

Χαρακτηριστικά των μυών

Έχει αποδειχθεί ότι η μυϊκή ισχύς του άνω μέρους του σώματος (upper body) αποτελεί βασικό παράγοντα επιτυχίας στη κοιλύμβηση ταχύτητας (sprint swimming). Η ισχύς κατά την κοιλύμβηση, όπως αυτή καθορίζεται με τη δοκιμασία της *προσδεμένης κοιλύμβησης* (tethered swimming), είναι υπεύθυνη για το 86% της επίδοσης ενός κοιλυμβητή σε ένα αγώνισμα ταχύτητας (sprint) 25 μέτρων *ελεύθερο ή κρούσι*. Επιπλέον, υπάρχει ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ της μυϊκής δύναμης ενός κοιλυμβητή και της ικανότητας του να αναπτύσσει ισχύ. Όσο όμως αυξάνει η απόσταση κοιλύμβησης, τόσο φαίνεται να μειώνεται η συμβολή της μυϊκής δύναμης. Στα 100, 200 και 400 μέτρα, η συμβολή της μυϊκής δύναμης πέφτει αντίστοιχα στο 74, 72 και 58%. Παρ' όλα αυτά, οι πιο επιτυχημένοι κοιλυμβητές είναι συνήθως και οι πιο δυνατοί.

Η ικανότητα παραγωγής μέγιστης μυϊκής ισχύος κατά τη διάρκεια της κοιλύμβησης, είναι μία σύνθετη διαδικασία που εξαρτάται από τη συγχρονισμένη αλληλεπίδραση πολλών φυσιολογικών παραγόντων. Η κατανόηση αυτών των παραγόντων είναι απαραίτητη, αν θέλουμε να αξιοποιήσουμε στο μέγιστο βαθμό τις δυνατότητες του αθλητή και να διαμορφώσουμε ένα πρόγραμμα προπόνησης, το οποίο θα αυξήσει τη δύναμη του. Σκοπός της συζήτησης που ακολουθεί είναι να περιγράψει την εφαρμοσμένη πλευρά της φυσιολογίας των μυών και να παρουσιάσει μια βάση για προπόνηση. Μία πιο λεπτομερής εξήγηση του μηχανισμού της μυϊκής συστολής, περιέχεται στο κείμενο των Willmore και Costill (1988).

Μυς: δομή και λειτουργία

Οι *σκελετικοί μύες*, γνωστοί και ως γραμμωτοί μύες, προσφύονται στα οστά και είναι υπεύθυνοι για τη κίνηση τους ενώ η λειτουργία τους ελέγχεται πλήρως από τη βούληση μας. Οι *μυϊκές ίνες* ή τα κύτταρα, δεν δρουν μεμονωμένα αλλήλα ούτε και ανεξάρτητα από τους άλλους μύες του σώματος. Αντίθετα, η λειτουργία των μυϊκών ινών συγχρονίζεται από ένα κεντρικό δίκτυο νευρικών κυττάρων, τόσο εντός όσο και εκτός του εγκεφάλου.

Ένας μυς αποτελείται από χιλιάδες μυϊκές ίνες. Ο αριθμός των μυϊκών ινών που σχηματίζουν ένα μυ ποικίλει σημαντικά, ανάλογα με το μέγεθος και τη λειτουργία του. Κάθε μυϊκή ίνα έχει ένα προστατευτικό περίβλημα ή μεμβράνη που την καλύπτει, το *σαρκείτημα*, ενώ το εσωτερικό αυτών των μυϊκών κυττάρων περιέχει το σαρκόπλάσμα, μία ημικρυσταλλική ουσία, μέσα στην οποία βρίσκονται τα πρωτεϊνικά ινίδια και οι μηχανισμοί παραγωγής ενέργειας, που είναι απαραίτητοι για την κίνηση. Η Εικόνα 1.1 απεικονίζει το εσωτερικό μιας μυϊκής ίνας, δείχνοντας τις πρωτεΐνες σύσπασης (*ακτίνη και μυοσίνη*), τις μονάδες παραγωγής ενέργειας (*μιτοχόνδρια*) και το βασικό καύσιμο (*γλυκογόνο*) που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας κατά τη κοιλύμβηση.

Αν και ο ακριβής μηχανισμός που προκαλεί τη βράχυνση της μυϊκής ίνας κατά τη διάρκεια της σύσπασης δεν είναι ακόμα πλήρως γνωστός, εντούτοις υπάρχουν επαρκείς αποδείξεις ότι, μετά από τον ερεθισμό τους τα ινίδια ακτίνης και μυοσίνης "γλιστρούν" το ένα κατά μήκος του άλλου. Αυτή η κίνηση πραγματοποιείται χάρη στην έλξη που ασκούν οι εγκάρσιες προβολές των ινιδίων μυοσίνης, οι οποίες συνδέονται με τα ινίδια της ακτίνης. Αυτές οι εγκάρσιες συνδέσεις βραχαίνουν ξαφνικά, έλκοντας έτσι τα πρωτεϊνικά ινίδια το ένα κατά μήκος του άλλου. Αυτό συμβαίνει ταυτόχρονα σε χιλιάδες μυϊκές ίνες, προκαλώντας τελικά μία ισχυρότατη έλξη στους τένοντες.

Εφόσον η αντοχή και η ταχύτητα του κοιλυμβητή εξαρτώνται από την ικανότητα των μυών να παράγουν δύναμη και ενέργεια, οι διαφορές στην απόδο-



Εικ. 1-1. Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου του εσωτερικού μυϊκής ίνας. A = μιτοχόνδρια, B = γλυκογόνο, C = πρωτεϊνικές δεσμίδες ακτίνης και μυοσίνης.

ση των κολυμβητών μπορούν κατά κάποιο τρόπο να συσχετισθούν με αυτά τα χαρακτηριστικά των μυών των άνω και των κάτω άκρων. Χάρη στη τεχνολογική εξέλιξη των τελευταίων 20 ετών, σήμερα είναι δυνατό να πάρουμε δείγματα μυϊκού ιστού από κολυμβητές πριν και μετά την προπόνηση, με τη χρήση βελόνας βιοψιών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2.

Μικροσκοπικές και χημικές τεχνικές μας επιτρέπουν να μελετήσουμε τη κατασκευή των μυϊκών κυττάρων και να μετρήσουμε την επίδραση της οξείας άσκησης και της προπόνησης στην απόδοσή τους. Ένα χαρακτηριστικό των μυών που έχει προσελκύσει σε σημαντικό βαθμό τη προσοχή του αθλητικού κόσμου, είναι η σύστασή τους σε *μυϊκές ίνες ταχείας (fast twitch - FT)* και *βραδείας συστολής (slow twitch - ST)*. Η φωτογραφία ανθρώπινου μύος από μικροσκόπιο στην Εικόνα 1.3 παρουσιάζει τους διαφορετικούς τύπους μυϊκών ινών. Οι χρωματισμένες με μαύρο χρώμα ίνες σε αυτή τη φωτογραφία είναι οι ίνες βραδείας συστολής. Υπάρχουν δύο τύποι μυϊκών ινών ταχείας συστολής: οι τύπου α (FT_a , που δεν έχουν χρωματιστεί στην Εικ. 1.3) και οι τύπου β (FT_b , γκριζες στην Εικ. 1.3). Σε μία μέση ομάδα ανθρώπων, περίπου το 50% των ινών στα άνω και στα κάτω άκρα είναι βραδείας συστολής, ενώ οι ίνες FT_a αποτελούν το 25% του μύος. Το υπόλοιπο 25% είναι κυρίως ίνες



Εικ. 1-2. Λήψη δείγματος μύος από τον ώμο κολυμβητή.



Εικ. 1-3. Εγκάρσια διατομή μυϊκών ινών από το μηρό αγύμναστου άνδρα. Οι ίνες βραδείας συστολής έχουν χρωματισθεί μαύρες, οι ίνες ταχείας συστολής τύπου β (FT_{β}) έχουν χρωματισθεί γκριζες, ενώ οι ίνες ταχείας συστολής τύπου α (FT_{α}) δεν έχουν χρωματισθεί. Σε γενικές γραμμές, οι ίνες βραδείας συστολής επιδεικνύουν μεγαλύτερη αερόβια και μικρότερη αναερόβια ικανότητα, από τις ίνες ταχείας συστολής.

FT_{β} . Τα νευρικά κύτταρα που ελέγχουν τις μυϊκές ίνες, καθορίζουν αν είναι βραδείας συστολής (ST) ή ταχείας συστολής (FT). Η μυϊκή ίνα και το νευρικό σύστημα με το οποίο συνδέεται, ονομάζεται *κινητική μονάδα*. Μία κινητική ομάδα βραδείας συστολής μπορεί να περιέχει ένα σχετικά μικρό νευρικό κύτταρο, συνδεδεμένο με μία ομάδα 10-180 μυϊκών ινών, ενώ οι κινητικές ομάδες ταχείας συστολής περιέχουν μεγαλύτερα νευρικά κύτταρα, τα οποία ελέγχουν 300 με 800 ίνες το καθένα.

Σε γενικές γραμμές, οι κινητικές μονάδες βραδείας συστολής χαρακτηρίζονται από καλή αερόβια αντοχή και χρησιμοποιούνται συχνότερα κατά τη

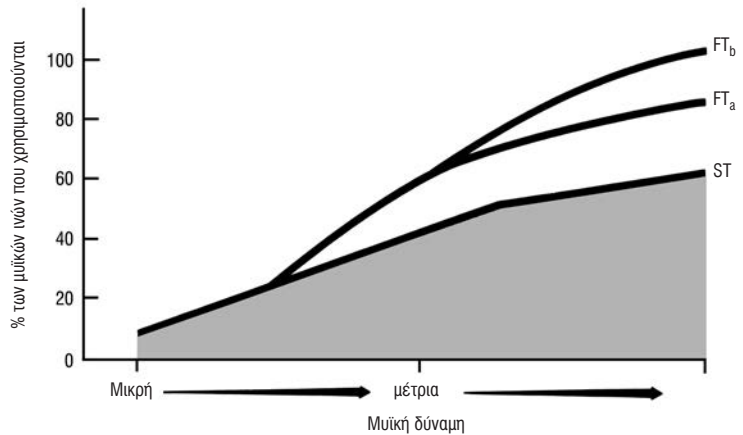
διάρκεια ασκήσεων αντοχής χαμηλής έντασης. Οι κινητικές μονάδες ταχείας συστολής α (FT_{α}) αναπτύσσουν σημαντικά μεγαλύτερη δύναμη από τις κινητικές ομάδες βραδείας συστολής, αλλά κουράζονται σχετικά εύκολα. Για αυτό οι ίνες FT χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια συντομότερων, αθλητάχύτερων αγώνων. Αν και η σημασία των μυϊκών ινών FT_{β} δεν έχει ακόμα πλήρως εξακριβωθεί, φαίνεται ότι δεν ενεργοποιούνται εύκολα από το νευρικό σύστημα και έτσι χρησιμοποιούνται μάλλον σπάνια στην φυσιολογική, χαμηλής εντάσεως δραστηριότητα.

Πάντως, δεν είναι η ταχύτητα της σύσπασης που καθορίζει το πρότυπο επιστράτευσης των μυϊκών ινών. Είναι μάλλον το επίπεδο της δύναμης που απαιτείται από το μυ, το οποίο αναγκάζει τα κινητικά νευρικά κύτταρα να ενεργοποιήσουν επιλεκτικά τις ST ή τις FT ίνες. Η εικ. 1.4 παρουσιάζει τη σχέση ανάμεσα στην ανάπτυξη δύναμης από ένα μυ και τη χρήση ινών βραδείας συστολής (ST) και ταχείας συστολής (FT_{α} & FT_{β}). Κατά τη διάρκεια της αργής, χαμηλής έντασης κοιλύμνησης, το μεγαλύτερο μέρος της μυϊκής δύναμης παράγεται από ίνες ST. Καθώς οι απαιτήσεις για μυϊκή τάση αυξάνουν σε μεγαλύτερη φόρτιση, προστίθεται η χρήση των ινών FT_{α} . Τέλος σε αγωνίσματα ταχύτητας (π.χ. 50-200μ), όπου απαιτείται η μέγιστη δύναμη, ενεργοποιούνται και οι ίνες FT_{β} .

Τέτοιου είδους πληροφορίες έχουν ουσιαστική σημασία στην κατανόηση των ειδικών απαιτήσεων της προπόνησης και του αγώνα. Δηλώνουν ότι όλη η προπόνηση που γίνεται σε αργό ρυθμό ή με χαμηλή δύναμη, δίνει έμφαση στη χρήση των ινών βραδείας συστολής, χωρίς να έχει ιδιαίτερη επίδραση στην εκγύμναση των ινών ταχείας συστολής. Για αυτό το λόγο οι μακροχρόνιες, αργές προπονήσεις δεν προετοιμάζουν τους μύες για τις ανάγκες τω αγώνων, όπου απαιτείται η μέγιστη δύναμη, τόσο από τις ίνες βραδείας συστολής όσο και από τις ίνες ταχείας συστολής.

Αυτή η γνώση, σχετικά με τη σύσταση και τη χρήση των μυϊκών ινών, κάνει φανερό ότι αθλητές με μεγάλο ποσοστό ινών βραδείας συστολής μπορεί να πλεονεκτούν σε αγωνίσματα αντοχής μεγάλ-

Εικ. 1-4. Η υπό μορφή κεκλιμένου επιπέδου επιστράτευση των μυϊκών ινών σε διάφορα επίπεδα μυϊκής προσπάθειας. Ενώ σε χαμηλά επίπεδα δύναμης χρησιμοποιούνται μόνο οι ίνες βραδείας συστολής, μεγαλύτερη φόρτιση των μυών οδηγεί σε επιστράτευση και των τριών τύπων μυϊκών ινών.



λης διάρκειας, ενώ εκείνοι με υπεροχή των ινών ταχείας συστολής, είναι ίσως καλύτεροι σε σύντομα και εκρηκτικά αγωνίσματα. Ο πίνακας 1.1 παρουσιάζει τη σύνθεση των μυϊκών ινών πετυχημένων αθλητών σε διάφορα αθλήματα. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι μύες των κάτω άκρων των κορυφαίων αθλητών ταχύτητας, αποτελούνται κυρίως από ίνες ταχείας συστολής, ενώ στους δρομείς αποστάσεων επικρατούν οι ίνες βραδείας συστολής. Αν και παρατηρείται μία τάση στους κολυμβητές να παρουσιάζουν ψηλότερο ποσοστό ινών βραδείας συστολής στους μύες του ώμου (π.χ. δελητοειδείς), σε σχέση με τους μη αθλητές, εντούτοις η σύσταση των μυϊκών ινών δεν φαίνεται να αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση επιτυχίας στην αγωνιστική κολύμβηση. Σε αντίθεση με τους δρομείς ταχύτητας, στους μύες των κάτω άκρων των οποίων επικρατούν οι ίνες ταχείας συστολής, η αναλογία ινών ταχείας και βραδείας συστολής ποικίλει μεταξύ των επιτυχημένων κολυμβητών ταχύτητας και αποστάσεων.

Ενώ προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι η προπόνηση μπορεί να αυξήσει την αντοχή των μυών, υπάρχουν λίγες αποδείξεις ότι αλλιάζει η σύσταση των μυών σε ίνες βραδείας και ταχείας συστολής μετά από προπόνηση λίγων μηνών. Υπάρχει διαφωνία για το κατά πόσο η μακροχρόνια προπόνηση μπορεί να προκαλέσει μετατροπή των

ινών βραδείας και ταχείας συστολής. Όποια μεταβολή και αν επέλθει στο ποσοστό των ινών βραδείας και ταχείας συστολής με την προπόνηση, θα είναι πιθανότατα μικρό. Δηλαδή, είναι ιδιαίτερα απίθανο να αλλιάξει η προπόνηση τη σύνθεση των ινών ενός αθλητή περισσότερο από λίγες ποσοστιαίες μονάδες. Οι περισσότερες μελέτες αναφέρουν, ότι η σύνθεση των μυών παραμένει σταθερή και ανεπηρέαστη από την προπόνηση, υποδηλώνοντας ότι τουλάχιστον αυτό το χαρακτηριστικό ενός πρωταθλητή είναι ίσως κληρονομικό. Μελέτες με μονοζυγωτικούς δίδυμους έχουν δείξει ότι έχουν ακριβώς την ίδια σύνθεση μυϊκών ινών, ενώ οι διζυγωτικοί δίδυμοι διαφέρουν στη σύνθεση των μυϊκών ινών όπως διαφέρουν και στα υπόλοιπα σωματικά χαρακτηριστικά τους. Αυτά τα ευρήματα συνηγορούν υπέρ της θεωρίας, ότι η σύνθεση των μυϊκών ινών είναι γενετικά προκαθορισμένη και το ποσοστό των ινών βραδείας και ταχείας συστολής διαμορφώνεται αμέσως μετά τη γέννηση και παραμένει σχετικά αναλλοίωτο για την υπόλοιπη ζωή. Εξαίρεση σε αυτό το κανόνα αποτελεί η μετατροπή σε κάποιο βαθμό των υποομάδων (FT_a και FT_b) των ινών ταχείας συστολής, η οποία μπορεί να παρατηρηθεί με τη προπόνηση. Οι ίνες FT_a θεωρούνται γενικά πιο αερόβιες –ικανές να χρησιμοποιήσουν οξυγόνο για τη παραγωγή ενέργειας– από τις ίνες FT_b. Με τη προπόνηση αντοχής,



Πίνακας 1-1. Το μέσο ποσοστό των ινών βραδείας συστολής (%ST) και ταχείας συστολής (%FT) σε επιλεγμένους μυσ αθλητών και των δύο φύλων. Α= άνδρες, Γ= γυναίκες. Επίσης παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της επιφάνειας των μυϊκών ινών σε εγκάρσια διατομή.

Αθλητές	Φύλο	Μυς	%ST	%FT	Μέγεθος Ινών (μ ²)	
					ST	FT
Κολυμβητές	A	Δελτοειδής	67	33	6345	5455
	Γ	Δελτοειδής	69	31	4332	3857
Δρομείς ταχύτητας	A	Γαστροκνήμιος	24	76	5878	6034
	Γ	Γαστροκνήμιος	27	73	3752	3930
Δρομείς αποστάσεων	A	Γαστροκνήμιος	79	21	8342	6485
	Γ	Γαστροκνήμιος	69	31	4441	4128
Ποδηλάτες	A	Έξω πλατύς μηριαίος	57	43	6333	6116
	Γ	Έξω πλατύς μηριαίος	51	49	5487	5216
Αθλητές άρσης βαρών	A	Γαστροκνήμιος	44	56	5060	8910
	A	Δελτοειδής	53	47	5010	8450
Αθλητές τριάθλου	A	Δελτοειδής	60	40	-	-
	A	Έξω πλατύς μηριαίος	63	37	-	-
	A	Γαστροκνήμιος	59	41	-	-
Αθλητές κανό	A	Δελτοειδής	71	29	4920	7040
Σφαιροβόλοι	A	Γαστροκνήμιος	38	62	6367	6441
Μη αθλητές	A	Έξω πλατύς μηριαίος	47	53	4722	4709

οι ίνες FT_b αρχίζουν να παίρνουν τα χαρακτηριστικά των ινών FT_a. Αυτό σημαίνει, ότι οι ίνες αυτές χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα κατά τη προπόνηση και κερδίζουν μεγαλύτερη αντοχή. Αν και η πλήρης σημασία αυτής της μετατροπής των ινών FT_b σε FT_a δεν είναι γνωστή, μπορεί να εξηγήσει γιατί βρίσκουμε ελάχιστες, αν βρεθούν, ίνες FT_b στους μύες των έντονα προπονημένων κολυμβητών.

Το μέγεθος (διάμετρος) των μυϊκών ινών διαφέρει ιδιαίτερα μεταξύ των κορυφαίων κολυμβητών, αλλά κατά μέσο όρο, οι ίνες βραδείας συστολής είναι κατά 14% περίπου μεγαλύτερες από τις ίνες ταχείας συστολής στους μύες του ώμου κορυφαίων κολυμβητών και κολυμβητριών (πίνακας 1.1). Φυσιολόγοι έχουν προτείνει ότι η προπόνηση για αντοχή ή δύναμη, μπορεί να προκαλεί εκλεκτική μεγέθυνση (υπερτροφία) των ινών βραδείας και τα-

χείας συστολής, αντίστοιχα. Πρέπει επίσης να σημειώσουμε ότι υπάρχει διαφορά στη διάμετρο των μυϊκών ινών ανάλογα με το φύλο. Οι μυϊκές ίνες από άρρενες δρομείς, ποδηλάτες και κολυμβητές είναι κατά 40-50% μεγαλύτερες από αυτές που παρατηρούνται σε αθλήτριες των ίδιων αθλημάτων. Επομένως, η διαφορά στη μυϊκή μάζα που παρατηρείται μεταξύ ανδρών και γυναικών μπορεί να οφείλεται κυρίως στο διαφορετικό μέγεθος των ινών, παρά σε διαφορά στον αριθμό τους.

Είναι το ποσοστό των ινών βραδείας και ταχείας συστολής το ίδιο σε όλους τους μύες του σώματος; Σε γενικές γραμμές, οι μύες των άνω και κάτω άκρων έχουν παρόμοια σύνθεση μυϊκών ινών, αν και οι κολυμβητές έχουν τη τάση να παρουσιάζουν ελαφρά υψηλότερο ποσοστό ινών βραδείας συστολής στους δελτοειδείς μύες, από ότι οι αθλη-

τές που γυμνάζουν μόνο τους μύες των κάτω άκρων (π.χ. ποδηλάτες και δρομείς). Αυτό το εύρημα καθώς και μελέτες με άηλους αθλητές (π.χ. αθλητές κανό), που γυμνάζουν μόνο τους μύες των άνω άκρων, υποδηλώνουν ότι τέτοια προπόνηση μπορεί να αυξήσει το ποσοστό των ινών ταχείας συστολής σε αυτούς τους μύες. Ο υποκνημίδιος μυς, που βρίσκεται κοντά στο οστό στη κνήμη, αποτελείται αποκλειστικά από ίνες βραδείας συστολής (πάνω από 90%) σε όλη τους τους ανθρώπους. Έχει επίσης παρατηρηθεί, ότι οι αγύμναστοι άνδρες στους οποίους επικρατούν οι ίνες βραδείας συστολής στους μύες των κάτω άκρων, έχουν κατά πάσα πιθανότητα υψηλό ποσοστό αυτών των ινών και στα άνω άκρα.

Πώς χρησιμοποιούνται οι μύες;

Τα περισσότερα από 215 ζευγάρια μυών του σώματος ποικίλουν σε μέγεθος, σχήμα και χρήση. Είναι σημαντικό να καταλάβουμε ότι για την πραγματοποίηση κάθε συγχρονισμένης κίνησης απαιτείται η εφαρμογή δύναμης από μύες, οι οποίοι λειτουργούν ως οι βασικοί υποκινητές και ονομάζονται *αγωνιστές μύες* και η χαλάρωση των μυών που θα μπορούσαν να αντισταθούν στη κίνηση και οι οποίοι ονομάζονται *ανταγωνιστές μύες*. Η ομαλή κάμψη του αγκώνα απαιτεί βράχυνση του δικέφαλου μυός (αγωνιστής) και χαλάρωση του τρικέφαλου (ανταγωνιστής).

Η βασική λειτουργία του μυός είναι η βράχυνση, η οποία αναφέρεται και ως *σύγκεντρη* δράση. Υπάρχουν όμως περιστάσεις, όπου οι μύες μπορούν να δράσουν χωρίς να μειώσουν το μήκος τους. Αυτή η στατική ανάπτυξη δύναμης ονομάζεται *ισομετρική* δράση και συμβαίνει για παράδειγμα, όταν προσπαθούμε να σηκώσουμε ένα αντικείμενο, το βάρος του οποίου είναι μεγαλύτερο από τη δύναμη που παράγουν οι μύες, ή όταν κρατάμε ένα αντικείμενο σταθερό με τον αγκώνα σε κάμψη. Από την άλλη μεριά, όταν ο μυς επιμηκύνεται ενώ διεγείρεται να δράσει, όπως συμβαίνει με τους δι-

κέφαλους όταν κατεβάζουμε ένα βάρος εκτεινώντας τους αγκώνες, τότε η δράση ονομάζεται *έκκεντρη*. Σε πολλές δραστηριότητες, όπως το τρέξιμο και το άλμα, συνυπάρχουν και οι τρεις τρόποι δράσης. Αντίθετα, στη κολύμβηση έχουμε αποκλειστικά σύγκεντρες συσπάσεις.

Η ανάπτυξη δύναμης από το μυ εξαρτάται από το αρχικό του μήκος και τη ταχύτητα βράχυνσης. Το μήκος που θα είχε ένας μυς σε χαλαρή κατάσταση, αν δεν προσφύταν σε οστό, ονομάζεται *μήκος ισορροπίας*. Όταν ένας μυς που προσφύεται στο σκελετό, βρίσκεται σε μήκος ανάπαυσης, παρουσιάζει φυσιολογικά ελαφρά τάση, διότι είναι ελαφρά διατεταμένος.

Οι μετρήσεις της ισομετρικής δύναμης είναι μέγιστες, όταν το μήκος του μυός τη στιγμή της ενεργοποίησης είναι κατά 20% μεγαλύτερο από το μήκος ισορροπίας. Αύξηση ή μείωση του μήκους του μυός, προκαλεί ελάττωση της μέγιστης δύναμης που αναπτύσσεται. Όταν ο μυς επιμηκυνθεί στο διπλάσιο του μήκους ισορροπίας, τότε η δύναμη που αναπτύσσεται από το μυ είναι περίπου μηδενική. Αυτή η αποτυχία παραγωγής δύναμης όταν ο μυς υπερδιαταθεί, οφείλεται στη μειωμένη επικάλυψη μεταξύ των ινιδίων ακτίνης και μυοσίνης. Όσο περισσότερο απομακρύνονται μεταξύ τους, τόσο λιγότερες εγκάρσιες συνδέσεις υπάρχουν μεταξύ τους για να παράγουν δύναμη.

Οι μύες και ο συνδετικός του ιστός (π.χ. τένοντες και περιτονίες), έχουν την ιδιότητα της ελαστικότητας. Όταν διατείνονται, λόγω της ελαστικότητας τους αποθηκεύουν ενέργεια, η οποία παράγει επιπλέον δύναμη κατά τη διάρκεια της σύσπασης που ακολουθεί. Στο ανθρώπινο σώμα το μήκος των μυών περιορίζεται από την ανατομική διαμόρφωση και από τη πρόσφυση τους στα οστά. Όταν διατείνονται, αυτή η ανατομική διαμόρφωση τους επιτρέπει να αυξήσουν το μήκος τους κατά 1,2 φορές σε σχέση με το μήκος ισορροπίας, το ιδανικό δηλαδή μήκος για τη μέγιστη ανάπτυξη δύναμης.

Εφόσον οι μύες χρησιμοποιούν οστικούς μοχλούς για να ασκήσουν τη δύναμη τους, η ανατομική διαμόρφωση αυτών των μυϊκών-οστικών μο-

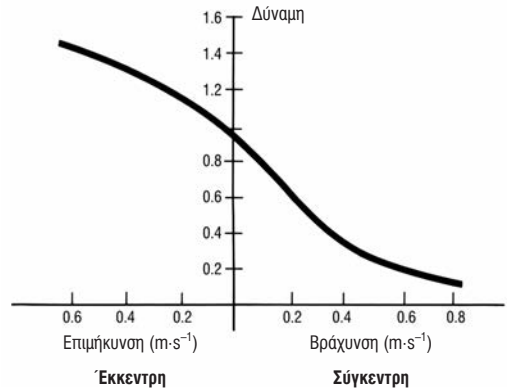
χλών, είναι βασική για την κατανόηση της κίνησης. Η πρόσφυση του τένοντα του δικέφαλου γίνεται μόλις στο ένα δέκατο της αποστάσεως από το υπομόχλιο (αγκώνα) στο σημείο αντίστασης στο χέρι. Έτσι για να κρατήσει ο μυς ένα βάρος 5 κιλών, πρέπει να ασκήσει δεκαπλάσια δύναμη, δηλαδή 50 κιλά. Η καλύτερη γωνία της άρθρωσης για την εφαρμογή αυτής της δύναμης είναι περίπου 100°, διότι μικρότερη ή μεγαλύτερη κάμψη του αγκώνα θα μειώσει τη γωνία εφαρμογής της δύναμης στο βραχίονα του μοχλίου.

Η ικανότητα ανάπτυξης δύναμης εξαρτάται επίσης από τη ταχύτητα επιμήκυνσης ή βράχυνσης του μυός. Η Εικόνα 1.5 επιδεικνύει αυτή την εξάρτηση, δείχνοντας ότι οι μεγαλύτερες δυνάμεις αναπτύσσονται από το μυ κατά τη γρήγορη έκκεντρη σύσπαση. Αντίθετα, η μέγιστη δύναμη κατά την σύγκεντρη σύσπαση, μειώνεται προοδευτικά όσο αυξάνει η ταχύτητα. Τέτοιες μετρήσεις είναι δυνατές μόνο με τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού, ο οποίος μπορεί να ελέγχει το ρυθμό βράχυνσης ή επιμήκυνσης του μυός.

Περίληψη

Υπάρχουν σημαντικά στοιχεία, τόσο για τον προπονητή όσο και για τον κοιλυμπητή, τα οποία εξάγονται από την προηγούμενη συζήτηση. Πρώτον, η δύναμη των μυών που χρησιμοποιούνται στην κοιλύμβηση, είναι σημαντικός παράγοντας επιτυχίας σε αγωνίσματα από 50 έως 1500 μ. Αν και αυτό μπορεί να μην προκαλεί έκπληξη, πρέπει να θυμόμαστε ότι η δύναμη από μόνη της δεν συνεπάγεται γρήγορη κοιλύμβηση. Οι δυνάμεις που παράγονται από το μυ πρέπει να εφαρμόζονται αποτελεσματικά στο νερό για να προωθήσουν το σώμα. Για αυτό, η εξειδίκευση της δύναμης είναι το κλειδί της επιτυχίας στη κοιλύμβηση.

Δεύτερον, η εκλεκτική χρήση των μυϊκών ινών ταχείας ή βραδείας συστολής, καθορίζεται από την ένταση της κάθε σύσπασης. Έτσι, στην αργή κοιλύμβηση, όπου η παραγωγή δύναμης είναι χα-



Εικ. 1-5. Η σχέση μεταξύ του ρυθμού κίνησης και της μέγιστης ανάπτυξης δύναμης κατά την έκκεντρη και τη συγκεντρική δράση.

μηλή, οι μύες χρησιμοποιούν κυρίως τις ίνες βραδείας συστολής, επιστρατεύοντας όλο και περισσότερες ίνες ταχείας συστολής καθώς αυξάνει σταδιακά η ταχύτητα. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για να γυμναστούν και οι δύο τύποι μυϊκών ινών, ο κοιλυμπητής πρέπει να πραγματοποιεί τουλάχιστον κάποιο μέρος της προπόνησης του με ρυθμό αγώνων. Φαίνεται ότι αυτή η μορφή προπόνησης είναι απαραίτητη, προκειμένου να αναπτυχθεί το νευρολογικό πρότυπο ενεργοποίησης των μυών, το οποίο απαιτείται για την μέγιστη ανάπτυξη δύναμης κατά την κοιλύμβηση ταχύτητας. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι όλη η προπόνηση πρέπει να γίνεται σε υψηλές ταχύτητες. Όπως θα εξηγήσουμε στο επόμενο τμήμα, η κοιλυμπητική προπόνηση σε περίπου αγωνιστικούς ρυθμούς, θέτει σοβαρές ενεργειακές απαιτήσεις στις μυϊκές ίνες, που είναι κρίσιμες για την επίδοση σε όλα τα αγωνίσματα.

Τέλος, η σύσταση των μυών του κοιλυμπητή σε ίνες βραδείας και ταχείας συστολής, δεν φαίνεται να αποτελεί αποφασιστικό παράγοντα επιτυχίας. Αν και οι κορυφαίοι αθλητές ταχύτητας ή αντοχής σε άλλα αθλήματα (π.χ. τρέξιμο και ποδηλασία), ξεχωρίζουν ως προς το ποσοστό των ινών βραδείας ή ταχείας συστολής, οι κοιλυμπητές ταχύτητας και αντοχής δεν διαφέρουν μεταξύ τους από αυτή την

άποψη. Για αυτό, η σύσταση των ινών του κοιλιακού φαίνεται να έχει μικρή επίδραση στην επιτυχία, αν και η μελέτη τους όσον αφορά την επιστράτευση τους και τη χρήση ενέργειας, παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την προπόνηση και τη διατροφή, οι οποίες τελικά επηρεάζουν την απόδοση.

Προτείνονται για μελέτη

- Brooke, M.H. & Kaiser, K.K. (1970) Muscle fiber types: how many and what kind? *Arch. Neurol.* **23**:369-379.
- Buchthal, F. & Schmalbruch, H. (1970) Contraction times and fiber types in intact muscle. *Acta Physiol. Scand.* **79**:435-452.
- Burke, R.E. & Edgerton, V.R. (1975) Motor unit properties and selective involvement in movement. In Wilmore, J. & Keogh, J. (eds), *Exercise and Sports Sciences Reviews*. New York: Academic Press, pp. 31-83.

- Costill, D.L. (1986) *Inside Running: Basics of Sports Physiology*. Indianapolis: Benchmark Press.
- Fox, E.L. (1984) *Sports Physiology*, 2nd edn. New York: CBS College Publications.
- Henneman, E. (1980) Skeletal muscle. The servant of the nervous system. In Mountcastle, V.B. (ed.) *Medical Physiology*, 14th edn. vol. 1. St Louis, Missouri: Mosby Publishing, pp. 674-702.
- Jones, N.L., McCartney, N. & McComas, A.J. (1986) *Human Muscle Power*. Champaign, Illinois: Human Kinetics.
- Porter, R. & Whelan, J. (1981) *Human Muscle Fatigue: Physiological Mechanisms* (Ciba Foundation Symposium 82). London: Pitman Medical.
- Wickiewicz, T.L., Roy, R.R., Powell, P.L., Perrine, J.J. & Edgerton, V.R. (1984) Muscle architecture and force-velocity relationships in humans. *J. Appl. Physiol. Environ. Exercise Physiol.* **57**:435-443.
- Wilmore, J.H. & Costill, D.L. (1988) *Training for Sport and Activity*. Dubuque, Iowa: W.C. Brown.

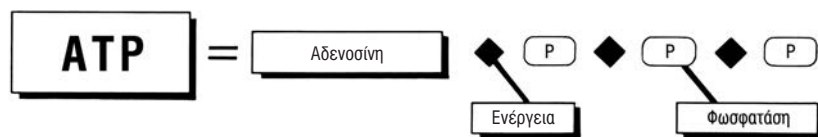
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Συστήματα παραγωγής ενέργειας στην κολύμβηση

Η επιτυχία ή η αποτυχία στην αγωνιστική κολύμβηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα των μυών να παράγουν την ενέργεια που είναι απαραίτητη για τη προώθηση του σώματος μέσα στο νερό. Η ενέργεια που αναφέρεται εδώ, είναι αυτή που παράγεται από τα τρόφιμα που καταναλώνουμε (υδατάνθρακες, λίπη και πρωτεΐνες). Όταν διασπώνται τα καύσιμα αυτά από τον οργανισμό, παράγουν χαμηλά επίπεδα ενέργειας τα οποία είναι ανεπαρκή για μυϊκή δραστηριότητα. Όμως, τα κύτταρα μετατρέπουν αυτές τις φτωχές πηγές ενέργειας, σε ένα σύμπλεγμα υψηλής ενέργειας, την τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP), το ATP παρέχει την άμεση ενέργεια για τη μυϊκή δραστηριότητα. Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο μόριο του ATP, απελευθερώνεται όταν η τρίτη φωσφορική ρίζα αποσπαστεί από το σύμπλεγμα (Εικ. 2.1).

Οι μύες έχουν τέσσερις πιθανές πηγές ATP.

1. αυτό που είναι αποθηκευμένο μέσα στο μυ
2. αυτό που παράγεται από άλητη φωσφορική ένωση (δηλαδή, το σύστημα ATP-φωσφοκρεατίνης (ATP-PCr));
3. το ATP που παράγεται από τη διάσπαση του γλυκογόνου των μυών (δηλαδή, το γλυκολυτικό σύστημα);



Εικ. 2-1. Η χημική δομή της τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP). Τα υπό μορφή διαμαντιού σχήματα που συνδέουν τα τέσσερα συστατικά μέρη υποδηλώνουν ενέργεια.

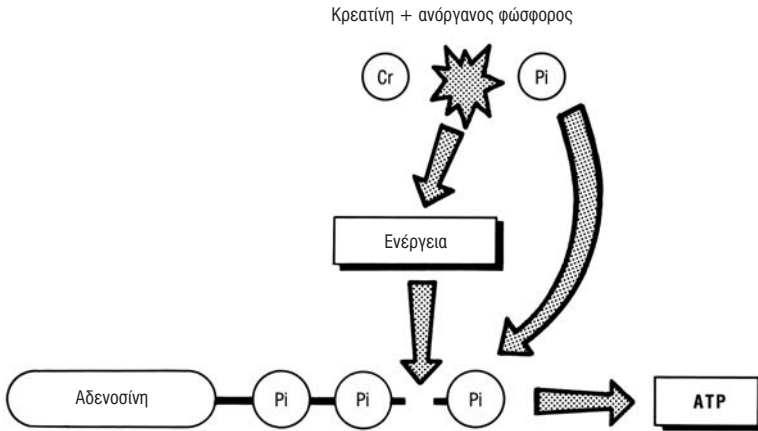
4. το ATP που παράγεται με τη βοήθεια του οξειδωτικού συστήματος (δηλαδή, το οξειδωτικό σύστημα).

Το σύστημα ATP-PCr

Η *φωσφοκρεατίνη* (PCr) είναι παρούσα μέσα στις μυϊκές ίνες, αν και εξυπηρετεί μια, κατά κάποιο τρόπο διαφορετική λειτουργία από το ATP. Αντίθετα με την ενέργεια που προέρχεται από τη διάσπαση του ATP, η PCr δεν χρησιμοποιείται άμεσα για τη παροχή ενέργειας μέσα στο κύτταρο. Αντίθετα, χρησιμοποιείται για την επανασύνθεση του μορίου ATP, διατηρώντας με αυτό τον τρόπο μία σχετικά συνεχή παροχή αυτής της πηγής υψηλής ενέργειας. Έτσι, όταν απελευθερώνεται ενέργεια από τη διάσπαση του μορίου του ATP, αυτό μπορεί να ξανασχηματιστεί με την ενέργεια από τη PCr (Εικ. 2.2). Δυστυχώς, αυτό το απόθεμα ενέργειας είναι πολύ περιορισμένο και διαρκεί για λίγα μόνο δευτερόλεπτα στη μέγιστη ταχύτητα κολύμβησης. Αν και το ATP παραμένει σε σχετικά φυσιολογικά επίπεδα, η PCr μειώνεται γρήγορα, καθώς διασπάται σε μία προσπάθεια να παραχθεί περισσότερο ATP. Παρόλα αυτά, σε εξάντληση τόσο το ATP όσο και η PCr είναι αρκετά χαμηλά και ανίκανα να παράσχουν την ενέργεια που απαιτείται για περαιτέρω συσπάσεις.

Το γλυκολυτικό σύστημα

Κατά τα πρώτα λεπτά της άσκησης και όταν η ένταση της μυϊκής προσπάθειας είναι υψηλή, το σώμα είναι ανίκανο να προσφέρει επαρκή ποσότητα οξειδωτικού για την επανασύνθεση του απαιτούμενου ATP. Σε αντιρρόπηση, τόσο το σύστημα



Εικ. 2-2. Η διάσπαση της κρεατίνης (Cr) και του ανόργανου φωσφόρου (Pi) για τη διατήρηση του αποθέματος τριφωσφωρικής αδενοσίνης (ATP).

ATP-PCr όσο και το γλυκολυτικό σύστημα παράγουν ATP χωρίς τη χρήση οξυγόνου, μια διαδικασία που ονομάζεται *αναερόβιος μεταβολισμός*. *Γλυκόλυση* ονομάζεται η διάσπαση του μυϊκού σακχάρου –γλυκογόνου– χωρίς τη παρουσία οξυγόνου, που καταλήγει στη παραγωγή και συσσώρευση γαλακτικού οξέως. Επομένως, η γλυκόλυση παρέχει ATP υπό συνθήκες ανεπαρκούς προσφοράς οξυγόνου στο σύστημα. Δυστυχώς, αυτή η μέθοδος είναι σχετικά ανεπαρκής και παράγει μικρή αλλά απαραίτητη ποσότητα ATP κατά την αγωνιστική κοιλύμβηση. Με παρουσία οξυγόνου, η αερόβια παραγωγή ενέργειας μπορεί να αποδώσει 13 φορές περισσότερο ATP, από αυτό που παράγεται από τη γλυκόλυση. Έτσι το γλυκολυτικό σύστημα συμπληρώνει το σύστημα ATP-PCr, παρέχοντας ενέργεια κατά την ιδιαίτερα έντονη μυϊκή προσπάθεια, όταν η παροχή οξυγόνου δεν επαρκεί.

Σε αγωνίσματα από 50 έως και 250 μέτρα, οι απαιτήσεις από το γλυκολυτικό σύστημα είναι υψηλές, προκαλώντας την αύξηση των επιπέδων γαλακτικού οξέως των μυών, από τιμές ηρεμίας της τάξεως του 1 mmol/kg μύς στα 25 mmol/kg μύς. Το υψηλό περιεχόμενο των μυϊκών ινών σε γαλακτικό οξύ* αναστέλλει την περαιτέρω διάσπαση του γλυκογόνου και μπορεί να παρέμβει στη

διαδικασία σύσπασης των μυών. Για αυτό, η παρατεταμένη χρήση της γλυκόλυσης για τη παραγωγή ενέργειας, θα καταλήξει σε κόπωση και εξάντληση των μυών, καθώς οι ίνες γίνονται όξινες.

Το αερόβιο σύστημα ενέργειας

Εφόσον η ενέργεια που καταναλώνουν οι μύες κατά τη διάρκεια μίας κούρσας ταχύτητας 50 ή 100 μέτρων, είναι περίπου 200 φορές περισσότερη από ότι σε ηρεμία, τα συστήματα ATP-PCr και γλυκόλυσης αδυνατούν να παράγουν αρκετό ATP, για να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες των μυών. Χωρίς την ύπαρξη άλλου, πιο αποτελεσματικού συστήματος παραγωγής ενέργειας, η μέγιστη διάρκεια της κοιλύμβησης ταχύτητας μπορεί να περιοριστεί σε 30 δευτερόλεπτα ή και λιγότερο. Όπως είδαμε, η αναερόβια παραγωγή ATP χωρίς οξυγόνο, είναι αρκετά αναποτελεσματική και ανεπαρκής για αγωνίσματα που διαρκούν περισσότερο από λίγα λεπτά. Επομένως, ο αερόβιος μεταβολισμός είναι η βασική μέθοδος παραγωγής ενέργειας για τα αγωνίσματα αντοχής, θέτοντας μεγάλες απαιτήσεις στην ικανότητα του αθλητή να παραδώσει οξυγόνο στους ασκούμενους μύες.

Τα μιτοχόνδρια χρησιμοποιούν καύσιμα και οξυγόνο για να παράγουν μεγάλες ποσότητες ATP. Οι υδατάνθρακες και το λίπος είναι τα βασικά καύσιμα

* Το γαλακτικό οξύ δεν θεωρείται πλέον παράγοντας κόπωσης.

που χρησιμοποιεί αυτό το σύστημα. Αυτά τα μόρια αποσυντίθενται μέσα στα υγρά (σαρκόπληγμα) και τα μιτοχόνδρια των μυϊκών ινών, με τη βοήθεια οξειδωτικών ενζύμων, τα οποία είναι ειδικές πρωτεΐνες που παράγονται μέσα στις ίνες. Σε αυτή τη διαδικασία, άτομα υδρογόνου (H^+), με την παρουσία του αναπνεόμενου οξυγόνου (O_2), απελευθερώνουν ενέργεια για την παραγωγή ATP και νερού (H_2O). Αν δεν γινόταν αυτό, τα ιόντα υδρογόνου που περιέχονται σε αυτά τα καύσιμα θα ήταν ελεύθερα να διαταράξουν τη λειτουργία των κυττάρων. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), που σχηματίζεται από τον άνθρακα και το οξυγόνο των καυσίμων, είναι ένα άηλο υποπροϊόν του οξειδωτικού μεταβολισμού. Ευτυχώς, το διοξείδιο του άνθρακα διαχέεται εύκολα έξω από τα κύτταρα και μεταφέρεται με το φλεβικό αίμα πίσω στους πνεύμονες, από όπου εγκαταλείπει το σώμα με τον εκπνεόμενο αέρα.

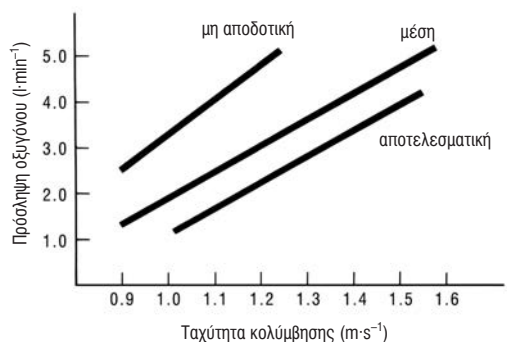
Μεταφορά οξυγόνου στους μύες

Η παράδοση οξυγόνου στους μύες είναι απαραίτητη για τη διατήρηση του υψηλού ρυθμού αερόβιας παραγωγής ενέργειας. Κατά την ήπια άσκηση, το αίμα παραλαμβάνει οξυγόνο καθώς περνάει από τους πνεύμονες, το μεταφέρει στους μύες, όπου ανταλλάσσεται με διοξείδιο του άνθρακα, έπειτα επιστρέφει στη καρδιά και στους πνεύμονες όπου ξεφορτώνει το διοξείδιο του άνθρακα και ανανεώνει τη προμήθεια του σε οξυγόνο. Καθώς η ένταση της άσκησης και οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνουν, ο ρυθμός της οξειδωτικής παραγωγής του ATP αυξάνει. Σε μία προσπάθεια να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των μυών σε οξυγόνο, η καρδιά κτυπά ταχύτερα, προωθώντας περισσότερο αίμα και οξυγόνο στους μύες. Εφόσον το σώμα αποθηκεύει ελάχιστα οξυγόνο, η ποσότητα που προσλαμβάνεται από το αίμα καθώς αυτό περνάει από τους πνεύμονες, θεωρείται άμεσα ανάληψη με τη ποσότητα που χρησιμοποιείται για την αερόβια παραγωγή ενέργειας. Επομένως, ένας ακριβής υπολογισμός του αερόβιου μεταβολισμού μπορεί να γίνει

υπολογίζοντας τη ποσότητα του οξυγόνου που καταναλώνεται.

Καθώς το σώμα μεταπίπτει από την ανάπαυση στην άσκηση, αυξάνονται οι απαιτήσεις σε ενέργεια. Αυτή η αύξηση στο μεταβολισμό, είναι άμεσα ανάληψη με τις απαιτήσεις για μυϊκή δύναμη (Εικ. 2-3). Όπως και με τα συστήματα ενέργειας ATP – PCr και γλυκόλυσης, υπάρχει ένα όριο στο ποσό της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί με τον οξειδωτικό μεταβολισμό. Καθώς αυξάνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις, το σώμα φτάνει ένα όριο στην παροχή οξυγόνου ($\dot{V}O_{2\max}$). Σε αυτό το σημείο υπάρχει σταθεροποίηση του $\dot{V}O_{2\max}$, ακόμα κι αν οι ενεργειακές απαιτήσεις συνεχίσουν να αυξάνονται. Η τιμή στην οποία σταθεροποιείται το $\dot{V}O_{2\max}$ (plateau), ονομάζεται αερόβια ικανότητα ή μέγιστη κατανάλωση οξυγόνου ($\dot{V}O_{2\max}$). Το $\dot{V}O_{2\max}$ θεωρείται η καλύτερη μεμονωμένη μέτρηση της καρδιοαναπνευστικής αντοχής και της αερόβιας φυσικής κατάστασης, διότι περιγράφει τη μέγιστη δυνατότητα του καρδιοαγγειακού και αερόβιου συστήματος για παραγωγή ενέργειας.

Εφόσον οι ανάγκες του κολυμβητή σε ενέργεια επηρεάζονται από το μέγεθος του σώματος, την ηλικία και το επίπεδο της φυσικής κατάστασης, το $\dot{V}O_{2\max}$ συχνά εκφράζεται σε σχέση με το σωματικό βάρος ($ml \cdot kg^{-2} \cdot min^{-1}$), αν και οι τιμές για τους κολυμβητές έχουν εκφραστεί επίσης σε κίλιοστά οξυ-



Εικ. 2-3. Η σχέση μεταξύ της ταχύτητας κολύμβησης σε ελεύθερο στυλ και της πρόσληψης οξυγόνου.

γόνου ανά μονάδα ύψους ($\text{ml}\cdot\text{m}^{-1}$) ή ανά μονάδα επιφανείας σώματος ($\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}$). Αυτοί οι υπολογισμοί επιτρέπουν μια πιο εξισορροπημένη σύγκριση μεταξύ ατόμων διαφορετικού μεγέθους. Φυσιολογικά δραστήριοι φοιτητές κολεγίων, 18-22 ετών, έχει αναφερθεί ότι έχουν μέσες τιμές $\dot{V}\text{O}_2 \text{max}$ από 38-42 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ (γυναίκες) και 44-50 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ (άνδρες). Από την άλλη μεριά, έντονα προπονημένοι κολυμβητές και κολυμβήτριες αναφέρεται ότι έχουν τιμές $\dot{V}\text{O}_2 \text{max}$ από 45-65 και 50-75 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ αντίστοιχα.

Πηγές ενέργειας για κολύμβηση

Οι υδατάνθρακες, στη μορφή της γλυκόζης αίματος και του γλυκογόνου των μυών, παρέχουν τη βασική ενέργεια για το σχηματισμό ATP κατά τη κολύμβηση, στην προπόνηση και στους αγώνες. Οι τροφές που περιέχουν απλούς και σύνθετους υδατάνθρακες και άμυλο, ανάγονται σε γλυκόζη κατά τη διάρκεια της πέψης. Αυτή η γλυκόζη μεταφέρεται στη συνέχεια με το αίμα στο ήπαρ και σε άλλα κύτταρα του σώματος. Αν και μέρος αυτής της γλυκόζης χρησιμοποιείται άμεσα σαν καύσιμο, η υπόλοιπη αποθηκεύεται μέσα στα κύτταρα, ως γλυκογόνο. Όταν αρχίζει η άσκηση, το γλυκογόνο των μυών διασπάται, παρέχοντας μια δεξαμενή ενέργειας για γλυκόλυση.

Εφόσον το γλυκογόνο αποθηκεύεται μέσα στα κύτταρα, είναι πιο εύκολο διαθέσιμο για τη παραγωγή ATP. Η συνήθης ποσότητα γλυκογόνου που αποθηκεύεται στα κύτταρα, είναι αρκετή για τη παραγωγή ATP για αρκετά λεπτά ή ώρες, ανάλογα με τη ταχύτητα του κολυμβητή.

Λόγω της μικρής του ποσότητας, μερικές μυϊκές ίνες μπορεί να εξαντλήσουν τα αποθέματα τους σε γλυκογόνο μετά από μόνο 5-10 λεπτά μέγιστης προσπάθειας. Όμως γλυκογόνο θα εξακολουθήσει να υπάρχει σε λιγότερο ενεργές ίνες μέσα στον ίδιο μυ, επιτρέποντας τη συνέχιση της άσκησης, μέχρι ο αριθμός των ινών που έχουν στερέψει γίνει τόσο μεγάλος, ώστε ο μυς να μην μπορεί να ανα-

πτύξει την δύναμη που χρειάζεται για να διατηρήσει την επιθυμητή ταχύτητα κολύμβησης.

Αν και έχει υπολογιστεί, ότι ένας ολόκληρος μυς μπορεί να εξαντληθεί μέσα σε μόνο 15-20 λεπτά κολύμβησης, η προσπάθεια που απαιτείται για να επιτευχθεί τέτοιος ρυθμός εξάντλησης είναι τόσο έντονη, που δεν μπορεί να διατηρηθεί ακόμα και για αυτό το σύντομο χρονικό διάστημα. Βιοψίες που έχουν παρθεί από τους μύες του ώμου κολυμβητών, πριν και μετά από προπόνηση, έχουν δείξει ότι τα αποθέματα γλυκογόνου μπορεί να εξαντληθούν μετά την ολοκλήρωση 3000-6000 μέτρων, με επαναλαμβανόμενες διαδρομές των 100 μέτρων, με διάστημα 20 δευτερολέπτων για ξεκούραση ανάμεσα σε κάθε διαδρομή. Αν και είναι ιδιαίτερα απίθανο για ένα κολυμβητή να εξαντλήσει τα αποθέματα των μυών του κατά τη διάρκεια ενός αγωνίσματος, οι εξαντλητικές περιόδους προπόνησης είναι σίγουρο ότι θα μειώσουν ή και θα εξαντλήσουν το απόθεμα καυσίμων του, θέτοντας ένα σοβαρό διατροφικό πρόβλημα για τον κολυμβητή.

Το σώμα περιέχει επίσης υδατάνθρακες αποθηκευμένους με τη μορφή γλυκογόνου στο ήπαρ, το οποίο μπορεί να διασπαστεί σε γλυκόζη και να μεταφερθεί στους μύες, όποτε είναι απαραίτητο. Επιπλέον, για να διατηρηθούν σχετικά σταθερά τα επίπεδα της γλυκόζης στο αίμα, το ηπατικό γλυκογόνο συμπληρώνει το μυϊκό γλυκογόνο που προσφέρεται για χρήση κατά την άσκηση.

Το λίπος αποθηκεύεται στους μύες και κάτω από το δέρμα ως λιπώδης ιστός. Αποτελεί τη μεγαλύτερη αποθήκη ενέργειας, διαθέσιμης για την ανακάλυψη του ATP. Η διαδικασία είναι τελείως αερόβια, αλλά πολύ αργή ώστε να προσφέρει την ενέργεια που χρειάζεται κατά τα αγωνίσματα της κολύμβησης ταχύτητας.

Μιλώντας γενικά, το λίπος του σώματος συμβάλει στη παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια παρατεταμένων περιόδων προπόνησης και στα αγωνίσματα κολύμβησης μεγάλων αποστάσεων. Φαίνεται ότι στην αερόβια κολύμβηση, όπου η ένταση είναι μικρότερη της μέγιστης δυνατότητας του κολυμβητή, το 30-50% της ενέργειας μπορεί

να προέρχεται από τα λίπη. Όσο μεγαλύτερη η διάρκεια, τόσο μεγαλύτερη και η συμμετοχή του λίπους. Κατά τη διάρκεια έντονης κολύμβησης που διαρκεί μόνο λίγα λεπτά, όπως συμβαίνει στα περισσότερα αγωνίσματα, το λίπος μπορεί να συνεισφέρει λιγότερο από το 10% της ενέργειας που καταναλώνεται.

Αν και η οξείδωση των λιπαρών οξέων μπορεί να προσφέρει ένα σημαντικό ποσό ενέργειας κατά τη διάρκεια των αγωνισμάτων αντοχής, αυτό απελευθερώνεται τόσο αργά που οι κολυμβητές δεν θα μπορούσαν να διατηρήσουν ένα γρήγορο ρυθμό, αν αυτή ήταν η μόνη πηγή ενέργειας για την ανασύνθεση του ATP. Ο μεταβολισμός του λίπους μπορεί να προσφέρει μέρος της συνολικής ενέργειας που χρειάζεται για μία διαδρομή 1500μ, αλλά αυτή η συμμετοχή είναι αρκετά μικρή σε σχέση με το ποσό ενέργειας που προέρχεται από το μυϊκό γλυκογόνο και τη γλυκόζη αίματος.

Στην αγωνιστική κολύμβηση, ο βασικός ρόλος του μεταβολισμού του λίπους είναι η παροχή ενέργειας για την αναπλήρωση του ATP κατά την προπόνηση. Μπορεί να προσφέρει σημαντικά ποσά σε set με μεγάλα διαστήματα, τα οποία εκτελούνται με μέτρια ταχύτητα. Με αυτό τον τρόπο χρησιμοποιείται λιγότερο μυϊκό γλυκογόνο. Έχει υπολογιστεί ότι το λίπος προσφέρει μεταξύ του 30 και 50% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται σε μία τυπική προπόνηση 2 ωρών.

Η προπόνηση μπορεί να αυξήσει το ποσό της ενέργειας που προέρχεται από το λίπος και επομένως να μειώσει τις απαιτήσεις των μυών σε μυϊκό γλυκογόνο για τη παραγωγή ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο, οι αθλητές μπορούν να κολυμπήσουν μεγάλα set επαναλήψεων και να έχουν ακόμα υπόλοιπο μυϊκού γλυκογόνου διαθέσιμο για γρήγορες αναερόβιες διαδρομές, αργότερα κατά τη διάρκεια της προπόνησης. Η αύξηση του μεταβολισμού του λίπους θα μειώσει επίσης τη χρήση του μυϊκού γλυκογόνου από μέρα σε μέρα, έτσι ώστε οι κολυμβητές θα μπορούν να προπονούνται δύο φορές την ημέρα, για αρκετές ημέρες κάθε φορά με μεγαλύτερη μέση ένταση.

Οι πρωτεΐνες συνθέτονται από αμινοξέα. Υπάρχουν περισσότερα από 20 γνωστά αμινοξέα. Εννέα από αυτά θεωρούνται απαραίτητα, γιατί δεν μπορούν να συντεθούν μέσα στο σώμα και ως εκ τούτου πρέπει να προσληφθούν με τη τροφή. Τα αμινοξέα έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Μπορούν να διαρκέσουν από αρκετές ημέρες έως λίγους μήνες πριν αντικατασταθούν από νέα αμινοξέα που προέρχονται από τη τροφή ή από άλλους ιστούς. Ο μυϊκός ιστός, συμπεριλαμβανομένων των μιτοχονδρίων, κατασκευάζεται από αυτά, έτσι οι κολυμβητές πρέπει να έχουν επαρκή πρόσληψη απαραίτητων αμινοξέων για να διατηρήσουν τη πρόοδο τους στη προπόνηση. Αυτό δεν πρέπει να σημαίνει ότι οι κολυμβητές πρέπει να τρώνε επιπλέον πρωτεΐνες. Διατροφική έρευνα έχει δείξει ότι σωστά ισορροπημένη δίαιτα παρέχει επαρκώς τη ποσότητα πρωτεΐνης που χρειάζεται για την κατασκευή και την επιδιόρθωση των ιστών του σώματος και ότι τα συμπληρώματα πρωτεΐνης δεν αυξάνουν τις προσαρμογές που σχετίζονται με την προπόνηση.

Όπως τονίσαμε προηγουμένως, οι πρωτεΐνες είναι τα οικοδομικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του σώματος και βοηθούν στην επιδιόρθωση των ιστών. Επίσης, παίζουν ρόλο στον έλεγχο της οξύτητας μέσα στις μυϊκές ίνες, προφυλάσσοντας από τα οξέα που παράγονται κατά τη διάρκεια των έντονα αναερόβιων δραστηριοτήτων. Οι πρωτεΐνες μπορούν επίσης να προσφέρουν ενέργεια για την ανακύκλωση του ATP. Όμως, όπως και με τα λίπη, η απελευθέρωση ενέργειας από τις πρωτεΐνες είναι μια αργή διαδικασία. Στη πράξη, ο μεταβολισμός των πρωτεϊνών είναι η πιο αργή και λιγότερο οικονομική μέθοδος για την ανασύνθεση του ATP.

Το ενεργειακό κόστος της κολύμβησης

Το ποσό της ενέργειας που ξοδεύεται για διάφορες δραστηριότητες ποικίλει ανάλογα με την ένταση και το στυλ που χρησιμοποιείται στη κολύμβηση.



Στυλ	Ταχύτητα (μέτρα/ δευτερόλεπτο)	Πρόσληψη οξυγόνου	Καρδιακή συχνότητα (παλμοί/ λεπτό)
Ελεύθερο	1.0	1.83	125
Ύπτιο	1.0	2.42	138
Πεταλούδα	1.0	2.85	150
Πρόσθιο	1.0	3.42	162

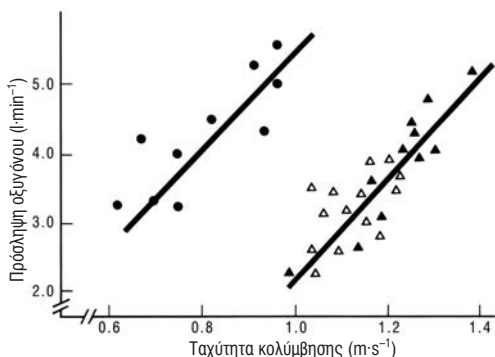
Πίνακας 2-1. Πρόσληψη οξυγόνου και καρδιακή συχνότητα για έναν άνδρα κολυμβητή που εκτελεί κάθε στυλ με την ίδια ταχύτητα.

ση. Η κατανάλωση ενέργειας κατά τη κολύμβηση υπολογίζεται συνήθως καταγράφοντας την κατανάλωση οξυγόνου κατά τη διάρκεια υπομέγιστης κολύμβησης, σε ταχύτητες αρκετά μικρότερες από αυτές που χρησιμοποιούνται στους αγώνες. Αυτές οι τιμές αγνοούν την *αναερόβια* πλευρά της άσκησης, μιας και η ενέργεια που προέρχεται από τα συστήματα γλυκόλυσης και ATP-PCr δεν περιλαμβάνεται σε αυτούς τους υπολογισμούς. Αυτό είναι ένα βασικό σημείο, διότι η αποτελεσματικότητα ενός κολυμβητή και η ενέργεια που καταναλώνεται σε ταχύτητες που απαιτούν περισσότερη ενέργεια από την αερόβια ικανότητα, μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από αυτές που υπολογίζονται κατά την υπομέγιστη κολύμβηση.

Ο πίνακας 2.1 παρέχει έναν υπολογισμό της αερόβιας κατανάλωσης ενέργειας για κάθε στυλ αγωνιστικής κολύμβησης, σε σχετικά χαμηλή ταχύτητα (1μέτρο/δευτερόλεπτο). Εφόσον η κολύμβηση περιλαμβάνει κίνηση ενάντια στην αντίσταση του νερού, αυτά τα νούμερα μπορούν να κυμαίνονται αισθητά ανάλογα με το βάρος, την ηλικία, το φύλο και την τεχνική κατάρτιση (δηλαδή, αποτελεσματικότητα) του κολυμβητή.

Η ικανότητα να πραγματοποιείται η κάθε άσκηση με σωστή τεχνική, οδηγεί σε μειωμένες απαιτήσεις για ενέργεια. Η ενέργεια που καταναλώνεται στη κολύμβηση χρησιμοποιείται, εν μέρει, για να πληρωθεί το τμήμα της διατήρησης του σώματος στην επιφάνεια του νερού και για να παραχθεί

η δύναμη που απαιτείται για να υπερνικηθεί η αντίσταση του νερού. Αν και η ενέργεια που χρειάζεται για τη κολύμβηση εξαρτάται από το μέγεθος του σώματος και τη πνευστότητα, η αποτελεσματική εφαρμογή της δύναμης ενάντια στο νερό είναι η καθοριστικότερη παράμετρος οικονομίας σε αυτή τη δραστηριότητα. Το σχήμα 2.4 παρουσιάζει τη διαφορά των απαιτήσεων σε οξυγόνο μεταξύ προπονημένων αθλητών και αθλητριών κολύμβησης και μιας ομάδας πολύ προπονημένων τριαθλητών. Αν και οι τριαθλητές προπονούσαν καθημερινά στη κολύμβηση, κανένας δεν ήταν στο παρελθόν αθλητής κολύμβησης. Είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι, πολλοί από αυτούς τους τριαθλητές είχαν αερόβια ικανότητα αισθητά υψηλότερη από



Εικ. 2-4. Πρόσληψη οξυγόνου από άνδρες τριαθλητές (●) και αθλητές κολύμβησης (άνδρες ▲, γυναίκες △)

τους κολυμβητές, αθλή ήλιοι μπορούσαν να αποδώσουν το ίδιο καλά ακόμα και με τους χειρότερους των κολυμβητών. Αρκετές κολυμβήτριες που είχαν τιμές $\dot{V}O_2 \max$ από 2,1-2,3 l/min, μπορούσαν να κολυμπήσουν τα 400 μέτρα τόσο γρήγορα όσο και τριαθλητές που είχαν τιμές πάνω από 5,0 l O_2 /min.

Έτσι, φαίνεται ότι η απόδοση στη κολύμβηση περιορίζεται περισσότερο από την τεχνική του αθλητή, παρά από το $\dot{V}O_2 \max$. Από αυτή τη πληροφορία συνεπάγεται ότι ο χρόνος της προπόνησης που ξοδεύεται στη μηχανική πλευρά (τεχνική) της κολύμβησης, μπορεί να είναι εξίσου ή και περισσότερο σημαντικός από το χρόνο που ξοδεύεται στη βελτίωση της δύναμης και της αντοχής.

Βοηθητικά συστήματα για τη παραγωγή ενέργειας

Αν και οι μεταβολικές διαδικασίες πραγματοποιούνται σε κάθε μυϊκή ίνα, το κυκλοφορικό και το αναπνευστικό σύστημα είναι υπεύθυνα για την παράδοση των καυσίμων και του οξυγόνου στους μύες και την απομάκρυνση των άχρηστων προϊόντων.

Το αίμα μεταφέρει οξυγόνο, γλυκόζη και άλλες ουσίες στα τριχοειδή, τα οποία έχουν άμεση επαφή με τα κύτταρα του σώματος. Αφού παραδώσει αυτά τα καύσιμα στους μύες, το αίμα αφήνει τους ιστούς μεταφέροντας διοξείδιο του άνθρακα, γαλακτικό και άλλα υποπροϊόντα του μεταβολισμού. Αφού επιστρέψει στη καρδιά, το αίμα προωθείται στους πνεύμονες, όπου το διοξείδιο του άνθρακα διαχέεται μέσα στα αέρια του πνεύμονα και μετά εκπνέεται. Ταυτόχρονα, οξυγόνο διαχέεται στο αίμα από τους πνεύμονες, αντικαθιστώντας αυτό που χρησιμοποιήθηκε από τους μύες και τους άλλους ιστούς του σώματος.

Οι κοιλίες της καρδιάς συσπώνται σε ρυθμούς, οι οποίοι είναι κατά κάποιο τρόπο ανάλογοι με τις ενεργειακές απαιτήσεις των μυών. Σε ηρεμία, η συχνότητα της καρδιάς μπορεί να κυμαίνεται από 50 έως 80 χτύπους το λεπτό για τους περισσότε-

ρους κολυμβητές, αν και έχουν αναφερθεί και πιο χαμηλές συχνότητες, μέχρι και 35 χτύποι το λεπτό. Γενικά, οι συχνότητες ηρεμίας των γυμνασμένων αθλητών είναι χαμηλότερες από εκείνες των αγύμναστων ατόμων, αν και τέτοιες μετρήσεις δεν αποτελούν ακριβή ένδειξη της αντοχής ή της φυσικής κατάστασης κάποιου.

Όταν ο κολυμβητής βρίσκεται μέσα στο νερό, η καρδιακή του συχνότητα μπορεί να μειωθεί κατά 5-8 χτύπους το λεπτό. Το νερό έχει τη τάση να διευκολύνει την επιστροφή του αίματος στη καρδιά, μειώνοντας έτσι το έργο του καρδιαγγειακού συστήματος. Επιπλέον, η βύθιση του προσώπου στο νερό θα μειώσει επίσης την καρδιακή συχνότητα. Αυτό είναι αποτέλεσμα ενός προσωπικού αντανακλαστικού, το οποίο είναι κοινό σε πολλή θηλαστικά. Συνεπώς, για μία δεδομένη άσκηση (δηλαδή, πρόσληψη οξυγόνου) που πραγματοποιείται μέσα στο νερό, η καρδιακή συχνότητα κάποιου μπορεί να είναι 10-12 χτύπους το λεπτό χαμηλότερη, από ότι αν γινόταν έξω από το νερό.

Η καρδιά έχει μια μέγιστη συχνότητα (π.χ. μέγιστη καρδιακή συχνότητα), την οποία δεν μπορεί να υπερβεί ακόμα και κατά τη διάρκεια της πιο εξαντλητικής ασκήσεως. Αν και αυτή η μέγιστη συχνότητα διαφέρει από κολυμβητή σε κολυμβητή, κατά μέσο όρο σε έφηβους και ενήλικους αθλητές είναι περίπου 200 χτύποι το λεπτό, με τους άνδρες να έχουν χαμηλότερες μέγιστες συχνότητες (κάτω από 200 χτύπους/λεπτό) από τις γυναίκες (πάνω από 200 χτύπους/λεπτό).

Το ποσό του αίματος που προωθείται από τη καρδιά σε κάθε συστολή, ονομάζεται όγκος παλμού (ΟΠ). Η φυσιολογική διακύμανση του ΟΠ σε ηρεμία είναι μεταξύ των 60 και 100 κ.εκ ανά παλμό. Κατά τη διάρκεια της άσκησης, η καρδιά μπορεί να αυξήσει τον ΟΠ κατά 2 με 3 φορές, σε σχέση με τις τιμές ηρεμίας. Όπως θα περίμενε κανείς, ο ΟΠ στους αθλητές αντοχής είναι μεγαλύτερος από ότι στους μη-αθλητές, γεγονός το οποίο εξηγεί γιατί αυτοί οι αθλητές έχουν χαμηλότερες καρδιακές συχνότητες ηρεμίας. Μπορούν να προμηθεύσουν περισσότερο αίμα με κάθε παλμό, μειώ-

νοντας έτσι τον αριθμό των παλμών που απαιτείται για να διατηρηθεί η καρδιακή παροχή –το ποσό του αίματος που προωθείται από τη καρδιά ανά λεπτό. Μία φυσιολογική καρδιακή παροχή σε ηρεμία, είναι περίπου $5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Ενώ σε αγύμναστα άτομα η καρδιακή παροχή μπορεί να αυξηθεί μέχρι τέσσερις φορές κατά την άσκηση, οι προπονημένοι κολυμβητές μπορούν να την αυξήσουν έξι με επτά φορές, σε σχέση με τη τιμή ηρεμίας. Η καρδιακή παροχή μπορεί να υπολογιστεί από τον ακόλουθο τύπο.

$$\text{ΚΠ} = \text{ΟΠ} \times \text{ΚΣ}$$

(καρδιακή παροχή = όγκος παλμού Χ καρδιακή συχνότητα)

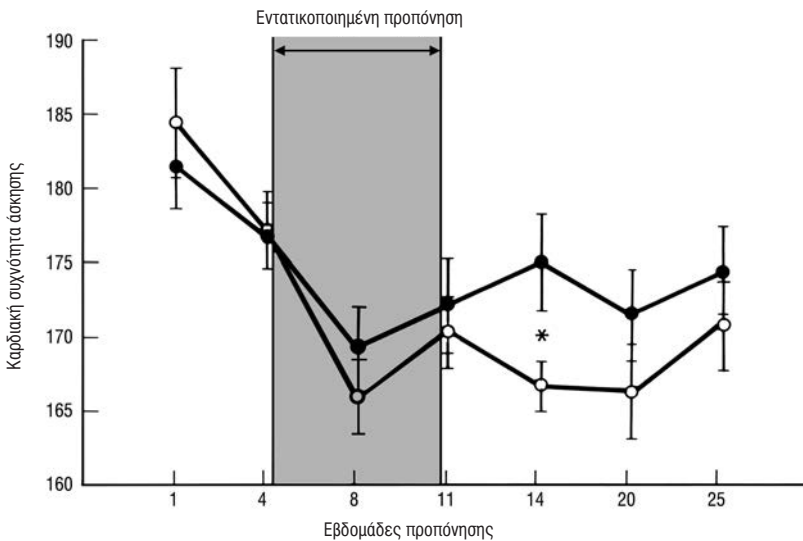
Οι χαμηλότερες καρδιακές συχνότητες που παρατηρούνται κατά την κολύμβηση σε καθορισμένες ταχύτητες μετά τη προπόνηση, παρέχουν έναν εξάιρετο δείκτη της βελτίωσης της καρδιαγγειακής φυσικής κατάστασης και της αντοχής.

Έτσι, ένας από τους ευκολότερους και πιο οικονομικούς τρόπους για να ελέγξει κανείς τη καρδιαγγειακή προσαρμογή στη προπόνηση, είναι να καταγράψει τη καρδιακή συχνότητα του κολυμβητή μετά από μία διαδρομή 400 ή 800 μέτρων με

προκαθορισμένη ταχύτητα. Καθώς οι κολυμβητές φτάνουν σε καλύτερη φυσική κατάσταση, οι καρδιακές τους συχνότητες μετά τη κολύμβηση θα είναι χαμηλότερες. Το σημείο αυτό φαίνεται στην Εικόνα 2.5.

Η αναπνοή είναι η διαδικασία με την οποία απομακρύνεται το διοξείδιο του άνθρακα και μεταφέρεται το οξυγόνο στους ιστούς του σώματος. Αυτή η διαδικασία μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις: την *εξωτερική* και την *εσωτερική* αναπνοή. Η εξωτερική αναπνοή περιλαμβάνει την ανταλλαγή αερίων μεταξύ των κυψελίδων του πνεύμονα και του αίματος. Η εσωτερική αναπνοή αναφέρεται στη διαδικασία ανταλλαγής οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ του αίματος και των ιστών του σώματος. Επομένως, η εξωτερική αναπνοή ορίζει τη διαδικασία ανταλλαγής αερίων στο πνεύμονα, ενώ η εσωτερική αναπνοή ορίζει την ανταλλαγή αερίων στο επίπεδο των μυών και των άλλων ιστών του σώματος.

Η *εισπνοή* είναι μία ενεργητική διαδικασία που περιλαμβάνει το διάφραγμα, το οποίο είναι ο βασικός αναπνευστικός μυς και τους μύες που είναι υπεύθυνοι για την αύξηση της θωρακικής κοιλότητας – οι δευτερεύοντες αναπνευστικοί μύες. Τα



Εικ 2-5. Επίδραση της κολυμβητικής προπόνησης στη καρδιακή συχνότητα κατά τη κολύμβηση 365,8 μέτρων (400 γιάρδες) με ελεύθερο στυλ. Κατά την περίοδο εντατικοποίησης της προπόνησης, μία ομάδα κολυμβητών προπονούταν δύο φορές την ημέρα (10.000-12.000 μέτρα/ημέρα, ●), ενώ η άλλη ομάδα συνέχισε να προπονείται μία φορά την ημέρα (5000-6000 μέτρα/ημέρα, ○).

πλευρά και το στέρνο συμβάλλουν στην αναπνοή, μεταβάλλοντας το μέγεθος του όγκου του θώρακα. Οι μύες μεταξύ των πλευρών περιστρέφουν και ανυψώνουν τον θωρακικό κλωβό, συμβάλλοντας έτσι στην μεγέθυνση της θωρακικής κοιλότητας. Αυτές οι δράσεις μειώνουν τη πίεση μέσα στη θωρακική κοιλότητα, προκαλώντας την εισροή αέρα στους πνεύμονες. Η *εκπνοή* είναι συνήθως μια παθητική διαδικασία που περιλαμβάνει τη χαλάρωση του διαφράγματος και τη μείωση του μεγέθους του θωρακικού κλωβού, γεγονός το οποίο προκαλεί την εκροή αέρα από τους πνεύμονες. Κατά τη κοιλύμπηση, οι μύες της αναπνοής παίζουν βασικό ρόλο στην εισπνοή, ενώ οι κοιλιακοί μύες παίζουν βασικό ρόλο στην εκούσια/προκλητή εκπνοή.

Σε ηρεμία, αναπνέονται περίπου 5-12 λίτρα αέρα κάθε λεπτό. Κατά τη βαριά άσκηση αυτός ο όγκος μπορεί να υπερβεί τα 100 λίτρα ανά λεπτό και μπορεί να υπερβεί ακόμα και τα 200 λίτρα το λεπτό σε μεγαλήδσωμους, καλά γυμνασμένους αθλητές.

Η ανταλλαγή αερίων στους πνεύμονες περιλαμβάνει την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα από το φλεβικό αίμα που επιστρέφει από τα διάφορα μέρη του σώματος και την αντικατάσταση του οξυγόνου που έχει αφαιρεθεί από τους μύες. Μέχρι τη στιγμή που το αίμα εξέρχεται από τους πνεύμονες, καθώς επιστρέφει στη καρδιά, η ποσότητα του οξυγόνου έχει σχεδόν εξισορροπηθεί με αυτή των κυψελίδων. Το διοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με παρόμοιο τρόπο, αν και διαχέεται 20 φορές πιο γρήγορα από το οξυγόνο. Στο επίπεδο των ιστών εφαρμόζονται οι ίδιες αρχές των αερίων στην αποβολή του οξυγόνου και την πρόσληψη του διοξειδίου του άνθρακα.

Το οξυγόνο μεταφέρεται από τα ερυθρά αιμοσφαίρια συνδεδεμένο με την αιμοσφαιρίνη καθώς και στο πλάσμα. Η αιμοσφαιρίνη που υπάρχει μέσα στα 4-6 δισεκατομμύρια ερυθρών αιμοσφαιρίων του σώματος, κάνει εφικτή τη μεταφορά από το αίμα ποσότητας οξυγόνου, 70 φορές μεγαλύτερη από αυτή που διαλύεται στο πλάσμα. Σε κάθε 100 ml αίματος περιέχεται κατά μέσο όρο 14-16 γρ αι-

μοσφαιρίνης στους άνδρες και 12-14 γρ στις γυναίκες. Εφόσον κάθε γραμμάριο αιμοσφαιρίνης μπορεί να συνδεθεί με περίπου 1,34 ml οξυγόνου, η χωρητικότητα μεταφοράς οξυγόνου του αίματος είναι περίπου 20 ml για κάθε 100 ml αίματος, πλήρως κορεσμένου σε οξυγόνο. Καθώς το αίμα περνάει από τους πνεύμονες, έρχεται σε επαφή με τον αέρα των κυψελίδων για περίπου 0,75 δευτερόλεπτα, χρόνο επαρκή για να προσλάβει η αιμοσφαιρίνη όλο σχεδόν το οξυγόνο που μπορεί να μεταφέρει. Σαν αποτέλεσμα, όταν το αίμα αφήνει τους πνεύμονες είναι κορεσμένο κατά 98% περίπου σε οξυγόνο.

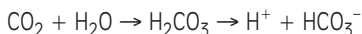
Άτομα που έχουν χαμηλό περιεχόμενο σε αιμοσφαιρίνη, όπως συμβαίνει στη *σιδηροπενική αναιμία*, έχουν μειωμένη ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου, εφόσον η μεταφορική ικανότητα του αίματος είναι μειωμένη. Σε ηρεμία, τα άτομα αυτά μπορεί να επηρεάζονται λίγο από την αναιμία, καθώς το καρδιαγγειακό τους σύστημα μπορεί να αντιρροπήσει το χαμηλό περιεχόμενο σε οξυγόνο, αυξάνοντας τη ροή του αίματος. Σε δραστηριότητες όμως, όπου η παράδοση του οξυγόνου μπορεί να αποτελέσει περιορισμό, το μειωμένο περιεχόμενο του αίματος σε οξυγόνο περιορίζει την αερόβια παραγωγή ενέργειας και την απόδοση.

Σε ηρεμία, το περιεχόμενο του αρτηριακού αίματος σε οξυγόνο είναι περίπου 20 ml ανά 100 ml, ενώ πέφτει στα 15-16 ml ανά 100 ml καθώς περνάει από τα τριχοειδή στο φλεβικό σύστημα. Αυτή η διαφορά αρτηριακού-φλεβικού αίματος στο περιεχόμενο οξυγόνου ($a-\dot{V}O_2 \text{ diff}$), είναι περίπου 4-5 ml οξυγόνου ανά 100 ml αίματος. Η ποσότητα του οξυγόνου που προσλαμβάνεται από τους ιστούς είναι περίπου ίση με την ποσότητα που χρησιμοποιείται για τη παραγωγή ενέργειας από τους ιστούς. Καθώς ο ρυθμός χρησιμοποίησης του οξυγόνου αυξάνει, η $a-\dot{V}O_2 \text{ diff}$ διευρύνεται. Κατά την έντονη άσκηση, η $a-\dot{V}O_2 \text{ diff}$ στους συσπώμενους μύες μπορεί να αυξηθεί στα 15 ml ανά 100 ml αίματος. Η μεταφορά του οξυγόνου από το αίμα στους μύες, διευκολύνεται από τη χαμηλή μερική πίεση του οξυγόνου στους ιστούς, και αυξάνει με

την οξύτητα των ιστών, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα, παράγοντες οι οποίοι όπως είναι γνωστό εμφανίζονται κατά τη μυϊκή δραστηριότητα.

Οι αυξημένες απαιτήσεις σε οξυγόνο κατά την άσκηση μπορούν επίσης να καλυφθούν με την αύξηση της αιματικής ροής προς τους μύες, μειώνοντας έτσι το οξυγόνο που απομακρύνεται από κάθε 100 ml αίματος. Επομένως, η μεταφορά και η πρόσληψη οξυγόνου εξαρτώνται από τη περιεκτικότητα του αίματος σε οξυγόνο, την αιματική ροή και τις τοπικές συνθήκες μέσα στο μυ. Κατά τη μέγιστη κοιλύμβηση, αρκετοί από αυτούς τους παράγοντες μπορεί να συμβάλλουν στη μείωση της προσφοράς οξυγόνου, περιορίζοντας με αυτό τον τρόπο την ικανότητα του μυός να καλύψει τις οξειδωτικές ανάγκες της προσπάθειας.

Το διοξείδιο του άνθρακα εξέρχεται από τα κύτταρα με διάχυση, λόγω της διαφοράς μερικής πίεσης που υπάρχει μεταξύ των ιστών και του τριχοειδικού αίματος. Ενώ μία μικρή ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα διαλύεται στο πλάσμα, το υπόλοιπο μεταφέρεται στους πνεύμονες συνδεδεμένο με την αιμοσφαιρίνη και το νερό (*ανθρακικό οξύ*). Το ανθρακικό οξύ αποτελεί τη κυριότερη οδό για τη μεταφορά του διοξειδίου του άνθρακα. Με τη βοήθεια του ενζύμου *καρβονική ανυδράση*, τα μόρια του διοξειδίου του άνθρακα και του νερού ενώνονται στα τριχοειδή των ιστών για να σχηματίσουν ανθρακικό οξύ (H_2CO_3). Αφού αφήσουν τα τριχοειδή, το ανθρακικό οξύ αποβάλλει ένα ιόν υδρογόνου (H^+), σχηματίζοντας με αυτό τον τρόπο ένα ιόν διτανθρακικό (HCO_3^-). Αυτή η αντίδραση μπορεί να περιγραφεί ως εξής:



Τα ιόντα υδρογόνου εξουδετερώνονται στη συνέχεια από την αιμοσφαιρίνη, η οποία διατηρεί την οξύτητα (pH) του αίματος σε σχετικά φυσιολογικά επίπεδα. Ως συνέπεια αυτής της αντίδρασης, περίπου το 70% του διοξειδίου του άνθρακα μεταφέρεται με τη μορφή των διτανθρακικών (HCO_3^-).

Στους πνεύμονες, όπου η μερική πίεση του διοξειδίου του άνθρακα μειώνεται, επανασχηματίζεται το ανθρακικό οξύ. Σε αυτό το στάδιο, επανασχηματίζονται το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό, επιτρέποντας στο διοξείδιο του άνθρακα να αφήσει το αίμα και να εισέλθει στις κυψελίδες από όπου εκπνέεται κατά των πνευμονικό αερισμό.

Έλεγχος της αναπνοής

Η ακούσια ρύθμιση της συχνότητας και του βάθους της αναπνοής δεν είναι πλήρως κατανοητή, αν και πολλοί περίπλοκοι νευρικοί μηχανισμοί ελέγχου έχουν αναγνωρισθεί. Η διατήρηση του αρτηριακού οξυγόνου, του διοξειδίου του άνθρακα και του pH μέσα σε πολύ στενά όρια, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το συντονισμό της κυκλοφορίας και του πνευμονικού αερισμού. Το κέντρο ελέγχου του πνευμονικού αερισμού (το αναπνευστικό κέντρο) εντοπίζεται στο κέντρο του προμήκη, αν και άλλες περιοχές του εγκέφαλου (π.χ. τα εγκεφαλικά ημισφαίρια και η γέφυρα) συνεισφέρουν στη λεπτή ρύθμιση της αναπνοής. Σε ηρεμία, οι μεταβολές του pH, της PCO_2 , της PO_2 και της θερμοκρασία του αρτηριακού αίματος, ενεργοποιούν νευρώνες μέσα στο προμήκη και στο αρτηριακό σύστημα, μεταδίδοντας έτσι μηνύματα στο εισπνευστικό και στο εκπνευστικό κέντρο, τα οποία ελέγχουν το ρυθμό και το βάθος της αναπνοής.

Μία μείωση του αρτηριακού PO_2 ενεργοποιεί τους χημικούς υποδοχείς (χημειούποδοχείς) στα αορτικά και καρωτιδικά σωματίδια. Οι ίδιοι υποδοχείς είναι επίσης υπεύθυνοι για την εντόπιση αύξησης του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), της θερμοκρασίας του αίματος, της αρτηριακής πίεσεως και της πτώσης του pH. Υπό συνθήκες ανάπαυσης, η μερική πίεση του διοξειδίου του άνθρακα είναι το ισχυρότερο ερέθισμα για τη ρύθμιση της αναπνοής. Όπως σημειώσαμε παραπάνω, μικρές αλλαγές στο ανθρακικό οξύ, το οποίο σχηματίζεται από διοξείδιο του άνθρακα και νερό, έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκεντρώσεως των ιόντων υδρογόνου που προέρχονται από τη διάσπα-

ση του ανθρακικού οξέως σε διτανθρακικά και ιόντα υδρογόνου. Αυτή η αύξηση στη συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου στο αίμα, διεγείρει την αναπνοή, εξαφανίζοντας έτσι το διοξείδιο του άνθρακα, γεγονός το οποίο μειώνει τη συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου καθώς σχηματίζεται νερό. Αυτή η αλληλεπίδραση αντιδράσεων ρυθμίζει την οξύτητα του αίματος, ενώ ελέγχει το μηχανισμό της εισπνοής και εκπνοής.

Η δύσπνοια κατά την άσκηση είναι συχνό φαινόμενο ανάμεσα σε άτομα που βρίσκονται σε κακή φυσική κατάσταση και τα οποία προσπαθούν να ασκηθούν σε επίπεδα, τα οποία προκαλούν απότομη αύξηση στο αρτηριακό διοξείδιο του άνθρακα και πτώση του pH. Όπως αναφέραμε προηγουμένως και τα δύο αυτά ερεθίσματα στέλνουν ισχυρά μηνύματα στο αναπνευστικό κέντρο, προκαλώντας αύξηση των απαιτήσεων για αερισμό. Αν και η δύσπνοια που προκαλείται από την άσκηση γίνεται αισθητή ως αδυναμία αναπνοής, η υποκείμενη αιτία είναι η αύξηση των επιπέδων ιόντων υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα στο αίμα.

Αναπνοή κατά τη κολύμβηση

Έχει προταθεί ότι ο κινητικός φλοιός είναι η βασική περιοχή που διεγείρει το αναπνευστικό κέντρο στους υψηλούς ρυθμούς αναπνοής που παρατηρούνται κατά την εκούσια αναπνοή και την άσκηση. Η κίνηση των χεριών και των ποδιών κατά την άσκηση, φαίνεται ότι αποτελεί ισχυρό ερέθισμα για την αναπνοή, αν και οι μεταβολές στην οξύτητα (pH) και στη θερμοκρασία του αίματος έχουν επίσης ισχυρή επίδραση στον αερισμό. Η προσμονή της άσκησης προκαλεί ξαφνική αύξηση της αναπνοής, πάνω από τις ανάγκες του σώματος. Αυτό ονομάζεται υπεραερισμός και μπορεί να προκαλέσει υπερβολική αποβολή διοξειδίου του άνθρακα και αύξηση του pH πάνω από τα φυσιολογικά επίπεδα. Αυτή η εκούσια, βαθιά και γρήγορη αναπνοή μπορεί να προκαλέσει ζάλη ή ακόμα και απώλεια συνείδησης, όταν διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα

αποκαλύπτοντας την ευαισθησία της ρύθμισης του διοξειδίου του άνθρακα και της οξεοβασικής ισορροπίας, από το αναπνευστικό σύστημα. Στο τέλος της ήπιας άσκησης, οι ενεργειακές απαιτήσεις των μυών πέφτουν σχεδόν αμέσως στα επίπεδα ηρεμίας, ενώ η αναπνοή επιστρέφει στο φυσιολογικό με πιο αργό σχετικά ρυθμό. Αν ο ρυθμός της αναπνοής ήταν απόλυτα συμβατός με τις μεταβολικές ανάγκες των ιστών, η αναπνοή θα έπρεπε να υποχωρήσει σε φυσιολογικά επίπεδα μέσα σε δευτερόλεπτα μετά το τέλος της άσκησης. Το γεγονός ότι η αναπνοή χρειάζεται αρκετά λεπτά για να επιστρέψει στα επίπεδα ηρεμίας, υποδηλώνει ότι η αναπνοή μετά την άσκηση ελέγχεται από την οξεοβασική ισορροπία και τη θερμοκρασία του αίματος.

Κατά τη διάρκεια μακράς, σταθερής κολύμβησης, η αναπνοή φαίνεται να συμβαδίζει με το ρυθμό του ενεργειακού μεταβολισμού. Ο αερισμός έχει τη τάση να είναι ανάλογος του όγκου του οξυγόνου που καταναλώνεται και του διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται από το σώμα. Όσο η ένταση της άσκησης αυξάνει προς το μέγιστο, παρατηρείται δυσανάλογη αύξηση του αερισμού σε σχέση με την κατανάλωση οξυγόνου. Όπως όλες οι δραστηριότητες των ιστών, ο αερισμός των πνευμόνων και η μεταφορά των αερίων μέσα στο σώμα χρειάζονται ενέργεια. Σε ηρεμία, μόνο το 2% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στο σώμα είναι για την αναπνοή. Όσο ο ρυθμός και το βάθος του αερισμού αυξάνουν, τόσο αυξάνει και το ενεργειακό κόστος. Περισσότερο από το 15% του οξυγόνου που καταναλώνεται κατά τη γρήγορη κολύμβηση μπορεί να χρησιμοποιείται από τους μύες του θωρακικού τοιχώματος, το διάφραγμα και τους κοιλιακούς μύες για τον αερισμό των πνευμόνων. Κατά την κατάσταση μετά την άσκηση, η λειτουργία της αναπνοής εξακολουθεί να απαιτεί ένα σημαντικό ποσό ενέργειας, καταναλώνοντας το 9-12% του συνολικού οξυγόνου που χρησιμοποιείται.

Αν και είναι προφανές ότι οι μύες της αναπνοής φορολογούνται βαριά κατά την άσκηση, υπάρχουν επαρκείς αναπνευστικές εφεδρείες για να αποτρέψουν την αύξηση του κυψελιδικού διοξειδίου του άν-

θρακα ή τη μείωση του κυψελιδικού οξυγόνου, κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων που διαρκούν λίγα μόνο λεπτά. Παρόλα αυτά, η εργώδης αναπνοή για αρκετές ώρες, μπορεί να οδηγήσει σε εξάντληση του γλυκογόνου και κόπωση των αναπνευστικών μυών. Πρέπει να σημειωθεί, ότι οι αναπνευστικοί μύες είναι καλύτερα σχεδιασμένοι για μακροχρόνια δραστηριότητα, από ότι οι μύες των χεριών και των ποδιών. Το διάφραγμα για παράδειγμα, έχει 2 με 3 φορές την αερόβια ικανότητα και την αιματική ροή των σκελετικών μυών. Συνεπώς, μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας για την αναπνοή, μπορεί να προέλθει από λίπος και γαλακτικό, από ότι στους άθλους μύες.

Σε μία προσπάθεια να μειώσουν την αναπνευστική καταπόνηση της άσκησης, οι κολυμβητές συχνά υπεραερίζουν τους πνεύμονες τους πριν τον αγώνα, προκαλώντας μείωση του διοξειδίου του άνθρακα του αίματος, αλλά μικρή αλλαγή στο περιεχόμενο οξυγόνου. Η μείωση του διοξειδίου του άνθρακα στο αίμα έχει σαν αποτέλεσμα ο κολυμβητής να αισθάνεται πολύ μικρή ανάγκη για αναπνοή στα πρώτα 10-20 δευτερόλεπτα του αγώνα. Στη διάρκεια αυτής της περιόδου όμως, το αρτηριακό οξυγόνο μπορεί να κατέβει σε επικίνδυνα χαμηλά επίπεδα, μειώνοντας το μεταβολισμό των μυών και την πρόσληψη οξυγόνου από το νευρικό σύστημα. Για αυτό, σε αγώνισματα που διαρκούν περισσότερο από 20-30 δευτερόλεπτα, η πρακτική του υπεραερισμού και η επακόλουθη συγκράτηση της αναπνοής μπορεί να μειώσουν την απόδοση παρά να την βελτιώσουν.

Προτείνονται για μελέτη

- Belcastro, A.N. & Bonen, A. (1975) Lactic acid removal rates during controlled and uncontrolled recovery exercise. *J. Appl. Physiol.* 39:932-937.
- Beltz, J.D., Costill, D.L., Thomas, R., Fink, W.J. & Kirwan, J.P. (1988) Energy demands of interval training for competitive swimming. *J. Swim Res.* 4:5-9.
- Bergstrom, J., Hermansen, L., Hultman, E. & Saltin, B. (1967) Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol. Scand.* 71:140-150.
- Brooks, G.A. (1987) Amino acid and protein metabolism during exercise, and recovery. *Med. Sci. Sports Exercise* 19 (suppl):S150-156.
- Cheatham, M.E., Boobis, L.H., Brooks, S. & Williams, C. (1986) Human muscle metabolism during sprint running. *J. Appl. Physiol.* 6:54-60.
- Clausen, J.P. (1973) Muscle blood flow during exercise and its significance for maximal performance. In Keul, J. (ed.) *Limiting Factors of Physical Performance*. Stuttgart, Germany: Georg Thieme Verlag, pp. 253-265.
- Costill, D.L., Fink, W.J., Getchell, L.H., Ivy, J.L. & Witzman, F.A. (1979) Lipid metabolism in skeletal muscle of endurance-trained males and females. *J. Appl. Physiol.* 47:787-791.
- Costill, D.L., Flynn, M.G., Kirwan, J.P. et al. (1988) Effects of repeated days of intensified training on muscle glycogen and swimming performance. *Med. Sci. Sports Exercise* 20:249-254.
- Gaesser, G.A. & Poole, D.C. (1988) Blood lactate during exercise: time course of training adaptation in humans. *Int. J. Sports Med.* 9:284-288.
- Maglischo, E. (1990) *Swimming Faster*. Palo Alto, California: Mayfield Publishing.
- Pendergast, D.R., diPrampo, P.E., Craig, A.B., Sr. & Rennie, D.W. (1978) The influence of selected biomechanical factors on the energy cost of swimming. In Eriksson, B. & Furberg, B. (eds) *Swimming Medicine IV: International Series on Sport Sciences*, vol. 6. Baltimore, Maryland: University Park Press, pp. 367-378.
- Sahlin, K. (1983) Effect of acidosis on energy metabolism and force generation in skeletal muscle. In Vogel, J.A. & Poortmans, J. (eds) *Biochemistry of Exercise*, vol. 13. Champaign, Illinois: Human Kinetics, pp. 151-161.
- Salo, D.C. (1988) Specifics of high-intensity training. *Swimming World* 29:21.
- Saltin, B. & Karlsson, J. (1971a) Muscle glycogen utilization during work of different intensities. In Pernow, B. & Saltin, B. (eds) *Muscle Metabolism During Exercise*. New York: Plenum Press, pp. 289-299.
- Saltin, B. & Karlsson, J. (1971b) Muscle ATP, CP, and lactate during exercise after physical conditioning. In Pernow, B. & Saltin, B. (eds) *Muscle Metabolism During Exercise*. New York: Plenum Press, pp. 395-399.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Κόπωση: παράγοντες που περιορίζουν την απόδοση του κολυμβητή

Χρησιμοποιούμε τον όρο “κόπωση” για να περιγράψουμε τη γενικότερη αίσθηση της κούρασης, καθώς και τη μείωση της απόδοσης κατά τη διάρκεια μιας εξαντλητικής προσπάθειας, αν και φαίνεται πως υπάρχουν πολλοί ορισμοί και πολλές αιτίες για την κόπωση κατά την εξαντλητική κολύμβηση. Όσοι έχουν πάρει μέρος σε αγώνα 100 μέτρων ελεύθερου ή πεταλούδας, γνωρίζουν ότι το αίσθημα της κόπωσης και της εξάντλησης είναι σημαντικά διαφορετικό από αυτό που ένιωσαν σε αγώνες 1500 μέτρων ή ακόμα μεγαλύτερων αποστάσεων. Αν και η κόπωση δεν μπορεί να εξαλειφθεί, η επίδραση της στην απόδοση μπορεί να μειωθεί με την προπόνηση και το σωστό ρυθμό. Η συζήτηση που ακολουθεί θα προσπαθήσει να περιγράψει τα αίτια της κόπωσης και την αξία των διαφόρων προγραμμάτων προπόνησης στη βελτίωση της ανοχής του κολυμβητή στην κόπωση.

Μεγάλο μέρος του χρόνου προπόνησης αποβλέπει στη βελτίωση της μυϊκής αντοχής, δηλαδή στη δημιουργία αντιστάσεων στη κόπωση. Η κόπωση προκαλεί μείωση της ταχύτητας κολύμβησης, αν και οι αιτίες δεν είναι οι ίδιες σε όλα τα αγωνίσματα. Οι κολυμβητές υπόκεινται σε κόπωση σε αγωνίσματα μικρών αποστάσεων, όπως τα 25 μέτρα, η οποία προκαλεί πτώση της ταχύτητας στα τελευταία 5-10 μέτρα, ακόμα και αν δεν νιώθουν πόνο ή εξάντληση. Σε μεγαλύτερες διαδρομές, (π.χ. 400-1500 μέτρα), αισθάνονται μία διαφορετική μορφή κοπώσεως, με απώλεια μυϊκής δυνάμεως και γενική αίσθηση δυσφορίας. Φαίνεται ότι κάθε μία από αυτές τις εξαντλητικές προσπάθειες σχετίζεται με διαφορετική μορφή κόπωσης, η οποία δεν είναι η ίδια με το χρόνιο βαρύ αίσθημα

που νιώθουν οι κολυμβητές σε περιόδους έντονης υπερπροπόνησης.

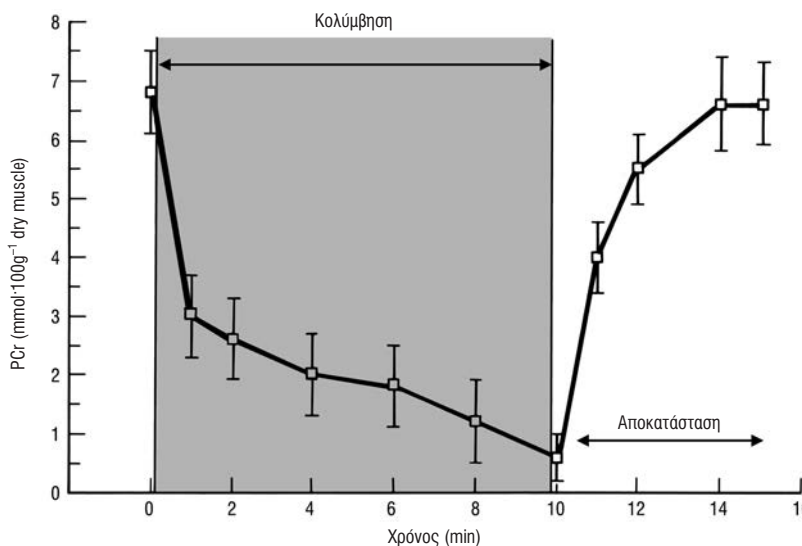
Γενικά, η κόπωση είναι μία σύνθετη σειρά γεγονότων που περιλαμβάνει αρκετές πλευρές των ενεργειακών διαδικασιών. Είναι δύσκολο να αναγνωρίσουμε κάποιο παράγοντα ως τον αδύναμο κρίκο, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την κατάρρευση και τη μείωση της ταχύτητας κολύμβησης. Αν και η διαθεσιμότητα της ενέργειας μπορεί να μειώσει την ικανότητα των μυών να παράγουν τάση, τα ενεργειακά συστήματα δεν μπορούν να θεωρηθούν υπεύθυνα για όλες τις μορφές κοπώσεως. Οι πιο ευρέως αποδεκτές θεωρίες για την εξήγηση των αιτιών της κοπώσεως έχουν ως εξής:

1. εξάντληση της ενέργειας που είναι απαραίτητη για την κολύμβηση ταχύτητας, π.χ. τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP), φωσφοκρεατίνης (PCr) και γλυκογόνου.
2. συσσώρευση μεταβολικών προϊόντων όπως το γαλακτικό* οξύ.
3. αλληλαγές στη φυσικοχημική κατάσταση του μυός, π.χ. μέταλλα.
4. διαταραχές στη διαδικασία του μυϊκού συντονισμού, π.χ. κεντρικό νευρικό σύστημα.

Εξάντληση της ενέργειας

Όπως σημειώσαμε προηγουμένως, το ATP παρέχει την ενέργεια που χρησιμοποιείται άμεσα για τη μυϊκή σύσπαση και είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη μυϊκής τάσης. Στην κολύμβηση ταχύτητας που διαρκεί λιγότερο από 10 δευτερόλεπτα, τα επίπεδα του ATP στους μύες διατηρούνται χάρη στη διάσπαση της φωσφοκρεατίνης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1, η PCr μειώνεται γρήγορα κατά τα πρώτα λεπτά μιας έντονης άσκησης. Ακολουθεί μια πιο βαθμιαία μείωση μέχρι το τέλος της άσκησης. Ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται η PCr κατά την άσκηση εξαρτάται από την ένταση της μυϊκής προσπάθειας.

* Το γαλακτικό δεν θεωρείται πλέον άχρηστο προϊόν, αφού μπορεί να μεταβολιστεί και να παραχθεί ενέργεια.



Εικ. 3-1. Επίδραση εξαντλητικής κολύμβησης στα επίπεδα της φωσφοκρεατινής (PCr) των μυών.

Ο ρυθμός της διάσπασης της PCr αυξάνει σε μεγαλύτερες ταχύτητες κολύμβησης, προκαλώντας ταχεία έναρξη της κόπωσης και της τελικής εξάντλησης. Μελέτες των μυών του ανθρώπινου μηρού και άλλων μεμονωμένων μυϊκών παρασκευασμάτων, έχουν δείξει ότι η εξάντληση μετά από επαναλαμβανόμενες μέγιστες συσπάσεις συμπίπτει με την εξάντληση της PCr. Αν και το ATP είναι άμεσα υπεύθυνο για την ενέργεια που χρησιμοποιείται σε σύντομες διαδρομές ταχύτητας, εν τούτοις μειώνεται πολύ λιγότερο από την PCr κατά τη μυϊκή προσπάθεια. Στην εξάντληση βέβαια, τόσο το ATP* όσο και η PCr μπορεί να έχουν καταναλωθεί πλήρως. Έτσι για να καθυστερήσει την έναρξη της κόπωσης, ο κολυμβητής πρέπει να κάνει κατανομή των δυνάμεών του, για να αποφύγει τη πρόωρη εξάντληση του ATP και της PCr. Η επιλογή ενός γρήγορου ρυθμού από την αρχή του αγώνα, θα έχει ως αποτέλεσμα τη γρήγορη πτώση των διαθέσιμων φωσφορικών (ATP και PCr), τη πρόωπη έναρξη της κόπωσης και ανικανότητα διατήρησης του ρυθμού στο τελικό στάδιο της κολύμβησης. Η προπόνηση και η εμπειρία θα επιτρέψουν στον κολυμ-

βητή να επιλέξει το καλύτερο ρυθμό άσκησης που θα επιτρέψει την ισότιμη χρήση του ATP και της PCr, σε όλη τη διάρκεια του αγώνα, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή απόδοση.

Εκτός της PCr, τα επίπεδα του ATP των μυών διατηρούνται και από την αερόβια και την αναερόβια διάσπαση του μυϊκού γλυκογόνου. Σε αγωνίσματα κολύμβησης που διαρκούν περισσότερο από λίγα δευτερόλεπτα, το μυϊκό γλυκογόνο αποτελεί τη κύρια πηγή ενέργειας για τη παραγωγή του ATP. Αν και τα περισσότερα αγωνίσματα της κολύμβησης είναι πολύ σύντομα για να προκαλέσουν πλήρη εξάντληση της προμήθειας γλυκογόνου ενός μυός, κατά τη διάρκεια περιόδων έντονης προπόνησης τα αποθέματα αυτά μπορούν να μειωθούν. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο μυς είναι ίσως σε θέση να παράγει δύναμη σε σχεδόν φυσιολογικά επίπεδα, μόνο για ένα σύντομο χρονικό διάστημα, βασισμένος στο διαθέσιμο σύστημα ATP-PCr. Όπως και με τη χρήση του PCr, ο ρυθμός εξάντλησης του γλυκογόνου των μυών ελέγχεται από την ένταση της δραστηριότητας.

Αυξήσεις στη παραγωγή δύναμης καταλήγουν σε γρήγορη μείωση του μυϊκού γλυκογόνου. Έχει υπολογιστεί ότι κατά τη κολύμβηση ταχύτητας το γλυκογόνο των μυών μπορεί να χρησιμοποιηθεί

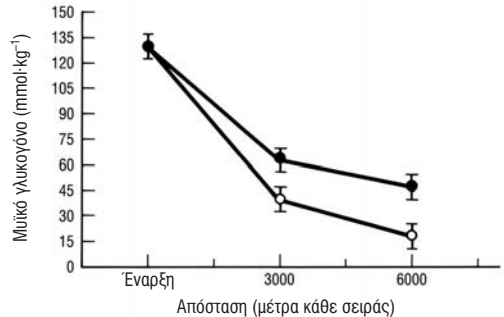
* Το ATP στο μυ δεν τελειώνει ποτέ. Η PCr μπορεί να μειωθεί σημαντικά χωρίς όμως να εξαντληθεί τελείως.

35-40 φορές γρηγορότερα, από ότι στη χαμηλή ένταση κοιλύμηση των μεγάλων αποστάσεων. Κατά τη διάρκεια των πρώτων λίγων λεπτών της άσκησης αντοχής, το μυϊκό γλυκογόνο χρησιμοποιείται με ταχύτερο ρυθμό από ότι αργότερα στην άσκηση. Το σημείο αυτό απεικονίζεται στην Εικ 3.2, η οποία δείχνει την μεταβολή στο γλυκογόνο των μυών, κατά την διάρκεια 1-1,5 ώρας κοιλύμησης με διαλείμματα. Η χρήση μυϊκού γλυκογόνου από το μυ του ώμου (δελητοειδής), ήταν μεγαλύτερη κατά τα πρώτα 75 λεπτά της άσκησης. Στη συνέχεια, οι κοιλυμβητές παρουσίασαν σταδιακά κόπωση καθώς τα επίπεδα του γλυκογόνου πλησιάζαν το μηδέν. Επομένως, φαίνεται ότι η αίσθηση της κόπωσης σε μακροχρόνιες προπονήσεις ή κατά τη διάρκεια διαδοχικών ημερών έντονης προπόνησης, μπορεί να συμπίπτει με την εξάντληση των αποθεμάτων του μυϊκού γλυκογόνου.

Πρέπει να σημειωθεί πάντως, ότι οι μυϊκές ίνες εξαντλούν τα αποθέματα ενέργειας τους με επιβλημένους τρόπους. Δηλαδή, οι μυϊκές ίνες που επιστρατεύονται συχνότερα κατά την άσκηση, μπορεί να εξαντλήσουν μεμονωμένα το γλυκογόνο τους, μειώνοντας έτσι τον αριθμό των ιών που είναι διαθέσιμες και ικανές να παράγουν τη δύναμη που χρειάζεται για άσκηση.

Όταν οι ίνες βραδείας συστολής (ST) έχουν εξαντλήσει το γλυκογόνο τους, οι ίνες ταχείας συστολής (FT) φαίνονται ανίκανες να παράγουν αρκετή τάση, ή δεν μπορούν να επιστρατευτούν εύκολα για να καλύψουν το έλλειμμα της μυϊκής τάσης. Για αυτό το λόγο θεωρήθηκε ότι το αίσθημα της μυϊκής κόπωσης και βάρους που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια συνεχόμενων ημερών βαριάς προπόνησης, ίσως να αντανακλά την ανικανότητα κάποιων μυϊκών ιών να παράγουν ενέργεια με τους ρυθμούς που χρειάζεται για γρήγορη κοιλύμηση.

Εκτός του ότι εξαντλεί το γλυκογόνο επιλεκτικά από τις ίνες βραδείας ή ταχείας συστολής, η άσκηση μπορεί να θέσει ασυνήθιστα βαριές απαιτήσεις σε ορισμένες ομάδες μυών. Έτσι στην ελεύθερη κοιλύμηση, για παράδειγμα, μπορεί να καταναλώνεται από τους τρικέφαλους και τους δελητοειδείς



Εικ. 3-2. Ρυθμός χρησιμοποίησης του μυϊκού γλυκογόνου κατά την προπόνηση με διαλείμματα. ●, επαναλήψεις 500 μέτρων – ○, επαναλήψεις 100 μέτρων.

μύες πολύ περισσότερο γλυκογόνο από ότι από τους δικέφαλους. Αυτό δείχνει ότι οι εκτείνοντες μύες του χεριού μπορεί να εξαντληθούν επιλεκτικά, με την κόπωση να περιορίζεται μόνο σε αυτούς.

Το μυϊκό γλυκογόνο από μόνο του δεν μπορεί να προσφέρει όλους τους υδατάνθρακες που χρειάζονται για μία άσκηση που διαρκεί αρκετές ώρες. Η γλυκόζη που παραδίδεται στους μύες μέσω του αίματος, έχει αποδειχθεί ότι συνεισφέρει ένα σημαντικό ποσό ενέργειας κατά την έντονη άσκηση. Το ήπαρ διασπά το γλυκογόνο για να διατηρήσει μια σταθερή παροχή γλυκόζης στο αίμα. Στα πρώτα στάδια της άσκησης, η παραγωγή ενέργειας απαιτεί μικρές ποσότητες γλυκόζης αίματος, αλλά στα τελευταία στάδια ενός αγωνίσματος αντοχής, η γλυκόζη του αίματος έχει μεγάλη συνεισφορά στις ενεργειακές ανάγκες των μυών. Όσο μεγαλύτερη η διάρκεια της άσκησης, τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η παραγωγή γλυκόζης από το ήπαρ, για να συμβαδίζει με τη πρόσληψη της γλυκόζης από τους μύες.

Εφόσον το ήπαρ διαθέτει περιορισμένη ποσότητα γλυκογόνου και είναι ανίκανο να παράγει γλυκόζη από άλλα καύσιμα, τα επίπεδα γλυκόζης του αίματος μπορεί να αρχίσουν να υποχωρούν, όταν η πρόσληψη από τους μύες υπερβεί την ηπατική παραγωγή γλυκόζης. Μην μπορώντας να προσλάβουν επαρκή ποσότητα γλυκόζης από το αίμα, οι

μύες πρέπει να ριξουν περισσότερο βάρος στα δικά τους αποθέματα γλυκογόνου, προκαλώντας επιτάχυνση της χρήσης του μυϊκού γλυκογόνου και την ταχύτερη έναρξη της εξάντλησης.

Υπό το φως της εξάρτησης των μυών από το γλυκογόνο και τη γλυκόζη του αίματος, δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός της βελτίωσης της απόδοσης σε ασκήσεις αντοχής, όταν το απόθεμα του μυϊκού γλυκογόνου είναι υψηλό στην αρχή της δραστηριότητας. Παρόλα αυτά, είναι ιδιαίτερα απίθανο τα μεγάλα αποθέματα γλυκογόνου να προκαλούν αύξηση της απόδοσης του κοιλιομυϊκού, πάνω από αυτή που παρατηρείται με σχετικά φυσιολογικά αποθέματα, αφού η εξάντληση του γλυκογόνου και η χαμηλή γλυκόζη αίματος φαίνεται να περιορίζουν την απόδοση και να προκαλούν κόπωση μόνο σε αγωνίσματα που διαρκούν 30 λεπτά ή περισσότερο. Η κόπωση σε πιο σύντομα αγωνίσματα είναι πιθανότερο να οφείλεται σε συσσώρευση άχρηστων προϊόντων, όπως το γαλακτικό και η αύξηση των ιόντων υδρογόνου μέσα στους μύες.

Συσσώρευση άχρηστων προϊόντων

Η συσχέτιση ανάμεσα στη συσσώρευση γαλακτικού οξέως στο αίμα και την κόπωση έχει αναγνωριστεί από τις αρχές της δεκαετίας του 1930. Κατά την εργώδη άσκηση, μέρος της ενέργειας παράγεται με το σχηματισμό γαλακτικού οξέως στο σαρκόπλάσμα των μυϊκών ινών. Η συνεχής απόσπαση του υδρογόνου από το μόριο του γαλακτικού οξέως, κάνει το περιβάλλον των μυών περισσότερο όξινο, μειώνοντας έτσι το pH τους. Αν και οι περισσότεροι άνθρωποι πιστεύουν ότι το γαλακτικό οξύ είναι υπεύθυνο για την κόπωση και την εξάντληση σε όλες τις μορφές άσκησης, μόνο κατά τη σχετικά βραχυχρόνια, ιδιαίτερα έντονη μυϊκή προσπάθεια αθροίζεται γαλακτικό οξύ μέσα στις μυϊκές ίνες, μεταβάλλοντας την οξύτητα τους. Οι δρομείς για παράδειγμα, μπορεί να έχουν σχεδόν φυσιολογικά επίπεδα γαλακτικού οξέως και pH στο τέλος ενός μαραθωνίου, παρά την κατάσταση εξάντλη-

σης στην οποία μπορεί να βρίσκονται. Από την άλλη πλευρά, η κοιλιομυϊκη ταχύτητα προκαλεί μεγάλη άθροιση γαλακτικού, που προέρχεται από την παραγωγή ενέργειας με γλυκόλυση. Η απόσπαση ιόντων υδρογόνου από το γαλακτικό οξύ μειώνει το pH από 7,1 κατά την ηρεμία σε 6,4 κατά την εξάντληση, τιμή η οποία είναι ασύμβατη με τη φυσιολογική κυτταρική λειτουργία.

Έτσι, δραστηριότητες οι οποίες εξαρτώνται από τη γλυκόλυση για ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας τους, προκαλούν όξινο περιβάλλον μέσα στους μύες και σε ολόκληρο το σώμα. Τα κύτταρα και τα σωματικά υγρά διαθέτουν ρυθμιστικά συστήματα, όπως τα διανθρακικά (HCO_3^-), η λειτουργία των οποίων είναι να ελαχιστοποιήσουν την καταστροφική επίδραση των ιόντων υδρογόνου. Αν τα ιόντα υδρογόνου προστεθούν σε διάλυμα χωρίς δυνατότητα ρύθμισης, η συγκέντρωση των ελεύθερων ιόντων υδρογόνου θα κατέβαζε το pH κατά περίπου 1,5 u (από pH 7,1 σε 5,6), σκοτώνοντας το μυ. Χάρη στην ικανότητα του σώματος για ρύθμιση, η συγκέντρωση των ιόντων υδρογόνου διατηρείται χαμηλά, ακόμα και στην ταχύτερη κοιλιομυϊκη, περιορίζοντας την πτώση του pH σε 6,6 με 6,4 στην εξάντληση.

Παρόλα αυτά, τέτοιες μεταβολές του pH έχουν αρνητική επίδραση στην παραγωγή ενέργειας και στη διαδικασία της σύσπασης του μυός. Η πτώση του ενδοκυττάρου pH κάτω από 6,9, μειώνει αποδεδειγμένα το ρυθμό της γλυκόλυσης και την παραγωγή ATP. Σε pH 6,4, η επίδραση των ελεύθερων ιόντων υδρογόνου είναι αρκετά ισχυρή ώστε να σταματήσει την περαιτέρω διάσπαση του γλυκογόνου και να διαταράξει τη διαδικασία της μυϊκής σύσπασης. Είναι κοινώς αποδεκτό ως εκ τούτου, ότι η μείωση του pH μέσα στο μυ είναι, ο βασικότερος περιοριστικός παράγοντας και η αιτία της κόπωσης στα περισσότερα αγωνίσματα κοιλιομυϊκής.

Όπως φαίνεται στην Εικ 3.3 η ανάκτηση της κατάστασης ηρεμίας μετά από μία άσκηση ταχύτητας απαιτεί περίπου 20-30 λεπτά. Σε αυτό το σημείο, το pH των μυών έχει επιστέψει στα προ-άσκησης επίπεδα, αν και το γαλακτικό του αίματος και των