

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 16

Ανάλυση των δυνάμεων στον καρπό κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων

CAROL A. OATIS, P.T., PH.D.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΡΠΟ	381
ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΡΠΟ	381
ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΖΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΠΗΧΕΟΚΑΡΠΙΚΗ ΑΡΘΡΩΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ	386
ΚΛΙΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΛΥΟΥΝ ΤΙΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΚΑΡΠΟ	387
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	387

Επειδή η άκρα χείρα αποτελεί το «εκτελεστικό» ακραίο τμήμα του άνω άκρου, συμμετέχει σε αμέτρητες δραστηριότητες, οι οποίες παράγουν μεγάλα φορτία στην άκρα χείρα και τον καρπό. Μερικά παραδείγματα περιλαμβάνουν το ξεκούμπωμα του σφιγμένου καπακιού ενός βάζου, ή το σκάλισμα ενός κήπου. Άλλες δραστηριότητες που δημιουργούν υψηλά φορτία στον καρπό και την άκρα χείρα περιλαμβάνουν αυτές κατά τις οποίες το άνω άκρο στηρίζει βάρος. Όπως σημειώνεται στα κεφάλαια σχετικά με τον ώμο και τον αγκώνα, τα άνω άκρα συμμετέχουν συχνά στην υποβοηθούμενη βάδιση μέσω της χρησιμοποίησης βακτηριών και άλλων βοηθητικών μέσων σε περιπτώσεις λειτουργικών διαταραχών των κάτω άκρων. Τα άνω άκρα μπορούν ακόμη και να αντικαταστήσουν εξ ολοκλήρου την προωθητική λειτουργία των κάτω άκρων, όπως κατά τη χρήση ενός αναπηρικού αμαξιδίου. Η άκρα χείρα και ο καρπός συμμετέχουν επίσης σε ωστικές δραστηριότητες, όπως το χτύπημα μιας μπάλας του τένις ή του γκολφ, τη σφυρηλάτηση, ή το χειρισμό ενός κομπρεσέρ. Τέτοιες δραστηριότητες εκθέτουν τον καρπό σε πολύ μεγάλα φορτία. Η δυνατότητα του καρπού να αντέχει τέτοια φορτία αποτελεί απόδειξη του θαυμαστού σχεδιασμού του.

Πολλές διαταραχές που αφορούν τις δομές του αντιβραχίου και του καρπού συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με τα φορτία που παράγονται στον καρπό. Τέτοιες διαταραχές περιλαμβάνουν τον "αγκώνα αντισφαίρισης" (έξω επικονδυλίτιδα), το σύνδρομο του καρπιαίου σωλήνα και την εκφυλιστική αρθρίτιδα. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να εξεταστούν τα φορτία που ασκούνται στον καρπό κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων και να διαπραγματευτούν οι επιπτώσεις τέτοιων φορτίων σε ασθενείς με διαταραχές του καρπού, καθώς και να καθοδηγήσει τους κλινικούς θεραπευτές που εργάζονται με τέτοιους ασθενείς. Συγκεκριμένα οι σκοποί αυτού του κεφαλαίου είναι να

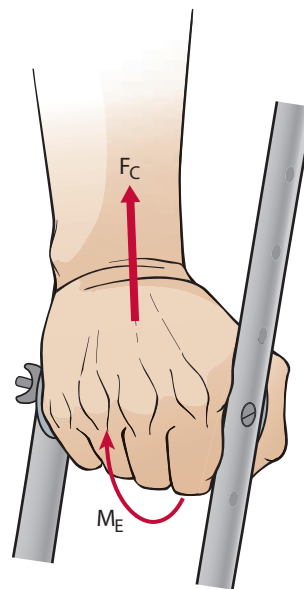
- Παρέχει ένα παράδειγμα δισδιάστατης ανάλυσης των δυνάμεων του καρπού.
- Εξετάσει τις δυνάμεις στην πηχεοκαρπική άρθρωση, καθώς και στις περιβάλλουσες δομές κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων.
- Επισκοπήσει τα πρότυπα και τις δυνάμεις φόρτισης σε συγκεκριμένες δομές του συμπλέγματος του καρπού
- Διαπραγματευτεί τις κλινικές επιπτώσεις του μεγέθους και της θέσης των φορτίων στον καρπό σε άτομα με ή χωρίς παθολογία

❖ Ανάλυση των δυνάμεων στον καρπό

Στις αναλύσεις των δυνάμεων που παράγονται στον ώμο και τον αγκώνα (Κεφάλαια 10 και 13), απλοποιημένες υποθέσεις γίνονται ώστε να λυθούν οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι δυνάμεις και οι ροπές σε αυτές τις αρθρώσεις. Αυτές οι υποθέσεις μειώνουν τον αριθμό των αγνώστων παραγόντων, θεωρώντας ως δεδομένο ότι μόνο ένας μυς ή μία μυϊκή ομάδα συσπάται κάθε φορά. Στον καρπό, αυτή αποτελεί μία λογική υπόθεση για μερικές δραστηριότητες, κατά τις οποίες οι μύες του καρπού είναι απαραίτητοι, ενώ οι μύες των δακτύλων μπορούν να είναι κάπως χαλαροί. Εντούτοις, σε μια δραστηριότητα που απαιτεί ισχυρή λαβή, είναι σαφές ότι οι καμπήρες των δακτύλων και οι εκτείνοντες μύες του καρπού πρέπει να συσπαστούν ταυτόχρονα. Ο υπολογισμός των αρθρικών δυνάμεων κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι πιο περίπλοκος, καθώς υπάρχουν περισσότεροι άγνωστοι από ό,τι εξισώσεις για να επιλυθούν, καταλήγοντας σε μια στατικά απροσδιόριστη περίπτωση (Κεφάλαιο 1).

Το ακόλουθο παράδειγμα επιλέχθηκε για να επισκοπήσει τις μεθόδους υπολογισμού των αρθρικών και μυϊκών δυνάμεων όταν ισχύουν οι απλοποιημένες υποθέσεις. Αναλογιστείτε ένα άτομο που χρησιμοποιεί μία βακτηρία για την υποστήριξη μετά από εγκεφαλικό. Το *Πλαίσιο Ανάλυσης Δυνάμεων 16.1* περιέχει το διάγραμμα ελεύθερου σώματος και την ανάλυση αυτού του παραδείγματος. Η αξιολόγηση αποκαλύπτει ότι ο ασθενής στηρίζει περίπου το 50% του βάρους του σώματός του στην ημίπληκτη πλευρά κατά τη διάρκεια της στήριξης σε αυτήν την πλευρά. Κατά συνέπεια, το μπαστούνι πρέπει να στηρίζει το υπόλοιπο 50%. Κατά τη διάρκεια της φάσης στήριξης, το μπαστούνι ωθεί προς τα πάνω την άκρα χείρα, δημιουργώντας μια ροπή έκτασης στον καρπό (Εικ. 16.1). Οι μύες των δακτύλων δεν είναι απαραίτητοι σε αυτήν τη φάση, κι έτσι το παράδειγμα χρησιμοποιεί την υπόθεση ότι μόνο οι κύριοι καμπήρες του καρπού συμμετέχουν στη δραστηριότητα. Επιπλέον, οι καμπήρες του καρπού θεωρούνται από κοινού ως μία καμπτική δύναμη. Αυτές οι υποθέσεις, ενώ σαφώς δεν είναι απολύτως ακριβείς, επιτρέπουν την επίλυση των εξισώσεων της κίνησης, ώστε να καθοριστούν οι μυϊκές και αρθρικές δυνάμεις αντίδρασης.

Αυτή η απλουστευμένη ανάλυση προτείνει ότι η συνολική καμπτική δύναμη που χρειάζεται για να ισορροπηθεί η ροπή έκτασης στον καρπό που παράγεται από το μπαστούνι είναι ίση με περίπου το ένα όγδοο του βάρους του σώματος. Η περαιτέρω ανάλυση υπολογίζει την αρθρική δύναμη αντίδρασης στον καρπό να είναι ελαφρώς περισσότερη από το 50% του βάρους του σώματος. Μια σημαντική υπόθεση σε αυτό το παράδειγμα είναι η θέση της δύναμης αντίδρασης του μπαστουניού. Όσο πιο κοντά είναι η δύναμη στον άξονα της άρθρωσης, τόσο μικρότερη η ροπή έκτασης που δημιουργείται. Εντούτοις, εάν το άτομο στηρίζει το βάρος περισσότερο στην παλάμη της άκρας χείρας,



Εικόνα 16.1 Η ροπή έκτασης στον καρπό που παράγεται από το μπαστούνι. Η δύναμη αντίδρασης του μπαστουניού που εφαρμόζεται στην άκρα χείρα δημιουργεί μία ροπή έκτασης (ME) στην πηχεοκαρπική άρθρωση.

η ροπή έκτασης και ως εκ τούτου, οι μυϊκές και αρθρικές δυνάμεις αντίδρασης αυξάνονται ανάλογα.

Οι τιμές που παρουσιάζονται σε αυτό το παράδειγμα αποτελούν μία αδρή προσέγγιση της πραγματικότητας, όμως το παράδειγμα δείχνει ότι ο καρπός μπορεί να υποβληθεί σε πολύ μεγάλα φορτία. Μια πτώση επάνω σε τεντωμένο χέρι μπορεί να μεταδώσει ένα ακόμα μεγαλύτερο φορτίο στον καρπό, δεδομένου ότι η άκρα χείρα μπορεί να υποβαστάξει περισσότερο από το 50% του βάρους του σώματος. Πειραματικές πτώσεις, ακόμα και από χαμηλά ύψη (3 – 6 cm) παράγουν φορτία στον καρπό 50–55% του βάρους του σώματος [4]. Οι πτώσεις από το ύψος της όρθιας στάσης θα πρέπει να παραγάγουν πολύ μεγαλύτερα φορτία. Επιπλέον, η ταχύτητα του σώματος τη στιγμή της πρόσκρουσης σημαίνει ότι η κινητική ενέργεια του σώματος μεταφέρεται στον καρπό. Είναι φυσικό να εμφανίζονται κατάγματα της κερκίδας ή συνδεσμικές ρήξεις! Οι δυνάμεις που απαιτούνται για να υποστεί κάταγμα η κερκίδα εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι και το μέγεθος και το σχήμα του οστού. Παρόλα αυτά, εκτιμήσεις του φορτίου θραύσης κυμαίνονται από 700 N έως 8.700 N (71,2 kg έως 887,2 kg) [15, 25].

❖ Επισκόπηση των δυνάμεων στον καρπό

Λίγες μελέτες έχουν εξετάσει τα φορτία στον καρπό κατά τη διάρκεια της βάδισης με βακτηρίες. Οι Slavens και συνεργάτες [24] αναφέρουν δυνάμεις με οπίσθια κατεύθυνση στον καρπό της τάξης περίπου του 40% του σωματικού βάρους σε ένα παιδί με εγκεφαλική παράλυση που χρησιμοποιούσε βακτηρίες Lofstrand, ενώ οι δυνάμεις



ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ 16.1

ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΡΠΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΤΗΡΙΞΗ ΣΕ ΒΑΚΤΗΡΙΕΣ

Φανταστείτε ένα άτομο που στηρίζεται σε δύο βακτηρίες με το τραυματισμένο πόδι στον αέρα και το υγιές να προωθείται εκτελώντας ένα βήμα. Κάθε βακτηρία υποστηρίζει περίπου το μισό του σωματικού βάρους (ΒΣ). Ζητούνται τα εξής:

Ποια είναι η δύναμη αντίδρασης στον καρπό κατά τη στήριξη βάρους στη βακτηρία; Ισχύουν οι συνθήκες στατικής ισορροπίας.

Οι εξισώσεις στατικής ισορροπίας που απαιτούνται για την επίλυση είναι

$$\Sigma M = 0$$

$$\Sigma F_X = 0$$

$$\Sigma F_Y = 0$$

Θυμηθείτε ότι οι ροπές που παράγονται από τις δυνάμεις στις κατευθύνσεις Χ- και Υ- εμπίπτουν στα επίπεδα Χ και Υ (ή γύρω από τον άξονα Ζ). Όπως ορίζει ο κανόνας του δεξιού χεριού, οι θετικές ροπές γύρω από τον άξονα Ζ έχουν φορά αντίθετη από τη φορά των δεικτών του ρολογιού, ενώ οι αρνητικές ροπές έχουν τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

Δίδονται τα παρακάτω μεγέθη:

Μοχλοβραχίονας δύναμης των καμπτήρων του καρπού (X_1): 2,0cm

Μοχλοβραχίονας της δύναμης αντίδρασης του μπαστουνιού (X_2): 0,5cm

F_C = η δύναμη αντίδρασης του μπαστουνιού, που ισούται με $\frac{1}{2}$ ΒΣ με κατακόρυφη προς τα πάνω κατεύθυνση

F_M , η συνολική έλξη των καμπτήρων του καρπού, με κατεύθυνση στον Υ άξονα

J = δύναμη αντίδρασης της άρθρωσης

J_X, J_Y = οι Χ και Υ συνιστώσες της δύναμης αντίδρασης της άρθρωσης, αντίστοιχα

Επίλυση για τη δύναμη των καμπτήρων (F_M)

$$\Sigma M = 0$$

M = Ροπή της δύναμης αντίδρασης της βακτηρίας + ροπή των καμπτήρων του καρπού = 0

$$-(0,5 \times \text{ΒΣ} \times 0,005\text{m}) + (F_M \times 0,02\text{m}) = 0$$

Η ροπή της δύναμης αντίδρασης της βακτηρίας είναι αρνητική επειδή παράγει στροφή σύμφωνη με την κίνηση των δεικτών του ρολογιού.

$$(F_M \times 0,02\text{m}) = (\text{ΒΣ} \times 0,0025\text{m})$$

$$\mathbf{F = 0,125 \text{ ΒΣ}}$$

Υπολογισμός της δύναμης αντίδρασης (J) στον καρπό. Υποθέστε ότι η δύναμη αντίδρασης του μπαστουνιού και η δύναμη των καμπτήρων είναι παράλληλες και κατακόρυφες. Το βάρος του άνω άκρου αποτελεί περίπου το 7% το ΒΣ.

ΣF_X : Δεν υπάρχουν δυνάμεις στην Χ κατεύθυνση

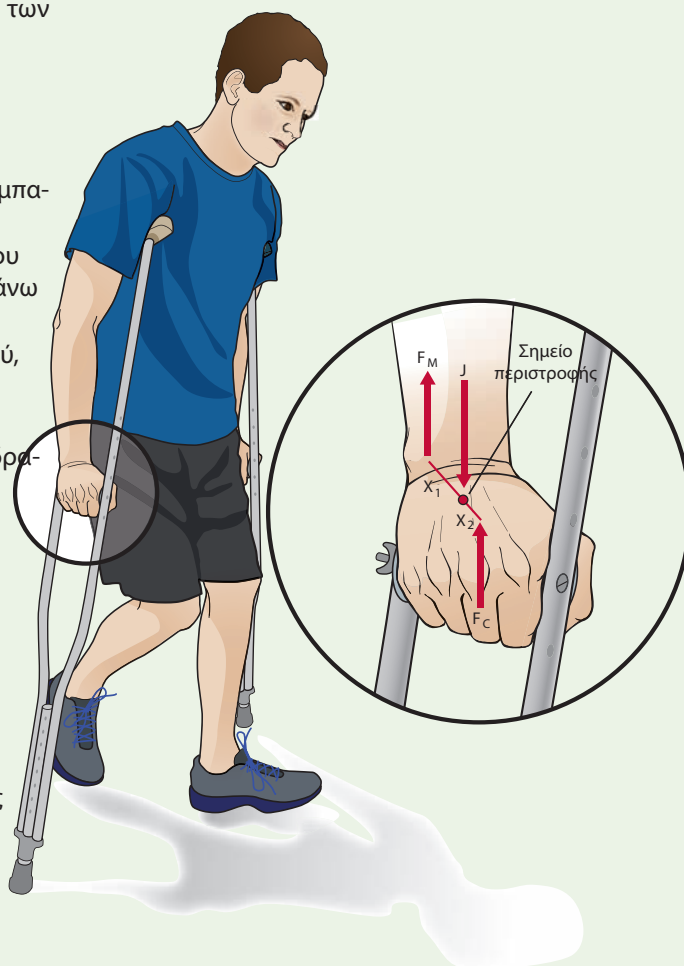
ΣF_Y : Δύναμη αντίδρασης της άρθρωσης + δύναμη των καμπτήρων του καρπού + δύναμη αντίδρασης της βακτηρίας – βάρος του άνω άκρου = 0

$$J_Y + F_M + 0,5 \text{ ΒΣ} - 0,07 \text{ ΒΣ} = 0$$

$$J_Y = 0,07 \text{ ΒΣ} - 0,5 \text{ ΒΣ} - 0,125 \text{ ΒΣ}$$

$$\mathbf{J_Y = - 0,555 \text{ ΒΣ}}$$

Επομένως, η αρθρική δύναμη αντίδρασης στον καρπό είναι περίπου 55,5% του βάρους του σώματος και έχει κατακόρυφη προς τα κάτω κατεύθυνση.



σε κατακόρυφη ή μετωπιαία κατεύθυνση ήταν μικρότερες. Οι ίδιοι ερευνητές αναφέρουν μικρότερες δυνάμεις στον καρπό σε ένα παιδί με κάκωση του νωτιαίου μυελού και σε ένα άλλο με ατελή οστεογένεση. Τα δεδομένα αυτά υποδηλώνουν ότι πολλοί παράγοντες συμβάλουν στο συνολικό φορτίο που ασκείται στον καρπό, όμως επίσης καταδεικνύουν ότι ο καρπός υπόκειται σε αρκετά μεγάλα φορτία όταν χρησιμοποιούνται βοηθήματα βάδισης. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι τα φορτία αυτά επαναλαμβάνονται σε κάθε κύκλο βάδισης.

Παρομοίως, η προώθηση του αναπηρικού αμαξιδίου ασκεί φορτία στον καρπό. Όπως και με τη βακτηρία, η δύναμη αντίδρασης του αμαξιδίου ασκεί μία εκτατική ροπή στον καρπό [5] (Εικ. 16.2). Φορτία έως 90N (περίπου 9 kg), ή 4% έως 7% του σωματικού βάρους, που ασκούνται στη στεφάνη των αναπηρικών αμαξιδίων αναφέρονται σε χρήστες χειροκίνητων αναπηρικών αμαξιδίων [2, 19, 20]. Το φορτίο που ασκείται από την άκρη χείρα στη βακτηρία μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το φορτίο στη στεφάνη του αναπηρικού αμαξιδίου, δεδομένου ότι το άτομο μπορεί να στηρίξει μεγάλο μέρος του σωματικού βάρους στη βακτηρία [16, 18]. Παρόλα αυτά, και στις δύο περιπτώσεις ο καρπός υπόκειται σε μεγάλα φορτία κατ' επανάληψη, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε πόνο, τραυματισμό ή εκφυλιστικές αλλοιώσεις στον καρπό.



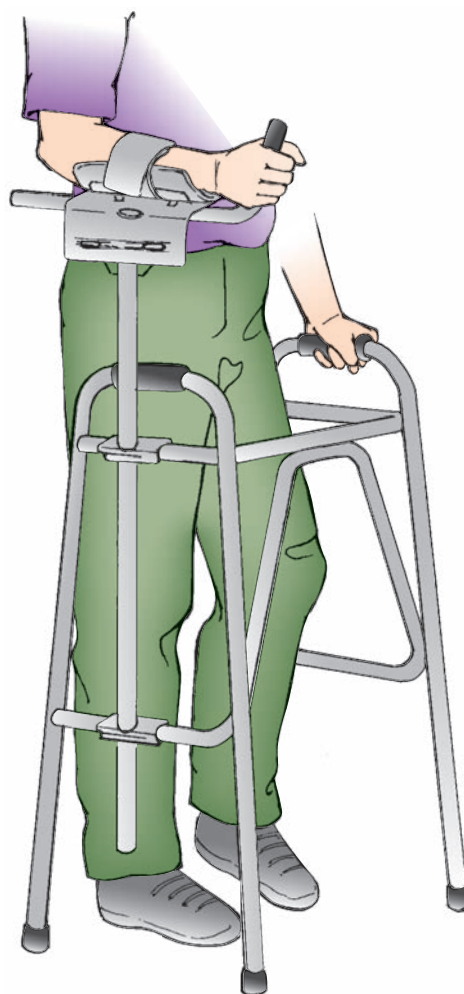
Εικόνα 16.2 Ροπή έκτασης που παράγεται στον καρπό από ένα αναπηρικό αμαξίδιο. Η προώθηση ενός αναπηρικού αμαξιδίου δημιουργεί μια ροπή έκτασης (M_E) στον καρπό.

Κλινικός Συσχετισμός

Η ΧΡΗΣΗ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΑΔΙΣΗ ΣΕ ΑΤΟΜΑ ΜΕ ΡΕΥΜΑΤΟΕΙΔΗ ΑΡΘΡΙΤΙΔΑ:

Ο καρπός επηρεάζεται συχνά σε άτομα με ρευματοειδή αρθρίτιδα, η οποία προσβάλλει επίσης τα πόδια, τα γόνατα και τα ισχία, καθιστώντας τη βάδιση δύσκολη και επώδυνη. Τα βοηθητικά μέσα, όπως τα μπαστούνια, οι βακτηρίες και οι περιπατητήρες μπορούν να είναι πολύ χρήσιμα στη μείωση των φορτίων στις αρθρώσεις των κάτω άκρων και στη βελτίωση της βάδισης. Εντούτοις, το Πλαίσιο Ανάλυσης των Δυνάμεων 16.1 καταδεικνύει ότι η χρήση αυτών των μέσων μπορεί να οδηγήσει στην εφαρμογή μεγάλων φορτίων και στον καρπό. Ο κλινικός θεραπευτής βρίσκεται αντιμέτωπος με το δίλημμα της προστασίας των αρθρώσεων των κάτω άκρων, υπερφορτώνοντας πιθανώς τις αρθρώσεις του καρπού. Οι ειδικές προσαρμογές των βοηθητικών μέσων μπορούν να παρέχουν μια εναλλακτική λύση. Σε αυτά τα βοηθητικά μέσα μπορούν να προσαρμοστούν ειδικά στηρίγματα που επιτρέπουν στον ασθενή να στηρίξει το βάρος στο αντιβράχιο παρά στην άκρη χείρα και τον καρπό (Εικ. 16.3). Τέτοιες τροποποιήσεις παρέχουν ανακούφιση στα κάτω άκρα ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο στον καρπό.

Κλινικό Συμπέρασμα: Ο βοηθητικός εξοπλισμός μπορεί να φανεί αρκετά χρήσιμος στην τροποποίηση μιας δραστηριότητας για την αποφυγή καταστροφικών φορτίων σε επώδυνες αρθρώσεις.



Εικόνα 16.3 Οι βακτηρίες αντιβραχίου αποτελούν ένα παράδειγμα των προσαρμοστικών συσκευών που τροποποιούν τα μπαστούνια και τις βακτηρίες, ώστε να μειωθεί η στήριξη βάρους στην πηχεοκαρπική άρθρωση.

Υπάρχουν λίγες μελέτες που αναφέρουν άμεσους υπολογισμούς των φορτίων που εφαρμόζονται στην πηχεοκαρπική άρθρωση κατά τη διάρκεια των δραστηριοτήτων καθημερινής διαβίωσης. Οι Chadwick και Nicol [3] αναφέρουν αρθρικές δυνάμεις αντίδρασης από 1200 έως περισσότερα από 2000 N (122,47 kg – 204,12 kg) κατά τη διάρκεια άρσης βάρους 2 – 4 kg, ανάλογα με το είδος της χρησιμοποιούμενης λαβής. Οι Keir και Wells προτείνουν ότι απαιτείται μεγαλύτερη από το 25% της μέγιστης διαθέσιμης εκτατικής ροπής για τη διατήρηση του καρπού σε 30° έκτασης, μία συχνά χρησιμοποιούμενη θέση από δακτυλογράφους και χειριστές ηλεκτρονικών υπολογιστών [10]. Τέτοιες μυϊκές απαιτήσεις θα παρήγαγαν υποθετικά επίσης σημαντικές αρθρικές δυνάμεις αντίδρασης. Επιπλέον, δεδομένου ότι τέτοιες στάσεις διατηρούνται για παρατεταμένες περιόδους, δεν εκπλήσσει το γεγονός ότι οι αναφορές πόνου και δυσλειτουργίας στον καρπό και στον αγκώνα είναι πολύ συνήθεις σε άτομα που ασκούν αυτά τα επαγγέλματα.

Κλινικός Συσχετισμός

ΕΡΓΑΤΙΚΟΙ ΤΡΑΥΜΑΤΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΚΑΡΠΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ

ΑΚΡΑΣ ΧΕΙΡΑΣ: Οι σχετιζόμενες με την εργασία μυοσκελετικές διαταραχές που προκύπτουν από τραυματισμούς του καρπού και της άκρας χείρας συνδέονται με μεγαλύτερη απώλεια παραγωγικότητας και εισοδήματος από ό,τι σε διαταραχές άλλων περιοχών του σώματος [1]. Οι εργασίες που απαιτούν παρατεταμένες, ή υψηλής ταχύτητας επαναλαμβανόμενες θέσεις του καρπού, ή υψηλά επαναλαμβανόμενα φορτία φέρουν υψηλό κίνδυνο για προβλήματα στον καρπό και την άκρα χείρα. Οι εργαζόμενοι με υψηλή συχνότητα τέτοιων διαταραχών ποικίλουν από χειριστές Η/Υ, οδοντιάτρους, έως κτηνοτρόφους που αρμέγουν αγελάδες.

Κλινικό Συμπέρασμα: Η λεπτομερής ανάλυση της εργασίας για την ανεύρεση μέσων για την τροποποίηση ή εναλλαγή των θέσεων του καρπού, καθώς και η εκπαίδευση των εργοδοτών και εργαζομένων γύρω από τους βασικούς κανόνες εργασιακής ασφάλειας μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση της συχνότητας των σχετιζόμενων με την εργασία τραυματισμών.

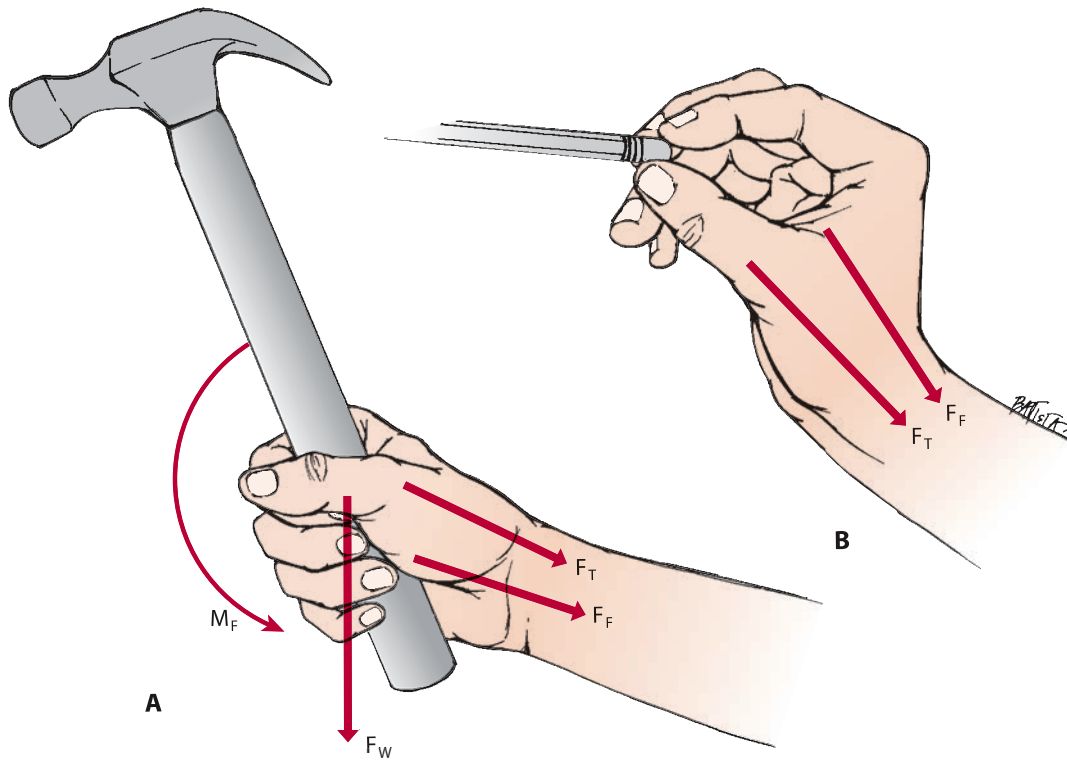
Ένας από τους λόγους για την έλλειψη ερευνών πάνω στις αρθρικές δυνάμεις που ασκούνται στον καρπό είναι η πολυπλοκότητα του προβλήματος. Όπως σημειώθηκε παραπάνω, οι περισσότερες δραστηριότητες που αφορούν τον καρπό απαιτούν την ταυτόχρονη σύσπαση διαφόρων μυών του καρπού και των δακτύλων. Αυτές οι συν-συσπάσεις ακυρώνουν τη συνήθη υπόθεση ότι μόνο ένας μυς ή ομάδα μυών ενεργεί σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Οι ερευνητές χρησιμοποιούν μια ποικιλία από αναλυτικές προσεγγίσεις ώστε να ερευνήσουν τα φορτία που υποστηρίζονται από τον καρπό κατά τη διάρκεια των συν-συσπάσεων. Τεχνικές βελτιστοποίησης (Κεφάλαιο 1) για να υπολογιστούν οι αρθρικές δυνάμεις αντίδρασης στον καρπό καθώς ένα

άτομο σπκώνει ένα μέτριο βάρος (2 έως 4 kg) χρησιμοποιώντας διαφορετικές λαβές, αναφέρουν αρθρικές δυνάμεις αντίδρασης στον καρπό που κυμαίνονται από 1200 έως 2200N (122,47 kg – 226,80 kg) [3]. Οι συν-συσπάσεις των μυών των δακτύλων και του καρπού που απαιτούνται για να συλληφθεί το αντικείμενο και να σταθεροποιηθεί ο καρπός είναι προφανώς αρμόδιες για αυτά τα εντυπωσιακά μεγάλα φορτία.

Ένα θεωρητικό μοντέλο για τον υπολογισμό των φορτίων στον καρπό σε μία δραστηριότητα ελαφριάς λαβής (περίπου λαβή 1kg) αναφέρει συνολικές δυνάμεις στον καρπό περίπου 160N (16,33 kg), αρκετά μικρότερες από εκείνες στην προηγούμενη μελέτη [22]. Δύο μεθοδολογικές διαφορές βοηθούν στο να εξηγηθούν οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων. Η δύναμη λαβής στο θεωρητικό μοντέλο αποτελεί το ένα τέταρτο έως το μισό της δύναμης λαβής που εξετάζεται από την τεχνική βελτιστοποίησης. Επιπλέον, η ανάλυση βελτιστοποίησης περιλαμβάνει την καμπική ροπή που ασκείται στον καρπό από το ανυψωμένο φορτίο, ενώ το θεωρητικό μοντέλο εξετάζει μόνο τα αποτελέσματα των συμπιεστικών φορτίων των μυών κατά τη διάρκεια του νυγμού, χωρίς να εφαρμόζει μία πρόσθετη εξωτερική ροπή στον καρπό (Εικ. 16.4). Και οι δύο αναλύσεις καταδεικνύουν ότι η συν-σύσπαση ανταγωνιστικών μυϊκών ομάδων παράγει μεγαλύτερες αρθρικές δυνάμεις αντίδρασης από ό,τι όταν εξετάζεται μόνο μία μυϊκή ομάδα. Αυτές οι μελέτες επίσης προτείνουν ότι ακόμη και σε τέτοιες ήπιες δραστηριότητες, όπως η λαβή και η άρση ενός αντικείμενου 2-kg, ο καρπός δέχεται μεγάλες αρθρικές δυνάμεις αντίδρασης.

▶ Βλέπε βίντεο, Turning a Key.

Οι πιο αδρές δραστηριότητες, όπως σε μερικά αθλήματα, οδηγούν σε μεγάλες αυξήσεις των φορτίων στον καρπό. Μέγιστες εσωτερικές ροπές της τάξης των 20 Nm αναφέρονται στον καρπό κατά τη στιγμή της πρόσκρουσης σε ένα κτύπημα της αντισφαίρισης [7]. Αυτό μπορεί να συγκριθεί με 12 Nm που αναφέρονται στον αγκώνα κατά τη διάρκεια της προώθησης ενός αναπηρικού αμαξιδίου [26]. Η ενόργανη γυμναστική επιπέδου πρωταθλητισμού περιλαμβάνει διάφορες δραστηριότητες που σχετίζονται με τη στήριξη του βάρους στα άνω άκρα, συνήθως σε βαλλιστικές κινήσεις, περιλαμβάνοντας πολύ υψηλές συχνότητες φόρτισης. Τα φορτία στον καρπό κατά τη διάρκεια των ασκήσεων του ίππου της ενόργανης γυμναστικής και του μονόζυγου έχουν αναλυθεί. Μέγιστες αρθρικές δυνάμεις αντίδρασης στον καρπό έως και δύο φορές το βάρος του σώματος αναφέρονται σε κορυφαίους εφήβους που εκτελούν τον ίππο της ενόργανης γυμναστικής [12] (Εικ. 16.5). Μία μελέτη της κινητικής των ασκήσεων μονόζυγου αναφέρει μέγιστες δυνάμεις αντίδρασης στο μονόζυγο έως και 2,2 φορές το βάρος του σώματος, σε κορυφαίους άντρες αθλητές κατά τη διάρκεια της μεγάλης αιώρησης [13]. Αυτά τα φορτία στο μονόζυγο ισορροπούνται από εφελκυστικές δυνάμεις στην άκρα χείρα και τον καρπό, οι οποίες θα πρέπει στη

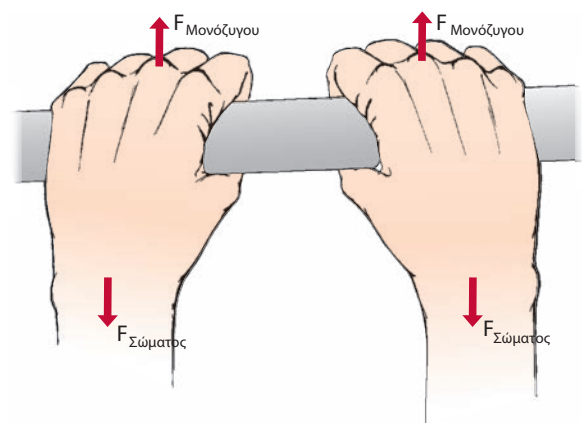


Εικόνα 16.4 Δύο διαφορετικά μοντέλα για την εξέταση των δυνάμεων που ασκούνται στον καρπό κατά τη διάρκεια της λαβής και του νυγμού. **A.** Το μοντέλο περιλαμβάνει τις δυνάμεις των μυών των δακτύλων (F_F) και του αντίχειρα (F_T), καθώς επίσης και την καμπτική ροπή (M_F) που δημιουργείται από το ίδιο το φορτίο. **B.** Το μοντέλο περιλαμβάνει μόνο τις δυνάμεις των μυών των δακτύλων (F_F) και του αντίχειρα (F_T) που απαιτούνται για το νυγμό ενός αντικείμενου.



Εικόνα 16.5 Φορτίο στον καρπό κατά τη διάρκεια μίας άσκησης στον ίππο. Η άσκηση στον ίππο παράγει φορτία στον καρπό που μπορούν να φθάσουν έως και δύο φορές το βάρος του σώματος.

συνέχεια να εξισορροπηθούν από μεγάλες δυνάμεις στους περιβάλλοντες συνδέσμους και τους μύες ώστε να σταθεροποιήσουν τον καρπό και να αποτρέψουν το εξάρθρημα (Εικ. 16.6). Τα φορτία που αναφέρονται σε αυτές τις μελέτες βοηθούν στην εξήγηση των συνηθών αναφορών πόνου στον καρπό από αθλητές της ενόργανης γυμναστικής [12]. Άλλες ψυχαγωγικές και επαγγελματικές δραστηριότητες όπως η οδήγηση μοτοσυκλετών εκτός



Εικόνα 16.6 Φορτίο στους καρπούς κατά τη διάρκεια ασκήσεων στο μονόζυγο. Ο καρπός υποστηρίζει μεγάλες εφελκυστικές δυνάμεις κατά τη διάρκεια της άσκησης στο μονόζυγο και σταθεροποιείται από μεγάλες δυνάμεις που παράγονται από τους περιβάλλοντες συνδέσμους και μύες.

δρόμου σε ανώμαλο έδαφος, η οδήγηση αυτοκινήτων - καρτ, ή ο χειρισμός ενός κομπρεσέρ στο σκυρόδεμα, μπορούν να παράγουν ομοίως υψηλά φορτία και να οδηγήσουν σε ποικίλους τραυματισμούς και αναφορές για πόνο στον καρπό.

Αυτές οι μελέτες των δυνάμεων αντίδρασης της άρθρωσης του καρπού προτείνουν ότι οι μύες και οι σύνδεσμοι στον καρπό υποστηρίζουν επίσης μεγάλα φορτία. Η άμεση εκτίμηση των φορτίων που ασκούνται σε τένοντες κατά την διάρκεια δραστηριοτήτων επίσης αναφέρεται. Η ανάλυση των μέγιστων δυνάμεων στο βραχύ κερκιδικό εκτείνων του καρπού κατά τη διάρκεια ενός ανάποδου κτυπήματος στην αντισφαίριση αποκαλύπτει φορτία 90N (9 kg) σε προχωρημένους παίκτες αντισφαίρισης και 65N (6,80 kg) σε αρχαίους παίκτες [17]. Μια άλλη μελέτη βασισμένη σε έναν ανατομικό προσομοιωτή της πηγεοκαρπικής άρθρωσης εξετάζει τις μυϊκές δυνάμεις που απαιτούνται για τη διατήρηση των στατικών θέσεων του καρπού [29]. Τα αναφερόμενα φορτία ποικίλουν από 5N (0,54 kg) στον κερκιδικό καμπτήρα του καρπού έως περίπου 30N (3 kg) στον ωλένιο καμπτήρα του καρπού και στον ωλένιο εκτείνοντα του καρπού, ανάλογα με τη θέση. Το μοντέλο υποστηρίζει την άποψη ότι οι λειτουργίες του καρπού απαιτούν την ταυτόχρονη δραστηριότητα διαφόρων μυών, μέσω της πρόβλεψης της συν-σύσπασης του ωλένιου εκτείνοντα του καρπού, του μακρού κερκιδικού εκτείνοντα του καρπού, του βραχύ κερκιδικού εκτείνοντα του καρπού, του κερκιδικού καμπτήρα του καρπού, του ωλένιου καμπτήρα του καρπού και του μακρού απαγωγού του αντίχειρα σε καθεμία από τις θέσεις που αναλύονται, 20° κάμψης ή έκτασης και 10° ωλένιας ή κερκιδικής απόκλισης.

Κλινικός Συσχετισμός

ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΑΣΚΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟΥΣ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟΝ ΚΑΡΠΟ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ:

Μελέτες των φορτίων που ασκούνται στον καρπό αποκαλύπτουν ότι οι μύες που περιβάλλουν τον καρπό πρέπει να υποστηρίζουν σημαντικά φορτία ακόμη και σε σχετικά απλές δραστηριότητες, και ακόμα μεγαλύτερα φορτία κατά τη διάρκεια των πιο επίπονων δραστηριοτήτων όπως η αντισφαίριση. Είναι εύκολο να φανταστεί κανείς γιατί οι αναφορές του πόνου στην έξω επικονδυλίτιδα (αγκώνας αντισφαίρισης) γίνονται χρόνιες, αφού και χωρίς κάποιος να παίζει τένις, οι περισσότεροι εκτελούν καθημερινές δραστηριότητες που απαιτούν μεγάλα φορτία από τους περιβάλλοντες μύες.

Κλινικό Συμπέρασμα: Ο προσδιορισμός των προτύπων φόρτισης απαιτεί την προσεκτική ανάλυση της επιβαρυντικής δραστηριότητας. Ο κλινικός θεραπευτής μπορεί να είναι σε θέση να συστήσει τροποποιήσεις της δραστηριότητας και να εκπαιδεύσει τους ασθενείς, ώστε να τροποποιηθούν τα φορτία. Βοηθητικά μέσα μπορούν επίσης να φανούν χρήσιμα στη μείωση των φορτίων που ασκούνται στο μυϊκό σύστημα του αντιβραχίου, ώστε να επιτραπεί η επούλωση.

❖ Ανάλυση των φορτίσεων που εφαρμόζονται στην πηγεοκαρπική άρθρωση κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων

Αν και η ανάλυση των αρθρικών **δυνάμεων** αντίδρασης του καρπού είναι ασυνήθιστη, η βιβλιογραφία περιέχει διάφορες μελέτες που παραθέτουν υπολογισμούς και άμεσες μετρήσεις των **φορτίσεων** που εφαρμόζονται στις αρθρικές επιφάνειες του καρπού και στα περιβάλλοντα μαλακά μόρια. Η φόρτιση, ή η πίεση, ορίζεται στο Κεφάλαιο 2 ως η δύναμη ανά μονάδα επιφανείας (δύναμη/επιφάνεια). Οι άμεσες μετρήσεις εκτελούνται συνήθως σε δείγματα πτωμάτων μέσω της εισαγωγής μιας συσκευής αισθητήρα πίεσης, ώστε να μετρηθεί η φόρτιση μεταξύ των παρακείμενων αρθρικών επιφανειών κατά τη διάρκεια της φόρτισης [8, 20, 22]. Μεγαλύτερες μέσες πιέσεις αναφέρονται στην άρθρωση από ό,τι στην κερκιδομηνοειδή άρθρωση [9, 20, 23, 27]. Η θέση του καρπού και η αρθρική ευθυγράμμιση ανήκουν μεταξύ πολλών παραγόντων που επηρεάζουν αυτήν την αρθρική πίεση. Υπάρχει μία αύξηση στην κερκιδοσκαφοειδή πίεση όταν ο καρπός βρίσκεται σε κερκιδική απόκλιση και μια αύξηση στην κερκιδομηνοειδή και ωλενοκαρπική πίεση όταν ο καρπός βρίσκεται σε ωλένια απόκλιση. Πιέσεις της τάξης των 4,3 MPa, (1 megapascal = 10^6 N/m², Κεφάλαιο 1), αναφέρονται σε μεμονωμένα δείγματα [23]. Αυτές οι πιέσεις μπορούν να συγκριθούν με άλλες μεταξύ 4,0 και 6,0 MPa που αναφέρονται στο ισχίο κατά τη διάρκεια της βάδισης [11]. Άλλες μελέτες καταδεικνύουν ευδιάκριτες μεταβολές στα πρότυπα φόρτισης παρουσία μη φυσιολογικής αρθρικής μορφολογίας. Μία αφύσικα μακριά ωλένη, που περιγράφεται ως **θετική ωλένια διαφορά**, συνοδεύεται από μία αύξηση στην πίεση στον τριγωνόχονδρο [9]. Ομοίως, η καρπική αστάθεια οδηγεί σε αλλαγές της πίεσης σε όλον τον καρπό [27].

Κλινικός Συσχετισμός

ΟΙ ΑΛΛΑΓΕΣ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΚΑΡΠΙΚΗΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ:

Μελέτες πτωμάτων προτείνουν ότι υπάρχει αυξημένη πίεση μεταξύ των οστών της κερκίδας και του σκαφοειδούς, όταν το σκαφοειδές παρουσιάζει αστάθεια [14]. Η περιοχή της αυξημένης πίεσης είναι περίπου η ίδια που παρουσιάζει συχνά σε εκφυλιστικές αρθρικές αλλοιώσεις στα ηλικιωμένα άτομα.

Κλινικό Συμπέρασμα: Μελέτες της πίεσης όπως αυτές, προτείνουν άμεσους συσχετισμούς μεταξύ της ανώμαλης αρθρικής ευθυγράμμισης, του ανώμαλου προτύπου φόρτισης και τελικά της αρθρικής καταστροφής. Επιπλέον έρευνα απαιτείται για να διευκρινίσει αυτούς τους συσχετισμούς, δεδομένου ότι η καλύτερη κατανόηση αυτών των σχέσεων θα βοηθήσει στην καθοδήγηση των κλινικών αποφάσεων σχετικά με τις θεραπευτικές στρατηγικές για την αντιμετώπιση των αρθρικών διαταραχών.

❖ Κλινικές εφαρμογές των μελετών που αναλύουν τις δυνάμεις και τις φορτίσεις στον καρπό

Η οστεοαρθρίτιδα προσβάλλει κυρίως τις μεγάλες αρθρώσεις που φέρουν το βάρος του σώματος, ιδιαίτερα τα ισχία και τα γόνατα αλλά, αν και λιγότερο συχνά, η οστεοαρθρίτιδα εμφανίζεται επίσης στον καρπό [8]. Η πιο συχνή περιοχή αρθρικού εκφυλισμού στον καρπό βρίσκεται μεταξύ του σκαφοειδούς και της κερκίδας [28]. Αυτό το εύρημα είναι σύμφωνο με τα δεδομένα πίεσης που αναφέρονται παραπάνω. Αυτά τα δεδομένα υποστηρίζουν την ύπαρξη μιας σχέσης μεταξύ της πίεσης των αρθρώσεων και του εκφυλισμού τους. Τα τροποποιημένα πρότυπα φόρτισης των διαταραγμένων αρθρώσεων του καρπού επίσης προτείνουν ότι οι καρποί με μη φυσιολογική ευθυγράμμιση μπορούν να προδιαθέτουν σε εκφυλιστικές αλλαγές.

Μερικοί ερευνητές προτείνουν ότι τα άτομα που εξαρτώνται από τα άνω άκρα τους για την στήριξη του βάρους τους, μπορούν να είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε εκφυλιστικές αλλοιώσεις στον καρπό [21, 30]. Μία μελέτη 50 ατόμων που χρησιμοποιούσαν ένα μονό μπαστούνι για τη βάδισή τους, δεν αναφέρει καμία αυξημένη συχνότητα αρθρίτιδας στον στηριζών καρπό σε σύγκριση με τον μη-στηριζόντα καρπό [30]. Η μέση διάρκεια της χρήσης μπαστούνιού μεταξύ των ατόμων που μελετήθηκαν ήταν 4 έτη. Αντίθετα, μια άλλη μελέτη παραθέτει υψηλή συχνότητα αστάθειας των καρπικών οστών, εμπλέκοντας συνήθως το μηνοειδές, σε άτομα με παραπληγία που χρησιμοποιούσαν κατά αποκλειστικότητα αναπηρικά αμαξίδια [21]. Η μέση διάρκεια του τραυματισμού του νωτιαίου μυελού σε άτομα με αρθρική αστάθεια στον καρπό ήταν 30 έτη.

Αυτές οι δύο μελέτες φαίνονται να έχουν συγκρινόμενα δεδομένα, αν και η μία μελέτη αξιολογεί την αρθρική αστάθεια του καρπού, ενώ η άλλη εξετάζει την επικράτηση της εκφυλιστικής αρθρίτιδας. Εντούτοις, η μεγαλύτερη διαφορά αυτών των δύο μελετών είναι η διάρκεια της επαναλαμβανόμενης στηρικτικής δραστηριότητας. Ο πληθυσμός με την παρατηρηθείσα αρθρική παθολογία στον καρπό είχε μια μέση διάρκεια στηρικτικής δραστηριότητας περίπου επτά φορές της μέσης διάρκειας που παρατηρήθηκε στον πληθυσμό χωρίς παθολογία. Αν και απαιτείται επιπρόσθετη έρευνα για να διευκρινιστεί η σχέση μεταξύ των παρατεταμένων στηρικτικών δραστηριοτήτων και της αρθρικής παθολογίας του καρπού, αυτά τα δεδομένα προτείνουν ότι η υπερβολική φόρτιση του καρπού για παρατεταμένη χρονική περίοδο μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη παθολογίας στον καρπό.

Τι σημαίνουν αυτές οι μελέτες για τον κλινικό θεραπευτή; Η αποφυγή των στηρικτικών δραστηριοτήτων για την προστασία των αρθρώσεων δεν είναι εφικτή σε έναν πληθυσμό που εξαρτάται από τα άνω άκρα για την κινητικότητά του. Περαιτέρω μελέτες απαιτούνται για να καθορίσουν εάν υπάρχουν άλλοι παράγοντες που αυξά-

νουν ή μειώνουν τον κίνδυνο ενδεχόμενου εκφυλισμού. Ίσως οι αλλαγές στην αρθρική ευκαμψία και τη δύναμη του καρπού μπορούν να τροποποιήσουν τους κινδύνους που συνδέονται με τις στηρικτικές δραστηριότητες. Επιπλέον, οι τροποποιήσεις στα αναπηρικά αμαξίδια και στις συσκευές βάδισης μπορούν να αλλάξουν τη μηχανική, ώστε να μειώσουν τα φορτία, ή να ανακατανεύμουν τις πιέσεις στον καρπό [6]. Γνωρίζοντας τις πιθανές συνδέσεις μεταξύ των προτύπων φόρτισης στον καρπό και της μελλοντικής αρθρικής παθολογίας, καθώς και κατανοώντας τους παράγοντες που επηρεάζουν τα φορτία που παράγονται κατά τη διάρκεια μιας δραστηριότητας, ο κλινικός θεραπευτής μπορεί να είναι σε θέση να μειώσει τον κίνδυνο αρθρικής παθολογίας του ασθενούς και να ελαχιστοποιήσει τις διαταραχές ως αποτέλεσμα μιας τέτοιας παθολογίας.

❖ Περίληψη

Αυτό το κεφάλαιο εξετάζει τις δυνάμεις και πιέσεις στις οποίες υποβάλλεται ο καρπός κατά την καθημερινή δραστηριότητα. Ένα απλό δισδιάστατο πρότυπο χρησιμοποιείται για να αναλύσει τις δυνάμεις στους μύες και στην άρθρωση κατά τη διάρκεια μιας απλής στηρικτικής δραστηριότητας, στο οποίο ισχύει η υπόθεση ότι μόνο μια μυϊκή ομάδα είναι ενεργή. Το απλουστευμένο πρότυπο υπολόγισε μια αρθρική δύναμη αντίδρασης στον καρπό της τάξης του 50% του βάρους του σώματος. Δεδομένα από πιο πολύπλοκα μοντέλα ανασκοπήθηκαν, δεδομένου ότι σε πολλές καθημερινές δραστηριότητες ο καρπός απαιτεί την ταυτόχρονη δραστηριότητα από πολλούς μύες. Τα δεδομένα από αυτά τα πιο σύνθετα μοντέλα αποκάλυψαν ότι οι μύες και η άρθρωση του καρπού μπορούν να υποστηρίξουν φορτία μεγαλύτερα από δύο φορές το βάρος του σώματος, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων που απαιτούν το άνω άκρο για την στήριξη του βάρους. Μελέτες που αναφέρουν τις πιέσεις (δύναμη/επιφάνεια) που υποστηρίζονται στον καρπό ανασκοπήθηκαν επίσης. Αυτά τα δεδομένα προτείνουν ότι ο καρπός υπόκειται σε πιέσεις παρόμοιες με εκείνες του ισχίου κατά τη διάρκεια της βάδισης. Πιέσεις στον καρπό μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της φυσιολογικής κίνησης του καρπού και επηρεάζονται άμεσα από τη μηχανική και την παθομηχανική του καρπού. Αυτές οι μελέτες παρέχουν μια χρήσιμη προοπτική για τον κλινικό θεραπευτή ώστε να εκτιμήσει τις μηχανικές προκλήσεις στον καρπό κατά τη διάρκεια της καθημερινής δραστηριότητας.

Αυτό το κεφάλαιο ολοκληρώνει τη διαπραγμάτευση του καρπού. Ωστόσο, η λειτουργία της άκρας χείρας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους μύες του αντιβραχίου και την ακεραιότητα της άρθρωσης του καρπού. Τα ακόλουθα τρία κεφάλαια εξετάζουν την αλληλεπίδραση των δομών του αντιβραχίου με τις ειδικές δομές και τους μύες που βρίσκονται μέσα στην άκρα χείρα, οι οποίες συμβάλλουν στη μηχανική και την παθομηχανική της λειτουργίας της άκρας χείρας.

Ασκήσεις & Προβλήματα

1. Εξηγήστε εν συντομία γιατί η σφιχτή γροθιά είναι πιθανό να δημιουργήσει μεγαλύτερες δυνάμεις αντίδρασης στον καρπό από ότι η ελεύθερη ενεργητική έκτασή του.
2. Ποιοι μύες πρέπει να συσπαστούν για να υποστηρίξουν τον καρπό όταν στηριζόμαστε στα χέρια για να σηκωθούμε από μία καρέκλα; Φανταστείτε μία τυπική καρέκλα με μπράτσα, ενώ και τα δύο χέρια απλώνουν τα μπράτσα προς τα κάτω.

Επισκεφτείτε: <http://thePoint.lww.com> για απαντήσεις σε αυτά τα ερωτήματα και για να κατεβάσετε το εργαστηριακό εγχειρίδιο με επιπλέον ερωτήσεις και δραστηριότητες.

Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Barr AE, Barbe MF, Clark BD: Work-related musculoskeletal disorders of the hand and wrist: epidemiology, pathophysiology, and sensorimotor changes. *J Orthop Sports Phys Ther* 2004; 34: 610–627.
2. Boninger ML, Cooper RA, Baldwin MA, et al.: Wheelchair pushrim kinetics: body weight and median nerve function. *Arch Phys Med Rehabil* 1999; 80: 910–915.
3. Chadwick EKJ, Nicol AC: Elbow and wrist joint contact forces during occupational pick and place activities. *J Biomech* 2000; 33: 591–600.
4. Chou P-H, Chou Y-L, Lin C-J, et al.: Effect of elbow flexion on upper extremity impact forces during a fall. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2001; 16: 888–894.
5. Desroches G, Dumas R, Pradon D, et al.: Upper limb joint dynamics during manual wheelchair propulsion. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2010; 25: 299–306.
6. Ferguson SA, Marras WS, Allread WG, et al.: Musculoskeletal disorder risk as a function of vehicle rotation angle during assembly tasks. *Appl Ergon* 2011; 42: 699–709.
7. Hatze H: Forces and duration of impact, and grip tightness during the tennis stroke. *Med Sci Sports* 1976; 8: 88–95.
8. Hochberg MC: Osteoarthritis. B. Clinical features. In: *Primer of the Rheumatic Diseases*. Klippel JH, ed. Atlanta, GA: Arthritis Foundation, 2001; 289–293.
9. Kazuki K, Kusunoki M, Shimazu A: Pressure distribution in the radiocarpal joint measured with a densitometer designed for pressure-sensitive film. *J Hand Surg Am* 1991; 16A: 401–408.
10. Kier PJ, Wells RP: The effect of typing posture on wrist extensor muscle loading. *Hum Factors* 2002; 44: 392–403.
11. Krebs DE, Robbins CE, Lavine L, et al.: Hip biomechanics during gait. *J Orthop Sports Phys Ther* 1998; 28: 51–59.
12. Markolf KL, Shapiro MS, Mandelbaum BR, et al.: Wrist loading patterns during pommel horse exercises. *J Biomech* 1990; 23: 1001–1011.
13. Neal RJ, Kippers V, Plooy D, et al.: The influence of hand guards on forces and muscle activity during giant swings on the high bar. *Med Sci Sports Exerc* 1995; 27: 1550–1556.
14. Patterson R, Viegas SF: Biomechanics of the wrist. *J Hand Ther* 1995; 8: 97–105.
15. Reeves JM, Burkhart TA, Dunning CE: The effect of static muscle forces on the fracture strength of the intact distal radius in vitro in response to simulated forward fall impacts. *J Biomech* 2014; 47: 2672–2678.
16. Reisman M, Burdett RG, Simon SR, et al.: Elbow moment and forces at the hands during swing-through axillary crutch gait. *Phys Ther* 1985; 65: 601–605.
17. Riek S, Chapman AE, Milner T: A simulation of muscle force and internal kinematics of extensor carpi radialis brevis during backhand tennis stroke: implications for injury. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 1999; 14: 477–483.
18. Robertson RN, Boninger ML, Cooper RA, et al.: Pushrim forces and joint kinetics during wheelchair propulsion. *Arch Phys Med Rehabil* 1996; 77: 856–864.
19. Rodgers MM, Gayle GW, Figoni SF, et al.: Biomechanics of wheelchair propulsion during fatigue. *Arch Phys Med Rehabil* 1994; 75: 85–92.
20. Schnorenberg AJ, Slavens BA, Wang M, et al.: Biomechanical model for evaluation of pediatric upper extremity joint dynamics during wheelchair mobility. *J Biomech* 2014; 47: 269–276.
21. Schroer W, Lacey S, Frost FS, et al.: Carpal instability in the weight-bearing upper extremity. *J Bone Joint Surg* 1996; 78A: 1838–1843.
22. Schuind F, Cooney WP, Linscheid RL, et al.: Force and pressure transmission through the normal wrist. A theoretical two-dimensional study in the posteroanterior plane. *J Biomech* 1995; 28: 587–601.
23. Short WH, Werner FW, Fortino MD, et al.: Analysis of the kinematics of the scaphoid and lunate in the intact wrist joint. *Hand Clin* 1997; 13: 93–108.
24. Slavens BA, Bhagchandani N, Wang M, et al.: An upper extremity inverse dynamics model for pediatric Lofstrand crutch-assisted gait. *J Biomech* 2011; 44: 2162–2167.
25. Ural A: Prediction of Colles' fracture load in human radius using cohesive finite element modeling. *J Biomech* 2009; 42: 22–28.
26. Veeger HEJ, van der Woude LHV, Rozendal RH: Load on the upper extremity in manual wheelchair propulsion. *J Electromyogr Kinesiol* 1991; 1: 270–280.
27. Viegas SF, Patterson RM: Load mechanics of the wrist. *Hand Clin* 1997; 13: 109–128.
28. Watson HK, Ryu J: Evolution of arthritis of the wrist. *Clin Orthop* 1986; 202: 57–67.
29. Werner FW, Palmer AK, Somerset JH, et al.: Wrist joint motion simulator. *J Orthop Res* 1996; 14: 639–646.
30. Wright V, Hopkins R: Osteoarthritis in weight-bearing wrists? *Br J Rheumatol* 1993; 32: 243–244.