

Φυσιολογία της κυκλοφορίας και παθοφυσιολογία της εξωσωματικής κυκλοφορίας

Η εξωσωματική κυκλοφορία αποτελεί την επιτομή της εφαρμοσμένης φυσιολογίας του καρδιοαναπνευστικού και κυκλοφορικού συστήματος στον άνθρωπο. Η προσωρινή διακοπή της καρδιακής και αναπνευστικής λειτουργίας και η υποκατάστασή τους από την εξωσωματική κυκλοφορία έχει επίπτωση στο σύνολο των φυσιολογικών διεργασιών που εκτελούνται σε ιστικό και κυτταρικό επίπεδο. Επομένως, η προστασία των τελικών οργάνων κατά τη διάρκεια της εξωσωματικής κυκλοφορίας αποτελεί ύψιστο μέλημα του τεχνικού. Αυτό εξασφαλίζεται με τη χρησιμοποίηση εξελιγμένης συνεχούς παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο (real-time in-line monitoring) όχι μόνο των ζωτικών λειτουργιών, αλλά και μεταβολικών παραμέτρων που ελέγχουν τη μικροκυκλοφορία, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 8. Η σχολαστική αυτή ρύθμιση προϋποθέτει τη σε βάθος κατανόηση της φυσιολογίας της κυκλοφορίας και του καρδιαγγειακού συστήματος. Με τον τρόπο αυτό η εξωσωματική κυκλοφορία ανάγεται από «τέχνη» σε σύγχρονη επιστήμη.

Το κυκλοφορικό σύστημα

Το κυκλοφορικό σύστημα στον άνθρωπο περιλαμβάνει την καρδιά και το αγγειακό δίκτυο. Η καρδιά αποτελεί το βασικότερο όρ-

γανο του κυκλοφορικού συστήματος και λειτουργεί ως αντλία προώθησης του αίματος σε δύο κυκλώματα· στη μεγάλη κυκλοφορία που αποτελεί ένα σύστημα υψηλών πιέσεων, καθώς και στη μικρή ή πνευμονική κυκλοφορία η οποία αποτελεί ένα δεύτερο «εν σειρά» σύστημα χαμηλών πιέσεων. Η μεγάλη κυκλοφορία περιλαμβάνει το κύκλωμα αριστερά κοιλία-τελικά όργανα-δεξιός κόλπος, ενώ η μικρή το κύκλωμα δεξιά κοιλία-πνεύμονες-αριστερός κόλπος.

Το αγγειακό δίκτυο περιλαμβάνει:

α) τις αρτηρίες, οι οποίες μεταφέρουν οξυγονωμένο αίμα από την καρδιά προς τους περιφερικούς ιστούς (με εξαίρεση την πνευμονική αρτηρία). Η μέση συστολική πίεση στις μεγάλες αρτηρίες κυμαίνεται γύρω στα 120 mmHg, ενώ η μέση διαστολική κυμαίνεται γύρω στα 80 mmHg,

β) τους μικρότερους κλάδους των αρτηριών, που ονομάζονται αρτηρίδια και ελέγχουν μέσω του αγγειακού τόνου (αγγειοσύσπαση ή αγγειοδιαστολή) την παροχή αίματος που λαμβάνουν οι διάφοροι ιστοί,

γ) τα τριχοειδή, στα οποία πραγματοποιείται η ανταλλαγή των ουσιών μεταξύ του αίματος και των ιστών. Η έξοδος ύδατος και διαφόρων ουσιών προς το μεσοκυττάριο χώρο, ή η απορρόφηση ύδατος και ουσιών απ' αυτόν στο επίπεδο των τριχοειδών, βασίζεται στη διαφορά της υδροστατικής από την

κολλοειδοσμητική πίεση. Η τελευταία εξαρτάται, κατά κύριο λόγο από τη συγκέντρωση του νατρίου και των πρωτεϊνών στον ορό,

δ) τις φλέβες, που επιστρέφουν το μη οξυγονωμένο αίμα (με εξαίρεση την πνευμονική φλέβα) στην καρδιά.

Οι αρτηρίες και οι φλέβες έχουν δυνατότητα για μεταβολή του εύρους τους, μέσω σύσπασης (αγγειοσύσπαση) ή χάλασης του τοιχώματός τους (αγγειοδιαστολή). Η λειτουργία αυτή έχει σημασία τόσο για την κατανομή των υγρών του σώματος, όσο και για τη θερμορρύθμιση.

Οι βασικές λειτουργίες της καρδιάς και του κυκλοφορικού συστήματος είναι οι ακόλουθες:

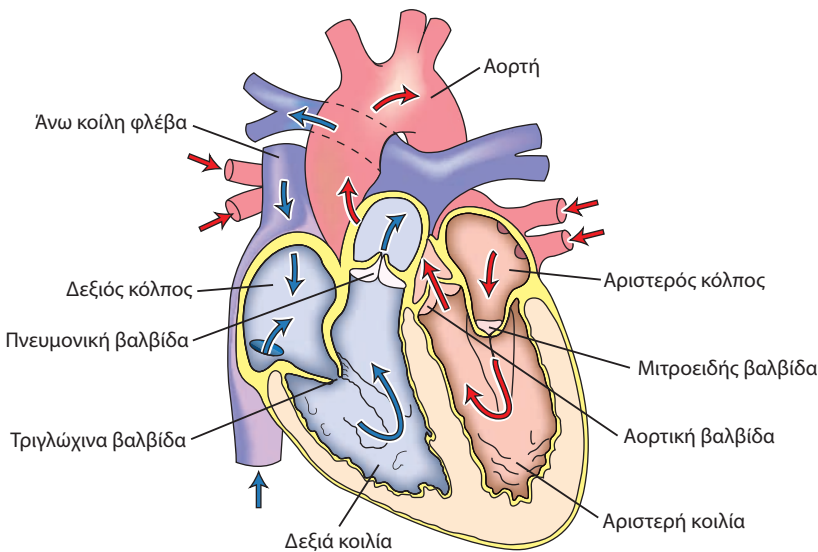
- α) η μεταφορά O_2 και άλλων απαραίτητων συστατικών στους ιστούς,
- β) η αποβολή CO_2 και άλλων μεταβολικών προϊόντων από τους ιστούς,

γ) η ενίσχυση της άμυνας του οργανισμού μέσω μεταφοράς με την κυκλοφορία ειδικών κυττάρων,

δ) η θερμορρύθμιση του οργανισμού.

Φυσιολογία της καρδιακής λειτουργίας

Η καρδιά αποτελείται από τέσσερις μεγάλες κοιλότητες: τους δύο κόλπους, οι οποίοι χωρίζονται με το μεσοκολπικό διάφραγμα και τις δύο κοιλίες, οι οποίες χωρίζονται με το μεσοκοιλιακό διάφραγμα (Εικόνα 2.1). Ο δεξιός κόλπος, που υποδέχεται την άνω και κάτω κοίλη φλέβα και το στεφανιαίο κόλπο αποτελείται από το ωτίο και τον κυρίως κόλπο. Ο φλεβοκόμβος, που βρίσκεται εγγύς του ωτίου, είναι το κέντρο έναρξης της κολπικής διέγερσης (κολπικό λάκτισμα). Διαταραχές στην περιοχή οδηγούν σε απώλεια της κολ-

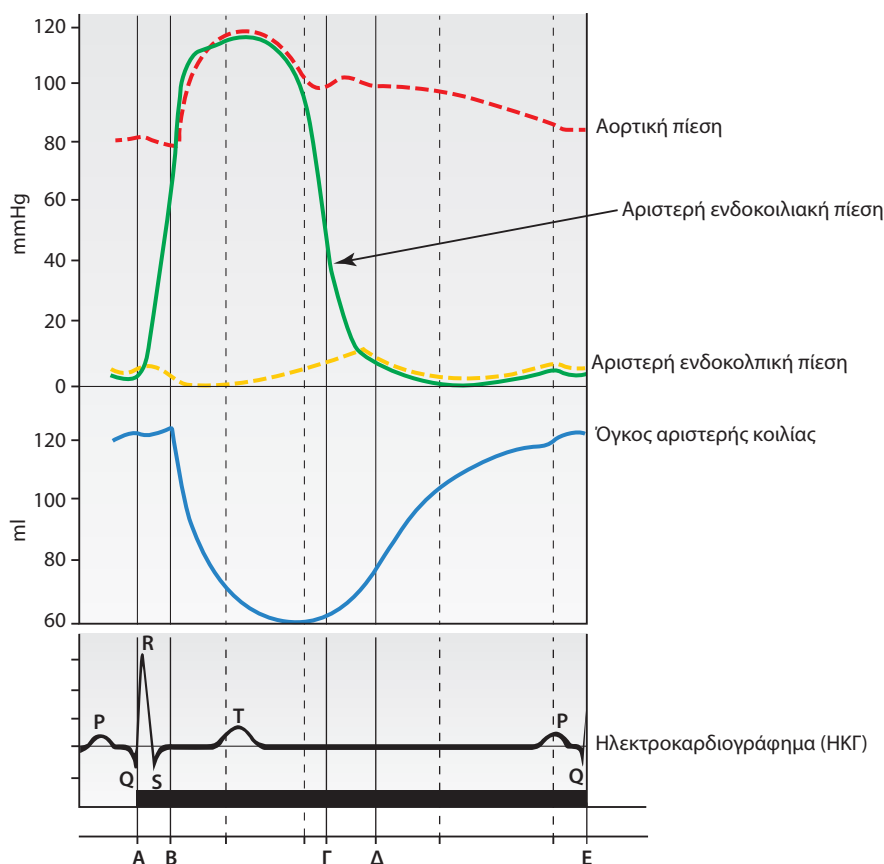


Εικόνα 2.1. Σχηματική απεικόνιση των καρδιακών κοιλοτήτων και της ενδοκαρδιακής ροής του αίματος. Με μπλε βέλη επισημαίνεται η κυκλοφορία του φλεβικού αίματος από το δεξιό κόλπο, στη δεξιά κοιλία διαμέσου της τριγλώχινας βαλβίδας και στη συνέχεια στην πνευμονική αρτηρία, όπου προσλαμβάνει οξυγόνο και αποβάλλει διοξείδιο του άνθρακα. Το οξυγονωμένο αίμα (κόκκινα βέλη) επιστρέφει με τις πνευμονικές φλέβες στον αριστερό κόλπο. Διαμέσου της μιτροειδούς βαλβίδας εισέρχει στην αριστερή κοιλία και στη συνέχεια εξωθείται προς την αορτή.

πικής συστολής και γένεση αρρυθμιών, όπως η κολπική μαρμαρυγή και ο κολπικός πτερυγισμός, με σημαντικές επιπτώσεις για την αιμοδυναμική ισορροπία του οργανισμού, αλλά και με αυξημένο κίνδυνο για θρομβοεμβολικά επεισόδια.

Από το δεξιό κόλπο το αίμα οδηγείται στη δεξιά κοιλία μέσω της τριγλώχινας βαλβίδας. Στην περιοχή εξώθησης του αίματος από τη δεξιά κοιλία προς τους πνεύμονες βρίσκεται η τρίπτυχη πνευμονική βαλβίδα. Από τους

πνεύμονες το οξυγονωμένο αίμα επιστρέφει στον αριστερό κόλπο μέσω των τεσσάρων πνευμονικών φλεβών. Ο αριστερός κόλπος είναι μικρότερος από το δεξιό και αποτελείται από το ωτίο και τον κυρίως κόλπο. Το ωτίο αποτελεί σημείο συγκέντρωσης θρόμβων που μπορεί να προκαλέσουν εμβολικά επεισόδια, γι' αυτό και συχνά απολινώνεται κατά τη διάρκεια καρδιοχειρουργικών επεμβάσεων. Από τον αριστερό κόλπο το αίμα φτάνει στην αριστερή κοιλία μέσω της μι-



Εικόνα 2.2. Οι τέσσερις φάσεις του καρδιακού κύκλου. Απεικονίζονται οι πιέσεις εντός της αριστερής κοιλίας, ο όγκος της αριστερής κοιλίας και το ηλεκτροκαρδιογράφημα. Κατά τη φάση της ισοογκομετρικής συστολής (A-B) αυξάνεται η πίεση εντός της αριστερής κοιλίας, ενώ η αορτική βαλβίδα είναι κλειστή. Ακολουθεί η φάση της εξώθησης (B-Γ) οπότε και ανοίγει η αορτική βαλβίδα και εξωθείται το αίμα στην αορτή. Κατά τη φάση της ισοογκομετρικής διαστολής (Γ-Δ) ελαττώνεται η πίεση εντός της αριστερής κοιλίας, ενώ η αορτική και η μιτροειδής βαλβίδες είναι κλειστές, ενώ ακολουθεί η φάση πλήρωσης (Δ-Ε) κατά την οποία ανοίγει η μιτροειδής βαλβίδα και πληρούται η αριστερή κοιλία.

τροειδούς βαλβίδας, η οποία είναι διγλώχινα και έχει επίσης στηρικτικό μηχανισμό συνεχόμενο με το μυοκάρδιο της κοιλίας αποτελούμενο από θηλοειδείς μυς και τενόντιες χορδές. Η εξώθηση του αίματος στην αορτή από την αριστερή κοιλία πραγματοποιείται μέσω της τρίπτυχης αορτικής βαλβίδας.

Ο καρδιακός κύκλος περιλαμβάνει την καρδιακή συστολή και τη διαστολή (Εικόνα 2.2). Κατά τη διάρκεια της συστολής οι κολποκοιλιακές βαλβίδες (τριγλώχινα και μιτροειδής) είναι κλειστές, ώστε να παρεμποδίζεται η παλινδρόμηση του αίματος προς τους κόλπους, ενώ οι αρτηριακές βαλβίδες (αορτική και πνευμονική) είναι ανοικτές προκειμένου να επιτυγχάνεται αποτελεσματική εξώθηση του αίματος στους πνεύμονες και στην περιφέρεια. Κατά τη διαστολή, οι αρτηριακές βαλβίδες κλείνουν, ώστε να εμποδίζουν την παλινδρόμηση του αίματος στις κοιλίες, ενώ ανοίγουν οι κολποκοιλιακές βαλβίδες με συνέπεια την αποτελεσματική πλήρωση της δεξιάς και της αριστερής κοιλίας. Η διάνοιξη και η σύγκλειση τόσο των κολποκοιλιακών όσο και των αρτηριακών βαλβίδων γίνεται παθητικά, λόγω μεταβολών των πιέσεων των καρδιακών κοιλοτήτων. Η ελάττωση της φυσιολογικής επιφάνειας του στομίου της βαλβίδας, ονομάζεται στένωση και παρεμποδίζει την ροή του αίματος διαμέσου αυτής, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σημαντικής κλίσης (διαφοράς) πίεσης εκατέρωθεν της βαλβίδας. Για παράδειγμα: στένωση της αορτικής βαλβίδας προκαλεί σημαντική κλίση πίεσης μεταξύ της αριστερής κοιλίας και της ανιούσας αορτής, ενώ στένωση της μιτροειδούς βαλβίδας συνοδεύεται από κλίση πίεσης μεταξύ του αριστερού κόλπου και της αριστερής κοιλίας. Αντίθετα, ανεπάρκεια μίας βαλβίδας οδηγεί σε παλινδρόμηση του αίματος διαμέσου αυτής και διάταση του καρδιακού διαμερίσματος που υποδέχεται τον παλινδρομούντα όγκο (της αριστερής κοιλίας σε ανεπάρκεια της αορτικής

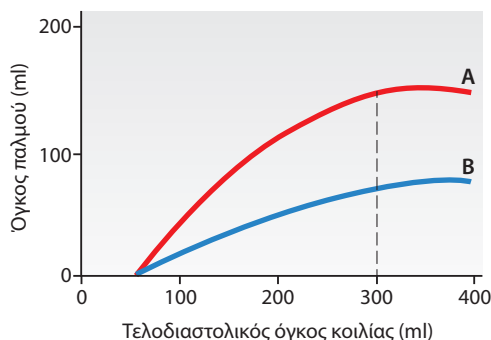
βαλβίδας ή του αριστερού κόλπου σε ανεπάρκεια της μιτροειδούς βαλβίδας).

Για τη διεκπεραίωση του έργου της, η καρδιά χρησιμοποιεί ενέργεια προερχόμενη από τη φωσφορυλίωση της τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP), εισερχόμενη διαδοχικά σε φάσεις συστολής-διαστολής, που σε μοριακό επίπεδο επιτυγχάνονται με τη βράχυνση-επιμήκυνση της ακτίνης και μυοσίνης των μυϊκών ινιδίων. Υπομόρια των τελευταίων αποτελούν η τροπομυοσίνη και η τροπονίνη, ο προσδιορισμός των οποίων γίνεται και διαγνωστικά στην κλινική πράξη, σε περιπτώσεις ύποπτες για μυοκαρδιακή ισχαιμία. Ειδικά η τροπονίνη αποτελεί τον πιο αξιόπιστο βιοχημικό δείκτη μυοκαρδιακής νέκρωσης μετά από οξύ έμφραγμα του μυοκαρδίου.

Ο καρδιακός μεταβολισμός ελαττώνεται με την πτώση της θερμοκρασίας (υποθερμία) και αυξάνεται δυσανάλογα με την αύξηση της διαμέτρου των καρδιακών κοιλοτήτων. Η γνώση αυτή βρίσκει εφαρμογή κατά την καρδιοπληγική παύση της καρδιακής λειτουργίας με την οποία καθίσταται δυνατή η διενέργεια των καρδιοχειρουργικών επεμβάσεων. Τα πλούσια σε κάλιο καρδιοπληγικά διαλύματα που χρησιμοποιούνται για την προσωρινή διακοπή της καρδιακής λειτουργίας κατά τη διάρκεια της επέμβασης, συνδυάζονται, ανάλογα και με το είδος της επέμβασης, με άλλοτε άλλο βαθμού υποθερμία, με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Για τον ίδιο λόγο, τοποθετείται κατά τη διάρκεια των καρδιοχειρουργικών επεμβάσεων και ο καθετήρας αποσυμφόρησης ή αποσυμπίεσης (vent αορτής, αριστερής κοιλίας, πνευμονικής αρτηρίας, δεξιάς άνω πνευμονικής φλέβας), που αποτρέπει την υπερβολική διάταση της καρδιάς και ελαττώνει, συνεπώς, τις μεταβολικές απαιτήσεις.

Το έργο της καρδιάς κατά τη συστολή εξαρτάται από τον όγκο αίματος που έχει συγκεντρωθεί στην αριστερή κοιλία προς εξώθηση και που αντιστοιχεί στο **προφορτίο**,

Εικόνα 2.3. Σχηματική αναπαράσταση του νόμου των Frank-Starling. Σε φυσιολογική καρδιά (A) η αύξηση του τελοδιαστολικού όγκου πλήρωσης της αριστερής κοιλίας (προφορτίο), συνεπάγεται την αύξηση του όγκου παλμού, μέχρι ενός συγκεκριμένου κριτικού ορίου, το οποίο απεικονίζεται με στικτή γραμμή. Στην καρδιακή ανεπάρκεια έχουμε μετατόπιση της καμπύλης προς τα δεξιά και κάτω (B), που σημαίνει ότι αντίστοιχη μεταβολή του προφορτίου δεν οδηγεί σε ανάλογη αύξηση του όγκου παλμού.



και από τις περιφερικές αγγειακές αντιστάσεις που αντιστοιχούν στο **μεταφορτίο**. Εξαρτάται επίσης από τη **διάμετρο της κοιλίας** και με αντίστροφα ανάλογη σχέση από το πάχος του τοιχώματος. Η συστολική τάση (T) που ασκείται στο τοίχωμα της αριστερής κοιλίας υπολογίζεται σύμφωνα με το νόμο του Laplace με τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$T = \frac{P \times R}{2h}$$

όπου P αντιστοιχεί στην πίεση εντός της αριστερής κοιλίας (προφορτίο), R στην ακτίνα της αριστερής κοιλίας και h στο πάχος του τοιχώματος της αριστερής κοιλίας. Διαπι-

στώνεται, επομένως, ότι η λέπτυνση του τοιχώματος της αριστερής κοιλίας, που προκύπτει κατά τη διαδικασία της αναδιαμόρφωσης (remodeling) σε ασθενείς με καρδιακή ανεπάρκεια, καθώς και η διάτασή της, που μπορεί να προκύψει κατά τη διάρκεια της εξωσωματικής κυκλοφορίας, οδηγούν σε αυξημένη τοιχωματική τάση και, συνεπώς, αυξημένες μεταβολικές απαιτήσεις.

Με τον όρο κλάσμα εξώθησης της αριστερής κοιλίας (ejection fraction ή EF) εννοούμε το ποσοστό του προφορτίου της αριστερής κοιλίας που εξωθείται στην περιφέρεια. Υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$EF (\%) = \frac{\text{τελοδιαστολικός όγκος} - \text{τελοσυστολικός όγκος}}{\text{τελοδιαστολικός όγκος}} \times 100\%$$

Σε φυσιολογικές συνθήκες το κλάσμα εξώθησης είναι μεγαλύτερο από 50%, ενώ τιμές κάτω από 30% καταδεικνύουν βαριά συστολική δυσλειτουργία.

Καθοριστική σημασία στην κατανόηση της καρδιακής λειτουργίας αποτελεί ο νόμος των Frank-Starling (Εικόνα 2.3), που δηλώνει ότι, μέχρι ενός ορισμένου κριτικού ορίου, η αύξηση της πλήρωσης της αριστερής κοιλίας (προφορτίου) επιφέρει αύξηση του όγκου παλμού της καρδιάς. Σε επίπεδο μυϊκών ινιδίων, αυτό σημαίνει ότι όσο πιο μεγάλη είναι η διαστολική πλήρωση της αριστερής κοιλίας, τόσο πιο διατεταμένα και απομακρυ-

σμένα μεταξύ τους είναι τα μόρια ακτίνης και μυοσίνης των σαρκομεριδίων και, επομένως, τόσο μεγαλύτερο περιθώριο έχουν για συμπλησίαση και βράχυνσή τους, με αποτέλεσμα την επίτευξη μεγαλύτερης συστολής.

Αιμοδυναμική παρακολούθηση

Η συνεχής αιμοδυναμική παρακολούθηση του καρδιοχειρουργικού ασθενούς είναι κεφαλαιώδους σημασίας, ιδιαίτερα κατά την περίοδο πριν και μετά την εξωσωματική κυκλοφορία. Μεγάλη σημασία για το σκοπό αυτό αποκτά ο καθετήρας Swan-Ganz, ο οποίος

προωθείται μέσω της έσω σφαγίτιδας φλέβας στο δεξιό κόλπο, τη δεξιά κοιλία, την πνευμονική αρτηρία, όπου μπορεί να ενσφηνωθεί σε τμηματικό κλάδο. Οι αιμοδυναμικές μετρήσεις που μπορεί να γίνουν σε κάθε σημείο της διαδρομής αυτής παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την εκτίμηση του προφορτίου, της καρδιακής παροχής, του μεταφορτίου καθώς και του ιστικού μεταβολισμού. Μπορεί να καθοδηγήσει την ορθή λήψη αποφάσεων αναφορικά με τη χορήγηση υγρών καθώς και την τιτλοποίηση των ινοτρόπων και αγγειοδραστικών φαρμάκων. Οι αιμοδυναμικές παράμετροι που εκτιμώνται με τον καθετήρα Swan-Ganz αναφέρονται παρακάτω:

- **Πίεση δεξιού κόλπου:** Φυσιολογικά κυμαίνεται από 3-8 mmHg και αντιστοιχεί στην κεντρική φλεβική πίεση. Αύξησή της συμβαίνει σε δεξιά καρδιακή ανεπάρκεια, σε πνευμονική εμβολή, καρδιακό επιπωματισμό και βαλβιδοπάθειες. Ελάττωσή της δείχνει απώλεια όγκου, όπως μετά από αιμορραγία.
- **Πίεση δεξιάς κοιλίας:** Φυσιολογικά: 5-30 mmHg συστολική πίεση/3-8 mmHg διαστολική πίεση. Αύξηση των τιμών της παρατηρείται σε πνευμονική υπέρταση, ενώ ελάττωση σε απώλεια όγκου.
- **Πίεση πνευμονικής αρτηρίας:** Φυσιολογικά: 15-30 mmHg συστολική πίεση/4-12 mmHg διαστολική (9-15 mmHg μέση πίεση). Η αύξησή της χαρακτηρίζεται ως πνευμονική υπέρταση, η οποία είναι απότοκος αριστερής καρδιακής ανεπάρκειας, ανεπάρκειας μιτροειδούς βαλβίδας, χρόνιας αποφρακτικής πνευμονοπάθειας, πνευμονικής εμβολής καθώς και μεσοκοιλιακής ή μεσοκοιλιακής επικοινωνίας. Ελάττωσή της παρατηρείται σε υποογκαιμία.
- **Πίεση ενσφήνωσης πνευμονικών τριχοειδών:** Η πίεση αυτή, εφόσον η μιτροειδής βαλβίδα λειτουργεί φυσιολογικά,

αντιπροσωπεύει την πίεση πλήρωσης του αριστερού κόλπου, που αντιστοιχεί στο προφορτίο της αριστερής κοιλίας. Η φυσιολογική μέση πίεση κυμαίνεται από 6-12 mmHg. Αύξησή της υποδηλώνει αριστερή καρδιακή ανεπάρκεια. Όταν η πίεση ενσφήνωσης ξεπεράσει τα 35 mmHg, μπορεί να προκληθεί οξύ πνευμονικό οίδημα. Ελάττωση της πίεσης ενσφήνωσης δηλώνει συνηθέστερα υποογκαιμία.

- **Κατά Λεπτόν Όγκος Αίματος (ΚΛΟΑ, Καρδιακή παροχή):** Ο όγκος αίματος που εξωθεί η καρδιά σε κάθε συστολή ονομάζεται όγκος παλμού (ΟΠ) και αντιστοιχεί σε 60-80 ml, ενώ ο όγκος που εξωθείται ανά λεπτό ονομάζεται κατά λεπτόν όγκος αίματος (ΚΛΟΑ) και αντιστοιχεί σε 5 περίπου λίτρα.

Δηλαδή: $ΚΛΟΑ = ΟΠ \times ΚΣ$, όπου ΚΣ είναι η καρδιακή συχνότητα.

Ο ΚΛΟΑ εξαρτάται από τα σωματομετρικά χαρακτηριστικά. Φυσιολογικά κυμαίνεται από 4-6 l/min. Αύξηση παρατηρείται επί πυρετού, σήψης, αναιμίας, ενώ ελάττωση επί υποογκαιμίας ή καρδιογενούς καταπληξίας.

- **Καρδιακός δείκτης:** Προκύπτει από το λόγο ΚΛΟΑ/επιφάνεια σώματος σε m². Φυσιολογικά κυμαίνεται από 2,5-4,2 l/min/m².
- **Κορεσμός σε οξυγόνο μικτού φλεβικού αίματος (SvO₂):** Αποτελεί τον κορεσμό σε οξυγόνο του αίματος που επιστρέφει από την περιφέρεια και περιλαμβάνεται σε κλάδους της πνευμονικής αρτηρίας. Φυσιολογικά κυμαίνεται από 65-75%. Αποτελεί εξαιρετικά χρήσιμο δείκτη καθώς αντανακλά έμμεσα την καρδιακή παροχή. Σε περίπτωση που η καρδιακή παροχή είναι ελαττωμένη, όπως σε χρόνια ή οξεία καρδιακή ανεπάρκεια (καρδιογενής καταπληξία), οι ιστοί απομακρύνουν περισσότερο οξυγόνο από το αίμα και ο κορεσμός του μικτού φλεβικού αίματος ελατ-

τώνεται. Ο SvO_2 ως δείκτης ιστικής οξυγόνωσης έχει χαμηλή ευαισθησία σε καταστάσεις διαταραχών της μικροκυκλοφορίας, όπως για παράδειγμα στη σήψη, όπου παρατηρείται κακή κατανομή της αιμάτωσης, λόγω διάνοιξης αρτηριοφλεβικών αναστομώνσεων και περιοχική ιστική υποξία. Αντίθετα, αυξημένες τιμές μπορεί να παρατηρηθούν σε μεσοκοιλιακή ή μεσοκοιλιακή επικοινωνία, μετά από χο-

ρήγηση ινοτρόπων, σε ασθενείς που υποστηρίζονται με ενδοαρτικό ασκό και σε υπερμεταβολικές καταστάσεις, όπως στην υπερδυναμική φάση του σηπτικού shock ή και στη θυρεοτοξίκωση, εξαιτίας της αδυναμίας χρησιμοποίησης του προσφερόμενου οξυγόνου από τους ιστούς.

- **Συστηματικές αγγειακές αντιστάσεις:** Εκφράζουν το μεταφορτίο. Υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$\frac{\text{μέση αρτηριακή πίεση} - \text{κεντρική φλεβική πίεση}}{\text{ΚΛΟΑ}} \times \text{dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$$

Οι φυσιολογικές τιμές κυμαίνονται από 900-1400 $\text{dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$. Αύξηση των συστηματικών αγγειακών αντιστάσεων παρατηρείται μετά από όλες τις καταστάσεις που προκαλούν αγγειοσύσπαση (υπογκαιμία, χορή-

γηση αγγειοσυσπαστικών ουσιών), ενώ ελάττωσή τους διαπιστώνεται μετά αγγειοδιαστολή.

- **Πνευμονικές Αγγειακές Αντιστάσεις:** Υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$\frac{\text{μέση πνευμονική πίεση} - \text{πίεση ενσφήνωσης}}{\text{ΚΛΟΑ}} \times \text{dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$$

Οι φυσιολογικές τιμές κυμαίνονται από 50-250 $\text{dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-5}$. Αυξημένες πνευμονικές αγγειακές αντιστάσεις παρατηρούνται στην πνευμονική υπέρταση, που μπορεί να είναι απότοκος πνευμονικής εμβολής, βαλβιδοπάθειας, μεσοκοιλιακής ή μεσοκοιλιακής επικοινωνίας.

Ινότροπα / αγγειοδραστικά φάρμακα

Τα κυριότερα ινότροπα/αγγειοδραστικά φάρμακα που χρησιμοποιούνται στην Καρδιοχειρουργική παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.1.

Αδρεναλίνη: αποτελεί τον πιο γνωστό και ευρέως χρησιμοποιούμενο συμπαθητικό αγωνιστή με έντονη θετική ινότροπη δράση και έντονη περιφερική αγγειοσυσπαστική δράση μέσω των α_1 συμπαθητικών υποδοχέων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή διατήρηση της στεφανιαίας

και εγκεφαλικής αιματικής άρδευσης, σε βάρος άλλων τελικών οργάνων που έχουν «μικρότερη» λειτουργική σπουδαιότητα, όπως το δέρμα και οι μύες. Η αύξηση της καρδιακής συχνότητας που προκαλείται αυξάνει σημαντικά τη μυοκαρδιακή κατανάλωση οξυγόνου.

Νοραδρεναλίνη: Δρα κύρια μέσω διέγερσης των α_1 και α_2 συμπαθητικών υποδοχέων, προκαλώντας περιφερική αγγειοσύσπαση. Ως αποτέλεσμα αυξάνει την αρτηριακή πίεση, ιδίως σε σηπτικές καταστάσεις. Παράλληλα, διαθέτει θετική ινότροπη δράση, μέσω διέγερσης των β_1 υποδοχέων, σε μικρότερο, όμως, βαθμό από την αδρεναλίνη.

Ντοπαμίνη: Η δράση της εξαρτάται από τη δοσολογία. Σε μικρές δόσεις (2-3 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$) αυξάνει τη νεφρική αιματική ροή μέσω διέγερσης των ντοπαμινεργικών υποδοχέων. Σε μεγαλύτερες δόσεις (3-15 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$) έχει θετική ινότροπη δράση μέσω διέγερσης των

Πίνακας 2.1. Βασικά χαρακτηριστικά των κυριότερων ινοτρόπων/αγγειοδραστικών φαρμάκων

Φάρμακο	Δράση	Μηχανισμός	Δοσολογία ($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$)
Επινεφρίνη (Αδρεναλίνη)	Θετική ινότροπη Περιφερική αγγειοσύσπαση Περιφερική αγγειοδιαστολή	Διέγερση $\beta 1$ -υποδοχέων Διέγερση $\alpha 1$ -υποδοχέων Διέγερση $\beta 2$ -υποδοχέων	0,01-0,5 0,03-0,5 0,01-0,03
Νορεπινεφρίνη (Νοραδρεναλίνη)	Περιφερική αγγειοσύσπαση Θετική ινότροπη	Διέγερση $\alpha 1$ -υποδοχέων Διέγερση $\beta 1$ -υποδοχέων	0,01-0,5
Ντοπαμίνη	Αγγειοδιαστολή νεφρικών αγγείων Θετική ινότροπη Περιφερική αγγειοσύσπαση	Διέγερση $\beta 2$ -υποδοχέων Διέγερση $\beta 1$ -υποδοχέων Διέγερση $\alpha 1$ -υποδοχέων	2-3 3-15 15-20
Ντομπουταμίνη	Θετική ινότροπη Περιφερική αγγειοδιαστολή	Διέγερση $\beta 1$ -υποδοχέων Διέγερση $\beta 2$ -υποδοχέων	1-20
Λεβοσιμεντάνη	Θετική ινότροπη Περιφερική αγγειοδιαστολή	Ευαισθητοποιητής διαύλων ασβεστίου	0,05-0,2
Μιλρινόνη	Θετική ινότροπη Περιφερική αγγειοδιαστολή	Αναστολέας φωσφοδιεστεράσης	0,3-0,8
Ισοπρεναλίνη	Θετική ινότροπη Περιφερική αγγειοδιαστολή	Διέγερση $\beta 1$ -υποδοχέων Διέγερση $\beta 2$ -υποδοχέων	0,01-0,5
Φανυλεφρίνη	Περιφερική αγγειοσύσπαση	Διέγερση $\alpha 1$ -υποδοχέων	0,1-2

β1-υποδοχέων. Σε ακόμη μεγαλύτερες δόσεις διεγείρει τους α-υποδοχείς και προκαλεί περιφερική αγγειοσυσπασση με αποτέλεσμα ελάττωση της στεφανιαίας και νεφρικής αιματικής ροής.

Ντομπουταμίνη: Διαθέτει θετική ινότροπη δράση, μέσω των β1-υποδοχέων αυξάνοντας τη συσταλτικότητα του μυοκαρδίου. Παράλληλα, δρα αγγειοδιασταλτικά μέσω των α2-υποδοχέων. Με το μηχανισμό αυτό συμβάλλει στην βελτίωση της καρδιακής παροχής. Συνδυάζεται συχνά, όμως, με ταχυκαρδία και πρόκληση αρρυθμιών, που μπορεί να προκαλέσουν αύξηση της μυοκαρδιακής κατανάλωσης οξυγόνου.

Μιλρινόνη: Δρα μέσω αναστολής του ενζύμου φωσφοδιεστεράση. Έχει θετική ινότροπη δράση και παράλληλα προκαλεί περιφερική αγγειοδιαστολή ελαττώνοντας το μεταφορτίο. Χρησιμοποιείται κυρίως στην υποστήριξη ασθενών με δεξιά καρδιακή ανεπάρκεια. Μπορεί να προκαλέσει αρρυθμίες, ιδιαίτερα κολπική μαρμαρυγή.

Λεβοσιμεντάνη: Πρόκειται για μία ουσία με θετική ινότροπη δράση, η οποία προκαλεί ταυτόχρονα περιφερική αγγειοδιαστολή, τόσο στη συστηματική όσο και στην πνευμονική κυκλοφορία. Δρα μέσω της ευαισθητοποίησης των διαύλων ασβεστίου των μυοκαρδιακών κυττάρων. Με το μηχανισμό αυτό αποφεύγεται η αύξηση της μυοκαρδιακής κατανάλωσης οξυγόνου. Έχει μακρά διάρκεια δράσης (περίπου 7 ημέρες). Αποτελεί σύγχρονο φάρμακο εκλογής για την αντιμετώπιση της οξείας απορρύθμισης της συμφορητικής καρδιακής ανεπάρκειας.

Ισοπρεναλίνη: Διαθέτει θετική ινότροπη δράση, η οποία εκδηλώνεται κυρίως με αύξηση της καρδιακής συχνότητας παρά της συσταλτικότητας του μυοκαρδίου. Παράλληλα, προκαλεί περιφερική αγγειοδιαστολή. Καθώς αυξάνει τη μυοκαρδιακή κατανάλωση οξυγόνου, χρησιμοποιείται κύρια για την αντιμετώπιση της μετεγχειρητικής βραδυ-

καρδίας καθώς και της δεξιάς καρδιακής ανεπάρκειας.

Φαινυλεφρίνη: Αποτελεί αποκλειστικό α1-διεγέρτη με συνέπεια την αύξηση των περιφερικών αγγειακών αντιστάσεων. Η αγγειοσυσπαστική της δράση βρίσκει εφαρμογή κατά τη διάρκεια της εξωσωματικής κυκλοφορίας για την αντιμετώπιση της αγγειοδιαστολής και την αύξηση της πίεσης άρδευσης των τελικών οργάνων.

Το ερεθισματογωγό σύστημα της καρδιάς

Η εκκίνηση του καρδιακού ρυθμού πραγματοποιείται υπό φυσιολογικές συνθήκες από τον φλεβόκομβο, που ανατομικά εντοπίζεται στην περιοχή της συμβολής της άνω κοίλης φλέβας με το δεξιό κόλπο. Η φυσιολογική συχνότητα παραγωγής ερεθισμάτων από το φλεβόκομβο είναι 60-100/λεπτό. Η διάδοση αυτού του αρχικού ερεθίσματος από τον φλεβόκομβο στο κολπικό μυοκάρδιο αντιστοιχεί στο έπαρμα P του ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ΗΚΓ). Ακολουθεί η επέκταση της διέγερσης προς τον κολποκοιλιακό κόμβο, πριν αυτή προσεγγίσει το μυοκάρδιο των κοιλιών. Ο κολποκοιλιακός κόμβος βρίσκεται κάτω από το ενδοκάρδιο του δεξιού κόλπου στο κατώτερο τμήμα του μεσοκολπικού διαφράγματος. Ο ρόλος του κολποκοιλιακού κόμβου έγκειται στο να καθυστερήσει τη διάδοση του ερεθίσματος στις κοιλίες, ώστε η συστολή των κόλπων και των κοιλιών να γίνεται διαδοχικά και όχι ταυτόχρονα. Η ενεργοποίηση των κοιλιών γίνεται μέσω του δεματίου του His που ξεκινά από την περιφέρεια του κολποκοιλιακού κόμβου και διακλαδίζεται στο μεσοκοιλιακό διάφραγμα σε δεξιό και αριστερό σκέλος. Οι ίνες των δεματίων και στις δύο κοιλίες μεταπίπτουν στις ίνες του Purkinje που μεταφέρουν το ερέθισμα και στα περιφερικότερα σημεία του μυοκαρδίου των κοιλιών. Η μετάδοση του ερεθίσματος

στο μυοκάρδιο των κοιλιών γίνεται γενικά με κατεύθυνση από το ενδοκάρδιο προς το επικάρδιο και αντιστοιχεί στο έπαρμα QRS του ΗΚΓ. Ακολουθεί η επαναπόλωση των κοιλιών, η οποία αντιστοιχεί στο έπαρμα T του ΗΚΓ (Εικόνα 2.2).

Η νεύρωση της καρδιάς εξυπηρετείται από το αυτόνομο νευρικό σύστημα. Η συμπαθητική νεύρωση της καρδιάς χρησιμοποιεί ως νευροδιαβιβαστή την ουσία νοραδρεναλίνη με κύριους υποδοχείς τους β-αδρενεργικούς υποδοχείς, ενώ η παρασυμπαθητική νεύρωση της καρδιάς εξυπηρετείται από το πνευμονογαστρικό νεύρο με νευροδιαβιβαστή την ακετυλοχολίνη και αντίστοιχους υποδοχείς τους μουσκαρινικούς-χολινεργικούς υποδοχείς. Η δράση του συμπαθητικού νευρικού συστήματος έχει γενικά ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της καρδιακής συχνότητας και την αύξηση της αρτηριακής πίεσης, ενώ η επίδραση του παρασυμπαθητικού ελαττώνει την καρδιακή συχνότητα.

Διαταραχές του καρδιακού ρυθμού

Η εμφάνιση αρρυθμιών αποτελεί μία από τις πιο συχνές επιπλοκές μετά από καρδιοχειρουργική επέμβαση, με συχνότητα που ανέρχεται στο 30-50% του συνόλου των ασθενών. Συνηθέστερα παρατηρούνται υπερκοιλιακές ταχυκαρδίες, με συχνότερη την κοιλιακή μαρμαρυγή, κολποκοιλιακός αποκλεισμός, και διαφόρων ειδών κοιλιακές αρρυθμίες (έκτακτες συστολές, ζεύγη, διδυμίες).

Κολπική μαρμαρυγή

Στην κολπική μαρμαρυγή παράγονται ερεθίσματα σε πολλαπλές έκτοπες εστίες των κόλπων, με αποτέλεσμα να χάνει το κολπικό μυοκάρδιο την ικανότητα για σύσπαση. Παράλληλα, οι κοιλίες συσπώνται ακανόνιστα (πλήρης αρρυθμία) (Εικόνα 2.4), συνήθως με αυξημένη συχνότητα (>100/λεπτό). Η περιγεχειρητικά εμφανιζόμενη κολπική μαρμα-



Εικόνα 2.4. Κολπική μαρμαρυγή με ταχεία κοιλιακή ανταπόκριση 120 σφύξεις/λεπτό. Διαπιστώνεται η «χαοτική» δραστηριότητα του κόλπου με απουσία των επαρμάτων P και με πλήρως άνισα διαστήματα μεταξύ των επαρμάτων QRS (πλήρης αρρυθμία).

ρυγή αντιμετωπίζεται με διόρθωση των ηλεκτρολυτών (καλίου, μαγνησίου), με χορήγηση αντιαρρυθμικών φαρμάκων, όπως η αμιοδαρόνη ή με ηλεκτρική ανάταξη μέσα στο χειρουργείο.

Κολπικός πτερυγισμός

Παρατηρείται αυξημένη κολπική συχνότητα (250-350/λεπτό), ενώ η κοιλιακή συχνότητα ακολουθεί ελαττωμένη καθώς συνυπάρχει κολποκοιλιακός αποκλεισμός 2:1 ή 3:1 (Εικόνα 2.5). Χαρακτηριστική είναι η μορφολογία του ΗΚΓ με τα πριονωτά P. Αντιμετωπίζεται με αντιαρρυθμική αγωγή ή με ηλεκτρική ανάταξη.

Κολποκοιλιακός αποκλεισμός

Οφείλεται σε διαταραχή της αγωγής του ερεθίσματος διαμέσου του κολποκοιλιακού κόμβου και εμφανίζεται συνηθέστερα μετά από επεμβάσεις επί των καρδιακών βαλβίδων



Εικόνα 2.5. Κολπικός πτερυγισμός με κολποκοιλιακό αποκλεισμό 3:1. Χαρακτηριστικά είναι τα πριονωτά επάρματα P. Για κάθε 3 επάρματα P αντιστοιχεί ένα έπαρμα QRS.

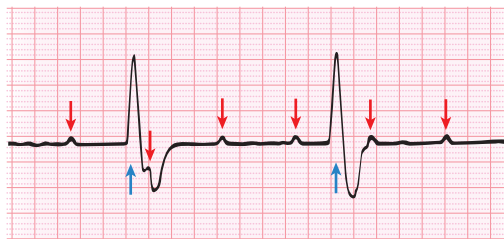


Εικόνα 2.6. 1^{ου} βαθμού κολποκοιλιακός αποκλεισμός. Η διάρκεια του διαστήματος PR υπερβαίνει τα 200 ms (4 μικρά κουτάκια στο χαρτί του ΗΚΓ).

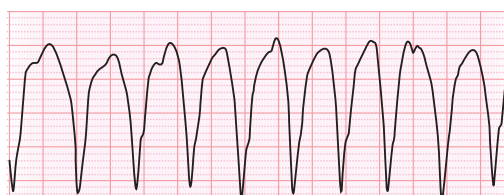


Εικόνα 2.7. 2^{ου} βαθμού κολποκοιλιακός αποκλεισμός. Διαπιστώνεται ότι μετά από 3 φυσιολογικές συστολές, χωρίς επιμήκυνση του διαστήματος PR, ένα έπαρμα P (κόκκινο βέλος) δεν ακολουθείται από QRS.

(αορτική, μιτροειδής ή τριγλώχινα βαλβίδα). Στον πρώτου βαθμού κολποκοιλιακό αποκλεισμό παρατηρείται παράταση του διαστήματος PR πάνω από 200 msec, η οποία, συνήθεστερα, παρέρχεται με την πάροδο του χρόνου (Εικόνα 2.6). Στον δεύτερου βαθμού κολποκοιλιακό αποκλεισμό διαπιστώνεται ότι ορισμένα ερεθίσματα δεν περνούν τον κολποκοιλιακό κόμβο (κολπική/κοιλιακή συχνότητα 2:1, 3:1) (Εικόνα 2.7). Αντιμετωπίζεται αρχικά με προσωρινή βηματοδότηση και στη συνέχεια, εφόσον δεν αποκατασταθεί η κολποκοιλιακή αγωγιμότητα, με μόνιμη βηματοδότηση. Στον τρίτου βαθμού ή πλήρη κολποκοιλιακό αποκλεισμό υπάρχει πλήρης διακοπή της μετάδοσης των ερεθισμάτων διαμέσου του κολποκοιλιακού κόμβου. Οι κόλποι και οι κοιλίες συσπώνται ασυντόνιστα με διαφορετικό ρυθμό (Εικόνα 2.8). Η αρρυθμία αυτή είναι επικίνδυνη για τη ζωή και απαιτεί αρχικά προσωρινή και, εφόσον



Εικόνα 2.8. Πλήρης κολποκοιλιακός αποκλεισμός. Τα κολπικά επάρματα P (κόκκινα βέλη) έχουν διαφορετική συχνότητα και είναι ανεξάρτητα από τα επάρματα QRS (μπλε βέλη).

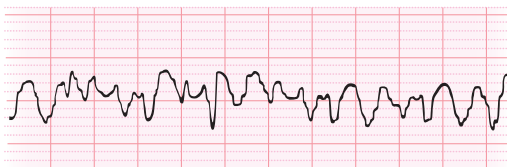


Εικόνα 2.9. Κοιλιακή ταχυκαρδία. Διαπιστώνονται ευρέα επάρματα QRS με συχνότητα 160 σφύξεις/λεπτό.

δεν αρθεί με την πάροδο του χρόνου, μόνιμη βηματοδότηση.

Κοιλιακή ταχυκαρδία

Προέρχεται από ερεθίσματα που παράγονται από έκτοπες εστίες στο μυοκάρδιο των κοιλιών, συνήθως σε περιοχές γύρω από μία ισχαιμική ουλή. Η συχνότητά της είναι >100/λεπτό και χαρακτηρίζεται από ευρέα συμπλέγματα QRS στο ΗΚΓ (Εικόνα 2.9). Αποτελεί επικίνδυνη για τη ζωή αρρυθμία, καθώς συνδυάζεται με ελαττωμένη εξώθηση ή μετάπτωση σε κοιλιακή μαρμαρυγή, εφόσον δεν αναταχθεί άμεσα. Είναι, σε πολλές περιπτώσεις, ενδεικτική ισχαιμίας, η οποία μπορεί να είναι παροδική μετά την αποδέσμευση από την εξωσωματική κυκλοφορία και να οφείλεται σε αερώδη μικροέμβολα. Εάν επιμένει για περισσότερο από μερικά δευτερόλεπτα, αντιμετωπίζεται με ενδοφλέβια χορήγηση λιδοκαΐνης, αμιοδαρόνης ή απαιτεί ηλεκτρική ανάταξη.



Εικόνα 2.10. Κοιλιακή μαρμαρυγή. Οι μυοκαρδιακές ίνες συσπώνονται ασυντόνιστα με αποτέλεσμα την αδυναμία επίτευξης μυοκαρδιακής συστολής και προώθησης του αίματος στην περιφέρεια. Απαιτείται άμεση έναρξη καρδιοπνευμονικής αναζωογόνησης και απινίδωση.

Κοιλιακή μαρμαρυγή

Η κοιλιακή μαρμαρυγή είναι ασύμβατη με τη ζωή, καθώς το μυοκάρδιο των κοιλιών εμφανίζει ασυντόνιστη δραστηριότητα με αδυναμία επαρκούς συστολής και εξώθησης του αίματος στην περιφέρεια (Εικόνα 2.10). Απαιτείται άμεση απινίδωση.

Βηματοδότηση

Η εμφάνιση αρρυθμιών αποτελεί συχνή επιπλοκή κατά τη διάρκεια της εξωσωματικής κυκλοφορίας, ιδιαίτερα κατά τη φάση της άρσης του αποκλεισμού της αορτής και της επανάρδευσης του μυοκαρδίου. Συνηθέστερα παρατηρούνται βραδυκαρδία, διάφοροι τύποι κολποκοιλιακού αποκλεισμού, κοιλιακές αρρυθμίες (έκτακτες συστολές, ζεύγη, διδυμίες), ενώ μπορεί να εμφανιστεί και υπερκοιλιακή ταχυκαρδία με συχνότερη την κολπική μαρμαρυγή. Πριν την αποδέσμευση από την εξωσωματική κυκλοφορία τοποθετούνται επικαρδιακά ηλεκτρόδια συνηθέστερα στο μυοκάρδιο της δεξιάς κοιλίας (κοιλιακή βηματοδότηση), ενώ μπορούν να τοποθετηθούν και στο μυοκάρδιο του δεξιού κόλπου για μονοεστιακή (κολπική) ή κολποκοιλιακή βηματοδότηση, ιδιαίτερα μετά από επεμβάσεις για παθήσεις των καρδιακών βαλβίδων (μιτροειδής, αορτική ή τριγλώχινα βαλβίδα) οι οποίες συνοδεύονται από κίνδυνο εμφάνισης κολποκοιλιακού αποκλεισμού. Τα ηλε-



Εικόνα 2.11. Συσκευή προσωρινής κολποκοιλιακής βηματοδότησης που χρησιμοποιείται σε ασθενείς που υποβάλλονται σε καρδιοχειρουργικές επεμβάσεις.

κτρόδια αυτά εξωτερικεύονται στο δέρμα και συνδέονται με συσκευή προσωρινού βηματοδότη (Εικόνα 2.11).

Όπως τονίστηκε προηγουμένως, η καρδιακή παροχή εξαρτάται άμεσα από την καρδιακή συχνότητα. Η βραδυκαρδία, επομένως, ελαττώνει σημαντικά την καρδιακή παροχή και αυξάνει τη διάταση της αριστερής κοιλίας, με συνέπεια την αύξηση της μυοκαρδιακής κατανάλωσης οξυγόνου. Πριν την αποδέσμευση από την εξωσωματική κυκλοφορία ο καρδιοχειρουργός, σε συνεργασία με τον καρδιοαναθισθιολόγο, εξασφαλίζει τη σωστή αγωγή του ερεθίσματος και βελτιστοποιεί την καρδιακή συχνότητα, εφόσον απαιτείται, μέσω της προσωρινής βηματοδότησης. Η καρδιακή συχνότητα επιλέγεται συνήθως σε 80-86 σφύξεις/λεπτό, προκειμένου να εξασφαλιστεί η βέλτιστη καρδιακή παροχή.