

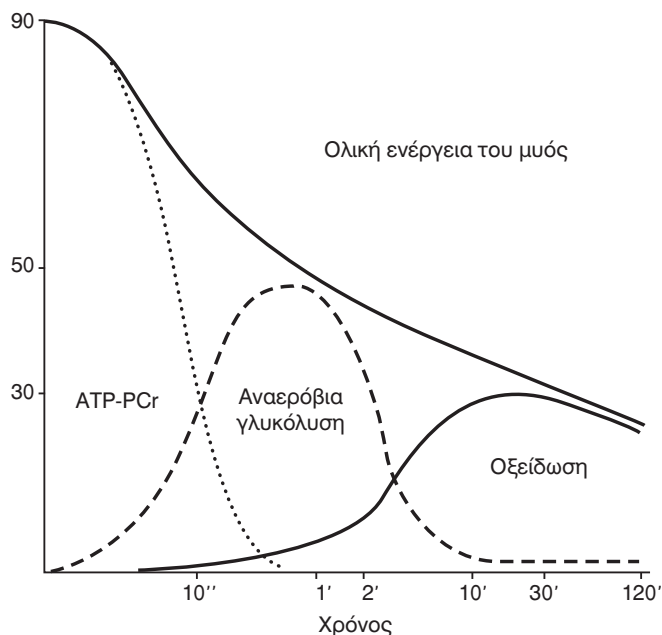
# 1

## Τα ενεργειακά συστήματα της μυϊκής δραστηριότητας

Η ενέργεια που είναι απαραίτητη για τον μυ και την επιτέλεση της μηχανικής λειτουργίας, παράγεται από τρία διαφορετικά ενεργειακά συστήματα (σχήμα 1):

- Φωσφορογόνο ή φωσφορυλίωση της ADP από τη φωσφοκρεατίνη (ATP-PCr) ή αναερόβιο-γαλακτικό [*άμεση ενέργεια*]
- Γλυκολυτικό ή φωσφορυλίωση της ADP στο κυτταρόπλασμα διαμέσου της γλυκολυτικής οδού [*βραχυπρόθεσμη ενέργεια*] και
- Οξειδωτικό ή οξειδωτική φωσφορυλίωση της ADP στα μιτοχόνδρια [*μακροπρόθεσμη ενέργεια*].

Η σχετική συμβολή του κάθε αναφερόμενου συστήματος καθορίζεται από τη διάρκεια και την ένταση της μυϊκής δραστηριότητας. Η επιτέλεση του συγκεκριμένου έργου καθορίζεται όχι μόνο από τη λειτουργία μυοϊνιδίων των σαρκομερίων, αλλά και από την ικανότητα αυτών των μεταβολικών κρίκων για τη διατήρηση του επιπέδου της τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP). Το ATP είναι η εμμέσως χρησιμοποιούμενη μορφή χημικής ενέργειας για τη συστολή των μυών. Η κατάσταση των βιοχημικών μεταβολικών κρίκων είναι ο δείκτης της λειτουργικής κατάστασης του οργανισμού, που καθορίζεται με τη βοήθεια του ειδικού τεστ επιβάρυνσης. Η χαμηλή δύναμη και η μικρή αντοχή των ατόμων με τις διαφορετικές νευρομυϊκές παθήσεις μπορούν να προκληθούν από τις διαταραχές του συστήματος του μεταβολισμού.



**Σχήμα 1.** Ενεργοποίηση των ενεργειακών συστημάτων κατά τη μυϊκή δραστηριότητα διαφορετικής διάρκειας. Φαίνεται ότι σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή ενεργοποιούνται διαφορετικά ενεργειακά συστήματα. Με την αύξηση της διάρκειας του έργου το συνολικό ποσό της παραγόμενης ενέργειας μειώνεται, αλλά μετά από 10λεπτη άσκηση αρχίζει να κυριαρχεί η δραστηριότητα του οξειδωτικού συστήματος. ATP-PCr – ATP-φωσφοκρεατινικό σύστημα.

1. Γενικά, η επιτέλεση των βραχυπρόθεσμων φορτίων υπερμέγιστης έντασης, όπου ο πιθανός χρόνος επιτέλεσης του μυϊκού έργου διαρκεί έως 10 s, εξαρτάται από τα αποθέματα της ATP και της φωσφοκρεατίνης (PCr) [Blei et al, 1993; Korniyenko et al, 2006]. Αυτό το σύστημα είναι πάντα έτοιμο και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμέσως. Όμως, από άποψη ποιότητας το σύστημα ATP-PCr έχει περιορισμένες δυνατότητες, επειδή τα αποθέματά του βρίσκονται σε πολύ χαμηλό επίπεδο και δεν μπορούν να διατηρήσουν τη μυϊκή ικανότητα για μακροπρόθεσμο έργο. Η λειτουργία αυτής της πηγής δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από άλλους παράγοντες.
2. Θεωρείται ότι η μυϊκή δραστηριότητα, που διαρκεί από 10 δευτερόλε-

πτα έως 2 λεπτά, εξασφαλίζεται από τις διαδικασίες αναερόβιας γλυκόλυσης, αποτεθειμένη από τη μεταφορά της γλυκόζης στα μυϊκά κύτταρα ή από τη γλυκογονόλυση των ενδομυϊκών υδατανθράκων [Spriet, 1992; Bogdanis et al, 1996, 1998]. Σε αντίθεση με το σύστημα της ATP-PCr, αυτή η πηγή χαρακτηρίζεται από σημαντικά μεγαλύτερη περιεκτικότητα, δεδομένου ότι στη διάθεσή της είναι ολόκληρο το απόθεμα του γλυκογόνου στους σκελετικούς μυς. Όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο της έντασης του φορτίου, τόσο γρηγορότερα καταναλώνεται το γλυκογόνο και μειώνεται ο μέγιστος χρόνος, κατά τη διάρκεια των οποίων αυτό το φορτίο μπορεί να διατηρηθεί. Όμως υπό κανονικές συνθήκες πλήρους κατανάλωση του γλυκογόνου δεν γίνεται, αλλά το μυϊκό έργο σταματά, κυρίως, λόγω της απότομης αύξησης του επιπέδου του γαλακτικού οξέος στους ιστούς και στο αίμα, το οποίο είναι το τελικό προϊόν αντιδράσεων του κύκλου αναερόβιας γλυκόλυσης και για άλλους λόγους λειτουργίας των συστημάτων ρυθμιστικού χαρακτήρα.

3. Τελικά η ενέργεια για τη μυϊκή δραστηριότητα η οποία διαρκεί περισσότερο από 2 λεπτά, στην ουσία διατηρείται με τις οξειδωτικές διαδικασίες στα μιτοχόνδρια. Οι διαδικασίες αυτές αποθέτουν τα τελικά προϊόντα της αναερόβιας γλυκόλυσης, τα κυκλοφορούντα λιπαρά οξέα ή τα ενδομυϊκά αποθέματα των λιπιδίων [Romlin et al, 1993; Van Loon et al, 2001]. Η μικτή παροχή ενέργειας δεν περιορίζει το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για την επιτέλεση του μυϊκού έργου.

Εδώ σημειώνουμε ότι τα ταχυ-χρονικά όρια οποιασδήποτε έντασης των σωματικών επιβαρύνσεων τόσο σε γυμνασμένα, όσο και σε αγύμναστα άτομα έχουν ατομικό χαρακτήρα. Στη φυσιολογική ζωή, προκειμένου να εξασφαλιστεί με την ενέργεια η καθημερινή σωματική δραστηριότητα ή η ενασχόληση με τον αθλητισμό, οι βιοχημικές διαδικασίες αυτές συνδυάζονται με διαφορετική αναλογία. Η σωματική δραστηριότητα μπορεί να απαιτεί τη συμμετοχή και των τριών διαδικασιών. Παραδείγματος χάριν, κατά τη διάρκεια του περπατήματος με χαλαρή ταχύτητα σε ένα άτομο ενεργοποιείται κυρίως το οξειδωτικό σύστημα μεταβολισμού, ενώ κατά τη διάρκεια της ανάβασης στο βουνό και της κατάβασης απ' αυτό αυξάνεται η συμβολή του γλυκολυτικού μεταβολισμού.



# 2

## Συνέπειες της έλλειψης μυϊκής δραστηριότητας

Είναι γνωστό ότι κατά τη συστηματική σωματική άσκηση, που είναι ανάλογη με τη λειτουργική κατάσταση του οργανισμού, αναπτύσσεται αξιόλογο για την υγεία προπονητικό αποτέλεσμα. Το πιο σημαντικό ανάμεσα στην εξυγιαντική και στην προληπτική επίδραση των σωματικών ασκήσεων είναι οι επιδράσεις τους στη διάρκεια και την ποιότητα ζωής [Lishchuk, Mostkova, 1999; Hall, Brody, 2005; Bandy, Sanders, 2008]. Με την προϋπόθεση ότι και οι άνθρωποι με ευπορία αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα που προκαλούνται από την έλλειψη σωματικής δραστηριότητας, μπορούμε να καταλήξουμε σε ορισμένες γενικεύσεις, που αφορούν στον ρόλο της κινητικής δραστηριότητας στην ανθρώπινη ζωή. Αυτή η διαπίστωση προκύπτει πιο έντονα κατά την ανάλυση των συνεπειών του ελλείμματος των κινητικών φορτίων.

Αποδείχθηκε ότι η κλινήρης κατάσταση των υγιών ατόμων προκαλεί σημαντικές ανεπιθύμητες συνέπειες. Οι πρόσφατες τυχαίες μελέτες που αφορούν στην επίδραση της διαρκούς κλινήρους κατάστασης στον οργανισμό του ανθρώπου δεν απέδειξαν τη βελτίωση της υγείας τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αντιθέτως, αν δεν ήταν εξασφαλισμένη από την αρχή η κινητική δραστηριότητα, θα εξελισσόταν η επιδείνωση της λειτουργικής κατάστασης του οργανισμού [Allen et al, 2000].

Οι αρνητικές συνέπειες της διαρκούς κλινήρους κατάστασης και ακινησίας γίνονται πιο φανερές μετά την ηλικία των 50 ετών. Όχι μόνο οι

ηλικιωμένοι άνθρωποι, αλλά και οι ασθενείς με χρόνιες παθήσεις και οι ανάπηροι υποβάλλονται στις αρνητικές συνέπειες της ακινησίας. Για παράδειγμα, σ' ένα υγιές άτομο κατά τη διαρκή κινήρη κατάσταση αναπτύσσεται βράχυνση των μυών της πλάτης και των ποδιών, ιδιαίτερα σ' αυτούς που συμμετέχουν στις κινήσεις των αρθρώσεων του γονάτου και της ποδοκνημικής άρθρωσης. Σε άτομα με διαταραχές του κινητικού ελέγχου, που συνοδεύονται από αδυναμία των άκρων και σπαστική κατάσταση των μυών, είναι αναμενόμενες τέτοιου είδους επιπλοκές, με πιο μεγάλη ταχύτητα. Ο υγιής άνθρωπος μπορεί να αντιδράσει στη διαρκή υποκινησία στην κινήρη κατάσταση με ατροφία, αδυναμία ή ακαμψία των μυών και τλαιπωρία. Το άτομο με νευρολογικές διαταραχές κατά τη διαρκή κινήρη κατάσταση χάνει σημαντικό μερίδιο ανεξάρτητης λειτουργίας. Γι' αυτό η πρόληψη τέτοιων επιπλοκών πρέπει να βασίζεται σε αρχές βασικής σημασίας για τον σχεδιασμό της περιόδου αποκατάστασης [Harper, Lyles, 1988].

Η έλλειψη μυϊκής δύναμης και η υποκινητικότητα σπάνια διαταράσσουν μόνο ένα σύστημα του οργανισμού.

Από τον πίνακα 1 φαίνεται ότι η ανεπαρκής φυσική δραστηριότητα περιορίζει σημαντικά τις εφεδρικές δυνατότητες του οργανισμού. Σε μεγαλύτερο βαθμό αλλάζει η λειτουργία του συστήματος παροχής οξυγόνου στον οργανισμό. Έτσι, κατά την υποκινησία μειώνεται η συσταλτική δυνατότητα του μυοκαρδίου, επειδή ελαττώνεται η μάζα της καρδιάς. Η μεταφορά των ιόντων του ασβεστίου στις συσταλτικές πρωτεΐνες επιβραδύνεται και επίσης παρατηρείται υπερβολική συγκέντρωση των ιόντων αυτών στην περιοχή μεταξύ των μυϊκών ινιδίων. Επομένως δεν υπάρχει πλήρης χαλάρωση του καρδιακού μυός και εκτός απ' αυτό στα καρδιακά μυϊκά κύτταρα μειώνεται η ένταση διάσπασης ATP και CP. Έτσι, περιορίζεται επίσης και η θρεπτική λειτουργία της κυκλοφορίας του αίματος.

Κατά την υποκινησία αποδυναμώνεται ο φλεβικός τόνος και το έργο της μυϊκής αντλίας, που εξασφαλίζεται από τη σύσπαση των μυών των κάτω άκρων και των μυών της κοιλιακής κοιλότητας και του διαφράγματος. Μειώνεται έτσι η επιστροφή του αίματος στην καρδιά και αναλογικά το μέγεθος του συσταλτικού όγκου, διαταράσσεται η μικροκυκλοφο-

**Πίνακας 1.** Οι αλλαγές στα διάφορα συστήματα του οργανισμού κατά την υποκινησία

<b>Μυοσκελετικό σύστημα</b>	<b>Καρδιαγγειακό, αναπνευστικό και άλλα συστήματα</b>	<b>Μεταβολισμός και ενδοκρινικό σύστημα</b>	<b>Γνωστικές λειτουργίες και συμπεριφορά</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Συσπάσεις των μυών</li> <li>- Ατροφία των μυών</li> <li>- Μείωση της δύναμης των μυών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ανακατανομή των υγρών στον οργανισμό</li> <li>- Ορθοστατική υπόταση</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Αλλαγές των ηλεκτρολυτών</li> <li>- Μείωση ανοχής στη γλυκόζη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Στέρηση των αισθητηρίων</li> <li>- Αποπροσανατολισμός</li> <li>- Διαταραχή της συνείδησης</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Οστεοπόρωση</li> <li>- Υπερασβεστιαμία</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Μείωση των εφεδρικών δυνατοτήτων του καρδιοαναπνευστικού συστήματος</li> <li>- Θρομβοεμβολή</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Αύξηση της παραγωγής της παραθυρεοειδούς ορμόνης</li> <li>- Άλλες αλλαγές των ορμονών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Άγχος και κατάθλιψη</li> <li>- Μείωση των γνωστικών δυνατοτήτων</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Διαταραχή στατοκινητικής σταθερότητας και συντονισμού</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Αύξηση της αντίστασης αναπνοής</li> <li>- Υποστατική πνευμονία</li> <li>- Κατακράτηση των ούρων</li> <li>- Νεφρολιθίαση</li> <li>- Ανοσοανεπάρκεια</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Κίνητρο στην υποδυναμία</li> </ul>

ρία, ιδιαίτερα στα κάτω άκρα, μειώνεται το μέγεθος αίματωσης στο δέρμα και επιδεινώνονται οι ρεολογικές ιδιότητες του αίματος (ελαττώνεται η ροή του αίματος, αυξάνεται η συνάθροιση και συγκολλητικότητα των έμμορφων στοιχείων). Επίσης μειώνεται η δύναμη και η λειτουργική ικανότητα των αναπνευστικών μυών και αποδυναμώνεται η αιμοποίηση.

Η έλλειψη της σωματικής δραστηριότητας είναι ο κυριότερος παράγοντας ανάπτυξης παθήσεων του καρδιαγγειακού συστήματος. Διαπιστώθηκε ότι ο κίνδυνος εμφάνισης παθήσεων του καρδιαγγειακού συστήματος σε σωματικά ανενεργά άτομα είναι διπλάσιος απ' ό,τι στα δραστήρια

άτομα. Με τη δεύτερη προληπτική συντήρηση στους ασθενείς που συμμετέχουν σε πρόγραμμα αποκατάστασης σημειώνεται ότι βρέθηκε 20-25% χαμηλότερη θνησιμότητα από καρδιοπάθεια απ' ό,τι στην ομάδα ελέγχου. Η κλινική πρακτική καταδεικνύει την ανάγκη πρόωρης κινητοποίησης, η οποία περιορίζει τις περιόδους εισαγωγής σε νοσοκομείο και τις επιπλοκές της παρατεταμένης υποκινητικότητας [Morris et al, 1953; Τοκμακίδης, Βόλακλης, 2000].

Η ατροφία των μυών κατά την υποκινησία –σε αντίθεση από την τοπική, όπως το κάταγμα ποδιού– έχει πιο εκτεταμένη φύση και είναι πιο έντονη για αντιβαρυστικούς μυς. Η υποκινησιακή ατροφία μυών εξαρτάται από την αλλαγή ομοιοστάσης στα μυϊκά κύτταρα και κατά τη διάρκεια και μετά την περίοδο κλινήρους κατάστασης, ενώ η ατροφία είναι πιο έντονη στους μυς των κάτω άκρων παρά των άνω [Berg et al, 1991]. Η μείωση της σύνθεσης της πρωτεΐνης στους μυς και σε όλο τον οργανισμό οδηγεί στη μυϊκή ατροφία. Η ελάττωση της μάζας των μυών τις πρώτες μέρες προχωράει με χαμηλό ρυθμό, ενώ μετά αυξάνεται. Κατά τη μυϊκή ατροφία επίσης μειώνεται η σύνθεση του κολλαγόνου αλλά σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με την πρωτεΐνη. Αυτό προκαλεί προσωρινή ή μόνιμη δυσαναλογία στην περιεκτικότητα του κολλαγόνου και της πρωτεΐνης (υπεροχή του κολλαγόνου) και αλλαγές των μηχανικών ιδιοτήτων των μυών.

Κατά τη μυϊκή ατροφία που είναι συνέπεια της υποκινητικότητας παρατηρείται όχι μόνο μείωση της σύνθεσης της πρωτεΐνης, αλλά και αυξημένη απώλεια του αζώτου, που φτάνει σε υγιή άτομα 2g/day και σε εξαντλημένους ασθενείς 12g/day. Η αυξανόμενη απώλεια του αζώτου αρχίζει από την 5η μέρα της κλινήρους κατάστασης με κορύφωση στο τέλος της 2ης εβδομάδας. Η διαρκής κλινήρης κατάσταση και η απώλεια σωματικού βάρους προκαλούν σημαντική αύξηση έκκρισης της κρεατίνης και της κρεατινίνης.

Η μέθοδος μαγνητικής αντήχησης απέδειξε ότι μετά από 20 ημέρες κλινήρους υποκινητικότητας ο όγκος των μυών της κνήμης μειώνεται κατά 9,4-10,3% και των εκτεινόντων και καμπτήρων της άρθρωσης του γόνατος είναι μικρότερος κατά 5,1-8,0% [Akima et al, 2000]. Η ατροφία



των μυϊκών ινών τύπου I είναι περισσότερο εμφανής παρά η ατροφία των μυϊκών ινών τύπου II (το μέσο μέγεθος των ινών τύπου I στο m. soleus μειώνεται τον 2ο μήνα κλινήρους κατάστασης κατά 12% και στον 4ο μήνα η ελάττωση αυτή φτάνει στο 39%). Αυτές οι αλλαγές μπορούν να αποτραπούν με φορτίσεις βαρύτητας από 10 ώρες την ημέρα [Ohira et al, 1999].

Ως συνέπεια της ατροφίας των μυών είναι η αδυναμία τους που οδηγεί στη μείωση της αντοχής και της σταθερότητας των μυών κατά το σωματικό έργο. Η μέγιστη δύναμη των μυών μειώνεται σ' αυτήν την περίπτωση 25-40% κάτω από το επίπεδο ορίου [Berg et al, 1991]. Κατά τη διάρκεια της αυστηρής κλινήρους κατάστασης οι μύες μπορεί να χάσουν το 10-15% των δυνάμεών τους ανά εβδομάδα.

Κατά τη διαρκή έλλειψη κινητικής δραστηριότητας εκδηλώθηκε ανάπτυξη της οστεοπενίας, της οποίας ο κυριότερος μηχανισμός θεωρείται η οστεοκυτταρική οστεόλυση. Επιβραδύνεται η οστεοβλαστική ιστογένεση, η οστεοκλαστική απορρόφηση, η οποία προκαλείται από μεταβολή στην ιεραρχία των συστημάτων που ρυθμίζουν την ομοιόσταση του ασβεστίου.

Σε μερικούς ασθενείς ως συνέπεια της κλινήρους κατάστασης εμφανίζεται η λείανση της θετικής (στη νόρμα) κλίσης βαρύτητας της ορυκτής πυκνότητας στους οσφυϊκούς σπονδύλους L1-L3. Υπό αυτές τις συνθήκες αποδείχθηκε η μέγιστη μείωση της ορυκτής πυκνότητας του οστικού ιστού στη μεσοπρόσθια ζώνη διάφυσης της κνήμης. Είναι γνωστό ότι αυτή η ζώνη φέρει τα μέγιστα δυναμικά φορτία κατά τις κινήσεις. Με την αποκατάσταση της πρέπουσας μυϊκής δραστηριότητας ενισχύεται και η βελτιωτική επίδρασή της στον οργανισμό.