECHNIQUES AND TECHNOLOGY

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, Ημερομηνία: 3/03/2026

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής Αλέξανδρος Τζαλλας

2. Μέλος επιτροπής Νικόλαος Γιαννακεας

3. Μέλος επιτροπής Χρήστος Γκογκος

© Πάνου Αποστολία, 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εκ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Πάνου Αποστολία

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Αλέξανδρο Τζαλλα για την πολύτιμη καθοδήγησή του, την επιστημονική του υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Οι πολύτιμες συμβουλές του και η καθοδήγησή του υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της μελέτης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κωνσταντίνο Σακκα, υποψήφιο διδάκτορα, για την αμέριστη βοήθεια, τις γνώσεις που μοιράστηκε μαζί μου και την πολύτιμη συνεισφορά του στην πορεία της έρευνας. Η καθοδήγησή του και η υποστήριξή του υπήρξαν ανεκτίμητες σε κάθε στάδιο αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Νόσος του Πάρκινσον (PD) είναι μια προοδευτική νευροεκφυλιστική διαταραχή που επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα ζωής των ασθενών, προκαλώντας κινητικά και μη κινητικά συμπτώματα. Η αποτελεσματική παρακολούθηση και αξιολόγηση των κινητικών διαταραχών της PD είναι κρίσιμη για την έγκαιρη διάγνωση, την προσαρμογή των θεραπειών και τη βελτίωση της καθημερινής λειτουργικότητας των ασθενών. Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει τις διαθέσιμες μεθόδους αξιολόγησης των κινητικών διαταραχών στη Νόσο του Πάρκινσον, εστιάζοντας σε κλινικές, υποκειμενικές και τεχνολογικές προσεγγίσεις. Οι παραδοσιακές κλινικές μέθοδοι, όπως η UPDRS και η κλίμακα Hoehn & Yahr, παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες, ωστόσο παρουσιάζουν περιορισμούς λόγω της υποκειμενικότητας και της διακύμανσης στις εκτιμήσεις των ιατρών. Τα ημερολόγια και οι αυτοαναφορές των ασθενών αποτελούν συμπληρωματικές μεθόδους, αλλά εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη μνήμη και την ακρίβεια των ίδιων των ασθενών. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση φορητών αισθητήρων, κινητών συσκευών και μεθόδων μηχανικής μάθησης έχει ανοίξει νέους δρόμους στην αντικειμενική παρακολούθηση της PD. Συστήματα με επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια και αισθητήρες αδρανειακής μέτρησης (IMUs) επιτρέπουν την ακριβή καταγραφή κινητικών διαταραχών, όπως ο τρόμος, η βραδυκινησία και το πάγωμα της βάδισης (FoG). Επιπλέον, οι τεχνικές πολυτροπικής συγχώνευσης αισθητήρων έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές, καθώς συνδυάζουν δεδομένα από πολλαπλές πηγές για βελτιωμένη ακρίβεια και αξιοπιστία. Η εργασία καταλήγει στη σύγκριση των διαφόρων μεθόδων και στη σημασία των συνδυαστικών προσεγγίσεων για τη βελτίωση της διαχείρισης της PD. Τονίζεται η ανάγκη για ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων που θα επιτρέπουν την αντικειμενική, συνεχόμενη και μη παρεμβατική παρακολούθηση των ασθενών, συμβάλλοντας στην εξατομικευμένη θεραπεία και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής τους.

Λέξεις-κλειδιά: Νόσος του Πάρκινσον, Κινητικές διαταραχές, Ανάλυση Δεδομένων, Φορητοί Αισθητήρες, Αξιολόγηση Συμπτωμάτων

ABSTRACT

Parkinson’s Disease (PD) is a progressive neurodegenerative disorder that significantly impacts patients' quality of life, causing both motor and non-motor symptoms. Effective monitoring and assessment of PD-related motor impairments are crucial for early diagnosis, treatment adjustments, and improving daily functionality.This thesis explores the available methods for evaluating motor disorders in PD, focusing on clinical, subjective, and technological approaches. Traditional clinical methods, such as the Unified Parkinson’s Disease Rating Scale (UPDRS) and the Hoehn & Yahr Scale, provide valuable insights but have limitations due to subjectivity and variability in physician assessments. Patient diaries and self-reports serve as complementary tools, yet they rely on patient memory and accuracy.In recent years, the use of wearable sensors, mobile devices, and machine learning techniques has introduced new possibilities for objective PD monitoring. Systems incorporating accelerometers, gyroscopes, and inertial measurement units (IMUs) enable precise tracking of motor symptoms such as tremor, bradykinesia, and freezing of gait (FoG). Additionally, multi-sensor fusion techniques have proven particularly effective by integrating data from multiple sources to enhance accuracy and reliability.This thesis concludes with a comparison of various assessment methods and emphasizes the importance of combined approaches for improving PD management. The need for advanced, integrated systems that enable objective, continuous, and non-invasive patient monitoring is highlighted. Such systems can contribute to personalized treatment and an overall improvement in the quality of life for individuals with PD.

Keywords: Parkinson's Disease, Motor Disorders, Wearable Sensors, Data Analysis Symptom Assessment

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 6

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 7

ABSTRACT 8

1. Η Νόσος Πάρκινσον 12

.1 Γενική παρουσίαση της νόσου του Πάρκινσον (PD) 12

1.2 Σημασία της Έρευνας 14

1.3 Ερευνητικό Πεδίο των Κινητικών Διαταραχών 16

2. Παθολογία και Συμπτώματα της Νόσου του Πάρκινσον Νευρολογική βάση της PD 18

2.1 Ανάλυση της Παθολογίας της PD και τα Κύρια Συμπτώματα 19

2.1.1 Επιλογή Βιοδεικτών στη Βελτίωση Δεδομένων 22

2.1.2 Οι Κινητικές Διαταραχές και η Σημασία της Παρακολούθησης της 24

3. Τρόποι Αξιολόγησης των Κινητικών Διαταραχών στη Νόσο του Πάρκινσον Κλινικές μέθοδοι αξιολόγησης (UPDRS, Hoehn & Yahr Scale, ADL Scale) 27

3.1 Χρονολογική Εξέλιξη των Κλινικών Μεθόδων 28

3.1.1 Περιγραφή στις Βασικές Κλιμακες Αξιολόγησης των Κινητικών Συμπτωμάτων 31

3.1.2 Η Χρήση των Μεθόδων Αξιολόγησης σε Ευρωπαϊκές Χώρες 33

3.2 Υποκειμενικές Κλινικές Μέθοδοι 34

3.2.1 Υπάρχουσες Κλινικές Μέθοδοι και οι Περιορισμοί τους. 36

3.2.2 Η Ανάγκη για Νέες Τεχνολογικές Προσεγγίσεις 37

4.Τεχνολογικές Εξελίξεις στην Παρακολούθηση των Κινητικών Διαταραχών Φορητοί αισθητήρες και κινητές συσκευές Νευροαπεικονιστικές τεχνικές (PET, MRI, EEG) 40

4.1 Λειτουργία και Ιστορική Αναδρομή των Αισθητήρων στην Παρακολούθηση Κινητικών Διαταραχών 41

4.1.1 Φορητοί Αισθητήρες και Κινητές Συσκευές 43

4.1.2 Τύποι Αισθητήρων για Παρακολούθηση Κινητικών Διαταραχών 45

4.2 Νευροαπεικονιστικές τεχνικές (PET, MRI, EEG) 52

4.1.2 Υβριδικες Απεικονίσεις για Βελτιωμένη Διάγνωση Νευρολογικών Παθήσεων 54

5. Ανάλυση και Σύγκριση Διαφορετικών Τεχνολογικών Μεθόδων Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Κλινικών vs Τεχνολογικών Μεθόδων.....57

5.1.1 Πηγές Δεδομένων και η Σημασία της Ενοποίησης τους 59

5.1.2 Ενοποίησης Δεδομένων μέσω PD_MENTOR & DSS.....62

5.1.3 Ανάλυση Δεδομένων με Μοντέλα Μηχανικής Μάθησης και Εξόρυξης Δεδομένων 64

5.2 Πολλαπλή Συγχώνευση Αισθητήρων 65

5.3 Σύγκριση Διαφορετικών Τεχνολογικών Προσεγγίσεων με Χρήση Αισθητήρων.....67

5.3.1 Εκτίμηση Συμπτωμάτων PD-Τρόμος και Βραδυκινησία.....68

5.3.2 Ανίχνευση Προκαλούμενης Δυσκινησίας με Λεβοντόπα (LID) σε PD 70

5.3.3 Εκτίμηση της Σοβαρότητας των Συμπτωμάτων της PD-τρόμος, Βραδυκινησία και Δυσκινησία 72

5.3.4 Σύστημα Παρακολούθησης PWP Home με Χρήση Εφαρμογής που Βασίζεται στο Web 73

5.3.5. Εκτίμηση Διαταραχής Βάδισης σε Π.Δ.....75

5.3.6 Ανίχνευση Κινητικών Αυμπτωμάτων PD: Μη Ελεγχόμενο Οικιακό Περιβάλλον 76

5.3.7 Παρακολούθηση Τρόμου Χεριού PD.....78

5.3.8 Ανίχνευση Παγώματος Βάδισης (FoG) σε PD 80

6. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις Συμπεράσματα από την ανασκόπηση των τεχνικών αξιολόγησης 82

6.1 Προσαρμογή Θεραπευτικών Προτάσεων με Βάση τα Δεδομένα του Ασθενούς.....83

6.1.2 Χρήση Cloud Computing και Αρχιτεκτονικής Υπηρεσιών (SOA) για Αποτελεσματική Επεξεργασία Δεδομένων 84

6.1.3 Διασταυρούμενη Ανάλυση Δεδομένων για τη Βελτίωση της Πρόγνωσης της Νόσου 86

6.1.4 Ανάγκη για ανάπτυξη ολοκληρωμένων πολυτροπικών συστημάτων 87

6.1.5 Βελτίωση του Συστήματος Υποστήριξης Απόφασης (DSS) 89

6.1.6 Ανάπτυξη πιο Ευφυών Κινητών Εφαρμογών για Ασθενείς 90

6.2. Πιο Ολοκληρωμένες και Ακριβείς Τεχνολογίες Παρακολούθησης 91

6.2.1 Επίπεδα Πολυτροπικής Σύντηξης 93

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 98

ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ 106

1. Η Νόσος Πάρκινσον

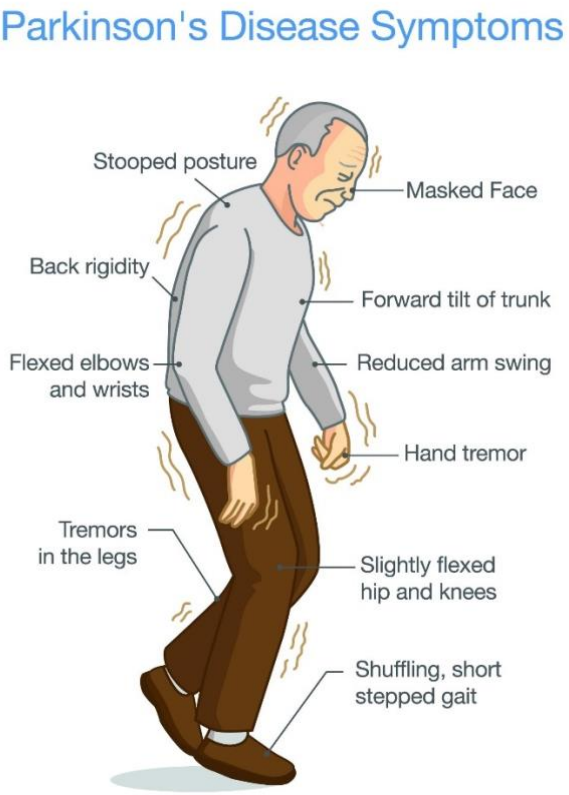
Η νόσος Πάρκινσον αποτελεί μία από τις συχνότερες και πιο μελετημένες νευροεκφυλιστικές διαταραχές του κεντρικού νευρικού συστήματος. Χαρακτηρίζεται κυρίως από τη σταδιακή εκφύλιση των ντοπαμινεργικών νευρώνων στη μέλαινα ουσία του εγκεφάλου, περιοχή που είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της κίνησης και της μυϊκής δραστηριότητας. Η απώλεια της ντοπαμίνης οδηγεί σε έναν συνδυασμό κινητικών συμπτωμάτων—όπως τρόμο ηρεμίας, μυϊκή δυσκαμψία, βραδυκινησία και διαταραχές ισορροπίας—καθώς και μη κινητικών εκδηλώσεων, όπως διαταραχές ύπνου, γνωστικές αλλαγές και αυτόνομες δυσλειτουργίες. Πρόκειται για μία προοδευτική πάθηση, της οποίας η αιτιολογία παραμένει πολυπαραγοντική. Γενετικοί, περιβαλλοντικοί και νευροβιολογικοί παράγοντες φαίνεται να συμβάλλουν στην εμφάνισή της, ενώ η επίπτωσή της αυξάνεται με την ηλικία, καθιστώντας την ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα δημόσιας υγείας σε γηράσκοντες πληθυσμούς. Αν και δεν υπάρχει μέχρι σήμερα οριστική θεραπεία, σημαντικές εξελίξεις στις φαρμακευτικές παρεμβάσεις, στη νευροχειρουργική και στη νευροαποκατάσταση έχουν βελτιώσει ουσιαστικά την ποιότητα ζωής των ασθενών. Η κατανόηση της νόσου Πάρκινσον, των παθοφυσιολογικών μηχανισμών της και της κλινικής της εικόνας αποτελεί θεμέλιο για την ανάπτυξη νέων θεραπευτικών προσεγγίσεων και για την αποτελεσματικότερη διαχείριση των ασθενών. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια συνολική θεώρηση της νόσου, θέτοντας τις βάσεις για την περαιτέρω ανάλυση των επιπτώσεών της και των σύγχρονων πρακτικών αντιμετώπισης.

.1 Γενική παρουσίαση της νόσου του Πάρκινσον (PD)

Η νόσος του Πάρκινσον (Parkinson's Disease – PD) αποτελεί μια χρόνια, προοδευτική και νευροεκφυλιστική διαταραχή που επηρεάζει κυρίως το κινητικό σύστημα. Χαρακτηρίζεται από τη σταδιακή απώλεια ντοπαμινεργικών νευρώνων στη μέλαινα ουσία (substantia nigra pars compacta) του εγκεφάλου, περιοχή η οποία εμπλέκεται στη ρύθμιση της κίνησης, του μυϊκού τόνου και του συντονισμού. Η μείωση της ντοπαμίνης – ενός νευροδιαβιβαστή απαραίτητου για την ομαλή λειτουργία των βασικών γαγγλίων – οδηγεί σε χαρακτηριστικές διαταραχές

κινητικότητας και σε πλήθος μη κινητικών συμπτωμάτων που επηρεάζουν συνολικά τη λειτουργικότητα του ατόμου [1].

Παρότι η PD παραδοσιακά θεωρείται κινητική διαταραχή, σήμερα αναγνωρίζεται ως μια πολυσυστηματική νόσος με ευρύ φάσμα κλινικών εκδηλώσεων. Στα βασικά κινητικά συμπτώματα περιλαμβάνονται ο τρόμος ηρεμίας, η βραδυκινησία (μείωση της ταχύτητας των κινήσεων), η μυϊκή δυσκαμψία και οι διαταραχές ισορροπίας και βάδισης. Ωστόσο, εξίσου σημαντικά είναι και τα μη κινητικά συμπτώματα, όπως οι διαταραχές ύπνου, οι γνωστικές δυσλειτουργίες, η κατάθλιψη, οι αυτόνομες διαταραχές (π.χ. ορθοστατική υπόταση, δυσκοιλιότητα), καθώς και οι αισθητηριακές αλλοιώσεις [2]. Τα συμπτώματα αυτά μπορεί να προηγηθούν των κινητικών ενδείξεων κατά πολλά χρόνια, γεγονός που αποδεικνύει τον ευρύτερο νευρολογικό χαρακτήρα της νόσου. Η αιτιολογία της νόσου Πάρκινσον παραμένει πολυπαραγοντική και δεν έχει ακόμη πλήρως αποσαφηνιστεί. Συνδυάζει γενετικούς παράγοντες, περιβαλλοντικές επιδράσεις, καθώς και κυτταρικές διεργασίες όπως το οξειδωτικό στρες, η μιτοχονδριακή δυσλειτουργία και η συσσώρευση της πρωτεΐνης α-συνουκλεΐνης σε μορφή σωμάτιων Lewy. Η PD εμφανίζεται συχνότερα σε άτομα άνω των 60 ετών, αν και ένα ποσοστό περίπου 10–15% αφορά νεότερους ασθενείς, με μορφές πρώιμης έναρξης. Η νόσος του Πάρκινσον έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ποιότητα ζωής των ασθενών και των οικογενειών τους, τόσο λόγω της προοδευτικής φύσης της όσο και λόγω της ανάγκης για μακροχρόνια θεραπευτική και υποστηρικτική φροντίδα. Παρόλο που δεν υπάρχει προς το παρόν οριστική θεραπεία, οι διαθέσιμες φαρμακευτικές παρεμβάσεις, η βαθιά εγκεφαλική διέγερση (Deep Brain Stimulation – DBS) και οι σύγχρονες μέθοδοι νευροαποκατάστασης επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας και τον καλύτερο έλεγχο των συμπτωμάτων [3].



Εικόνα 1: Οπτική Αναπαράσταση των συμπτωμάτων της PD

Συνολικά, η PD αποτελεί μία σύνθετη νευρολογική πάθηση με πολλαπλές κλινικές διαστάσεις, της οποίας η έγκαιρη αναγνώριση και η ολιστική διαχείριση είναι κρίσιμες για την αποτελεσματική υποστήριξη των ασθενών. Το υποκεφάλαιο αυτό σκιαγραφεί το γενικό προφίλ της νόσου, θέτοντας τη βάση για την πιο αναλυτική παρουσίαση των παθοφυσιολογικών μηχανισμών και των κλινικών χαρακτηριστικών που ακολουθεί στα επόμενα τμήματα.

1.2 Σημασία της Έρευνας

Η μελέτη της PD αποτελεί πεδίο ιδιαίτερης σημασίας τόσο για την επιστημονική κοινότητα όσο και για το σύνολο της κοινωνίας, λόγω της συνεχώς αυξανόμενης επίπτωσής της και των πολυδιάστατων επιπτώσεων που προκαλεί στους ασθενείς και στο σύστημα υγείας. Ως η δεύτερη πιο συχνή νευροεκφυλιστική διαταραχή μετά τη νόσο Alzheimer, η PD επηρεάζει εκατομμύρια άτομα παγκοσμίως, με την αναμενόμενη αύξηση του προσδόκιμου ζωής να προδιαγράφει ακόμη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στο μέλλον. Η προοδευτική της φύση, καθώς και η απουσία

θεραπείας που να αναστέλλει ή να αντιστρέφει την εκφύλιση των νευρώνων, καθιστούν την έρευνα απαραίτητη για την κατανόηση και την αποτελεσματικότερη αντιμετώπισή της [4].

Η έρευνα γύρω από την PD έχει καίριο ρόλο στην αποσαφήνιση των υποκείμενων νευροβιολογικών μηχανισμών. Η διερεύνηση της συσσώρευσης της α-συνουκλεΐνης, των μιτοχονδριακών διαταραχών, του οξειδωτικού στρες και των νευροφλεγμονωδών διεργασιών μπορεί να προσφέρει πολύτιμες γνώσεις που θα οδηγήσουν σε νέους θεραπευτικούς στόχους. Επιπλέον, η αναγνώριση γενετικών παραγόντων και βιοδεικτών συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της ποικιλομορφίας της νόσου, επιτρέποντας την ανάπτυξη πιο εξατομικευμένων παρεμβάσεων.

Ιδιαίτερη σημασία έχει, επίσης, η έρευνα στον τομέα των θεραπευτικών στρατηγικών. Παρά την ύπαρξη αποτελεσματικών φαρμακευτικών θεραπειών για τον έλεγχο των συμπτωμάτων, εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη για θεραπείες που να επιβραδύνουν την εξέλιξη της νόσου. Η αξιολόγηση νέων φαρμάκων, νευροπροστατευτικών ουσιών, αλλά και τεχνολογικών παρεμβάσεων – όπως η βαθιά εγκεφαλική διέγερση (DBS), η γονιδιακή θεραπεία και οι κυτταρικές θεραπείες – αποτελεί κρίσιμο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση.

Παράλληλα, η έρευνα συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ασθενών. Η κατανόηση των μη κινητικών συμπτωμάτων, η ανάπτυξη νέων εργαλείων αξιολόγησης, η προώθηση προγραμμάτων νευροαποκατάστασης και η διερεύνηση ψυχοκοινωνικών παραγόντων ενισχύουν μια πιο σφαιρική και ολιστική προσέγγιση στη διαχείριση της PD [5].

Τέλος, η σημασία της έρευνας αντανακλάται και στη δημόσια υγεία. Η αυξανόμενη επιβάρυνση των συστημάτων υγείας λόγω των χρόνιων νευροεκφυλιστικών παθήσεων απαιτεί τεκμηριωμένες στρατηγικές πρόληψης, έγκαιρης διάγνωσης και αποτελεσματικής υποστήριξης των ασθενών και των φροντιστών τους. Η επιστημονική τεκμηρίωση αποτελεί θεμέλιο για τη χάραξη πολιτικών υγείας που ανταποκρίνονται στις πραγματικές ανάγκες του πληθυσμού.

Συνολικά, η έρευνα στη νόσο του Πάρκινσον δεν συμβάλλει μόνο στη βαθύτερη κατανόηση της νόσου, αλλά αποτελεί βασικό μοχλό για την ανάπτυξη καινοτόμων

θεραπευτικών λύσεων και την ενίσχυση της ποιότητας ζωής των ασθενών. Η εξέλιξη της γνώσης στον τομέα αυτό καθίσταται, επομένως, απαραίτητη για την επιστήμη και την κοινωνία.

1.3 Ερευνητικό Πεδίο των Κινητικών Διαταραχών

Το ερευνητικό πεδίο των κινητικών διαταραχών αποτελεί μια σημαντική και συνεχώς αναπτυσσόμενη περιοχή των νευροεπιστημών, δεδομένου ότι οι διαταραχές αυτές επηρεάζουν βασικές λειτουργίες του ανθρώπινου οργανισμού, όπως ο έλεγχος της κίνησης, ο μυϊκός τόνος, ο συντονισμός και η ισορροπία. Στο επίκεντρο της έρευνας βρίσκονται παθήσεις που οφείλονται σε δυσλειτουργίες των βασικών γαγγλίων, του θαλάμου, της παρεγκεφαλίδας και των κινητικών φλοιικών περιοχών, καθώς οι συγκεκριμένες δομές αποτελούν κεντρικούς ρυθμιστές της κινητικής συμπεριφοράς.

Οι κινητικές διαταραχές περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα κλινικών οντοτήτων, όπως η νόσος Πάρκινσον, η δυστονία, ο τρόμος, η χορεία, καθώς και οι αταξίες. Η PD αποτελεί το συχνότερο και ίσως το πιο ερευνημένο παράδειγμα κινητικής διαταραχής, λόγω της χαρακτηριστικής παθοφυσιολογίας της και των ποικίλων κλινικών συμπτωμάτων που παρουσιάζει. Η μελέτη αυτών των διαταραχών συμβάλλει ουσιαστικά στην καλύτερη κατανόηση των νευροβιολογικών μηχανισμών που διέπουν όχι μόνο την παθολογία αλλά και τη φυσιολογική κίνηση [6].

Στο πλαίσιο της σύγχρονης έρευνας, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται:

- **Στην κατανόηση των νευρωνικών κυκλωμάτων**

Η λειτουργία των βασικών γαγγλίων, η αλληλεπίδραση των ντοπαμινεργικών, γλουταμινεργικών και GABAεργικών νευρώνων, καθώς και οι συνδέσεις με τον κινητικό φλοιό αποτελούν βασικούς τομείς μελέτης. Η δυσλειτουργία αυτών των κυκλωμάτων οδηγεί σε συμπτώματα όπως βραδυκινησία, τρόμο ή υπερκινητικότητα.

- **Στην ανάλυση βιοδεικτών και νευροαπεικόνισης**

Η μαγνητική τομογραφία, η λειτουργική νευροαπεικόνιση , η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET) και η σπινθηρογραφία DAT-SPECT επιτρέπουν την in vivo μελέτη των νευρωνικών μηχανισμών και της εξέλιξης των κινητικών διαταραχών. Η αναζήτηση βιοδεικτών αποτελεί καθοριστικό βήμα για την έγκαιρη διάγνωση και την παρακολούθηση της πορείας της νόσου.

- **Στην ανάπτυξη και αξιολόγηση θεραπευτικών παρεμβάσεων**

Νέες φαρμακευτικές θεραπείες, νευροπροστατευτικοί παράγοντες και καινοτόμες τεχνολογίες —όπως η βαθιά εγκεφαλική διέγερση (DBS), τα εμφυτεύσιμα συστήματα χορήγησης φαρμάκων και η γονιδιακή θεραπεία— αποτελούν επίκεντρο της ερευνητικής δραστηριότητας. Παράλληλα, εξελίσσονται μη φαρμακευτικές παρεμβάσεις, όπως η φυσιοθεραπεία, η εργοθεραπεία, η λογοθεραπεία και η ρομποτική αποκατάσταση.

- **Στη μελέτη της κλινικής ποικιλομορφίας**

Οι κινητικές διαταραχές εμφανίζουν σημαντική ετερογένεια ως προς την έναρξη, την εξέλιξη και την ανταπόκριση στη θεραπεία. Η εμβάθυνση στην κατηγοριοποίηση των υποτύπων της νόσου Πάρκινσον, των δυσκινησιών και των άλλων υπερκινητικών συνδρόμων αποτελεί βασικό βήμα για την εξατομίκευση της θεραπευτικής προσέγγισης.

- **Στην καθημερινή λειτουργικότητα και στην ποιότητα ζωής**

Η σύγχρονη έρευνα εξετάζει όχι μόνο τα νευρολογικά συμπτώματα αλλά και τον αντίκτυπό τους στη λειτουργικότητα, στην αυτονομία και στην ψυχοκοινωνική υγεία των ασθενών. Η αξιολόγηση της ποιότητας ζωής έχει πλέον καθιερωθεί ως βασικός δείκτης αποτελεσματικότητας των θεραπευτικών παρεμβάσεων [7].

Συνολικά, το ερευνητικό πεδίο των κινητικών διαταραχών συμβάλλει ουσιαστικά στην εξέλιξη της νευρολογίας και της νευροεπιστήμης. Η κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τις διαταραχές αυτές όχι μόνο βοηθά στη διάγνωση και αντιμετώπιση παθήσεων όπως η νόσος Πάρκινσον, αλλά προσφέρει παράλληλα πολύτιμες πληροφορίες για τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου και την οργάνωση του κινητικού συστήματος

2. Παθολογία και Συμπτώματα της Νόσου του Πάρκινσον

Νευρολογική βάση της PD

Η PD αποτελεί μια πολυσύνθετη νευροεκφυλιστική διαταραχή, της οποίας η κλινική εικόνα και η εξέλιξη αποτυπώνουν βαθιές αλλοιώσεις στη νευροανατομική και νευροχημική οργάνωση του εγκεφάλου. Η παθολογία της νόσου εδράζεται πρωτίστως στην εκφύλιση των ντοπαμινεργικών νευρώνων στη μέλαινα ουσία (substantia nigra pars compacta), μια περιοχή κομβικής σημασίας για τη ρύθμιση της κίνησης μέσω των βασικών γαγγλίων. Η μείωση των επιπέδων ντοπαμίνης και η διαταραχή των κινητικών κυκλωμάτων οδηγούν στην εμφάνιση των χαρακτηριστικών κινητικών συμπτωμάτων, τα οποία αποτελούν το κύριο κλινικό γνώρισμα της νόσου.

Ωστόσο, η παθοφυσιολογία της PD υπερβαίνει τη ντοπαμινεργική δυσλειτουργία. Στη νόσο παρατηρείται συσσώρευση της πρωτεΐνης α-συνουκλεΐνης σε ατυπικές παθολογικές δομές γνωστές ως σωμάτια Lewy, τα οποία επεκτείνονται προοδευτικά σε πολλαπλές περιοχές του κεντρικού και περιφερικού νευρικού συστήματος. Αυτή η εκτεταμένη παθολογία εξηγεί την παρουσία μη κινητικών συμπτωμάτων, τα οποία συχνά εμφανίζονται χρόνια πριν από τα κινητικά και επηρεάζουν σημαντικά την καθημερινότητα των ασθενών.

Το σύνολο των συμπτωμάτων της PD —κινητικών και μη κινητικών— αντανακλά την πολυσυστημική φύση της νόσου. Η βραδυκινησία, ο τρόμος ηρεμίας, η μυϊκή δυσκαμψία και οι διαταραχές της βάδισης αποτελούν τα θεμελιώδη κινητικά σημεία. Παράλληλα, η γνωστική έκπτωση, οι διαταραχές ύπνου, η ψυχιατρική συμπτωματολογία, η αυτόνομη δυσλειτουργία και οι αισθητηριακές διαταραχές αποκαλύπτουν μια πιο εκτεταμένη νευροβιολογική εμπλοκή.

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει διεξοδικά τις νευρολογικές και παθολογικές βάσεις της νόσου του Πάρκινσον, αναλύοντας τόσο τους βασικούς μηχανισμούς εκφύλισης όσο και τη συσχέτιση αυτών των μηχανισμών με την κλινική εικόνα. Μέσω της κατανόησης των κυτταρικών, μοριακών και συστημικών αλλαγών που χαρακτηρίζουν την PD, αναδεικνύεται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που συμβάλλει στη διάγνωση, στην πρόγνωση και στην ανάπτυξη νέων θεραπευτικών παρεμβάσεων.

2.1 Ανάλυση της Παθολογίας της PD και τα Κύρια Συμπτώματα

Η κύρια παθολογία της PD αφορά την προοδευτική απώλεια των ντοπαμινεργικών νιγροστριωδών νευρώνων στη συμπαγή μοίρα της μέλαινας ουσίας (substantia nigra pars compacta). Παράλληλα, ο σχηματισμός παθολογικών συσσωματωμάτων της πρωτεΐνης α-συνουκλεΐνης, που οδηγούν στη δημιουργία των χαρακτηριστικών σωμάτων Lewy, θεωρείται το βασικό παθολογοανατομικό γνώρισμα της νόσου. Η α-συνουκλεΐνη είναι μια πρωτεΐνη που φυσιολογικά συμμετέχει στη ρύθμιση της συναπτικής λειτουργίας και της μεταφοράς νευροδιαβιβαστών όπως η ντοπαμίνη [8]. Ωστόσο, στη νόσο του Πάρκινσον και σε άλλες συνουκλεϊνοπάθειες, η πρωτεΐνη αυτή υφίσταται παθολογική συσσώρευση, αποκτά μη φυσιολογική δομή και σχηματίζει αδιάλυτες ενδοκυττάριες εναποθέσεις, οι οποίες οδηγούν σε νευροεκφύλιση.

Τα σωμάτια Lewy (Lewy bodies) αποτελούν τις χαρακτηριστικές παθολογικές δομές της νόσου και εντοπίζονται τόσο στη μέλαινα ουσία όσο και σε άλλες περιοχές του εγκεφάλου, όπως ο εγκεφαλικός φλοιός, ιδιαίτερα σε προχωρημένα στάδια. Η παρουσία τους σχετίζεται με τη δυσλειτουργία των νευρώνων και τον κυτταρικό θάνατο, συμβάλλοντας τόσο στα κινητικά όσο και στα μη κινητικά συμπτώματα, όπως η άνοια με σωμάτια Lewy. Ο παθολογικός ρόλος της α-συνουκλεΐνης έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων θεραπευτικών προσεγγίσεων που στοχεύουν στη μείωση ή παρεμπόδιση της συσσώρευσής της, στο πλαίσιο ευρωπαϊκών και διεθνών ερευνητικών πρωτοβουλιών για νευροεκφυλιστικές νόσους [9].

Τα κλασικά κλινικά χαρακτηριστικά της PD περιλαμβάνουν ένα συνδυασμό προοδευτικών κινητικών και μη κινητικών συμπτωμάτων. Τα κινητικά συμπτώματα αποτελούν συχνά τα πιο εμφανή, ωστόσο τα μη κινητικά έχουν εξίσου σημαντικό αντίκτυπο στην ποιότητα ζωής των ασθενών. Η εξέλιξη της νόσου ποικίλλει σημαντικά μεταξύ των ατόμων· ενώ στα αρχικά στάδια οι επιπτώσεις μπορεί να είναι ήπιες, στα προχωρημένα στάδια προκαλείται σοβαρή αναπηρία [10].

Μεταξύ των κύριων κινητικών συμπτωμάτων περιλαμβάνονται:

Τρόμος ηρεμίας, πρόκειται για ρυθμικό τρόμο που εμφανίζεται όταν ο ασθενής βρίσκεται σε ηρεμία, κυρίως στα χέρια, τα πόδια ή το πηγούνι. Συνήθως μειώνεται με την εκούσια κίνηση, αλλά μπορεί να εντείνεται σε περιόδους κόπωσης ή άγχους. Δεν εμφανίζεται σε όλους τους ασθενείς αλλά αποτελεί συχνά πρώιμο σύμπτωμα.

Μυϊκή δυσκαμψία (rigidity), χαρακτηρίζεται από αυξημένη αντίσταση στις παθητικές κινήσεις, η οποία προκαλεί πόνο, μυϊκή ακαμψία και περιορισμένο εύρος κίνησης. Επηρεάζει σημαντικά την ευχέρεια και τη λειτουργικότητα των κινήσεων.

Βραδυκινησία, η βραδυκινησία αφορά την επιβράδυνση των εκούσιων κινήσεων και αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό σύμπτωμα της PD. Οι ασθενείς δυσκολεύονται να ξεκινήσουν μια κίνηση και η εκτέλεσή της είναι αργή και λιγότερο ακριβής, επηρεάζοντας δραστηριότητες όπως το περπάτημα, το ντύσιμο, το γράψιμο και τη μάσηση.

Διαταραχές Ισορροπίας και Βάδισης, σε προχωρημένα στάδια, εμφανίζονται σοβαρές διαταραχές της ισορροπίας και της όρθιας στάσης, καθώς και επεισόδια "freezing of gait" (FoG), όπου ο ασθενής αδυνατεί προσωρινά να ξεκινήσει ή να συνεχίσει τη βάδιση. Αυτό αυξάνει τον κίνδυνο πτώσεων και περιορίζει την κινητικότητα.

Μη Κινητικά Συμπτώματα, η παθολογική απώλεια νευρώνων στη PD δεν περιορίζεται στο ντοπαμινεργικό σύστημα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση σημαντικών μη κινητικών συμπτωμάτων, πολλές φορές πριν ακόμη εμφανιστούν τα κινητικά.

Γνωστική Εξασθένηση, Εκδηλώνεται με δυσκολίες στη μνήμη, την προσοχή και την εκτελεστική λειτουργία και μπορεί να εξελιχθεί σε άνοια στα προχωρημένα στάδια.

Κατάθλιψη και άγχος, Αποτελούν από τα πιο συχνά μη κινητικά συμπτώματα, συχνά υποδιαγνωσμένα. Προκαλούνται από ανισορροπίες νευροδιαβιβαστών και το ψυχολογικό βάρος της χρόνιας νόσου.

Διαταραχές Ύπνου, περιλαμβάνουν αϋπνία, υπερβολική ημερήσια υπνηλία, νυχτερινές αφυπνίσεις και διαταραχή ύπνου REM, κατά την οποία ο ασθενής μπορεί να κινείται ή να μιλάει στον ύπνο του.

Εικόνα 2: Συμπτώματα της Νόσου

Η εξέλιξη της PD παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια όσον αφορά την παθολογία και το κλινικό φαινότυπο, γεγονός που δυσκολεύει τη σταδιοποίηση της νόσου αποκλειστικά με βάση τη σοβαρότητα των συμπτωμάτων. Επιπλέον, η συμπτωματική βελτίωση που προσφέρουν τα αντιπαρκινσονικά φάρμακα μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των κλινικών κλιμάκων, ακόμη και μετά από περίοδο διακοπής της αγωγής [11].

Επομένως, απαιτούνται αξιόπιστοι βιοδείκτες που να μπορούν να αντικειμενικοποιούν την εξέλιξη της παθολογικής degenerative διεργασίας, ανεξάρτητα από τη φαρμακευτική δράση. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η κλίμακα Hoehn & Yahr (H&Y) και η Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS / MDS-UPDRS) αποτελούν καθιερωμένα εργαλεία αξιολόγησης. Τα τελευταία χρόνια, συνδυάζονται ολοένα και περισσότερο με φορητές τεχνολογίες, όπως

επιταχυνσιόμετρα και έξυπνα ρολόγια, παρέχοντας συνεχόμενη και αντικειμενική παρακολούθηση των συμπτωμάτων.

2.1.1 Επιλογή Βιοδεικτών στη Βελτίωση Δεδομένων

Η επιλογή βιοδεικτών που δεν επηρεάζονται από τη φαρμακευτική αγωγή αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων που συλλέγονται σχετικά με τη PD. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται πιο αξιόπιστη αποτύπωση των παθολογικών και κλινικών διεργασιών που χαρακτηρίζουν τη νόσο, καθώς και πιο αντικειμενική παρακολούθηση της εξέλιξής της, χωρίς τις διακυμάνσεις που προκαλούν οι συμπτωματικές θεραπείες.

Ο βιοδείκτης ορίζεται ως ένα μετρήσιμο χαρακτηριστικό το οποίο αντικατοπτρίζει βιολογικές διεργασίες υπό φυσιολογικές ή παθολογικές συνθήκες. Στη νόσο του Πάρκινσον, οι βιοδείκτες χρησιμοποιούνται τόσο για τη διάγνωση και την πρώιμη ανίχνευση της νόσου όσο και για την παρακολούθηση της εξέλιξης και της ανταπόκρισης στη θεραπεία [12]. Αυτοί μπορεί να είναι μοριακοί, όπως η συγκέντρωση της α-συνουκλεΐνης στο εγκεφαλονωτιαίο υγρό· απεικονιστικοί, όπως η μείωση της ντοπαμινεργικής δραστηριότητας σε PET ή DAT-SPECT εξετάσεις· ή φυσιολογικοί/ψηφιακοί, όπως τα κινητικά μοτίβα που καταγράφονται μέσω φορητών αισθητήρων και έξυπνων συσκευών[13]. Παρά την αξιοσημείωτη πρόοδο στη μελέτη τους, δεν έχει ακόμη αναγνωριστεί ένας καθοριστικός μοναδικός βιοδείκτης που να επιτρέπει την ασφαλή και προκλινική διάγνωση της νόσου, γεγονός που καθιστά αναγκαία την πολυπαραμετρική αξιολόγηση.

Μια ιδιαίτερα σημαντική κατηγορία αποτελούν οι αναπληρωματικοί δείκτες, οι οποίοι παρέχουν πρώιμες ενδείξεις για την πορεία της νόσου ή την ανταπόκριση στην αγωγή, χωρίς να απαιτείται αναμονή για την εμφάνιση κλινικών εκβάσεων. Στην PD, ενδεικτικά παραδείγματα πιθανών αναπληρωματικών δεικτών αποτελούν οι μεταβολές στη συγκέντρωση της α-συνουκλεΐνης στο ΕΝΥ ή οι αλλαγές στη ντοπαμινεργική λειτουργικότητα σε απεικονιστικές εξετάσεις. Αυτοί οι δείκτες συμβάλλουν στην ταχύτερη λήψη θεραπευτικών αποφάσεων και στη βελτιστοποίηση των κλινικών δοκιμών, επιτρέποντας την αξιολόγηση νέων θεραπευτικών προσεγγίσεων [14].

Σε αντίθεση με τους αναπληρωματικούς δείκτες, τα κλινικά τελικά σημεία αποτελούν άμεσες και ουσιαστικές εκβάσεις που αντανακλούν τη λειτουργική κατάσταση και την ποιότητα ζωής του ασθενούς. Στη νόσο του Πάρκινσον, τέτοια τελικά σημεία είναι οι μεταβολές στις βαθμολογίες της UPDRS/MDS-UPDRS, η συχνότητα επεισοδίων freezing of gait ή η γενικότερη λειτουργική επιβάρυνση του ασθενούς. Τα κλινικά τελικά σημεία αποτελούν θεμέλιο για την αξιολόγηση και έγκριση νέων θεραπευτικών στρατηγικών [15].

Στο πεδίο της έρευνας, ιδιαίτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνουν οι θεραπείες τροποποίησης της νόσου, οι οποίες στοχεύουν στην επιβράδυνση ή την αναστροφή των παθολογικών διεργασιών της PD και όχι απλώς στην ανακούφιση των συμπτωμάτων. Στις υπό διερεύνηση προσεγγίσεις περιλαμβάνονται οι νευροπροστατευτικές θεραπείες που στοχοποιούν την α-συνουκλεΐνη ή την οξειδωτική βλάβη, οι νευρο-αποκαταστατικές στρατηγικές όπως η γονιδιακή θεραπεία και τα βλαστοκύτταρα, καθώς και οι ανοσοθεραπείες που επιδιώκουν να μειώσουν τη νευροφλεγμονή και την παθολογική συσσώρευση πρωτεϊνών [16]. Παρά την πρόοδο, καμία από αυτές δεν έχει ακόμη αποδειχθεί κλινικά αποτελεσματική ώστε να θεωρηθεί τροποποιητική της νόσου, γεγονός που καθιστά ακόμη πιο αναγκαίο τον συνδυασμό αξιόπιστων βιοδεικτών, αναπληρωματικών δεικτών και κλινικών τελικών σημείων στην αξιολόγηση των νέων θεραπειών.

Η ανάγκη για έγκυρους και ανεξάρτητους από την αγωγή βιοδείκτες ενισχύεται από το γεγονός ότι η εξέλιξη της νόσου του Πάρκινσον δεν είναι γραμμική. Μελέτες δείχνουν ότι ο ρυθμός επιδείνωσης μπορεί να είναι ταχύτερος στα πρώιμα στάδια και να επιβραδύνεται σε μεταγενέστερα, ενώ ταυτόχρονα να διαφοροποιείται σημαντικά από ασθενή σε ασθενή. Η ηλικία αποτελεί ισχυρό προγνωστικό παράγοντα, καθώς μεγαλύτερη ηλικία έναρξης συνοδεύεται από ταχύτερη εξέλιξη και συχνότερη εμφάνιση γνωστικής έκπτωσης [17]. Επιπλέον, οι συννοσηρότητες που συνδέονται φυσιολογικά με τη γήρανση επηρεάζουν την πορεία της νόσου και περιπλέκουν την κλινική της εικόνα.

Η παθολογική διεργασία στην PD φαίνεται ότι ξεκινά αρκετά χρόνια πριν από την πρώτη κλινική εκδήλωση, καθώς η εμφάνιση των κινητικών συμπτωμάτων απαιτεί απώλεια περίπου του 50% των ντοπαμινεργικών νευρώνων στη μέλαινα ουσία. Τα πρώιμα συμπτώματα είναι συχνά μη ειδικά, οδηγώντας σε διάστημα καθυστέρησης

4–6 ετών μεταξύ της έναρξης των υποκλινικών αλλαγών και της διάγνωσης [18]. Κατά συνέπεια, ο συνδυασμός αξιόπιστων βιοδεικτών, αναπληρωματικών δεικτών και σύγχρονων ψηφιακών μεθόδων παρακολούθησης αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την κατανόηση της πραγματικής εξέλιξης της νόσου.

2.1.2 Οι Κινητικές Διαταραχές και η Σημασία της Παρακολούθησης της

Η παρακολούθηση των κινητικών διακυμάνσεων των ατόμων με νόσο του Πάρκινσον αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία για την κατανόηση της κλινικής εικόνας και την αξιολόγηση της θεραπευτικής ανταπόκρισης. Ένα από τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην κλινική πράξη είναι οι υποκειμενικές αναφορές των ασθενών, οι οποίες περιλαμβάνουν αυτοαναφορές, ημερολόγια συμπτωμάτων και επιτόπιες παρατηρήσεις από εξειδικευμένο προσωπικό. Μέσω αυτών των μεθόδων, οι ασθενείς καλούνται να ανακαλέσουν και να περιγράψουν περιόδους «ενεργού» και «μη ενεργού» χρόνου, δηλαδή τις χρονικές φάσεις όπου η φαρμακευτική αγωγή ελέγχει επαρκώς τα συμπτώματα ή, αντίθετα, όπου τα συμπτώματα επανεμφανίζονται λόγω μείωσης της ισχύος του φαρμάκου.

Παρότι οι αυτοαναφορές και τα ημερολόγια προσφέρουν μια πιο άμεση καταγραφή της εμπειρίας του ασθενούς, παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς. Η ανάκληση μνήμης συχνά επηρεάζεται από υποκειμενικότητα, ενώ πολλοί ασθενείς δυσκολεύονται να διακρίνουν με ακρίβεια τις δυσκινησίες από άλλες κινητικές διαταραχές [19]. Επιπλέον, οι καταγραφές αυτές δεν μπορούν να αποτυπώσουν με επαρκή λεπτομέρεια τα χαρακτηριστικά των κινητικών διακυμάνσεων, ούτε να παρέχουν αντικειμενικά δεδομένα που θα βοηθήσουν τον κλινικό ιατρό στη λήψη ακριβών αποφάσεων [20].

Ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι οι επί τόπου παρατηρήσεις από ειδικούς δεν αντικατοπτρίζουν την πραγματική καθημερινότητα του ασθενούς. Οι κινητικές διακυμάνσεις μπορεί να εκτείνονται σε χρονικά διαστήματα αρκετών ωρών μεταξύ των δόσεων φαρμάκων, καθιστώντας αδύνατη τη διαρκή παρακολούθησή τους μέσω σύντομων επισκέψεων στην κλινική [21]. Παράλληλα, η ανάγκη συχνών κλινικών αξιολογήσεων επιβαρύνει τόσο τον ασθενή όσο και το σύστημα υγείας, καθώς απαιτεί πολύ χρόνο, οργάνωση και συχνά σημαντικούς οικονομικούς πόρους.

Για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των παραδοσιακών μεθόδων, έχουν αναπτυχθεί κλινικές κλίμακες που επιχειρούν να τυποποιήσουν και να ποσοτικοποιήσουν την αξιολόγηση των κινητικών και μη κινητικών συμπτωμάτων. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη είναι η Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS), η οποία επιτρέπει στους ιατρούς να αποτυπώσουν τη βαρύτητα της νόσου [22]. Ωστόσο, η UPDRS παρουσιάζει και αυτή περιορισμούς, καθώς οι τιμές μπορεί να διαφέρουν μεταξύ παρατηρητών, ενώ παρέχει μόνο μια στιγμιαία εικόνα της κατάστασης του ασθενούς. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα συμπτώματα των ατόμων με Πάρκινσον συχνά μεταβάλλονται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, μια μεμονωμένη μέτρηση δεν μπορεί να αποδώσει πλήρως τη λειτουργική επιβάρυνση στην καθημερινή ζωή [23].

Αντιμέτωπη με τα παραπάνω προβλήματα, η επιστημονική κοινότητα προχώρησε το 2008 στην ανάπτυξη της εκσυγχρονισμένης κλίμακας MDS-UPDRS από τη Movement Disorder Society. Η νέα αυτή εκδοχή επιτρέπει πιο λεπτομερή και αξιόπιστη αξιολόγηση, καθώς περιλαμβάνει πρόσθετες ενότητες για τα μη κινητικά συμπτώματα, μεγαλύτερη ευαισθησία στην καταγραφή της εξέλιξης της νόσου και αυστηρότερα τυποποιημένα κριτήρια. Παρά τις προόδους αυτές, παραμένει το ζήτημα ότι ακόμη και η MDS-UPDRS αποτυπώνει μόνο σημειακές καταγραφές, οι οποίες δεν μπορούν να αντικατοπτρίσουν την πλήρη δυναμική των συμπτωμάτων [24].

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για συνεχή και αντικειμενική παρακολούθηση έχει οδηγήσει στην ενσωμάτωση φορητών τεχνολογιών, όπως επιταχυνσιόμετρα, έξυπνα ρολόγια και αισθητήρες κίνησης. Οι συσκευές αυτές, σε συνδυασμό με κλινικές κλίμακες όπως η UPDRS ή η MDS-UPDRS, προσφέρουν μια πιο ολοκληρωμένη και ρεαλιστική εικόνα της πορείας της νόσου, καθώς καταγράφουν κινητικά χαρακτηριστικά σε πραγματικό χρόνο και σε συνθήκες καθημερινής ζωής. Η χρήση τέτοιων τεχνολογιών συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των κινητικών διακυμάνσεων, στη βελτίωση της ακρίβειας της διάγνωσης και στη διαμόρφωση εξατομικευμένων θεραπευτικών παρεμβάσεων [25].

Συνολικά, η παρακολούθηση των κινητικών διαταραχών στη νόσο του Πάρκινσον αποτελεί ένα πολυδιάστατο και απαιτητικό πεδίο, το οποίο χρειάζεται συνδυασμό υποκειμενικών και αντικειμενικών δεδομένων για να προσφέρει μια ολοκληρωμένη

αποτύπωση της πραγματικής λειτουργικής κατάστασης του ασθενούς. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας, σε συνδυασμό με τις νεότερες κλινικές μεθόδους αξιολόγησης, αναμένεται να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα της παρακολούθησης και, τελικά, τη φροντίδα των ατόμων με Πάρκινσον [26].

3. Τρόποι Αξιολόγησης των Κινητικών Διαταραχών στη Νόσο του Πάρκινσον Κλινικές μέθοδοι αξιολόγησης (UPDRS, Hoehn & Yahr Scale, ADL Scale)

Η ακριβής και συστηματική αξιολόγηση των κινητικών διαταραχών αποτελεί θεμέλιο λίθο στη διάγνωση, την παρακολούθηση και την κλινική διαχείριση της PD. Καθώς η PD χαρακτηρίζεται από σημαντική ετερογένεια στην εμφάνιση και εξέλιξη των συμπτωμάτων, η υιοθέτηση αξιόπιστων και επαναλήψιμων μεθόδων αξιολόγησης είναι απαραίτητη τόσο για την ορθή κλινική προσέγγιση όσο και για την έρευνα. Οι κλινικές κλίμακες που έχουν αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτόν επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση των κινητικών και μη κινητικών συμπτωμάτων, την αξιολόγηση της λειτουργικής ικανότητας των ασθενών και την παρακολούθηση των αλλαγών που επέρχονται με την πάροδο του χρόνου ή μετά από θεραπευτικές παρεμβάσεις.

Στο πλαίσιο αυτό, κλίμακες όπως η Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS) και η αναθεωρημένη έκδοσή της, η MDS-UPDRS, αποτελούν διεθνώς το «χρυσό πρότυπο» για την κλινική αξιολόγηση της βαρύτητας της νόσου. Χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάλυση των κινητικών διαταραχών, των μη κινητικών συμπτωμάτων και της συνολικής λειτουργικότητας των ασθενών. Αντίστοιχα, η Hoehn & Yahr Scale προσφέρει μια συνοπτική αλλά αποτελεσματική μέθοδο σταδιοποίησης της νόσου, προσδιορίζοντας το επίπεδο λειτουργικής επιβάρυνσης και την πρόοδο των κινητικών συμπτωμάτων με βάση πέντε διακριτά στάδια. Παράλληλα, κλίμακες όπως η Activities of Daily Living (ADL) Scale αξιολογούν την ικανότητα του ασθενούς να εκτελεί βασικές και σύνθετες δραστηριότητες της καθημερινότητας, επιτρέποντας την ολοκληρωμένη αποτίμηση της λειτουργικότητας και της αυτονομίας του.

Η σημασία αυτών των εργαλείων δεν περιορίζεται μόνο στην κλινική πράξη αλλά επεκτείνεται και στην έρευνα, όπου αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της αξιολόγησης νέων φαρμακευτικών, τεχνολογικών και αποκαταστασιακών παρεμβάσεων. Η αντικειμενική καταγραφή της πορείας της νόσου, η έγκαιρη

ανίχνευση επιδείνωσης και η δυνατότητα σύγκρισης αποτελεσμάτων μεταξύ μελετών καθιστούν τις κλίμακες αξιολόγησης απαραίτητο εργαλείο για την επιστημονική πρόοδο στον τομέα της νευροεκφυλιστικής παθολογίας.

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τις βασικότερες κλινικές μεθόδους αξιολόγησης της PD, αναλύοντας τη δομή, τη χρησιμότητα και τους περιορισμούς των σημαντικότερων κλιμάκων που χρησιμοποιούνται σήμερα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις κλίμακες UPDRS/MDS-UPDRS, στην κλασική κλίμακα Hoehn & Yahr, καθώς και στις κλίμακες καθημερινής λειτουργικότητας όπως η ADL Scale, οι οποίες συμπληρώνουν το κλινικό προφίλ του ασθενούς και επιτρέπουν μια πιο ολιστική προσέγγιση στη διαχείριση της νόσου.

3.1 Χρονολογική Εξέλιξη των Κλινικών Μεθόδων

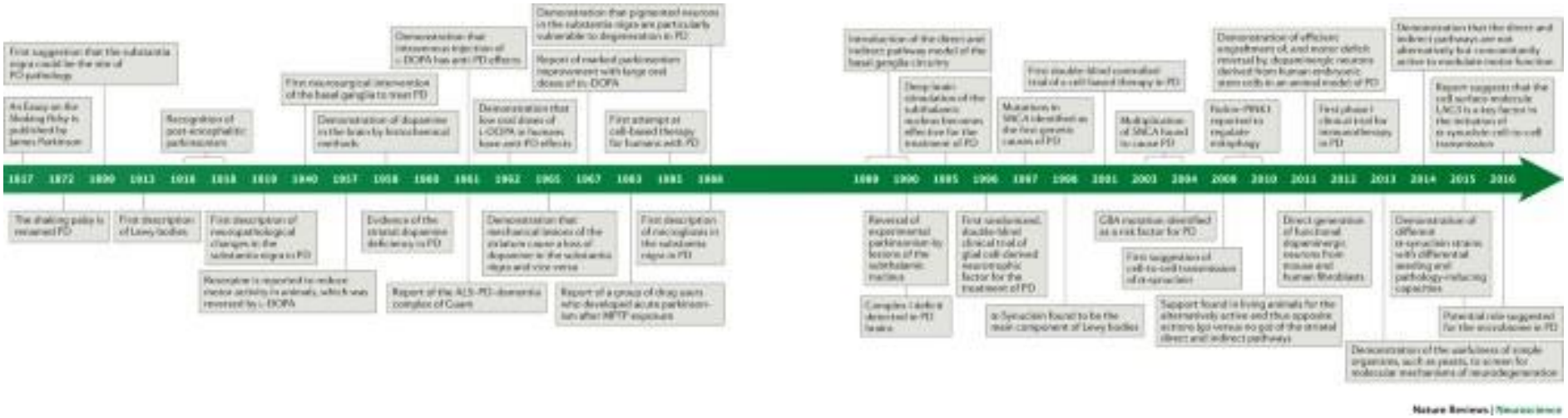
Η αξιολόγηση των ασθενών με τη χρήση αντικειμενικών, αξιόπιστων και σταθμισμένων κλιμάκων αποτελεί θεμελιώδες εργαλείο για την τυποποιημένη εκτίμηση της κλινικής εικόνας, τη δυνατότητα αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων και την ανίχνευση ακόμη και μικρών μεταβολών στη βαρύτητα των συμπτωμάτων. Οι κλίμακες αυτές μετατρέπουν τα κλινικά σημεία και συμπτώματα σε μετρήσιμες παραμέτρους και αποτελούν απαραίτητο στοιχείο τόσο στην κλινική πράξη όσο και στην έρευνα.

Η πρώτη κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε ευρέως για τη σταδιοποίηση της νόσου του Πάρκινσον ήταν η κλίμακα Hoehn & Yahr (H&Y), η οποία δημοσιεύθηκε το 1967. Η κλίμακα αυτή ταξινομεί τους ασθενείς σε πέντε στάδια, βασιζόμενη κυρίως στην εντόπιση, την έκταση των κινητικών συμπτωμάτων και τον βαθμό της λειτουργικής αναπηρίας. Παρά την αξία της ως απλό και γρήγορο εργαλείο, η H&Y έχει δεχθεί κριτική, καθώς αποτελεί μεικτή κλίμακα που συνδυάζει αξιολόγηση κλινικών σημείων και λειτουργικής ικανότητας. Επιπλέον, δεν ακολουθεί γραμμική κλίμακα βαρύτητας, αφού για παράδειγμα η μετάβαση από το στάδιο 2 στο 3 καθορίζεται αποκλειστικά από την παρουσία διαταραχής ισορροπίας, ανεξάρτητα από τη σοβαρότητα άλλων κινητικών συμπτωμάτων. Παρ' όλα αυτά, η κλίμακα Hoehn & Yahr άντεξε στη δοκιμασία του χρόνου, χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα και έχει ενσωματωθεί στις νεότερες και πιο αξιόπιστες κλίμακες, όπως η Unified

Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS) και η αναθεωρημένη εκδοχή της, η MDS-UPDRS [27].

Παράλληλα, σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση των λειτουργικών ικανοτήτων των ασθενών διαδραματίζει η κλίμακα Activities of Daily Living (ADL). Η αρχική μορφή της κλίμακας αναπτύχθηκε το 1963 από τον Sidney Katz για την εκτίμηση βασικών δραστηριοτήτων της καθημερινής ζωής, όπως η αυτοεξυπηρέτηση, η σίτιση και η κινητικότητα. Στη δεκαετία του 1970, οι Lawton και Brody ανέπτυξαν την κλίμακα Instrumental ADL (IADL) για την αξιολόγηση πιο σύνθετων δραστηριοτήτων, όπως η διαχείριση χρημάτων και η χρήση τηλεφώνου. Από τη δεκαετία του 1980, οι ADL/IADL κλίμακες χρησιμοποιούνται εκτενώς στη νόσο του Πάρκινσον, ενσωματώνοντας την επίδραση της κινητικής δυσλειτουργίας στην καθημερινή ζωή των ασθενών. Σήμερα, αξιοποιούνται τόσο στην κλινική πράξη όσο και στην έρευνα και συχνά συνδυάζονται με σύγχρονα τεχνολογικά εργαλεία, όπως αισθητήρες κίνησης και εφαρμογές κινητών τηλεφώνων, ώστε να παρέχουν πιο ακριβή και αντικειμενική παρακολούθηση της λειτουργικότητας [28].

Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980 είχαν αναπτυχθεί πολλές κλίμακες αξιολόγησης της νόσου του Πάρκινσον, όπως οι Columbia University Rating Scale (CURS), Webster Parkinson's Disease Rating Scale, Northwestern University Disability Scale (NUDS), Columbia scale και University of California Los Angeles scale (UCLA). Παρά το πλήθος τους, καμία δεν κατέκτησε καθολική αποδοχή, κυρίως λόγω μεθοδολογικών αδυναμιών και περιορισμένης αξιοπιστίας.



Εικόνα 3: Ιστορική Εξέλιξη Νόσου

Η ανάγκη για μια πιο ολοκληρωμένη, τυποποιημένη και αξιόπιστη κλίμακα οδήγησε το 1987 στη δημιουργία της Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS) από τη Movement Disorder Society (MDS). Η UPDRS εξελίχθηκε στη σημαντικότερη κλίμακα αξιολόγησης της νόσου, καθιερώθηκε στις δεκαετίες του 1990 και 2000 ως το «χρυσό πρότυπο» και επέτρεψε την πιο λεπτομερή και αντικειμενική αποτύπωση της κλινικής εικόνας των ασθενών.

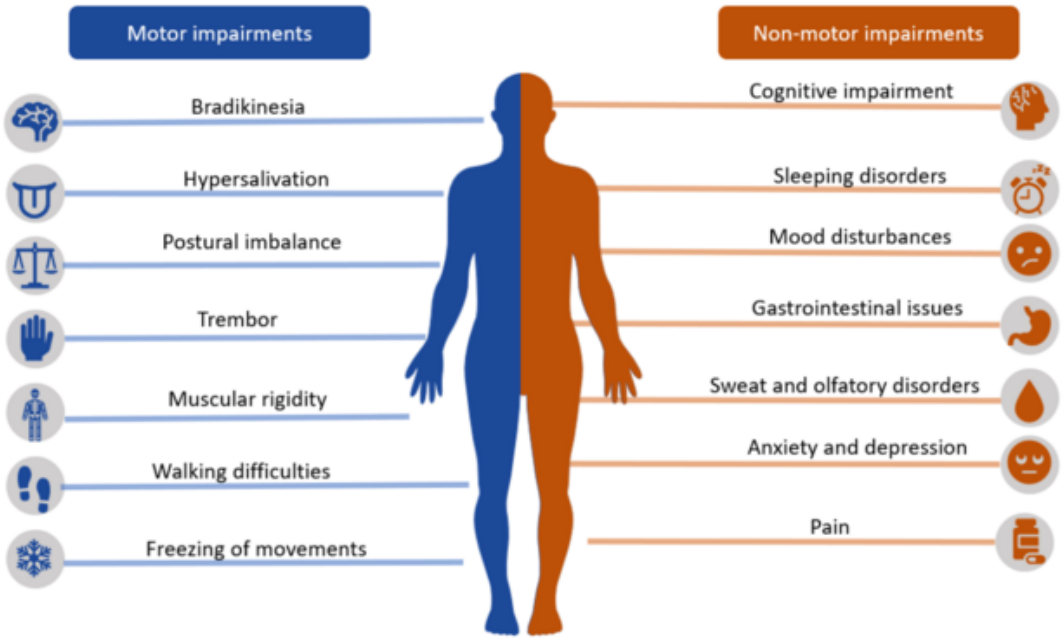
Το 2008, η Movement Disorder Society εισήγαγε μια αναθεωρημένη και εκσυγχρονισμένη εκδοχή, την MDS-UPDRS, η οποία ενίσχυσε σημαντικά την αξιολόγηση των μη κινητικών συμπτωμάτων και αύξησε την ευαισθησία της κλίμακας στην ανίχνευση της εξέλιξης της νόσου. Η MDS-UPDRS θεωρείται σήμερα το πλέον αξιόπιστο και ολοκληρωμένο εργαλείο για την κλινική και ερευνητική αξιολόγηση της νόσου του Πάρκινσον.

3.1.1 Περιγραφή στις Βασικές Κλιμακες Αξιολόγησης των Κινητικών Συμπτωμάτων

Η αξιολόγηση των κινητικών συμπτωμάτων στη νόσο του Πάρκινσον (PD) βασίζεται σε σταθμισμένα και αξιόπιστα εργαλεία, τα οποία επιτρέπουν την τυποποιημένη και αντικειμενική καταγραφή της βαρύτητας και της εξέλιξης της νόσου. Οι κλινικές αυτές κλίμακες, καθώς μετατρέπουν τα συμπτώματα σε ποσοτικοποιημένες παραμέτρους, αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο της νευρολογικής πρακτικής και της ερευνητικής διαδικασίας. Οι τρεις θεμελιώδεις κλίμακες που χρησιμοποιούνται διεθνώς είναι η Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS/MDS-UPDRS), η Hoehn & Yahr Scale και οι κλίμακες Activities of Daily Living (ADL).

Η Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS) αποτελεί το πλέον διαδεδομένο και ολοκληρωμένο εργαλείο αξιολόγησης της νόσου, τόσο στην κλινική πράξη όσο και στην έρευνα. Η αναθεωρημένη μορφή της, MDS-UPDRS, παρέχει υψηλή ακρίβεια, μειωμένη μεταβλητότητα μεταξύ εξεταστών και λεπτομερή καταγραφή των κινητικών και μη κινητικών συμπτωμάτων. Η κλίμακα αποτελείται από τέσσερα μέρη. Το πρώτο μέρος επικεντρώνεται στα μη κινητικά συμπτώματα, εξετάζοντας γνωστικές, ψυχιατρικές, συναισθηματικές και αυτόνομες διαταραχές. Το δεύτερο μέρος αξιολογεί καθημερινές δραστηριότητες του

ασθενούς, τόσο σε περιόδους καλής κινητικότητας («on») όσο και σε περιόδους επιδείνωσης («off»), αποτυπώνοντας ουσιαστικά τον λειτουργικό αντίκτυπο της νόσου στην καθημερινή ζωή. Το τρίτο μέρος περιλαμβάνει την αντικειμενική νευρολογική εξέταση, κατά την οποία αξιολογούνται ο τρόμος, η δυσκαμψία, η βραδυκινησία, η στάση, η ισορροπία και η ποιότητα της βάδισης. Τέλος, το τέταρτο μέρος εξετάζει τις κινητικές διακυμάνσεις και τις επιπλοκές της φαρμακευτικής αγωγής, όπως οι δυσκινησίες, το φαινόμενο «on-off» και οι δυστονίες. Η MDS-UPDRS προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα της νόσου και αποτελεί σήμερα το χρυσό πρότυπο αξιολόγησης στην κλινική νευρολογία [29].



Εικόνα 4: Αξιολόγηση Νόσου Πάρκινσον

Συμπληρωματικά προς την UPDRS, η κλίμακα Hoehn & Yahr (H&Y) χρησιμοποιείται για τη σταδιοποίηση της PD σε πέντε επίπεδα, με βάση τη βαρύτητα των κινητικών συμπτωμάτων και ιδιαίτερα την εμφάνιση διαταραχών ισορροπίας. Η κλίμακα αυτή είναι απλή στη χρήση, επιτρέπει τη γρήγορη ταξινόμηση του ασθενούς και αποτελεί ένα χρήσιμο δείκτη για την πορεία της νόσου και τις θεραπευτικές αποφάσεις. Παρά τους περιορισμούς της – όπως το ότι δεν αξιολογεί μη κινητικά συμπτώματα και ότι δεν είναι απόλυτα γραμμική ως προς τη βαρύτητα – παραμένει ένα από τα πιο καθιερωμένα εργαλεία κλινικής εκτίμησης.

Ιδιαίτερη σημασία για την αποτύπωση της λειτουργικής κατάστασης των ασθενών έχουν και οι κλίμακες Activities of Daily Living (ADL). Οι Basic ADL (BADL)

εστιάζουν στις θεμελιώδεις δραστηριότητες αυτοεξυπηρέτησης, όπως η υγιεινή, το ντύσιμο, η σίτιση, η χρήση σπιτικών χώρων και η κινητικότητα. Η έκπτωση στις δραστηριότητες αυτές αντικατοπτρίζει άμεσα την επίδραση των κινητικών συμπτωμάτων στην καθημερινή ζωή των ασθενών. Αντίστοιχα, οι Instrumental ADL (IADL) αξιολογούν πιο σύνθετες και απαιτητικές δραστηριότητες, όπως η διαχείριση χρημάτων, η χρήση τηλεφώνου ή ηλεκτρονικών συσκευών, η οργάνωση του νοικοκυριού και η διαχείριση φαρμακευτικής αγωγής. Οι δραστηριότητες αυτές αποτελούν δείκτες ανεξαρτησίας και αυτονομίας, επηρεάζονται τόσο από κινητικά όσο και από γνωστικά συμπτώματα και είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τη συνολική αποτίμηση της λειτουργικής ικανότητας.

Συνολικά, οι κλίμακες MDS-UPDRS, Hoehn & Yahr και ADL παρέχουν τρεις συμπληρωματικές διαστάσεις αξιολόγησης: την λεπτομερή κλινική καταγραφή, τη σταδιοποίηση της νόσου και την αποτύπωση της πραγματικής λειτουργικότητας. Ο συνδυασμός τους εξασφαλίζει μια ολοκληρωμένη και ακριβή εικόνα της κατάστασης του ασθενούς, διευκολύνοντας τόσο την εξατομίκευση της θεραπείας όσο και την αξιόπιστη παρακολούθηση της εξέλιξης της νόσου του Πάρκινσον.

3.1.2 Η Χρήση των Μεθόδων Αξιολόγησης σε Ευρωπαϊκές Χώρες

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, οι κλίμακες αξιολόγησης της PD έχουν καθιερωθεί ως βασικό εργαλείο τόσο για την κλινική διάγνωση όσο και για την παρακολούθηση της εξέλιξης της νόσου, αποτελώντας κοινή γλώσσα επικοινωνίας μεταξύ νευρολόγων, ερευνητών και φορέων υγείας. Η UPDRS, και κυρίως η αναθεωρημένη εκδοχή της MDS-UPDRS, αποτελεί την κυρίαρχη μέθοδο αξιολόγησης σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες, χάρη στη δυνατότητά της να αποτυπώνει με ακρίβεια τόσο τα κινητικά όσο και τα μη κινητικά συμπτώματα. Χώρες όπως η Γερμανία, η Γαλλία και η Ολλανδία έχουν ενσωματώσει πλήρως την κλίμακα αυτή στα πρωτόκολλα των πανεπιστημιακών νοσοκομείων και των εξειδικευμένων κέντρων κινητικών διαταραχών. Εκεί χρησιμοποιείται συστηματικά για τη διάγνωση, την τεκμηριωμένη παρακολούθηση της πορείας της νόσου, αλλά και για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας νέων θεραπευτικών παρεμβάσεων στο πλαίσιο κλινικών δοκιμών.

Παράλληλα, χώρες όπως η Ιταλία και η Ισπανία έχουν επεκτείνει τη χρήση της UPDRS συνδυάζοντάς την με σύγχρονα ψηφιακά εργαλεία, όπως φορητές συσκευές, αισθητήρες και απομακρυσμένα συστήματα παρακολούθησης. Η ολοένα και μεγαλύτερη ενσωμάτωση της τηλεϊατρικής στο ευρωπαϊκό σύστημα υγείας έχει καταστήσει τη UPDRS πολύτιμο εργαλείο για την παρακολούθηση των συμπτωμάτων των ασθενών σε πραγματικές συνθήκες καθημερινής ζωής, επιτρέποντας ταχύτερες παρεμβάσεις και εξατομικευμένη προσαρμογή της θεραπείας.

Η κλίμακα H&Y εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως ως συμπληρωματικό εργαλείο για την ταχεία σταδιοποίηση της νόσου, ιδίως σε χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο και η Σουηδία, όπου η ταξινόμηση σε στάδια αποτελεί βασικό κριτήριο για την επιλογή θεραπευτικών στρατηγικών και την πρόσβαση σε κοινωνικές υπηρεσίες. Παρότι η κλίμακα αυτή δεν παρέχει λεπτομερή αξιολόγηση, παραμένει πρακτική για τη συνοπτική εκτίμηση της κλινικής βαρύτητας.

Η κλίμακα ADL και οι παραλλαγές της χρησιμοποιούνται επίσης σε ευρωπαϊκά συστήματα υγείας, ιδιαίτερα στη Δανία και τη Φινλανδία, όπου η αξιολόγηση της λειτουργικής ικανότητας αποτελεί καθοριστικό δείκτη για τη χορήγηση επιδομάτων, υπηρεσιών κατ' οίκον φροντίδας και υποστηρικτικών παρεμβάσεων. Η ADL συμβάλλει στη συνολική εκτίμηση της αυτονομίας του ασθενούς, γεγονός που την καθιστά αναπόσπαστο στοιχείο της σφαιρικής αντιμετώπισης της PD [30].

Συνολικά, η UPDRS υπερισχύει στις περισσότερες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς προσφέρει την πληρέστερη και πιο ευαίσθητη καταγραφή της νόσου. Η ευρεία υιοθέτησή της σε εθνικές κατευθυντήριες οδηγίες, η χρήση της σε πανευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα και η συνεχώς αυξανόμενη ενσωμάτωσή της με τεχνολογίες τηλεϊατρικής και φορητών συσκευών ενισχύουν περαιτέρω τον ρόλο της ως το πρότυπο εργαλείο αξιολόγησης. Αν και η Hoehn & Yahr και η ADL Scale εξακολουθούν να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ταξινόμηση και στην αξιολόγηση της λειτουργικότητας, αντίστοιχα, η UPDRS παραμένει το πιο πλήρες και αξιόπιστο εργαλείο για την κλινική πρακτική και την έρευνα στην Ευρώπη.

3.2 Υποκειμενικές Κλινικές Μέθοδοι

Η παρακολούθηση των κινητικών διακυμάνσεων των ατόμων με νόσο του Πάρκινσον αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την κλινική διαχείριση και την αποτελεσματική προσαρμογή της θεραπείας. Ιδιαίτερα στις προχωρημένες μορφές της νόσου, όπου οι κινητικές διακυμάνσεις είναι συχνές και απρόβλεπτες, η ακριβής καταγραφή της καθημερινής πορείας των συμπτωμάτων αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Παραδοσιακά, η καταγραφή αυτή βασίζεται σε υποκειμενικές κλινικές μεθόδους, οι οποίες περιλαμβάνουν ημερολόγια ασθενών, αυτοαναφορές και επιτόπιες παρατηρήσεις από εξειδικευμένο προσωπικό.

Τα ημερολόγια ασθενών χρησιμοποιούνται για τη συστηματική καταγραφή των περιόδων «on» και «off», των δυσκινησιών και άλλων κινητικών συμπτωμάτων, με τον ασθενή να σημειώνει την ένταση και τη διάρκεια των διακυμάνσεων. Παρόμοια, οι αυτοαναφορές βασίζονται στην ανάκληση εμπειριών από τον ίδιο τον ασθενή, ο οποίος καλείται να περιγράψει την ποιότητα της κίνησης, την αποτελεσματικότητα της φαρμακευτικής αγωγής και τη συνολική λειτουργική του κατάσταση. Οι μέθοδοι αυτές έχουν το πλεονέκτημα ότι καταγράφουν την προσωπική αντίληψη των συμπτωμάτων και αντανακλούν την πραγματική καθημερινή εμπειρία του ασθενούς [31].

Ωστόσο, παρά τη χρησιμότητά τους, οι υποκειμενικές μέθοδοι εμφανίζουν σημαντικούς περιορισμούς. Η ανάκληση μνήμης συχνά επηρεάζεται από υποκειμενικότητα, γνωστικές δυσλειτουργίες και συναισθηματικούς παράγοντες, ενώ πολλοί ασθενείς δυσκολεύονται να διαχωρίσουν με ακρίβεια επιμέρους κινητικά συμπτώματα, όπως τη δυσκινησία από τη βραδυκινησία ή την κόπωση. Επιπλέον, τα ημερολόγια παρέχουν αποσπασματικές πληροφορίες, δεν αποτυπώνουν με ακρίβεια τα μοτίβα των διακυμάνσεων και δεν μπορούν να καταγράψουν μικρής διάρκειας ή λεπτές αλλαγές στη λειτουργικότητα που είναι συχνές στη νόσο του Πάρκινσον [32].

Οι επιτόπιες παρατηρήσεις από επαγγελματίες υγείας μπορούν να προσφέρουν πιο αξιόπιστη εκτίμηση, αλλά περιορίζονται σημαντικά από πρακτικούς παράγοντες. Η διάρκεια και η συχνότητα των κινητικών διακυμάνσεων συχνά υπερβαίνουν τον χρόνο που μπορεί να διαθέσει ο επαγγελματίας για άμεση παρακολούθηση, ενώ η παρουσία του εξεταστή μπορεί να τροποποιήσει την κινητική συμπεριφορά του

ασθενούς. Επιπλέον, οι συχνές κλινικές επισκέψεις είναι χρονοβόρες, κουραστικές και οικονομικά επιβαρυντικές για τους ασθενείς και τις οικογένειές τους.

3.2.1 Υπάρχουσες Κλινικές Μέθοδοι και οι Περιορισμοί τους.

Οι υποκειμενικές κλινικές μέθοδοι αποτελούν τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις για την παρακολούθηση των κινητικών διακυμάνσεων στη νόσο του Πάρκινσον. Παρότι αποτελούν σημαντικό μέρος της καθημερινής κλινικής πρακτικής και προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την εμπειρία του ασθενούς, συνοδεύονται από ουσιαστικούς περιορισμούς που μειώνουν την αξιοπιστία και την ακρίβεια των δεδομένων. Οι κύριες μορφές υποκειμενικής αξιολόγησης περιλαμβάνουν τις αυτοαναφορές, τα ημερολόγια ασθενών και την επιτόπια κλινική παρατήρηση από ειδικούς.

Οι αυτοαναφορές ασθενών αποτελούν την πιο απλή και διαδεδομένη μέθοδο καταγραφής των κινητικών διακυμάνσεων. Οι ασθενείς καλούνται να περιγράψουν τις περιόδους όπου η φαρμακευτική αγωγή είναι αποτελεσματική («on») και εκείνες όπου τα συμπτώματα επανεμφανίζονται έντονα λόγω μειωμένης δράσης της θεραπείας («off»). Αν και αυτή η μέθοδος προσφέρει μια συνολική εικόνα της υποκειμενικής εμπειρίας, η αξιοπιστία της επηρεάζεται έντονα από τη μεροληψία ανάκλησης [33]. Οι ασθενείς συχνά δυσκολεύονται να θυμηθούν με ακρίβεια τη διάρκεια, τη συχνότητα και την ένταση των επεισοδίων, ιδιαίτερα όταν οι κινητικές διακυμάνσεις είναι συχνές ή παρουσιάζουν σταδιακές μεταβολές. Επιπλέον, η διάκριση μεταξύ διαφορετικών κινητικών καταστάσεων, όπως η δυσκινησία και τα συμπτώματα «off», δεν είναι εύκολη για πολλούς ασθενείς, οδηγώντας σε λανθασμένες αναφορές. Η δυαδική κατηγοριοποίηση σε «on» και «off» δεν αποτυπώνει τη σύνθετη και συχνά ενδιάμεση κινητική λειτουργία, με αποτέλεσμα η κλινική εικόνα που προκύπτει να μην είναι πλήρως αντιπροσωπευτική [34].

Τα ημερολόγια ασθενών επιχειρούν να περιορίσουν την ανακριβή ανάκληση, καθώς επιτρέπουν την καταγραφή της κινητικής κατάστασης σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αν και θεωρητικά προσφέρουν πιο λεπτομερή δεδομένα, στην πράξη παρουσιάζουν πολλούς περιορισμούς. Η συστηματική συμπλήρωση ημερολογίων είναι χρονοβόρα και απαιτεί υψηλό βαθμό συνέπειας από τους ασθενείς, κάτι που δεν είναι πάντοτε εφικτό, ιδιαίτερα σε άτομα με

γνωστικές δυσλειτουργίες, έντονη κόπωση ή προχωρημένα κινητικά προβλήματα. Οι παραλείψεις, οι καθυστερημένες καταγραφές και οι λανθασμένες σημειώσεις μειώνουν σημαντικά την αξιοπιστία της μεθόδου. Επιπλέον, τα ημερολόγια εξακολουθούν να βασίζονται στην υποκειμενική κρίση του ασθενούς, χωρίς δυνατότητα λεπτομερούς διάκρισης μεταξύ των διαφορετικών μορφών κινητικής δυσλειτουργίας [35]. Ακόμη, παρέχουν αποσπασματικά και όχι συνεχή δεδομένα, αφήνοντας εκτός καταγραφής μικρές αλλά σημαντικές διακυμάνσεις που μπορεί να επηρεάζουν ουσιαστικά την ποιότητα ζωής.

Η επιτόπια κλινική παρατήρηση από νευρολόγους ή εξειδικευμένο προσωπικό θεωρείται η πιο αξιόπιστη μορφή υποκειμενικής αξιολόγησης, καθώς βασίζεται στην άμεση παρατήρηση των κινητικών συμπτωμάτων και την εφαρμογή τυποποιημένων κλινικών δοκιμασιών. Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος αυτή είναι περιορισμένη από τη φύση της. Οι κλινικές επισκέψεις είναι σύντομες και πραγματοποιούνται αραιά, συνήθως κάθε λίγους μήνες, γεγονός που καθιστά εξαιρετικά δύσκολη την καταγραφή των πραγματικών κινητικών διακυμάνσεων της καθημερινότητας, οι οποίες συχνά μεταβάλλονται μέσα στην ίδια ημέρα [36]. Μια στιγμιαία κλινική εξέταση δεν μπορεί να αποδώσει τη δυναμική φύση των κινητικών αλλαγών, ενώ βασίζει κρίσιμες θεραπευτικές αποφάσεις σε ένα περιορισμένο σύνολο πληροφοριών. Επιπλέον, η συχνή μετακίνηση των ασθενών προς την κλινική είναι συχνά δυσχερής λόγω των κινητικών τους δυσκολιών και οικονομικά επιβαρυντική, καθιστώντας την μέθοδο αυτή πρακτικά ανεπαρκή για μακροπρόθεσμη παρακολούθηση.

3.2.2 Η Ανάγκη για Νέες Τεχνολογικές Προσεγγίσεις

Η υποκειμενικότητα των αυτοαναφορών, η αποσπασματική φύση των ημερολογίων και η χαμηλή συχνότητα των κλινικών επισκέψεων καθιστούν δύσκολη την ακριβή και συνεχή καταγραφή των κινητικών διακυμάνσεων στη νόσο του Πάρκινσον. Οι παραδοσιακές μέθοδοι αξιολόγησης, παρότι αποτελούν σημαντικά εργαλεία της κλινικής πρακτικής, δεν μπορούν να αποτυπώσουν με ακρίβεια τη δυναμική και συχνά πολυπαραγοντική εξέλιξη των συμπτωμάτων. Αυτό δημιουργεί επιτακτική ανάγκη για την ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογικών προσεγγίσεων, οι οποίες προσφέρουν τη δυνατότητα συνεχούς, αντικειμενικής και υψηλής ακρίβειας παρακολούθησης των κινητικών λειτουργιών [37].

Οι φορητές συσκευές (wearables) έχουν αναδειχθεί ως μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογικές λύσεις. Εξοπλισμένες με αισθητήρες όπως επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια και αισθητήρες κίνησης, παρέχουν συνεχή καταγραφή της κινητικής συμπεριφοράς του ασθενούς σε πραγματικό χρόνο. Μέσω αυτών των αισθητήρων είναι δυνατή η αντικειμενική μέτρηση παραμέτρων όπως η ένταση του τρόμου, η συχνότητα και η σοβαρότητα των δυσκινησιών, η ποιότητα της βάδισης και οι μεταβολές στη στάση σώματος [38]. Σε αντίθεση με τις αυτοαναφορές ή τα χειρόγραφα ημερολόγια, τα δεδομένα που συλλέγονται μέσω wearables δεν επηρεάζονται από τη μνήμη, την υποκειμενική αντίληψη ή τη γνωστική κατάσταση του ασθενούς, γεγονός που αυξάνει την αξιοπιστία και την κλινική τους αξία.

Εικόνα 5: Η Τεχνολογία στην Βοήθεια της Νόσου

Παράλληλα, τα ηλεκτρονικά ημερολόγια (e-diaries) προσφέρουν μια βελτιωμένη μορφή αυτοαναφοράς. Μέσω εφαρμογών σε κινητές συσκευές, οι ασθενείς μπορούν να καταγράφουν τα συμπτώματά τους σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας έτσι τα σφάλματα που συνδέονται με την καθυστερημένη ανάκληση. Η διαδραστική φύση αυτών των εφαρμογών επιτρέπει την ενσωμάτωση τυποποιημένων ερωτηματολογίων και οδηγών αυτοαξιολόγησης, βελτιώνοντας την ποιότητα των δεδομένων. Όταν τα ηλεκτρονικά ημερολόγια συνδυάζονται με φορητούς αισθητήρες, δημιουργούνται ολοκληρωμένα συστήματα παρακολούθησης που

συνδυάζουν αντικειμενικά και υποκειμενικά δεδομένα, προσφέροντας μια σφαιρική εικόνα της κατάστασης του ασθενούς [39].

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα των νέων τεχνολογικών λύσεων είναι η χρήση τεχνητής νοημοσύνης και προηγμένων αλγορίθμων για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων. Η συνεχής συλλογή μεγάλου όγκου πληροφοριών επιτρέπει την αναγνώριση προτύπων στις κινητικές διακυμάνσεις και τη δημιουργία προβλέψεων σχετικά με πιθανές επιδεινώσεις των συμπτωμάτων. Με αυτόν τον τρόπο, οι ιατροί μπορούν να λαμβάνουν εξατομικευμένες και τεκμηριωμένες θεραπευτικές αποφάσεις, προσαρμόζοντας εγκαίρως τη φαρμακευτική αγωγή και μειώνοντας τον κίνδυνο ανεπιθύμητων επιπλοκών, όπως υποθεραπεία ή υπερθεραπεία [40].

Η ενσωμάτωση των τεχνολογικών αυτών εργαλείων στην κλινική πρακτική έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει τον τρόπο διαχείρισης της νόσου του Πάρκινσον. Οι φορητές συσκευές και τα ηλεκτρονικά ημερολόγια καθιστούν εφικτή τη συνεχή και ακριβή καταγραφή των διακυμάνσεων, προσφέροντας δεδομένα που αντικατοπτρίζουν την πραγματική καθημερινότητα του ασθενούς και όχι μόνο τη στιγμιαία εικόνα κατά τη διάρκεια μιας κλινικής επίσκεψης. Παρότι εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις, όπως το κόστος των συσκευών, η εκπαίδευση των ασθενών στη χρήση τους και η ανάγκη ενσωμάτωσης των συστημάτων αυτών στο υπάρχον πλαίσιο των υποδομών υγείας, τα οφέλη τους είναι ιδιαίτερα σημαντικά [41].

4.Τεχνολογικές Εξελίξεις στην Παρακολούθηση των Κινητικών Διαταραχών Φορητοί αισθητήρες και κινητές συσκευές Νευροαπεικονιστικές τεχνικές (PET, MRI, EEG)

Η αποτελεσματική παρακολούθηση των κινητικών διαταραχών αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για την έγκαιρη διάγνωση, την αξιολόγηση της πορείας της νόσου και την εξατομίκευση των θεραπευτικών παρεμβάσεων στη νόσο του Πάρκινσον. Παραδοσιακά, η κλινική αξιολόγηση βασίζεται σε υποκειμενικές μεθόδους, όπως η Κλίμακα UPDRS και οι αυτοαναφορές των ασθενών. Αν και οι μέθοδοι αυτές αποτελούν βασικά εργαλεία της νευρολογικής πρακτικής, περιορίζονται από την ανθρώπινη υποκειμενικότητα, την ασυνεχή καταγραφή και τη δυσκολία στην αποτύπωση των συχνών και δυναμικών κινητικών διακυμάνσεων που χαρακτηρίζουν την PD.

Οι ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων ετών έχουν επιτρέψει την ανάπτυξη νέων, αντικειμενικών και ιδιαίτερα ακριβών μεθόδων παρακολούθησης, οι οποίες μπορούν να συμπληρώσουν ή και να υπερκεράσουν τις παραδοσιακές κλινικές προσεγγίσεις. Οι φορητοί αισθητήρες και οι κινητές συσκευές, όπως επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια και ηλεκτρομυογραφικοί (EMG) αισθητήρες, προσφέρουν τη δυνατότητα συνεχούς καταγραφής των κινητικών συμπτωμάτων σε πραγματικές συνθήκες καθημερινής ζωής. Με τον τρόπο αυτό, επιτρέπουν την αντικειμενική μέτρηση παραμέτρων όπως ο τρόμος, οι δυσκινησίες, η ποιότητα της βάδισης και οι διαταραχές στάσης, παρέχοντας ένα λεπτομερές και ακριβές προφίλ της κινητικής λειτουργίας του ασθενούς.

Παράλληλα, οι σύγχρονες νευροαπεικονιστικές τεχνικές έχουν συμβάλει σημαντικά στην κατανόηση και την παρακολούθηση της παθολογίας της PD. Η PET επιτρέπει τη λειτουργική απεικόνιση της ντοπαμινεργικής δραστηριότητας, αποκαλύπτοντας την έκταση της νευροεκφύλισης. Η Μαγνητική Τομογραφία (MRI) παρέχει υψηλής ανάλυσης εικόνες της δομής και της λειτουργίας του εγκεφάλου, ενώ το Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG) προσφέρει πληροφορίες για την ηλεκτρική

δραστηριότητα των νευρωνικών κυκλωμάτων. Οι τεχνικές αυτές συμβάλλουν τόσο στη διάγνωση όσο και στην έρευνα, επιτρέποντας τη μελέτη της προόδου της νόσου, των θεραπευτικών επιδράσεων και των νευροφυσιολογικών μηχανισμών της.

Επιπλέον, οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης έχουν αναδειχθεί ως ισχυρά εργαλεία για την ανάλυση των δεδομένων που προέρχονται από φορητές συσκευές και νευροαπεικονιστικές εξετάσεις. Η αυτόματη αναγνώριση προτύπων, η πρόβλεψη επιδεινώσεων και η εξατομικευμένη προσαρμογή της φαρμακευτικής αγωγής αποτελούν μόνο μερικές από τις δυνατότητες που προσφέρει ο συνδυασμός μεγάλου όγκου δεδομένων και προηγμένων αλγορίθμων.

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις στην παρακολούθηση των κινητικών διαταραχών, αναλύοντας τη λειτουργία και τις εφαρμογές των φορητών αισθητήρων, των νευροαπεικονιστικών τεχνικών και των μεθόδων ανάλυσης δεδομένων μέσω μηχανικής μάθησης. Στόχος του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει μια ολοκληρωμένη εικόνα των σύγχρονων συστημάτων που συμβάλλουν στη βελτίωση της διάγνωσης, της παρακολούθησης και της συνολικής διαχείρισης της νόσου του Πάρκινσον, αναδεικνύοντας τον καθοριστικό ρόλο της τεχνολογίας στη σύγχρονη νευρολογική πρακτική.

4.1 Λειτουργία και Ιστορική Αναδρομή των Αισθητήρων στην Παρακολούθηση Κινητικών Διαταραχών

Οι αισθητήρες αποτελούν συσκευές που ανιχνεύουν φυσικά ή βιολογικά σήματα και τα μετατρέπουν σε ηλεκτρικά σήματα, επιτρέποντας τη μέτρηση και ανάλυση ποικίλων παραμέτρων. Στο πλαίσιο των κινητικών διαταραχών και ειδικότερα της νόσου του Πάρκινσον, οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την καταγραφή κινήσεων του σώματος, της μυϊκής δραστηριότητας και άλλων φυσιολογικών σημάτων που σχετίζονται με τη λειτουργική κατάσταση του ασθενούς. Η χρήση τους έχει συμβάλει αποφασιστικά στη μετάβαση από τις υποκειμενικές κλινικές εκτιμήσεις σε αντικειμενικές, συνεχείς και υψηλής ακρίβειας μετρήσεις των κινητικών συμπτωμάτων.

Η εφαρμογή τεχνολογιών καταγραφής κίνησης έχει τις ρίζες της στα μέσα του 20ού αιώνα, όταν οι πρώτες συσκευές επιτάχυνσης χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της

ανθρώπινης κινητικότητας. Στη δεκαετία του 1960, τα επιταχυνσιόμετρα άρχισαν να χρησιμοποιούνται ερευνητικά για την καταγραφή βασικών παραμέτρων κίνησης, ανοίγοντας τον δρόμο για την ανάπτυξη πιο εξελιγμένων συστημάτων παρακολούθησης. Η δεκαετία του 1980 σηματοδότησε την ευρύτερη υιοθέτηση της ηλεκτρομυογραφίας (EMG), η οποία επέτρεψε τη λεπτομερή καταγραφή της μυϊκής δραστηριότητας και έδωσε τη δυνατότητα για πιο ολοκληρωμένη κατανόηση των κινητικών δυσλειτουργιών [42].

Η πραγματική τεχνολογική εξέλιξη ωστόσο σημειώθηκε στις αρχές του 21ου αιώνα, με την εμφάνιση φορητών και ασύρματων συσκευών που επέτρεψαν τη συλλογή δεδομένων κίνησης σε πραγματικό χρόνο, στην καθημερινή ζωή των ασθενών. Η διάδοση των έξυπνων κινητών τηλεφώνων, των έξυπνων ρολογιών και των συσκευών παρακολούθησης φυσικής δραστηριότητας (fitness trackers) επέτρεψε τη συνεχή καταγραφή κινήσεων χωρίς την ανάγκη εξειδικευμένου εργαστηριακού εξοπλισμού. Οι φορητές συσκευές, σε συνδυασμό με αισθητήρες όπως επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια και EMG, προσφέρουν σήμερα ένα πλούσιο σύνολο δεδομένων υψηλής ανάλυσης σχετικά με την κινητική συμπεριφορά του ασθενούς.

Εικόνα 6: Ιστορική Αναδρομή Νόσου

Παράλληλα, η πρόοδος στη μηχανική μάθηση και την ανάλυση μεγάλων δεδομένων επέτρεψε την αυτόματη αναγνώριση προτύπων κινητικών διαταραχών, τη διάκριση μεταξύ διαφορετικών κινητικών καταστάσεων και την αξιολόγηση των διακυμάνσεων με τρόπους που δεν ήταν εφικτοί με τις παραδοσιακές μεθόδους. Η δυνατότητα επεξεργασίας συνεχούς ροής δεδομένων από φορητές συσκευές έχει ενισχύσει σημαντικά την ακρίβεια της διάγνωσης και παρέχει νέες δυνατότητες στην εξατομικευμένη παρακολούθηση της νόσου [43].

Η εξέλιξη των φορητών αισθητήρων και των κινητών συσκευών αποτελεί πλέον κεντρικό στοιχείο στις σύγχρονες προσπάθειες για τη βελτίωση της διαχείρισης της νόσου του Πάρκινσον, προσφέροντας ένα καινοτόμο και πιο αξιόπιστο μέσο αξιολόγησης των κινητικών συμπτωμάτων σε πραγματικές συνθήκες καθημερινότητας.

4.1.1 Φορητοί Αισθητήρες και Κινητές Συσκευές

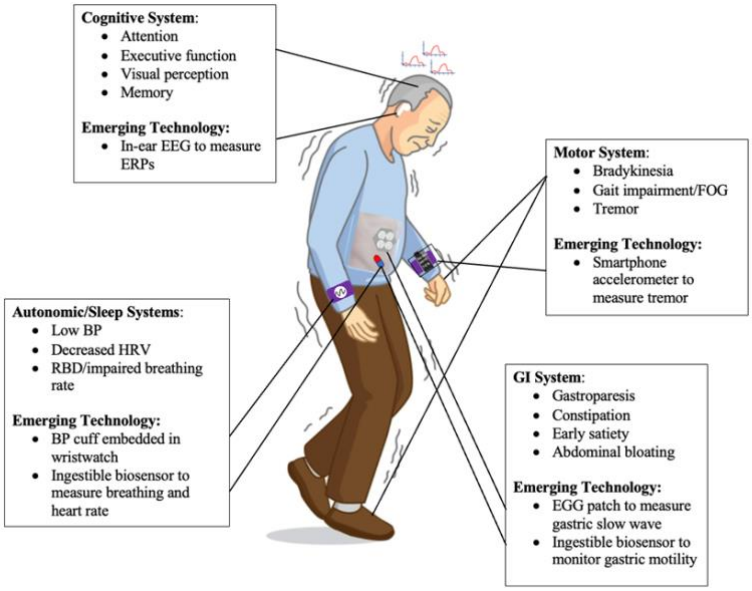
Οι φορητές τεχνολογίες αποτελούν πλέον ένα από τα πιο πολλά υποσχόμενα εργαλεία για την ανάλυση και παρακολούθηση των συμπτωμάτων της νόσου του Πάρκινσον. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές κλινικές κλίμακες αξιολόγησης, οι οποίες παρέχουν αποσπασματική πληροφόρηση και συχνά επηρεάζονται από την υποκειμενικότητα των ασθενών, οι φορητοί αισθητήρες καταγράφουν τα συμπτώματα με αντικειμενικό, μη επεμβατικό και συνεχή τρόπο. Η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης σε πραγματικές συνθήκες καθημερινής ζωής επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση κινητικών δυσλειτουργιών και την ακριβή αξιολόγηση των διακυμάνσεων, γεγονός που βελτιώνει τόσο την κλινική παρακολούθηση όσο και την ποιότητα των δεδομένων σε ερευνητικά και κλινικά περιβάλλοντα.

Η χρήση φορητών συσκευών έχει συμβάλει στη μετάβαση από μια περιορισμένη, στιγμιαία εικόνα της κινητικής λειτουργίας προς μια ολιστική παρακολούθηση της νόσου. Οι συσκευές αυτές επιτρέπουν τη συνεχή καταγραφή ποικίλων συμπτωμάτων, τόσο κινητικών όσο και μη κινητικών, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη αποτύπωση της πολυσυστημικής φύσης της PD. Η παρακολούθηση εκτός κλινικού περιβάλλοντος οδηγεί σε πιο ακριβείς αξιολογήσεις κατά τη

διάρκεια κλινικών δοκιμών και επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της φαρμακευτικής αγωγής με λιγότερη εξάρτηση από συχνές επισκέψεις στο ιατρείο [44].

Οι φορητοί αισθητήρες είναι μικρές ηλεκτρονικές συσκευές που καταγράφουν βιομετρικά και κινητικά δεδομένα από το σώμα. Οι πιο διαδεδομένοι τύποι περιλαμβάνουν επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια, μαγνητόμετρα και ηλεκτρομυογραφικούς (EMG) αισθητήρες. Καθένας από αυτούς καταγράφει διαφορετικές φυσιολογικές ή κινητικές παραμέτρους, όπως επιτάχυνση, γωνιακή ταχύτητα, ηλεκτρική δραστηριότητα των μυών και καρδιακή λειτουργία. Με την ανάλυση των δεδομένων αυτών είναι δυνατή η αντικειμενική αξιολόγηση βασικών κινητικών διαταραχών της PD, όπως η βραδυκινησία, οι δυσκινησίες και το φαινόμενο Freezing of Gait.

Κεντρικό ρόλο στο πεδίο αυτό έχουν οι αδρανειακές μονάδες μέτρησης (IMU), οι οποίες τοποθετούνται συνήθως στα άκρα του ασθενούς, όπως στους καρπούς, τους αστραγάλους ή τη μέση. Συνδυάζοντας επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια και μαγνητόμετρα, οι μονάδες IMU καταγράφουν με υψηλή ευαισθησία την κινηματική των συμπτωμάτων και προσφέρουν ένα λεπτομερές προφίλ της κίνησης. Πρόσφατες μελέτες έχουν διερευνήσει τις βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης αισθητήρων, ώστε να ενισχύεται η συμμόρφωση των ασθενών και να μεγιστοποιείται η ακρίβεια της παρακολούθησης στο σπίτι.



Εικόνα 7: Αισθητήρες και Τεχνολογίες Ανίχνευσης Νόσου

Επιπλέον, η εξάπλωση των έξυπνων κινητών τηλεφώνων έχει προσφέρει νέες δυνατότητες στην καταγραφή των συμπτωμάτων. Τα σύγχρονα smartphones ενσωματώνουν ισχυρά επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια και εξειδικευμένο λογισμικό, επιτρέποντας τη μέτρηση βασικών κινητικών παραμέτρων χωρίς την ανάγκη πρόσθετου εξοπλισμού. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα προέρχεται από μελέτες όπου ένα κινητό τηλέφωνο τοποθετημένο στο χέρι του ασθενούς κατέγραψε με ακρίβεια το μέγεθος και τη συχνότητα του τρόμου ηρεμίας, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα των φορητών αυτών συσκευών στην παρακολούθηση της PD [45].

Πέρα από το κινητικό σύστημα, οι σύγχρονες φορητές τεχνολογίες επεκτείνονται στη μέτρηση γνωστικών, γαστρεντερικών, αυτόνομων και άλλων βιολογικών δεικτών που επηρεάζονται από τη νόσο. Αισθητήρες που τοποθετούνται στο αυτί μπορούν να καταγράψουν ηλεκτρικά σήματα που σχετίζονται με γνωστική λειτουργία, όπως τα δυναμικά που προκαλούνται από γεγονότα (ERP), ενώ συσκευές που τοποθετούνται στην κοιλιά μπορούν να παρακολουθούν τη γαστρεντερική δραστηριότητα μέσω καταγραφής ηλεκτρογαστρογραφικών σημάτων. Επιπλέον, smartwatch που ενσωματώνουν αισθητήρες πίεσης και άλλες τεχνολογίες επιτρέπουν την εκτίμηση της αυτόνομης λειτουργίας και των διαταραχών ύπνου σε πραγματικό χρόνο.

4.1.2 Τύποι Αισθητήρων για Παρακολούθηση Κινητικών Διαταραχών

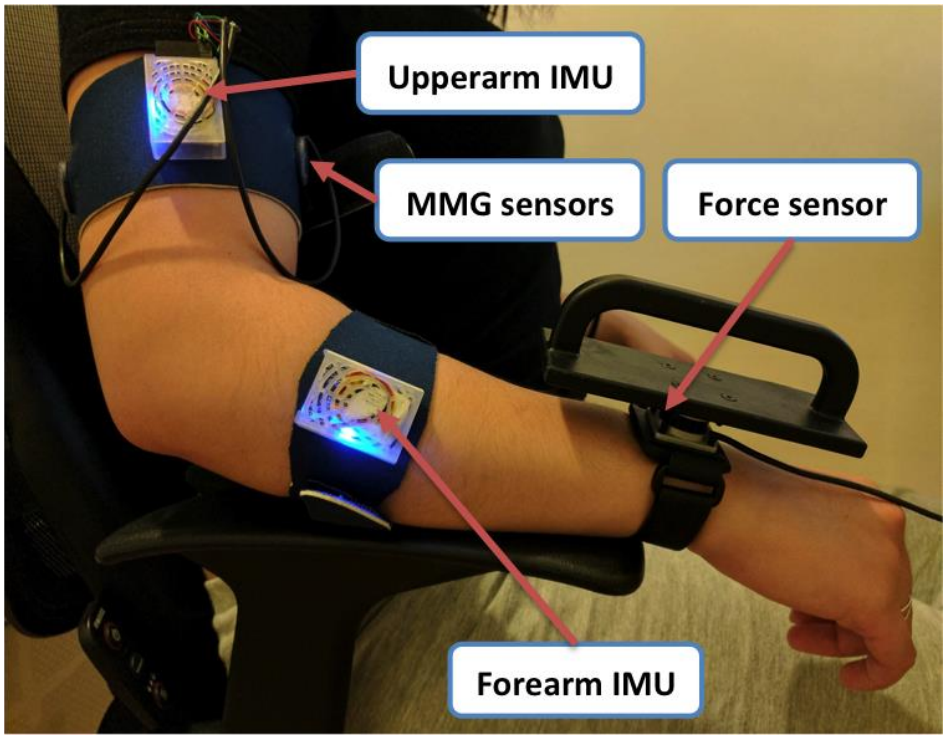
Η σύγχρονη παρακολούθηση της νόσου του Πάρκινσον στηρίζεται σε ένα ευρύ φάσμα αισθητήρων που μετατρέπουν φυσικά και βιολογικά σήματα σε αξιοποιήσιμα ψηφιακά δεδομένα. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν αντικειμενική, συνεχόμενη και υψηλής ανάλυσης καταγραφή κινητικών και μη κινητικών συμπτωμάτων, διευκολύνοντας την κλινική λήψη αποφάσεων και την εξατομίκευση της θεραπείας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες αισθητήρων και ενδεικτικές ερευνητικές εφαρμογές τους.

Αδρανειακοί αισθητήρες (IMU)

Οι αδρανειακές μονάδες μέτρησης (Inertial Measurement Units – IMUs) αποτελούν τον πυρήνα των περισσότερων φορητών συστημάτων παρακολούθησης, καθώς συνδυάζουν επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια και, συχνά, μαγνητόμετρα. Μετρούν

επιτάχυνση, γωνιακή ταχύτητα και προσανατολισμό, προσφέροντας λεπτομερή αποτύπωση της κίνησης σε πραγματικό χρόνο. Λόγω του μικρού μεγέθους και της φορητότητάς τους τοποθετούνται σε καρπούς, αστραγάλους, λεκάνη ή κορμό, και υποστηρίζουν αναλυτικές μετρήσεις βάδισης, ισορροπίας, στάσης και χειροκινησίας.

Η ενσωμάτωση τεχνικών μηχανικής μάθησης στα δεδομένα IMU επιτρέπει την αυτόματη ανίχνευση επεισοδίων, όπως το Freezing of Gait (FoG) και οι δυσκινησίες. Πρόσφατες εργασίες αξιοποίησαν συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα και βέλτιστη τοποθέτηση αισθητήρων για βελτιωμένη συμμόρφωση στο σπίτι, ενώ εφαρμογές σε smartphones—with ενσωματωμένα επιταχυνσιόμετρα/γυροσκόπια—κατέγραψαν με ακρίβεια τη συχνότητα και το πλάτος τρόμου ηρεμίας, επιβεβαιώνοντας τη χρηστικότητα των κινητών ως «κλινικών οργάνων τσέπης» [46].



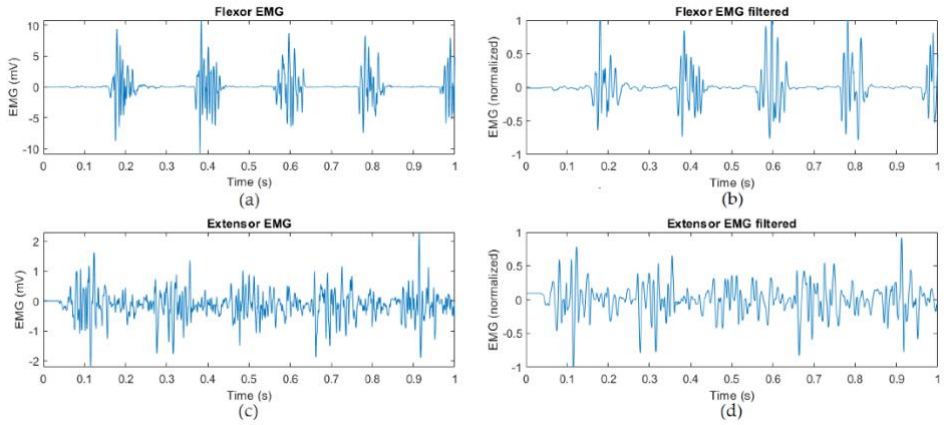
Εικόνα 8: IMUs στην Νόσο

Ηλεκτροφυσιολογικοί αισθητήρες (EMG, EEG, ECG)

EMG (Ηλεκτρομυογραφία)

Το EMG καταγράφει την ηλεκτρική δραστηριότητα των μυών και προσφέρει παράθυρο στη νευρομυϊκή λειτουργία. Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις:

επιφανειακή καταγραφή (sEMG) με ηλεκτρόδια στο δέρμα και εισδυτική (iEMG) με βελονοηλεκτρόδια για υψηλότερη χωρική ανάλυση. Ερευνητικά, έχει αξιοποιηθεί προχωρημένη ανάλυση σημάτων EMG: η εργασία της **Saara Rissanen** χρησιμοποίησε μέτρα διασταυρούμενου ρυθμού (Cross Recurrence) και μορφολογική ανάλυση ιστογραμμάτων, τα οποία—με διαστασιομείωση μέσω Karhunen–Loève—παρήγαγαν ανταγωνιστικές ακρίβειες ταξινόμησης μεταξύ υγιών και PD, αναδεικνύοντας βιοδείκτες συγχρονισμού μυϊκών εκρήξεων σχετιζόμενους με βραδυκινησία/δυσκινησία. Η ομάδα του **Bryan** συνέδεσε φορητούς τριαξονικούς επιταχυνσιογράφους και sEMG με δύο σταδίων αλγοριθμική αρχιτεκτονική (γραμμικός ταξινομητής για «όρθιος/μη όρθιος» και DNN για FoG), επιτυγχάνοντας υψηλή ευαισθησία/ειδικότητα στην πραγματική ζωή. Οι **V. Ruonala** και συν. έδειξαν ότι μορφολογία ιστογραμμάτων EMG μπορεί να διακρίνει PD από ιδιοπαθή τρόμο (ET) και υγιείς μάρτυρες, με καλύτερους διακριτικούς δείκτες το ύψος του ιστογράμματος και την ασυμμετρία μεταξύ χεριών, υπογραμμίζοντας όμως την ετερογένεια των πληθυσμών [47].

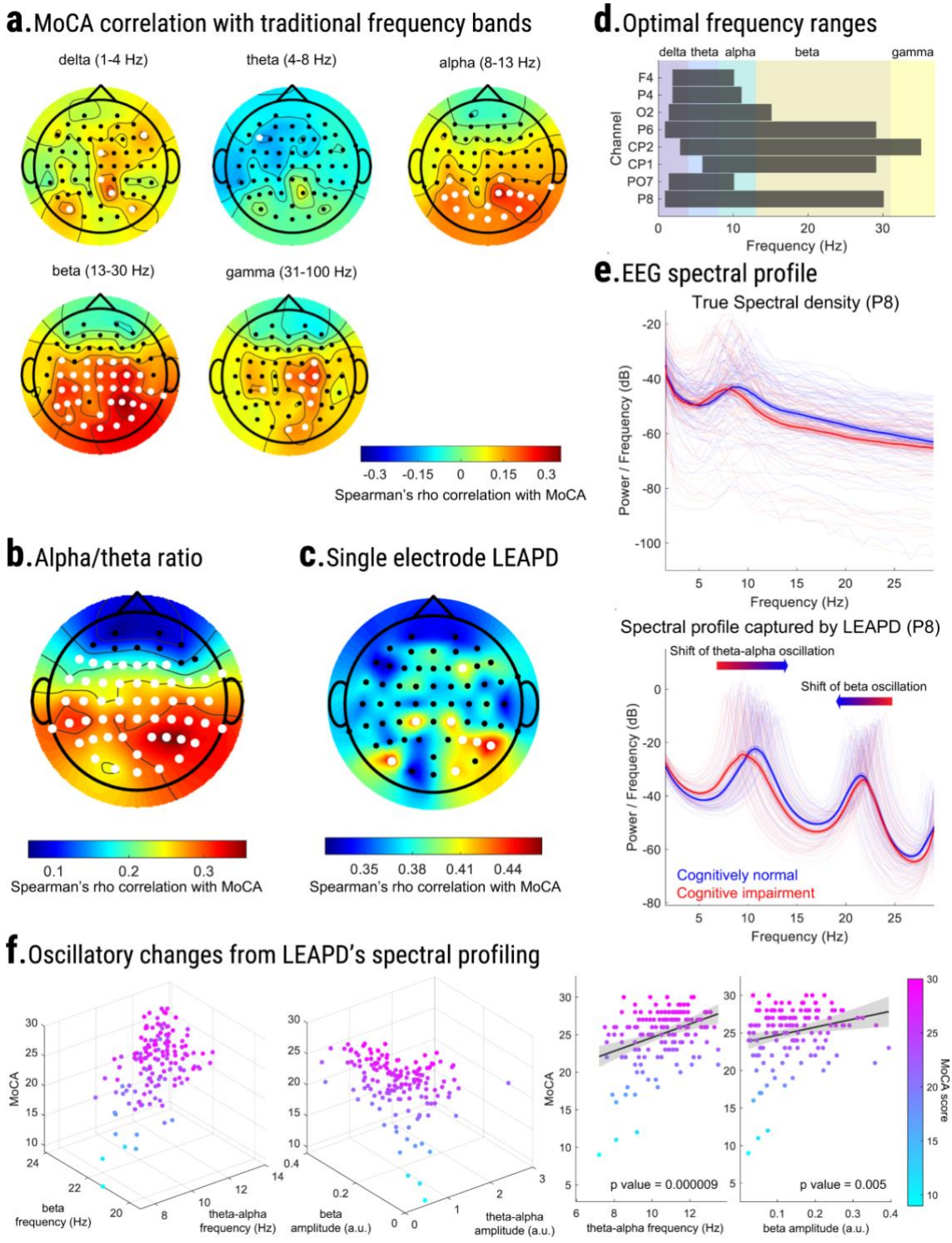


Εικόνα 9: EMG Σήματα απο Ασθενής με Νόσο

EEG (Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα)

Το EEG προσφέρει άριστη χρονική ανάλυση της εγκεφαλικής δραστηριότητας (ζώνες δέλτα–θήτα–άλφα–βήτα–γάμμα) και έχει αξιοποιηθεί για ανίχνευση FoG και χαρακτηρισμό δικτυακών δυσλειτουργιών. Η μελέτη του **A.M. Ardi** εφάρμοσε αποδόμηση κυματιδίων (DWT) και εξαγωγή χαρακτηριστικών (ενέργεια/εντροπία κυματιδίων), με ταξινόμηση μέσω τριεπίπεδου BP-NN και αξιοσημείωτες επιδόσεις στην αναγνώριση FoG. Σε άλλη εργασία, οι **Priyanka G. Bhosale** και συν.

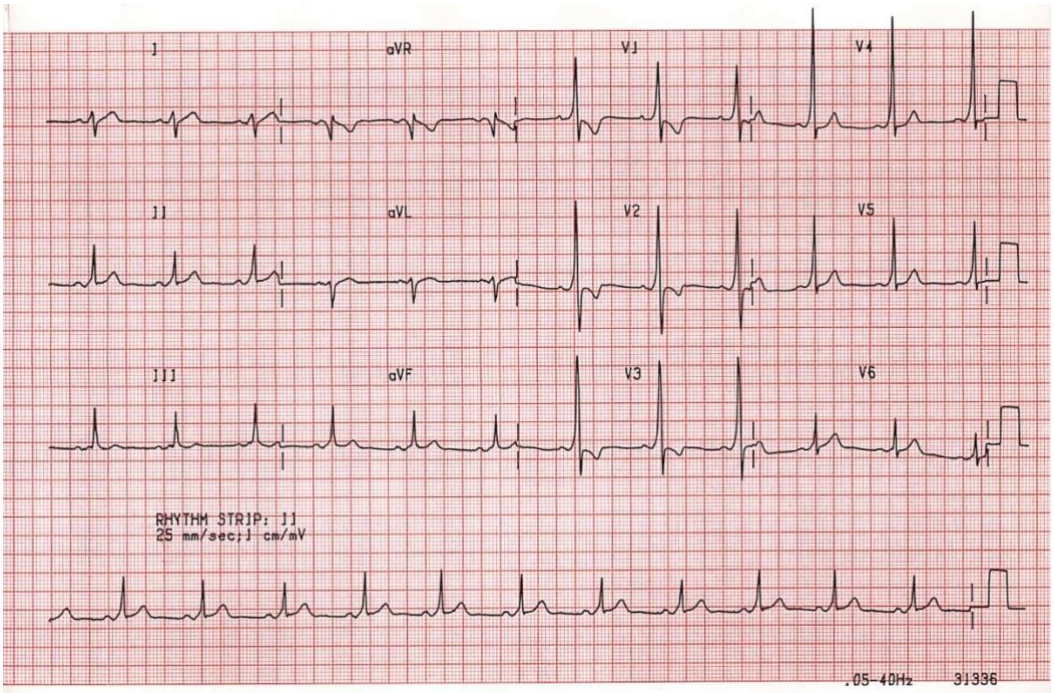
χρησιμοποίησαν DFT-features και συνδυασμό SVM με MLP-Backpropagation· ο υβριδικός ταξινομητής πέτυχε ανώτερη γενίκευση για διαχωρισμό PD από υγιείς.



Εικόνα 10: EEG Σήματα Αθενών με Νόσο

ECG (Ηλεκτροκαρδιογράφημα)

Το ECG καταγράφει την ηλεκτρική δραστηριότητα της καρδιάς και είναι κρίσιμο για μη κινητικά φάσματα της PD (π.χ. αυτόνομη δυσλειτουργία, ορθοστατική υπόταση). Σε πρόσφατη πλατφόρμα **WESAA**, ξηρά ηλεκτρόδια ECG συνδυάστηκαν με PPG και IMU σε δύο μονάδες (καρπός–αστράγαλος). Η πολυτροπική καταγραφή (40 Hz για κινησιματικά, 167 Hz σε παράθυρα για καρδιοαιμοδυναμικά) επέτρεψε εκτίμηση βάδισης/ύπνου, κύριων κινητικών συμπτωμάτων και ανίχνευση πιέσεως χωρίς περιχειρίδα, με επιδόσεις συγκρίσιμες προς «χρυσά» κλινικά πρότυπα.



Εικόνα 11: Σήματα ECG Ασθενών με Νόσο

Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες

Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς μετατρέπουν μηχανική πίεση/δόνηση σε ηλεκτρικό σήμα και είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι σε μικρομεταβολές δύναμης. Σε PD αξιοποιούνται σε πέλματα ή ιχνηλάτες ισορροπίας για:

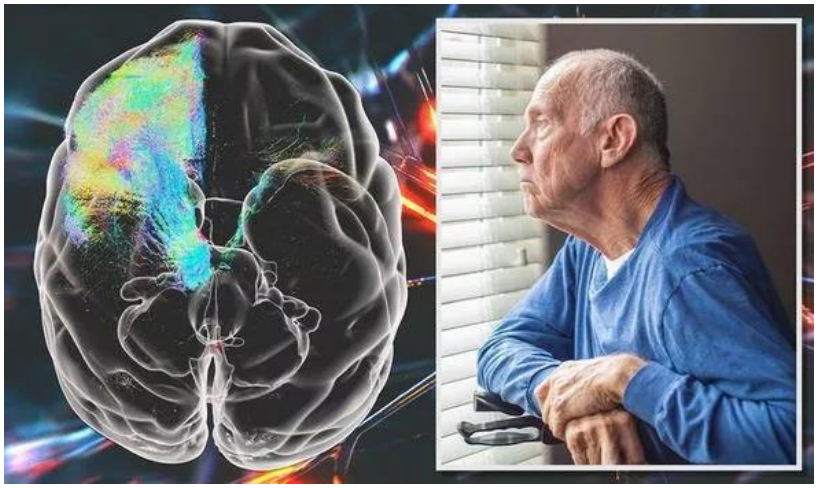
- ανίχνευση και προειδοποίηση επεισοδίων FoG μέσω χαρτογράφησης πιέσεων και απουσίας προωθητικής κίνησης,
- εκτίμηση σταθερότητας στάσης/κέντρου βάρους και κινδύνου πτώσεων,

- καταγραφή τρόμου χαμηλής συχνότητας σε άνω άκρα. Καινοτόμα συστήματα χρησιμοποιούν την ίδια πιεζοηλεκτρική αρχή για **energy harvesting**, αυξάνοντας την αυτονομία των wearables και μειώνοντας τις απαιτήσεις φόρτισης.

Εικόνα 12: Πιεζοηλεκτρικό Σύστημα

Οπτικοί αισθητήρες και τρισδιάστατη (3D) ανάλυση κίνησης

Η οπτική καταγραφή (κάμερες υψηλού ρυθμού καρέ, αισθητήρες βάθους) και η μηχανική όραση επιτρέπουν μη επεμβατική, ακριβή 3D ανάλυση κινήσεων χωρίς αισθητήρες στο σώμα. Εξάγονται μετρήσεις τρόμου (πλάτος, συχνότητα, κατεύθυνση), βάδισης (ταχύτητα, μήκος βήματος, μεταβλητότητα) και ισορροπίας, με δυνατότητα αυτόματης ανίχνευσης FoG. Σε επίπεδο νευροαπεικόνισης, ο **Dan Long** και συνεργάτες συνέδεσαν rsfMRI και voxel-based morphometry σε πολυτροπικό σχήμα εξαγωγής χαρακτηριστικών (ReHo, ALFF, RFCS, GM/WM/CSF) και ταξινόμηση με SVM, επιτυγχάνοντας υψηλή ακρίβεια στον διαχωρισμό πρώιμης PD από υγιείς. Στο πεδίο της πολυτροπικής καταγραφής κίνησης (MoCap+IMU+EMG), η ομάδα της **Magdalena** ανέλυσε τρισδιάστατες τροχιές δεικτών, δυνάμεις εδάφους και EMG υπό διαφορετικές θεραπευτικές συνθήκες (διέγερση/φαρμακοθεραπεία), με φασματικές μετρικές (FFT) και στατιστικό έλεγχο, καταδεικνύοντας παραμέτρους τρόμου ευαίσθητες σε κλινικές μεταβολές [48].



Εικόνα 13: 3D Απεικόνιση

Συνοπτική σύγκλιση και κλινική αξία

- **IMU/smartphones**: υψηλής ανάλυσης κινηματικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, ιδανικά για βάδισμα, ισορροπία, τρόμο και ανίχνευση FoG.
- **EMG**: παράγει μυοηλεκτρικούς βιοδείκτες για βραδυκινησία/δυσκινησία· αποδίδει όταν συνδυάζεται με προηγμένη επεξεργασία σημάτων και ML.
- **EEG**: εξαιρετική χρονική ανάλυση εγκεφαλικής δραστηριότητας· χρήσιμο για ανίχνευση FoG και διαχωρισμό προτύπων PD.
- **ECG/PPG**: στοχεύουν αυτόνομη δυσλειτουργία και καρδιοαιμοδυναμικές επιπλοκές, με προοπτική «cuffless» παρακολούθησης ΑΠ.
- **Πιεζοηλεκτρικοί**: ακριβής μέτρηση φορτίων/δόνησης για FoG, ισορροπία, τρόμο· δυνατή ενεργειακή αυτάρκεια συστημάτων.
- **Οπτικοί/3D**: πλήρης, μη επεμβατικός κινητικός φαινότυπος χωρίς φορετούς αισθητήρες, με δυνατότητα κλινικής κλίμακας.

Ο συνδυασμός πολλαπλών αισθητήρων (πολυτροπικά συστήματα) και αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης δημιουργεί ένα ισχυρό, συμπληρωματικό οικοσύστημα για την PD: επιτρέπει πρώιμη ανίχνευση επιδεινώσεων, συνεχή παρακολούθηση στο σπίτι και ακριβή, εξατομικευμένη προσαρμογή θεραπευτικών σχημάτων. Αυτό το πλαίσιο μετατοπίζει το κέντρο βάρους της φροντίδας από την αποσπασματική κλινική εξέταση στη **διαρκή, δεδομενοστραφή** διαχείριση της νόσου.

4.2 Νευροαπεικονιστικές τεχνικές (PET, MRI, EEG)

Οι μοριακές και νευρωνικές διεργασίες που διέπουν τις νευρολογικές διαταραχές είναι περίπλοκες και σπάνια αποκαλύπτονται επαρκώς από μία μόνο απεικονιστική τεχνική. Στο πλαίσιο αυτό, η νευροαπεικόνιση αποτελεί ζωτικό εργαλείο για τη μελέτη της εγκεφαλικής λειτουργίας και τη σε βάθος κατανόηση της παθοφυσιολογίας της νόσου του Πάρκινσον (PD). Διαφορετικές μέθοδοι προσφέρουν συμπληρωματικές πληροφορίες: η PET αποτυπώνει μεταβολικές/νευροχημικές διεργασίες, η MRI προσφέρει υψηλής ανάλυσης δομικές και λειτουργικές εικόνες, ενώ το Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG) καταγράφει με άριστη χρονική ευκρίνεια τη δυναμική της νευρωνικής δραστηριότητας. Ο συνδυασμός τους δημιουργεί ένα υβριδικό, πολυτροπικό πλαίσιο με αυξημένη διαγνωστική και προγνωστική ισχύ.

Μαγνητική Τομογραφία (MRI)

Η MRI είναι μη επεμβατική τεχνική που αξιοποιεί ισχυρά μαγνητικά πεδία και ραδιοκύματα για να παράγει λεπτομερείς εικόνες εγκεφαλικών δομών. Στην PD, η συμβατική MRI χρησιμοποιείται κυρίως για τη **διαφοροδιάγνωση** από άλλα παρκινσονικά σύνδρομα (π.χ. προοδευτική υπερπυρηνική παράλυση, πολυσυστηματική ατροφία), εντοπίζοντας πρότυπα ατροφίας ή λευκοεγκεφαλοπάθειας που δεν είναι τυπικά για την ιδιοπαθή PD. Προηγμένες παραλλαγές της MRI ενισχύουν ουσιαστικά την κλινική και ερευνητική χρησιμότητα:

- **Diffusion Tensor Imaging (DTI)**: εξετάζει την ακεραιότητα της λευκής ουσίας και τη μικροδομή νευρωνικών δεματίων, επιτρέποντας έμμεση αποτίμηση δικτυακών διαταραχών.

- **Functional MRI (fMRI)**: καταγράφει αίμα-οξυγόνο (BOLD) κατά την ηρεμία ή την εκτέλεση κινητικών/γνωστικών έργων, αποκαλύπτοντας δυσλειτουργία βρόχων βασικών γαγγλίων–φλοιού και πλαστικές αλλαγές μετά από θεραπευτικές παρεμβάσεις (π.χ. φαρμακοθεραπεία, DBS).

- **Ποσοτική MRI** (π.χ. susceptibility/neuromelanin imaging): μπορεί να ανιχνεύσει έμμεσες ενδείξεις εκφύλισης στη μέλαινα ουσία ή μεταβολές στη

σιδηροφόρτωση. Παρότι η MRI δεν αποτελεί αυτόνομο διαγνωστικό δείκτη για την PD, παρέχει **πολύτιμο πλαίσιο** για ολοκληρωμένη εκτίμηση και θεραπευτικό σχεδιασμό [49].

Τομογραφία Εκπομπής Ποζιτρονίων (PET)

Η PET χρησιμοποιεί ραδιοϊχνηθέτες για την απεικόνιση μεταβολικών και νευροχημικών διεργασιών **in vivo**. Στην PD, οι συχνότερες εφαρμογές αφορούν:

- **Ντοπαμινεργική λειτουργία**: ιχνηθέτες όπως το [18F]-DOPA χαρτογραφούν τη ντοπαμινεργική σύνθεση/μεταφορά στο ραβδωτό και τη μέλαινα ουσία, επιτρέποντας **πρώιμη ανίχνευση** απωλειών πριν την κλινική εκδήλωση κινητικών συμπτωμάτων.

- **Μεταβολική απεικόνιση**: ιχνηθέτες γλυκόζης (FDG) αποκαλύπτουν πρότυπα υπο/υπερμεταβολισμού, χρήσιμα για φαινοτυπική διαστρωμάτωση και παρακολούθηση θεραπευτικών επιδράσεων. Η PET διαθέτει υψηλή διαγνωστική ακρίβεια αλλά περιορίζεται από **κόστος**, **διαθεσιμότητα** και τη χρήση ραδιενεργών ουσιών, με αποτέλεσμα να αξιοποιείται κυρίως σε εξειδικευμένα κέντρα ή ερευνητικά πλαίσια. Ως εργαλείο **παρακολούθησης**, μπορεί να τεκμηριώσει τη δυναμική της νόσου και να αποτιμήσει την επίδραση παρεμβάσεων, όπως η λεβοντόπα ή η DBS, στη ντοπαμινεργική δραστηριότητα [50].

Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG)

Το EEG καταγράφει την ηλεκτρική δραστηριότητα του εγκεφάλου με υψηλή **χρονική** ανάλυση, συμπληρώνοντας τις χωρικά λεπτομερείς αλλά χρονικά βραδύτερες απεικονίσεις MRI/PET. Στην PD, έχει αναδειχθεί η **δυσρύθμιση β-ταλαντώσεων (≈13–30 Hz)**, οι οποίες σχετίζονται με κινητικό έλεγχο και έχουν συνδεθεί με βραδυκινησία και δυσκαμψία. Το EEG:

- υποστηρίζει τη **μελέτη δικτυακής δυναμικής** σε ηρεμία ή κατά την κίνηση,

- μπορεί να **συνδυαστεί** με φορητούς αισθητήρες (π.χ. IMU, EMG) και αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για ανίχνευση επεισοδίων όπως το **Freezing of Gait**,

- αξιοποιείται στην **εκτίμηση θεραπευτικών επιδράσεων** (φαρμακευτικές ρυθμίσεις, DBS), παρέχοντας δείκτες ανταπόκρισης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

  Το χαμηλότερο κόστος και η φορητότητα καθιστούν το EEG ιδιαίτερα ελκυστικό για **μακροχρόνια παρακολούθηση** και κατ' οίκον εφαρμογές, ειδικά όταν ενσωματώνεται σε ψηφιακές πλατφόρμες [51].

Συμπληρωματικότητα και υβριδικές προσεγγίσεις

Καμία μεμονωμένη μέθοδος δεν επαρκεί για τη **σφαιρική** αποτύπωση της PD. Οι υβριδικές/πολυτροπικές προσεγγίσεις (π.χ. **PET/MRI**, **EEG–MRI**, συνδυασμοί με φορητούς αισθητήρες) επιτρέπουν:

- ταυτόχρονη **ανατομική, λειτουργική και νευροχημική** χαρτογράφηση,
- βελτιωμένη **διαφοροδιάγνωση** και φαινοτυπική διαστρωμάτωση,
- **προσωποποιημένη** παρακολούθηση της εξέλιξης και της θεραπευτικής ανταπόκρισης. Με την ώσμωση απεικονιστικών δεδομένων και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, αναδεικνύονται νέοι βιοδείκτες με προγνωστική αξία, υποστηρίζοντας μεταβάσεις προς δεδομενοστραφή, συνεχόμενη φροντίδα.

4.1.2 Υβριδικες Απεικονίσεις για Βελτιωμένη Διάγνωση Νευρολογικών Παθήσεων

Η έννοια της υβριδικής νευροαπεικόνισης προέκυψε από την ανάγκη συνδυασμού συμπληρωματικών πληροφοριών που παρέχουν διαφορετικές τεχνικές, με στόχο την πιο ακριβή και ολοκληρωμένη διάγνωση νευρολογικών παθήσεων. Ένα από τα σημαντικότερα παραδείγματα υβριδικής απεικόνισης είναι το σύστημα PET-MRI, το οποίο προτάθηκε ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 από τους Paul Marsden και Simon Cherry, με αρχικό σκοπό τη βελτίωση της σάρωσης μικρών ζώων. Η ιδέα αυτή εξελίχθηκε ραγδαία και σήμερα αποτελεί ένα από τα πιο ισχυρά εργαλεία στη σύγχρονη νευροαπεικόνιση.

Η υβριδική προσέγγιση PET-MRI προέκυψε από την αναγνώριση των περιορισμών κάθε μεμονωμένης τεχνικής: η PET παρέχει λεπτομερή πληροφορία για τις φυσιολογικές και μεταβολικές διεργασίες, αλλά με περιορισμένη χωρική ανάλυση,

ενώ η MRI προσφέρει εξαιρετική απεικόνιση μαλακών ιστών και υψηλή χωρική ανάλυση, χωρίς όμως να μπορεί να καταγράψει άμεσα τη νευροχημική δραστηριότητα. Η ταυτόχρονη λήψη εικόνων PET και MRI επιτρέπει την ακριβή συγχώνευση λειτουργικών και δομικών δεδομένων, εξασφαλίζοντας πιο αξιόπιστες και κλινικά χρήσιμες απεικονίσεις από ό,τι οι διαδοχικές σάρωσεις. Επιπλέον, η συνολική δόση ακτινοβολίας δεν αυξάνεται, καθώς η MRI δεν χρησιμοποιεί ιονίζουσα ακτινοβολία [52].

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας PET-MMRI περιλαμβάνουν την υψηλή ευαισθησία της PET στην ανίχνευση μεταβολικών αλλαγών, την εξαιρετική απεικόνιση δομικών μεταβολών μέσω MRI και τη μείωση του συνολικού χρόνου εξέτασης λόγω ταυτόχρονης σάρωσης. Ο συνδυασμός αυτός καθιστά το PET-MRI ιδανικό εργαλείο για τη νευροαπεικόνιση, τη χαρτογράφηση εγκεφαλικής λειτουργίας και την πρώιμη διάγνωση νευρολογικών παθήσεων, όπως η νόσος του Πάρκινσον.

Στο πλαίσιο της PD, η υβριδική απεικόνιση επιτρέπει την ακριβή διερεύνηση της ντοπαμινεργικής λειτουργίας μέσω ραδιοϊχνηθετών (όπως 18F-DOPA), σε συνδυασμό με την ανάλυση δομικών και μικροδομικών αλλοιώσεων στις περιοχές των βασικών γαγγλίων. Νεότεροι ραδιοϊχνηθέτες, όπως αυτοί που στοχεύουν την α-συνουκλεΐνη, αναμένεται να ενισχύσουν ακόμη περισσότερο τη διαγνωστική ακρίβεια της PET-MRI στα πρώιμα στάδια της νόσου. Παράλληλα, προηγμένες τεχνικές MRI, όπως η φασματοσκοπία πρωτονίων, η χαρτογράφηση σιδήρου και οι μέθοδοι διάχυσης, προσφέρουν πρόσθετες πληροφορίες για τη νευρωνική εκφύλιση και τις μικροδομικές αλλοιώσεις που σχετίζονται με τη νόσο.

Πέρα από το PET-MRI, σημαντική υβριδική προσέγγιση αποτελεί και ο συνδυασμός EEG–fMRI. Η τεχνική αυτή συνδυάζει την υψηλή χρονική ανάλυση του EEG με την εξαιρετική χωρική ακρίβεια της fMRI, επιτρέποντας την ταυτόχρονη καταγραφή των νευρωνικών ταλαντώσεων και της αιματικής απόκρισης του εγκεφάλου. Στη νόσο του Πάρκινσον, το EEG-fMRI χρησιμοποιείται για τη μελέτη της δυσλειτουργίας των βασικών γαγγλίων και του κινητικού φλοιού, συνδέοντας παθολογικές ταλαντώσεις όπως η μειωμένη β-δραστηριότητα με τις αλλαγές στη ροή του αίματος. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει

πολύτιμα δεδομένα για την κατανόηση κινητικών συμπτωμάτων, μεταξύ των οποίων ο τρόμος, η βραδυκινησία και η δυσκαμψία.

Επιπλέον, η υβριδική τεχνική EEG-fMRI έχει αποδειχθεί χρήσιμη στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας φαρμακευτικών παρεμβάσεων, όπως η λεβοντόπα, καθώς επιτρέπει την παρακολούθηση των νευρωνικών και αγγειακών αλλαγών που συνοδεύουν τη θεραπεία. Σημαντική εφαρμογή της αποτελεί η μελέτη σύνθετων συμπτωμάτων όπως το Freezing of Gait, προσφέροντας πληροφορίες για τις νευρωνικές δυσλειτουργίες που σχετίζονται με το φαινόμενο και βοηθώντας στη σχεδίαση νέων θεραπευτικών στρατηγικών [53].

Τέλος, οι υβριδικές απεικονιστικές τεχνικές ανοίγουν τον δρόμο για την πρώιμη διάγνωση και την παρακολούθηση της εξέλιξης της νόσου, καθώς μπορούν να ανιχνεύσουν νευροφυσιολογικές αλλαγές πριν την εμφάνιση κλινικών συμπτωμάτων. Ο συνδυασμός λειτουργικών, δομικών και ηλεκτροφυσιολογικών δεδομένων δημιουργεί ένα ισχυρό πλαίσιο εξατομικευμένης ιατρικής, προσφέροντας νέες δυνατότητες για την πρόγνωση, τη διαχείριση και τη θεραπεία της PD και άλλων νευρολογικών διαταραχών.

5. Ανάλυση και Σύγκριση Διαφορετικών Τεχνολογικών Μεθόδων Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Κλινικών vs Τεχνολογικών Μεθόδων

Η αξιολόγηση των κινητικών διαταραχών στη νόσο του Πάρκινσον αποτελεί ένα θεμελιώδες βήμα για την ακριβή διάγνωση, την παρακολούθηση της εξέλιξης και την εξατομίκευση των θεραπευτικών παρεμβάσεων. Παραδοσιακά, η κλινική εκτίμηση βασίζεται σε δομημένες κλίμακες, όπως η UPDRS, η Hoehn & Yahr και η ADL, καθώς και σε υποκειμενικές αναφορές των ασθενών. Αυτές οι μέθοδοι, αν και αποτελεσματικές σε επίπεδο κλινικής πρακτικής, παρουσιάζουν περιορισμούς που σχετίζονται με την υποκειμενικότητα, τη χαμηλή συχνότητα παρακολούθησης και την αδυναμία συνεχούς καταγραφής των συμπτωμάτων.

Τα τελευταία χρόνια, οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν εισαγάγει νέες μεθόδους παρακολούθησης, όπως φορητούς αισθητήρες, συστήματα καταγραφής κίνησης, νευροαπεικονιστικές τεχνικές και αλγορίθμους μηχανικής μάθησης. Οι τεχνολογικές αυτές λύσεις επιτρέπουν την αντικειμενική, αυτοματοποιημένη και συνεχόμενη καταγραφή κινητικών και μη κινητικών συμπτωμάτων στη φυσική καθημερινότητα των ασθενών. Η δυνατότητα συλλογής μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο δημιουργεί ένα νέο πλαίσιο αξιολόγησης της νόσου, συμπληρώνοντας και σε ορισμένες περιπτώσεις υπερβαίνοντας την παραδοσιακή κλινική παρατήρηση.

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει συστηματικά τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τόσο των κλασικών κλινικών μεθόδων όσο και των σύγχρονων τεχνολογικών προσεγγίσεων. Μέσα από συγκριτική ανάλυση, αναδεικνύονται οι διαφορές στην ακρίβεια, την αξιοπιστία, τη χρηστικότητα και την κλινική αξία των διαθέσιμων συστημάτων, με στόχο την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι παραδοσιακές και οι τεχνολογικές μέθοδοι μπορούν να συνδυαστούν αποτελεσματικά. Η σύνθεση αυτή αποτελεί κεντρικό στοιχείο για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων μοντέλων παρακολούθησης της νόσου, που θα συμβάλλουν στη βελτίωση της διάγνωσης, της θεραπείας και της ποιότητας ζωής των ατόμων με Πάρκινσον.

5.1 Πολυτροπική Φύση της Νόσου του Πάρκινσον

Η νόσος του Πάρκινσον (PD) αποτελεί μια πολυσύνθετη και πολυπαραγοντική νευροεκφυλιστική διαταραχή, η οποία επηρεάζει ταυτόχρονα κινητικές, γνωστικές, ψυχικές και αυτόνομες λειτουργίες του οργανισμού. Η πολυτροπική αυτή φύση της νόσου καθιστά απαραίτητη την ολιστική και πολυεπίπεδη αξιολόγηση των ασθενών, με στόχο την κατανόηση της πλήρους κλινικής εικόνας και την εξατομίκευση της θεραπευτικής προσέγγισης. Η μεγάλη ετερογένεια στα συμπτώματα, στον ρυθμό εξέλιξης και στην ανταπόκριση στη θεραπεία απαιτεί τη συλλογή δεδομένων από πολλαπλές πηγές, ώστε να αποτυπωθεί η πραγματική επίδραση της νόσου στην καθημερινότητα των ασθενών.

Στο κινητικό επίπεδο, η PD εκδηλώνεται κυρίως μέσω χαρακτηριστικών συμπτωμάτων όπως ο τρόμος ηρεμίας, η βραδυκινησία, η μυϊκή δυσκαμψία και οι διαταραχές της βάδισης, μεταξύ των οποίων εξέχουσα θέση κατέχει το φαινόμενο Freezing of Gait (FoG). Η αξιολόγηση αυτών των κινητικών δυσλειτουργιών πραγματοποιείται τόσο με κλινικές μεθόδους όσο και με φορητές τεχνολογικές συσκευές και αισθητήρες, οι οποίοι καταγράφουν παράμετρους όπως η επιτάχυνση, η γωνιακή ταχύτητα, η ισορροπία και η σταθερότητα του βηματισμού. Η συνεχής και αντικειμενική καταγραφή τέτοιων κινηματικών δεδομένων αποτελεί σημαντικό συμπλήρωμα των παραδοσιακών κλινικών εργαλείων που βασίζονται κυρίως στη στιγμιαία παρατήρηση του ιατρού [54].

Πέραν των κινητικών συμπτωμάτων, η PD χαρακτηρίζεται από ένα ευρύ φάσμα μη κινητικών εκδηλώσεων, οι οποίες συχνά προηγούνται των κινητικών διαταραχών και έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ποιότητα ζωής. Σε αυτές περιλαμβάνονται η γνωστική επιβάρυνση, η άνοια, οι διαταραχές ύπνου, η κατάθλιψη, το άγχος, καθώς και η δυσλειτουργία του αυτόνομου νευρικού συστήματος. Η αξιολόγηση των μη κινητικών συμπτωμάτων απαιτεί συνδυασμό νευροψυχολογικών δοκιμασιών, ερωτηματολογίων, αλλά και σύγχρονων φορητών συστημάτων που επιτρέπουν τη συνεχή καταγραφή συμπεριφορικών και φυσιολογικών αλλαγών – όπως τα μοτίβα ύπνου ή οι μεταβολές στην καρδιακή λειτουργία.

Επιπλέον, η φαρμακευτική αγωγή για τη νόσο του Πάρκινσον, ιδιαίτερα η λεβοντόπα, μπορεί να προκαλέσει παρενέργειες όπως δυσκινησίες και διακυμάνσεις κινητικότητας (on-off φαινόμενο), οι οποίες απαιτούν προσεκτική και εξατομικευμένη διαχείριση. Η αξιολόγηση αυτών των θεραπευτικών επιδράσεων

βασίζεται τόσο στην υποκειμενική εμπειρία του ασθενούς όσο και στην αντικειμενική ανάλυση δεδομένων κινητικότητας από αισθητήρες, τα οποία παρέχουν συνεχείς μετρήσεις για την ένταση και τη συχνότητα των επεισοδίων [55].

Τέλος, οι συνοσηρότητες που συχνά συνυπάρχουν με την PD — όπως καρδιαγγειακές παθήσεις, αρτηριακή υπέρταση και μεταβολικές διαταραχές — επηρεάζουν την κλινική πορεία της νόσου και απαιτούν ολοκληρωμένη αξιολόγηση. Η διασύνδεση κλινικών δεδομένων, αυτοαναφορών, ιατρικών αρχείων και βιοαισθητήρων επιτρέπει μια σφαιρική προσέγγιση στη διαχείριση των ασθενών, με στόχο τη βέλτιστη θεραπευτική καθοδήγηση και την αποφυγή επιπλοκών

5.1.1 Πηγές Δεδομένων και η Σημασία της Ενοποίησης τους

Η αποτελεσματική διαχείριση της νόσου του Πάρκινσον απαιτεί τη συλλογή και αξιοποίηση δεδομένων από πολλαπλές, ετερογενείς πηγές, καθώς κανένα μεμονωμένο εργαλείο δεν μπορεί να αποτυπώσει πλήρως την πολυπαραγοντική φύση της νόσου. Η κλινική αξιολόγηση μέσω καθιερωμένων εργαλείων, όπως η Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS) και η κλίμακα Hoehn & Yahr, προσφέρει μια δομημένη αλλά περιοδική εκτίμηση της κατάστασης του ασθενούς. Οι μέθοδοι αυτές, αν και υψηλής κλινικής αξίας, βασίζονται σε σύντομες στιγμιαίες παρατηρήσεις και συνεπώς δεν μπορούν να καταγράψουν μικρές αλλά σημαντικές αλλαγές στη συμπεριφορά και στην κινητικότητα που συμβαίνουν στην καθημερινή ζωή των ασθενών.

Patient Name or Subject ID	Site ID	(mm-dd-yyyy) Assessment Date	Investigator's Initials

MDS UPDRS Score Sheet

1.A	Source of information	☐ Patient ☐ Caregiver ☐ Patient + Caregiver	3.3b	Rigidity– RUE	
			3.3c	Rigidity– LUE	
Part I			3.3d	Rigidity– RLE	
1.1	Cognitive impairment		3.3e	Rigidity– LLE	
1.2	Hallucinations and psychosis		3.4a	Finger tapping– Right hand	
1.3	Depressed mood		3.4b	Finger tapping– Left hand	
1.4	Anxious mood		3.5a	Hand movements– Right hand	
1.5	Apathy		3.5b	Hand movements– Left hand	
1.6	Features of DDS		3.6a	Pronation- supination movements– Right hand	
1.6a	Who is filling out questionnaire	☐ Patient ☐ Caregiver ☐ Patient + Caregiver	3.6b	Pronation- supination movements– Left hand	
			3.7a	Toe tapping–Right foot	
1.7	Sleep problems		3.7b	Toe tapping– Left foot	
1.8	Daytime sleepiness		3.8a	Leg agility– Right leg	
1.9	Pain and other sensations		3.8b	Leg agility– Left leg	
1.10	Urinary problems		3.9	Arising from chair	
1.11	Constipation problems		3.10	Gait	
1.12	Light headedness on standing		3.11	Freezing of gait	
1.13	Fatigue		3.12	Postural stability	
Part II			3.13	Posture	
2.1	Speech		3.14	Global spontaneity of movement	
2.2	Saliva and drooling		3.15a	Postural tremor– Right hand	
2.3	Chewing and swallowing		3.15b	Postural tremor– Left hand	
2.4	Eating tasks		3.16a	Kinetic tremor– Right hand	
2.5	Dressing		3.16b	Kinetic tremor– Left hand	
2.6	Hygiene		3.17a	Rest tremor amplitude– RUE	
2.7	Handwriting		3.17b	Rest tremor amplitude– LUE	
2.8	Doing hobbies and other activities		3.17c	Rest tremor amplitude– RLE	
2.9	Turning in bed		3.17d	Rest tremor amplitude– LLE	
2.10	Tremor		3.17e	Rest tremor amplitude– Lip/jaw	
2.11	Getting out of bed		3.18	Constancy of rest	
2.12	Walking and balance			Were dyskinesias presen	☐ No ☐ Yes
2.13	Freezing			Did these movements interfere with ratings?	☐ No ☐ Yes
3a	Is the patient on medication?	☐ No ☐ Yes		Hoehn and Yahr Stage	
3b	Patient's clinical state	☐ Off ☐ On	**Part IV**		
3c	Is the patient on Levodopa?	☐ No ☐ Yes	4.1	Time spent with dyskinesias	
3.C1	If yes, minutes since last dose:		4.2	Functional impact of dyskinesias	
Part III			4.3	Time spent in the OFF state	
3.1	Speech		4.4	Functional impact of fluctuations	
3.2	Facial expression		4.5	Complexity of motor fluctuations	
3.3a	Rigidity– Neck		4.6	Painful OFF-state dystonia	

Εικόνα 14: Κλίμακα Αξιολόγησης Νόσου

Παράλληλα, οι αυτοαναφορές και τα ερωτηματολόγια των ασθενών παρέχουν μια υποκειμενική αλλά απαραίτητη διάσταση της αξιολόγησης, καθώς αποτυπώνουν την προσωπική εμπειρία των συμπτωμάτων, τις επιπτώσεις τους στην ποιότητα ζωής και τις μεταβολές στη λειτουργικότητα που δεν είναι πάντα εμφανείς κατά την κλινική εξέταση. Παρά τους περιορισμούς τους λόγω πιθανής μεροληψίας ή

ανακριβούς ανάκλησης, αποτελούν σημαντική πηγή δεδομένων που συμπληρώνει τα κλινικά ευρήματα [56].

Η εισαγωγή φορητών αισθητήρων και κινητών συσκευών έχει ενισχύσει την αντικειμενικότητα και τη συνέχεια στην παρακολούθηση της νόσου. Επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια, αισθητήρες ηλεκτροφυσιολογικών σημάτων και άλλες wearable τεχνολογίες επιτρέπουν την αδιάλειπτη καταγραφή κινητικών παραμέτρων, όπως του τρόμου, της βραδυκινησίας, της σταθερότητας του βηματισμού και της παρουσίας δυσκινησιών. Τα δεδομένα αυτά συλλέγονται σε πραγματικές συνθήκες ζωής και όχι σε τεχνητά περιβάλλοντα κλινικών επισκέψεων, προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη και ακριβή εικόνα των κινητικών διακυμάνσεων.

Η ενοποίηση των δεδομένων από αυτές τις πηγές — κλινικές κλίμακες, αυτοαναφορές και φορητές τεχνολογίες — αποτελεί κρίσιμο βήμα για την πλήρη αξιοποίηση του πληροφοριακού πλούτου που παράγεται. Ο συνδυασμός των διαφορετικών τύπων δεδομένων επιτρέπει την ανάπτυξη προηγμένων αλγορίθμων ανάλυσης και πρόβλεψης, οι οποίοι μπορούν να εντοπίσουν πρότυπα συμπεριφοράς, να προβλέψουν επιδείνωση της κινητικής λειτουργίας και να ανιχνεύσουν έγκαιρα κρίσιμα γεγονότα, όπως επεισόδια Freezing of Gait ή απότομες διακυμάνσεις κινητικότητας.

Η διαχρονική και συνεχής συλλογή πολυτροπικών δεδομένων προσφέρει στους επαγγελματίες υγείας μια δυναμική εικόνα της πορείας της νόσου, διευκολύνοντας την έγκαιρη προσαρμογή της θεραπευτικής αγωγής και την εξατομίκευση των παρεμβάσεων. Η χρήση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης καθιστά πλέον δυνατή τη διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων και την εξαγωγή κλινικά χρήσιμων συμπερασμάτων με υψηλή ακρίβεια.

Ωστόσο, χωρίς αποτελεσματικά συστήματα ενοποίησης, τυποποίησης και διαλειτουργικότητας, ο πλούτος αυτών των δεδομένων παραμένει εν μέρει ανεκμετάλλευτος. Η ανάπτυξη ολοκληρωμένων πλατφορμών που συγκεντρώνουν και επεξεργάζονται τα δεδομένα από διαφορετικές πηγές αποτελεί κομβικό στοιχείο για τη βελτίωση της διάγνωσης, της παρακολούθησης και της θεραπευτικής διαχείρισης της νόσου του Πάρκινσον. Τέτοιες πλατφόρμες μπορούν να

προσφέρουν μια ενιαία και συνεκτική εικόνα της κατάστασης του ασθενούς, επιτρέποντας πραγματικά εξατομικευμένη και στοχευμένη φροντίδα.

5.1.2 Ενοποίησης Δεδομένων μέσω PD_MENTOR & DSS

Η ενσωμάτωση των πολυτροπικών δεδομένων που σχετίζονται με τη νόσο του Πάρκινσον αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την ακριβή παρακολούθηση της κατάστασης του ασθενούς και την υποστήριξη κλινικών αποφάσεων. Στο πλαίσιο αυτό, η πλατφόρμα **PD_MENTOR** αναπτύσσεται ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα ενοποίησης και ανάλυσης δεδομένων, το οποίο στοχεύει να προσφέρει εξατομικευμένες υπηρεσίες στη διαχείριση της PD, των συνοσηροτήτων και των χρόνιων επιπλοκών που συχνά συνοδεύουν τη νόσο. Η πλατφόρμα αξιοποιεί ένα ευρύ φάσμα ετερογενών πηγών δεδομένων – από παραδοσιακές κλινικές εξετάσεις και ερωτηματολόγια έως σύγχρονους φορητούς αισθητήρες, wearables και κινητές συσκευές – συνδυάζοντάς τα σε ένα ενιαίο σύστημα ανάλυσης μέσω τεχνικών πολυτροπικής συγχώνευσης δεδομένων.

Κεντρικό στοιχείο του PD_MENTOR είναι η λειτουργία του ως **Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων (Decision Support System – DSS)**, το οποίο παρέχει καθοδήγηση σε επαγγελματίες υγείας και φροντιστές σχετικά με τη βέλτιστη διαχείριση της νόσου. Το DSS βασίζεται σε εξειδικευμένη ιατρική γνώση και προηγμένους αλγορίθμους, ώστε να υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων σε πολλαπλά επίπεδα. Ένα από τα βασικά πεδία εφαρμογής του αφορά τις θεραπευτικές προτάσεις, καθώς το σύστημα αναλύει τα δεδομένα του ασθενούς και προτείνει κατάλληλες παρεμβάσεις, είτε πρόκειται για νευροπροστατευτικές θεραπείες που στοχεύουν στην επιβράδυνση της εξέλιξης της νόσου, είτε για συμπτωματικές φαρμακευτικές αγωγές, είτε για θεραπείες βασισμένες σε ιατρικές συσκευές, όπως η εν τω βάθει εγκεφαλική διέγερση (DBS). Ένας επιπλέον τομέας αφορά τις ιατρικές ειδοποιήσεις, όπου το σύστημα μπορεί να ενημερώσει έγκαιρα για επιδείνωση συμπτωμάτων, όπως αύξηση γνωστικής έκπτωσης ή εμφάνιση επικίνδυνων κινητικών διαταραχών, επιτρέποντας την άμεση αντίδραση επαγγελματιών υγείας και φροντιστών [57].

Το DSS παρέχει επίσης προτάσεις για τη συλλογή πρόσθετων δεδομένων, όταν τα υπάρχοντα είναι ανεπαρκή για την τεκμηριωμένη αξιολόγηση της κατάστασης. Για

παράδειγμα, εάν η εκτίμηση ενός συμπτώματος, όπως ο τρόμος ηρεμίας, έχει βασιστεί αποκλειστικά σε παρωχημένα ερωτηματολόγια, το σύστημα μπορεί να συστήσει την επανάληψη της αξιολόγησης με νεότερα εργαλεία ή την ενσωμάτωση αντικειμενικών μετρήσεων μέσω αισθητήρων.

Η λειτουργία του DSS δομείται γύρω από ένα **σύστημα αλληλεπιδρώντων κόμβων**, καθένας από τους οποίους είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση ενός συγκεκριμένου συμπτώματος, πάθησης ή συννοσηρότητας. Κάθε κόμβος επεξεργάζεται τα διαθέσιμα δεδομένα και δημιουργεί προτάσεις προσαρμοσμένες στη συγκεκριμένη κλινική πτυχή που αναλύει. Ωστόσο, για τη διασφάλιση συνοχής και ακρίβειας, τα αποτελέσματα των κόμβων διασυνδέονται μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο, προτάσεις που βασίζονται αποκλειστικά σε ένα σύμπτωμα επικυρώνονται ή απορρίπτονται βάσει των υπόλοιπων δεδομένων. Για παράδειγμα, σε περίπτωση έντονων κινητικών διαταραχών που υποδηλώνουν πιθανή ανάγκη για DBS, το σύστημα θα λάβει υπόψη τα δεδομένα του κόμβου γνωστικής λειτουργίας, αποτρέποντας την προτεινόμενη θεραπεία σε ασθενή με σοβαρή γνωστική έκπτωση, όπου η DBS αντενδείκνυται.

Το PD_MENTOR λειτουργεί σε δύο επίπεδα: στο επίπεδο του κόμβου, όπου γίνεται εξειδικευμένη επεξεργασία δεδομένων για κάθε κλινική παράμετρο, και στο επίπεδο του ασθενούς, όπου τα αποτελέσματα συνδυάζονται για τη δημιουργία μιας ενιαίας, συνεκτικής και τεκμηριωμένης πρότασης. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι η τελική απόφαση στηρίζεται σε μια σφαιρική, εξατομικευμένη προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική κλινική εικόνα και τις συννοσηρότητες του ασθενούς [58].

Συνολικά, η πλατφόρμα PD_MENTOR σε συνδυασμό με το σύστημα DSS αποτελεί μια καινοτόμο λύση ενοποίησης και αξιοποίησης πολυτροπικών δεδομένων, προσφέροντας ένα ισχυρό εργαλείο για τη βελτίωση της διάγνωσης, της παρακολούθησης και της θεραπευτικής διαχείρισης της νόσου του Πάρκινσον. Η εφαρμογή τέτοιων συστημάτων αναμένεται να ενισχύσει σημαντικά την ποιότητα φροντίδας και να επιτρέψει την ανάπτυξη πραγματικά εξατομικευμένων θεραπευτικών στρατηγικών.

5.1.3 Ανάλυση Δεδομένων με Μοντέλα Μηχανικής Μάθησης και Εξόρυξης Δεδομένων

Η αξιοποίηση μοντέλων μηχανικής μάθησης και μεθόδων εξόρυξης δεδομένων αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο της λειτουργικότητας της πλατφόρμας PD_MENTOR, επιτρέποντας την αυτοματοποιημένη και υψηλής ακρίβειας ανάλυση των πολυτροπικών δεδομένων που συλλέγονται από τους ασθενείς. Αφού τα δεδομένα ενοποιηθούν και τυποποιηθούν, υποβάλλονται σε επεξεργασία από εξειδικευμένα μοντέλα, τα οποία εκπαιδεύονται σε επισημασμένα ιατρικά σύνολα δεδομένων με στόχο την εξαγωγή κλινικά χρήσιμων συμπερασμάτων. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την παραγωγή ιατρικών ειδοποιήσεων, θεραπευτικών προτάσεων και εξατομικευμένων κλινικών προγνώσεων, ενισχύοντας σημαντικά την αποτελεσματικότητα της διαχείρισης της νόσου του Πάρκινσον.

Η συγχώνευση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα διαφορετικά μοντέλα γίνεται βάσει σαφώς καθορισμένων ιατρικών κριτηρίων. Αρχικά, δίνεται προτεραιότητα στα δεδομένα υψηλής αξιοπιστίας, όπως οι μετρήσεις που προέρχονται από κλινικές εξετάσεις και αντικειμενικές καταγραφές, ενώ δεδομένα από ερωτηματολόγια και αυτοαναφορές επιβαρύνονται με χαμηλότερη βαρύτητα. Επιπλέον, το χρονικό πλαίσιο των δεδομένων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο, καθώς πιο πρόσφατες πληροφορίες θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικές της τρέχουσας κατάστασης του ασθενούς. Τέλος, το μέγεθος και η ποιότητα του συνόλου εκπαίδευσης κάθε μοντέλου επηρεάζουν άμεσα την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, με μεγαλύτερα και πλουσιότερα σύνολα δεδομένων να οδηγούν σε πιο σταθερές προβλέψεις [59].

Η σταδιοποίηση και συνολική εκτίμηση της κατάστασης του ασθενούς πραγματοποιείται μέσω μιας ιεραρχικής διαδικασίας τύπου bottom-up. Στο πρώτο επίπεδο, κάθε εξειδικευμένο μοντέλο αναλύει δεδομένα που σχετίζονται με ένα συγκεκριμένο σύμπτωμα ή κλινική πτυχή, όπως η σοβαρότητα του τρόμου ηρεμίας, η παρουσία δυσκινησιών ή οι μεταβολές στη γνωστική λειτουργία. Στο επόμενο επίπεδο, τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται σε κόμβους που αντιπροσωπεύουν ολόκληρες κατηγορίες συμπτωμάτων. Οι κόμβοι συνδυάζουν τα αποτελέσματα των επιμέρους μοντέλων, δημιουργώντας μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση για κάθε σύμπτωμα. Στο τελικό επίπεδο, όλα τα αποτελέσματα των κόμβων συγχωνεύονται

για να παραχθεί μια συνολική εκτίμηση της κλινικής εικόνας του ασθενούς, επιτρέποντας μια ολιστική αξιολόγηση της πορείας της νόσου.

Στο πλαίσιο αυτό αξιοποιούνται ποικίλα μοντέλα μηχανικής μάθησης, συμπεριλαμβανομένων των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, των τυχαίων δασών και των συστημάτων βασισμένων στη γνώση. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα επιτρέπουν την ανίχνευση περίπλοκων μη γραμμικών συσχετίσεων στα δεδομένα, ενώ τα τυχαία δάση εξασφαλίζουν υψηλή ακρίβεια μέσα από τον συνδυασμό πολλών δέντρων απόφασης. Παράλληλα, τα συστήματα βασισμένα στη γνώση ενσωματώνουν την εμπειρία και τα κριτήρια των ειδικών, μετατρέποντάς τα σε δομημένους κανόνες που μπορούν να εφαρμοστούν αυτόματα κατά την ανάλυση των δεδομένων. Ο συνδυασμός αυτών των μοντέλων προσφέρει ένα ισχυρό και ευέλικτο πλαίσιο για την υποστήριξη της κλινικής λήψης αποφάσεων [60].

Συνολικά, το PD_MENTOR αξιοποιεί προχωρημένες τεχνικές ανάλυσης δεδομένων για να προσφέρει ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης της νόσου του Πάρκινσον. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης και επεξεργασίας μεγάλου όγκου ετερογενών δεδομένων, σε συνδυασμό με την εφαρμογή μοντέλων μηχανικής μάθησης, επιτρέπει την παροχή ακριβών, εξατομικευμένων και έγκαιρων θεραπευτικών κατευθύνσεων, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βελτίωση της ποιότητας φροντίδας και στη βέλτιστη διαχείριση της νόσου.

5.2 Πολλαπλή Συγχώνευση Αισθητήρων

Η πολλαπλή συγχώνευση αισθητήρων αποτελεί μια προηγμένη τεχνική που επιτρέπει τον συνδυασμό δεδομένων από δύο ή περισσότερους αισθητήρες, με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας, της αξιοπιστίας και της πληρότητας των πληροφοριών που συλλέγονται. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στη θεμελιώδη παραδοχή ότι κανένας αισθητήρας από μόνος του δεν μπορεί να αποδώσει μια πλήρως αξιόπιστη και ολοκληρωμένη εικόνα ενός φαινομένου, ειδικά όταν αυτό είναι σύνθετο, δυναμικό και πολυδιάστατο, όπως συμβαίνει με τη νόσο του Πάρκινσον. Η συγχώνευση αισθητήρων αξιοποιείται ήδη ευρέως σε τομείς όπως η ρομποτική, τα αυτόνομα οχήματα, η αεροναυπηγική και η ιατρική τεχνολογία, όπου η υψηλή ακρίβεια και η συνεχής παρακολούθηση κρίσιμων μεταβλητών αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για τη λήψη αποφάσεων.

Στο πλαίσιο της υγειονομικής παρακολούθησης, η πολλαπλή συγχώνευση αισθητήρων αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Η νόσος του Πάρκινσον χαρακτηρίζεται από ένα πολυδιάστατο σύνολο συμπτωμάτων, τόσο κινητικών όσο και μη κινητικών, τα οποία εκδηλώνονται με διαφορετική ένταση και συχνότητα στο καθημερινό περιβάλλον του ασθενούς. Οι αισθητήρες κίνησης, όπως οι αδρανειακές μονάδες μέτρησης (IMUs), οι επιταχυνσιόμετροι και τα γυροσκόπια, καταγράφουν πληροφορίες σχετικές με τη θέση, την επιτάχυνση, τη γωνιακή ταχύτητα και τις μεταβολές στη στάση του σώματος. Παράλληλα, οι βιοαισθητήρες προσφέρουν στοιχεία για τη μυϊκή δραστηριότητα, τη λειτουργία του καρδιακού και αναπνευστικού συστήματος ή ακόμη και τις μεταβολές στα επίπεδα οξυγόνου. Ο συνδυασμός αυτών των δεδομένων δημιουργεί μια πλουσιότερη και πιο λεπτομερή αναπαράσταση της φυσιολογικής και κινητικής κατάστασης του ασθενούς [61].

Η συγχώνευση δεδομένων επιτρέπει όχι μόνο την ολοκληρωμένη αποτύπωση της κινητικής συμπεριφοράς αλλά και την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τα συμπτώματα. Για παράδειγμα, η εμφάνιση του φαινομένου Freezing of Gait (FoG) – ενός εκ των πιο αναπηρικών συμπτωμάτων της PD – μπορεί να αναγνωριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια όταν τα δεδομένα από επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια συνδυαστούν με φυσιολογικούς δείκτες, όπως η καρδιακή συχνότητα ή η ηλεκτρική δραστηριότητα των μυών. Η πολλαπλή συγχώνευση αισθητήρων επιτρέπει την ανίχνευση λεπτών μοτίβων που δεν είναι εμφανή σε ένα μόνο κανάλι δεδομένων, οδηγώντας σε πιο αξιόπιστη αναγνώριση κρίσιμων επεισοδίων και σε ακριβέστερη πρόγνωση.

Επιπλέον, η τεχνική αυτή ενισχύει την εξατομικευμένη παρακολούθηση της υγείας των ασθενών, καθώς επιτρέπει τη δημιουργία προφίλ που αντικατοπτρίζουν όχι μόνο την κινητική λειτουργία αλλά και τη συνολική φυσιολογική κατάσταση. Μέσω συστημάτων πολλαπλής συγχώνευσης, είναι δυνατή η συσχέτιση κινητικών διαταραχών με παράγοντες όπως η κόπωση, το στρες, η ποιότητα του ύπνου και η φαρμακευτική ανταπόκριση. Έτσι, η παρακολούθηση γίνεται πιο στοχευμένη και προσαρμοσμένη στις ανάγκες του κάθε ασθενούς, διευκολύνοντας την έγκαιρη ανίχνευση επιδείνωσης ή την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των θεραπευτικών παρεμβάσεων [62].

Συνολικά, η πολλαπλή συγχώνευση αισθητήρων αποτελεί βασικό εργαλείο στη σύγχρονη τεχνολογική προσέγγιση της νόσου του Πάρκινσον, προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη, ακριβή και αξιόπιστη παρακολούθηση των συμπτωμάτων. Η δυνατότητα συνδυασμού διαφορετικών ειδών δεδομένων δημιουργεί ένα πιο ισχυρό πλαίσιο αξιολόγησης, το οποίο συμβάλλει καθοριστικά στη βελτίωση της διάγνωσης, στην εξατομίκευση των θεραπευτικών αποφάσεων και στη συνολική ενίσχυση της ποιότητας ζωής των ασθενών.

5.3 Σύγκριση Διαφορετικών Τεχνολογικών Προσεγγίσεων με Χρήση Αισθητήρων

Η ταχεία εξέλιξη των τεχνολογιών αισθητήρων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλαπλών συστημάτων παρακολούθησης για τη νόσο του Πάρκινσον, καθένα από τα οποία αξιοποιεί διαφορετικού τύπου αισθητήρες, μεθόδους ανάλυσης και επίπεδα πολυπλοκότητας. Η σύγκριση αυτών των προσεγγίσεων είναι απαραίτητη για την κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους, καθώς και για την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου ανάλογα με τη χρήση, το περιβάλλον και τις ανάγκες του ασθενούς.

Οι αδρανειακοί αισθητήρες, όπως τα επιταχυνσιόμετρα και τα γυροσκόπια, αποτελούν την πιο διαδεδομένη και προσιτή τεχνολογία για την παρακολούθηση κινητικών συμπτωμάτων. Παρέχουν υψηλής ανάλυσης δεδομένα σχετικά με το βάδισμα, τον τρόμο, τη βραδυκινησία και τις διακυμάνσεις της κινητικότητας, ενώ μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε φορητές συσκευές όπως smartwatches ή κινητά τηλέφωνα. Η ακρίβειά τους είναι υψηλή για την ανίχνευση μοτίβων κίνησης, ωστόσο περιορίζονται από την ευαισθησία τους σε εξωτερικούς θορύβους και από τη δυσκολία διάκρισης μεταξύ ορισμένων συμπτωμάτων, όπως η δυσκινησία και η φυσιολογική δραστηριότητα.

Οι ηλεκτροφυσιολογικοί αισθητήρες, όπως το EMG και το EEG, παρέχουν πιο εξειδικευμένα δεδομένα, καταγράφοντας άμεσα τη μυϊκή και εγκεφαλική δραστηριότητα. Το EMG είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην ανάλυση δυσκινησιών και στην καταγραφή της μυϊκής λειτουργίας, προσφέροντας υψηλή διακριτική ικανότητα για κινητικά επεισόδια που δεν αποτυπώνονται εύκολα από αδρανειακούς αισθητήρες. Παρόλα αυτά, απαιτεί σωστή τοποθέτηση ηλεκτροδίων

και είναι πιο ευαίσθητο σε ηλεκτρικό θόρυβο και τεχνουργήματα. Το EEG, από την άλλη, συμβάλλει στην κατανόηση της νευρωνικής δραστηριότητας που σχετίζεται με συμπτώματα όπως το FoG και η βραδυκινησία, αλλά απαιτεί πιο σύνθετες διαδικασίες εγκατάστασης και εξειδικευμένη ανάλυση σημάτων.

Οι οπτικοί αισθητήρες και τα συστήματα τρισδιάστατης ανάλυσης κίνησης προσφέρουν πολύ υψηλή ακρίβεια στην καταγραφή κινητικών μοτίβων, καθιστώντας τα ιδανικά για εργαστηριακές ή κλινικές αξιολογήσεις. Επιτρέπουν λεπτομερείς μετρήσεις της στάσης, της βάδισης και του τρόμου, παρέχοντας δεδομένα που συχνά λειτουργούν ως «χρυσό πρότυπο». Ωστόσο, η χρήση τους είναι περιορισμένη σε πραγματικές συνθήκες, λόγω του κόστους, της ανάγκης εξειδικευμένου εξοπλισμού και της έλλειψης φορητότητας.

Παράλληλα, η ανάπτυξη πολυτροπικών συστημάτων συγχώνευσης αισθητήρων συνδυάζει τα πλεονεκτήματα διαφορετικών τεχνολογιών, επιτρέποντας τη δημιουργία ολοκληρωμένων προφίλ κινητικότητας και φυσιολογικής κατάστασης. Αυτές οι υβριδικές προσεγγίσεις βελτιώνουν την ακρίβεια των μετρήσεων, μειώνουν την αβεβαιότητα και επιτρέπουν την παρακολούθηση πολύπλοκων συμπτωμάτων όπως το FoG, μέσω ταυτόχρονης αξιολόγησης πολλών παραμέτρων. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα στην επεξεργασία των δεδομένων και η ανάγκη για προηγμένους αλγορίθμους ανάλυσης.

Συνολικά, η επιλογή της ιδανικής τεχνολογικής προσέγγισης εξαρτάται από το σκοπό της παρακολούθησης, τις δυνατότητες του συστήματος και τις ανάγκες του ασθενούς. Οι αδρανειακοί αισθητήρες είναι κατάλληλοι για καθημερινή, συνεχόμενη παρακολούθηση, οι ηλεκτροφυσιολογικοί για εξειδικευμένη ανάλυση μυϊκής ή νευρωνικής δραστηριότητας, ενώ τα οπτικά συστήματα για κλινικά περιβάλλοντα υψηλής ακρίβειας. Η πολλαπλή συγχώνευση αισθητήρων αναδεικνύεται ως η πιο ολοκληρωμένη λύση, καθώς προσφέρει υψηλή ακρίβεια, πολυδιάστατη αποτύπωση της κατάστασης του ασθενούς και μεγάλη δυνατότητα εξατομίκευσης των θεραπευτικών αποφάσεων.

5.3.1 Εκτίμηση Συμπτωμάτων PD-Τρόμος και Βραδυκινησία

Η ακριβής και αντικειμενική εκτίμηση του τρόμου και της βραδυκινησίας αποτελεί θεμελιώδη στόχο στη μελέτη της νόσου του Πάρκινσον, καθώς τα δύο αυτά

συμπτώματα αντανακλούν βασικές δυσλειτουργίες του κινητικού συστήματος και συμβάλλουν καθοριστικά στη σταδιοποίηση και στη θεραπευτική διαχείριση της νόσου. Η εργασία των Arash et al. αποτελεί σημαντική συμβολή στον τομέα αυτό, καθώς προτείνει συστήματα ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης κινητικών συμπτωμάτων βασισμένα στη χρήση φορητών αισθητήρων υψηλής ακρίβειας.

Στην πρώτη μελέτη των ερευνητών, χρησιμοποιήθηκαν τρία μονοαξονικά γυροσκόπια για την καταγραφή της γωνιακής ταχύτητας του αντιβραχίου σε τρεις άξονες κίνησης. Συνολικά συμμετείχαν 10 άτομα με Πάρκινσον και 10 υγιή άτομα, τα οποία εκτέλεσαν τυπικές καθημερινές δραστηριότητες, προκειμένου να καταγραφούν αντιπροσωπευτικά δείγματα κινήσεων. Σε δεύτερη φάση, πραγματοποιήθηκε συνεχής παρακολούθηση σε πραγματικές συνθήκες ζωής, όπου οι κινήσεις του άνω άκρου έντεκα ασθενών καταγράφηκαν για αρκετές ώρες. Το σύστημα χρησιμοποιούσε φορητή συσκευή με υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας και υψηλή ανάλυση, επιτρέποντας λεπτομερή ανάλυση των σημάτων και ακριβή αποτύπωση των κινητικών διαταραχών.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την ανίχνευση του τρόμου και της βραδυκινησίας επικυρώθηκε μέσω σύγκρισης με βιντεοσκοπημένες αναλύσεις, παρουσιάζοντας εξαιρετικά υψηλά ποσοστά ευαισθησίας και ειδικότητας. Η σημαντική συσχέτιση των παραμέτρων που εξήχθησαν από τα γυροσκόπια με τις αντίστοιχες υποβαθμολογίες της UPDRS ενίσχυσε περαιτέρω την εγκυρότητα της μεθοδολογίας. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι συσχετίσεις παρέμειναν ισχυρές μετά την αφαίρεση της επίδρασης των ON/OFF κινητικών φάσεων μέσω μερικής συσχέτισης, υποδηλώνοντας ότι το σύστημα μπορεί να αποτυπώσει με ακρίβεια τη βαρύτητα των συμπτωμάτων ανεξάρτητα από τη φαρμακευτική κατάσταση [63].

Σε δεύτερη εργασία, οι ίδιοι ερευνητές επέκτειναν τη μέθοδό τους παρουσιάζοντας ένα φορητό σύστημα παρακολούθησης φυσικών δραστηριοτήτων σε άτομα με Πάρκινσον, το οποίο συνδύαζε ένα γυροσκόπιο και δύο επιταχυνσιόμετρα. Η μελέτη περιλάμβανε άτομα με Πάρκινσον που υποβάλλονταν σε θεραπεία εν τω βάθει εγκεφαλικής διέγερσης (STN-DBS) και υγιείς συμμετέχοντες, επιτρέποντας τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών κινητικών προφίλ. Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν ταξινόμησαν με υψηλή ακρίβεια βασικές δραστηριότητες, όπως το

περπάτημα, το κάθισμα και την όρθια στάση, ενώ κατάφεραν να ανιχνεύσουν μεταβάσεις μεταξύ καθιστής και όρθιας θέσης με ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά αξιοπιστίας. Η ανάλυση των παραμέτρων που εξήχθησαν από τις μεταβάσεις αποκάλυψε σαφείς διαφορές μεταξύ ασθενών με και χωρίς ενεργοποιημένο STN-DBS, υποδεικνύοντας ότι η μέθοδος μπορεί να αξιοποιηθεί για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της θεραπείας.

Και στις δύο μελέτες, η χρήση πολλαπλών αισθητήρων συνέβαλε σημαντικά στη βελτίωση της ακρίβειας και της πληρότητας των αποτελεσμάτων. Η συγχώνευση δεδομένων από γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα παρείχε πλουσιότερες πληροφορίες σε σχέση με τη χρήση ενός μόνο αισθητήρα, καθιστώντας δυνατή την αναγνώριση λεπτών κινητικών αποκλίσεων και σύνθετων μοτίβων κίνησης. Η προσέγγιση αυτή υπογραμμίζει τη σημασία της πολυτροπικής ανάλυσης στη σύγχρονη παρακολούθηση της νόσου του Πάρκινσον και αναδεικνύει ότι η ενσωμάτωση διαφορετικών καναλιών πληροφορίας αποτελεί κρίσιμο βήμα προς την ανάπτυξη αξιόπιστων και εξατομικευμένων εργαλείων παρακολούθησης.

Συνολικά, οι μελέτες των Arash et al. αποδεικνύουν ότι η χρήση φορητών αισθητήρων αποτελεί ένα ισχυρό και αποτελεσματικό μέσο για τη λεπτομερή καταγραφή και ποσοτικοποίηση βασικών κινητικών συμπτωμάτων της PD. Η υψηλή ακρίβεια, η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης και η συμβατότητα με καθημερινές δραστηριότητες καθιστούν αυτές τις προσεγγίσεις ιδιαιτέρως αξιόλογες για την εξέλιξη σύγχρονων συστημάτων παρακολούθησης της νόσου.

5.3.2 Ανίχνευση Προκαλούμενης Δυσκινησίας με Λεβοντόπα (LID) σε PD

Η δυσκινησία που προκαλείται από τη λεβοντόπα (Levodopa-Induced Dyskinesia – LID) αποτελεί μία από τις πιο συχνές και εξουθενωτικές κινητικές επιπλοκές της φαρμακευτικής θεραπείας στη Νόσο του Πάρκινσον. Η εμφάνισή της σχετίζεται με τη μακροχρόνια χρήση ντοπαμινεργικών φαρμάκων και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα ζωής των ασθενών, καθιστώντας αναγκαία την ανάπτυξη αξιόπιστων μεθόδων ανίχνευσης, παρακολούθησης και ποσοτικοποίησής της. Σε αυτό το πλαίσιο, οι μελέτες των Keijsers et al. αποτελούν σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση της αντικειμενικής αξιολόγησης της LID μέσω φορητών αισθητήρων και τεχνικών μηχανικής μάθησης.

Στην πρώτη έρευνα, οι ερευνητές διερεύνησαν τη δυνατότητα χρήσης νευρωνικών δικτύων για τη διάκριση της δυσκινησίας από τις εκούσιες κινήσεις σε συνθήκες πραγματικής ζωής. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν έξι τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα τοποθετημένα σε διαφορετικά μέρη του σώματος, επιτρέποντας την πολύπλευρη καταγραφή της κινητικής συμπεριφοράς. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν σε οικιακό περιβάλλον με συχνότητα 64 Hz, παρέχοντας μια αντιπροσωπευτική εικόνα της καθημερινής κινητικής δραστηριότητας των ασθενών. Το νευρωνικό δίκτυο τύπου MLP εκπαιδεύτηκε πάνω στα χαρακτηριστικά που εξήχθησαν από τα σήματα των επιταχυνσιομέτρων και στη συνέχεια αξιολογήθηκε σε σύγκριση με τις κλινικές βαθμολογίες AIMS και βιντεοσκοπημένες αξιολογήσεις από νευρολόγους. Τα αποτελέσματα έδειξαν πολύ υψηλή ακρίβεια αναγνώρισης της δυσκινησίας, με ποσοστά επιτυχίας που ξεπέρασαν το 93% για το χέρι, το 99% για τον κορμό και το 97% για το πόδι.

Η δεύτερη μελέτη των Keijsers et al. επικεντρώθηκε στην περαιτέρω βελτιστοποίηση της ανάλυσης της LID, εξετάζοντας τη συμβολή των επιμέρους χαρακτηριστικών και τον ρόλο της προεπεξεργασίας των δεδομένων. Οι ερευνητές διερεύνησαν τη σοβαρότητα της δυσκινησίας σε κάθε μέρος του σώματος ανεξάρτητα, αναγνωρίζοντας ότι τα μοτίβα της κίνησης ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με την περιοχή. Διαπιστώθηκε ότι ο χρόνος ενεργοποίησης της δυσκινησίας στον κορμό και στα κάτω άκρα αποτελεί κρίσιμη παράμετρο, ενώ επιπλέον μεταβλητές, όπως η κινητικότητα του καρπού ή οι αλλαγές στη στάση, παρείχαν σημαντική πληροφορία για την ανίχνευση και κατηγοριοποίηση του φαινομένου. Η προσέγγιση με διαδοχικά νευρωνικά δίκτυα —όπου κάθε επίπεδο επεξεργάζεται διαφορετικές όψεις της κίνησης— ενίσχυσε περαιτέρω την ακρίβεια της εκτίμησης [64].

Συνολικά, οι δύο μελέτες καταδεικνύουν ότι τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούν μια αποτελεσματική μέθοδο για την ανάλυση της LID, επιτρέποντας την αντικειμενική, λεπτομερή και αυτοματοποιημένη αξιολόγηση των κινητικών επιπλοκών της φαρμακευτικής θεραπείας. Η δυνατότητα χρήσης των συστημάτων αυτών σε καθημερινές συνθήκες ζωής καθιστά την προσέγγιση ιδιαίτερα ελκυστική, καθώς ξεπερνά τους περιορισμούς της κλινικής παρατήρησης, η οποία περιορίζεται χρονικά και δεν αποτυπώνει την πραγματική συχνότητα ή ένταση των επεισοδίων.

Παράλληλα, η έρευνα υπογραμμίζει τη σημασία της πολλαπλής συγχώνευσης αισθητήρων, καθώς η συνδυαστική χρήση επιταχυνσιομέτρων και άλλων βιοαισθητήρων μπορεί να προσφέρει ακόμη πιο ακριβή αποτύπωση της κινητικής συμπεριφοράς. Η ολοκληρωμένη ανάλυση που προκύπτει από πολυαισθητηριακά συστήματα καθίσταται ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρακολούθηση ενός συνδρόμου τόσο πολυπαραγοντικού όσο η LID, και συμβάλλει ουσιαστικά στην ανάπτυξη φορητών, real-time συστημάτων υποστήριξης της θεραπευτικής διαδικασίας.

5.3.3 Εκτίμηση της Σοβαρότητας των Συμπτωμάτων της PD-τρόμος, Βραδυκινησία και Δυσκινησία

Η αντικειμενική αξιολόγηση της σοβαρότητας των κύριων κινητικών συμπτωμάτων της Νόσου του Πάρκινσον —του τρόμου, της βραδυκινησίας και της δυσκινησίας— αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την παρακολούθηση της εξέλιξης της νόσου και τη βέλτιστη προσαρμογή της θεραπείας. Στο πλαίσιο αυτό, η μελέτη των Patel et al. διερεύνησε τη δυνατότητα χρήσης φορητών αισθητήρων και τεχνικών μηχανικής μάθησης για την ποσοτικοποίηση αυτών των συμπτωμάτων με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τις παραδοσιακές κλινικές μεθόδους.

Η ερευνητική ομάδα χρησιμοποίησε δεδομένα από επιταχυνσιόμετρα που τοποθετήθηκαν στους ασθενείς, οι οποίοι κλήθηκαν να εκτελέσουν συγκεκριμένες κινητικές εργασίες από την κλίμακα UPDRS. Το σύνολο των συμμετεχόντων περιλάμβανε 12 ασθενείς σε ενδιάμεσα στάδια της νόσου (Hoehn & Yahr 2–3), ώστε να διασφαλιστεί η καταγραφή ποικιλομορφίας κινητικών συμπτωμάτων. Τα δεδομένα από τους αισθητήρες συγκρίθηκαν με τις κλινικές βαθμολογίες που προέκυπταν από οπτική αξιολόγηση βιντεοσκοπημένου υλικού, λειτουργώντας ως σημείο αναφοράς για την επικύρωση των αλγορίθμων.

Για την ανάλυση και ταξινόμηση των συμπτωμάτων χρησιμοποιήθηκε SVM ταξινομητής, με την έρευνα να επικεντρώνεται στην επιλογή του βέλτιστου πυρήνα και στην επίδραση διαφορετικών παραμέτρων προεπεξεργασίας. Οι Patel et al. εξέτασαν πολλαπλές μορφές SVM (linear, RBF, polynomial), καθώς και διαφορετικά μήκη παραθύρων ανάλυσης, ώστε να εντοπίσουν τον συνδυασμό που προσφέρει την υψηλότερη ακρίβεια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι παράθυρο μήκους 5 δευτερολέπτων προσέφερε την καλύτερη ισορροπία μεταξύ ευαισθησίας

και ακρίβειας ταξινόμησης, ενώ ο πολυωνυμικός πυρήνας 3ης τάξης εμφάνισε το χαμηλότερο ποσοστό εσφαλμένων ταξινομήσεων.

Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η ανάλυση των χαρακτηριστικών του σήματος. Τα χαρακτηριστικά rms, το εύρος των δεδομένων και η εντροπία αποδείχθηκαν ιδιαίτερα αποτελεσματικά για την εκτίμηση της σοβαρότητας των συμπτωμάτων. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι ο συνδυασμός αυτών των παραμέτρων επέτρεψε στο σύστημα να διακρίνει με αξιοπιστία τα επίπεδα τρόμου, βραδυκινησίας και δυσκινησίας, προσεγγίζοντας τις κλινικές βαθμολογίες των ειδικών με υψηλή συμφωνία [65].

Η μελέτη καταδεικνύει τη δυναμική των φορετών αισθητήρων σε συνδυασμό με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για την αντικειμενική και αυτοματοποιημένη αξιολόγηση της PD. Παρά την αποτελεσματικότητα της χρήσης ενός μόνο αισθητήρα, οι ερευνητές επισημαίνουν ότι η πολυτροπική προσέγγιση —με συνδυασμό επιταχυνσιομέτρων, γυροσκοπίων και ηλεκτροφυσιολογικών σημάτων— μπορεί να προσφέρει ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια και αντοχή στις μετρήσεις, καθιστώντας την προσέγγιση καταλληλότερη για χρήση σε πραγματικές συνθήκες καθημερινής ζωής.

Συνολικά, η συμβολή της μελέτης των Patel et al. είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αποδεικνύει πως η τεχνολογία των αισθητήρων, σε συνδυασμό με προηγμένες τεχνικές ανάλυσης, μπορεί να αποτελέσει ισχυρό εργαλείο στη σύγχρονη διαχείριση της Νόσου του Πάρκινσον, προσφέροντας ακριβέστερη, συνεχή και εξατομικευμένη αξιολόγηση των κινητικών συμπτωμάτων.

5.3.4 Σύστημα Παρακολούθησης PWP Home με Χρήση Εφαρμογής που Βασίζεται στο Web

Η πρόοδος της τηλεϊατρικής και των φορετών αισθητήρων έχει δημιουργήσει νέες δυνατότητες για συνεχή, απομακρυσμένη παρακολούθηση των ασθενών με Νόσο του Πάρκινσον (PWP), ιδιαίτερα εκείνων που παρουσιάζουν σοβαρές κινητικές διακυμάνσεις. Στο πλαίσιο αυτό, οι Patel et al. ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης στο σπίτι, σχεδιασμένο για να καταγράφει σε πραγματικό χρόνο τις κινητικές λειτουργίες των ασθενών και να επιτρέπει άμεση αλληλεπίδραση με τους κλινικούς ιατρούς.

Το σύστημα αποτελείται από τρεις βασικές υποδομές:

- **τον κεντρικό διακομιστή**, ο οποίος αναλαμβάνει τη διαχείριση, αποθήκευση και ασφάλεια των δεδομένων,
- **τον σταθμό εργασίας του ασθενούς**, που λειτουργεί ως τοπική μονάδα επεξεργασίας και αποστολής δεδομένων μέσω ενός ασύρματου φορετού αισθητήρα, και
- **τον σταθμό εργασίας του κλινικού ιατρού**, που παρέχει πρόσβαση στα δεδομένα και υποστηρίζει επικοινωνία μέσω βιντεοδιάσκεψης.

Η διαδικτυακή εφαρμογή *MercuryLive*, η οποία αποτελεί τον πυρήνα του συστήματος, επιτρέπει την απρόσκοπτη μετάδοση των δεδομένων κίνησης από το σπίτι του ασθενούς προς την κλινική μονάδα. Χάρη στην ασύρματη φορητή συσκευή συλλογής δεδομένων, οι κινήσεις του ασθενούς καταγράφονται σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την ανάλυση κρίσιμων παραμέτρων, όπως η ένταση των δυσκινησιών, η συχνότητα των επεισοδίων OFF και η γενική κινητική απόδοση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Με αυτό τον τρόπο, οι ιατροί αποκτούν πρόσβαση σε πολύτιμες πληροφορίες που δεν είναι συνήθως διαθέσιμες κατά τη διάρκεια των σύντομων κλινικών επισκέψεων [66].

Η αξιολόγηση του MercuryLive από τους Chen et al. επικεντρώθηκε στην τεχνική απόδοση του συστήματος και στην καταλληλότητά του για οικιακή χρήση. Μετρήθηκαν οι καθυστερήσεις στη μετάδοση δεδομένων, οι απαιτήσεις εύρους ζώνης και η συνολική σταθερότητα της πλατφόρμας. Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά: η καθυστέρηση παρέμεινε κάτω από 400 ms για τα δεδομένα αισθητήρων, ενώ η καθυστέρηση μετάδοσης βίντεο ήταν περίπου 200 ms, με ρυθμό ανανέωσης 13 καρέ/δευτερόλεπτο σε εύρος ζώνης 800 kb/s. Αυτές οι επιδόσεις καθιστούν το σύστημα κατάλληλο για συνεχή, αξιόπιστη παρακολούθηση ασθενών στο οικιακό περιβάλλον.

Παρά τα πλεονεκτήματα του MercuryLive ως πλατφόρμα τηλεϊατρικής, η χρήση μονοαισθητήριων δεδομένων περιορίζει την ικανότητά του να καταγράφει πλήρως τις πολυδιάστατες κινητικές εκδηλώσεις της PD. Σε αντίθεση, η πολλαπλή συγχώνευση αισθητήρων μπορεί να παρέχει πολύ πιο ολοκληρωμένη και ακριβή εικόνα, συνδυάζοντας δεδομένα από επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια,

ηλεκτροφυσιολογικούς αισθητήρες και άλλες πηγές. Ωστόσο, αυτή η πολυπλοκότητα απαιτεί υψηλότερη υπολογιστική ισχύ, πιο εξελιγμένους αλγορίθμους και μεγαλύτερη επεξεργαστική υποδομή [67].

Έτσι, η βέλτιστη κατεύθυνση για μελλοντική ανάπτυξη θα ήταν η δημιουργία υβριδικών συστημάτων που συνδυάζουν τη λειτουργικότητα της τηλεϊατρικής — όπως αυτή που παρέχει το MercuryLive— με την αυξημένη ακρίβεια και την πολυτροπική ανάλυση δεδομένων από πολλαπλούς αισθητήρες. Μια τέτοια λύση θα μπορούσε να προσφέρει πραγματικά ολοκληρωμένη και εξατομικευμένη διαχείριση της Νόσου του Πάρκινσον, επιτρέποντας στους κλινικούς να λαμβάνουν αποφάσεις βασισμένες σε πλήρεις και αξιόπιστες πληροφορίες, ενώ ταυτόχρονα θα βελτίωνε τη δυνατότητα παρακολούθησης των ασθενών στο φυσικό τους περιβάλλον.

5.3.5. Εκτίμηση Διαταραχής Βάδισης σε Π.Δ

Η βάδιση αποτελεί μία από τις πλέον διαταραγμένες κινητικές λειτουργίες στη Νόσο του Πάρκινσον (PD), επηρεάζοντας σημαντικά την αυτονομία των ασθενών και αυξάνοντας τον κίνδυνο πτώσεων. Για τον λόγο αυτό, η ακριβής ανάλυση των χαρακτηριστικών βάδισης έχει ιδιαίτερη σημασία για την αξιολόγηση της εξέλιξης της νόσου και την προσαρμογή της θεραπευτικής αγωγής. Η μελέτη των Cancela et al. προσέφερε αξιοσημείωτη συμβολή προς αυτή την κατεύθυνση, διερευνώντας τη χρήση φορετών αισθητήρων για την ποσοτική καταγραφή και αξιολόγηση της βάδισης σε PWP.

Συγκεκριμένα, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν πέντε τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα, τοποθετημένα σε κρίσιμα σημεία του σώματος (π.χ. καρποί, αστράγαλοι, λεκάνη), επιτρέποντας τη λεπτομερή καταγραφή χωροχρονικών και δυναμικών χαρακτηριστικών της βάδισης. Η ανάλυση επικεντρώθηκε σε χαρακτηριστικά όπως η εντροπία του σήματος, η ταλάντευση των βραχιόνων, οι αλλαγές στον ρυθμό βηματισμού και άλλες παραμέτρους που συχνά επηρεάζονται αρνητικά στη PD. Η εντροπία, ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης μη κανονικότητας της βάδισης, καθώς η Νόσος του Πάρκινσον συχνά προκαλεί απώλεια του φυσιολογικού ρυθμού και της ομαλότητας στην εκτέλεση των κινήσεων.

Τα αποτελέσματα της έρευνας ανέδειξαν τη χρησιμότητα αυτών των χαρακτηριστικών για την ποσοτική εκτίμηση της βλάβης στη βάδιση και την

παρακολούθηση της επίδρασης φαρμακευτικών παρεμβάσεων (όπως η λεβοντόπα). Η προσέγγιση αυτή προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών κλινικών αξιολογήσεων, καθώς επιτρέπει την παρακολούθηση σε πραγματικές συνθήκες και την αντικειμενική καταγραφή ακόμη και μικρών μεταβολών στην κινητική απόδοση.

Ωστόσο, η χρήση μεμονωμένων δεικτών και η εξάρτηση αποκλειστικά από επιταχυνσιομετρικά δεδομένα περιορίζουν την πληρότητα της αξιολόγησης. Η βάδιση στη PD είναι ένα πολυδιάστατο φαινόμενο, επηρεαζόμενο από πολλαπλά κινητικά και φυσιολογικά συστήματα, όπως η ισορροπία, ο έλεγχος στάσης, η μυϊκή ενεργοποίηση και η νευρωνική λειτουργία. Έτσι, ενώ η μελέτη των Cancela et al. προσφέρει σημαντική πρόοδο στη φορητή παρακολούθηση βάδισης, δεν μπορεί να αποτυπώσει με ακρίβεια όλες τις πτυχές των κινητικών διαταραχών [68].

Η πολλαπλή συγχώνευση αισθητήρων (sensor fusion) υπερβαίνει αυτά τα όρια, συνδυάζοντας δεδομένα από επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια, ηλεκτρομυογράφους (EMG), πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και άλλες τεχνολογίες. Με αυτό τον τρόπο, παρέχεται μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της κινητικής λειτουργίας, εντοπίζοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια φαινόμενα όπως το Freezing of Gait, η αστάθεια ισορροπίας και οι διακυμάνσεις στη μυϊκή ενεργοποίηση. Η συγχώνευση δεδομένων καθιστά δυνατή την ανάπτυξη πιο αξιόπιστων αλγορίθμων ανίχνευσης και αξιολόγησης των συμπτωμάτων, βελτιώνοντας τόσο την κλινική παρακολούθηση όσο και την εξατομικευμένη διαχείριση της νόσου.

Συνολικά, η έρευνα των Cancela et al. αποτελεί σημαντικό βήμα στην αξιοποίηση φορετών συσκευών για την παρακολούθηση της βάδισης στη PD, ωστόσο η εξέλιξη προς πολυαισθητηριακές προσεγγίσεις αποτελεί το επόμενο κρίσιμο στάδιο για την επίτευξη ολοκληρωμένης και ακριβούς αξιολόγησης της κινητικής δυσλειτουργίας.

5.3.6 Ανίχνευση Κινητικών Αυμπτωμάτων PD: Μη Ελεγχόμενο Οικιακό Περιβάλλον

Η ανίχνευση των κινητικών συμπτωμάτων της Νόσου του Πάρκινσον (PD) σε πραγματικές συνθήκες καθημερινής ζωής αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στη σύγχρονη έρευνα. Οι ασθενείς παρουσιάζουν διακυμάνσεις στην κινητικότητά τους καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, οι οποίες δεν είναι πάντοτε

εύκολο να καταγραφούν με παραδοσιακές κλινικές μεθόδους ή ακόμη και με κοινά συστήματα φορητών αισθητήρων. Σε αυτό το πλαίσιο, η μελέτη των Samargit Das et al. εισάγει μια καινοτόμο, ευέλικτη και πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την αυτόματη αναγνώριση κινητικών συμπτωμάτων σε μη ελεγχόμενα περιβάλλοντα, όπου η συμπεριφορά του ασθενούς δεν περιορίζεται από εργαστηριακές συνθήκες.

Στην έρευνα εφαρμόστηκε ένα ασθενώς εποπτευόμενο μαθησιακό πλαίσιο, βασισμένο στη μέθοδο Multiple Instance Learning (MIL). Σε αντίθεση με τις κλασικές εποπτευόμενες τεχνικές, που απαιτούν ακριβή και λεπτομερή επισημείωση των δεδομένων (labeling) για κάθε χρονική στιγμή, το MIL επιτρέπει την εκπαίδευση του μοντέλου με ελάχιστες πληροφορίες. Η βασική ιδέα είναι ότι τα δεδομένα οργανώνονται σε ομάδες (bags), οι οποίες χαρακτηρίζονται συνολικά ως θετικές ή αρνητικές, χωρίς να είναι γνωστό ποιες επιμέρους στιγμές ή τμήματα του σήματος αντιστοιχούν πραγματικά στην εμφάνιση του συμπτώματος. Έτσι, το μοντέλο μπορεί να μάθει να εντοπίζει πρότυπα που σχετίζονται με συμπτώματα όπως τρόμος, δυσκινησία ή βραδυκινησία, ακόμη και χωρίς ακριβείς επισημάνσεις.

Για τη συλλογή δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν πέντε τρισδιάστατα επιταχυνσιόμετρα, τοποθετημένα σε διαφορετικά σημεία του σώματος, προκειμένου να αποτυπωθούν πλήθος κινηματικών πληροφοριών. Τα χαρακτηριστικά που εξήχθησαν περιλάμβαναν παραμέτρους συχνοτικού και ενεργειακού περιεχομένου, όπως το ενεργειακό περιεχόμενο υψηλής συχνότητας και το ιστόγραμμα του πεδίου συχνότητας, τα οποία έχουν αποδειχθεί χρήσιμα για την αναγνώριση κινητικών διαταραχών στη PD.

Η μελέτη εισήγαγε την παραλλαγή ID-APR του αλγορίθμου Aggregated Probability Ranking (APR), ο οποίος συνδυάζει πλεονεκτήματα από την τυπική και την επεκταμένη εκδοχή του APR. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιήθηκε για τη βελτίωση της απόδοσης στην ταξινόμηση των κινητικών συμπτωμάτων εντός μη ελεγχόμενων δεδομένων. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης έδειξαν ότι ο ID-APR ξεπέρασε προηγμένες MIL μεθόδους όπως MI-SVM και KNN, επιτυγχάνοντας ακρίβεια άνω του 90%, καθιστώντας τον ιδιαίτερα αποτελεσματικό για χρήση σε περιβάλλοντα οικιακής παρακολούθησης.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών συστημάτων που βασίζονται αποκλειστικά στην πολλαπλή συγχώνευση αισθητήρων. Η MIL μεθοδολογία μειώνει δραστικά τις απαιτήσεις για επισημασμένα δεδομένα, καθιστώντας την ιδανική για μακροχρόνια παρακολούθηση σε πραγματικές συνθήκες, όπου τα κλινικά labels είναι δύσκολο ή αδύνατο να συλλεχθούν. Παράλληλα, επιτρέπει την ευέλικτη ανίχνευση κινητικών επεισοδίων ακόμη και όταν οι δραστηριότητες του ασθενούς ποικίλλουν και δεν είναι προκαθορισμένες [69].

Ωστόσο, η MIL προσέγγιση δεν υποκαθιστά πλήρως τα συστήματα πολλαπλής συγχώνευσης αισθητήρων, τα οποία επιτρέπουν την ολοκληρωμένη καταγραφή της κινητικότητας, αξιοποιώντας δεδομένα από διαφορετικούς τύπους βιοαισθητήρων (π.χ. EMG, IMU, πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες). Ενώ η MIL προσφέρει μεγάλη ευκολία εφαρμογής και υψηλή ευχρηστία, η πολυαισθητηριακή συγχώνευση παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια και πληρότητα στη λεπτομερή χαρτογράφηση των συμπτωμάτων.

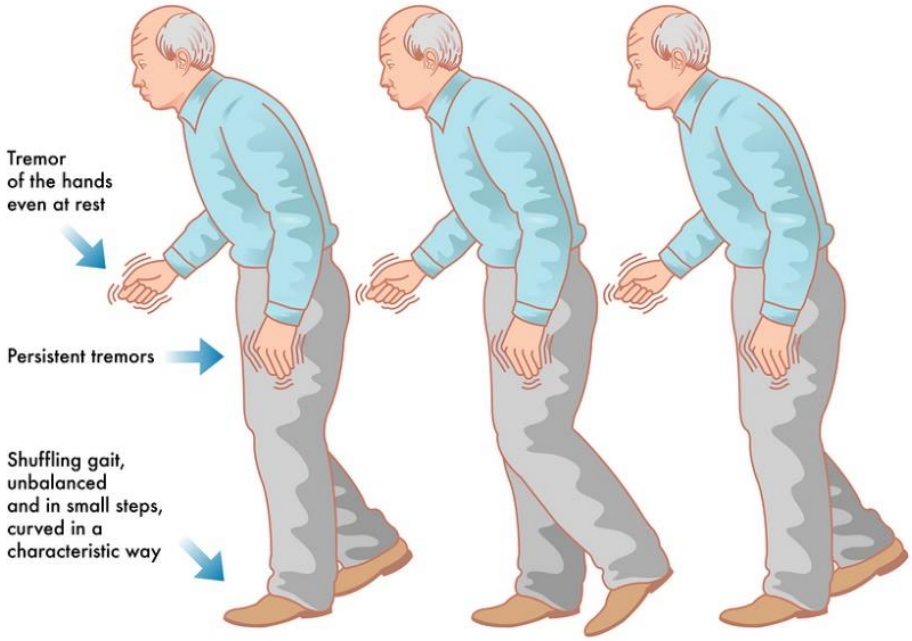
Συνολικά, η εργασία των Samargit Das et al. καταδεικνύει ότι η ασθενώς εποπτευόμενη μάθηση αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς πιο ευέλικτες, εφαρμόσιμες και οικονομικά αποδοτικές λύσεις για την καθημερινή παρακολούθηση των ασθενών με PD, ενισχύοντας τις δυνατότητες της ψηφιακής υγείας και της απομακρυσμένης φροντίδας.

5.3.7 Παρακολούθηση Τρόμου Χεριού PD

Ο τρόμος χεριού αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά και συχνά εμφανιζόμενα κινητικά συμπτώματα της Νόσου του Πάρκινσον (PD), επηρεάζοντας σημαντικά την καθημερινή λειτουργικότητα των ασθενών. Η ανάπτυξη φορητών συστημάτων για την αξιόπιστη παρακολούθησή του έχει καταστεί ιδιαίτερα σημαντική, τόσο για την κλινική αξιολόγηση όσο και για την απομακρυσμένη παρακολούθηση σε πραγματικές συνθήκες. Σε αυτό το πλαίσιο, η έρευνα των LeMoyne et al. προσέφερε μια από τις πρώιμες και πιο ουσιαστικές εφαρμογές της χρήσης ασύρματων επιταχυνσιόμετρων για την ποσοτική καταγραφή του τρόμου χεριού.

Το πειραματικό σύστημα που αναπτύχθηκε περιλάμβανε δύο κόμβους επιταχυνσιόμετρων: ο ένας τοποθετήθηκε σε σταθερή θέση ώστε να λειτουργεί ως

σημείο αναφοράς, ενώ ο δεύτερος στερεώθηκε πάνω σε γάντι το οποίο φορούσε ο ασθενής. Αυτό επέτρεψε την καταγραφή της επιτάχυνσης του χεριού κατά την εκδήλωση τρόμου, σε αντιδιαστολή με ένα στατικό περιβάλλον χωρίς κίνηση. Με αυτόν τον τρόπο, οι ερευνητές μπόρεσαν να απομονώσουν τη συχνοτική και χρονική συμπεριφορά του τρόμου, αναλύοντας τις κυματομορφές της επιτάχυνσης για να εντοπίσουν πρότυπα που σχετίζονται με τη σοβαρότητα και τη συχνότητα του συμπτώματος.



Εικόνα 15: Παρακολούθηση Τρόμου

Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων επιβεβαίωσε ότι υπήρχαν σαφείς και σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα σήματα του τρόμου και στα σήματα στατικής θέσης, αναδεικνύοντας την υψηλή ευαισθησία του συστήματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ακόμη και με μια σχετικά απλή διάταξη βασισμένη σε δύο επιταχυνσιόμετρα, είναι δυνατή η αξιόπιστη ανίχνευση του τρόμου χεριού, με τη μέθοδο να παρουσιάζει υψηλή επαναληψιμότητα και ακρίβεια.

Παρά τα θετικά αποτελέσματα, η συγκεκριμένη προσέγγιση παραμένει μονοαισθητηριακή και επικεντρώνει αποκλειστικά στην καταγραφή των κινητικών πληροφοριών από το χέρι. Αυτό αποτελεί έναν σημαντικό περιορισμό, καθώς η PD συχνά επηρεάζει πολλαπλά μέρη του σώματος και εκδηλώνει συμπτώματα που δεν

είναι πάντοτε εντοπισμένα ή αποκλειστικά κινητικά. Σε σύγκριση με αυτή τη μέθοδο, η πολλαπλή συγχώνευση αισθητήρων (MSS – Multi-Sensor Fusion) προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη και προηγμένη προσέγγιση.

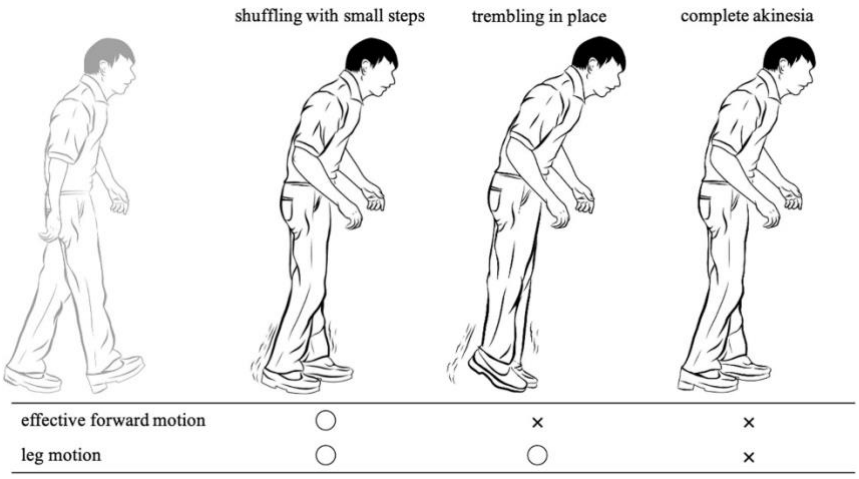
Η MSS συνδυάζει δεδομένα από επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια, ηλεκτρομυογραφήματα (EMG) και άλλους βιοαισθητήρες, επιτρέποντας την ταυτόχρονη καταγραφή και ανάλυση πολλαπλών κινητικών και φυσιολογικών παραμέτρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πιο αξιόπιστη παρακολούθηση της κινητικής κατάστασης, καθώς μπορεί να αποτυπώσει την πολυπλοκότητα και τις διακυμάνσεις των συμπτωμάτων σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η MSS προσφέρει τη δυνατότητα αναγνώρισης μοτίβων που εντοπίζονται σε διάφορες περιοχές του σώματος, γεγονός που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για ολοκληρωμένες κλινικές αξιολογήσεις και εξατομικευμένες παρεμβάσεις [70].

Συνολικά, ενώ το σύστημα των LeMoyne et al. αποτελεί μια σημαντική και πρακτική λύση για την παρακολούθηση του τρόμου χεριού με μεγάλη ακρίβεια, οι πολυαισθητηριακές προσεγγίσεις αποτελούν το επόμενο βήμα για μια πιο ολοκληρωμένη και ακριβή παρακολούθηση της Νόσου του Πάρκινσον. Ο συνδυασμός κινητικών και φυσιολογικών μετρήσεων μέσω MSS μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την κατανόηση των συμπτωμάτων και να βελτιώσει τη διαχείριση της νόσου σε καθημερινό επίπεδο.

5.3.8 Ανίχνευση Παγώματος Βάδισης (FoG) σε PD

Το πάγωμα της βάδισης (Freezing of Gait – FoG) αποτελεί ένα από τα πλέον αναπηρικά κινητικά συμπτώματα της Νόσου του Πάρκινσον, καθώς χαρακτηρίζεται από αιφνίδια αδυναμία έναρξης ή συνέχισης της βάδισης. Η ακριβής και έγκαιρη ανίχνευσή του είναι ουσιαστική για την αξιολόγηση της σοβαρότητας της νόσου και την προσαρμογή της θεραπείας. Στο πλαίσιο αυτό, διάφορες μελέτες έχουν προτείνει τεχνολογικές λύσεις βασισμένες σε φορητούς αισθητήρες, αξιοποιώντας αναλύσεις στον τομέα της συχνότητας και προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος.

Η μελέτη των **Haritz et al.** εστίασε στην αναγνώριση επεισοδίων FoG μέσω της ανάλυσης των συχνοτήτων βάδισης, χρησιμοποιώντας ένα επιταχυνσιόμετρο και ένα γυροσκόπιο τοποθετημένα σε τρεις διαφορετικές θέσεις των κάτω άκρων. Τα δεδομένα καταγράφηκαν και αναλύθηκαν με φασματικές τεχνικές, όπως ο Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (FFT), ώστε να αναδειχθούν περιοχές συχνότητας που σχετίζονται με το FoG. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η τοποθέτηση του αισθητήρα στα κάτω άκρα και ειδικά η κάθετη τοποθέτηση στη φτέρνα στο στεφανιαίο επίπεδο παρείχε την υψηλότερη ακρίβεια, με ποσοστά ανίχνευσης 80,8% και 82,7% αντίστοιχα. Η μελέτη κατέδειξε ότι η φασματική ανάλυση μπορεί να διαχωρίσει αποτελεσματικά τα κανονικά μοτίβα βάδισης από τα επεισόδια FoG, επιτρέποντας μια αξιόπιστη χρήση των αισθητήρων σε πραγματικές συνθήκες [71].



Εικόνα 16: Κατάσταση FoG

Αντίστοιχα, η έρευνα των **Moore et al.** διερεύνησε τη χρήση ενός επιταχυνσιόμετρου τοποθετημένου στον αστράγαλο κατά τη διάρκεια προκαθορισμένων δοκιμών βάδισης. Το σύστημα μετέδιδε δεδομένα ασύρματα σε υπολογιστή τσέπης και αξιοποιούσε ανάλυση ισχύος συχνοτήτων για την ανίχνευση των χαρακτηριστικών συχνοτήτων του FoG. Πιο συγκεκριμένα, το FoG συσχετίστηκε με ενισχυμένες συνιστώσες υψηλής συχνότητας στην περιοχή 3–8 Hz. Ο δείκτης παγώματος (Freeze Index – FI), ο οποίος προέκυπτε ως λόγος της ισχύος στη ζώνη FoG προς τη ζώνη φυσιολογικής κίνησης, έφτασε ακρίβεια περίπου 78% στη διάκριση επεισοδίων FoG. Η προσέγγιση αυτή ανέδειξε ότι ακόμη και ένας μόνο αισθητήρας, όταν συνδυάζεται με κατάλληλη συχνοτική ανάλυση, μπορεί να αποδώσει σημαντικές ενδείξεις για την ανίχνευση του FoG.

Παρά τα θετικά αποτελέσματα των δύο μελετών, και οι δύο προσεγγίσεις κάνουν χρήση **μονοαισθητηριακών συστημάτων**, κάτι που περιορίζει την ικανότητα διάκρισης πολύπλοκων κινητικών μοτίβων. Η **πολλαπλή συγχώνευση αισθητήρων** (multi-sensor fusion) προσφέρει ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις μεμονωμένες μεθόδους, καθώς επιτρέπει τον συνδυασμό δεδομένων από διαφορετικούς αισθητήρες (επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια, IMUs), ενισχύοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία στην ανίχνευση του FoG. Η χρήση αλγορίθμων συγχώνευσης, όπως τα φίλτρα Kalman και οι τεχνικές Bayesian fusion, μπορεί να μειώσει το θόρυβο, να αυξήσει την ευρωστία του συστήματος και να επιτρέψει διαχωρισμό ανάμεσα σε φυσιολογικές και παθολογικές κινήσεις με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια [72].

Συνολικά, αν και οι μέθοδοι των Haritz et al. και Moore et al. αποτέλεσαν σημαντικά βήματα στην ανίχνευση του FoG μέσω μεμονωμένων αισθητήρων, η πολλαπλή συγχώνευση αισθητήρων παρουσιάζει σαφή πλεονεκτήματα και συνιστά το επόμενο στάδιο στην τεχνολογική παρακολούθηση της Νόσου του Πάρκινσον. Μέσω της ολοκληρωμένης συλλογής δεδομένων και της προηγμένης ανάλυσης σήματος, η προσέγγιση αυτή μπορεί να προσφέρει πιο πλήρη και αξιόπιστη εικόνα της κινητικής συμπεριφοράς των ασθενών, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βελτίωση της θεραπευτικής διαχείρισης.

6. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Συμπεράσματα από την ανασκόπηση των τεχνικών αξιολόγησης

Η Νόσος του Πάρκινσον αποτελεί μια σύνθετη, πολυτροπική νευροεκφυλιστική διαταραχή, η οποία απαιτεί συνδυασμένες προσεγγίσεις για την ακριβή αξιολόγηση και αποτελεσματική διαχείρισή της. Στα προηγούμενα κεφάλαια πραγματοποιήθηκε μια εκτενής ανασκόπηση των κλινικών, τεχνολογικών και υβριδικών μεθόδων παρακολούθησης των κινητικών και μη κινητικών συμπτωμάτων, καθώς και των σύγχρονων προσεγγίσεων συγχώνευσης δεδομένων και μηχανικής μάθησης. Η συνολική εικόνα που προκύπτει αποκαλύπτει ότι, ενώ οι παραδοσιακές κλινικές μέθοδοι – όπως η UPDRS, η Hoehn & Yahr και η ADL Scale – παραμένουν αναντικατάστατα εργαλεία στην κλινική πράξη, παρουσιάζουν σαφείς περιορισμούς

όσον αφορά την αντικειμενικότητα, τη συχνότητα καταγραφής και την ικανότητά τους να αποτυπώνουν τις καθημερινές διακυμάνσεις των συμπτωμάτων.

Αντίθετα, οι φορητοί αισθητήρες, οι νευροαπεικονιστικές τεχνικές και οι προηγμένοι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης επιτρέπουν πλέον μια λεπτομερή, αντικειμενική και διαρκή παρακολούθηση των ασθενών, προσφέροντας πλούσια πολυτροπικά δεδομένα που μπορούν να ενισχύσουν τη διαγνωστική ακρίβεια και να υποστηρίξουν την εξατομικευμένη θεραπευτική προσέγγιση. Παράλληλα, τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, όπως η πλατφόρμα PD_MENTOR, αναδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο η τεχνητή νοημοσύνη και η διαλειτουργικότητα δεδομένων μπορούν να μετασχηματίσουν τη σύγχρονη κλινική πράξη.

Στο πλαίσιο αυτό, το παρόν κεφάλαιο συνοψίζει τα βασικά συμπεράσματα της ανασκόπησης, αναδεικνύοντας τα ισχυρά σημεία και τους περιορισμούς των υφιστάμενων μεθόδων αξιολόγησης. Παράλληλα, προτείνει μελλοντικές κατευθύνσεις για την έρευνα και την τεχνολογική ανάπτυξη, με στόχο μια ολοκληρωμένη, αξιόπιστη και εξατομικευμένη παρακολούθηση της Νόσου του Πάρκινσον που θα ανταποκρίνεται στις ανάγκες της κλινικής πρακτικής αλλά και της καθημερινής ζωής των ασθενών.

6.1 Προσαρμογή Θεραπευτικών Προτάσεων με Βάση τα Δεδομένα του Ασθενούς

Η εξατομικευμένη ιατρική αποτελεί θεμελιώδη πυλώνα της σύγχρονης προσέγγισης στη διαχείριση της Νόσου του Πάρκινσον, καθώς η ετερογένεια της κλινικής εικόνας απαιτεί θεραπευτικές παρεμβάσεις προσαρμοσμένες στις ανάγκες και τα χαρακτηριστικά κάθε ασθενούς. Οι διαφοροποιήσεις στην ένταση των κινητικών και μη κινητικών συμπτωμάτων, οι συννοσηρότητες, οι διαφοροποιημένες αντιδράσεις στα φαρμακευτικά σχήματα και η παρουσία παρενεργειών καθιστούν αναγκαία τη χρήση δυναμικών μοντέλων λήψης αποφάσεων. Στο πλαίσιο της πλατφόρμας **PD_MENTOR**, η αξιοποίηση τεχνικών μηχανικής μάθησης και προηγμένων μεθόδων ανάλυσης δεδομένων επιτρέπει τη διαμόρφωση εξατομικευμένων θεραπευτικών προτάσεων, οι οποίες βασίζονται σε ολοκληρωμένα δεδομένα προερχόμενα από πολλαπλές πηγές.

Τα θεραπευτικά μοντέλα που ενσωματώνονται στο PD_MENTOR μπορούν να προβλέψουν την ανταπόκριση του ασθενούς σε συγκεκριμένες παρεμβάσεις, εκτιμώντας πιθανές παρενέργειες ή ανεπιθύμητες κινητικές διακυμάνσεις, όπως οι δυσκινησίες που προκαλούνται από τη λεβοντόπα. Μελλοντικά, η χρήση πιο εξελιγμένων μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης – όπως τα προγνωστικά νευρωνικά δίκτυα ή τα deep learning μοντέλα – θα μπορούσε να ενισχύσει περαιτέρω την ακρίβεια των προβλέψεων, επιτρέποντας στους κλινικούς ιατρούς να λαμβάνουν αποφάσεις με μεγαλύτερη ασφάλεια και αποτελεσματικότητα.

Η συνεχής συλλογή δεδομένων από φορετές συσκευές, κινητές εφαρμογές και ηλεκτρονικά ημερολόγια εμπλουτίζει το θεραπευτικό μοντέλο με πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο. Αυτό καθιστά δυνατή τη δημιουργία ενός προσαρμοστικού συστήματος που ενημερώνεται δυναμικά με βάση τις αλλαγές στα συμπτώματα, τις μεταβολές της κινητικότητας μέσα στην ημέρα και τις αποκρίσεις στη φαρμακευτική αγωγή. Με αυτόν τον τρόπο, οι θεραπευτικές συστάσεις μπορούν να αναπροσαρμόζονται άμεσα, εξασφαλίζοντας ότι η αγωγή ανταποκρίνεται πραγματικά στη διαρκώς μεταβαλλόμενη κατάσταση του ασθενούς.

Μια ακόμη πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση είναι η ανάπτυξη συνδυαστικών θεραπευτικών προσεγγίσεων, που θα ενσωματώνουν φαρμακευτικές παρεμβάσεις, φυσικοθεραπευτικά προγράμματα, γνωσιακές και συμπεριφορικές παρεμβάσεις, καθώς και διατροφικές οδηγίες. Η ενσωμάτωση παραγόντων όπως ο τρόπος ζωής, η φυσική δραστηριότητα, η ψυχολογική κατάσταση και η γενετική προδιάθεση μπορεί να οδηγήσει σε μια πιο ολοκληρωμένη, πολυδιάστατη θεραπευτική στρατηγική, η οποία θα ανταποκρίνεται στις πραγματικές ανάγκες του κάθε ατόμου.

Συνολικά, η προσαρμογή των θεραπευτικών προτάσεων με βάση τα δεδομένα του ασθενούς αποτελεί κρίσιμο βήμα προς μια περισσότερο στοχευμένη και αποτελεσματική διαχείριση της Νόσου του Πάρκινσον. Η αξιοποίηση πολυτροπικών δεδομένων και προηγμένων αλγορίθμων υπόσχεται να μεταμορφώσει τη σύγχρονη κλινική πρακτική, ενισχύοντας την ακρίβεια των παρεμβάσεων και βελτιώνοντας ουσιαστικά την ποιότητα ζωής των ασθενών.

6.1.2 Χρήση Cloud Computing και Αρχιτεκτονικής Υπηρεσιών (SOA) για Αποτελεσματική Επεξεργασία Δεδομένων

Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση φορητών αισθητήρων, κινητών εφαρμογών και συστημάτων απομακρυσμένης παρακολούθησης στη νόσο του Πάρκινσον έχει οδηγήσει σε μια πρωτοφανή παραγωγή δεδομένων υψηλού όγκου και ποικιλίας. Τα δεδομένα αυτά, που περιλαμβάνουν κινητικές μετρήσεις, φυσιολογικά σήματα, αυτοαναφορές και αποτελέσματα κλινικών αξιολογήσεων, απαιτούν προηγμένες υποδομές για την αποθήκευση, επεξεργασία και ανάλυσή τους σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτό το πλαίσιο, το **Cloud Computing** και η **Αρχιτεκτονική Προσανατολισμένη στις Υπηρεσίες (Service-Oriented Architecture – SOA)** διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο, προσφέροντας μια ευέλικτη, επεκτάσιμη και διαλειτουργική πλατφόρμα για την αποτελεσματική αξιοποίηση των δεδομένων αυτών.

Η χρήση υποδομών cloud επιτρέπει την κεντρική αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων, την άμεση πρόσβαση από ιατρούς και ερευνητές, καθώς και τη χρήση ισχυρών υπολογιστικών πόρων για την εκτέλεση πολύπλοκων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Με βάση την αρχιτεκτονική SOA, οι λειτουργίες της πλατφόρμας μπορούν να οργανωθούν σε αυτόνομες, επαναχρησιμοποιήσιμες υπηρεσίες που συνεργάζονται μεταξύ τους, επιτρέποντας την ευκολότερη ολοκλήρωση νέων μονάδων, όπως συστήματα πρόβλεψης συμπτωμάτων, εργαλεία επεξεργασίας σήματος ή συστήματα υποστήριξης αποφάσεων. Αυτή η δομημένη προσέγγιση διευκολύνει την ανάπτυξη και τη συντήρηση σύνθετων κλινικών εφαρμογών, μειώνοντας παράλληλα την πολυπλοκότητα των υποδομών.

Η μελλοντική έρευνα αναμένεται να στραφεί σε **κατανεμημένες και έξυπνες μεθόδους επεξεργασίας δεδομένων**, οι οποίες θα μειώνουν την καθυστέρηση και θα επιτρέπουν την ανάλυση σε πραγματικό χρόνο ακόμη και σε μεγάλους όγκους πληροφορίας. Τεχνολογίες όπως το **edge computing** μπορούν να φέρουν την επεξεργασία δεδομένων πιο κοντά στη συσκευή του ασθενούς, μειώνοντας το φορτίο μεταφοράς προς το cloud και επιτρέποντας την άμεση λήψη αποφάσεων για κρίσιμες καταστάσεις, όπως η ανίχνευση πτώσεων ή επεισοδίων παγώματος βάδισης.

Ένα εξίσου σημαντικό πεδίο αφορά τη δημιουργία **διεθνών προτύπων και ασφαλών διαλειτουργικών πλατφορμών** που θα επιτρέπουν την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και οργανισμών υγειονομικής

περίθαλψης. Η καθιέρωση ενοποιημένων πρωτοκόλλων για τη διαχείριση των ιατρικών δεδομένων μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη συνεργασία μεταξύ νοσοκομείων, κλινικών και ερευνητικών κέντρων, επιτρέποντας μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της νόσου και βελτιώνοντας τις δυνατότητες εξατομίκευσης των θεραπευτικών παρεμβάσεων.

Τέλος, η ενσωμάτωση τεχνολογιών **blockchain** αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για την ενίσχυση της ασφάλειας, της ακεραιότητας και της διαφάνειας των δεδομένων των ασθενών. Η αποκεντρωμένη φύση του blockchain μπορεί να προστατεύσει τις ευαίσθητες πληροφορίες από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, να διασφαλίσει την αυθεντικότητα των δεδομένων και να ενισχύσει την εμπιστοσύνη των ασθενών στη χρήση ψηφιακών συστημάτων παρακολούθησης.

6.1.3 Διασταυρούμενη Ανάλυση Δεδομένων για τη Βελτίωση της Πρόγνωσης της Νόσου

Η νόσος του Πάρκινσον χαρακτηρίζεται από έντονη ετερογένεια, τόσο στην κλινική της εικόνα όσο και στον ρυθμό εξέλιξης των συμπτωμάτων. Αυτή η ποικιλία καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την ακριβή πρόγνωση της πορείας της νόσου με βάση μια μόνο πηγή πληροφόρησης. Η διασταυρούμενη ανάλυση δεδομένων, δηλαδή ο συνδυασμός και η συγκριτική αξιολόγηση πληροφοριών που προέρχονται από πολλαπλές και ετερογενείς πηγές, προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για τη βελτίωση των προγνωστικών μοντέλων και τη βαθύτερη κατανόηση των μηχανισμών εξέλιξης της PD.

Η αξιοποίηση τεχνικών ανάλυσης μεγάλων δεδομένων (big data analytics) αποτελεί μία από τις πλέον υποσχόμενες κατευθύνσεις για το μέλλον. Μέσω της ανίχνευσης επαναλαμβανόμενων μοτίβων στα δεδομένα – όπως αλλαγές στη βάδιση, στη στάση του σώματος, στη φωνή ή στη συχνότητα των κινητικών επεισοδίων – μπορούν να εντοπιστούν πρώιμοι δείκτες επιδείνωσης που δεν είναι εμφανείς σε μια τυπική κλινική αξιολόγηση. Αυτοί οι δείκτες, όταν ενσωματωθούν στα προγνωστικά συστήματα, μπορούν να επιτρέψουν πιο έγκαιρη παρέμβαση, μειώνοντας τον κίνδυνο σοβαρών επιπλοκών και επιτρέποντας στους κλινικούς να προσαρμόσουν κατάλληλα τη θεραπεία.

Ένα ακόμη σημαντικό πεδίο αφορά τη χρήση δεδομένων από διαφορετικούς πληθυσμούς. Η αξιοποίηση διεθνών βάσεων δεδομένων και δεδομένων από ποικίλα δημογραφικά προφίλ μπορεί να οδηγήσει σε πιο γενικεύσιμα και αξιόπιστα μοντέλα πρόγνωσης, που λαμβάνουν υπόψη μεταβλητές όπως η γενετική προδιάθεση, οι περιβαλλοντικές επιδράσεις και οι πολιτισμικές διαφοροποιήσεις στην καθημερινότητα. Με τον τρόπο αυτό, είναι εφικτή η κατανόηση των διαφορών στον ρυθμό εξέλιξης της νόσου και η ανάπτυξη εργαλείων που θα ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες διαφορετικών ομάδων ασθενών.

Παράλληλα, οι νέες τεχνολογικές προσεγγίσεις στην προσομοίωση φυσιολογικών λειτουργιών (physiological modeling) μπορούν να εμπλουτίσουν τη διασταυρούμενη ανάλυση δεδομένων. Τα υπολογιστικά μοντέλα που προσομοιώνουν τη λειτουργία του εγκεφάλου και του κινητικού συστήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της πορείας της νόσου υπό διαφορετικές θεραπευτικές παρεμβάσεις, επιτρέποντας την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας πιθανών σεναρίων πριν εφαρμοστούν κλινικά.

Τέλος, η ανάπτυξη πολυδιάστατων δεικτών υγείας αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική μελλοντική κατεύθυνση. Ο συνδυασμός βιοδεικτών, κλινικών παραμέτρων, φυσιολογικών μετρήσεων και δεδομένων από φορητές συσκευές μπορεί να δημιουργήσει ολοκληρωμένα προφίλ ασθενών, ικανά να αποτυπώνουν τη συνολική κατάσταση της υγείας τους. Μέσω αυτών των προφίλ, η σταδιοποίηση της νόσου και η παρακολούθηση της εξέλιξής της μπορούν να γίνουν πιο ακριβείς, παρέχοντας στους κλινικούς πιο ισχυρά εργαλεία για τη λήψη αποφάσεων.

6.1.4 Ανάγκη για ανάπτυξη ολοκληρωμένων πολυτροπικών συστημάτων

Η αποτελεσματική παρακολούθηση της νόσου του Πάρκινσον προϋποθέτει τη συλλογή και συνεκτική ανάλυση δεδομένων που προέρχονται από ποικίλες και ετερογενείς πηγές. Τα πολυτροπικά συστήματα, τα οποία συνδυάζουν πληροφορίες από κλινικές αξιολογήσεις, ερωτηματολόγια, φορητές συσκευές, βιοαισθητήρες και κινητές εφαρμογές, αποτελούν σημαντική εξέλιξη προς την κατεύθυνση της ολοκληρωμένης αποτύπωσης της κατάστασης του ασθενούς. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους που συχνά παρέχουν στιγμιότυπα της κλινικής εικόνας, τα πολυτροπικά συστήματα προσφέρουν μια διαχρονική και πολυδιάστατη θεώρηση

της νόσου, καταγράφοντας τόσο τις κινητικές όσο και τις μη κινητικές εκδηλώσεις της.

Ωστόσο, η ανάπτυξή τους συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις, ιδιαίτερα στον τομέα της ενσωμάτωσης και της επεξεργασίας των ετερογενών δεδομένων. Οι διαφορετικές μέθοδοι συλλογής, οι ποικίλοι βαθμοί ακρίβειας και η διαφορετική χρονική ανάλυση των δεδομένων καθιστούν απαραίτητη τη χρήση προηγμένων τεχνικών συγχώνευσης πληροφορίας. Η μελλοντική έρευνα οφείλει να εστιάσει στη βελτίωση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης ικανών να επεξεργάζονται αποτελεσματικά αυτά τα πολυσύνθετα δεδομένα, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές στη δομή, την ποιότητα και το περιεχόμενό τους. Προηγμένα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να συμβάλουν στην αναγνώριση κρυφών προτύπων που σχετίζονται με την εξέλιξη της νόσου, οδηγώντας σε ακριβέστερες προγνώσεις και πιο στοχευμένες θεραπευτικές συστάσεις.

Ένα ακόμη κρίσιμο ζήτημα είναι η διαλειτουργικότητα των συστημάτων. Σε πολλές περιπτώσεις, τα δεδομένα ενός ασθενούς βρίσκονται κατακερματισμένα σε διαφορετικές πλατφόρμες και συστήματα υγείας, γεγονός που δυσχεραίνει την ολοκληρωμένη ανάλυση και καθυστερεί τη λήψη κλινικών αποφάσεων. Η ανάπτυξη κοινών προτύπων, πρωτοκόλλων επικοινωνίας και διαλειτουργικών μηχανισμών ανταλλαγής δεδομένων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την πλήρη αξιοποίηση των πολυτροπικών συστημάτων. Αυτό το πλαίσιο θα διευκολύνει τη συνεργασία μεταξύ κλινικών ιατρών, ερευνητών, τεχνολογικών φορέων και ασθενών, ενισχύοντας την ποιότητα και τη συνέχεια της παρεχόμενης φροντίδας.

Τέλος, η υιοθέτηση πολυτροπικών συστημάτων απαιτεί καινοτομίες στον τομέα της κυβερνοασφάλειας και της προστασίας προσωπικών δεδομένων. Οι φορητές συσκευές, οι κινητές εφαρμογές και οι διαδικτυακές πλατφόρμες συλλέγουν ευαίσθητες πληροφορίες, επομένως είναι απαραίτητο οι νέες τεχνολογίες να συμμορφώνονται με αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας και να ενσωματώνουν σύγχρονους μηχανισμούς κρυπτογράφησης, ελέγχου πρόσβασης και διαχείρισης ταυτότητας. Μόνο μέσα από ασφαλείς και αξιόπιστες υποδομές μπορεί να διασφαλιστεί η εμπιστοσύνη των ασθενών και η αποτελεσματική εφαρμογή αυτών των συστημάτων στην καθημερινή κλινική πρακτική.

6.1.5 Βελτίωση του Συστήματος Υποστήριξης Απόφασης (DSS)

Τα Συστήματα Υποστήριξης Απόφασης (Decision Support Systems – DSS) αποτελούν κομβικό εργαλείο στη σύγχρονη διαχείριση της νόσου του Πάρκινσον, διότι συνδυάζουν δεδομένα από κλινικές αξιολογήσεις, αυτοαναφορές και φορητές συσκευές, με στόχο τη διατύπωση τεκμηριωμένων θεραπευτικών προτάσεων. Παρά τη χρησιμότητά τους, τα υπάρχοντα DSS συχνά περιορίζονται από την ακρίβεια των μοντέλων τους, την ετερογένεια των δεδομένων και την αδυναμία προσαρμογής στις συνεχείς αλλαγές της κλινικής εικόνας των ασθενών. Για τον λόγο αυτό, είναι αναγκαία η περαιτέρω ανάπτυξή τους, τόσο σε επίπεδο τεχνολογίας όσο και σε επίπεδο λειτουργικότητας.

Ένας από τους σημαντικότερους τομείς εξέλιξης αφορά τη χρήση προηγμένων αλγορίθμων βαθιάς μάθησης (deep learning), οι οποίοι μπορούν να ανιχνεύουν πολύπλοκες μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών παραμέτρων της νόσου. Τα νευρωνικά δίκτυα, μέσω της εκπαίδευσης σε μεγάλα σύνολα δεδομένων, μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ικανότητα των DSS να προβλέπουν την εξέλιξη της νόσου ή την πιθανότητα εμφάνισης συγκεκριμένων συμπτωμάτων, όπως το Freezing of Gait ή οι φαρμακογενείς δυσκινησίες. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι προσαρμοστικής μάθησης (adaptive learning) προσφέρουν τη δυνατότητα στα DSS να ενημερώνονται συνεχώς, ενσωματώνοντας νέα δεδομένα από τον ασθενή και αναπροσαρμόζοντας τις συστάσεις τους σε πραγματικό χρόνο.

Ένας ακόμη κρίσιμος τομέας βελτίωσης είναι η ενσωμάτωση ιατρικής γνώσης στα DSS μέσω κανόνων, πρωτοκόλλων και κλινικών κατευθυντήριων οδηγιών. Η υβριδική προσέγγιση, η οποία συνδυάζει δεδομένα με knowledge-based συστήματα, μπορεί να διασφαλίσει ότι οι προτεινόμενες παρεμβάσεις δεν βασίζονται αποκλειστικά σε στατιστικά πρότυπα αλλά και σε κλινικά τεκμηριωμένες κατευθύνσεις. Με αυτόν τον τρόπο, το DSS μπορεί να λειτουργεί όχι μόνο ως εργαλείο ανάλυσης δεδομένων, αλλά και ως αξιόπιστος συνεργάτης του ιατρού στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Τέλος, η βελτίωση της διεπαφής χρήστη αποτελεί σημαντική προϋπόθεση για την κλινική αξιοποίηση των DSS. Η ανάπτυξη διαδραστικών, ευέλικτων και προσαρμόσιμων γραφικών περιβαλλόντων μπορεί να διευκολύνει τους κλινικούς

ιατρούς στη γρήγορη κατανόηση των προτάσεων του συστήματος. Παράλληλα, η απεικόνιση των δεδομένων με τρόπο κατανοητό και εύχρηστο μπορεί να ενισχύσει την αποδοχή των DSS στην καθημερινή πρακτική. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση της εμπειρίας χρήστη, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες και τις προτιμήσεις των επαγγελματιών υγείας.

6.1.6 Ανάπτυξη πιο Ευφυών Κινητών Εφαρμογών για Ασθενείς

Η ανάπτυξη ευφυών κινητών εφαρμογών αποτελεί έναν από τους πιο δυναμικά αναπτυσσόμενους τομείς στην ψηφιακή υγεία και ειδικότερα στη διαχείριση της νόσου του Πάρκινσον. Καθώς οι ασθενείς με PD παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα κινητικών και μη κινητικών συμπτωμάτων, η χρήση έξυπνων εργαλείων παρακολούθησης μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της ποιότητας ζωής τους και στη διευκόλυνση των επαγγελματιών υγείας στη λήψη θεραπευτικών αποφάσεων.

Ένας βασικός άξονας της μελλοντικής έρευνας αφορά τη βελτίωση των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης που ενσωματώνονται σε αυτές τις εφαρμογές. Τα μοντέλα αυτά πρέπει να είναι ικανά να αναλύουν σε πραγματικό χρόνο πολυτροπικά δεδομένα, τα οποία προέρχονται από φορητούς αισθητήρες, αυτοαναφορές των ασθενών, φαρμακευτικά δεδομένα και περιβαλλοντικές παραμέτρους. Η συγχώνευση αυτών των ετερογενών δεδομένων επιτρέπει την αναγνώριση μοτίβων που σχετίζονται με την εξέλιξη των συμπτωμάτων και υποστηρίζει την εξαγωγή εξατομικευμένων προβλέψεων για κρίσιμες κινητικές και μη κινητικές μεταβολές.

Παράλληλα, σημαντική ερευνητική κατεύθυνση αποτελεί η αυτοματοποίηση της θεραπευτικής προσαρμογής μέσω κινητών εφαρμογών. Ενώ οι σημερινές εφαρμογές περιορίζονται στην παρουσίαση πληροφοριών, οι μελλοντικές λύσεις θα μπορούσαν να ενσωματώσουν συστήματα υποστήριξης απόφασης (DSS) και προηγμένους αλγορίθμους για την παροχή προσωποποιημένων προτάσεων σχετικά με τη φαρμακευτική αγωγή, τη φυσιοθεραπεία ή άλλες παρεμβάσεις. Με τον τρόπο αυτό, οι εφαρμογές θα λειτουργούν ως «ψηφιακοί σύμβουλοι υγείας», προσφέροντας προσαρμοσμένες συστάσεις βασισμένες στην τρέχουσα κλινική εικόνα του ασθενούς.

Ένα ακόμη σημαντικό πεδίο έρευνας αφορά τη βελτίωση της διεπαφής ανθρώπου-μηχανής. Ασθενείς με Πάρκινσον μπορεί να αντιμετωπίζουν δυσκολίες στη χρήση μικρών οθονών ή παραδοσιακών μενού λόγω τρόμου, δυσκαμψίας ή βραδυκινησίας. Η ενσωμάτωση φωνητικών εντολών, οπτικών διεπαφών, τεχνολογιών φυσικής γλώσσας (NLP) και επαυξημένης πραγματικότητας (AR) μπορεί να προσφέρει πιο φιλικά και λειτουργικά συστήματα, επιτρέποντας την εύκολη αλληλεπίδραση ακόμη και σε ασθενείς με σοβαρές κινητικές δυσκολίες.

Εξίσου κρίσιμη είναι η ανάπτυξη ισχυρών μηχανισμών προστασίας προσωπικών δεδομένων. Οι κινητές εφαρμογές διαχειρίζονται ιδιαίτερα ευαίσθητες πληροφορίες και πρέπει να πληρούν υψηλά πρότυπα ασφάλειας, εξασφαλίζοντας την κρυπτογράφηση, τον έλεγχο πρόσβασης και την ασφαλή αποθήκευση των δεδομένων στο cloud ή σε τοπικές συσκευές. Η συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα και κανονισμούς, όπως το GDPR, αποτελεί απαραίτητο βήμα για την ευρεία υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών.

Τέλος, η κλινική επικύρωση των ευφυών εφαρμογών αποτελεί βασικό παράγοντα για τη μελλοντική τους εφαρμογή σε πραγματικά συστήματα υγείας. Η διεξαγωγή εκτεταμένων κλινικών δοκιμών είναι απαραίτητη για την τεκμηρίωση της αποτελεσματικότητας των εφαρμογών στη βελτίωση της καθημερινής λειτουργικότητας και στη μείωση των συμπτωμάτων των ασθενών. Η συνεργασία μεταξύ ερευνητικών ιδρυμάτων, νευρολόγων, μηχανικών λογισμικού και εταιρειών τεχνολογίας θα είναι καθοριστική για τη δημιουργία ολοκληρωμένων λύσεων που δεν θα περιορίζονται μόνο στην παρακολούθηση, αλλά θα ενισχύουν ενεργά τη διαχείριση της νόσου του Πάρκινσον

6.2. Πιο Ολοκληρωμένες και Ακριβείς Τεχνολογίες Παρακολούθησης

Τα τελευταία χρόνια, η πρόοδος στη βιοϊατρική μηχανική και στις φορητές τεχνολογίες έχει μεταμορφώσει τον τρόπο παρακολούθησης και διαχείρισης της Νόσου του Πάρκινσον (PD). Η αυξανόμενη διαθεσιμότητα μικροσκοπικών, χαμηλού κόστους και υψηλής ακρίβειας αισθητήρων, σε συνδυασμό με νέες στρατηγικές ανάλυσης δεδομένων, έχει δημιουργήσει ένα νέο πλαίσιο υγειονομικής

φροντίδας όπου η συνεχή, φιλική προς τον χρήστη και μη παρεμβατική παρακολούθηση καθίσταται εφικτή.

Οι φορητοί αισθητήρες – επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια, μαγνητόμετρα αλλά και μικρόφωνα – αποτελούν βασικά εργαλεία για την αντικειμενική μέτρηση κινητικών και φυσιολογικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο. Παρότι η κλινική αξιολόγηση και οι εκτιμήσεις των ειδικών παραμένουν καθοριστικοί παράγοντες στη διάγνωση και παρακολούθηση της PD, οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να λειτουργήσουν ως ισχυρά υποστηρικτικά εργαλεία. Η χρήση τους βελτιώνει την ακρίβεια και τη συνέπεια των κλινικών αποφάσεων, μειώνει τα περιθώρια σφάλματος και συμβάλλει στη μείωση του χρόνου αξιολόγησης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη πολυτροπικών συστημάτων μικροσκοπικών αισθητήρων, τα οποία συνδυάζουν δεδομένα από περισσότερους του ενός τύπους αισθητήρων. Αυτά τα συστήματα υποστηρίζουν τόσο τη φορητή όσο και την πανταχού παρούσα παρακολούθηση (ubiquitous monitoring), προσφέροντας ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης του ασθενούς στην καθημερινή ζωή. Οι φορετοί και σταθεροί αισθητήρες, τοποθετημένοι στο σώμα, έχουν εξελιχθεί ώστε να επιτρέπουν κλινικά αξιόπιστες μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες, ενισχύοντας σημαντικά τη διαχείριση χρόνιων νευρολογικών διαταραχών όπως η PD.

Ένα βασικό πλεονέκτημα των φορητών συστημάτων είναι η δυνατότητα μακροχρόνιας παρακολούθησης εντός του οικιακού περιβάλλοντος. Οι γιατροί μπορούν έτσι να παρακολουθούν τις καθημερινές δραστηριότητες των ασθενών για εβδομάδες ή μήνες, υπερβαίνοντας τους περιορισμούς της περιοδικής κλινικής εξέτασης. Η συνεχής αυτή παρακολούθηση βελτιώνει την αναγνώριση μοτίβων κινητικών διαταραχών, επιτρέπει την εκτίμηση της επίδρασης των θεραπευτικών παρεμβάσεων και υποστηρίζει την έγκαιρη τροποποίηση της αγωγής.

Ο πιο διαδεδομένος αισθητήρας στην παρακολούθηση της PD είναι το επιταχυνσιόμετρο, λόγω του χαμηλού κόστους, της ανθεκτικότητας και της δυνατότητάς του να μετρά την επιτάχυνση του σώματος σε πολλούς άξονες. Η επιτάχυνση αντανακλά άμεσα τις εξωτερικές δυνάμεις, επιτρέποντας την αναγνώριση της έντασης και της συχνότητας της κίνησης, γεγονός που καθιστά το

επιταχυνσιόμετρο ιδανικό για την αξιολόγηση της καθημερινής φυσικής δραστηριότητας. Το γυροσκόπιο συμπληρώνει αυτή τη μέτρηση, καταγράφοντας γωνιακές μεταβολές και επιτρέποντας την ακριβή εκτίμηση περιστροφικών κινήσεων, στάσεων και μεταβάσεων. Το μαγνητόμετρο, το οποίο μετρά τις μεταβολές προσανατολισμού σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο της Γης, βελτιώνει την ακρίβεια των μετρήσεων και διορθώνει πιθανές αποκλίσεις.

Ο συνδυασμός των τριών αισθητήρων – επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια και μαγνητόμετρα – σχηματίζει την αδρανειακή μονάδα μέτρησης (IMU), η οποία προσφέρει ολοκληρωμένο προσδιορισμό θέσης και προσανατολισμού με υψηλή ακρίβεια και ελάχιστη απόκλιση με την πάροδο του χρόνου. Η IMU αποτελεί πλέον τον «χρυσό κανόνα» για την ανάλυση κίνησης και έχει καθιερωθεί σε πολλές σύγχρονες κλινικές και ερευνητικές εφαρμογές.

Πέρα από τους κινητικούς αισθητήρες, σύγχρονες μελέτες αναδεικνύουν και τη σημασία της ανάλυσης της ομιλίας ως βιοδείκτη για την PD. Ερευνητικά δεδομένα δείχνουν ότι μεγάλο ποσοστό ασθενών εμφανίζει φωνητικές διαταραχές ήδη από τα πρώιμα στάδια της νόσου. Η ανάλυση φωνής αποτελεί μια μη επεμβατική, εύκολη και οικονομική τεχνική, ιδανική για τηλεπαρακολούθηση. Επιπλέον, μπορεί να αναδείξει πρώιμες μεταβολές στη σοβαρότητα των συμπτωμάτων, συμπληρώνοντας τις μετρήσεις από τους κινητικούς αισθητήρες.

Συνολικά, οι σύγχρονες τεχνολογίες παρακολούθησης – είτε βασίζονται σε IMU αισθητήρες, είτε σε φωνητικά σήματα είτε σε συνδυασμό πολυτροπικών δεδομένων – θέτουν τα θεμέλια για την ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου φροντίδας. Το μοντέλο αυτό στηρίζεται στην αντικειμενική, συνεχή και υψηλής ακρίβειας παρακολούθηση των συμπτωμάτων, προσφέροντας στους ειδικούς ένα εργαλείο που ενισχύει τη διάγνωση, μειώνει το υποκειμενικό σφάλμα και διευκολύνει την εξατομίκευση της θεραπείας. Η εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών αναμένεται να επιταχυνθεί τα επόμενα χρόνια, οδηγώντας σε ολοένα πιο ολοκληρωμένα και αποτελεσματικά συστήματα διαχείρισης της PD.

6.2.1 Επίπεδα Πολυτροπικής Σύντηξης

Παρά την πρόοδο στις φορητές τεχνολογίες, εξακολουθεί να απουσιάζει μια ολοκληρωμένη, πολυτροπική πλατφόρμα αισθητήρων που να παρακολουθεί με

ακρίβεια και οικονομική αποδοτικότητα την εξέλιξη της νόσου του Πάρκινσον (PD) σε πυκνά χρονικά διαστήματα. Επιπλέον, η πραγματική ισχύς των σύγχρονων αλγορίθμων επεξεργασίας/ταξινόμησης σήματος δεν έχει συστηματικά αξιολογηθεί σε σενάρια όπου οι πληροφορίες προκύπτουν από συνδυασμό πολλαπλών αισθητήρων. Ως αποτέλεσμα, παραμένει κενό για την ανάπτυξη πολυαισθητηριακών, κλινικά επικυρωμένων και πρακτικά βιώσιμων συστημάτων σύντηξης που να παρέχουν αξιόπιστη, συνεχόμενη εκτίμηση της κατάστασης των ασθενών με PD.

Η πολυτροπική σύντηξη (sensor/multimodal fusion) συνιστά την υπολογιστική ολοκλήρωση ετερογενών ροών πληροφορίας—από αισθητήρες κίνησης, βιοηλεκτρικούς/φυσιολογικούς αισθητήρες και «μαλακά» κανάλια όπως ομιλία ή χειρονομίες—με σκοπό την παραγωγή συνεκτικών και κλινικά χρήσιμων συμπερασμάτων. Οι πολυτροπικές διεπαφές αξιοποιούν ταυτόχρονα πολλούς τρόπους εισόδου/παρατήρησης και αποδίδουν αποφάσεις υψηλότερης αξιοπιστίας μέσω συνδυασμού, ευθυγράμμισης και σταθμίσεων των επιμέρους πηγών. Κεντρικό στοιχείο αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ο «διαχειριστής διαλόγου» (decision/interaction manager), ο οποίος λαμβάνει τις συγχωνευμένες ενδείξεις και παράγει ερμηνείες ή εισηγήσεις θεραπευτικής δράσης.

Τυπολογικά, η σύντηξη υλοποιείται σε τρία συμπληρωματικά επίπεδα:

(α) Σύντηξη σε επίπεδο δεδομένων (data-level) Ενοποιεί ακατέργαστα σήματα ομοειδούς συνήθως προέλευσης (π.χ. πολλαπλοί αισθητήρες κίνησης σε διαφορετικές θέσεις). Προσφέρει το μέγιστο βάθος πληροφορίας, επειδή η επεξεργασία γίνεται πριν από κάθε συμπίεση ή εξαγωγή χαρακτηριστικών. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε θόρυβο, αστοχίες αισθητήρων και χρονικές ασυγχρονίες, απαιτώντας αυστηρή προεπεξεργασία, βαθμονόμηση και συγχρονισμό.

(β) Σύντηξη σε επίπεδο χαρακτηριστικών (feature-level) Συνδυάζει διανύσματα χαρακτηριστικών που έχουν εξαχθεί από ετερογενείς ροές (π.χ. φασματικά γνωρίσματα ομιλίας με κινηματικά γνωρίσματα από IMU). Επιτυγχάνει καλή ισορροπία μεταξύ πληρότητας πληροφορίας και ανθεκτικότητας σε θόρυβο, επιτρέποντας στενή σύζευξη μεθόδων (π.χ. συγχώνευση λόγου–χειλιών, ή EMG–

επιταχυνσιομέτρων) και διευκολύνοντας αλγορίθμους μάθησης που «βλέπουν» την κοινή αναπαράσταση.

(γ) Σύντηξη σε επίπεδο απόφασης (decision-level) Συνδυάζει ανεξάρτητες μερικές αποφάσεις/πιθανότητες από επιμέρους ταξινομητές (late fusion), με κανόνες ψήφισης, στάθμισης ή μπεϋζιανές ενοποιήσεις. Είναι η πιο ευέλικτη και ανθεκτική επιλογή για χαλαρά συζευγμένες ροές, αυξάνει τη ρομπουστότητα σε ελλείψεις δεδομένων ή αποτυχίες αισθητήρων και βελτιώνει τη διαθεσιμότητα συστήματος σε πραγματικές συνθήκες.

Πέρα από τα επίπεδα, η θεωρία της σύντηξης αναγνωρίζει τρεις λειτουργικές σχέσεις πληροφορίας: **επικάλυψη** (redundancy), όπου πολλαπλές πηγές περιγράφουν τα ίδια φαινόμενα και μειώνουν την αβεβαιότητα· **συμπληρωματικότητα** (complementarity), όπου κάθε πηγή «βλέπει» διαφορετικές όψεις του φαινομένου (π.χ. γωνιακή ταχύτητα από γυροσκόπιο και γραμμική επιτάχυνση από επιταχυνσιόμετρο)· και **διαχρονικότητα** (temporality), όπου ο συγχρονισμός και η στοίχιση στο χρόνο (time alignment) επιτρέπουν την ανάδειξη αιτιακών ή προγνωστικών μοτίβων (π.χ. προαγγελτικά σήματα πριν από επεισόδια FoG).

Ειδικά για την PD, η πολυτροπική σύντηξη παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα:

- **Καταστολή σφαλμάτων και θορύβου** μέσω πλεονάζουσας πληροφορίας (π.χ. πολλαπλές IMU σε άκρα/κορμό), που σταθεροποιεί τους ρυθμούς αναγνώρισης σε οικιακά περιβάλλοντα.

- **Πλούσια περιγραφή συμπτωμάτων** με συμπληρωματικές πηγές (IMU για τρόμο/βραδυκινησία/δυσκινησία, EMG για μυϊκή στρατολόγηση, PPG/ECG για αυτόνομες δυσλειτουργίες, EEG/φωνή για κεντρικούς και λογοκινητικούς δείκτες).

- **Καλύτερη γενίκευση και προγνωστική ισχύς** μέσω στοίχισης πολλαπλών χρονικών κλιμάκων (δευτερόλεπτα για επεισόδια FoG, ώρες–ημέρες για on–off διακυμάνσεις, εβδομάδες–μήνες για πορεία νόσου).

Ένας ιδιαίτερα υποσχόμενος άξονας είναι ο συνδυασμός **φορητών αισθητήρων κίνησης (IMU: επιταχυνσιόμετρο–γυροσκόπιο–μαγνητόμετρο)** με **αισθητήρα ήχου/ομιλίας** ως βιοδείκτη. Κλινικές παρατηρήσεις δείχνουν ότι η ομιλία επηρεάζεται ήδη από πρώιμα στάδια, ενώ τα κυρίαρχα αρχικά συμπτώματα περιλαμβάνουν βραδύτητα, δυσκολία στη βάδιση και γραφή—όλα άμεσα μετρήσιμα από IMU. Η στατιστική χαρτογράφηση μεταξύ δεικτών ομιλίας (φωνητική ένταση, jitter/shimmer, ρυθμός) και κινηματικών δεικτών (τρέμουλο, ταλαντώσεις, μικρομεταβάσεις στάσεων) αποτελεί ανεκμετάλλευτη μέχρι σήμερα ευκαιρία για έγκαιρη διάγνωση και λεπτομερή παρακολούθηση.

Κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη:

1. **Αρχιτεκτονικές πολλαπλών επιπέδων**: υβριδική σύντηξη (data+feature+decision) με μάθηση των βαρών σύντηξης από τα δεδομένα και ταυτόχρονη ενσωμάτωση κλινικής γνώσης (π.χ. κανόνες UPDRS).

2. **Συγχρονισμός και στοίχιση**: ισχυρή χρονική στοίχιση ροών (sensor time warping, cross-modal alignment) και ανθεκτικότητα σε απώλειες πακέτων/ενεργειακούς περιορισμούς.

3. **Εξήγηση αποφάσεων (XAI)**: διαφάνεια των μοντέλων σύντηξης για κλινικούς (χαρτογράφηση χαρακτηριστικών σε συμπτώματα, εμπιστοσύνη/αβεβαιότητα).

4. **Κλινική επικύρωση και πρακτικότητα**: μελέτες ακρίβειας–αξιοπιστίας σε οικιακά περιβάλλοντα, αξιολόγηση κόστους–οφέλους, ενεργειακά αποδοτικό edge processing.

5. **IMU + ομιλία ως πυρήνας**: συστηματική, προοπτική αξιολόγηση δεσμών IMU–φωνής για πρώιμους δείκτες και εξατομικευμένη πρόγνωση.

Συνοψίζοντας, μια καλοσχεδιασμένη πολυτροπική διασύνδεση αισθητήρων—που συγχωνεύει δύο ή περισσότερες πηγές σε κατάλληλα επίπεδα—μειώνει την αβεβαιότητα αναγνώρισης, αυξάνει την ανθεκτικότητα σε πραγματικές συνθήκες και σταθεροποιεί την απόδοση σε σχέση με μονοαισθητηριακές προσεγγίσεις. Η στοχευμένη σύζευξη IMU και ομιλίας, ειδικά, αναμένεται να ενισχύσει ουσιαστικά

την έγκαιρη διάγνωση και τη συνεχή διαχείριση της PD, προσφέροντας ταυτόχρονα κλινική αξία και μείωση του συνολικού κόστους φροντίδας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] J. Jankovic, “Parkinson’s disease: clinical features and diagnosis,” *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, vol. 79, no. 4, pp. 368–376, Apr. 2008, doi: 10.1136/jnnp.2007.131045.

[2] W. Poewe *et al.*, “Parkinson disease,” *Nat Rev Dis Primers*, vol. 3, no. 1, p. 17013, Mar. 2017, doi: 10.1038/nrdp.2017.13.

[3] L. V Kalia and A. E. Lang, “Parkinson’s disease,” *The Lancet*, vol. 386, no. 9996, pp. 896–912, Aug. 2015, doi: 10.1016/S0140-6736(14)61393-3.

[4] E. R. Dorsey, T. Sherer, M. S. Okun, and B. R. Bloem, “The Emerging Evidence of the Parkinson Pandemic,” *J Parkinsons Dis*, vol. 8, no. s1, pp. S3–S8, Dec. 2018, doi: 10.3233/JPD-181474.

[5] B. R. Bloem, M. S. Okun, and C. Klein, “Parkinson’s disease,” *The Lancet*, vol. 397, no. 10291, pp. 2284–2303, Jun. 2021, doi: 10.1016/S0140-6736(21)00218-X.

[6] A. Berardelli *et al.*, “<scp>EFNS</scp> / <scp>MDS</scp> - <scp>ES</scp> recommendations for the diagnosis of <scp>P</scp> arkinson’s disease,” *Eur J Neurol*, vol. 20, no. 1, pp. 16–34, Jan. 2013, doi: 10.1111/ene.12022.

[7] P. A. Kempster, “Understanding the progression of Parkinson’s disease: a review,” *BMJ Neurol Open*, vol. 7, no. 2, p. e001215, Sep. 2025, doi: 10.1136/bmjno-2025-001215.

[8] R. Pahwa and S. H. Isaacson, “Pathophysiology, Patient Burden, and Recognition of OFF Episodes of Parkinson Disease,” *J Clin Psychiatry*, vol. 81, no. 6, Oct. 2020, doi: 10.4088/JCP.SU19004BR1C.

[9] W. Dauer and S. Przedborski, “Parkinson’s Disease,” *Neuron*, vol. 39, no. 6, pp. 889–909, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0896-6273(03)00568-3.

[10] J. A. Obeso *et al.*, “Functional organization of the basal ganglia: Therapeutic implications for Parkinson’s disease,” *Movement Disorders*, vol. 23, no. S3, pp. S548–S559, 2008, doi: 10.1002/mds.22062.

[11] S. K. Van Den Eeden, “Incidence of Parkinson’s Disease: Variation by Age, Gender, and Race/Ethnicity,” *Am J Epidemiol*, vol. 157, no. >11, pp. 1015–1022, Jun. 2003, doi: 10.1093/aje/kwg068.

[12] J. G. Nutt, B. R. Bloem, N. Giladi, M. Hallett, F. B. Horak, and A. Nieuwboer, “Freezing of gait: moving forward on a mysterious clinical phenomenon,” *Lancet Neurol*, vol. 10, no. 8, pp. 734–744, Aug. 2011, doi: 10.1016/S1474-4422(11)70143-0.

[13] M. Stacy, “The wearing-off phenomenon and the use of questionnaires to facilitate its recognition in Parkinson’s disease,” *J Neural Transm*, vol. 117, no. 7, pp. 837–846, Jul. 2010, doi: 10.1007/s00702-010-0424-5.

[14] A. P. Denny and M. Behari, “Motor fluctuations in Parkinson’s disease,” *J Neurol Sci*, vol. 165, no. 1, pp. 18–23, May 1999, doi: 10.1016/S0022-510X(99)00052-0.

[15] T. N. Tran, T. N. N. Vo, K. Frei, and D. D. Truong, “Levodopa-induced dyskinesia: clinical features, incidence, and risk factors,” *J Neural Transm*, vol. 125, no. 8, pp. 1109–1117, Aug. 2018, doi: 10.1007/s00702-018-1900-6.

[16] D. W. Dickson, “Parkinson’s Disease and Parkinsonism: Neuropathology,” *Cold Spring Harb Perspect Med*, vol. 2, no. 8, pp. a009258–a009258, Aug. 2012, doi: 10.1101/cshperspect.a009258.

[17] H. Braak and K. Del Tredici, “Neuropathological Staging of Brain Pathology in Sporadic Parkinson’s disease: Separating the Wheat from the Chaff,” *J Parkinsons Dis*, vol. 7, no. s1, pp. S71–S85, Mar. 2017, doi: 10.3233/JPD-179001.

[18] D. J. Surmeier, J. A. Obeso, and G. M. Halliday, “Selective neuronal vulnerability in Parkinson disease,” *Nat Rev Neurosci*, vol. 18, no. 2, pp. 101–113, Feb. 2017, doi: 10.1038/nrn.2016.178.

[19] A. Ascherio and M. A. Schwarzschild, “The epidemiology of Parkinson’s disease: risk factors and prevention,” *Lancet Neurol*, vol. 15, no. 12, pp. 1257–1272, Nov. 2016, doi: 10.1016/S1474-4422(16)30230-7.

[20] A. J. Hughes, S. E. Daniel, L. Kilford, and A. J. Lees, “Accuracy of clinical diagnosis of idiopathic Parkinson’s disease: a clinico-pathological study of 100 cases.,” *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, vol. 55, no. 3, pp. 181–184, Mar. 1992, doi: 10.1136/jnnp.55.3.181.

[21] R. B. Postuma *et al.*, “MDS clinical diagnostic criteria for Parkinson’s disease,” *Movement Disorders*, vol. 30, no. 12, pp. 1591–1601, Oct. 2015, doi: 10.1002/mds.26424.

[22] D. Berg *et al.*, “Prodromal Parkinson disease subtypes — key to understanding heterogeneity,” *Nat Rev Neurol*, vol. 17, no. 6, pp. 349–361, Jun. 2021, doi: 10.1038/s41582-021-00486-9.

[23] A. H. Snijders and B. R. Bloem, “Cycling for Freezing of Gait,” *New England Journal of Medicine*, vol. 362, no. 13, p. e46, Apr. 2010, doi: 10.1056/NEJMicm0810287.

[24] A. Manson, P. Stirpe, and A. Schrag, “Levodopa-Induced-Dyskinesias Clinical Features, Incidence, Risk Factors, Management and Impact on Quality of Life,” *J Parkinsons Dis*, vol. 2, no. 3, pp. 189–198, Aug. 2012, doi: 10.3233/JPD-2012-120103.

[25] D. Aarsland, K. Brønnick, and T. Fladby, “Mild Cognitive Impairment in Parkinson’s Disease,” *Curr Neurol Neurosci Rep*, vol. 11, no. 4, pp. 371–378, Aug. 2011, doi: 10.1007/s11910-011-0203-1.

[26] A. Fasano, N. P. Visanji, L. W. C. Liu, A. E. Lang, and R. F. Pfeiffer, “Gastrointestinal dysfunction in Parkinson’s disease,” *Lancet Neurol*, vol. 14, no. 6, pp. 625–639, Jun. 2015, doi: 10.1016/S1474-4422(15)00007-1.

[27] M. M. Hoehn and M. D. Yahr, “Parkinsonism,” *Neurology*, vol. 17, no. 5, pp. 427–427, May 1967, doi: 10.1212/WNL.17.5.427.

[28] "The Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS): Status and recommendations," *Movement Disorders*, vol. 18, no. 7, pp. 738–750, Jul. 2003, doi: 10.1002/mds.10473.

[29] C. G. Goetz *et al.*, "Movement Disorder Society-sponsored revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS): Scale presentation and clinimetric testing results," *Movement Disorders*, vol. 23, no. 15, pp. 2129–2170, Nov. 2008, doi: 10.1002/mds.22340.

[30] G. Deuschl *et al.*, "European Academy of Neurology/Movement Disorder Society - European Section guideline on the treatment of Parkinson's disease: I. Invasive therapies," *Eur J Neurol*, vol. 29, no. 9, pp. 2580–2595, Sep. 2022, doi: 10.1111/ene.15386.

[31] S. (Spyros) Papapetropoulos, "Patient Diaries As a Clinical Endpoint in Parkinson's Disease Clinical Trials," *CNS Neurosci Ther*, vol. 18, no. 5, pp. 380–387, May 2012, doi: 10.1111/j.1755-5949.2011.00253.x.

[32] A. A. Stone, "Patient non-compliance with paper diaries," *BMJ*, vol. 324, no. 7347, pp. 1193–1194, May 2002, doi: 10.1136/bmj.324.7347.1193.

[33] D. J. van Wamelen *et al.*, "Characterization of Non-Motor Fluctuations Using the Movement Disorder Society <scp>Non-Motor</scp> Rating Scale," *Mov Disord Clin Pract*, vol. 9, no. 7, pp. 932–940, Oct. 2022, doi: 10.1002/mdc3.13520.

[34] R. A. Hauser, F. Deckers, and P. Lehert, "Parkinson's disease home diary: Further validation and implications for clinical trials," *Movement Disorders*, vol. 19, no. 12, pp. 1409–1413, Dec. 2004, doi: 10.1002/mds.20248.

[35] J. Jankovic, "Motor fluctuations and dyskinesias in Parkinson's disease: Clinical manifestations," *Movement Disorders*, vol. 20, no. S11, pp. S11–S16, May 2005, doi: 10.1002/mds.20458.

[36] *Principles and Practice of Movement Disorders*. Elsevier, 2007. doi: 10.1016/B978-0-443-07941-2.X5001-3.

[37] M. Shehab *et al.*, “Machine learning in medical applications: A review of state-of-the-art methods,” *Comput Biol Med*, vol. 145, p. 105458, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.compbiomed.2022.105458.

[38] S. Patel *et al.*, “Monitoring Motor Fluctuations in Patients With Parkinson’s Disease Using Wearable Sensors,” *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 13, no. 6, pp. 864–873, Nov. 2009, doi: 10.1109/TITB.2009.2033471.

[39] S. Ancona *et al.*, “Wearables in the home-based assessment of abnormal movements in Parkinson’s disease: a systematic review of the literature,” *J Neurol*, vol. 269, no. 1, pp. 100–110, Jan. 2022, doi: 10.1007/s00415-020-10350-3.

[40] S. Del Din, A. Godfrey, B. Galna, S. Lord, and L. Rochester, “Free-living gait characteristics in ageing and Parkinson’s disease: impact of environment and ambulatory bout length,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 13, no. 1, p. 46, Dec. 2016, doi: 10.1186/s12984-016-0154-5.

[41] W. Maetzler, J. Domingos, K. Srulijes, J. J. Ferreira, and B. R. Bloem, “Quantitative wearable sensors for objective assessment of Parkinson’s disease,” *Movement Disorders*, vol. 28, no. 12, pp. 1628–1637, Oct. 2013, doi: 10.1002/mds.25628.

[42] R. Lu *et al.*, “Evaluation of Wearable Sensor Devices in Parkinson’s Disease: A Review of Current Status and Future Prospects,” *Parkinsons Dis*, vol. 2020, pp. 1–8, Sep. 2020, doi: 10.1155/2020/4693019.

[43] N. Jalloul, “Wearable sensors for the monitoring of movement disorders,” *Biomed J*, vol. 41, no. 4, pp. 249–253, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.bj.2018.06.003.

[44] A. Salarian, H. Russmann, C. Wider, P. R. Burkhard, F. J. G. Vingerhoets, and K. Aminian, “Quantification of Tremor and Bradykinesia in Parkinson’s Disease Using a Novel Ambulatory Monitoring System,” *IEEE Trans Biomed*

Eng, vol. 54, no. 2, pp. 313–322, Feb. 2007, doi: 10.1109/TBME.2006.886670.

[45] "Freezing of Gait Detection in Parkinson's Disease: A Subject-Independent Detector Using Anomaly Scores," *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 64, no. 11, pp. 2719–2728, Nov. 2017, doi: 10.1109/TBME.2017.2665438.

[46] S. K. Bansal, B. Basumatary, R. Bansal, and A. K. Sahani, "Techniques for the detection and management of freezing of gait in Parkinson's disease – A systematic review and future perspectives," *MethodsX*, vol. 10, p. 102106, 2023, doi: 10.1016/j.mex.2023.102106.

[47] G. N. Saridis and T. P. Gootee, "EMG Pattern Analysis and Classification for a Prosthetic Arm," *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. BME-29, no. 6, pp. 403–412, Jun. 1982, doi: 10.1109/TBME.1982.324954.

[48] N. L. W. Keijsers, M. W. I. M. Horstink, and S. C. A. M. Gielen, "Ambulatory motor assessment in Parkinson's disease," *Movement Disorders*, vol. 21, no. 1, pp. 34–44, Jan. 2006, doi: 10.1002/mds.20633.

[49] D. J. Brooks, "Technology Insight: imaging neurodegeneration in Parkinson's disease," *Nat Clin Pract Neurol*, vol. 4, no. 5, pp. 267–277, May 2008, doi: 10.1038/ncpneuro0773.

[50] S. Bajaj *et al.*, "Diffusion-weighted MRI distinguishes Parkinson disease from the parkinsonian variant of multiple system atrophy: A systematic review and meta-analysis," *PLoS One*, vol. 12, no. 12, p. e0189897, Dec. 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0189897.

[51] R. K. J. Brown, N. I. Bohnen, K. K. Wong, S. Minoshima, and K. A. Frey, "Brain PET in Suspected Dementia: Patterns of Altered FDG Metabolism," *RadioGraphics*, vol. 34, no. 3, pp. 684–701, May 2014, doi: 10.1148/rg.343135065.

[52] J. A. Disselhorst, I. Bezrukov, A. Kolb, C. Parl, and B. J. Pichler, "Principles of PET/MR Imaging," *Journal of Nuclear Medicine*, vol. 55, no. Supplement 2, pp. 2S-10S, Jun. 2014, doi: 10.2967/jnumed.113.129098.

[53] H. Laufs, M. C. Walker, and T. E. Lund, "'Brain activation and hypothalamic functional connectivity during human non-rapid eye movement sleep: an EEG/fMRI study'--its limitations and an alternative approach," *Brain*, vol. 130, no. 7, pp. e75–e75, May 2007, doi: 10.1093/brain/awm084.

[54] W. Poewe, "Non-motor symptoms in Parkinson's disease," *Eur J Neurol*, vol. 15, no. s1, pp. 14–20, Apr. 2008, doi: 10.1111/j.1468-1331.2008.02056.x.

[55] K. R. Chaudhuri, D. G. Healy, and A. H. Schapira, "Non-motor symptoms of Parkinson's disease: diagnosis and management," *Lancet Neurol*, vol. 5, no. 3, pp. 235–245, Mar. 2006, doi: 10.1016/S1474-4422(06)70373-8.

[56] E. Rovini, C. Maremmani, and F. Cavallo, "How Wearable Sensors Can Support Parkinson's Disease Diagnosis and Treatment: A Systematic Review," *Front Neurosci*, vol. 11, Oct. 2017, doi: 10.3389/fnins.2017.00555.

[57] R. T. Sutton, D. Pincock, D. C. Baumgart, D. C. Sadowski, R. N. Fedorak, and K. I. Kroeker, "An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success," *NPJ Digit Med*, vol. 3, no. 1, p. 17, Feb. 2020, doi: 10.1038/s41746-020-0221-y.

[58] B. V. Patel *et al.*, "A randomized control trial evaluating the advice of a physiological-model/digital twin-based decision support system on mechanical ventilation in patients with acute respiratory distress syndrome," *Front Med (Lausanne)*, vol. 11, Oct. 2024, doi: 10.3389/fmed.2024.1473629.

[59] J. Mei, C. Desrosiers, and J. Frasnelli, "Machine Learning for the Diagnosis of Parkinson's Disease: A Review of Literature," *Front Aging Neurosci*, vol. 13, May 2021, doi: 10.3389/fnagi.2021.633752.

[60] Y. Ya *et al.*, "Machine Learning Models for Diagnosis of Parkinson's Disease Using Multiple Structural Magnetic Resonance Imaging Features," *Front Aging Neurosci*, vol. 14, Apr. 2022, doi: 10.3389/fnagi.2022.808520.

[61] D. L. Hall and J. Llinas, "An introduction to multisensor data fusion," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 1, pp. 6–23, 1997, doi: 10.1109/5.554205.

[62] B. Khaleghi, A. Khamis, F. O. Karray, and S. N. Razavi, “Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art,” *Information Fusion*, vol. 14, no. 1, pp. 28–44, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.inffus.2011.08.001.

[63] C. Donié, N. Das, S. Endo, and S. Hirche, “Estimating motor symptom presence and severity in Parkinson’s disease from wrist accelerometer time series using ROCKET and InceptionTime,” *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 19140, May 2025, doi: 10.1038/s41598-025-04263-2.

[64] N. L. W. Keijsers, M. W. I. M. Horstink, and S. C. A. M. Gielen, “Automatic assessment of levodopa-induced dyskinesias in daily life by neural networks,” *Movement Disorders*, vol. 18, no. 1, pp. 70–80, Jan. 2003, doi: 10.1002/mds.10310.

[65] C. Pérez-López *et al.*, “Assessing Motor Fluctuations in Parkinson’s Disease Patients Based on a Single Inertial Sensor,” *Sensors*, vol. 16, no. 12, p. 2132, Dec. 2016, doi: 10.3390/s16122132.

[66] U. Izhar, L. Piyathilaka, and D. M. G. Preethichandra, “Sensors for brain temperature measurement and monitoring – a review,” *Neuroscience Informatics*, vol. 2, no. 4, p. 100106, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.neuri.2022.100106.

[67] S. Oh *et al.*, “Bioelectronic Implantable Devices for Physiological Signal Recording and Closed-Loop Neuromodulation,” *Adv Funct Mater*, vol. 34, no. 41, Oct. 2024, doi: 10.1002/adfm.202403562.

[68] W. Tao, T. Liu, R. Zheng, and H. Feng, “Gait Analysis Using Wearable Sensors,” *Sensors*, vol. 12, no. 2, pp. 2255–2283, Feb. 2012, doi: 10.3390/s120202255.

[69] Z. Ren, S. Wang, and Y. Zhang, “Weakly supervised machine learning,” *CAAI Trans Intell Technol*, vol. 8, no. 3, pp. 549–580, Sep. 2023, doi: 10.1049/cit2.12216.

[70] A. C. A. de Araújo *et al.*, “Hand Resting Tremor Assessment of Healthy and Patients With Parkinson’s Disease: An Exploratory Machine Learning

Study," *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 8, Jul. 2020, doi: 10.3389/fbioe.2020.00778.

[71] S. T. Moore, H. G. MacDougall, and W. G. Ondo, "Ambulatory monitoring of freezing of gait in Parkinson's disease," *J Neurosci Methods*, vol. 167, no. 2, pp. 340–348, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.jneumeth.2007.08.023.

[72] J. Li and Y. Guo, "EEG Detection and Prediction of Freezing of Gait in Parkinson's Disease Based on Spatiotemporal Coherent Modes," *IEEE J Biomed Health Inform*, vol. 29, no. 4, pp. 2521–2533, Apr. 2025, doi: 10.1109/JBHI.2024.3496074.

ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: https://d2icp22po6iej.cloudfront.net/wp-content/uploads/2018/09/symptoms2.jpg

Εικόνα 2: https://www.hexaphysio.com/wp-content/uploads/2022/07/image-bloque-parkinson-1-lr-scaled.jpeg

Εικόνα 3: https://media.springernature.com/m685/springer-static/image/art%3A10.1038%2Fnrn.2017.25/MediaObjects/41583_2017_Article_BFnrn201725_Fig1_HTML.jpg

Εικόνα 4: https://www.physio-pedia.com/images/thumb/7/75/Parkinson_disease_symtpoms.png/635px-Parkinson_disease_symtpoms.png

Εικόνα 5: https://media.springernature.com/w580h326/nature-cms/uploads/collections/Digital_technologies_for_Parkinson_s_disease_1200x675-b9c2bc901f89eed7e551e4ae2d21c03a.jpg

Εικόνα 6: https://parkinson.lu/images/200_years_parkinsons_disease_research.jpg

Εικόνα 7: https://cheme.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj17096/files/styles/responsive_large/public/media/image/annual_report_article_2_image_1_0.png?itok=QuXmqIKs

Εικόνα 8: https://www.mdsabstracts.org/wp-content/uploads/2017/05/0037-001290_001.png

Εικόνα 9: https://www.mdpi.com/sensors/sensors-20-02605/article_deploy/html/images/sensors-20-02605-g001.png

Εικόνα 10: https://media.springernature.com/lw1200/springer-static/image/art%3A10.1038%2Fs41531-023-00602-0/MediaObjects/41531_2023_602_Fig2_HTML.png

Εικόνα 11: https://i0.wp.com/www.stemlynsblog.org/wp-content/uploads/2020/04/Screenshot-2020-04-27-13.55.23.png?fit=1670%2C1098&ssl=1

Εικόνα 12: https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2666351124000469-gr4.jpg

Εικόνα 13: https://cdn.images.express.co.uk/img/dynamic/151/590x/parkinsons-disease-cure-3d-scans-monkey-brains-nerve-cells-treatment-1471452.webp?r=1627984932627

Εικόνα 14: https://movementdisorders.onlinelibrary.wiley.com/cms/asset/1f3dd7e4-819e-4af0-97cb-7dfd410d1bad/mill031.gif

Εικόνα 15: https://christchurchcranbrook.org/wp-content/uploads/2019/05/bigstock-Parkinson-s-disease-64550221.jpg

Εικόνα 16: https://www.frontiersin.org/files/Articles/828355/fnhum-16-828355-HTML/image_m/fnhum-16-828355-g001.jpg