

Συσχέτιση Κινητικών και Κινηματικών Παραμέτρων με Λειτουργικές Μεθόδους Αξιολόγησης Ισορροπίας και Βάδισης στη Νόσο Πάρκινσον: Κριτική Ανασκόπηση Αρθρογραφίας

Παπακώστα Ε.¹, Λαμπροπούλου Σ.²

1. Υποψήφια Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια ΠΜΣ «Θεραπευτική Άσκηση», Τμήμα Φυσικοθεραπείας, Σχολή Επιστημών Αποκατάστασης Υγείας Πανεπιστημίου Πατρών
2. Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Φυσικοθεραπείας, Σχολή Επιστημών Αποκατάστασης Υγείας Πανεπιστημίου Πατρών

Υποβλήθηκε: 31 Μαρτίου 2025 /
Αναθεωρήθηκε: 22 Απριλίου 2025 /
Εγκρίθηκε: 25 Απριλίου 2025

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός: Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να διερευνήσει κατά πόσο οι αντικειμενικοί τρόποι αξιολόγησης της ισορροπίας και της βάδισης, όπως η κινητική και κινηματική ανάλυση, συσχετίζονται με τις λειτουργικές κλίμακες οι οποίες χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση ασθενών με ΝΠ κατά τη συνήθη κλινική πρακτική.

Μέθοδοι: Πρόκειται για αφηγηματική κριτική ανασκόπηση βιβλιογραφίας, χωρίς τυπική εφαρμογή πρωτοκόλλου PRISMA. Η αναζήτηση έγινε στις βάσεις δεδομένων PubMed, ScienceDirect και Google Scholar, ενώ οι όροι αναζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν «Parkinson disease», «balance», «gait», «motion analysis», «force platform», «Vicon system», «functional assessments». Επιλέχθηκαν άρθρα μεταξύ του 2015-2025, τα οποία αφορούσαν μεθόδους ακριβείας, όπως κινητική και κινηματική αξιολόγηση του στατικού ελέγχου και της βάδισης σε ασθενείς με ΝΠ καθώς και μελέτες οι οποίες διερευνούσαν τις ποσοτικές συσχετίσεις αυτών με λειτουργικές κλίμακες (mini-BESTest, BBS, FGA).

Αποτελέσματα: Βρέθηκε μέτρια συσχέτιση μεταξύ κινητικών και κινηματικών παραμέτρων με την BBS ($\rho = -0.55$), ενώ κινηματικές παράμετροι οι οποίες καταγράφηκαν μέσω φορητών αισθητήρων αδράνειας (IMU's) παρουσίασαν εξίσου μέτρια συσχέτιση με την UPDRS ($\rho = 0.5$). Επιπλέον, η FGA συσχετίστηκε ισχυρά με την ταχύτητα βάδισης ($\rho = 0.77$) και μετρίως με το μήκος βήματος ($\rho = 0.54 - 0.59$), ενώ βαθμολογία ≤ 18 προέβλεπε πτώσεις εντός εξαμήνου (ICC= 0.81).

Συμπεράσματα: Η συνδυαστική χρήση αντικειμενικών δεικτών και κλινικών εργαλείων παρέχει πολυδιάστατη και πιο ακριβή εικόνα της λειτουργικότητας των ασθενών με ΝΠ. Σε πρώιμα στάδια (H&Y 1-2) οι IMU's και οι δυναμοπλατφόρμες ανιχνεύουν ήπιες αποκλίσεις, ενώ σε ενδιάμεσα και προχωρημένα στάδια συνίσταται ο συνδυασμός των mini-BESTest/FGA με αντικειμενικές μετρήσεις για την έγκαιρη πρόληψη πτώσεων.

Λέξεις-κλειδιά: Νόσος Πάρκινσον, βάδιση, ισορροπία, λειτουργικές κλίμακες, ανάλυση κίνησης.

Επικοινωνία: Παπακώστα Ε., up1075912@ac.upatras.gr
Λαμπροπούλου Σ. lampropoulou@upatras.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η νόσος του Πάρκινσον (ΝΠ) χαρακτηρίζεται από ποικίλες κινητικές διαταραχές, συμπεριλαμβανομένων των διακυμάνσεων στην ισορροπία και στη βάδιση, οι οποίες οδηγούν σε σημαντικά αυξημένο κίνδυνο πτώσεων (Bao et al., 2023).

Υπολογίζεται ότι περίπου το 60% των ασθενών με ΝΠ θα βιώσουν τουλάχιστον ένα επεισόδιο πτώσης, το οποίο σχετίζεται άμεσα με τραυματισμούς, περιορισμό της κινητικότητας και επιδείνωση της ποιότητας ζωής (Sotirakis et al., 2024). Κατά συνέπεια, η έγκυρη και λεπτομερής αξιολόγηση της

ισορροπίας και του προτύπου βάδισης είναι καίριας σημασίας, τόσο για την πρόληψη των πτώσεων, όσο και για την παρακολούθηση της εξέλιξης της νόσου (Bao et al., 2023).

Η αξιολόγηση της στατικής και δυναμικής ισορροπίας και της βάδισης σε ασθενείς με ΝΠ συνήθως διενεργείται μέσω κλινικών μεθόδων και δοκιμασιών. Εργαλεία όπως η κλίμακα Berg Balance Scale (BBS), η mini-Balance Evaluation Systems Test (mini-BESTest), η αξιολόγηση λειτουργικής βάδισης (FGA) και η δοκιμασία Timed Up and Go (TUG) χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση της στατικής και δυναμικής ισορροπίας και της βάδισης σε ασθενείς με ΝΠ (Winser et al., 2019). Αν και οι εν λόγω κλίμακες έχουν εδραιωθεί ως αξιόπιστα και έγκυρα μέσα αξιολόγησης στην ΝΠ (Bao et al., 2023), η υποκειμενική φύση της παρατήρησης από τον εξεταστή και η περιορισμένη εφαρμογή τους σε ελεγχόμενες εργαστηριακές ή κλινικές συνθήκες υπονομεύουν την εξωτερική τους εγκυρότητα (Atrsaei et al., 2021). Έχει τεκμηριωθεί ότι η ταχύτητα βάδισης κατά τις καθημερινές δραστηριότητες μπορεί να υπολείπεται έως και κατά 30% σε σύγκριση με τις μετρήσεις στην κλινική αξιολόγηση (Atrsaei et al., 2021). Επιπλέον, οι λειτουργικές κλίμακες χαρακτηρίζονται από περιορισμένο εύρος βαθμολογίας (π.χ. 0-4 ή 0-56 βαθμοί), γεγονός το οποίο οδηγεί σε φαινόμενα «οροφής» και «δαπέδου». Πολλοί ασθενείς σε ήπια στάδια ΝΠ επιτυγχάνουν την ανώτατη βαθμολογία στη BBS αποκρύπτοντας, ωστόσο, ήπιες διαταραχές ισορροπίας (King et al., 2012). Αντίστοιχα, το 89% των ασθενών με ήπια συμπτωματολογία αξιολογούνται με 0-1 (καθόλου/ήπια διαταραχή) στο αντικείμενο βάδισης της Movement Disorder Society – Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS), μιας κλίμακας η οποία χρησιμοποιείται διεθνώς για την εκτίμηση της σοβαρότητας και της εξέλιξης της νόσου. Ωστόσο, καταγράφονται μετρήσιμες αποκλίσεις στη βάδιση, τις οποίες η κλίμακα δεν ανιχνεύει (Hill et al., 2021).

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, έχουν αναπτυχθεί εργαστηριακές μέθοδοι υψηλής ακρίβειας για την αξιολόγηση της ισορροπίας και βάδισης, όπως οι δυναμοπλατφόρμες για ανάλυση των μετατοπίσεων του κέντρου πίεσης (CoP) και οι

φορητοί αισθητήρες αδράνειας (IMU's) για κινηματική ανάλυση της βάδισης (Horak et al., 2013). Οι τεχνικές αυτές παρέχουν ποσοτικές μετρήσεις υψηλής ανάλυσης (π.χ. ακρίβεια εκατοστού) και επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση υπό πραγματικές συνθήκες (Merlo et al., 2025). Μελέτες τεκμηριώνουν, ότι οι ποσοτικές εμβιομηχανικές παράμετροι ανιχνεύουν διαταραχές ισορροπίας σε πρώιμα στάδια της ΝΠ, πριν αυτές καταστούν κλινικά εμφανείς (Atrsaei et al., 2021; Bao et al., 2023). Συγκεκριμένα, παθολογικές διαταραχές της μεταβλητότητας του CoP κατά την ήρεμη όρθια στάση έχουν καταγραφεί σε πρώιμο στάδιο ΝΠ, ακόμη και προτού εκδηλωθούν σαφή συμπτώματα (Taghizadeh et al., 2018). Αντίθετα, οι συμβατικές κλινικές δοκιμασίες, συνήθως, αποκαλύπτουν διαταραχές μόνο όταν αυτές έχουν εξελιχθεί σε βαθμό ο οποίος επηρεάζει ορατά τη λειτουργικότητα (Wodarski et al., 2023).

Η συσχέτιση των παραπάνω ευαίσθητων και ακριβείας τρόπων αξιολόγησης με τα λειτουργικά δεδομένα καταγραφής αποτελεί μείζον επιστημονικό ζήτημα. Μέσω της συσχέτισης μπορούμε να κατανοήσουμε σε ποιο βαθμό οι λειτουργικές μέθοδοι αντικατοπτρίζουν (ή παραλείπουν) κρίσιμες πτυχές της ισορροπίας και βάδισης (Wodarski et al., 2023). Παράλληλα, αναδεικνύονται τα ελλείμματα των κλινικών εργαλείων ως προς την πληρότητα και την ακρίβεια των πληροφοριών που παρέχουν (Merlo et al., 2025). Η παρούσα έρευνα εξέτασε τα πρόσφατα ερευνητικά δεδομένα που διερευνούν αυτές τις πτυχές σε ασθενείς με ΝΠ.

Σκοπός της παρούσας εργασίας, ήταν να διερευνήσει κατά πόσο οι αντικειμενικοί και ακριβείας τρόποι αξιολόγησης της ισορροπίας και της βάδισης, όπως η κινητική και κινηματική ανάλυση ή τα δεδομένα από εξειδικευμένες καταγραφές, συσχετίζονται με τις λειτουργικές κλίμακες οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στην αξιολόγηση ασθενών με ΝΠ. Επιδιώκεται η κριτική αποτύπωση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών των κλινικών εργαλείων ως προς την ακρίβεια και την πληρότητα με την οποία αποτυπώνουν τα αντίστοιχα μετρήσιμα μεγέθη.

ΜΕΘΟΔΟΙ

Η παρούσα εργασία ακολουθεί μία αφηγηματική

κριτική ανασκόπηση βιβλιογραφίας, χωρίς τυπική εφαρμογή πρωτοκόλλου PRISMA, με στοχευμένη αναζήτηση στις βάσεις δεδομένων «PubMed», «ScienceDirect» και «Google Scholar». Χρησιμοποιήθηκαν λέξεις – κλειδιά στα αγγλικά («Parkinson disease», «balance», «gait», «motion analysis», «force platform», «Vicon system», «functional assessments»), προκειμένου να εντοπιστούν σχετικές δημοσιεύσεις του χρονικού διαστήματος 2015-2025. Επιλέχθηκαν άρθρα τα οποία αφορούσαν αντικειμενικές μεθόδους αξιολόγησης της ισορροπίας και της βάδισης σε ασθενείς με ΝΠ, όπως τρισδιάστατη κινηματική ανάλυση (π.χ. Vicon system), συστήματα έμμεσης δυναμομετρίας (π.χ. force platforms) ή φορητοί αισθητήρες αδράνειας (π.χ. IMUs), καθώς και μελέτες οι οποίες διερευνούσαν τις ποσοτικές συσχετίσεις αυτών των αντικειμενικών και ακριβείας μετρήσεων με καθιερωμένες λειτουργικές κλίμακες (π.χ. mini-BESTest, BBS, FGA). Όλες οι πηγές προέρχονται από αγγλόφωνα περιοδικά με κριτές, διασφαλίζοντας τον επιστημονικό τους χαρακτήρα. Δεν εφαρμόστηκε πλήρης συστηματική ανασκόπηση, αλλά έγινε προσεκτική επιλογή αντιπροσωπευτικών άρθρων, τα οποία καλύπτουν τις βασικές τεχνολογικές κατηγορίες και περιλαμβάνουν ποσοτικές συγκριτικές αναλύσεις, ώστε να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα και η συνάφεια της βιβλιογραφικής σύνθεσης.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ακρίβειας και αντικειμενική αξιολόγηση ισορροπίας έναντι κλινικών δοκιμασιών

Οι ασθενείς με ΝΠ παρουσιάζουν συχνά διαταραχές ισορροπίας, οι οποίες αξιολογούνται κλινικά μέσω εργαλείων όπως η κλίμακα BBS, η δοκιμασία μονοποδικής στήριξης, η μικρή δοκιμασία εκτίμησης των συστημάτων ισορροπίας (mini-BESTest) και το «Pull Test» της MDS-UPDRS (Liu et al., 2020). Αντιθέτως, η αντικειμενική και ακριβείας αξιολόγηση στηρίζεται σε δυναμοπλατφόρμες (οι οποίες καταγράφουν τις μεταβολές του CoP και τις δυνάμεις αντίδρασης του εδάφους - GRF), καθώς και σε IMUs, οι οποίοι αποτυπώνουν σε τρεις άξονες τις επιταχύνσεις και τις γωνιακές ταχύτητες, διευκολύνοντας την ακριβή ποσοτικοποίηση των στατικών ταλαντώσεων του σώματος και των κινηματικών χαρακτηριστικών της βάδισης (King et al., 2012;

Álvarez et al., 2020). Τα πρόσφατα ερευνητικά δεδομένα, όπως τεκμηριώνεται παρακάτω, υποδεικνύουν ότι υπάρχει σημαντική αλλά μέτρια συσχέτιση μεταξύ ορισμένων παραμέτρων αυτών των μεθόδων αξιολόγησης (King et al., 2012; Picardi et al., 2020; Bao et al., 2023).

Συγκεκριμένα, η μελέτη των Bao et al. (2023), στην οποία συμμετείχαν 46 ασθενείς με ήπιο – μέτριο στάδιο ΝΠ (H&Y 1-2), συνέκρινε τη βαθμολογία της BBS με σταθερομετρικούς δείκτες CoP κατά την ορθοστάτηση, υπό συνθήκες ανοικτών και κλειστών ματιών σε δυναμοπλατφόρμα. Το εμβαδόν της 95 % ελλειπτικής περιοχής του CoP (95% prediction ellipse area) συσχετίστηκε αρνητικά με τη BBS ($\rho = -0.55$, $p = 0.001$), ενώ η κλίση υψηλών συχνοτήτων στο φάσμα ισχύος της ταλάντωσης, που αντανάκλα γρήγορες διορθωτικές κινήσεις, παρουσίασε μέτρια θετική συσχέτιση με τη BBS ($\rho \approx 0.48$, $p = 0.001$). Επιπλέον, διαρθρωτικοί δείκτες, όπως το σημείο τομής στο διάγραμμα διάχυσης του σταθερογραφήματος, εμφάνισαν επίσης μέτρια θετική συσχέτιση ($\rho \approx 0.40-0.50$, $p \leq 0.01$). Οι τιμές αυτές υποδηλώνουν ότι η BBS εξηγεί μόνο το 25 % της συνολικής διακύμανσης στα εργαστηριακά δεδομένα, γεγονός με σαφή κλινική σημασία: παρότι η λειτουργική κλίμακα απεικονίζει γενικά τα επίπεδα ισορροπίας, δεν ανιχνεύει επαρκώς τις υποκλινικές αστάθειες που αποκαλύπτουν οι αντικειμενικές μετρήσεις, οδηγώντας ενδεχομένως, σε καθυστερημένη παρέμβαση και αυξημένο κίνδυνο πτώσεων. Ανάλογα ευρήματα έχουν καταγραφεί και από τους Liu et al. (2023) ($\rho \approx -0.55$ μεταξύ εμβαδού ελλειπτικής περιοχής CoP και BBS), ενώ πειραματικές παρεμβάσεις έδειξαν ότι η μείωση της ταλάντωσης αντιστοιχεί σε κλινικά σημαντική βελτίωση (+2,3 βαθμοί στη mini-BESTest), υπογραμμίζοντας την αξία της ενσωμάτωσης αντικειμενικών δεικτών στην καθημερινή πρακτική αξιολόγησης (Giardini et al., 2018). Επιπρόσθετα, όσον αφορά τις παραμέτρους ισορροπίας, στη μελέτη των Hasegawa et al. (2019) καταγράφηκαν μέτριες συσχετίσεις μεταξύ της mini-BESTest και των σταθερομετρικών δεικτών ταλάντωσης (sway) του CoP, με τιμές οι οποίες κυμάνθηκαν από $\rho = 0.5$ έως $\rho = 0.58$. Επιπλέον, η υποκατηγορία «Αισθητηριακός Προσανατολισμός» της mini-BESTest εμφάνισε μέτρια συσχέτιση με τη μεταβλητότητα

της ταλάντωσης κατά την ήρεμη όρθια στάση ($p = 0.45$), ενώ η υποκατηγορία «Αντιδραστικός Έλεγχος Στάσης» παρουσίασε μέτριες συσχετίσεις με παραμέτρους από το “Push and Release test”, το οποίο αξιολογεί αυτόματες προσαρμοστικές αντιδράσεις ($p = 0.4-0.55$). Τα δεδομένα αυτά αναδεικνύουν ότι η mini-BESTest, αν και αποτελεί ένα αξιόπιστο και ευρέως διαδεδομένο κλινικό εργαλείο για την αξιολόγηση της ισορροπίας, συσχετίζεται μετρίως με εμβιομηχανικές παραμέτρους. Αυτό υποδηλώνει ότι η ενσωμάτωση εργαστηριακών μετρήσεων μπορεί να προσφέρει συμπληρωματική πληροφόρηση, εμπλουτίζοντας την κλινική εκτίμηση. Ωστόσο, παρότι οι δυναμοπλατφόρμες παρέχουν εξαιρετικά ακριβή δεδομένα για το CoP και τις GRF, η χρήση τους περιορίζεται σημαντικά από το υψηλό κόστος και τις ιδιαιτερότητες του χώρου εγκατάστασης, όπου απαιτείται εξειδικευμένο εργαστήριο και εκπαίδευση προσωπικού για βαθμονόμηση και λειτουργία. Επιπλέον, διαθέτουν περιορισμένη φορητότητα, καθώς καταγράφουν μόνο σύντομες δοκιμασίες (10-40 δευτερόλεπτα) και δεν επιτρέπουν μετρήσεις «εκτός εργαστηρίου» (Merlo et al., 2025).

Συνεπώς τα ευρήματα δείχνουν ότι σε πρώιμα στάδια ΝΠ (H&Y 1-2, όπου οι λειτουργικές κλίμακες παρουσιάζουν φαινόμενα «οροφής», οι δείκτες CoP μέσω δυναμοπλατφορμών (Bao et al., 2023; Taghizadeh et al., 2018) αποτυπώνουν ήπιες αποκλίσεις ισορροπίας. Σε ενδιάμεσα στάδια (H&Y 2-3), η mini-BESTest σε συνδυασμό με σταθερομετρικούς δείκτες μετατόπισης του CoP παρέχει μέτριες αλλά ουσιαστικές συσχετίσεις (Hasegawa et al., 2019), ενώ σε προχωρημένα στάδια (H&Y 3-4) η αυξημένα αστάθεια τεκμηριώνεται μέσω παραμέτρων CoP οι οποίες σχετίζονται άμεσα με υψηλό κίνδυνο πτώσεων (Kamieniarz et al., 2018).

Ακριβείας και αντικειμενική αξιολόγηση βάδισης έναντι κλινικών δοκιμασιών

Η βάδιση στη ΝΠ χαρακτηρίζεται από βραδυκίνησια η οποία εκδηλώνεται ως μειωμένη ταχύτητα, μικρότερο μήκος βημάτων, αυξημένο χρόνο διπλής στήριξης, καθώς και δυσκολίες στην έναρξη/διακοπή της κίνησης και στην εκτέλεση παράλληλων δραστηριοτήτων (Zhang et al., 2024). Στη συνήθη κλινική πρακτική, η βάδιση αξιολογείται ποσοτικά

κυρίως μέσω δοκιμασιών ταχύτητας (π.χ. 10MWT) και λειτουργικών κλιμάκων βάδισης (π.χ. Tinetti gait score), οι οποίες όμως δεν παρέχουν αναλυτικούς ποσοτικούς δείκτες για τις κινηματικές και ισορροπιστικές διαταραχές που αναδεικνύουν οι μέθοδοι αντικειμενικής αξιολόγησης (De Pasquale et al., 2025).

Ειδικότερα, ένα κεντρικό ερώτημα αφορά το κατά πόσο οι αντικειμενικές μετρήσεις βάδισης αντικατοπτρίζουν τη συνολική κινητική βαρύτητα στη ΝΠ, όπως αυτή αποτυπώνεται στην UPDRS και στο στάδιο Hoehn & Yahr. Στη μελέτη των Curtze et al. (2016), 104 ασθενείς με ήπια έως μέτρια-σοβαρή λειτουργική έκπτωση (στάδιο 2-4) σύμφωνα με την κλίμακα H&Y αξιολογήθηκαν με 34 παραμέτρους βάδισης και ισορροπίας μέσω IMU's, και εξετάστηκε η συσχέτισή τους: (α) με την υποκειμενική κινητική ικανότητα (PDQ-39 Mobility, κλίμακα ABC) και (β) με την κλινική βαρύτητα (UPDRS, Hoehn & Yahr). Στην κατάσταση χωρίς φαρμακευτική αγωγή, η ταχύτητα βάδισης, η γωνιακή ταχύτητα στροφής και το μήκος διασκελισμού παρουσίασαν τις ισχυρότερες συσχετίσεις με την UPDRS ($p \approx 0.5$) και με την αντιληπτή δυσκολία ($p \approx 0.4-0.5$), ενώ η διακύμανση του κέντρου πίεσης εμφάνισε μικρότερο βαθμό συσχέτισης. Αντίθετα, στην κατάσταση υπό φαρμακευτική αγωγή οι συσχετίσεις αποδυναμώθηκαν, υπογραμμίζοντας την ανάγκη αξιολόγησης σε κατάσταση χωρίς φαρμακευτική αγωγή για την αποκάλυψη «κρυφών» ελλειμμάτων. Επιπλέον, οι Carlson-Kuhta et al. (2019) επιβεβαίωσαν αντιστρόφως ανάλογη σχέση ($p \approx -0.51$) της γωνιακής ταχύτητας στροφής και του μήκους βήματος με το UPDRS, ενώ ο δείκτης SPARC (Beck et al., 2018) παρέχει ποσοτική εκτίμηση της ομαλότητας της βάδισης, η οποία συνάδει με τη βαρύτητα της νόσου.

Μελέτες έχουν αξιοποιήσει IMU's κατά την εκτέλεση του TUG, με ένα αισθητήρα τοποθετημένο στην ΟΜΣΣ να καταγράφει παραμέτρους όπως η ταχύτητα ανόδου από καθιστή θέση, η επιτάχυνση κατά την έναρξη βάδισης, η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα στροφής και ο χρόνος διπλής στήριξης, ενισχύοντας την ευαισθησία του TUG στην αντίχρεση κινητικών διαταραχών στη ΝΠ (Zhang et al., 2024; Di Lazzaro et al., 2020; Bernad-Elazari et al., 2016). Επιπλέον, η μελέτη των Wang et al.

(2024) αξιοποίησε δέκα αισθητήρες σε όλο το σώμα κατά τη διάρκεια του TUG για να συγκρίνει υπότυπους ΝΠ (υπότυπος με επικράτηση του τρόμου έναντι υπότυπου με επικράτηση βραδυκινησίας/αστάθειας) και να διερευνήσει τη σχέση με την κλινική βαρύτητα (UPDRS). Διαπιστώθηκε ότι σύνθετοι ψηφιακοί δείκτες, όπως η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα στροφής, διακρίνουν έγκαιρα τον υπότυπο με επικράτηση αστάθειας σε σύγκριση με υγιείς, ενώ παράμετροι οι οποίοι σχετίζονταν με τον κορμό, όπως η μέγιστη ταχύτητα ανόδου από καθιστή θέση, συσχετίζονται αντιστρόφως με τη σοβαρότητα της νόσου. Ακόμη, στην μελέτη των Hasegawa et al. (2019) στην οποία συμμετείχαν ασθενείς με ΝΠ ύστερα από τουλάχιστον 12 ώρες αποχής από φαρμακευτική αγωγή, μετρήσεις μέσω IMU's τοποθετημένων σε πολλαπλά ανατομικά σημεία ανέδειξαν μέτριες έως ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ της υποκατηγορίας «Δυναμική Βάδιση» της κλίμακας mini-BESTest και κινηματικών παραμέτρων βάδισης. Συγκεκριμένα, καταγράφηκαν ισχυρές θετικές συσχετίσεις με την ταχύτητα βάδισης ($\rho = 0.77$) και το μήκος διασκελισμού ($\rho = 0.61$), καθώς και μέτρια αρνητική συσχέτιση με τον χρόνο διπλής στήριξης ($\rho = -0.55$), υποδηλώνοντας ότι η κλίμακα αποτυπώνει ουσιαστικές κινηματικές πτυχές της βάδισης. Παρόλα αυτά, συνολικά τα ευρήματα αναδεικνύουν τη συμπληρωματική αξία των φορητών αισθητήρων αδράνειας στην ανίχνευση υποκλινικών μεταβολών στη βάδιση, οι οποίες παραμένουν αδιάγνωστες μέσω των συμβατικών κλινικών εργαλείων αξιολόγησης.

Ωστόσο, παρότι τα IMUs επιτρέπουν την παρακολούθηση στο φυσικό περιβάλλον με επανειλημμένες ή συνεχείς μετρήσεις, διαθέτουν ορισμένα μειονεκτήματα όπως: (α) οι συνεχείς επιταχύνσεις αθροίζονται, οδηγώντας σε σφάλμα θέσης εάν δεν γίνει τακτική επαναβαθμονόμηση, (β) λανθασμένη ζώνη τοποθέτησης ή κλίση στο σώμα του αισθητήρα αλλάζει σημαντικά τις μετρήσεις, (γ) οι αλγόριθμοι που διαχωρίζουν φαινόμενα όπως το FOG απαιτούν εκπαίδευση σε ευρύ δείγμα ασθενών, διαφορετικά αυξάνεται το ποσοστό ψευδώς θετικών/αρνητικών αποτελεσμάτων και (δ) αν και είναι φθηνότερα από τα εργαστηριακά συστήματα, ορισμένα αξιόπιστα μοντέλα δεν είναι πάντα διαθέσιμα σε όλες τις κλινικές (Prisco et al., 2024).

Επιπρόσθετα, στη ΝΠ έχει βρεθεί ότι η βαθμολογία της κλίμακας FGA σχετίζεται στενά με αντικειμενικές παραμέτρους βάδισης, οι οποίες μετρώνται μέσω συστημάτων τρισδιάστατης ανάλυσης κίνησης (3D motion capture systems), η οποία αποτελεί το «χρυσό πρότυπο» για κινηματική ανάλυση βάδισης (παρόλο που διαθέτει παρόμοια μειονεκτήματα με τις δυναμοπλατφόρμες) (Ehrhardt et al., 2020). Συγκεκριμένα, παρατηρείται ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας βάδισης και της FGA ($\rho \approx 0.77$), καθώς και μετρίου μεγέθους θετικές συσχετίσεις με το μήκος βήματος και τον ρυθμό βάδισης ($\rho \approx 0.54-0.59$) (Eldeeb & Abdelraheem, 2021). Αντίστροφα, χρονικές παράμετροι όπως η διάρκεια βήματος και ο χρόνος διπλής στήριξης συσχετίζονται σημαντικά και αρνητικά με την FGA ($\rho \approx -0.59$ έως -0.65 , $p < 0.01$), υποδηλώνοντας ότι χαμηλότερη βαθμολογία (FGA) συνδέεται με πιο αργό και παρατεταμένο μοτίβο βάδισης (Álvarez et al., 2020). Παράλληλα, ορισμένες χωρικές παράμετροι, όπως το πλάτος βάδισης, δεν φαίνεται να σχετίζονται σημαντικά με τη βαθμολογία της FGA (Pistacchi et al., 2017). Η διαγνωστική αξία της FGA ενισχύεται από την ικανότητά της να προβλέπει πτώσεις, καθώς βαθμολογία ≤ 18 προέβλεψε εμφάνιση πτώσεων εντός εξαμήνου με ευαισθησία 81 % και ειδικότητα 80 % (Marques et al., 2021). Συνολικά, τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνουν την εγκυρότητα της FGA ως εργαλείου λειτουργικής αξιολόγησης της βάδισης στη ΝΠ, αντανακλώντας δείκτες κινητικής βαρύτητας και κινδύνου πτώσεων.

Συνεπώς τα ευρήματα δείχνουν ότι σε πρώιμα στάδια ΝΠ (H&Y 1-2) οι IMUs και τα τρισδιάστατα συστήματα ανάλυσης κίνησης (3D motion capture systems) ανιχνεύουν υποκλινικές αλλαγές βάδισης, οι οποίες δεν είναι εύκολο να ανιχνευτούν μέσω των λειτουργικών κλιμάκων αξιολόγησης (Zhang et al., 2024; McGuirk et al., 2022). Σε ενδιάμεσα στάδια (H&Y 2-3), η χρήση IMUs κατά την εκτέλεση του TUG αναδεικνύει μέτριες-ισχυρές συσχετίσεις με υποκλίμακες της mini-BESTest (Hasegawa et al., 2019; Curtze et al., 2016). Σε προχωρημένα στάδια (H&Y 3-4), η FGA (Marques et al., 2021) καθώς και τα δεδομένα από πελματογράφους και δυναμοπλατφόρμες (Merlo et al., 2025) συνδέονται στενά με τον αυξημένο κίνδυνο πτώσεων, καθι-

στώντας τα πολύτιμα εργαλεία για την πρόγνωση και την αποκατάσταση.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η παρούσα εργασία αναδεικνύει ότι η σύγκριση μεταξύ αντικειμενικών και κλινικών μεθόδων για την αξιολόγηση της ισορροπίας και βάδισης σε ασθενείς με ΝΠ, παρουσιάζει σαφή πλεονεκτήματα και περιορισμούς και για τις δύο προσεγγίσεις.

Οι συνήθεις κλίμακες αξιολόγησης ισορροπίας (π.χ. BBS, Tinetti) σχεδιάστηκαν για ηλικιωμένους με κίνδυνο πτώσεων και εμφανίζουν φαινόμενο «οροφής» στα ήπια στάδια (H&Y 1-2) (Krzysztoń et al., 2018) και φαινόμενο «δαπέδου» στα προχωρημένα στάδια (H&Y 4-5) (Schlenstedt et al., 2016), περιορίζοντας την ικανότητά τους να καταγράφουν επιδείνωση ή βελτίωση πέραν ορισμένων ορίων (Park et al., 2018). Επιπλέον, οι αθροιστικές βαθμολογίες τους δεν διαχωρίζουν τις επιμέρους λειτουργικές συνιστώσες (δυναμική σταθερότητα, αντιδραστική ικανότητα, ακρίβεια τοποθέτησης ποδιού), ενώ ταυτόχρονα είναι εξαρτώμενες από την υποκειμενική κρίση του εξεταστή και τη συνεργασία, την κόπωση ή το στρες του ασθενή σε ένα στιγμιότυπο λειτουργίας (π.χ. κατάσταση χωρίς φαρμακευτική αγωγή έναντι υπό φαρμακευτική αγωγή) (Bao et al., 2023). Αντιθέτως, αντικειμενικές μέθοδοι όπως η σταθερομετρία (κινητικές καταγραφές μετατόπισης του κέντρου πίεσης) και τα συστήματα κινηματικής ανάλυσης παρέχουν συνεχείς ή επαναλαμβανόμενες μετρήσεις υψηλής ανάλυσης (χιλιοστά, μοίρες, χιλιοστά του δευτερολέπτου), αποτυπώνοντας τόσο τη διεύθυνση της αστάθειας (προσθιοπίσθια έναντι πλαγιοπλάγιας) όσο και το φάσμα συχνοτήτων των ταλαντώσεων (υψηλή συχνότητα αντανακλαστικών διορθώσεων έναντι χαμηλής συχνότητας για αναζήτηση σταθερότητας), συλλαμβάνοντας σπάνια επεισόδια (π.χ. πάγωμα βάδισης) και επιτρέποντας στοχευμένες παρεμβάσεις (De Pasquale et al., 2025). Εξαίρεση στο πεδίο των λειτουργικών εργαλείων αποτελεί η mini-BESTest, η οποία έχει σχεδιαστεί για την αποτίμηση ευρύτερου φάσματος παραμέτρων ισορροπίας, εμφανίζει μειωμένα φαινόμενα «οροφής/δαπέδου» και υψηλότερη ευαισθησία σε κλινικές μεταβολές (Krzysztoń et al., 2018), αλλά και η FGA η οποία καθίσταται πολύτιμη για την έγκαιρη ανίχνευση πτώσεων σε ΝΠ (Marques et al., 2021).

Συνεπώς, ανάλογα με την βαρύτητα της κινητικής διαταραχής φαίνεται ότι:

(α) **Σε πρώιμα στάδια (H&Y 1-2)**, όπου οι λειτουργικές κλίμακες εμφανίζουν γρήγορα φαινόμενα «οροφής», η χρήση IMUs ή 3D motion capture systems επιτρέπει την ανίχνευση ήπιων αποκλίσεων στη βάδιση και την ισορροπία (Zhang et al., 2024; McGuirk et al., 2022)., (β) **Σε ενδιάμεσα στάδια (H&Y 2-3)**, η mini-BESTest σε συνδυασμό με IMUs κατά την εκτέλεση TUG παρέχει ένα πλουσιότερο πλαίσιο αξιολόγησης, εντοπίζοντας σημεία που η λειτουργική κλίμακα μόνο της πιθανώς δεν θα κατέγραφε (Curtze et al., 2016; Mancini et al., 2025) και

(γ) **Σε προχωρημένα στάδια (H&Y 3-4)**, όπου ο κίνδυνος πτώσεων είναι υψηλός, οι δυναμοπλατφόρμες και οι πελματογράφοι παρέχουν ακριβή εκτίμηση κινδύνου πτώσεων και βοηθούν στον σχεδιασμό εξειδικευμένων προγραμμάτων αποκατάστασης (Kamieniarz et al., 2018).

Περιορισμοί και μελλοντικές κατευθύνσεις

Κόστος και διαθεσιμότητα: Πολυάριθμοι κλινικοί χώροι, ιδιαίτερα μακριά από μεγάλα πανεπιστημιακά κέντρα, δεν διαθέτουν πόρους για μεγάλα εργαστηριακά συστήματα. Η αξιολόγηση κόστους – αποτελεσματικότητας των IMUs συσκευών σε σχέση με τη βελτίωση της πρόγνωσης των πτώσεων χρειάζεται περαιτέρω μελέτη (Mancini et al., 2025; Prisco et al., 2024).

Τυποποίηση πρωτοκόλλων: Η έλλειψη κοινά αποδεκτών πρωτοκόλλων (π.χ. αριθμός αισθητήρων, ταχύτητα βάδισης) δυσχεραίνει τη σύγκριση δεδομένων μεταξύ διαφορετικών ομάδων και κέντρων (Merlo et al., 2025). Απαιτούνται διεθνείς κατευθυντήριες γραμμές για τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων βάδισης από IMUs.

Μεγάλες και μακροχρόνιες μελέτες: Οι περισσότερες μελέτες έχουν μικρό δείγμα (< 50 ασθενείς) και σύντομη διάρκεια (6 – 12 μήνες). Για να αξιολογηθεί η χρησιμότητα των ψηφιακών δεικτών ως προγνωστικοί παράγοντες εξέλιξης της νόσου, χρειάζονται μελέτες παρακολούθησης > 2 ετών με μεγαλύτερα δείγματα (Curtze et al., 2016; Mancini et al., 2025).

Ικανοποίηση ασθενών και συμμόρφωση: Η διαθεσιμότητα φορητών συσκευών και η προσαρμογή τους σε καθημερινές δραστηριότητες απαιτεί

εκπαίδευση ασθενών και αξιολόγηση άνεσης. Χωρίς κατάλληλη συμμόρφωση, τα δεδομένα μπορεί να μην είναι αξιόπιστα (Prisco et al., 2024).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση αντικειμενικών δεικτών στη διαδικασία αξιολόγησης σε συνδυασμό με τις κλινικές μεθόδους, προσφέρει μια πολυδιάστατη και πιο ακριβή εικόνα της λειτουργικότητας σε ασθενείς με ΝΠ. Η πρόκληση είναι να διατηρηθεί η ισορροπία ανάμεσα σε κόστος, διαθεσιμότητα και ακρίβεια, με έμφαση σε πρωτόκολλα τα οποία επιτρέπουν συγκρίσιμα και εφαρμόσιμα αποτελέσματα στην κλινική πράξη.

Δηλώσεις

Χρηματοδότηση: Η παρούσα εργασία δεν έλαβε χρηματοδότηση.

Σύγκρουση συμφερόντων: Οι συγγραφείς δηλώνουν ότι δεν υφίσταται σύγκρουση συμφερόντων.

Ηθική έγκριση: Δεν απαιτείται για ανασκόπηση δημοσιευμένης βιβλιογραφίας.

Δήλωση για χρήση τεχνητής νοημοσύνης (TN) στην επιστημονική συγγραφή: Οι συγγραφείς δηλώνουν ότι δεν χρησιμοποιήθηκε κανένα λογισμικό παραγωγικής Τεχνητής Νοημοσύνης (όπως μοντέλα γλώσσας μεγάλου μεγέθους, εφαρμογές δημιουργίας κειμένου, κ.λπ.) στη διαδικασία σύνταξης, δομής ή ανάλυσης δεδομένων της συγκεκριμένης εργασίας.

REFERENCES

1. Álvarez I, Latorre J, Aguilar M, Pastor P, Llorens R. (2020) Validity and sensitivity of instrumented postural and gait assessment using low-cost devices in Parkinson's disease. *J Neuroeng Rehabil.*, 11;17 (1):149. doi: 10.1186/s12984-020-00770-7.
2. Atrsaei, A., Corrà, M.F., Dadashi, F. (2021) Gait speed in clinical and daily living assessments in Parkinson's disease patients: performance versus capacity. *npj Parkinsons Dis.*, 7;(24) <https://doi.org/10.1038/s41531-021-00171-0>.
3. Bao W, Tan Y, Yang Y, Chen K, Liu J. (2023) Correlation of balance posturographic parameters during quiet standing with the berg balance scale in patients with parkinson's disease. *BMC Neurol.*, 6;23(1):362. doi: 10.1186/s12883-023-03386-1.
4. Bernad-Elazari H, Herman T, Mirelman A, Gazit E, Giladi N, Hausdorff JM. (2016) Objective characterization of daily living transitions in patients with Parkinson's disease using a single body-fixed sensor. *J Neurol.*, 263(8):1544-51. doi: 10.1007/s00415-016-8164-6.
5. Curtze C, Nutt JG, Carlson-Kuhta P, Mancini M, Horak FB. (2016) Objective Gait and Balance Impairments Relate to Balance Confidence and Perceived Mobility in People With Parkinson Disease. *Phys Ther.*;96(11): 1734-1743. doi: 10.2522/ptj.20150662.
6. De Pasquale, P., Bonanno, M., De Marchis, C., et al. (2025). Beyond clinical scales: an observational study on instrumental gait analysis and biomechanical patterns in patients with Parkinson's disease. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, 1541240.
7. Di Lazzaro G, Ricci M, Al-Wardat M, Schirinzi T, Scalise S, Giannini F, Mercuri NB, Saggio G, Pisani A. (2020) Technology-Based Objective Measures Detect Subclinical Axial Signs in Untreated, de novo Parkinson's Disease. *J Parkinsons Dis.*, 10(1):113-122. doi: 10.3233/JPD-191758.
8. Ehrhardt A, Hostettler P, Widmer L, Reuter K, Petersen JA, Straumann D, Filli L. (2020) Fall-related functional impairments in patients with neurological gait disorder. *Sci Rep.*, 3;10(1):21120. doi: 10.1038/s41598-020-77973-4.
9. Eldeeb, H.M., Abdelraheem, H.S. (2021) Functional gait assessment in early and advanced Parkinson's disease. *Egypt J Neurol Psychiatry Neurosurg.*, 57, 145. <https://doi.org/10.1186/s41983-021-00399-w>.
10. Hasegawa N, Shah VV, Carlson-Kuhta P, Nutt JG, Horak FB, Mancini M. (2019) How to Select Balance Measures Sensitive to Parkinson's Disease from Body-Worn Inertial Sensors-Separating the Trees from the Forest. *Sensors.*, 28;19(15):3320. doi: 10.3390/s19153320.
11. Hill EJ, Mangleburg CG, Alfradique-Dunham I, Ripberger B, Stillwell A, Saade H, Rao S, Fagbongbe O, von Coelln R, Tarakad A, Hunter C, Dawe RJ, Jankovic J, Shulman LM, Buchman AS, Shulman JM. (2021) Quantitative mobility measures complement the MDS-UPDRS for characterization of Parkinson's disease heterogeneity. *Parkinsonism Relat Disord.*, 84:105-111. doi: 10.1016/j.parkreldis. 2021. 02.006.
12. Horak FB, Mancini M. (2013) Objective biomarkers of balance and gait for Parkinson's disease using body-worn sensors. *Mov Disord.*, 15;28(11):1544-

51. doi: 10.1002/mds.25684.
13. Kamieniarz A, Michalska J, Brachman A, Pawłowski M, Słomka KJ, Juras G. (2018) A posturographic procedure assessing balance disorders in Parkinson's disease: a systematic review. *Clin Interv Aging.* 12;13:2301-2316. doi: 10.2147/CIA.S180894.
14. King LA, Priest KC, Salarian A, Pierce D, Horak FB. (2012) Comparing the Mini-BESTest with the Berg Balance Scale to Evaluate Balance Disorders in Parkinson's Disease. *Parkinsons Dis.*, 2012:375419. doi: 10.1155/2012/375419.
15. Krzysztoń K, Stolarski J, Kochanowski J. (2018) Evaluation of Balance Disorders in Parkinson's Disease Using Simple Diagnostic Tests-Not So Simple to Choose. *FrontNeurol.*, 31;9:932. doi: 10.3389/fneur.2018.00932.
16. Marques LBF, Moreira BS, Ocarino JM, Sampaio RF, Bastone AC, Kirkwood RN. (2021) Construct and criterion validity of the functional gait assessment-Brazil in community-dwelling older adults. *Braz J Phys Ther.*, 25(2):186-193. doi: 10.1016/j.bjpt.2020.05.008.
17. Mancini, M., Afshari, M., Almeida, Q., Amundsen-Huffmaster, S., Balfany, K., Camicioli, R., Corcos, D. M. (2025). Digital gait biomarkers in Parkinson's disease: Susceptibility/risk, progression, response to exercise, and prognosis. *npj Parkinson's Disease*, 11(1), 51. <https://doi.org/10.1038/s41531-025-00897-1>.
18. McGuirk, T. E., Perry, E. S., Sihanath, W. B., Riazati, S., & Patten, C. (2022). Feasibility of markerless motion capture for three-dimensional gait assessment in community settings. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16,867485. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.867485>
19. Merlo A, Cavazzuti L, Bò MC, Cavallieri F, Bassi MC, Damiano B, Scaltriti S, Fioravanti V, Di Rauso G, Portaro G, Valzania F, Lusuardi M, Campanini I. (2025) Instrumental balance assessment in Parkinson's disease and parkinsonism. A systematic review with critical appraisal of clinical applications and quality of reporting. *Front Neurol.*, 29;16:1528191. doi: 10.3389/fneur.2025.1528191.
20. Park J, Koh SB, Kim HJ, Oh E, Kim JS, Yun JY, Kwon DY, Kim Y, Kim JS, Kwon KY, Park JH, Youn J, Jang W. (2018) Validity and Reliability Study of the Korean Tinetti Mobility Test for Parkinson's Disease. *J Mov Disord.*, 11(1):24-29. doi: 10.14802/jmd.17058.
21. Pistacchi M, Gioulis M, Sanson F, De Giovannini E, Filippi G, Rossetto F, Zambito Marsala S. (2017) Gait analysis and clinical correlations in early Parkinson's disease. *Funct Neurol.*, 32(1):28-34. doi: 10.11138/fneur/2017.32.1.028.
22. Prisco, G., Pirozzi, M. A., Santone, A., Esposito, F., Cesarelli, M., Amato, F., & Donisi, L. (2024). Validity of wearable inertial sensors for gait analysis: A systematic review. *Diagnostics (Basel)*, 15(1), 36. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15010036>
23. Schlenstedt C, Brombacher S, Hartwigsen G, Weisser B, Möller B, Deuschl G. (2016) Comparison of the Fullerton Advanced Balance Scale, Mini-BESTest, and Berg Balance Scale to Predict Falls in Parkinson Disease. *Phys Ther.*, 96(4):494-501. doi: 10.2522/ptj.20150249.
24. Sotirakis C, Brzezicki MA, Patel S, Conway N, FitzGerald JJ, Antoniadou CA. (2024) Predicting future fallers in Parkinson's disease using kinematic data over a period of 5 years. *NPJ Digit Med.*, 5;7(1):345. doi: 10.1038/s41746-024-01311-5.
25. Taghizadeh G, Martinez-Martin P, Fereshtehnejad SM, Habibi SA, Nikbakht N, Alizadeh NH, Salehi S, Mehdizadeh M. (2018) Psychometric properties of the Berg balance scale in idiopathic Parkinson' disease in the drug off-phase. *Neurol Sci.*, 39(12):2175-2181. doi: 10.1007/s10072-018-3570-4.
26. Wang, H., Xu, Y., Chen, Z., & Pan, J. (2024). Instrumented Timed Up and Go with ten body worn sensors for motor-subtype differentiation in Parkinson's disease. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 21(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s12984-024-01023-7>.
27. Winser SJ, Kannan P, Bello UM, Whitney SL. (2019) Measures of balance and falls risk prediction in people with Parkinson's disease: a systematic review of psychometric properties. *Clin Rehabil.*, 33(12):1949-1962. doi: 10.1177/0269215519877498.
28. Wodarski P, Jurkoć J, Michalska J, Kamieniarz A, Juras G, Gzik M. (2023) Balance assessment in selected stages of Parkinson's disease using trend change analysis. *J Neuroeng Rehabil.*, 2;20(1):99. doi: 10.1186/s12984-023-01229-1.
29. Zhang, W., Ling, Y., Chen, Z. (2024) Wearable sensor-based quantitative gait analysis in Parkinson's disease patients with different motor subtypes. *npj Digit. Med.*, 7,169 <https://doi.org/10.1038/s41746-024-01163-z>.