



Υπάρχουν όρια στη δυνατότητα των αθλητικών προσθετικών μελών να μιμούνται τη φύση; Η σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς προσθετικών και βιολογικών ποδιών κατά το σπριντ σε στροφή: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Μπερμπερίδου Φανή

Ειδικό Εκπαιδευτικό Προσωπικό Τ.Ε.Φ.Α.Α., Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχής προσπάθεια για τη βελτιστοποίηση των δυνατοτήτων των αθλητικών προσθετικών ποδιών, ώθησε στην ανάπτυξη μιας κατεύθυνσης ερευνών που επικεντρώθηκε στην ανάλυση της μηχανικής και ενεργειακής απόδοσης των τεχνολογικά αναπτυσσόμενων προθέσεων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η απόδοση των προσθετικών ποδιών στα αγωνίσματα των σπριντ κατά το τρέξιμο στη στροφή. Σκοπός της ανασκόπησης ήταν η συλλογή, διασταύρωση και παρουσίαση των συμπερασμάτων των μελετών της τελευταίας εικοσαετίας (2004-2024) με ερευνητικό αντικείμενο την εμβιομηχανική ανάλυση του σπριντ σε στροφή και της μηχανικής συμπεριφοράς των προσθετικών ποδιών σε σχέση με τα βιολογικά πόδια αρτιμελών αθλητών. Για τον εντοπισμό των μελετών, εφαρμόστηκε το πρωτόκολλο PRISMA Statement 2020. Από τα ευρήματα των μελετών διαφάνηκε ότι τα προσθετικά πόδια δεν προσδίδουν πλεονέκτημα στους αθλητές, τουλάχιστον σε αποστάσεις που εμπεριέχουν στροφή. Κατέστη όμως σαφές, ότι η τεχνολογία των προσθετικών ποδιών αδυνατεί να μιμηθεί τη φυσική κίνηση και ειδικά όταν απαιτείται προσαρμογή σε ειδικές συνθήκες (κλίση εδάφους, αέρας, υγρασία). Παράγοντες που δείχνουν ότι επηρεάζουν την τεχνική του τρεξίματος σε στροφή με προσθετικά πόδια, είναι το ύψος (πάνω-κάτω του γόνατος) και η πλευρά του ακρωτηριασμού (εσωτερικά-εξωτερικά). Τα συμπεράσματα της ανασκόπησης υποδεικνύουν την αναγκαιότητα της τεχνολογικής εξειδίκευσης των προσθετικών ποδιών, αλλά ταυτόχρονα θέτουν προβληματισμούς σχετικά με τη δίκαιη κατάταξη των αθλητών σε αγωνιστικές κατηγορίες.

Λέξεις κλειδιά: Κλασικός Αθλητισμός, σπριντ σε στροφή, αθλητές με αναπηρία, προσθετικά πόδια

Εισαγωγή

Όλες οι κινήσεις στον Κλασικό Αθλητισμό εκτελούνται σύμφωνα με επιστημονικά τεκμηριωμένα και αποδεκτά κινητικά πρότυπα (κινησιογράμματα), τα οποία είναι προϊόντα εκτενών ερευνών σε εμβιομηχανικά εργαστήρια. Έτσι, τίθενται στη διάθεση της αθλητικής κοινότητας ακριβείς πληροφορίες για τα κινηματικά και δυναμικά χαρακτηριστικά της κάθε αθλητικής κίνησης, προσδιορίζοντας ταυτόχρονα και τις φυσικές παραμέτρους που είναι σημαντικές για την βέλτιστη εκτέλεση της τεχνικής. Η ανάπτυξή τους θα πρέπει να συμπεριληφθεί στη στοχοθεσία των

Διεύθυνση αλληλογραφίας:

Μπερμπερίδου Φανή
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Τμήμα Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού
Πανεπιστημιούπολη, 69100 Κομοτηνή

E-mail:

fbermper@phyed.duth.gr

προπονητικών προγραμμάτων. Συχνά, παρατηρείται μια φυσιολογική απόκλιση από τα κινητικά πρότυπα (τεχνικές) λόγω του προσωπικού στυλ, των διαφορετικών σωματομετρικών και φυσικών παραμέτρων, αλλά και του επιπέδου τεχνικής κατάρτισης του κάθε αθλητή (Bartlett, Wheat & Robins, 2007). Στη βάση της ωστόσο, η δομή όπως και ο στόχος/το αποτέλεσμα της τεχνικής κίνησης είναι κοινή.

Βασική προϋπόθεση για την άρτια εκτέλεση μιας τεχνικής και συνεπώς και για τη μέγιστη επίδοση, είναι ένα λειτουργικό μυοσκελετικό και νευρικό σύστημα (αρτιμέλεια) και η ικανότητα απόδοσης. Εάν αυτή η προϋπόθεση μεταφερθεί στον αθλητισμό των ατόμων με αναπηρία, όπου οι αθλητές ανταποκρίνονται με δυσκολία στις κινητικές και φυσιολογικές απαιτήσεις των «ιδανικών» αθλητικών τεχνικών, θα διαπιστωθεί ότι στην περίπτωσή τους μπορούν μόνο σε περιορισμένο βαθμό να αποτελέσουν πρότυπο κινητικό για αυτούς. Ο κύριος λόγος είναι, ότι το κάθε σώμα αθλητή αποτελεί μια εντελώς διαφορετική κινητική μονάδα, που φέρει τα χαρακτηριστικά της αναπηρίας, τα οποία του αποδίδουν κινητικές ιδιαιτερότητες και μειονεκτήματα που δεν έχουν προβλεφθεί και συμπεριληφθεί κατά τη δημιουργία των κινητικών προτύπων (Fairhurst, Bloom & Harvey, 2017; Funken, Willwacher, Heinrich, Müller, Hobara, Grabowski & Potthast, 2019).

Και δεν είναι μόνο η διαφοροποίηση μεταξύ ανάπηρων και μη ανάπηρων αθλητών που δυσχεραίνει την προσαρμογή των τεχνικών στον παραολυμπιακό αθλητισμό. Η κύρια δυσκολία της ερευνητικής προσέγγισης των αθλητικών κινήσεων, προκύπτει από την επιπρόσθετη μεγάλη εσωτερική διαφοροποίηση στους «παρα-αθλητές», λόγω των πολλών μορφών και βαθμών αναπηρίας και κατ' επέκταση, της πληθώρας διαφορετικών κινητικών επιπέδων (Vanlandewijck & Thompson, 2016). Επομένως, η δημιουργία μιας ιδανικής τεχνικής εκτέλεσης στον παραολυμπιακό αθλητισμό, ακόμα και για αθλητές με το ίδιο τύπο αναπηρίας, καθίσταται αδύνατη.

Αναπηρία και Κλασικός Αθλητισμός

Παρ' όλη όμως τη δυσκολία στον καθορισμό της ιδανικής τεχνικής για τον κάθε ένα ανάπηρο αθλητή, ο παραολυμπιακός αθλητισμός όχι μόνο υφίσταται αλλά έχει εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια (Baumgart, Blaauw, Mulder & Severin, 2022), επιδεικνύοντας ακόμα και επιδόσεις πολύ κοντινές σε αυτές των αθλητών χωρίς αναπηρία. Σε αυτό φυσικά, έπαιξε σημαντικό ρόλο η υποστήριξη της τεχνολογίας. Ειδικά στον «αυστηρό» Κλασικό Αθλητισμό, όπου όλες οι κινήσεις απαιτούν ακρίβεια εκτέλεσης αλλά και μέγιστη απόδοση, έχουν κάνει την εμφάνισή τους από πολύ νωρίς εξειδικευμένα τεχνολογικά βοηθήματα, τα οποία δεν υποκαθιστούν απλά την χαμένη λειτουργικότητα ενός μέλους, αλλά δρουν υποστηρικτικά ή αναπαράγουν στοχευμένα την «κινητική αποστολή» που είχε το μέλος κατά την εκτέλεση της αθλητικής τεχνικής.

Ο βαθμός και το είδος της τεχνολογικής παρέμβασης έχουν άμεση επίδραση στην διαφοροποίηση της τεχνικής εκτέλεσης των αγωνισμάτων, που μπορεί να κυμαίνεται από μικρή απόκλιση έως και τη δημιουργία νέων κινητικών «μονοπατιών» (Bermperidou, 2009). Για παράδειγμα, το κλασικό σπριντ μπορεί να πραγματοποιηθεί στον παραολυμπιακό Κλασικό Αθλητισμό με αγωνιστικό αμαξίδιο, οπότε το τρέξιμο μετατρέπεται σε τροχήλατη μετακίνηση και απομακρύνεται κατά πολύ από τα συνηθισμένα κινητικά πρότυπα, μπορεί όμως επίσης να εκτελεστεί σχεδόν άρτια και πανομοιότυπα με το τρέξιμο των αρτιμελών, με τη βοήθεια ειδικών για σπριντ προσθετικών ποδιών (λεπίδες-blades).

Προσθετικά μέλη στον Κλασικό Αθλητισμό

Ο βαθμός της τεχνολογικής παρέμβασης στην κινητική αλυσίδα, καθορίζεται όχι μόνο από το επίπεδο αναπηρίας και της χαμένης λειτουργικότητας, αλλά και από το επιθυμητό κινητικό αποτέλεσμα. Έτσι, τα τεχνητά μέλη διαφοροποιούνται ανάλογα με την ακρίβεια και τον σκοπό της κίνησης που θα καλύψουν: σε αντίθεση με μια πρόθεση για καθημερινή χρήση η οποία εξυπηρετεί μόνο την απλή μετακίνηση και είναι στην κατασκευή της και στην απόδοση πολύ απλή, ένα αθλητικό προσθετικό πόδι για τρέξιμο χαρακτηρίζεται από την ελαφριά κατασκευή του (ανθρακονήματα) και από την ικανότητα να καλύπτει με λεπτομέρεια και ακρίβεια τις απαιτήσεις συγκεκριμένου αγωνίσματος. Ειδικά στον πρωταθλητισμό, η κατασκευή γίνεται εξειδικευμένα και με στόχο την υποστήριξη μιας συγκεκριμένης λειτουργίας που είχε το ακρωτηριασμένο μέλος κατά την εκτέλεση της τεχνικής. Για παράδειγμα, το αριστερό πόδι ενός ρίπτη κατασκευάζεται έτσι ώστε να διαθέτει την κατάλληλη σκληρότητα (stiffness) για την κίνηση του κοντραρίσματος. Αντίθετα, το πόδι ενός σπρίντερ ή ενός άλτη θα πρέπει να έχει ιδιότητες επιστροφής της δύναμης που ασκεί κατά την ώθηση, δίνοντας την απαιτούμενη ενέργεια για να παραχθεί η αθλητική κίνηση (Rahnama, Soulis & Geil, 2024).

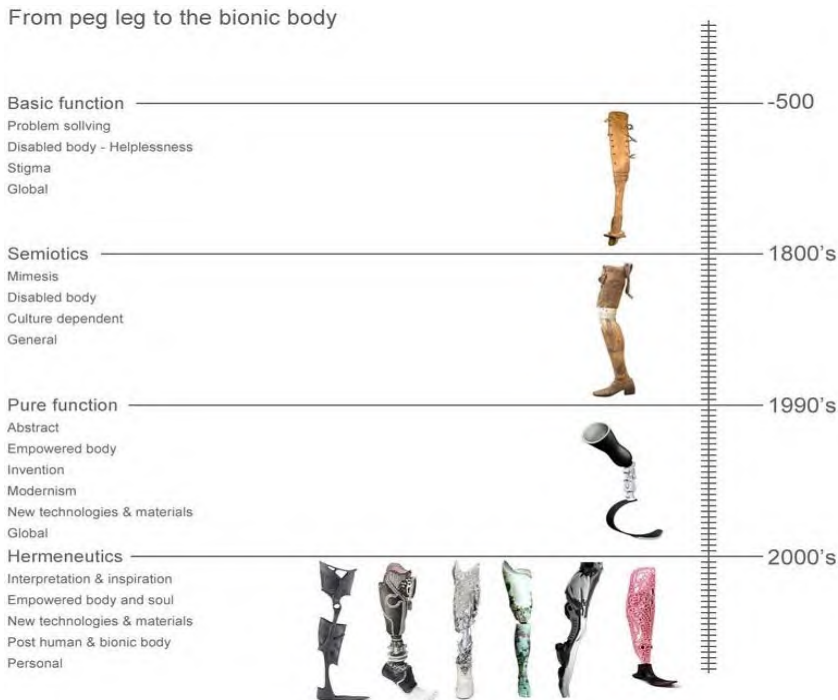
Ιστορική εξέλιξη των προσθετικών μελών

Η χρήση διάφορων μέσων/εφευρέσεων, αρχικά για την αναπλήρωση ενός χαμένου μέλους και κατόπιν για λειτουργικούς σκοπούς σε συνδυασμό με αισθητικούς, έχει τις ρίζες της βαθιά στην αρχαιότητα. Ήδη από πολύ νωρίς (Αίγυπτος, πριν περίπου 3.500 έτη) αναζητήθηκε η αναπαραγωγή ακρωτηριασμένων μελών μέσω υποτυπωδών κατασκευών, ώστε να υποστηριχθούν βασικές λειτουργίες όπως η όρθια στάση, η μετατόπιση και η ισορροπία. Μόλις στον μεσαίωνα δημιουργήθηκαν τα πρώτα προσθετικά πόδια, τα οποία διέθεταν μιας απλής μορφής άρθρωση γόνατος (Ventura & Shvo, 2017). Από την δεκαετία του 90' και μετά και ταυτόχρονα με την εξέλιξη της τεχνολογίας που υποστήριζε την δημιουργία όλο και πιο λειτουργικών προθέσεων (Εικόνα 1), παρατηρήθηκε μια ραγδαία βελτίωση στον αθλητισμό των ατόμων με ακρωτηριασμό, αφού έδωσε τη δυνατότητα να εκτελούνται κινήσεις πολύ κοντά στα πρότυπα των αρτιμελών (Kosmol, Bednarczuk, Molik, & Buszta, 2020).

Η προοδευτική εξειδίκευση και η προσθήκη της τεχνολογίας των μικροτσιπ στην άρθρωση του γόνατος των προσθετικών ποδιών, που επέτρεπε τον αυτόματο έλεγχο της επαναφοράς της κνήμης και την προσαρμογή σε διαφορετικές ταχύτητες κατά το τρέξιμο στο σπριντ, όχι μόνο βελτίωσαν ακόμη πιο πολύ την αρτιότητα της τεχνικής, αλλά συμπαρέσυραν και τις επιδόσεις των αθλητών, φτάνοντας σε ρεκόρ πολύ κοντά με αυτά των αρτιμελών (Gutfleisch, 2003). Από τους Παραολυμπιακούς Αγώνες του 2000 στο Σίδνεϋ, το ρεκόρ στα 100 μέτρα σπριντ αθλητών με ακρωτηριασμό κάτω από το γόνατο έχει φτάσει από 11.09 δευτερόλεπτα στα 9.77 δευτερόλεπτα σήμερα, κάνοντας σαφή τον ρόλο που διαδραμάτισαν οι τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των προσθετικών ποδιών. Μια εξέλιξη που αναμένεται να έχει μέλλον, εν όψη της συμπερίληψης λογισμικών τεχνητής νοημοσύνης (AI) στην παραπέρα βελτιστοποίηση των προθέσεων, δημιουργώντας ερωτηματικά αναφορικά με το που σταματάει η επιδιωκόμενη θεμιτή εξισορρόπηση της αναπηρίας και που αρχίζει το μη νόμιμο αθλητικό πλεονέκτημα μέσω της τεχνολογίας. Ήδη πριν από τους Ολυμπιακούς του Λονδίνου το 2012, τέθηκε για πρώτη φορά ο όρος

Technodopping στο «τραπέζι» της IAAF, με αφορμή το αίτημα του παραολυμπιονίκη Oscar Pistorius να αγωνιστεί μαζί με αρτιμελείς αθλητές.

Οι προβλέψεις για τη μελλοντική τεχνολογία των προσθετικών, συμπεριλαμβάνουν προσθετικά μέλη τα οποία δεν θα περιορίζονται μόνο στη μηχανική αναπαραγωγή της λειτουργίας του χαμένου άκρου, αλλά θα ενεργοποιούνται μυοηλεκτρικά (Yildiz, Shin & Kaufman, 2020), δηλαδή μέσω του εγκεφάλου και θα έχουν ίσως και αισθαντικότητα (αφή, αίσθηση κρύου-ζεστού), καθορίζοντας το σώμα του φορέα ως cyborg (συντομογραφία των λέξεων "cybernetic organism", δηλαδή οργανισμός που συνδυάζει βιολογικά και τεχνητά στοιχεία).



Εικόνα 1. Η εξέλιξη των προθέσεων ("Prosthesis evolution", Ventura & Shvo, 2017)

Υπόθεση Oscar Pistorius

Η υπόθεση του Oscar Pistorius είναι ένα κομβικό σημείο στην ιστορία του παραολυμπιακού αθλητισμού, προκαλώντας ένα παγκόσμιο debate περί εξέλιξης και νομιμότητας χρήσης βοηθημάτων υψηλής τεχνολογίας στον ευρύτερο αγωνιστικό αθλητισμό. Ο νοτιοαφρικανικός παραολυμπιονίκης που έτρεχε με διπλές προθέσεις-λάμες ("BladeRunner"), έχοντας στο ενεργητικό του ρεκόρ στα 100m, 200m και στα 400m πολύ κοντά σε αυτά των αθλητών χωρίς αναπηρία, αιτήθηκε να συμμετάσχει στους Ολυμπιακούς του Λονδίνου (2012), με αποτέλεσμα να εμπλακεί σε μια νομική διαμάχη με την Ομοσπονδία Κλασικού Αθλητισμού (τότε IAAF) όσον αφορά το αν οι αγωνιστικές λάμες που φορούσε του προσέδιδαν πλεονέκτημα κατά το τρέξιμο και σε σχέση με τους αρτιμελείς αθλητές (παραβιάζοντας τον Κανόνα 144.2 της IAAF). Η διαμάχη αυτή εξετάστηκε από το Διεθνές Αθλητικό Δικαστήριο, αφού ανατέθηκε η εμβιομηχανική μελέτη της κίνησης και η εξερεύνηση της πιθανής διαφορετικής ενεργειακής δαπάνης κατά το τρέξιμο με λάμες, στο Ινστιτούτο Εμβιομηχανικής και Ορθοπεδικής του Παν/μίου Αθλητικής Επιστήμης της Κολωνίας.

Η συγκεκριμένη μελέτη των Brüggemann, Arampatzis, Emrich & Potthast (2008) αποτελούνταν από εμβιομηχανική και φυσιολογική ανάλυση του τρεξίματος του Pistorius με λάμες, αλλά και μιας δεύτερης ομάδας αποτελούμενη από πέντε αρτιμελείς αθλητές με παρόμοια επίπεδα επίδοσης στα

400m. Οι δοκιμασίες, έλαβαν χώρα τόσο σε ελαστικό τάπητα, καταγράφοντας τα κινηματικά και δυναμικά χαρακτηριστικά της κίνησης όσο και σε στατικό ποδήλατο (κυκλοεργόμετρο), όπου έγινε η τακτική καταγραφή παραμέτρων αναερόβιας ικανότητας και της ενεργειακής δαπάνης. Επιπρόσθετα, μέσω ενός σαρωτή 3D καταγράφηκε η σωματική μάζα και οι ανθρωπομετρικές μετρήσεις όλων των αθλητών. Το κύριο ενδιαφέρον όμως της έρευνας εστιάστηκε στα τεχνικά στοιχεία και την απόδοση των προσθετικών ποδιών, που υπεβλήθησαν σε υλικοτεχνικούς ελέγχους. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι:

Ο Pistorius μπορούσε να τρέξει με τις προσθετικές του λάμες με την ίδια ταχύτητα με τους αρτιμελείς αθλητές, όμως με περίπου 25% λιγότερη κατανάλωση ενέργειας, αφού μόλις έφτανε στη μέγιστη ταχύτητά του, χρειαζόταν λιγότερη ενέργεια για τη διατήρησή της, σε σχέση με κάποιον με βιολογικά πόδια.

Η εμβιομηχανική ανάλυση αποκάλυψε σημαντικές διαφορές στη μηχανική του σπριντ του αθλητή με προσθετικά πόδια σε σύγκριση με τους αθλητές με βιολογικά, υπογραμμίζοντας πως η μέγιστη κάθετη δύναμη αντίδρασης του εδάφους (GRF) και το ποσοστό επιστροφής ενέργειας από τη λάμα δεν θα μπορούσε να αποδοθεί από ένα βιολογικό πόδι. Μάλιστα η επιστρεφόμενη ενέργεια εκτιμήθηκε να είναι σχεδόν τρεις φορές υψηλότερη από αυτή που επιτυγχάνει ένας αρτιμελής αθλητής κατά τη διάρκεια ενός μέγιστου σπριντ.

Η απώλεια ενέργειας της προσθετικής λάμας κατά τη φάση στήριξης μετρήθηκε στο 9,3%, ενώ η μέση απώλεια ενέργειας για τους αρτιμελείς αθλητές υπολογίστηκε στο 41,4%. Από αυτό συμπεραίνεται, ότι το μηχανικό πλεονέκτημα της λάμας σε σχέση με μια υγιή ποδοκνημική είναι πάνω από 30% και συνεπώς οι προσθετικές λάμες θα πρέπει να θεωρούνται τεχνικά βοηθήματα που παραβιάζουν τον Κανόνα 144.2 της IAAF.

Υπάρχουν όμως και κάποιες παράμετροι, όπως η συμπεριφορά της προσθετικής λάμας κατά το τρέξιμο σε στροφή ή σε βρεγμένη πίστα ταρτάν, ακόμα και ο έλεγχος της συχνότητας και του συντονισμού του τρεξίματος με δυνατό άνεμο, οι οποίες αποτελούν μερικά από τα μειονεκτήματα της χρήσης προσθετικών ποδιών-λάμες. Ίσως να είναι και αυτά, που μετά από ένσταση του Pistorius στο Διεθνές Αθλητικό Δικαστήριο (CAS), συντέλεσαν ώστε να αποφανθεί τελικά υπέρ του Pistorius (Court of Arbitration for Sport - CAS, 2008) επιτρέποντάς του να αγωνιστεί σε ανοιχτούς αγώνες με τους μη ανάπηρους αθλητές, ανοίγοντας δρόμο για μελλοντική συμπερίληψη σε επίσημους αγώνες και άλλων παραολυμπιακών αθλητών (Wolbring, 2008).

Ως αποτέλεσμα της αμφιλεγόμενης συμμετοχής του Pistorius και της μεγάλης συζήτησης που ξεκίνησε γύρω από τις δυνατότητες των προσθετικών ποδιών, ήταν η ανάπτυξη μιας κατεύθυνσης ερευνών που ασχολήθηκε στοχευμένα με την ανάλυση της μηχανικής, ενεργειακής και της κινητικής απόδοσης των όλο και καλύτερων τεχνολογικά προθέσεων, θέλοντας να απαντήσουν κυρίως στο ερώτημα: παρουσιάζουν τα αγωνιστικά προσθετικά μέλη και τα βιολογικά πόδια όμοια κινητική συμπεριφορά κατά το σπριντ; (Beck, Taboga & Grabowski, 2016).

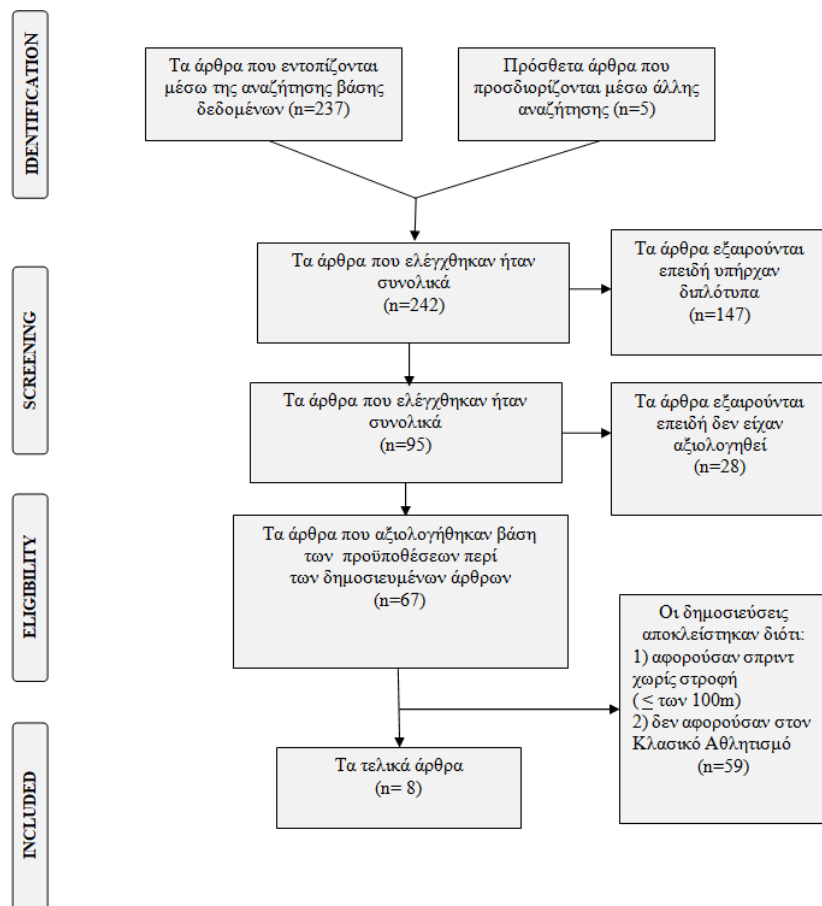
Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η συλλογή, διασταύρωση και παρουσίαση των σημαντικότερων ερευνών της τελευταίας εικοσαετίας (2004-2024), που είχαν ως ερευνητικό τους αντικείμενο την εμβιομηχανική ανάλυση του σπριντ σε στροφή των αθλητών με ακρωτηριασμό και τη μηχανική συμπεριφορά των προσθετικών τους ποδιών σε σχέση με τα βιολογικά πόδια αρτιμελών

αθλητών. Μέσω της ανασκόπησης, έγινε προσπάθεια να ξεχωρίσουν τα πιο σημαντικά σημεία στην τεχνική του τρεξίματος των αθλητών με προσθετικό πόδι σε στροφή, τα οποία εκτελούνται διαφορετικά και θα έπρεπε να ληφθούν υπ' όψη στην προπονητική διαδικασία και ιδιαίτερα στην ανάπτυξη των ειδικών παραμέτρων φυσικής κατάστασης απαραίτητα για την βελτιστοποίηση του τρεξίματος σε σπριντ άνω των 100m. Συμπληρωματικά, αντλήθηκαν πληροφορίες για νεότερα στοιχεία σχετικά με την μηχανική συμπεριφορά των πιο σύγχρονων και εξελιγμένων προσθετικών ποδιών, όπως και για την αναμενόμενη στο μέλλον εξέλιξη της τεχνολογίας πάνω στον τομέα αυτό.

Μέθοδος

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η περιγραφική βιβλιογραφική ανασκόπηση με εφαρμογή του πρωτοκόλλου PRISMA Statement 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analysis). Οι μελέτες εντοπίστηκαν μέσω των μηχανών αναζήτησης στις βάσεις δεδομένων Pub Med, Google Scholar και Semantic Scholar. Η αναζήτηση των άρθρων έγινε με τη βοήθεια του εργαλείου σύνθετης αναζήτησης και με λέξεις κλειδιά: “curve-running” and “prosthesis”, “curve-running” and “amputee” με χρονικό περιορισμό την τελευταία εικοσαετία (2004-2024). Τέθηκε ο περιορισμός οι ερευνητικές μελέτες να είναι στην αγγλική γλώσσα, να έχουν δημοσιευθεί σε έγκριτα περιοδικά και να έχουν μορφή πλήρους κειμένου (διάγραμμα ροής, Σχήμα 1). Η διερεύνηση της βιβλιογραφίας ολοκληρώθηκε στις 26 Απριλίου 2024.



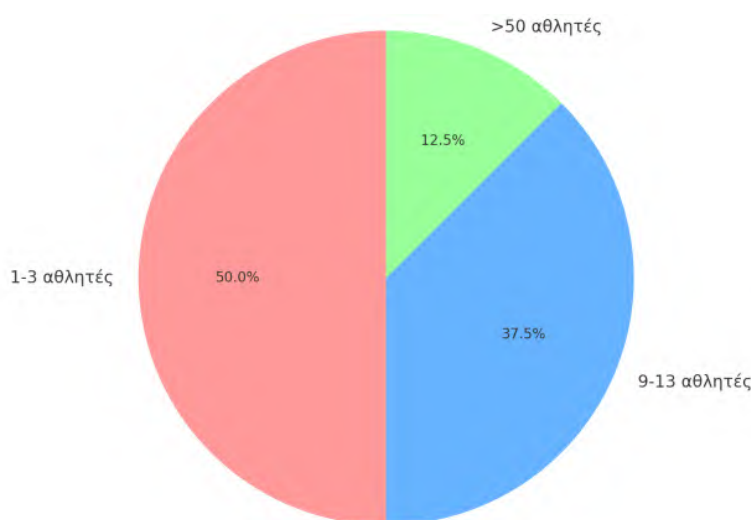
Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής τύπου PRISMA.

Αποτελέσματα

Από τις βάσεις δεδομένων και με τα κριτήρια που τέθηκαν, εντοπίστηκαν 242 τίτλοι άρθρων, από τα οποία σε πρώτη φάση εξαιρέθηκαν τα διπλότυπα, άρθρα που δεν είχαν μορφή πλήρους κειμένου και αυτά που δεν ήταν δημοσιευμένα σε έγκριτα περιοδικά ($n=175$), ενώ στη τελική φάση, θέτοντας ως βασικό κριτήριο την ανάλυση του σπριντ σε στροφή, αφαιρέθηκαν επιπλέον 59 άρθρα που είτε αφορούσαν το τρέξιμο αθλητών με προσθετικά πόδια σε ευθεία ($n=55$) ή δεν αφορούσαν στον Κλασικό Αθλητισμό. Τα αποτελέσματα της ανασκόπησης ανέδειξαν τα οκτώ άρθρα ($n=8$) που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Μια γενική παρατήρηση σχετικά με το μέγεθος του δείγματος στις οκτώ έρευνες που επιλέχθηκαν, είναι ότι η περιπτωσιολογική μελέτη ενός μεμονωμένου αθλητή ή μιας μικρής, ομοιογενούς ομάδας έως τριών αθλητών αποτελεί τη συνηθέστερη ερευνητική προσέγγιση (Σχήμα 2). Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη σημαντική εσωτερική διαφοροποίηση αθλητών με ακρωτηριασμό, τόσο ως προς τον βαθμό αναπηρίας όσο και ως προς το κινητικό τους επίπεδο, όταν εξετάζονται μεγαλύτερα δείγματα αθλητών. Αυτή η διαφοροποίηση δυσχεραίνει τη γενίκευση των συμπερασμάτων και ενδεχομένως να ενέχει τον κίνδυνο να μην αναδειχθούν παράγοντες και χαρακτηριστικά που μπορεί να είναι καθοριστικά σε μια συγκεκριμένη υποομάδα.

Εντούτοις, καταγράφηκαν και έρευνες με μεγαλύτερο δείγμα αθλητών, τα οποία χαρακτηριζόταν από κοινό βαθμό αναπηρίας ή ανήκαν στην ίδια αγωνιστική κατηγορία. Στις έρευνες αυτές, στόχος ήταν να διερευνηθούν τα κοινά χαρακτηριστικά τους κατά το τρέξιμο στη στροφή, συγκρίνοντάς τα με εκείνα αρτιμελών αθλητών. Επιπλέον, υπήρξαν έρευνες που εστίασαν σε εσωτερικές συγκρίσεις, αναλύοντας αθλητές με διαφορετική πλευρικότητα, ύψος και βαθμό ακρωτηριασμού. Στις περιπτώσεις αυτές, επιχειρήθηκε η σύνδεση αυτών των διαφορών με τα αντίστοιχα κινητικά και κινηματικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται κατά το σπριντ στη στροφή (Πίνακας 1).



Σχήμα 2. Μέγεθος δείγματος ερευνών.

Πίνακας 1. Σύνθεση δείγματος αθλητών και ερευνητική στοχοθεσία.

Έρευνα	N	Στόχος
Funken et al., 2014	1	Περιπτωσιολογική μελέτη
Hobara et al., 2015	59	Εσωτερική σύγκριση σε ομοειδή ομάδα
Taboga et al., 2016	11	Εσωτερική σύγκριση σε ομοειδή ομάδα αλλά και με ομάδα αρτιμελών (6)
Funken et al., 2017	1	Περιπτωσιολογική μελέτη
Li et al., 2018	13	Εσωτερική σύγκριση σε ομοειδή ομάδα
Hobara et al., 2018	9	Σύγκριση μεταξύ αθλητών με αμφίπλευρο και μονό ακρωτηριασμό
Funken et al., 2019	3	Καταγραφή χαρακτηριστικών ομοειδούς ομάδας και σύγκριση με ομάδα αρτιμελών (6)
Beck et al., 2022	1	Περιπτωσιολογική μελέτη και σύγκριση με ερευνητικά δεδομένα αρτιμελών

Από την παρούσα ανασκόπηση, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν έρευνες που μελέτησαν το ρόλο που παίζει η πλευρικότητα, δηλαδή η θέση του προσθετικού ποδιού (αριστερό ή δεξί πόδι) ως προς το κέντρο της στροφής, αφού όταν ο ακρωτηριασμός είναι μόνο στο ένα το πόδι, θεωρείται μειονέκτημα να είναι στο αριστερό, λόγω του ότι αυτό επιβαρύνεται περισσότερο κατά το αριστερόστροφο τρέξιμο στην πίστα του στίβου, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη χρονική διάρκεια στήριξης, μεγαλύτερη περιστροφική μετατόπιση του ισχίου και μικρότερο διασκελισμό (Li et al., 2018).

Στην περιπτωσιολογική μελέτη ενός διεθνούς επιπέδου αθλητή με μονόπλευρο ακρωτηριασμό, ο Funken και οι συνεργάτες του (2014) διερεύνησαν τις δυνάμεις αντίδρασης του εδάφους (GRFs) και τις ροπές που ασκούνται σε μια προσθετική λεπίδα κατά το τρέξιμο σε στροφή. Τα ευρήματα έδειξαν σημαντικές διαφορές στα κινητικά χαρακτηριστικά μεταξύ του τρεξίματος σε στροφή και του ευθύγραμμου τρεξίματος, με την κατεύθυνση της φόρτισης, τις τιμές των GRFs και των ροπών που δρουν στη λεπίδα να διαφέρουν ανάλογα με την κατεύθυνση του τρεξίματος (αριστερόστροφα-δεξιόστροφα) και την πλευρά του ακρωτηριασμού. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα, πως η πλευρικότητα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την κατασκευή βελτιστοποιημένων προσθετικών ποδιών για αθλητές με ακρωτηριασμό στο εσωτερικό πόδι, που θα αντισταθμίζουν τις διαφορές που προκύπτουν από τις δυνάμεις αντίδρασης του εδάφους (GRFs) κατά το τρέξιμο στη στροφή, ενώ χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για να διαπιστωθεί αν η πλευρικότητα αποτελεί το κύριο μειονέκτημα για την επίτευξη μέγιστης ταχύτητας.

Σε μεταγενέστερη περιπτωσιολογική μελέτη του Funken (2017) προστέθηκε στα παραπάνω το συμπέρασμα, ότι η το προσθετικό πόδι παρουσιάζει αξιοσημείωτα διαφορετικά εμβιομηχανικά μοτίβα σε σύγκριση με το υγιές πόδι κατά το σπριντ, αλλά και σε σύγκριση με τα πόδια των αρτιμελών. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε, πως το φορτίο που εφαρμόζεται στο προσθετικό πόδι εξαρτάται άμεσα από την κατεύθυνση του τρεξίματος στη στροφή, με τη συνολική κάθετη ώθηση να είναι χαμηλότερη όταν το επηρεασμένο άκρο βρισκόταν στο εσωτερικό της. Επίσης, αυτό που έκανε εντύπωση ήταν ότι το ανεπηρέαστο άκρο εμφάνισε διαφορετική μηχανική των αρθρώσεων κατά το τρέξιμο, σε σύγκριση με τους αρτιμελείς, συμπεραίνοντας ότι η απόδοση στο σπριντ σε στροφή, πέρα

από την πλευρικότητα, επηρεάζεται περαιτέρω από το ύψος και το είδος του ακρωτηριασμού, τις επηρεαζόμενες μυϊκές ομάδες και το είδος της πρόθεσης.

Η μελέτη του Taboga και συν. (2016) συμπληρώνει τα παραπάνω ευρήματα εξετάζοντας τη μέγιστη ταχύτητα τρέξιματος σε στροφή με μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας (ακτίνα 17,2m) από αυτή που συνηθίζεται στις διαδρομές της πίστας του στίβου, τόσο σε αθλητές χωρίς ακρωτηριασμό όσο και σε σπρίντερ με ακρωτηριασμό κάτω από το γόνατο. Η κινηματική ανάλυση του διασκελισμού και των δύο ομάδων έδειξε ότι έτρεξαν πιο αργά στις στροφές σε σύγκριση με το ευθύγραμμο τρέξιμο, καταγράφοντας μεγαλύτερο χρόνο επαφής του εσωτερικού ποδιού με το έδαφος. Ειδικά για τους σπρίντερ με ακρωτηριασμό, οι παρατεταμένοι χρόνοι επαφής του επηρεασμένου ποδιού φάνηκαν να περιορίζουν τη μέγιστη ταχύτητα τόσο σε ευθύγραμμο τρέξιμο όσο και σε στροφές, ειδικά όταν το προσθετικό πόδι ήταν εσωτερικά. Μάλιστα, οι σπρίντερ με ακρωτηριασμό σημείωσαν μεγαλύτερη μείωση ταχύτητας (3,9%) από τους αρτιμελείς, που αποτελεί, κατά τους συγγραφείς, μια μετρήσιμη διαφορά, ικανή να προσθέσει δύο δέκατα του δευτερολέπτου σε έναν αγώνα σπριντ 200m.

Στα παραπάνω ευρήματα έρχεται ο Funken και οι συνεργάτες του με μια νέα έρευνα (2019) να προσθέσουν και δυο νέους παράγοντες που επηρεάζουν το τρέξιμο σε στροφή με προσθετικό πόδι. Πέρα από την πλευρά του ακρωτηριασμού, παρατηρήθηκε και μια εξάρτηση της επίδοσης από το ύψος του ακρωτηριασμού (πάνω ή κάτω από το γόνατο) όπως και από το αν είναι μονόπλευρος ή αμφίπλευρος. Επιπρόσθετα, τονίστηκε για πρώτη φορά ο ρόλος που παίζει η διαδρομή στην οποία θα τρέξει ο αθλητής και συγκεκριμένα η ακτίνα καμπυλότητας, αφού η μικρότερη ακτίνα της καμπύλης της στροφής (στο πείραμα ήταν 36,3m που αντιστοιχεί περίπου στη πρώτη διαδρομή) φαίνεται να προκαλεί μεγαλύτερη πλευρική κλίση του σώματος (μεγαλύτερη κατά το δεξί διασκελισμό από ό,τι στον αριστερό), μεγαλύτερους χρόνους επαφής του εσωτερικού ποδιού όπως και μεταβολή στα χαρακτηριστικά παραγωγής δύναμης μεταξύ των άκρων.

Σε αντίθεση με τις παραπάνω έρευνες έρχονται τα ευρήματα έρευνας των Hobara και συν. (2015), οι οποίοι δεν παρατήρησαν καμία διαφορά ως προς τη θέση του προσθετικού ποδιού. Το συμπέρασμα αυτό, προέκυψε από τη βιντεοανάλυση 29 αγώνων και τη καταγραφή του μέσου όρου ταχύτητας, της συχνότητας και του μήκους διασκελισμού 59 αθλητών με ακρωτηριασμό. Οι ερευνητές συμπέραναν ότι η πλευρικότητα δεν αποτελεί παράγοντα που χρειάζεται να ληφθεί υπόψη για να διασφαλιστεί η ισονομία σε αγώνες σπριντ 200 και 400m, αναφέροντας όμως ως περιορισμούς της έρευνας τον μη υπολογισμό ατομικών χαρακτηριστικών (ύψος ακρωτηριασμού, είδος πρόθεσης, προπονητικό επίπεδο, κτλ.) και τη μη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων. Η άποψή τους βασίστηκε στο γεγονός, ότι δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στον αριθμό των συμμετεχόντων όπως και στην επίδοση στα 200m, ανάμεσα στους αθλητές (T42, T44) και τις αθλήτριες (T44) με δεξί ή αριστερό ακρωτηριασμό. Σε μεταγενέστερη έρευνά τους όμως (Hobara et al., 2018), παρατήρησαν ότι η μέση ταχύτητα των αθλητών με αμφίπλευρο ακρωτηριασμό ήταν 5.7% μεγαλύτερη από εκείνη των αθλητών με μονόπλευρο, παρουσιάζοντας χαμηλότερη συχνότητα βημάτων (-8.9%) και μεγαλύτερο μήκος βήματος (16.3%), οδηγώντας τους στο συμπέρασμα, ότι ακόμη και στην ίδια αγωνιστική κατηγορία (T42), εφαρμόζονται διαφορετικές χωροχρονικές στρατηγικές μεταξύ των αθλητών με αμφίπλευρους και μονόπλευρους ακρωτηριασμούς κατά το τρέξιμο αγωνιστικών αποστάσεων που εμπεριέχουν στροφή.

Τέλος, η μελέτη των Beck, Taboga & Grabowski (2022), ήταν η μόνη που προσπάθησε να συνδέσει τις διαφορές των κινητικών και κινηματικών παραμέτρων του σπριντ σε στροφή με φυσιολογικές παραμέτρους και να συγκρίνει τα αποτελέσματα των αθλητών με διαφορετικά επίπεδα και διαφορετική πλευρά ακρωτηριασμού με αυτά των αρτιμελών αθλητών. Από τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε πως η μέγιστη ταχύτητα τρεξίματος και το προφίλ αντοχής στο σπριντ των αθλητών με προσθετικά πόδια είναι παρόμοια με αυτά των αρτιμελών αθλητών, αλλά δεν είναι καλύτερα. Αντίθετα, η αρχική επιτάχυνση (0 έως 20m), η μέγιστη ταχύτητα γύρω από τις στροφές και ταχύτητα στη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου ($\dot{V}O_{2max}$) των αθλητών με προσθετικά πόδια ήταν 40%, 1-3% και 19% πιο χαμηλές σε σύγκριση με αυτές των αρτιμελών αθλητών, αντίστοιχα, αφήνοντας ένα ανοιχτό ερευνητικό πεδίο σχετικό με την εκκίνηση σε στροφή.

Πίνακας 2. Σύνοψη των μελετών ανασκόπησης βιβλιογραφίας.

Συγγραφείς	Συμμετέχοντες	Στόχος	Μεταβλητές	Εργαλεία	Αποτελέσματα
Funken et al. (2014)	Ένας (n=1) αθλητής διεθνούς επιπέδου, με μονόπλευρο ακρωτηριασμό στο αριστερό πόδι	Η ανάλυση των δυνάμεων αντίδρασης του εδάφους (GRFs) και των ροπών που δρουν στην λεπίδα τρεξίματος κατά τη διάρκεια ενός σπριντ σε στροφή	Μέγιστο sprint (με εισαγωγική φόρα 30m) σε ευθεία και σε στροφή, με τη φορά των δεικτών και αντίθετα (3 για κάθε συνθήκη, με προσγείωση του προσθετικού άκρου στο κέντρο δυναμοδαπέδου) Κινηματικά και κινητικά χαρακτηριστικά (χρόνος επαφής, οριζόντια ταχύτητα, GRF, ροπή) Η στροφή είχε καμπυλότητα ακτίνας 36,5m, που αντιστοιχεί σε αυτή του πρώτου διαδρόμου ενός τυπικού στίβου (WorldAthletics)	-Σύστημα καταγραφής κίνησης 3D (VICON) με 16 υπέρυθρες κάμερες (250 Hz) -Τέσσερα δυναμοδάπεδα (90 x 60cm, Kistler, 1000 Hz) -Ανακλαστήρες (markers) σε ανατομικά αναφορικά σημεία (28 στο προσθετικό πόδι και 2 στην άρθρωση ισχίου γόνατος) - Οι υπολογισμοί δεδομένων πραγματοποιήθηκαν στο MATLAB®	- οι δυνάμεις αντίδρασης του εδάφους (GRFs) δείχνουν διαφορές μεταξύ του τρεξίματος σε στροφή και του ευθύγραμμου τρεξίματος. -το μέγεθος και η κατεύθυνση της φόρτισης που εφαρμόζεται στη λεπίδα κατά το τρέξιμο σε στροφή εξαρτώνται άμεσα από την κατεύθυνση του τρεξίματος ή την πλευρά του ακρωτηριασμού αντίστοιχα. -η μελέτη παρέχει πληροφορίες για την κινητική του τρεξίματος αθλητών με ακρωτηριασμό σε στροφή και μπορεί να επηρεάσει την κατασκευή και τον σχεδιασμό των μελλοντικών γενεών προσθετικών μελών καθώς και τις διαγνωστικές μεθόδους απόδοσης.
Hobara et al. (2015)	Ελίτ Αθλητές /τριες 200 μέτρων με μονόπλευρο ακρωτηριασμό κάτω άκρων (N= 59). Κατηγοριοποιήθηκαν ως προς τον βαθμό αναπηρίας και την πλευρά ακρωτηριασμού Αποκλείστηκαν αθλητές με διπλό	Να εξεταστεί, αν οι αθλητές με πρόθεση στο αριστερό πόδι παρουσιάζουν μικρότερες επιδόσεις στο σπριντ 200m σε σύγκριση με αθλητές που τρέχουν με πρόθεση στο δεξί πόδι	Επίσημες επιδόσεις σε αγώνες 200m, από το 2008 (Πεκίνο) έως το 2012 (Λονδίνο) Πλευρά ακρωτηριασμού Κατάταξη (Classification) αθλητή	-Καταγραφή επίδοσης αγώνων από την επίσημη ιστοσελίδα του Παραολυμπιακού Οργανισμού (www.paralympic.org/) -Καταγραφή πλευράς και είδους ακρωτηριασμού μέσω διαθέσιμων διαδικτυακών μεταδόσεων και άλλων πηγών	-δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στον αριθμό των συμμετεχόντων όπως και στην επίδοση στα 200m, ανάμεσα στους αθλητές (T42, T44) και τις αθλήτριες (T44) με δεξί ή αριστερό ακρωτηριασμό. -η πλευρά του ακρωτηριασμού δεν αποτελεί παράγοντα που χρειάζεται να ληφθεί υπόψη για να διασφαλιστεί η ισονομία σε αγώνες σπριντ 200 και 400 m. - περιορισμοί της έρευνας: το προπονητικό επίπεδο, η μη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων και ο μη υπολογισμός ατομικών

Συγγραφείς	Συμμετέχοντες	Στόχος	Μεταβλητές	Εργαλεία	Αποτελέσματα
Taboga et al. (2016)	ακρωτηριασμό πάνω από το γόνατο Δεκαεπτά (N=17) δρομείς σπριντ: N=6 σπρίντερ αρτιμελείς (5 άνδρες/1 γυναίκα) N=6 σπρίντερ με ακρωτηριασμό στο δεξί κάτω άκρο (5 άνδρες/1 γυναίκα) N=5 σπρίντερ με ακρωτηριασμό στο αριστερό κάτω άκρο (2 άνδρες/3 γυναίκες)	Να μελετηθεί αν οι σπρίντερ με μονόπλευρο ακρωτηριασμό έχουν ασύμμετρα πόδια, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν διαφορετικά την απόδοση του τρεξίματος στις στροφές	Πραγματοποιήθηκαν 6 σπριντ 40m σε ταρτάν: 2 σε ευθεία 2 σε δεξιόστροφη στροφή (ακτίνα 17.2 m) και 2 σε αριστερόστροφη στροφή Υπολογίστηκε: η μέση ταχύτητα μεταξύ των 20 και 40m για κάθε πόδι: ο χρόνος επαφής, αιώρησης, εναέριας φάσης και ο χρόνος διασκελισμού.	-Κάμερα υψηλής ταχύτητας (210 καρέ/δευτ.) για την καταγραφή κινηματικών παραμέτρων -Ανάλυση των δεδομένων με λογισμικό Kinovea 0.8.15	χαρακτηριστικών (ύψος ακρωτηριασμού, είδος πρόθεσης, κτλ.) - οι αρτιμελείς αθλητές και οι αθλητές με ακρωτηριασμό έτρεξαν πιο αργά στις στροφές σε σύγκριση με το ευθύ τρέξιμο -οι ταχύτητες των αρτιμελών ήταν μόνο 1,9% διαφορετικές σε δεξιόστροφες και αριστερόστροφες στροφές, - οι αθλητές με ακρωτηριασμό ήταν 3,9% πιο αργοί στις στροφές με το προσθετικό πόδι εσωτερικά, σε σύγκριση με τις στροφές με το προσθετικό πόδι εξωτερικά.
Funken et al. (2017)	Ένας (n=1) κορυφαίος διεθνής αθλητής στα 100 και 200m, με μονόπλευρο ακρωτηριασμό στο επίπεδο του γόνατος, κατηγορίας T42.	Να διερευνηθεί η επίδραση της πλευράς του ακρωτηριασμού στην απόδοση στο sprint σε αθλητές με μονόπλευρο ακρωτηριασμό. Αναλυτικότερα: - να περιγράψει την κινηματική και κινητική των κάτω άκρων κατά το τρέξιμο σε στροφές	Ο αθλητής εκτέλεσε sprint σε ευθεία και σε στροφή με μέγιστη ταχύτητα, με (ευθεία) εισαγωγική φόρα 30m. Το τρέξιμο σε στροφή εκτελέστηκε αντίθετα προς τη φορά του ρολογιού και με τη φορά του ρολογιού. Η ακτίνα της καμπυλότητας της στροφής ορίστηκε στα 36.5m, που αντιστοιχεί στην πρώτη διαδρομή ενός στάνταρ στίβου 400 m. (WorldAthletics).	Τριδιάστατο σύστημα καταγραφής κίνησης (Vicon, Oxford, UK) με 16 υπέρυθρες (250 Hz). Τέσσερα δυναμοδάπεδα (Kistler, 1000 Hz), στη κορυφή της στροφής, ενσωματωμένα στην πίστα και καλυμμένα με την ίδια επιφάνεια (ταρτάν). Ενενήντα τρία ανακλαστήρες(markers) τοποθετήθηκαν σε ανατομικά σημεία αναφοράς στο σώμα του αθλητή και στη λεπίδα της πρόθεσης.	- η πρόθεση παρουσιάζει διαφορετικά εμβιομηχανικά μοτίβα σε σύγκριση με το υγιές πόδι -γενικότερα το σπριντ με πρόθεση δείχνει αξιοσημείωτα διαφορετική εμβιομηχανική από αυτή που παρατηρείται στο σπριντ αθλητών χωρίς ακρωτηριασμό. -το φορτίο που εφαρμόζεται στην πρόθεση εξαρτάται άμεσα από την κατεύθυνση του τρεξίματος -η εφαρμογή της κάθετης δύναμης αντίδρασης του εδάφους και η συνολική κάθετη ώθηση ήταν χαμηλότερες όταν το επηρεασμένο άκρο βρισκόταν στο εσωτερικό της. - η κατεύθυνση του τρεξίματος ή η πλευρά του ακρωτηριασμού, αντίστοιχα, επηρεάζει την

Συγγραφείς	Συμμετέχοντες	Στόχος	Μεταβλητές	Εργαλεία	Αποτελέσματα
		- σύνδεση μεταξύ της επηρεασμένης πλευράς και της ικανότητας να εκτελούν ισοδύναμες κινήσεις με το υγιές πόδι.	Κινηματικά και κινητικά χαρακτηριστικά	Για την ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB® και δημιουργήθηκε ένα τροποποιημένο μαθηματικό ανθρώπινο μοντέλο (ALASKA)	ικανότητα παραγωγής υψηλής ταχύτητας τρεξίματος, ειδικά στο τρέξιμο σε στροφή -η απόδοση στο σπριντ επηρεάζεται από την πλευρά, το ύψος και το είδος του ακρωτηριασμού, τις επηρεαζόμενες μυϊκές ομάδες και το είδος της πρόθεσης.
Li et al. (2018)	Δεκατρείς διεθνείς αθλητές 200m, με ακρωτηριασμό από το γόνατο	N=13 Να καθοριστεί εάν η κινηματική τρεξίματος σε στροφή, έμπειρων δρομέων με μονόπλευρη πρόθεση, σε αγώνα 200m, επηρεάζεται από την πλευρά του ακρωτηριασμού (εσωτερικό ή εξωτερικό πόδι) και από το ύψος του ακρωτηριασμού (πάνω ή κάτω από το γόνατο).	κινηματικοί παράμετροι διασκελισμού η απόσταση της μύτης του πέλματος από το έδαφος η κάμψη του γόνατος και του ισχίου η περιστροφή του ισχίου σε κάθε διασκελισμό	2 βιντεοκάμερες (Panasonic VHS, 50 Hz), συγχρονίστηκαν με τη γωνία του οπτικού άξονα τους να είναι περίπου 120 μοίρες μακριά, με ταχύτητα κλείστρου 1/500.	- μικρότερη χρονική διάρκεια στήριξης και χαμηλότερη περιστροφική μετατόπιση του ισχίου όταν το προσθετικό πόδι ήταν εξωτερικά - μικρότερο διασκελισμό και μεγαλύτερη χρονική διάρκεια στήριξης όταν το προσθετικό πόδι ήταν εσωτερικά. -δεν υπάρχει σαφές πλεονέκτημα από την θέση της πρόθεσης ως προς τη στροφή.
Hobara et al. (2018)	Εννιά διεθνείς αθλητές 200m, κατηγορίας T42, με μονόπλευρο και αμφίπλευρο ακρωτηριασμό	N=9 Να συγκρίνει τους χωροχρονικούς παράγοντες του σπριντ 200m μεταξύ αθλητών με αμφίπλευρο και	ο μέσος όρος ταχύτητας και η συχνότητα και το μήκος διασκελισμού (υπολογίστηκαν από τον αριθμό διασκελισμών σε	Αναλύθηκαν 29 αγώνες από δημόσια διαθέσιμες μεταδόσεις στο Διαδίκτυο.	-η μέση ταχύτητα των αθλητών με αμφίπλευρο ακρωτηριασμό άνω του γόνατος ήταν 5.7% μεγαλύτερη από εκείνη των αθλητών με μονόπλευρο. -οι αθλητές με αμφίπλευρο ακρωτηριασμό παρουσίασαν χαμηλότερη συχνότητα

Συγγραφείς	Συμμετέχοντες	Στόχος	Μεταβλητές	Εργαλεία	Αποτελέσματα
		μονόπλευρο ακρωτηριασμό άνω του γόνατος	συνδυασμό με τον επίσημο χρόνο του αγώνα).		βημάτων (-8.9%) αλλά μεγαλύτερο μήκος βήματος (16.3%) από τους αθλητές με μονόπλευρο ακρωτηριασμό. -ακόμη και στην ίδια αγωνιστική κατηγορία (T42), υπάρχουν διαφορετικές χωροχρονικές στρατηγικές μεταξύ αθλητών με αμφίπλευρους και μονόπλευρους ακρωτηριασμούς άνω του γόνατος, ειδικά για κατά τη διάρκεια των σπριντ των 200m.
Funken, et al. (2019)	Εννιά (N=9) δρομείς σπριντ: N=3 αθλητές διεθνούς επιπέδου με ακρωτηριασμό στα κάτω άκρα N=6 αρτιμελείς αθλητές εθνικού επιπέδου	Να αναλύσει και να συγκρίνει την κινητική του τρεξίματος των αθλητών με ακρωτηριασμό στα κάτω άκρα, με διαφορετικά επίπεδα και διαφορετική πλευρά ακρωτηριασμού με τη μηχανική τρεξίματος των αρτιμελών αθλητών.	Πραγματοποιήθηκαν 3 κούρσες σε στροφή 30m (ακτίνα καμπύλης 36.3m) με μέγιστη ταχύτητα ή υπομέγιστη ταχύτητα. Καταγράφηκαν: χρόνος επαφής ταχύτητα τρεξίματος μέγιστες τιμές της GRF (Ground Reaction Force)	-Σύστημα καταγραφής κίνησης 3D (VICON) με 16 υπέρυθρες κάμερες (250 Hz) -Τέσσερα δυναμοδάπεδα (90 x 60 εκατοστά, Kistler TM, 1000 Hz) για τον προσδιορισμό των κινητικών δεδομένων - Ανακλαστήρες (markers) σε ανατομικά αναφορικά σημεία και στα προσθετικά των αθλητών - Υπολογισμοί σχετικοί με τη GRF πραγματοποιήθηκαν στο MATLAB®	-Παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των αθλητών στην ικανότητα παραγωγής υψηλών κάθετων και κεντρομόλων δυνάμεων -Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν μια εξάρτηση της επίδοσης από ύψος του ακρωτηριασμού (πάνω ή κάτω από το γόνατο) και την πλευρά (αριστερά ή δεξιά) του ακρωτηριασμού. -Οι αθλητές με ακρωτηριασμό στο εσωτερικό πόδι (μονόπλευρο ή διπλό) φαίνεται να έχουν μειονεκτική θέση όσον αφορά την παραγωγή υψηλών ταχυτήτων τρεξίματος στις στροφές.
Beck et al. (2022)	Ο γρηγορότερος αθλητής στα 400m με διπλό ακρωτηριασμό, δρομικές προθέσεις Otto Bock 1E90 Sprinter	Να αποδειχθεί ότι κανένας αθλητής με διπλό ακρωτηριασμό κάτω άκρων με δρομικές προθέσεις, ακόμη και του	οριζόντια ταχύτητα και επιτάχυνση GRF μέγιστης ταχύτητας και αντοχή στην ταχύτητα ταχύτητας του σπριντ σε στροφή	-Δύο δυναμοδάπεδα (1000 Hz) για την μέτρηση της GRF. -σύστημα ραντάρ StalkerATSII (47 Hz) για την καταγραφή της οριζόντιας ταχύτητας και της επιτάχυνσης	- η μέγιστη ταχύτητα τρεξίματος και το προφίλ αντοχής στο σπριντ των αθλητών με προσθετικά πόδια είναι παρόμοια με αυτά των αρτιμελών αθλητών, αλλά δεν είναι καλύτερα - η αρχική επιτάχυνση (από 0 έως 20m), η μέγιστη ταχύτητα γύρω από τις στροφές και ταχύτητα στη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου

Συγγραφείς	Συμμετέχοντες	Στόχος	Μεταβλητές	Εργαλεία	Αποτελέσματα
		γρηγορότερου αθλητή 400m, δεν εμφανίζει σε καμία παράμετρο απόδοσης των 400m ανωτερότητα σε σχέση με τους αρτιμελείς αθλητές.	VO2max και ταχύτητα στη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου (vVO2max)	-δαπεδοεργόμετρο για την αξιολόγηση της μέγιστης ταχύτητας και της αντοχής στην ταχύτητα -κάμερα υψηλής ακρίβειας (240 Hz), για τον υπολογισμό της ταχύτητας των σπριντ σε στροφή - ανάλυση αερίων για τον υπολογισμό VO2max	(vVO2max) των αθλητών με προσθετικά πόδια ήταν 40%, 1-3% και 19% πιο χαμηλές σε σύγκριση με αυτές των αρτιμελών αθλητών, αντίστοιχα.

Συζήτηση

Η παρούσα μελέτη αφορούσε στη συλλογή, διασταύρωση και παρουσίαση των σημαντικότερων ερευνών της τελευταίας εικοσαετίας (2004-2024), που είχαν ως ερευνητικό τους αντικείμενο κινηματικά και κινητικά χαρακτηριστικά του σπριντ σε στροφή των αθλητών με ακρωτηριασμό και τη μηχανική συμπεριφορά των προσθετικών τους ποδιών σε σχέση με τα βιολογικά πόδια αρτιμελών αθλητών.

Η κύρια πληροφορία που αντλήθηκε μέσα από τις έρευνες ήταν η κατάρριψη του «μύθου» ότι τα προσθετικά πόδια προσδίδουν πλεονέκτημα στους αθλητές. Τα ευρήματα των ερευνών που έκαναν σύγκριση του σπριντ αρτιμελών και αθλητών με προσθετικό πόδι, υπογράμμισαν τη δυσκολία της απόδοσης των πολλαπλών μηχανικών λειτουργιών που απαιτούνται μέσω του τεχνητού ποδιού. Παρά το γεγονός ότι οι έρευνες οι οποίες έχουν αναλύσει το ευθύγραμμο σπριντ, καταγράφουν σχεδόν παρόμοια τελική απόδοση τεχνητών και βιολογικών ποδιών (Jones & Wilson, 2009; Hobara, Kobayashi, Mochimaru, 2015; Schmalz, Bellmann, Sottong & Altenburg, 2017), αξιοσημείωτο είναι ότι ικανός αριθμός από αυτές τις έρευνες (Weyand, Bundle, McGowan, Grabowski, Brown, Kram, Herr, H., 2009; Taboga, Kram & Grabowski, 2016; Beck, Taboga & Grabowski, 2022) καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι λειτουργικές ανομοιότητες που αναπόφευκτα παρατηρούνται ανάμεσά τους, είναι καθοριστικές, ακόμη και στο ευθύγραμμο τρέξιμο. Ο λόγος είναι ότι τα πόδια πρέπει να εκτελούν πολλές και διαφορετικές λειτουργίες κατά τη διάρκεια των φάσεων στήριξης και αιώρησης (Alt, Heinrich, Funken & Potthast, 2015), καθώς και κατά την εκκίνηση, επιτάχυνση και φάση σταθεροποίησης της ταχύτητας, απαιτήσεις που δεν μπορούν να καλυφθούν από μια μηχανική πρόθεση, λόγω της έλλειψης της άρθρωσης της ποδοκνημικής και της προσαρμοστικότητάς της σε οποιαδήποτε συνθήκη (Namiki et al., 2019; Hansen, Childress, Miff, Gard & Mesplay, 2004). Ωστόσο, οι κινητικές και κινηματικές διαφορές που κατέγραψαν οι έρευνες της ανασκόπησης ανάμεσα στο ευθύγραμμο σπριντ και στο σπριντ σε στροφή των αθλητών με ακρωτηριασμό, όπως μείωση ταχύτητας, μεγαλύτερη επιβάρυνση και χρόνος στήριξης εσωτερικού ποδιού, διαφορά στο μήκος διασκελισμού αριστερού-δεξιού ποδιού, και η μειωμένη απόδοση των αθλητών όταν το προσθετικό πόδι βρισκόταν εσωτερικά της στροφής, ταυτίζονται με τα ευρήματα των αντίστοιχων μελετών για τους αρτιμελείς.

Σε αυτό έρχεται να προσθέσει τα ευρήματά της μια πιο πρόσφατη έρευνα (Diaz et al., 2024), σύμφωνα με την οποία διαπιστώθηκε πως οι αθλητές επιτυγχάνουν χαμηλότερη μέγιστη ταχύτητα (v_{max}) σε καμπύλες σε σχέση με ευθείες διαδρομές, πιθανώς λόγω της διαφορετικής παραγωγής κεντρικής δύναμης αντίδρασης του εδάφους (GRF). Μάλιστα παρατηρήθηκε πως αυτή εξαρτάται από την ακτίνα της καμπύλης της στροφής, συνδέοντάς το με τις διαφορές στην παραγωγή της GRF μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού ποδιού του αθλητή σε σχέση με το κέντρο της καμπύλης. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι οι σπρίντερ αλλάζουν τη διάρκεια επαφής και ρυθμίζουν τις κεντρικές δυνάμεις αντίδρασης που παράγονται από το εσωτερικό και το εξωτερικό πόδι, καθώς η ακτίνα της καμπύλης της στροφής μειώνεται, περιορίζοντας τη μέγιστη ταχύτητα (v_{max}). Αυτό στην πράξη μπορεί να ερμηνευτεί πως ανάλογα με τον διάδρομο που τρέχει ο κάθε αθλητής, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μια διαφορά ακτίνας καμπύλης 10m περίπου μεταξύ 1ου (36,5m) και 8ου (45,1m) διαδρόμου μιας τυπικής πίστας στίβου, ο αθλητής παράγει διαφορετική GRF και αναπτύσσει διαφορετικά εμβιομηχανικά μοτίβα/τακτικές (Churchill et al., 2019). Η διαφοροποίηση αυτή γίνεται ακόμη πιο έντονη, όταν ένας αθλητής με ακρωτηριασμό χρειάζεται να αντισταθμίσει και το

μειονέκτημα που του προσδίδει το προσθετικό πόδι, ειδικά όταν αυτό βρίσκεται εσωτερικά της στροφής του σπριντ.

Αξιόλογες διαφορές παρατηρήθηκαν και στις φυσιολογικές παραμέτρους απόδοσης των 400m. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε πως η μέγιστη ταχύτητα τρεξίματος στο σπριντ και το προφίλ αντοχής των αθλητών με προσθετικά πόδια είναι παρόμοια με αυτά των αρτιμελών αθλητών. Αντίθετα, η αρχική επιτάχυνση, η μέγιστη ταχύτητα κατά τη διάρκεια του τρεξίματος στις στροφές, καθώς και η ταχύτητα στη μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου ($v\dot{V}O_{2max}$) των αθλητών με προσθετικά πόδια, βρέθηκαν σημαντικά χαμηλότερες σε σύγκριση με αυτές των αρτιμελών. Γεγονός που μπορεί να αντιβαίνει στην υπόθεση ότι οι αθλητές με προσθετικά μέλη, οι οποίοι δεν διαθέτουν πια τις μυϊκές ομάδες του μέλους λόγω του ακρωτηριασμού, δαπανούν λιγότερη ενέργεια κατά το τρέξιμο, εξαιτίας των ελαστικών στοιχείων του προσθετικού ποδιού τους (Brüggemann et al., 2008). Ενδιαφέρον θα είχε η ξεχωριστή διερεύνηση του ενεργειακού προφίλ κατά το ευθύγραμμο τρέξιμο σε σύγκριση με αυτό κατά τις στροφές από μελλοντικές μελέτες.

Τέλος, οι έρευνες που εστίασαν στην εσωτερική σύγκριση των αθλητών με προσθετικό/ά πόδι/ια, συμφωνούν ότι οι αθλητές με ακρωτηριασμό στο εσωτερικό πόδι φαίνεται να έχουν μειονεκτική θέση όσον αφορά την παραγωγή υψηλών ταχυτήτων τρεξίματος στις στροφές, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζουν μια εξάρτηση της επίδοσης και από το ύψος (πάνω ή κάτω από το γόνατο), το είδος του ακρωτηριασμού (μονόπλευρο ή διπλό) και τις επηρεαζόμενες μυϊκές ομάδες. Ειδικά για το τελευταίο, σε πρόσφατη έρευνά (Funken et al., 2023), όπου περιγράφεται το προφίλ δύναμης των μυών του ποδιού αρτιμελών σε σχέση με τη θέση του στο σπριντ σε στροφή (εσωτερικά-εξωτερικά), συμπεραίνεται ότι οι μέγιστες δυνάμεις των απαγωγών μυών και εξωτερικών στροφέων του ισχίου ήταν υψηλότερες (κατά 35% και 29% αντίστοιχα) στο εσωτερικό πόδι σε σύγκριση με το εξωτερικό. Αντίθετα, οι μέγιστες δυνάμεις των εκτεινόντων μυών του ισχίου και καμπτήρων μυών του γόνατος ήταν χαμηλότερες (κατά 30% και 16% αντίστοιχα) στο αριστερό πόδι σε σύγκριση με το δεξί, γεγονός που υποδηλώνει ότι είναι απαραίτητη μια διαφοροποιημένη διερεύνηση της ενεργοποίησης των επιμέρους μυών, καθώς διαφορετικοί μύες αναλαμβάνουν προωθητικές και/ή σταθεροποιητικές λειτουργίες σε διάφορα επίπεδα κίνησης, που ίσως για τους αθλητές με προσθετικό πόδι να είναι διαφορετικές. Οι πληροφορίες αυτές, όπως καταλήγουν, θα ήταν χρήσιμες στην εξειδίκευση της προπόνησης τεχνικής και δύναμης, με πιθανή θετική επίδραση στην αθλητική απόδοση.

Συμπεράσματα

Τη γενίκευση των συμπερασμάτων της παρούσας ανασκόπησης, περιορίζει ο μικρός αριθμός των ερευνών που προέκυψαν ($n=8$, μόνο 15% των τελικών άρθρων αφορούσαν στο σπριντ σε στροφή), που μπορεί να δικαιολογηθεί από τα μικρότερα ποσοστά ενασχόλησης των ατόμων με αναπηρία με τον υψηλό αθλητισμό σε σχέση με τους αρτιμελείς (McLoughlin, Fecske, Castañeda, Gwin, Graber, 2017), άρα την περιορισμένη διαθεσιμότητα σε δείγμα, αλλά και από την τεχνική δυσκολία μέτρησης δυναμικών παραμέτρων ενός σπριντ, όταν αυτό πρέπει να εκτελεστεί σε στροφή μιας τυπικής πίστας στίβου με ελαστικό τάπητα.

Έτσι, σε σύγκριση με τον μεγάλο αριθμό μελετών που ανέλυσαν το ευθύγραμμο σπριντ των αθλητών με προσθετικό/ά πόδι/ια, λίγες είναι οι έρευνες που μελέτησαν το τρέξιμο σε στροφή, αφήνοντας ένα ερευνητικά ακάλυπτο πεδίο που χρήζει μελλοντικής μελέτης. Εντούτοις, μέσω της ανασκόπησης, αναδείχθηκαν τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του τρεξίματος σε στροφή, με κοινό

συμπέρασμα, ότι η επίδοση έχει άμεση εξάρτηση από την πλευρά του ακρωτηριασμού (αριστερά ή δεξιά), το ύψος (πάνω ή κάτω από το γόνατο), το είδος του ακρωτηριασμού (μονόπλευρος ή αμφίπλευρος), τις μυϊκές ομάδες που επηρεάζει, όπως και το είδος της πρόθεσης.

Ιδιαίτερα τα ευρήματα σχετικά με τις δυνάμεις που ασκούνται στις αρθρώσεις, αποτελούν σημαντικές πληροφορίες για την προπονητική διαδικασία, αφού λόγω της υψηλής επιβάρυνσης του εσωτερικού ποδιού κατά το τρέξιμο σε στροφή (ειδικά αν είναι αυτό που «φοράει» προσθετικό πόδι), θα πρέπει να ενταχθούν στο πρόγραμμα ειδικές ασκήσεις ενδυνάμωσης, πρωτίστως για την πρόληψη τραυματισμών στο κολόβωμα του ποδιού που επιβαρύνεται περισσότερο, αλλά και για τη σταθεροποίηση των μυών της άρθρωσης του ισχίου και του γόνατος.

Η μειονεκτική θέση που αποδείχθηκε ότι έχουν οι αθλητές με ακρωτηριασμό στο εσωτερικό πόδι, φάνηκε να επηρεάζεται και από την ακτίνα καμπυλότητας της στροφής, ένα στοιχείο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε αποστάσεις άνω των 100m, είτε επιτρέποντάς τους να τρέχουν στους εξωτερικούς διαδρόμους του στίβου (6ο, 7ο, 8ο) ή με την ανάθεση μόνο των ευθειών στη σκυταλοδρομία 4×100m σε αθλητές με αριστερό ακρωτηριασμό. Μάλιστα, αποτελεί κοινή πρόταση όλων των ερευνών που παρουσιάστηκαν, ότι η πλευρά του προσθετικού ποδιού σε δρομικά αγωνίσματα, πρέπει να αποτελέσει έναν επιπλέον παράγοντα κατάταξης των αθλητών σε κατηγορία (Classification), εξασφαλίζοντας τον δίκαιο συναγωνισμό στους αγώνες 200m και 400m.

Στα πλαίσια αυτά, προτείνεται σε μελλοντικές έρευνες η διερεύνηση του «μειονεκτήματος» να επεκταθεί και στην εκτέλεση της εκκίνησης, αφού είναι το εισαγωγικό κομμάτι των 200-400m και εκτελείται πάντα σε στροφή, καθώς και του βαθμού επίδρασης παραγόντων όπως ο αέρας και το σπριντ σε υγρό ταρτάν.

Τέλος, όλες οι πληροφορίες που παρέχονται από μελέτες σχετικά με τις κινητικές και κινηματικές παραμέτρους του τρεξίματος σε στροφή και τη μηχανική συμπεριφορά των προθέσεων σε διαφορετικές συνθήκες, μπορούν να αξιοποιηθούν για το σχεδιασμό και τη εμβιομηχανική μοντελοποίηση εξειδικευμένων προσθετικών ποδιών για το τρέξιμο σε στροφές.

Βιβλιογραφία

- Alt, T., Heinrich, K., Funken, J., & Potthast, W. (2015). Lower extremity kinematics of athletics curve sprinting. *Journal of Sports Sciences*, 33(6), 552–560.
- Bartlett, R., Wheat, J. & Robins, M. (2007). Is movement variability important for sports biomechanists? *Sports Biomechanics*, 6(2), 224–243.
<https://doi.org/10.1080/14763140701322994>
- Baumgart, J.K., Blaauw, E.R., Mulder, R. & Severin, A.C. (2022). Changes in the Number of Medal Events, Sport Events, and Classes During the Paralympic Games: A Historical Overview. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3:762206. doi: 10.3389/fspor.2021.762206
- Beck, O.N., Taboga, P., Grabowski, A.M. (2016). Characterizing the Mechanical Properties of Running-Specific Prostheses. *PLoS ONE* 11(12): e0168298. doi:10.1371/journal.pone.0168298
- Beck, O.N., Taboga, P., Grabowski, A.M. (2022). Sprinting with prosthetic versus biological legs: insight from experimental data. *Royal Society Open Science*, 9, 211799.
<https://doi.org/10.1098/rsos.211799>
- Bermperidou, F. (2009). Funktionale Analyse von Bewegungen im Behindertensport unter besonderer Berücksichtigung des leichtathletischen Speerwurfs. *Thesis*. Universität Tübingen.
<https://publikationen.uni-tuebingen.de/xmlui/handle/10900/42126/discover>

- Brittain, I. (2006). Paralympic success as a measure of national social and economic development. *International Journal of Eastern Sport and Physical Education*. 4(1), 38-47.
- Brüggemann, G.P., Arampatzis, A., Emrich, F. & Potthast, W. (2008). Biomechanics of double transtibial amputee sprinting using dedicated sprinting prostheses. *Sports Technology*, 1, 220-227. <https://doi.org/10.1002/jst.63>
- Buckley, J.G. (2000). Biomechanical adaptations of transtibial amputee sprinting in athletes using dedicated prostheses. *Clinical Biomechanics* (Bristol, Avon). Jun;15(5):352-8. doi: 10.1016/s0268-0033(99)00094-7
- Buts, C., du Bois, C., Heyndels, B. & Jegers, M. (2013). Socioeconomic determinants of success at the Summer Paralympics. *Journal of Sports Economics*. 14(2), 133-147.
- Churchill, S.M., Trewartha, G., Salo, A. (2019). Bend sprinting performance: New insights into the effect of running lane. *Sports Biomechanics*, 18, 437-447. doi.org/10.1080/14763141.2018.1427279
- Court of Arbitration for Sport (CAS), 2008.
- Diaz GB, Alcantara RS, Grabowski AM. (2024). Maximum velocity and leg-specific ground reaction force production change with radius during flat curve sprinting. *Journal of Experimental Biology*, 15, 227(4): jeb246649. doi: 10.1242/jeb.246649.
- Fairhurst, K. E., Bloom, G. A., & Harvey, W. J. (2017). The learning and mentoring experiences of Paralympic coaches. *Disability and Health Journal*, 10, 240-246. <https://doi.org/10.1016/j.dhjo.2016.10.007>
- Funken, J., Willwacher, S., Böcker, J., Müller, R., Heinrich, K., & Potthast, W. (2014). Blade kinetics of a unilateral prosthetic athlete in curve sprinting. In *Proceedings on 32nd International Conference of Biomechanics in Sports*. Johnson City.
- Funken, J., Heinrich, K., Willwacher, S., Müller, R., Böcker, J., Hobara, H., Brüggemann, G.-P., Potthast, W. (2017). Leg amputation side determines performance in curve sprinting: a case study on a Paralympic medalist. *Sports Biomechanics*, 18(1), 75-87. <https://doi.org/10.1080/14763141.2017.138405>
- Funken, J., Heinrich, K., Willwacher, S., Müller, R., Böcker, J., Hobara, H., Brüggemann, G.-P., Potthast, W. (2019). Leg amputation side determines performance in curve sprinting: a case study on a Paralympic medalist. *Sports Biomechanics*, 18(1), 75-87. <https://doi.org/10.1080/14763141.2017.1384051>
- Funken J., Willwacher S., Heinrich K., Müller R., Hobara H., Grabowski A.M. & Potthast W. (2019). Long jumpers with and without a transtibial amputation have different three-dimensional centre of mass and joint take-off step kinematics. *Royal Society Open Science*, 6190107. <http://doi.org/10.1098/rsos.190107>
- Funken, J., Zedler, M., Lüdorff, Sv., Alt, T., Heinrich, K., & Potthast, W. (2023). Force profile of functional leg muscle groups in curve sprinting - preliminary results. *ISBS Proceedings Archive*: 41(1), Article 38.
- Gutfleisch, O. (2003). Peg legs and bionic limbs: The development of lower extremity prosthetics. *Interdisciplinary Science Reviews*. 28. 139-148. doi:10.1179/030801803225010368.

- Hansen, A. H., Childress, D. S., Miff, S. C., Gard, S. A., & Mesplay, K. P. (2004). The human ankle during walking: Implications for design of biomimetic ankle prostheses. *Journal of Biomechanics*, 37, 1467-1474.
- Hobara, H., Kobayashi, Y., Mochimaru, M. (2015). Spatiotemporal Variables of Able-bodied and Amputee Sprinters in Men's 100-m Sprint. *International Journal of Sports Medicine*. Jun; 36(6), 494-7. doi: 10.1055/s-0034-1387794.
- Hobara, H., Potthast, W., Sano, Y., Müller, R., Kobayashi, Y., Heldoorn, T.A., Mochimaru, M. (2015). Does amputation side influence sprint performances in athletes using running-specific prostheses? *Springerplus*. Nov 4; 4:670. doi: 10.1186/s40064-015-1470-0.
- Hobara H, Saito S, Hashizume S, Namiki Y, Kobayashi Y. (2018). Differences in spatiotemporal parameters during 200-m sprint between bilateral and unilateral transfemoral amputees. *Prosthetics and Orthotics International*, Dec; 42(6):567-570. doi: 10.1177/0309364618767142.
- Hobara H, Murata H, Hisano G, Hashizume S, Ichimura D, Cutti AG, Petrone N. (2023). Biomechanical determinants of top running speeds in para-athletes with unilateral transfemoral amputation. *Prosthetics and Orthotics International*, Jun 1; 47(3), 253-257. doi: 10.1097/PXR.0000000000000175.
- Jones, C. & Wilson, C. (2009). Defining advantage and athletic performance: The case of Oscar Pistorius. *European Journal of Sport Science - EUR J SPORT SCI*. 9, 125-131. doi: 10.1080/17461390802635483.
- Kosmol, A., Bednarczyk, G., Molik, B. & Buszta, M. (2020). Sprint performance of male track athletes at Paralympic Games between 1992 and 2016. *Advances in Rehabilitation*. 35(1), 39–46. doi: 10.5114/areh.2020.101481
- Li, Y., Simpson, K.J., Nolan, L., Miller, M., Johnson, B. (2018). Lower extremity kinematics of curve sprinting displayed by runners using a transtibial prosthesis. *Journal of Sports Sciences*, Feb; 36(3):293-302. doi: 10.1080/02640414.2017.1303186.
- McLoughlin, G., Fecske, C., Castañeda, Y., Gwin, C. & Graber, K. (2017). Sport Participation for Elite Athletes With Physical Disabilities: Motivations, Barriers, and Facilitators. *Adapted Physical Activity Quarterly*. 34, 1-7. doi: 10.1123/apaq.2016-0127.
- Namiki Y, Hashizume S, Murai A, Kobayashi Y, Takemura H, Hobara H. (2019). Joint moments during sprinting in unilateral transfemoral amputees wearing running-specific prostheses. *Biology Open*, 18;8(2):bio039206. doi: 10.1242/bio.039206.
- Potthast, W. & Brueggemann, G.P. (2011). Comparison of sprinting mechanics of the double transtibial amputee Oscar Pistorius with able bodied athletes. *28th International Symposium of Biomechanics in Sports*, Marquette, MI
- PRISMA-Transparent reporting of systematic review and meta-analyses. PRISMA 2020 flow diagram. <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-flow-diagram>
- Rahnama L., Soulis. K., Geil, M.D. (2024). A review of evidence on mechanical properties of running specific prostheses and their relationship with running performance. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 5:1402114. doi: 10.3389/fresc.2024.1402114
- Schmalz T, Bellmann M, Sottong J, Altenburg B. (2017). Advantages and Limitations of New Sports Prosthetic Components Developed for Running in Lower Limb Amputees. *Sports Medicine and Rehabilitation Journal*, 2(2), 1018.

- Swartz, L., Bantjes, J., Rall, D., Ferreira, S., Blauwet, C., Derman, W. (2016). A More Equitable Society: The Politics of Global Fairness in Paralympic Sport. *PLoS ONE* 11(12), e0167481. doi:10.1371/journal.pone.0167481.
- Taboga, P., Kram, R., Grabowski, A.M. (2016) Maximum-speed curve-running biomechanics of sprinters with and without unilateral leg amputations. *Journal of Experimental Biology*, Mar;219(Pt 6):851-8. doi: 10.1242/jeb.133488. PMID: 26985053.
- Yildiz K.A., Shin A.Y., Kaufman K.R. (2020). Interfaces with the peripheral nervous system for the control of a neuroprosthetic limb: a review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*; 17(01), 43.
- Vanlandewijck, Y. C. & Thompson, W. R. (2016). *Training and Coaching the Paralympic Athlete*. Chichester: John Wiley and Sons. doi: 10.1002/9781119045144.
- Ventura, Jonathan & Shvo, Galit. (2017). The Design Journal An International Journal for All Aspects of Design Yellow as " Non-Black ": Prosthetics, Semiotics, Hermeneutics, Freedom and Function. *The Design Journal*. 20. doi:10.1080/14606925.2017.1352963.
- Weyand, P.G., Bundle, M.W., McGowan, C.P., Grabowski, A., Brown, M.B., Kram, R., Herr, H. (2009). The fastest runner on artificial legs: different limbs, similar function? *Journal of Applied Physiology*, Sep; 107(3), 903-11. doi: 10.1152/jappphysiol.00174.2009.
- Wolbring G. (2008). Oscar Pistorius and the future nature of olympic, paralympic and other sports. *Scripted*; 5(1), 139–160.



Are there limits to the potential of athletic prosthetics to mimic nature? A comparison of the mechanical behavior of prosthetic and biological legs during curved sprinting: A literature review

Berberidou Fani

Specialized Teaching Staff, D.P.E.S.S., Democritus University of Thrace

ABSTRACT

The pursuit of optimizing the capabilities of prosthetic legs in sport has led to the development of a research direction focusing on the analysis of the mechanical and energetic performance of advanced technological prosthetics. Of significant interest is the performance of prosthetic legs in sprint events during curve running. The aim of this literature review was to collect, cross-reference, and present the findings of studies from the last two decades (2004-2024) on the biomechanical analysis of curved sprinting and the mechanical behavior of the prosthetic legs compared to the biological legs of able-bodied athletes. To identify the relevant studies, the PRISMA Statement 2020 protocol was applied. The findings of the studies indicated that prosthetic legs do not provide an advantage to athletes, at least in events that involve curves. However, it became clear that the technology of prosthetic legs appears inefficient to fully replicate natural movement, especially when adaptation to special conditions (e.g., ground slope, wind, humidity) is required. Factors that seem to affect running technique on a curve with prosthetic legs include the height (above or below the knee) and the side of the amputation (internal or external). The conclusions of this review emphasize the need for technological specialization of prosthetic limbs, while also raising considerations regarding the fair classification of athletes in competitive categories.

Key words: Track and Field; curve-sprinting; athletes with disabilities; prosthetic legs

Corresponding address:

Berberidou Fani
Democritus University of Thrace
Department of Physical Education and Sport Sciences
University Campus, 69100 Komotini

E-mail:

fbermper@phyed.duth.gr