

## Science in Free Diving

### Η φυσιολογία και η παθοφυσιολογία της ελεύθερης κατάδυσης. Μέρος Α΄



#### **Οι φυσιολογικές αντιδράσεις του οργανισμού στην ελεύθερη κατάδυση**

Ο ανθρώπινος οργανισμός προσαρμόζεται στην αύξηση της υδροστατικής πίεσης με ανάλογες προσαρμογές στο καρδιαγγειακό σύστημα. Αλλαγές που συμβαίνουν κατά την κατάδυση είναι η αύξηση της αρτηριακής πίεσης, η βραδυκαρδία, η εξοικονόμηση του οξυγόνου για την λειτουργία του εγκεφάλου και της καρδιάς, οι καρδιακές αρρυθμίες για την προσαρμογή της καρδιακής παροχής και η σύσπαση του σπλήνα για την αύξηση των ερυθρών αιμοσφαιρίων.

#### **Το καταδυτικό αντανακλαστικό (Diving Response):**

Το καταδυτικό αντανακλαστικό είναι κάτι που συμβαίνει σε όλα τα θηλαστικά, εκδηλώνεται με το κράτημα της αναπνοής (άπνοια) και αποτελείται από: περιφερειακή αγγειοσυστολή λόγω της συμπαθητικής δραστηριότητας, αύξηση της αρτηριακής πίεσης, και από βραδυκαρδία (μείωση της καρδιακής συχνότητας μέσω ενεργοποίησης του πνευμονογαστρικού νεύρου) με σημαντική μείωση της καρδιακής παροχής. Αυτές οι αλλαγές στο καρδιαγγειακό σύστημα ενισχύονται περαιτέρω από την επίδραση της χαμηλής θερμοκρασίας του νερού στην περιοχή του προσώπου και της υποξίας.

Σε καλά προπονημένους ελεύθερους δύτες, η άπνοια έχει βρεθεί να ανυψώνει τη περιφερειακή κυκλοφοριακή αντίσταση (αύξηση της αρτηριακής πίεσης) επάνω από 4-

5 φορές, συνοδευόμενη από έντονη βραδυκαρδία και μειωμένη καρδιακή παροχή αίματος στους ιστούς (μύες και όργανα).

Μπορεί η έντονη βραδυκαρδία να είναι μέρος μιας αντανακλαστικής απάντησης στη άπνοια αλλά υπάρχουν πειραματικές ενδείξεις ότι η αύξηση της αρτηριακής πίεσης προηγείται της επιβράδυνσης της καρδιακής συχνότητας. Αυτό σημαίνει ότι η ενεργοποίηση αυτή είναι αποτέλεσμα δύο μηχανισμών: της δράσης των τασεοϋποδοχέων (*υποδοχείς που αντιλαμβάνονται αλλαγές στην ατμοσφαιρική πίεση*) λόγω αλλαγής της πίεσης και της δράσης των χημειοϋποδοχέων (*υποδοχείς που αντιλαμβάνονται χημικές αλλαγές*) που επηρεάζονται από τα επίπεδα της υποξίας (*χαμηλά επίπεδα οξυγόνου*) και της υπερκαπνίας (*υψηλά επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα*).

Γενικά υποστηρίζεται ότι κατά την διάρκεια της κατάδυσης, όλα τα αποθέματα οξυγόνου στο αίμα και στους πνεύμονες κατανέμονται κατά προτίμηση στην καρδιά και τον εγκέφαλο. Μια άλλη «ανταπόκριση» του οργανισμού στην κατάδυση που έχει προσελκύσει την προσοχή των ερευνητών τα τελευταία χρόνια, είναι η αύξηση της συγκέντρωσης της αιμοσφαιρίνης στην κυκλοφορία μέσω της συστολής του σπλήνα, που εμφανίζεται αρκετά νωρίς κατά τη διάρκεια της κατάδυσης, ακόμα και πριν την βραδυκαρδία. Αυτά τα αποτελέσματα έχουν επιβεβαιωθεί σε υγιή άτομα που τους έχει αφαιρεθεί για κάποιο λόγο ο σπλήνας, τα οποία δεν αύξησαν την συγκέντρωση της αιμοσφαιρίνης στο αίμα κατά την διάρκεια της άπνοιας. Πάντως μελέτες έχουν δείξει ότι οι αθλητές της ελεύθερης κατάδυσης έχουν υψηλότερα επίπεδα αιμοσφαιρίνης στο αίμα από τους μη-δύτες και αυτό εξηγείται με το ότι οι ελεύθεροι δύτες εμφανίζουν 24% αύξηση στα επίπεδα ερυθροποιητίνης στο αίμα τους (*η ερυθροποιητίνη είναι μια ορμόνη που αυξάνει τον αριθμό των κυκλοφορούντων ερυθρών αιμοσφαιρίων και, κατά συνέπεια τον αιματοκρίτη. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η αύξηση της ικανότητας μεταφοράς οξυγόνου από το αίμα και η βελτίωση στην ανοχή της υποξίας.*

Φυσικά υπάρχουν και περιπτώσεις αθλητών ελεύθερης κατάδυσης που δεν έχουν αυξημένα επίπεδα αιμοσφαιρίνης και αιματοκρίτη πάνω από το μέσο όρο του γενικού πληθυσμού. Είναι λογικό ότι ο κάθε οργανισμός αντιλαμβάνεται διαφορετικά το υποξικό ερέθισμα και αντιδρά αναλόγως. Πάντως τα επίπεδα της αιμοσφαιρίνης δεν αποτελούν περιοριστικό παράγοντα απόδοσης όταν αυτά βρίσκονται μέσα στα φυσιολογικά όρια.

Η ψύξη του προσώπου, και ιδιαίτερα του μετώπου και της περιοχής των ματιών είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην μείωση της καρδιακής συχνότητας (βραδυκαρδία) κατά την ελεύθερη κατάδυση. Ωστόσο, η στατική άπνοια σε κρύο νερό (20°C) χωρίς στολή βρέθηκε μειωμένη κατά 55% λόγω αύξησης του βασικού μεταβολισμού παρότι μειώθηκε η καρδιακή συχνότητα κατά 26% από ότι όταν αξιολογήθηκε σε θερμοουδέτερο περιβάλλον.

Η καταδυτική απάντηση του οργανισμού διαφέρει σημαντικά κατά τη διάρκεια της ηρεμίας (στατική φάση) και της άσκησης (δυναμική φάση). Οι διαφορές επίσης εξαρτώνται από την ηλικία και την εμπειρία του ατόμου στην ελεύθερη κατάδυση. Η βραδυκαρδία κατάδυσης είναι αρκετά αναπτυγμένη στα παιδιά 4-12 μηνών και σχετίζεται με την διαδικασία επιβίωσης κατά τη διάρκεια των υποξικών επεισοδίων κατά την γέννηση. Η καταδυτική απάντηση του οργανισμού αποδυναμώνεται με το

γήρας, αλλά διατηρείται σε υψηλά επίπεδα όταν συνεχίζονται οι υποβρύχιες δραστηριότητες (υποβρύχιο ψάρεμα, κατάδυση κ.α.) μέσα στα χρόνια. Το καταδυτικό αντανακλαστικό είναι περισσότερο έντονο κατά τη διάρκεια της δυναμικής από ότι κατά τη διάρκεια της στατικής άπνοιας.

Η οικονομία του οργανισμού σε οξυγόνου κατά την διάρκεια της άπνοιας (oxygen sparing effect) εμφανίζεται να είναι ανάλογη προς το βαθμό της βραδυκαρδίας όπως έχει επιβεβαιωθεί σε διάφορες μελέτες κατά τη διάρκεια της άσκησης. Όσο μεγαλύτερη πτώση εμφανίζει η καρδιακή συχνότητα, τόσο μεγαλύτερη η οικονομία του οργανισμού στο οξυγόνο. Κατά τη διάρκεια της στατικής άπνοιας, η οικονομία σε οξυγόνο γίνεται κυρίως λόγω της μείωσης της πνευμονικής κατανάλωσης οξυγόνου (αναπνευστικοί μύες, διάφραγμα κ.α.) και εμφανίζεται ιδιαίτερα αναπτυγμένη στους έμπειρους δύτες που μπορούν να χαλαρώσουν και να συγκεντρωθούν καλύτερα.

### **Καρδιακή Αρρυθμία κατά την κατάδυση:**

Ένα από τα πιο ξεχωριστά χαρακτηριστικά του καταδυτικού αντανακλαστικού είναι ο συνδυασμός της βραδυκαρδίας και της καρδιακής αρρυθμίας (με την έννοια αρρυθμία εννοούμε τις άρρυθμες αλλαγές της καρδιακής συχνότητας κατά την κατάδυση). Η αιτία του φαινομένου αυτού βρίσκεται στην ταυτόχρονη αναστολή του πνευμονογαστρικού νεύρου και στην ενεργοποίηση του συμπαθητικού νευρικού συστήματος. Σημαντικό ρόλο σε αυτό το φαινόμενο παίζει η έκθεση του προσώπου κατά την κατάδυση στο κρύο νερό, η διάταση που υφίσταται η καρδιά λόγω της μεγάλης ενδοθωρακικής πίεσης, και λόγω του μεγάλου καρδιακού μεταφορτίου (μεταφορτίο είναι η δύναμη που βάζει ο καρδιακός μυς για να εξωθήσει το αίμα από τις κοιλίες λόγω της περιφερικής αντίστασης).

Οι καρδιακές αυτές αρρυθμίες καταγράφηκαν για πρώτη φορά στους δύτες μαργαριταριών από τους Scholander και συνεργάτες το 1962. Ωστόσο σε μια πιο πρόσφατη μελέτη σε έμπειρους δύτες ελεύθερης κατάδυσης, οι οποίοι καταδύθηκαν στα 55 μέτρα βάθος (σε υπερβαρικό θάλαμο) παρατηρήθηκε ότι μετά από την αρχική ταχυκαρδία, η καρδιακοί χτύποι μειώθηκαν σε 20-30 ανά λεπτό όταν προσέγγισαν το κατώτατο βάθος. Η ανάλυση του καρδιογραφήματος όμως έδειξε ότι η καρδιακή συχνότητα μειώθηκε στιγμιαία έως και 8 χτύπους το λεπτό.

Επιπλέον, τέτοιου είδους αρρυθμίες εμφανίζονται κυρίως σε καταδύσεις που γίνονται στο κρύο νερό (25°C) ενώ δεν εμφανίζονται σε θερμοκρασίες νερού άνω των 30°C. Βραδυκαρδία ακόμα εμφανίζεται και με είσοδο του προσώπου μόνο σε κρύο νερό που μπορεί προσωρινά να αγγίζει τους 10 χτύπους το λεπτό.

Δρ. Σακκάς Γεώργιος \*  
FDI Scientific Team

### **Βιβλιογραφία**

1. **Collier CR, Dail CW, and Affeldt JE.** Mechanics of glossopharyngeal breathing. *J Appl Physiol* 8: 580-584, 1956.
2. **Ferrigno M, and Lundgren CEG.** Breath-Hold Diving. In: *Bennett and*

- Elliott's Physiology and Medicine of Diving*, edited by Brubakk AO, and Neuman T. New York: Saunders, 2003, p. 153-180
3. **Ferrigno M, and Lundgren CEG.** Human Breath-Hold Diving. In: *The Lung at Depth*, edited by Lundgren CEG, and Miller JN Marcel Dekker, Inc., 1999, p. 529-585.
  4. **Lin YC, and Hong SK.** Hyperbaria: breath-hold diving. In: *Handbook of Physiology, Environmental Physiology*. Bethesda, MD: Am. Physiol. Soc., 1996, p. chapt. 42, p. 979-995.
  5. **Muth CM, Ehrmann U, and Radermacher P.** Physiological and clinical aspects of apnea diving. *Clin Chest Med* 26: 381-394, v, 2005.

\* Ο Δρ Σακκάς είναι Κλινικός Εργοφυσιολόγος στην Ιατρική Σχολή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας & Διευθυντής του Εργαστηρίου Κλινικών Μελετών του Ινστιτούτου Σωματικής Απόδοσης και Αποκατάστασης του Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης Θεσσαλίας, και μέλος της επιστημονικής ομάδας του FDI.