

---

# ΑΣΚΗΣΗ

## 2

---

### Φυσιολογία της καρδιάς και ηλεκτροκαρδιογράφημα

#### 2.1 Εισαγωγή

Στην άσκηση αυτή περιγράφεται η λειτουργία της καρδιάς ως αντλία, το ειδικό σύστημα παραγωγής και αγωγής του ερεθίσματος που ελέγχει τις συστολές της καρδιάς καθώς, η καταγραφή των ηλεκτρικών δυναμικών (ηλεκτροκαρδιογράφημα - ΗΚΓ) που παράγονται από την καρδιά και, τέλος, το σύστημα καταγραφής.

#### 2.2 Η Καρδιά

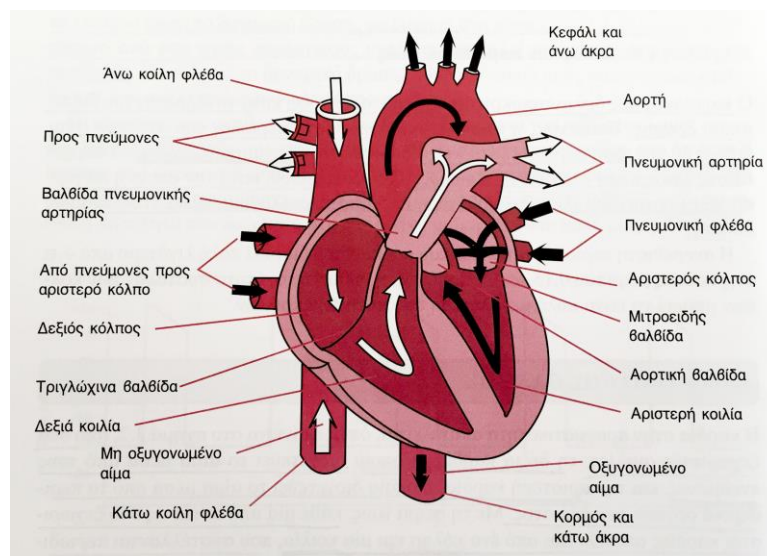
Η καρδιά είναι ένα μυώδες όργανο που συστέλλεται ρυθμικά λειτουργώντας σαν αντλία αίματος με τη βοήθεια του κυκλοφορικού συστήματος.

##### 2.2.1 Ο καρδιακός κύκλος

Η καρδιά στην πραγματικότητα αποτελείται, όπως φαίνεται στο σχήμα 1, από δύο ξεχωριστές αντλίες, τη δεξιά καρδιά, η οποία διοχετεύει το αίμα μέσα από τους πνεύμονες, και την αριστερή καρδιά, η οποία διοχετεύει το αίμα μέσα από τα περιφερικά όργανα του σώματος. Με τη σειρά τους, κάθε μία από αυτές τις δύο ξεχωριστές καρδιές αποτελείται από ένα κόλπο και μια κοιλία, που συστέλλονται περιοδικά. Ο κόλπος

φυσιολογικά λειτουργεί σαν προθάλαμος για την κοιλία, επιτελεί όμως και ελαφρά υποβοηθητική αντλητική λειτουργία, για την προώθηση του αίματος προς την κοιλία. Με τη σειρά της η κοιλία προσφέρει την κύρια δύναμη για την προώθηση του αίματος μέσα από την πνευμονική ή την περιφερική κυκλοφορία.

Η χρονική περίοδος από το τέλος μιας καρδιακής συστολής μέχρι το τέλος της επόμενης συστολής, ονομάζεται καρδιακός παλμός (ή καρδιακός κύκλος). Ο κάθε καρδιακός παλμός αρχίζει με την αυτόματη γένεση ενός δυναμικού δράσης στο φλεβόκομβο, όπως εξηγείται με περισσότερη λεπτομέρεια παρακάτω. Ο φλεβόκομβος εντοπίζεται στο οπίσθιο τμήμα του δεξιού κόλπου, κοντά στην εκβολή της άνω κοίλης φλέβας, το δε δυναμικό δράσης επεκτείνεται με ταχύτητα και στους δυο κόλπους, και από εκεί, μέσα από το κολποκοιλιακό δεμάτιο, προς τις κοιλίες. Όμως, εξαιτίας ειδικής διαρρύθμισης του συστήματος αγωγής από τους κόλπους στις κοιλίες, παρατηρείται καθυστέρηση μεγαλύτερη από 0,1 sec για τη διόδο της διέγερσης από τους κόλπους στις κοιλίες. Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται στους κόλπους η ευκαιρία να συστέλλονται πριν από τις κοιλίες, με αποτέλεσμα την προώθηση του αίματος προς τις κοιλίες πριν από την έντονη κοιλιακή συστολή. Έτσι οι κόλποι λειτουργούν σαν εναυσματικές αντλίες (προαντλίες) για την πλήρωση των κοιλιών, οι οποίες με τη σειρά τους παρέχουν την κύρια πηγή της δύναμης για την προώθηση του αίματος μέσα από το αγγειακό σύστημα.



Σχήμα 1: Ανατομική της καρδιάς και πορεία του αίματος διάμεσου των καρδιακών κοιλοτήτων

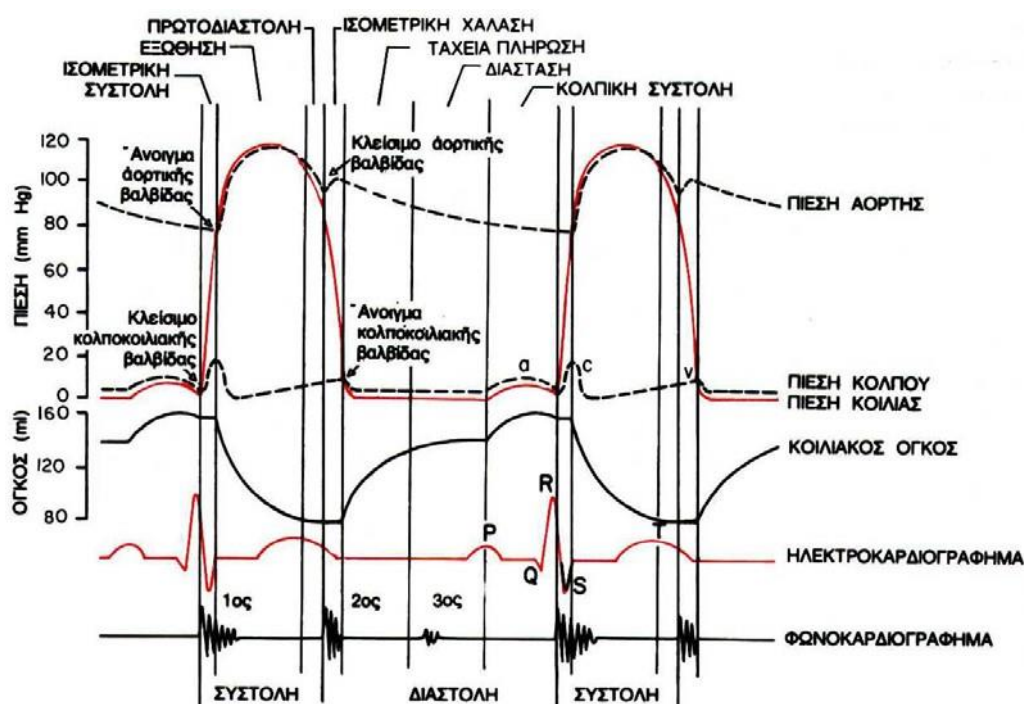
### 2.2.1.1 Η συστολή και η διαστολή

Ο καρδιακός παλμός αποτελείται από μια περίοδο χάλασης που ονομάζεται διαστολή, κατά τη διάρκεια της οποίας η καρδιά γεμίζει με αίμα, η οποία ακολουθείται από περίοδο συστολής, που ονομάζεται συστολή. Στο σχήμα 2 παριστάνονται τα διάφορα γεγονότα τα οποία λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του καρδιακού παλμού. Στις άνω τρεις καμπύλες παριστάνονται οι μεταβολές της πίεσης μέσα στην αορτή, μέσα στην αριστερή κοιλία και μέσα στον αριστερό κόλπο αντίστοιχα. Η τέταρτη καμπύλη παριστάνει τις μεταβολές του όγκου των κοιλιών, η πέμπτη είναι το ηλεκτροκαρδιογράφημα, και η έκτη είναι το καρδιοφωνογράφημα, το οποίο αποτελεί καταγραφή των ήχων που παράγονται από την καρδιά κατά την αντλητική της λειτουργία. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να

μελετήσει κανείς με μεγάλη προσοχή και με λεπτομέρεια αυτό το διάγραμμα, και να κατανοήσει τα αίτια όλων των φαινομένων που καταγράφονται σ' αυτό.

### 2.2.1.2 Η σχέση ηλεκτροκαρδιογραφήματος και καρδιακού κύκλου

Στο ηλεκτροκαρδιογράφημα του σχήματος 2 καταγράφονται τα επάρματα (κύμα) P, QRS και T. Πρόκειται περί ηλεκτρικών δυναμικών, τα οποία παράγονται από την καρδιά και αναγράφονται με τον ηλεκτροκαρδιογράφο, από την επιφάνεια του σώματος. Το έπαρμα P προκαλείται από την επέκταση της εκπόλωσης στο μυοκάρδιο των κόλπων, η οποία ακολουθείται από τη συστολή των κόλπων, με αποτέλεσμα την ελαφρά ανύψωση της καμπύλης της ενδοκοιλιακής πίεσης, αμέσως μετά το έπαρμα P.



Σχήμα 2: Τα φαινόμενα του καρδιακού κύκλου, με τις μεταβολές της πίεσης στον αριστερό κόλπο, την αριστερή κοιλία και την αορτή, τις μεταβολές του όγκου των κοιλιών, το ηλεκτροκαρδιογράφημα και το φωνοκαρδιογράφημα.

Μετά από 0,16 sec περίπου από την έναρξη του επάρματος P, εμφανίζονται τα επάρματα QRS τα οποία οφείλονται στην εκπόλωση των κοιλιών, η οποία προκαλεί την έναρξη της συστολής των κοιλιών και την ανιούσα φορά της ενδοκοιλιακής πίεσης, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2. Κατά συνέπεια, το σύμπλεγμα QRS αρχίζει ελάχιστο χρόνο πριν από τη συστολή των κοιλιών.

Τέλος, παρατηρείται στο ηλεκτροκαρδιογράφημα το κοιλιακό έπαρμα T. Αυτό αντιπροσωπεύει την περίοδο επαναπόλωσης των κοιλιών, κατά τη διάρκεια της οποίας οι μυϊκές ίνες του μυοκαρδίου των κοιλιών αρχίζουν να χαλαρώνουν. Γι' αυτό και το έπαρμα T εμφανίζεται ελάχιστο χρονικό διάστημα πριν από το τέλος της συστολής των κοιλιών.

### 2.2.1.3 Η αντλητική λειτουργία των κόλπων

Το αίμα φυσιολογικά ρέει από τις μεγάλες φλέβες προς τους κόλπους. Από αυτό το αίμα, ποσοστό 75% περίπου διοχετεύεται κατευθείαν μέσα από τους κόλπους προς τις κοιλίες, ακόμα και πριν από τη συστολή τους. Στη συνέχεια, με τη συστολή των κόλπων, προκαλείται συνήθως μια συμπληρωματική πλήρωση των κοιλιών, κατά ποσοστό 25%. Κατά συνέπεια, οι κόλποι απλά λειτουργούν σαν εναυσματικές αντλίες (προαντλίες), οι οποίες αυξάνουν την αποτελεσματικότητα των κοιλιών ως αντλιών, κατά ποσοστό μέχρι και 25%. Παρ' όλα αυτά, η καρδιά μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί απόλυτα ικανοποιητικά, υπό φυσιολογικές συνθήκες ηρεμίας του ατόμου, ακόμα και χωρίς αυτό το επιπρόσθετο 25% της αποτελεσματικότητας, γιατί φυσιολογικά διαθέτει την ικανότητα για άντληση 300 ως 400% περισσότερο αίμα από αυτό που χρειάζεται για το σώμα. Κατά συνέπεια, όταν οι κόλποι δε λειτουργούν, η διαφορά μάλλον δε γίνεται αντιληπτή, εκτός από την περίπτωση της επιτέλεσης μυϊκής εργασίας από το άτομο. Σε μια τέτοια περίπτωση, εμφανίζονται οξεία σημεία καρδιακής ανεπάρκειας, και ιδιαίτερα δυσπνοϊκά φαινόμενα.

### Οι μεταβολές της ενδοκοιλιακής πίεσης - Τα κύματα a, c και v

Στην καμπύλη της ενδοκοιλιακής πίεσης, του σχήματος 2 παρατηρούνται τρία κύρια κύματα, τα οποία υποδηλώνουν αντίστοιχες αυξήσεις της πίεσης, τα κύματα a, c και v της κοιλιακής πίεσης.

Το κύμα a προκαλείται από τη συστολή των κόλπων. Φυσιολογικά, η πίεση στο δεξιό κόλπο αυξάνεται από 4 έως 6 mm Hg κατά τη συστολή των κόλπων, ενώ η πίεση στον αριστερό κόλπο αυξάνεται από 7 έως 8 mm Hg περίπου.

Το κύμα c εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της συστολής των κοιλιών, και προκαλείται, κατά ένα μέρος, από ελαφρά παλινδρόμηση αίματος προς τους κόλπους κατά την έναρξη συστολής των κοιλιών, κατά κύριο όμως λόγο, πιθανώς από την κύρτωση των κολποκοιλιακών βαλβίδων προς τις κοιλότητες των κόλπων, εξαιτίας της αυξανόμενης πίεσης μέσα στις κοιλίες.

Το κύμα v εμφανίζεται προς το τέλος της συστολής των κοιλιών, και οφείλεται στη βραδεία άθροιση αίματος μέσα στους κόλπους κατά το χρονικό διάστημα που οι κολποκοιλιακές βαλβίδες είναι κλειστές, κατά τη διάρκεια της συστολής των κοιλιών. Στη συνέχεια, όταν η συστολή των κοιλιών έχει τελειώσει, οι κολποκοιλιακές βαλβίδες διανοίγονται, και επιτρέπουν την ελεύθερη και ταχεία ροή του αίματος προς τις κοιλίες, με αποτέλεσμα την εξαφάνιση του κύματος v.

### 2.2.1.4 Η αντλητική λειτουργία των κοιλιών

#### Πλήρωση των κοιλιών

Κατά τη διάρκεια της συστολής των κοιλιών μία μεγάλη ποσότητα αίματος αθροίζεται μέσα στους κόλπους εξαιτίας της σύγκλεισης των κολποκοιλιακών βαλβίδων. Γι' αυτό, αμέσως μετά το τέλος της συστολής, και της ελάττωσης των ενδοκοιλιακών πιέσεων και πάλι προς τις χαμηλές διαστολικές τους πιέσεις, οι σχετικά υψηλές πιέσεις μέσα στους κόλπους προκαλούν την άμεση διάνοιξη των κολποκοιλιακών βαλβίδων, οπότε το αίμα ρέει ταχύτατα προς τις κοιλίες, όπως φαίνεται από την αύξηση του όγκου των κοιλιών, στην καμπύλη του όγκου των κοιλιών, στο σχήμα 2. Αυτή η περίοδος ονομάζεται χρόνος ταχείας πλήρωσης των κοιλιών. Οι ενδοκοιλιακές πιέσεις ελαττώνονται μέχρι κλάσματος

μόνο του ενός χιλιοστού υδραργυρικής στήλης πάνω από τις ενδοκοιλιακές πιέσεις, γιατί το άνοιγμα των κολποκοιλιακών βαλβίδων είναι τόσο μεγάλο, ώστε να μην προβάλλουν σχεδόν καμία αντίσταση προς τη ροή του αίματος.

Ο χρόνος ταχείας πλήρωσης καταλαμβάνει περίπου το πρώτο τρίτο της διάρκειας της διαστολής. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου τρίτου, μία μικρή μόνο ποσότητα αίματος ρέει φυσιολογικά προς τις κοιλίες. Πρόκειται για το αίμα που εξακολουθεί να διοχετεύεται από τις φλέβες προς τους κόλπους, το οποίο συνεχίζει την πορεία του προς τις κοιλίες.

Κατά τη διάρκεια του τελευταίου τρίτου της διαστολής, οι κόλποι συστέλλονται και προσδίδουν μια επιπλέον ώθηση στην εισροή αίματος προς τις κοιλίες. Η επιπρόσθετη αυτή ποσότητα αίματος που εισρέει στις κοιλίες με αυτόν τον τρόπο συμβάλλει κατά 25% περίπου στην πλήρωση των κοιλιών σε κάθε καρδιακό παλμό.

### **Εκκένωση των κοιλιών κατά τη διάρκεια της συστολής**

**Χρόνος της ισομετρικής συστολής.** Αμέσως μετά την έναρξη της συστολής των κοιλιών η ενδοκοιλιακή πίεση υφίσταται απότομη άνοδο, όπως παριστάνεται στο σχήμα 2, με αποτέλεσμα το κλείσιμο των κολποκοιλιακών βαλβίδων. Ένας επιπρόσθετος χρόνος 0,02-0,03 sec απαιτείται για την ανάπτυξη από τις κοιλίες επαρκούς πίεσης για τη διάνοιξη των μηννοειδών βαλβίδων (της αορτής και της πνευμονικής αρτηρίας) έναντι των πιέσεων που επικρατούν στην αορτή και στην πνευμονική αρτηρία. Κατά συνέπεια, κατά το χρονικό αυτό διάστημα, επιτελείται συστολή των κοιλιών, χωρίς όμως να προκαλείται εκκένωση των κοιλιών. Η χρονική αυτή περίοδος καλείται χρόνος ισομετρικής συστολής, γιατί κατά τη διάρκεια του αναπτύσσεται τάση από το μυοκάρδιο, χωρίς όμως να προκαλείται βράχυνση των μυϊκών ινών.

**Χρόνος εξώθησης (διοχέτευσης).** Όταν οι πιέσεις μέσα στις κοιλίες αυξηθούν λίγο πιο πάνω από τα 80 mm Hg στην αριστερή και από τα 8 mm Hg στη δεξιά, ανοίγουν τις μηννοειδείς βαλβίδες. Αμέσως αίμα αρχίζει να διοχετεύεται από τις κοιλίες προς τις μεγάλες αρτηρίες. Το 70% περίπου από αυτό το αίμα διοχετεύεται κατά τη διάρκεια του πρώτου τρίτου του χρόνου εξώθησης, το δε υπόλοιπο 30% διοχετεύεται κατά τη διάρκεια των επόμενων δύο τρίτων. Γι' αυτό το λόγο, το πρώτο ένα τρίτο καλείται χρόνος ταχείας εξώθησης και τα υπόλοιπα δυο τρίτα λέγονται χρόνος βραδείας εξώθησης.

**Πρωτοδιαστολική περίοδος.** Κατά το τελευταίο τρίτο της κοιλιακής συστολής το αίμα που ρέει από τις κοιλίες προς τις μεγάλες αρτηρίες είναι λίγο, αν και το κοιλιακό μυοκάρδιο εξακολουθεί να βρίσκεται σε κατάσταση συστολής. Η περίοδος αυτή λέγεται πρωτοδιαστολική. Η αρτηριακή πίεση κατά την περίοδο αυτή ελαττώνεται, γιατί μεγάλες ποσότητες αίματος εισέρχονται από τις αρτηρίες στα περιφερικά αγγεία.

**Χρόνος της ισομετρικής χάλασης.** Στο τέλος της συστολής, η χάλαση των κοιλιών αρχίζει απότομα, με αποτέλεσμα την ταχεία υποχώρηση των ενδοκοιλιακών πιέσεων. Οι αυξημένες πιέσεις μέσα στις διατεταμένες μεγάλες αρτηρίες προκαλούν απότομη παλινδρόμηση αίματος προς τις κοιλίες, γεγονός που προκαλεί το απότομο κλείσιμο των βαλβίδων της αορτής και της πνευμονικής αρτηρίας. Για το επόμενο χρονικό διάστημα των

0,03-0,06 sec η χάλαση του μυοκαρδίου των κοιλιών συνεχίζεται, και οι ενδοκοιλιακές πιέσεις ελαττώνονται με ταχύτατο ρυθμό, προς τα πολύ χαμηλά διαστολικά τους επίπεδα. Αμέσως μετά, ανοίγουν οι κολποκοιλιακές βαλβίδες και αρχίζει ο επόμενος κύκλος της αντλητικής λειτουργίας των κοιλιών.

### **2.2.1.5 Τελοδιαστολικοί και τελοσυστολικοί όγκοι των κοιλιών**

Κατά τη διάρκεια της διαστολής, η πλήρωση των κοιλιών αυξάνει φυσιολογικά τον όγκο της κάθε κοιλίας κατά 110-120 ml. Ο όγκος αυτός είναι γνωστός ως τελοδιαστολικός όγκος. Στη συνέχεια, κατά την εκκένωση των κοιλιών, ο όγκος της κάθε κοιλίας ελαττώνεται κατά 70 ml περίπου. Ο υπόλοιπος όγκος κάθε κοιλίας, που είναι 40-50 ml περίπου, λέγεται τελοσυστολικός όγκος. Το ποσοστό του τελοδιαστολικού όγκου που διοχετεύεται από κάθε κοιλία στη σύστοιχη αρτηρία, λέγεται κλάσμα ή ποσοστό διοχέτευσης και συνήθως είναι 60% περίπου.

Όταν η καρδιά συστέλλεται έντονα, ο τελοσυστολικός όγκος μπορεί να περιοριστεί έως και σε 10 ως 20 ml. Αντίθετα, όταν μεγάλη ποσότητα αίματος ρέει προς τις κοιλίες κατά τη διάρκεια της διαστολής, ο διαστολικός όγκος της κάθε κοιλίας μπορεί να φτάσει στα 150 ως 180 ml σε φυσιολογική καρδιά. Τόσο με την αύξηση του τελοδιαστολικού όγκου, όσο και με τη μείωση του τελοσυστολικού όγκου, ο όγκος παλμού μπορεί, σε μερικές περιπτώσεις, να αυξάνεται ακόμα και πέρα από το διπλάσιο του συνήθους.

### **2.2.1.6 Η λειτουργία των βαλβίδων**

Οι κολποκοιλιακές βαλβίδες (η τριγλώχινα και η μιτροειδής) παρεμποδίζουν την παλινδρόμηση του αίματος από τις κοιλίες προς τους κόλπους κατά τη διάρκεια της συστολής (των κοιλιών), οι δε μηνοειδείς βαλβίδες (η αορτική και η πνευμονική), παρεμποδίζουν την παλινδρόμηση του αίματος από την αορτή και την πνευμονική αρτηρία, προς τις κοιλίες κατά τη διάρκεια της διαστολής. Όλες οι βαλβίδες της καρδιάς κλείνουν και ανοίγουν παθητικά. Δηλαδή, κλείνουν όταν ένα πρανές πίεσης του αίματος ωθεί αίμα προς τα πίσω, και ανοίγουν όταν ένα πρανές πίεσης του αίματος ωθεί αίμα προς τα εμπρός. Για προφανείς ανατομικούς λόγους, για τις λεπτές κολποκοιλιακές βαλβίδες δεν απαιτείται σχεδόν καμία παλινδρόμηση αίματος για να προκληθεί η σύγκλεισή τους, ενώ για τις πολύ βαρύτερες μηνοειδείς βαλβίδες απαιτείται μάλλον ισχυρή ροή παλινδρόμησης για λίγα msec.

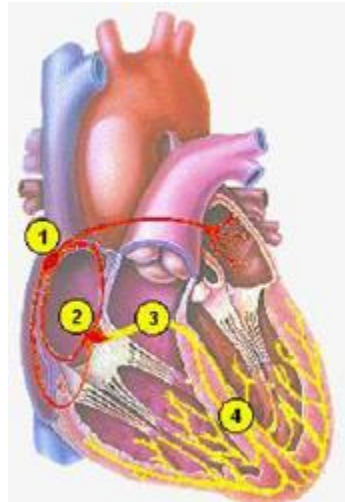
## **2.2.2 Η ρυθμική διέγερση της καρδιάς**

Η καρδιά διαθέτει ένα ιδιαίτερο σύστημα: (1) για την παραγωγή ρυθμικών ώσεων, με τις οποίες προκαλείται η ρυθμική συστολή του μυοκαρδίου, και (2) για την αγωγή αυτών των ώσεων ταχύτατα σε ολόκληρη την καρδιά. Όταν αυτό το σύστημα λειτουργεί κανονικά, οι κόλποι συστέλλονται κατά ένα έκτο, περίπου, δευτερολέπτου, πριν από τη συστολή των κοιλιών, γεγονός που εξασφαλίζει την καλύτερη πλήρωση των κοιλιών πριν από τη διοχέτευση του αίματος μέσα από τους πνεύμονες και το περιφερικό κυκλοφορικό σύστημα. Μια άλλη ιδιαίτερη σημασία αυτού του συστήματος είναι ότι με τη λειτουργία του επιτυγχάνεται η σχεδόν ταυτόχρονη συστολή όλων των τμημάτων του μυοκαρδίου των κοιλιών, γεγονός που ενέχει αποφασιστική σημασία για την αποτελεσματική ανάπτυξη πίεσης μέσα στις κοιλότητες των κοιλιών. Πολλές από τις παθήσεις της

καρδιάς και ειδικά αυτές που χαρακτηρίζονται από καρδιακές αρρυθμίες οφείλονται σε διαταραχές αυτού του ειδικού συστήματος παραγωγής και αγωγής του ερεθίσματος.

### 2.2.2.1 Το ειδικό σύστημα παραγωγής και αγωγής της διέγερσης

Η καρδιά του φυσιολογικού ενήλικου ανθρώπου συστέλλεται ρυθμικά με συχνότητα περίπου 72 παλμών το λεπτό. Στο σχήμα 3 απεικονίζεται το ειδικό σύστημα παραγωγής και αγωγής των διεγέρσεων, από το οποίο ελέγχονται οι συστολές της καρδιάς. Στο σχήμα φαίνονται ο φλεβόκομβος (S-A), μέσα στον οποίο παράγονται τα ρυθμικά, αυτοδιεγερτικά ερεθίσματα, οι διακομβικές οδοί, μέσα από τις οποίες άγεται το ερέθισμα από το φλεβόκομβο προς τον κολποκοιλιακό κόμβο, ο κολποκοιλιακός κόμβος (A-V), όπου το ερέθισμα καθυστερείται, πριν να περάσει προς τις κοιλίες, το κολποκοιλιακό δεμάτιο, το οποίο άγει τη διέγερση από τους κόλπους προς τις κοιλίες, και το αριστερό και το δεξιό σκέλος του δεματίου (ίνες του Purkinje), με τα οποία η διέγερση άγεται προς όλα τα σημεία των κοιλιών.



Σχήμα 3: Ο φλεβόκομβος και το σύστημα Purkinje της καρδιάς.  
Απεικονίζονται: 1) ο φλεβόκομβος, 2) ο κολποκοιλιακός κόμβος, 3) το κολποκοιλιακό δεμάτιο και 4) το αριστερό και δεξί σκέλος του κολποκοιλιακού δεματίου.

### Ο φλεβόκομβος

Ο φλεβόκομβος είναι μια μικρή, επίπεδη, ελλειψοειδής λωρίδα από εξειδικευμένο μυϊκό ιστό, πλάτους 3 mm, μήκους 15 mm και πάχους 1 mm. Εντοπίζεται στο άνω οπίσθιο τμήμα του δεξιού κόλπου, αμέσως μπροστά και έξω από την εκβολή της άνω κοίλης φλέβας. Οι μυϊκές ίνες από τις οποίες αποτελείται έχουν διάμετρο 3-5  $\mu\text{m}$ , ενώ οι μυϊκές ίνες του μυοκαρδίου των κόλπων έχουν διάμετρο 10-15  $\mu\text{m}$ . Εντούτοις, οι ίνες του μυοκαρδίου των κόλπων αποτελούν συνέχεια των ινών του φλεβόκομβου, κατά τέτοιο τρόπο ώστε το οποιοδήποτε δυναμικό δράσης που εμφανίζεται στο φλεβόκομβο να επεκτείνεται αμέσως προς το μυοκάρδιο των κόλπων.

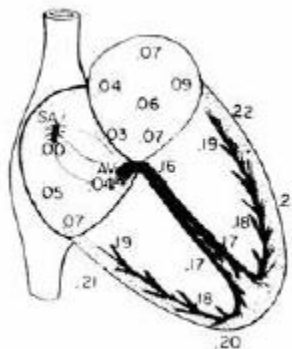
**Αυτόματη ρύθμιση των ινών του φλεβόκομβου.** Οι περισσότερες μυοκαρδιακές ίνες έχουν την ικανότητα της αυτοδιέγερσης, δηλ. μιας διαδικασίας που προκαλεί αυτόματη ρυθμική συστολή. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τις ίνες του ειδικού συστήματος παραγωγής και αγωγής των ερεθισμάτων της καρδιάς. Τη μεγαλύτερη αυτοδιέγερση από όλο το

σύστημα παρουσιάζουν οι φλεβοκομβικές ίνες. Αυτός είναι ο λόγος που ο φλεβόκομβος, ελέγχει, σε φυσιολογικές συνθήκες, όπως αναφέρεται σε επόμενη ενότητα, τη συχνότητα του παλμού ολόκληρης της καρδιάς.

### Περίληψη του μηχανισμού επέκτασης της ηλεκτρικής διέγερσης της καρδιάς

Στο σχήμα 4 απεικονίζεται περιληπτικά η μετάδοση της διέγερσης σε όλα τα σημεία της καρδιάς, στον άνθρωπο. Οι αριθμοί στο σχήμα αντιπροσωπεύουν τον παρεμβαλλόμενο χρόνο, σε εκατοστά δευτερολέπτου, από την έναρξη της διέγερσης στο φλεβόκομβο, και της εμφάνισής της στο συγκεκριμένο σημείο. Σημειώνεται ότι η διέγερση επεκτείνεται με μέτρια ταχύτητα μέσα από τους κόλπους, καθυστερείται όμως περισσότερο από 0,1 sec στην περιοχή του κολποκοιλιακού κόμβου (κολποκοιλιακή καθυστέρηση) πριν να εμφανιστεί στο κολποκοιλιακό δεμάτιο. Όταν πια εισέλθει στο δεμάτιο, επεκτείνεται ταχύτατα μέσα από τις ίνες Purkinje, σε ολόκληρη την επιφάνεια του ενδοκαρδίου των κοιλιών. Στη συνέχεια η διέγερση επεκτείνεται βραδέως μέσα στο μυοκάρδιο και φτάνει μέχρι την επικαρδιακή επιφάνεια της καρδιάς.

Είναι πολύ σημαντικό να κατανοήσει κανείς με λεπτομέρεια την πορεία της διέγερσης μέσα στην καρδιά, καθώς και τους χρόνους εμφάνισής της στα διάφορα σημεία της καρδιάς, γιατί η ποσοτική γνώση αυτής της διεργασίας είναι απαραίτητη για την κατανόηση της ηλεκτροκαρδιογραφίας, η οποία αναλύεται στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 4: Μετάδοση της διέγερσης μέσα στην καρδιά, με το χρόνο εμφάνισης της διέγερσης (σε εκατοστά του δευτερολέπτου) σε διάφορα σημεία της

#### 2.2.2.2 Η ρύθμιση της διέγερσης και της αγωγής στην καρδιά

##### Ο φλεβόκομβος ως φυσικός βηματοδότης της καρδιάς

Για τη γένεση και την αγωγή της διέγερσης μέσα από την καρδιά, δηλώθηκε ότι η διέγερση φυσιολογικά προέρχεται από τον φλεβόκομβο. Εντούτοις, υπό παθολογικές συνθήκες, αυτό δεν συμβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις, γιατί τα άλλα τμήματα της καρδιάς είναι δυνατόν να εμφανίζουν ρυθμική συστολή, όπως ακριβώς και οι μυϊκές ίνες του φλεβόκομβου. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τις ίνες του κολποκοιλιακού κόμβου και τις ίνες Purkinje.

Έτσι, εγείρεται το ερώτημα: γιατί η ρυθμικότητα της καρδιάς ελέγχεται μάλλον από τον φλεβόκομβο παρά από τον κολποκοιλιακό κόμβο ή τις ίνες Purkinje; Η απάντηση είναι απλά ότι ο ενδογενής ρυθμός του φλεβόκομβου είναι σημαντικά υψηλότερος, τόσο από εκείνον των ινών του κολποκοιλιακού κόμβου, όσο και από εκείνον των ινών Purkinje. Κάθε φορά που διεγείρεται ο φλεβόκομβος, η διέγερση άγεται τόσο στις ίνες του κολποκοιλιακού κόμβου, όσο και στις ίνες Purkinje, με αποτέλεσμα την εκπόλωση



της διεγέρσιμης μεμβράνης τους. Στη συνέχεια αυτές οι ίνες, όπως και οι ίνες του φλεβόκομβου, αναλαμβάνουν από το δυναμικό ενέργειας και υφίστανται υπερπόλωση. Οι ίνες όμως του φλεβόκομβου αποβάλλουν αυτήν την υπερπόλωση με πολύ ταχύτερο ρυθμό από τις άλλες δυο κατηγορίες ινών, και εκπέμπουν μια καινούρια διέγερση πριν οι άλλες ίνες προφτάσουν να φτάσουν σε κατάσταση για αυτοδιέγερση. Η καινούρια διέγερση προκαλεί και πάλι εκπόλωση, τόσο των ινών του κολποκοιλιακού κόμβου, όσο και των ινών Purkinje. Η διεργασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς, με τον φλεβόκομβο να προκαλεί πάντοτε τη διέγερση των δυνητικά διεγέρσιμων αυτών ινών, πριν να είναι δυνατή η αυτοδιέγερσή τους.

Με αυτόν τον τρόπο, ο φλεβόκομβος ελέγχει την καρδιακή λειτουργία, όσον αφορά τη συχνότητα, γιατί η συχνότητα της ρυθμικής του διέγερσης είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα αυτοδιέγερσης οποιουδήποτε άλλου τμήματος της καρδιάς. Γι' αυτόν το λόγο, ο φλεβόκομβος αποτελεί το φυσιολογικό βηματοδότη της καρδιάς.

**Παθολογικοί βηματοδότες - Ο ετερότοπος βηματοδότης.** Σε μερικές περιπτώσεις, κάποιο άλλο σημείο της καρδιάς αναπτύσσει συχνότητα ρυθμικής διέγερσης, η οποία είναι υψηλότερη από εκείνη του φλεβόκομβου. Για παράδειγμα, αυτό συμβαίνει συχνά στον κολποκοιλιακό κόμβο ή στις ίνες Purkinje. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, ο βηματοδότης της καρδιάς μετακινείται από το φλεβόκομβο προς τον κολποκοιλιακό κόμβο, ή τις διεγέρσιμες ίνες Purkinje. Υπό σπάνιες συνθήκες, ένα σημείο στο μυοκάρδιο των κόλπων ή των κοιλιών, αναπτύσσει υπέρμετρη διεγερσιμότητα, και καθίσταται βηματοδότης της καρδιάς.

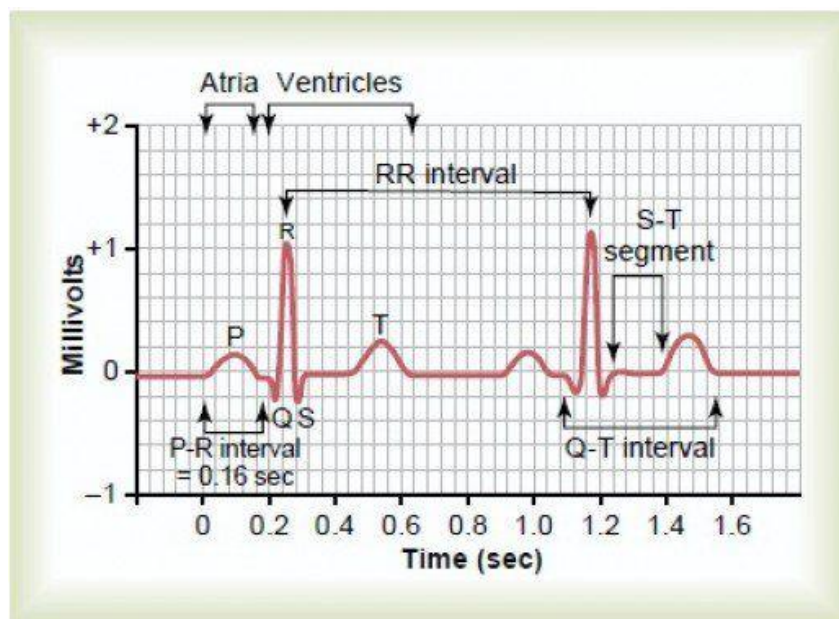
Ο βηματοδότης που εντοπίζεται σε οποιοδήποτε άλλο σημείο της καρδιάς εκτός από το φλεβόκομβο, ονομάζεται ετερότοπος βηματοδότης. Είναι φανερό ότι ο ετερότοπος βηματοδότης προκαλεί ανωμαλίες όσον αφορά την αλληλουχία της συστολής των διαφόρων τμημάτων της καρδιάς.

Ένα άλλο αίτιο που προκαλεί μετακίνηση του βηματοδότη, είναι ο αποκλεισμός της αγωγής της διέγερσης από το φλεβόκομβο προς τα άλλα σημεία της καρδιάς. Ο αποκλεισμός αυτός συχνότερα παρατηρείται στον κολποκοιλιακό κόμβο ή στο κολποκοιλιακό δεμάτιο, κατά την πορεία του προς τις κοιλίες. Κατά τον κολποκοιλιακό αποκλεισμό, οι κόλποι εξακολουθούν να συστέλλονται με τον φυσιολογικό ρυθμό του φλεβόκομβου, ενώ παράλληλα αναλαμβάνει λειτουργία ένας καινούριος βηματοδότης, μέσα στο σύστημα Purkinje των κοιλιών, ο οποίος προκαλεί τη συστολή του μυοκαρδίου των κοιλιών με καινούρια συχνότητα, γύρω στις 15 με 40 φορές το λεπτό. Εντούτοις, το σύστημα των ινών Purkinje, μετά από αιφνίδιο αποκλεισμό, δεν αναλαμβάνει αμέσως τη ρυθμική λειτουργία, παρά μετά πάροδο 5-30 sec. Σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα οι κοιλίες δεν αντλούν αίμα, το δε άτομο λιποθυμάει μετά τα 4-5 δευτερόλεπτα, εξαιτίας της αναστολής της αιμάτωσης του εγκεφάλου. Η κατάσταση αυτή λέγεται σύνδρομο των Stokes-Adams. Εάν αυτή η περίοδος είναι μεγαλύτερη, είναι δυνατόν να οδηγήσει και σε θάνατο.

### **Ο ρόλος του συστήματος Purkinje για τη σύγχρονη συστολή του μυοκαρδίου των κοιλιών**

Από την προηγούμενη περιγραφή του συστήματος Purkinje είναι φανερό ότι η διέγερση φτάνει, σε όλα τα σημεία των κοιλιών με ελάχιστη μόνο διαφορά χρόνου, και διεγείρει την πρώτη ίνα του μυοκαρδίου των κοιλιών 0,06 sec μόνο πριν από τη διέγερση

της τελευταίας ίνας αυτού του μυοκαρδίου. Είναι φανερό ότι, με την ταχεία αυτή επέκταση της διέγερσης σε ολόκληρη τη μάζα αυτού του μυοκαρδίου, προκαλείται η συστολή όλων των τμημάτων του μυοκαρδίου και των δυο κοιλιών σχεδόν συγχρόνως. Για την αποτελεσματική άντληση του αίματος από τις κοιλότητες των δυο κοιλιών, αυτός ο τύπος της σύγχρονης συστολής είναι απαραίτητος. Εάν η διέγερση επεκτεινόταν στα διάφορα τμήματα του μυοκαρδίου με βραδύτητα, τότε ένα μεγάλο τμήμα του μυοκαρδίου των κοιλιών θα συστέλλόταν πριν από το υπόλοιπο, οπότε το ολικό αντλητικό αποτέλεσμα θα ήταν πολύ μικρότερο. Πράγματι, σε ορισμένες μορφές καρδιακής ανεπάρκειας παρατηρείται μια τέτοια βραδεία επέκταση της διέγερσης, με αποτέλεσμα την ελάττωση της αντλητικής απόδοσης των κοιλιών μέχρι 20 ως 30%.



Σχήμα 5: Το φυσιολογικό ηλεκτροκαρδιογράφημα

## 2.3 Το Ηλεκτροκαρδιογράφημα

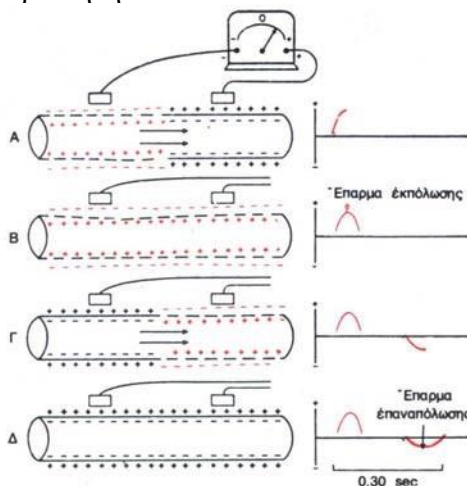
Κατά την επέκταση του επάρματος της διέγερσης στα διάφορα τμήματα της καρδιάς, ηλεκτρικά ρεύματα διατρέχουν τους ιστούς γύρω από την καρδιά, ένα μικρό δε μέρος από αυτά φτάνει μέχρι την επιφάνεια του σώματος. Εάν τοποθετηθούν ηλεκτρόδια πάνω στο δέρμα από τη μια και την άλλη πλευρά της καρδιάς, καθίσταται δυνατή η καταγραφή των ηλεκτρικών δυναμικών που παράγονται από αυτήν. Η καμπύλη που λαμβάνεται με αυτόν τον τρόπο ονομάζεται ηλεκτροκαρδιογράφημα. Φυσιολογικό ηλεκτροκαρδιογράφημα, που αφορά δύο διαδοχικούς καρδιακούς παλμούς, απεικονίζεται στο σχήμα 5.

Το ΗΚΓ, επομένως, αντανακλά τα ηλεκτρικά γεγονότα τα οποία σχετίζονται με την καρδιακή διέγερση και παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον ανατομικό προσανατολισμό της καρδιάς, τα σχετικά μεγέθη των καρδιακών κοιλοτήτων, την καρδιακή συχνότητα, το ρυθμό, την παραγωγή και την αγωγή της διέγερσης, και τις διαταραχές στα παραπάνω γεγονότα, ανεξάρτητα από το αν οφείλονται σε ανατομικές, μηχανικές, μεταβολικές ή κυκλοφορικές ατέλειες. Επίσης, αλλαγές στις ηλεκτρολυτικές συγκεντρώσεις και η επίδραση ορισμένων φαρμακευτικών ουσιών μπορούν να ανιχνευθούν με τη βοήθεια του ΗΚΓ. Το ΗΚΓ, όμως, δεν παρέχει άμεσες πληροφορίες σχετικά με τη συστολή και την

αντλητική ικανότητα της καρδιάς. Αυτές οι ιδιότητες μπορούν να κριθούν με βάση την πίεση του αίματος, την καρδιακή παροχή (cardiac output), τους καρδιακούς ήχους κ.α.

### 2.3.1 Χαρακτηριστικά του φυσιολογικού ηλεκτροκαρδιογραφήματος

Το φυσιολογικό ηλεκτροκαρδιογράφημα (σχήμα 5) αποτελείται από ένα έπαρμα (κύμα) P, ένα «σύμπλεγμα QRS» και ένα έπαρμα T. Το σύμπλεγμα QRS συνήθως αποτελείται από τρία διαφορετικά επάρματα, το έπαρμα Q, το έπαρμα R και το έπαρμα S. Το έπαρμα P προκαλείται από ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία παράγονται κατά την εκπόλωση των κόλπων πριν από τη συστολή τους, ενώ το σύμπλεγμα QRS προκαλείται από ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία παράγονται κατά την εκπόλωση των κοιλιών πριν από τη συστολή τους, δηλαδή, κατά την επέκταση της εκπόλωσης στο μυοκάρδιο των κοιλιών. Κατά συνέπεια, τόσο το έπαρμα P, όσο και τα επάρματα που αποτελούν το σύμπλεγμα QRS, είναι επάρματα εκπόλωσης. Το έπαρμα T προκαλείται από ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία παράγονται κατά την ανάνηψη των κοιλιών από την κατάσταση της εκπόλωσης. Η διεργασία αυτή επιτελείται στο μυοκάρδιο των κοιλιών 0,25 ως 0,35 sec μετά την εκπόλωση, αυτό δε το έπαρμα χαρακτηρίζεται ως έπαρμα επαναπόλωσης. Δηλαδή, το ηλεκτροκαρδιογράφημα αποτελείται τόσο από επάρματα εκπόλωσης, όσο και από επάρματα επαναπόλωσης. Επειδή η διάκριση μεταξύ των κυμάτων εκπόλωσης και επαναπόλωσης θεωρείται πολύ σημαντική στην ηλεκτροκαρδιογραφία, η περαιτέρω διευκρίνιση εδώ κρίνεται απαραίτητη.



Σχήμα 6: Καταγραφή του επάρματος εκπόλωσης και του επάρματος επαναπόλωσης από μια μυϊκή ίνα μυοκαρδίου

#### Επάρματα εκπόλωσης και επάρματα επαναπόλωσης

Στο σχήμα 6 απεικονίζεται μια μυϊκή ίνα σε τέσσερα διαφορετικά στάδια εκπόλωσης και επαναπόλωσης. Κατά τη διεργασία της «εκπόλωσης» το φυσιολογικό αρνητικό δυναμικό στο εσωτερικό της ίνας παύει να υπάρχει, το δε δυναμικό της μεμβράνης στην πραγματικότητα αντιστρέφεται, δηλαδή γίνεται ελαφρά θετικό στο εσωτερικό της ίνας, και αρνητικό στην εξωτερική της επιφάνεια

Στο σχήμα 6-A, η διεργασία της εκπόλωσης, που απεικονίζεται με τα θετικά φορτία στο εσωτερικό και τα αρνητικά φορτία στην εξωτερική επιφάνεια, επεκτείνεται από τα αριστερά στα δεξιά, το δε πρώτο μισό τμήμα της ίνας έχει ήδη υποστεί εκπόλωση, ενώ

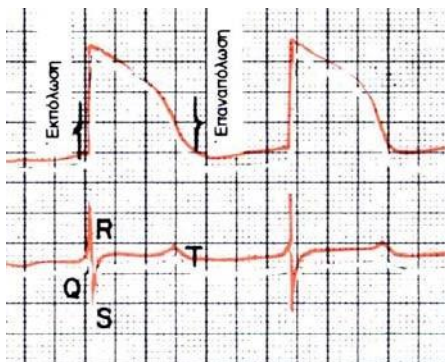
το υπόλοιπο μισό διατηρεί ακόμη την πόλωσή του. Κατά συνέπεια, το αριστερό ηλεκτρόδιο πάνω στην ίνα βρίσκεται σε περιοχή αρνητικότητας όταν έρχεται σε επαφή με το εξωτερικό της ίνας, ενώ το δεξιό ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε περιοχή θετικότητας. Αυτό καταγράφεται ως θετική απόκλιση. Στο δεξιό άκρο του σχήματος απεικονίζεται η καμπύλη του δυναμικού, όπως καταγράφεται από όργανο με μεγάλη ταχύτητα καταγραφής, όπως είναι σε αυτό το συγκεκριμένο στάδιο εκπόλωσης. Σημειώνεται ότι όταν η εκπόλωση φτάσει στο μέσο της ίνας, το καταγραφόμενο δυναμικό βρίσκεται στη μέγιστη θετική του τιμή.

Στο σχήμα 6-B η εκπόλωση έχει επεκταθεί σε ολόκληρη τη μυϊκή ίνα, η δε καμπύλη προς τα δεξιά έχει επανέλθει στη μηδενική βασική γραμμή, επειδή και τα δυο ηλεκτρόδια βρίσκονται τώρα σε περιοχές ίσης αρνητικότητας μεταξύ τους. Το συμπληρωμένο αυτό έπαρμα είναι έπαρμα εκπόλωσης, γιατί προκαλείται από την επέκταση της διέγερσης σε ολόκληρο το μήκος της μυϊκής ίνας.

Στο σχήμα 6-Γ απεικονίζεται η διεργασία επαναπόλωσης της μυϊκής ίνας, η οποία έχει ήδη προχωρήσει ως το μέσο της ίνας, από αριστερά προς τα δεξιά. Στο σημείο αυτό, το αριστερό ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε επαφή με περιοχή θετικότητας, ενώ το δεξιό ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε περιοχή αρνητικότητας. Η πολικότητα των δυο ηλεκτροδίων είναι ακριβώς η αντίθετη από εκείνη του σχήματος 6-A. Γι' αυτό και η καμπύλη του δυναμικού, όπως απεικονίζεται στα δεξιά, γίνεται αρνητική.

Τελικά στο σχήμα 6-Δ, η μυϊκή ίνα έχει πλήρως επαναπολωθεί, και τα δυο ηλεκτρόδια βρίσκονται σε επαφή με περιοχές θετικότητας, με αποτέλεσμα να μην υφίσταται πια διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Έτσι, στην καμπύλη προς τα δεξιά του σχήματος, το δυναμικό επανέρχεται και πάλι σε μηδενικό επίπεδο. Το συμπληρωμένο αυτό αρνητικό έπαρμα χαρακτηρίζεται ως έπαρμα επαναπόλωσης, επειδή προκαλείται από την επέκταση της διεργασίας επαναπόλωσης πάνω στη μυϊκή ίνα.

**Η σχέση του μονοφασικού δυναμικού ενέργειας του μυοκαρδίου προς τα έπαρματα QRS και T.** Το μονοφασικό δυναμικό ενέργειας του μυοκαρδίου των κοιλιών διαρκεί φυσιολογικά από 0.25 ως 0.35 sec. Στο άνω μέρος του σχήματος 7 απεικονίζεται μονοφασικό δυναμικό ενέργειας, το οποίο έχει καταγραφεί με μικροηλεκτρόδιο που έχει εισαχθεί μέσα σε μυϊκή ίνα του μυοκαρδίου των κοιλιών. Η σχεδόν κάθετη προς τα άνω γραμμή του δυναμικού ενέργειας προκαλείται από την εκπόλωση, η δε επάνοδος του δυναμικού στη βασική γραμμή προκαλείται από την επαναπόλωση.



Σχήμα 7: Επάνω: δυναμικό ενέργειας κοιλιακής μυοκαρδιακής ίνας κατά τη διάρκεια φυσιολογικής καρδιακής λειτουργίας. Η εκπόλωση είναι γρήγορη, ενώ η επαναπόλωση είναι αργή κατά τη φάση του επιπέδου (plateau) της καμπύλης αλλά πολύ γρήγορη προς το τέλος του. Κάτω: ΗΚΓ που πάρθηκε ταυτόχρονα.

Σημειώνεται ότι στο κάτω μέρος του σχήματος υπάρχει σύγχρονη καταγραφή ηλεκτροκαρδιογραφήματος από την ίδια κοιλία, στο οποίο φαίνεται ότι το σύμπλεγμα QRS εμφανίζεται στην αρχή του μονοφασικού δυναμικού ενέργειας, το δε έπαρμα T προς το τέλος του. Σημειώνεται ιδιαίτερα το γεγονός, ότι στο ηλεκτροκαρδιογράφημα δεν αναγράφεται καθόλου δυναμικό όταν το μυοκάρδιο των κοιλιών διατηρεί πλήρως την πόλωσή του, είτε όταν βρίσκεται σε πλήρη εκπόλωση. Μόνο όταν το μυοκάρδιο είναι κατά ένα μέρος μόνο σε κατάσταση πόλωσης και κατά το άλλο μέρος σε κατάσταση εκπόλωσης, παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος από ένα μέρος των κοιλιών σε άλλο, και κατά συνέπεια παρατηρείται και ροή του στην επιφάνεια του σώματος, οπότε και προκαλείται η γένεση των κυμάτων του ηλεκτροκαρδιογραφήματος.

### **Η συσχέτιση της συστολής των κόλπων και κοιλιών προς τα έπαρματα του ηλεκτροκαρδιογραφήματος**

Πριν να είναι δυνατή η συστολή του μυός, είναι απαραίτητη η επέκταση της εκπόλωσης στο μυοκάρδιο, για την έναρξη των χημικών διεργασιών της συστολής. Το έπαρμα P προκαλείται από την επέκταση της εκπόλωσης στους κόλπους, τα δε έπαρματα QRS από την επέκταση της εκπόλωσης στις κοιλίες. Κατά συνέπεια, το έπαρμα P εμφανίζεται αμέσως πριν από την έναρξη της συστολής των κόλπων, ενώ το σύμπλεγμα QRS αμέσως πριν από την έναρξη της συστολής των κοιλιών. Οι κοιλίες παραμένουν σε κατάσταση συστολής για μερικά χιλιοστά του sec μετά την επαναπόλωση, δηλαδή μετά το τέλος του επάρματος T.

Το έπαρμα επαναπόλωσης των κοιλιών, στο φυσιολογικό ηλεκτροκαρδιογράφημα, είναι το έπαρμα T. Φυσιολογικά, ορισμένες μυϊκές ίνες του μυοκαρδίου των κοιλιών αρχίζουν να επαναπολούνται 0,2 sec περίπου μετά την έναρξη του επάρματος εκπόλωσης, πολλές όμως άλλες ίνες αρχίζουν να επαναπολούνται βραδύτερα, μέχρι και 0,35 sec. Έτσι, η διεργασία της επαναπόλωσης επεκτείνεται μέσα σε σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, περίπου 0,15 sec. Κατά συνέπεια, το έπαρμα T στο φυσιολογικό ηλεκτροκαρδιογράφημα συχνά είναι παρατεταμένο, η ηλεκτρική του όμως τάση είναι σημαντικά μικρότερη από την τάση του συμπλέγματος QRS, αυτό δε μερικώς οφείλεται στη μεγάλη του διάρκεια.

Οι κόλποι επαναπολούνται περίπου 0,15 ως 0,20 sec μετά το έπαρμα εκπόλωσης. Ο χρόνος όμως αυτός συμπίπτει με την εμφάνιση του συμπλέγματος QRS στο ηλεκτροκαρδιογράφημα. Κατά συνέπεια, το έπαρμα επαναπόλωσης των κόλπων, γνωστό ως T των κόλπων, συνήθως επικαλύπτεται από το πολύ μεγαλύτερο σύμπλεγμα QRS. Γι' αυτό το λόγο, σπάνια μόνο είναι δυνατόν να παρατηρηθεί κολπικό έπαρμα T στο ηλεκτροκαρδιογράφημα.

### **Η βαθμονόμηση του ΗΚΓ ως προς την ηλεκτρική τάση και το χρόνο**

Όλα τα ηλεκτροκαρδιογραφήματα λαμβάνονται με τις κατάλληλες γραμμώσεις βαθμονόμησης στο χαρτί. Οι γραμμώσεις αυτές είτε είναι τυπωμένες στο χαρτί από πριν, όπως συμβαίνει στην περίπτωση που η καμπύλη αναγράφεται με γραφίδα, είτε αναγράφονται στο χαρτί κατά τη διάρκεια του ηλεκτροκαρδιογραφήματος, όπως όταν η αναγραφή γίνεται με τη χρήση ηλεκτροκαρδιογράφου φωτογραφικού τύπου.

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5, οι οριζόντιες γραμμές βαθμονόμησης είναι χαραγμένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε 10 μικρές υποδιαιρέσεις, προς τα πάνω ή προς τα κάτω, στο σύνηθες ΗΚΓ, να αντιστοιχούν σε 1 mV θετική απόκλιση προς τα πάνω και αρνητική απόκλιση προς τα κάτω.

Οι κάθετες γραμμές στο ΗΚΓ αποτελούν γραμμές βαθμονόμησης χρόνου. Κάθε 2,5 cm, σε οριζόντια κατεύθυνση, αντιστοιχούν σε χρόνο 1 sec, αυτή δε η απόσταση συνήθως υποδιαιρείται σε πέντε ίσα μέρη, με παχύτερες κάθετες γραμμές. Τα διαστήματα μεταξύ αυτών των γραμμών αντιστοιχούν σε χρόνο 0,2 sec. Με τη σειρά τους, τα μικρά αυτά διαστήματα χωρίζονται, με λεπτότερες κάθετες γραμμές, σε πέντε μικρότερα διαστήματα των 0,04 sec.

**Οι φυσιολογικές ηλεκτρικές τάσεις στο ηλεκτροκαρδιογράφημα.** Η ηλεκτρική τάση των κυμάτων στο φυσιολογικό ηλεκτροκαρδιογράφημα εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στην επιφάνεια του σώματος. Όταν το ένα ηλεκτρόδιο τοποθετείται αμέσως πάνω από την καρδιά, και το δεύτερο ηλεκτρόδιο τοποθετείται σε κάποιο άλλο σημείο του σώματος, η ηλεκτρική τάση του συμπλέγματος QRS μπορεί να φτάνει τα 3 ή 4 mV. Αλλά ακόμη και αυτή η τάση είναι πολύ μικρή, σε σύγκριση με το μονοφασικό δυναμικό ενέργειας των 110 mV, όπως καταγράφεται, με άμεσο τρόπο, από την κυτταρική μεμβράνη μυϊκής ίνας του μυοκαρδίου. Όταν το ηλεκτροκαρδιογράφημα καταγράφεται με ηλεκτρόδια τοποθετημένα στα δυο άνω άκρα, είτε σε ένα άνω και σε ένα κάτω άκρο, η ηλεκτρική τάση του συμπλέγματος QRS είναι συνήθως 1 mV από την κορυφή του επάρματος R μέχρι το κάτω μέρος του επάρματος S. Εξάλλου η ηλεκτρική τάση του επάρματος P είναι 0,1 ως 0,3 mV και του επάρματος T από 0,2 ως 0,3 mV.

**Το διάστημα P-Q ή P-R.** Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ του επάρματος P και της αρχής του συμπλέγματος QRS είναι ο χρόνος που παρέρχεται από την έναρξη της συστολής των κόλπων, μέχρι την έναρξη της συστολής των κοιλιών. Το χρονικό αυτό διάστημα ονομάζεται διάστημα P-Q. Το φυσιολογικό διάστημα P-Q είναι περίπου 0,16 sec. Αυτό το διάστημα σε μερικές περιπτώσεις ονομάζεται διάστημα P-R γιατί το Q συχνά απουσιάζει.

**Το διάστημα Q-T.** Η συστολή των κοιλιών πρακτικά διαρκεί από την αρχή του επάρματος Q μέχρι το τέλος του επάρματος T. Το χρονικό αυτό διάστημα ονομάζεται διάστημα Q-T και η φυσιολογική του διάρκεια είναι 0,35 sec.

## **Η συχνότητα της καρδιακής λειτουργίας όπως καθορίζεται με το ηλεκτροκαρδιογράφημα**

Η συχνότητα της καρδιακής λειτουργίας μπορεί να καθορισθεί εύκολα από το ηλεκτροκαρδιογράφημα, γιατί το χρονικό διάστημα που παρεμβάλλεται μεταξύ δυο διαδοχικών καρδιακών παλμών είναι το αντίστροφο της καρδιακής συχνότητας. Εάν το χρονικό διάστημα που παρεμβάλλεται μεταξύ δυο διαδοχικών καρδιακών παλμών, όπως καθορίζεται με τις γραμμές βαθμονόμησης, είναι 1 sec, η καρδιακή συχνότητα είναι 60 καρδιακοί παλμοί το λεπτό. Το φυσιολογικό χρονικό διάστημα που παρεμβάλλεται μεταξύ δυο συμπλεγμάτων QRS είναι περίπου 0,83 sec. Αυτό σημαίνει ότι η καρδιακή συχνότητα σ' αυτή την περίπτωση, είναι 72 καρδιακοί παλμοί το λεπτό.

### Μέθοδοι καταγραφής του ηλεκτροκαρδιογραφήματος

Η επεξεργασία του ΗΚΓ γίνεται με σκοπό την παρουσίαση της καρδιακής δραστηριότητας με όσο το δυνατό λεπτομερέστερο σήμα. Το αντίστροφο πρόβλημα στην καρδιολογία ορίζεται ως η μέγιστη δυνατότητα εντοπισμού της ηλεκτρικής δραστηριότητας του φαινομένου που λαμβάνει χώρα τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αν και κάτι τέτοιο είναι πολύ δύσκολο λόγω της υπερβολικής πολυπλοκότητας που παρουσιάζει το νευρικό δένδρο αγωγής της καρδιάς, μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί με επιτυχία αρκετά είδη καρδιογράφων που εξασφαλίζουν ικανοποιητικά την παραπάνω συνθήκη.

Το μεγαλύτερο μέρος των υπαρχόντων ηλεκτροκαρδιογράφων πραγματοποιεί ηλεκτρικές μετρήσεις στην επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος. Ένα απλό ΗΚΓ αποτελεί από το PQRSΤ σύμπλεγμα με εύρος μόλις λίγων millivolts. Συνήθως το εύρος ζώνης ενός τέτοιου σήματος κυμαίνεται στην περιοχή 0,05-100Hz, όπου περιέχεται σχεδόν όλη η ενέργειά του. Γι' αυτό το λόγο η ψηφιοποίηση (βάσει του θεωρήματος του Shannon) σήματος ΗΚΓ απαιτεί συχνότητα δειγματοληψίας τουλάχιστον 200 δείγματα / sec.

Το πρώτο βήμα στην επεξεργασία του ΗΚΓ είναι η αναγνώριση του R κύματος. Η αναγνώριση αυτή πραγματοποιείται με διάφορες μεθόδους συγχρονισμού συνεχόμενων R-R παλμών. Η ανάλυση του διαστήματος είναι μια πολύ χρήσιμη διαδικασία που χρησιμοποιείται πρωτίστως στην εξάλειψη του θορύβου από το σήμα. Πολύ προσπάθεια έχει γίνει στην ανάπτυξη αλγορίθμων αυτόματης επεξεργασίας του ΗΚΓ, τη συμπίεσή του και την κατάταξή του σε διακριτές τάξεις.

Τα πιο γνωστά είδη καρδιογραφημάτων είναι τα ακόλουθα:

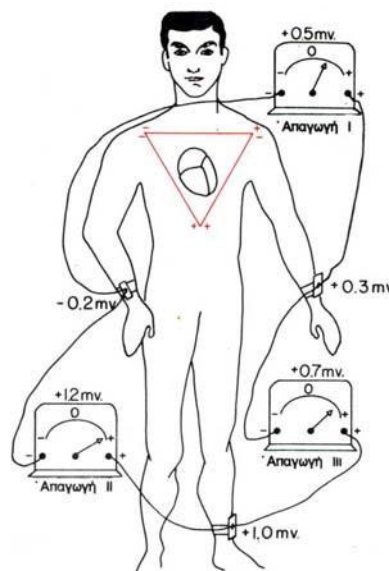
- 1) Ηλεκτροκαρδιογράφημα υψηλής συχνότητας (high frequency ECG)  
Έχει διαπιστωθεί ότι η υψηλή περιοχή συχνοτήτων 100-1000 Hz περιέχει επιπρόσθετη πληροφορία της ηλεκτρικής δραστηριότητας της καρδιάς. Κυματομορφές που καλούνται notch και slurs έχουν καταγραφεί υπερτιθέμενες στο γνωστό QRS σύμπλεγμα.
- 2) Fetal ECG (FECG).  
Το είδος αυτό αφορά στα διαφορετικά ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή του (ηλεκτρόδια με όχι λεία επιφάνεια). Το βασικότερο πρόβλημα σε αυτό το ΗΚΓ είναι οι μεγάλες παρεμβολές που υπερτίθενται στο σήμα από την ηλεκτρική δραστηριότητα μυώνων που βρίσκονται κοντά στην περιοχή της καρδιάς. Προσαρμοζόμενα φίλτρα (adaptive filters) έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο, στο συγκεκριμένο είδος ηλεκτροκαρδιογραφήματος.
- 3) His Bundle ECG (HBE).  
Αυτό το ΗΚΓ γίνεται με καθετηριασμό και αφορά την απευθείας καταγραφή του ηλεκτρικού δυναμικού του His Purkinje νευρικού δένδρου. Το σήμα που καταγράφεται έχει εύρος 1 έως 10  $\mu V$ . Σήματα με τόσο μικρό εύρος απαιτούν συγχρονισμένες τεχνικές averaging για την περαιτέρω επεξεργασία τους.
- 4) Διανυσματικά ΗΚΓ (vector ECG, VCG).  
Αντί να καταγράφονται ηλεκτρικά δυναμικά από τα ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του σώματος σε συνάρτηση με το χρόνο, είναι δυνατό να καταγράφεται και να παρουσιάζεται η ηλεκτρική δραστηριότητα του ενός ηλεκτροδίου σε σχέση με



την ηλεκτρική δραστηριότητα κάποιου άλλου ή κάποιου συνδυασμού άλλων ηλεκτροδίων. Έτσι, υιοθετώντας μια συγκεκριμένη τοπολογία πάνω στην επιφάνεια του σώματος για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, μπορεί να μετρηθεί η προβολή του διπόλου της καρδιάς (μοντελοποίηση) στα επίπεδα (x,y), (y,z) και (x,z). Ορισμένοι γνωστοί συνδυασμοί ηλεκτροδίων είναι το Frank σύστημα συντεταγμένων, το τετράεδρο και το κυβικό διανυσματικό ηλεκτροκαρδιογράφημα.

### 2.3.2 Ηλεκτροκαρδιογραφικές απαγωγές

Για τη λήψη ΗΚΓ τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε διάφορες σταθερές (τυπικές) θέσεις κι έτσι το αν και κατά πόσο η πολικότητα της εγγραφής, κατά τη διάρκεια κάθε καρδιακού κύκλου, θα είναι θετική ή αρνητική, καθορίζεται από τον προσανατολισμό των ηλεκτροδίων σε σχέση με την κατεύθυνση του ρεύματος στην καρδιά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικοί από τους συμβατικούς συνδυασμούς τοποθέτησης των ηλεκτροδίων, οι λεγόμενες *ηλεκτροκαρδιογραφικές απαγωγές*.



Σχήμα 8: Συμβατική διάταξη των ηλεκτροδίων για την καταγραφή των βασικών ηλεκτροκαρδιογραφικών απαγωγών. Στον θώρακα έχει τοποθετηθεί το τρίγωνο του Einthoven.

#### 2.3.2.1 Οι τρεις διπολικές απαγωγές των άκρων

Στο σχήμα 8 απεικονίζονται οι ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ των άκρων και του ηλεκτροκαρδιογράφου για την καταγραφή ηλεκτροκαρδιογραφήματος με τις πρότυπες διπολικές απαγωγές των άκρων. Με τον όρο «διπολικές» εννοείται ότι το ηλεκτροκαρδιογράφημα καταγράφεται από δύο ειδικά ηλεκτρόδια, τοποθετημένα στο σώμα, και σ' αυτή την περίπτωση σε άκρα. Έτσι, η «απαγωγή» δεν συνίσταται από ένα απλό καλώδιο, με το οποίο συνδέεται το σώμα με το καταγραφικό όργανο, αλλά από δύο καλώδια και από τα ηλεκτρόδιά τους, για να σχηματίζεται ένα πλήρες ηλεκτρικό κύκλωμα με τον ηλεκτροκαρδιογράφο. Αν και ο πραγματικός ηλεκτροκαρδιογράφος είναι ηλεκτρονικό όργανο καταγραφής υψηλής ταχύτητας, στο σχήμα παριστάνεται ως απλό μηχανικό όργανο καταγραφής.



**Απαγωγή I.** Κατά την καταγραφή με την απαγωγή I, το αρνητικό ηλεκτρόδιο του ηλεκτροκαρδιογράφου τοποθετείται στο δεξιό άνω άκρο και το θετικό ηλεκτρόδιο στο αριστερό άνω άκρο. Κατά συνέπεια, όταν το σημείο στον θώρακα όπου το δεξιό άνω άκρο συνδέεται με το σώμα είναι ηλεκτραρνητικό σε σχέση με το σημείο στο οποίο το αριστερό άνω άκρο συνδέεται με τον θώρακα, ο ηλεκτροκαρδιογράφος καταγράφει θετικό έπαρμα - δηλαδή έπαρμα πάνω από την ισοηλεκτρική γραμμή του ηλεκτροκαρδιογραφήματος. Εξάλλου, όταν η πολικότητα μεταβάλλεται, το καταγραφόμενο έπαρμα είναι αρνητικό, δηλαδή κάτω από την ισοηλεκτρική γραμμή.

**Απαγωγή II.** Κατά την καταγραφή με την απαγωγή II, το αρνητικό ηλεκτρόδιο του ηλεκτροκαρδιογράφου τοποθετείται στο δεξιό άνω άκρο και το θετικό ηλεκτρόδιο στο αριστερό κάτω άκρο. Κατά συνέπεια, όταν το δεξιό άνω άκρο είναι ηλεκτραρνητικό σε σχέση με το αριστερό κάτω άκρο, ο ηλεκτροκαρδιογράφος καταγράφει θετικό έπαρμα.

**Απαγωγή III.** Κατά την καταγραφή με την απαγωγή III, το αρνητικό ηλεκτρόδιο του ηλεκτροκαρδιογράφου τοποθετείται στο αριστερό άνω άκρο, και το θετικό ηλεκτρόδιο στο αριστερό κάτω άκρο. Αυτό σημαίνει ότι ο ηλεκτροκαρδιογράφος καταγράφει θετικό έπαρμα όταν το αριστερό άνω άκρο είναι ηλεκτραρνητικό σε σχέση με το αριστερό κάτω άκρο.

**Το τρίγωνο Einthoven.** Στο σχήμα 8 υπάρχει σχεδιασμένο, γύρω από την περιοχή της καρδιάς, ένα ισόπλευρο τρίγωνο, το οποίο ονομάζεται τρίγωνο του Einthoven. Αυτό αποτελεί ένα σχεδιαγραμματικό τρόπο για να καταδειχθεί ότι τα δύο άνω άκρα και το αριστερό κάτω άκρο αποτελούν τις τρεις γωνίες τριγώνου που περιβάλλει την καρδιά. Οι δύο γωνίες στο άνω άκρο του τριγώνου παριστάνουν τα σημεία στα οποία τα δύο άνω άκρα πραγματοποιούν ηλεκτρική σύνδεση με τα υγρά που περιβάλλουν την καρδιά, η δε κάτω γωνία αποτελεί το σημείο στο οποίο το αριστερό κάτω άκρο συνδέεται με αυτά τα υγρά.

**Ο νόμος του Einthoven.** Κατά το νόμο του Einthoven, αν τα ηλεκτρικά δυναμικά δύο οποιωνδήποτε από τις τρεις ηλεκτροκαρδιογραφικές απαγωγές είναι γνωστά για δεδομένη χρονική στιγμή, το δυναμικό της τρίτης απαγωγής μπορεί να υπολογιστεί μαθηματικώς, από τις δύο πρώτες, με την απλή άθροισή τους (σημειώνεται όμως ότι τα θετικά και τα αρνητικά σημεία των διαφόρων απαγωγών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εκτέλεση αυτής της άθροισης).

Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 8, το δεξιό άνω άκρο είναι 0.2mV αρνητικό σε σχέση με το μέσο δυναμικό του σώματος, το αριστερό άνω άκρο είναι 0.3mV θετικό, και το αριστερό κάτω άκρο είναι 1.0mV θετικό. Από την παρατήρηση των μετρητικών οργάνων στο σχήμα, παρατηρείται ότι στην απαγωγή I καταγράφεται θετικό δυναμικό 0.5mV, γιατί αυτή είναι η διαφορά μεταξύ του -0.2mV του δεξιού άνω άκρου και του +0.3mV του αριστερού άνω άκρου. Επίσης, στην απαγωγή III καταγράφεται θετικό δυναμικό 0.7 mV ενώ στην απαγωγή II η εγγραφή είναι θετικό δυναμικό 1.2mV γιατί αυτές είναι οι στιγμιαίες διαφορές δυναμικού μεταξύ των αντιστοίχων ζευγών άκρων.

Σημειώνεται ότι το άθροισμα των ηλεκτρικών τάσεων στις απαγωγές I και III ισούται με την τάση στην απαγωγή II. Δηλαδή,  $0,5 + 0,7 = 1,2$ . Μαθηματικώς, αυτή η αρχή, που ονομάζεται νόμος του Einthoven, ισχύει για κάθε χρονική στιγμή, κατά τη διάρκεια της καταγραφής του ηλεκτροκαρδιογραφήματος.



Σχήμα 9: Φυσιολογικά ΗΚΓ που καταγράφονται από τις τρεις βασικές ηλεκτροκαρδιογραφικές απαγωγές.

### **Το φυσιολογικό ηλεκτροκαρδιογράφημα όπως καταγράφεται και με τις τρεις κλασσικές απαγωγές**

Στο σχήμα 9 απεικονίζονται τρία ηλεκτροκαρδιογραφήματα, τα οποία λαμβάνονται συγχρόνως, με τις απαγωγές I, II και III. Από αυτό το σχήμα καθίσταται φανερό ότι τα ηλεκτροκαρδιογραφήματα που λαμβάνονται με αυτές τις απαγωγές μοιάζουν πολύ μεταξύ τους, γιατί και στα τρία, τα επάρματα P και T είναι θετικά, το δε μεγαλύτερο μέρος του συμπλέγματος QRS είναι επίσης θετικό σε όλες τις εγγραφές.

Με τη σχετική ανάλυση και των τριών ηλεκτροκαρδιογράφων, μπορεί ναδειχθεί, με προσεκτικές μετρήσεις, ότι για μια οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή, το άθροισμα των δυναμικών στις απαγωγές I και III είναι ίσο με το δυναμικό στην απαγωγή II, σύμφωνα με το νόμο του Einthoven.

Επειδή τα ηλεκτροκαρδιογραφήματα που λαμβάνονται με όλες τις διπολικές απαγωγές είναι όμοια μεταξύ τους, δεν έχει μεγάλη σημασία ποια απαγωγή χρησιμοποιείται, όταν επιδιώκεται η διάγνωση των διάφορων αρρυθμιών της καρδιάς, γιατί η διάγνωση των αρρυθμιών εξαρτάται, κατά κύριο λόγο, από τις χρονικές αλληλοσυσχετίσεις μεταξύ των διαφόρων κυμάτων του καρδιακού παλμού. Από την άλλη μεριά, όταν απαιτείται η διάγνωση βλάβης στο μυοκάρδιο των κοιλιών ή των κόλπων, είτε στο σύστημα αγωγής των διεγέρσεων, ενδιαφέρει πάρα πολύ η απαγωγή που χρησιμοποιείται, γιατί οι ανωμαλίες που εμφανίζονται στο μυοκάρδιο μεταβάλλουν τη μορφή του ηλεκτροκαρδιογραφήματος κατά τρόπο σημαντικό σε ορισμένες απαγωγές, χωρίς να επηρεάζονται άλλες απαγωγές.

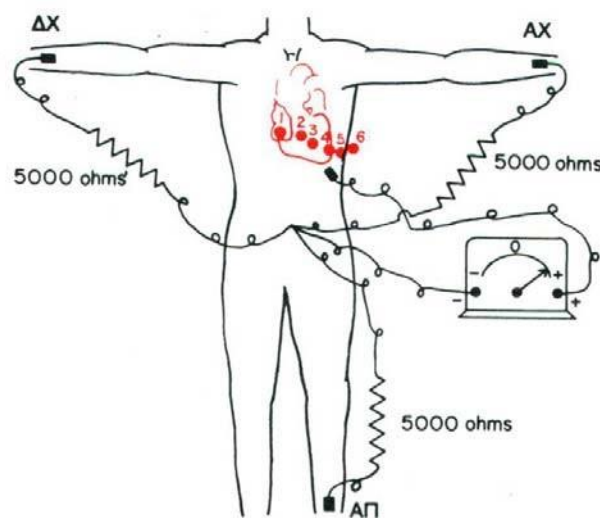
#### **2.3.2.2 Θωρακικές (προκάρδιες) απαγωγές**

Συχνά, ηλεκτροκαρδιογραφήματα λαμβάνονται με το ένα ηλεκτρόδιο τοποθετημένο στην πρόσθια επιφάνεια του θώρακα, πάνω από την καρδιά, σε ένα από τα έξι ξεχωριστά σημεία, τα οποία σημειώνονται με σκούρο χρώμα στο σχήμα 10. Αυτό το ηλεκτρόδιο συνδέεται με τον θετικό πόλο του ηλεκτροκαρδιογράφου, ενώ το αρνητικό ηλεκτρόδιο,

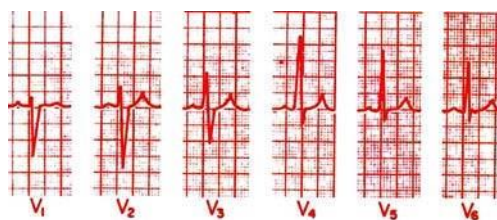
που ονομάζεται αδιάφορο ηλεκτρόδιο, συνδέεται συνήθως, με την παρεμβολή ηλεκτρικών αντιστάσεων, με το δεξιό και αριστερό άνω άκρο, καθώς και με το αριστερό κάτω άκρο, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 10. Συνήθως λαμβάνονται έξι διαφορετικές πρότυπες απαγωγές από το πρόσθιο θωρακικό τοίχωμα, με τη διαδοχική τοποθέτηση του θωρακικού ηλεκτροδίου στα έξι σημεία που σημειώνονται στο διάγραμμα. Τα ηλεκτροκαρδιογραφήματα που λαμβάνονται με τη μέθοδο που απεικονίζεται στο σχήμα 11, φέρονται ως απαγωγές V1,V2,V3,V4,V5 και V6.

Στο σχήμα 11 απεικονίζονται τα ηλεκτροκαρδιογραφήματα φυσιολογικής καρδιάς, όπως καταγράφονται από τις έξι αυτές πρότυπες θωρακικές απαγωγές. Επειδή οι διάφορες επιφάνειες της καρδιάς είναι πολύ κοντά στο θωρακικό τοίχωμα, με την κάθε μια θωρακική απαγωγή καταγράφεται, κατά κύριο λόγο, το ηλεκτρικό δυναμικό του μυοκαρδίου, που βρίσκεται αμέσως κάτω από το ηλεκτρόδιο. Γι' αυτό το λόγο, σχετικά μικρές ανωμαλίες στις κοιλίες, και ιδιαίτερα στο πρόσθιο κοιλιακό τοίχωμα, συχνά προκαλούν εκσεσημασμένες αλλοιώσεις στα ηλεκτροκαρδιογραφήματα που λαμβάνονται με τις προκάρδιες απαγωγές.

Στις απαγωγές V1 και V2, το σύμπλεγμα QRS της φυσιολογικής καρδιάς είναι κατά το μεγαλύτερο μέρος του αρνητικό, γιατί, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 10, στις απαγωγές αυτές το θωρακικό ηλεκτρόδιο είναι πλησιέστερα στη βάση μάλλον παρά στην κορυφή της καρδιάς, προς την οποία βάση είναι η κατεύθυνση της ηλεκτραρνητικότητας κατά τη διάρκεια του μεγαλύτερου μέρους της διεργασίας της εκπόλωσης των κοιλιών. Αντίθετα, το σύμπλεγμα QRS στις απαγωγές V4, V5 και V6 είναι, κατά το μεγαλύτερο μέρος του θετικό, γιατί το θωρακικό ηλεκτρόδιο σ' αυτές τις απαγωγές είναι πλησιέστερα προς την κορυφή της καρδιάς, προς την κατεύθυνση της οποίας παρατηρείται ηλεκτροθετικότητα κατά το μεγαλύτερο μέρος της διάρκειας της διεργασίας εκπόλωσης των κοιλιών.



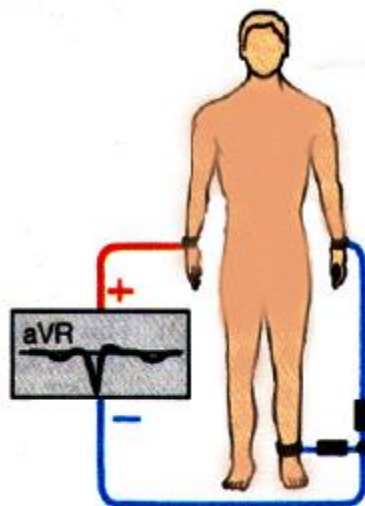
Σχήμα 10: Συνδέσεις του σώματος με τον ηλεκτροκαρδιογράφο για την καταγραφή προκάρδιων απαγωγών.



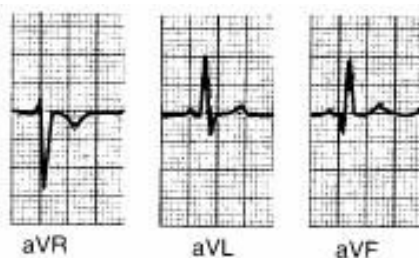
Σχήμα 11: Φυσιολογικά ΗΚΓ των έξι τυπικών προκάρδιων απαγωγών.

### 2.3.2.3 Οι ενισχυμένες μονοπολικές απαγωγές άκρων

Ένα άλλο σύστημα απαγωγών σε ευρεία χρήση είναι η «ενισχυμένη μονοπολική απαγωγή άκρου». Στην απαγωγή αυτού του τύπου, δύο άκρα συνδέονται, με την παρεμβολή ηλεκτρικών αντιστάσεων, με τον αρνητικό πόλο του ηλεκτροκαρδιογράφου, ενώ το τρίτο άκρο συνδέεται με τον θετικό πόλο. Όταν το θετικό ηλεκτρόδιο συνδέεται με δεξιό άνω άκρο, η απαγωγή ονομάζεται aVR, όταν συνδέεται με το αριστερό άνω άκρο, ονομάζεται απαγωγή aVL και όταν συνδέεται με το αριστερό κάτω άκρο, ονομάζεται απαγωγή aVF (Σχήμα 12).



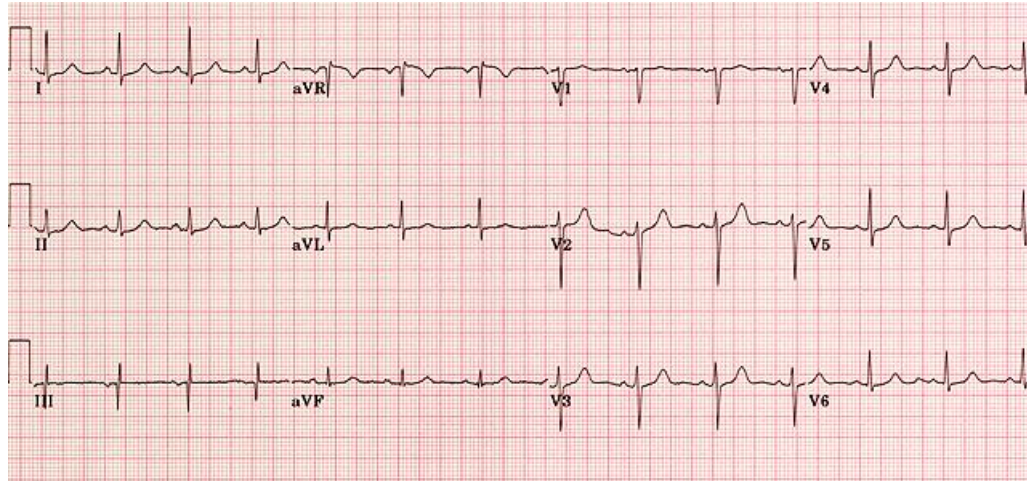
Σχήμα 12: Τοποθέτηση των ηλεκτροδίων για την καταγραφή των ενισχυμένων μονοπολικών απαγωγών άκρων



Σχήμα 13: Φυσιολογικά ΗΚΓ όπως λαμβάνονται με τις τρεις ενισχυμένες μονοπολικές απαγωγές των άκρων

Τα φυσιολογικά ηλεκτροκαρδιογραφήματα που λαμβάνονται με τις ενισχυμένες μονοπολικές απαγωγές των άκρων, απεικονίζονται στο σχήμα 13. Όλα είναι όμοια με εκείνα των κλασικών διπολικών απαγωγών των άκρων, εκτός από την απαγωγή aVR, στην οποία το ηλεκτροκαρδιογράφημα είναι αντεστραμμένο.

Στο σχήμα 14 συνοψίζονται τα σήματα που προέρχονται από όλες τις απαγωγές για ένα φυσιολογικό άτομο.



Σχήμα 14: Σήματα από όλες τις απαγωγές για ένα φυσιολογικό άτομο

### 2.3.3 Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός και οι βασικές αρχές καταγραφής και ψηφιακής επεξεργασίας του ΗΚΓ

Οι μετρήσεις του ΗΚΓ χρησιμοποιούνται για την απόκτηση επιπρόσθετης πληροφορίας (εκτός από αυτήν που αποκτάται με χρήση του ιατρικού ακουστικού) που αφορά την ηλεκτρική δραστηριότητα της περιοχής μέσα και γύρω από την καρδιά. Οι καταγραφές του ΗΚΓ γίνονται τόσο με ηλεκτροκαρδιογράφους διαφορετικού τύπου, όσον αφορά το ΗΚΓ που λαμβάνεται, όσο και με ηλεκτροκαρδιογράφους διαφορετικών προδιαγραφών (δηλαδή με μηχανήματα που, ενώ παράγουν μορφολογικά ίδιο ΗΚΓ, τα ίδια τα μηχανήματα παρουσιάζουν διαφορές στις συχνότητες αποκοπής των φίλτρων, στην ενίσχυση των προενισχυτών τους, στον αριθμό των bits ψηφιοποίησης κ.τ.λ.). Έτσι, οι ηλεκτροκαρδιογράφοι χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες, ανάλογα με τον αριθμό των καναλιών που δίνουν ως έξοδο:

**Μονοκαναλικοί:** Ένα πολύ γνωστό είδος μονοκαναλικού καρδιογράφου είναι ο His-Purkinje καρδιογράφος για τον οποίο θα μιλήσουμε αναλυτικά στη συνέχεια της ενότητας αυτής.

**12-καναλικοί:** Η κατηγορία αυτή είναι η πιο διαδεδομένη από όλες τις άλλες, ενώ τα μηχανήματα που υπάγονται σε αυτήν δίνουν το πιο γνωστό ΗΚΓ που στη διεθνή βιβλιογραφία ονομάζεται normal ECG.

**Πολυκαναλικοί:** Στην κατηγορία αυτήν υπάγονται συστήματα που δίνουν ΗΚΓ σε 32 έως 256 κανάλια. Οι καρδιογράφοι αυτοί δεν έχουν ευρεία κλινική εφαρμογή (εκτός από το πολύ γνωστό test κοπώσεως) και χρησιμοποιούνται κυρίως για πειραματικούς σκοπούς. Παρά την περιορισμένη κλινική τους χρήση (κυρίως λόγω της υψηλής τιμής τους), το ΗΚΓ που δίνουν είναι πολύ σημαντικό για τους ερευνητές που μελετούν τη λειτουργία της καρδιάς, γιατί είναι πολύ λεπτομερές, αφού χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια σε όλη την επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος για την απόκτησή του.

Για όλα τα παραπάνω είδη καρδιογράφων απαιτείται η χρήση ογκώδους hardware. Επιπλέον, ένα μεγάλο δείκτη πολυπλοκότητας αποτελεί και ο αριθμός των ηλεκτροδίων



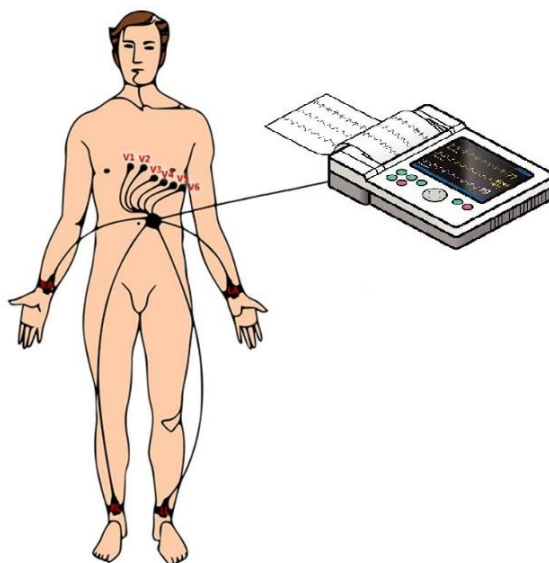
που χρησιμοποιούνται για την απόκτηση του ΗΚΓ. Όσο περισσότερα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται, τόσο περισσότεροι ενισχυτές και απομονωτές εισόδου απαιτούνται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο όγκος του αναλογικού hardware, γεγονός που πρέπει να αποφεύγεται, αφού τα αναλογικά ηλεκτρονικά είναι πολύ ευαίσθητα σε περιβάλλον θορύβου.

### 2.3.3.1 Τα ηλεκτρόδια και η τοποθέτησή τους στο ανθρώπινο σώμα

Ηλεκτρόδια (ή κανάλια εισόδου ή απαγωγές σήματος) καλούνται οι αισθητήρες που τοποθετούνται στο ανθρώπινο σώμα, για να καταγράψουν την ηλεκτρική δραστηριότητα στην περιοχή της καρδιάς. Ο αριθμός των ηλεκτροδίων, καθώς και το σημείο τοποθέτησής τους πάνω στο σώμα του ασθενούς, έχει οριστεί με ακρίβεια μόνο για τους 12-κάναλους καρδιογράφους. Στην περίπτωση των μονοκάναλων καρδιογράφων, το ηλεκτρόδιο είναι ένας αισθητήρας ηλεκτρικής τάσης που τοποθετείται στον ασθενή με καθετηριασμό, ενώ στους πολυκαναλικούς καρδιογράφους χρησιμοποιείται μεταβλητός αριθμός ηλεκτροδίων, που η τοποθέτησή τους γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να καταγράφονται συγκεκριμένες καρδιακές δραστηριότητες. (Γι' αυτό το λόγο, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, τα μηχανήματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην έρευνα.)

Στην περίπτωση των 12-κάναλων καρδιογράφων, τα ηλεκτρόδια είναι συνολικά δέκα και τοποθετούνται στην επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 15.

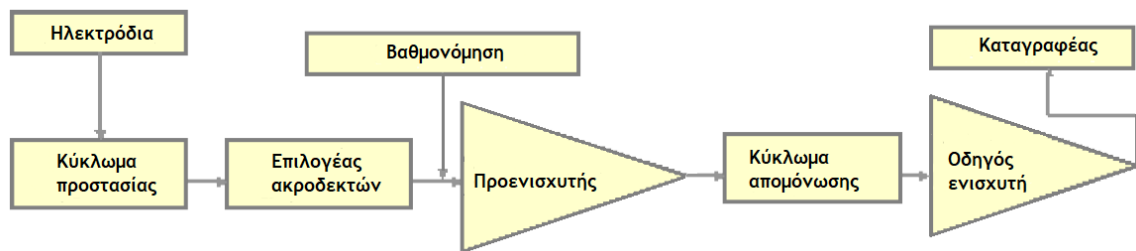
Από τα δέκα αυτά ηλεκτρόδια προκύπτουν 12 σήματα στην έξοδο του καρδιογράφου (λαμβάνοντας ως γη το ηλεκτρόδιο του αριστερού ποδιού). Επίσης, οι απαγωγές χωρίζονται σε δυο είδη: τις απαγωγές στήθους (chest leads: V1, V2, V3, V4, V5, V6) και τις απαγωγές άκρων (metal electrodes). Ηλεκτρονικά οι απαγωγές στήθους προκύπτουν πολύ εύκολα με σύγκριση του σήματος αναφοράς (δεξί πόδι) και κάθε μιας από τις απαγωγές στήθους. Από τις απαγωγές άκρων όμως προκύπτουν έξι επιπλέον σήματα: Τα VL, VR, VF, που προκύπτουν με σύγκρισή των L, R, F με το σήμα αναφοράς και τα σήματα I, II, III που προκύπτουν με σύγκριση των L, R, F με το ηλεκτρονικό τους άθροισμα (το οποίο πρέπει να μας είναι 0 V).



Σχήμα 15: Η διάταξη των ηλεκτροδίων πάνω στο ανθρώπινο σώμα (6 ηλεκτρόδια στο θώρακα και 4 στα άνω και κάτω άκρα)

### 2.3.3.2 Γενική περιγραφή των υποσυστημάτων ενός Ηλεκτροκαρδιογράφου

Στο σχήμα 16 βλέπουμε τα βασικά υποσυστήματα ενός ηλεκτροκαρδιογράφου. Ο ηλεκτροκαρδιογράφος είναι, ουσιαστικά, ένας ενισχυτής που ακολουθείται από ένα καταγραφέα, και η βασική του λειτουργία είναι η λήψη του ασθενούς ηλεκτρικού σήματος της καρδιάς, όπως αυτό φτάνει στην επιφάνεια του σώματος, και η ενίσχυση του πλάτους του για περαιτέρω επεξεργασία, καταγραφή ή αποθήκευση.



Σχήμα 16: Βασικά υποσυστήματα ηλεκτροκαρδιογράφου

Τα βασικά υποσυστήματα ενός ηλεκτροκαρδιογράφου είναι τα ακόλουθα (όπως φαίνονται και στο σχήμα 16):

1) Τα *ηλεκτρόδια* τα οποία χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της ηλεκτρικής δραστηριότητας της καρδιάς.

2) Τα *κύκλωμα προστασίας* και *απομόνωσης* για την ασφάλεια του ατόμου του οποίου το ΗΚΓ καταγράφεται. Είναι διατάξεις απομόνωσης υπερτάσεων στις εισόδους της συσκευής.

3) Ο *επιλογέας ακροδεκτών* για την επιλογή της επιθυμητής προς καταγραφή απαγωγής. Ένας τυπικός ηλεκτροκαρδιογράφος περιλαμβάνει τουλάχιστον 12 ακροδέκτες εισόδου για να μπορούμε να παίρνουμε συγκεκριμένου τύπου ΗΚΓ.

4) Ο *προενισχυτής*, ο οποίος πραγματοποιεί την πρώτη προενίσχυση που δέχεται το σήμα. Πρέπει να έχει πολύ υψηλό λόγο απόρριψης κοινού σήματος (CMRR) και συνήθως υλοποιείται με τελεστικούς ενισχυτές.

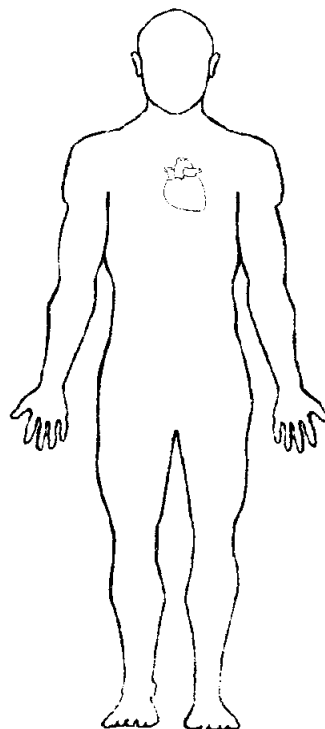
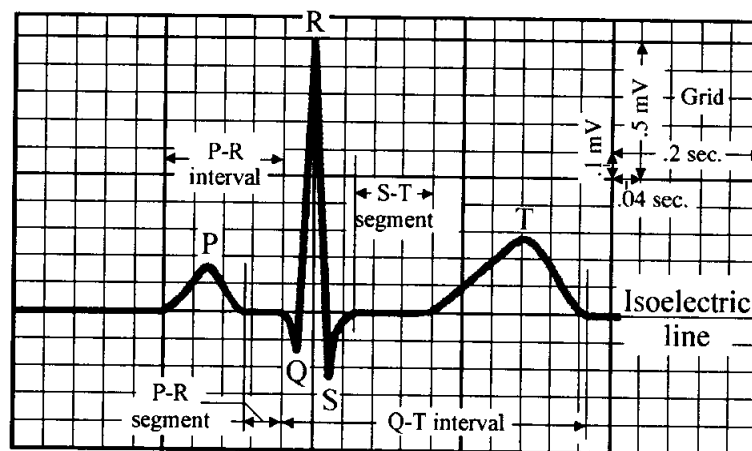
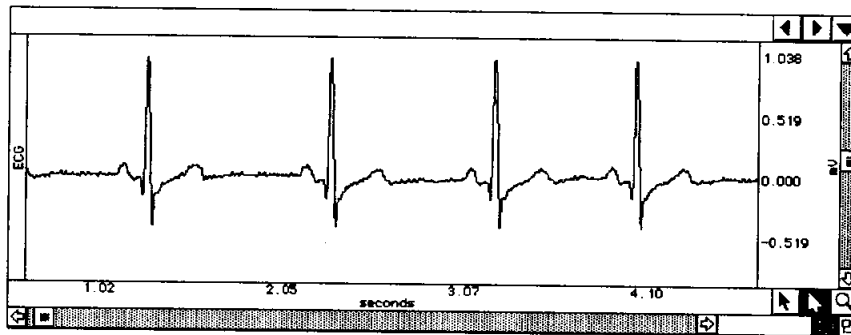
5) Το *κύκλωμα απομόνωσης*, το οποίο είναι ένα ζωνοπερατό φίλτρο στα 50 Hz για την αποκοπή των παρεμβολών του δικτύου. Προστατεύει επίσης τον ασθενή από τυχόν ρεύματα διαρροής από ή προς τα μεταλλικά της συσκευής.

6) Το *κύκλωμα οδήγησης* δεξιού κάτω άκρου, το οποίο παρέχει αναφορά τάσεων, ορίζει δηλ. μία γείωση, και το κύκλωμα κύριας ενισχυτικής βαθμίδας, το οποίο ενισχύει το σήμα όσο χρειάζεται ώστε να αποδοθεί ικανοποιητικά από τη συσκευή καταγραφής.

7) Ο *καταγραφέας*, ο οποίος εξασφαλίζει την εκτύπωση της οθόνης στο χαρτί. Σε ψηφιακούς ηλεκτροκαρδιογράφους υπάρχει και σύστημα μνήμης το οποίο επιτρέπει την καταγραφή των δεδομένων σε δίσκο μαζί με προσωπικά δεδομένα του ασθενούς.

8) Το *σήμα βαθμονόμησης*, το οποίο εξασφαλίζει την αρχικοποίηση από τυχόν αποκλίσεις.

## 2.4. Καταγραφή ηλεκτροκαρδιογραφήματος με το σύστημα BIOPAC



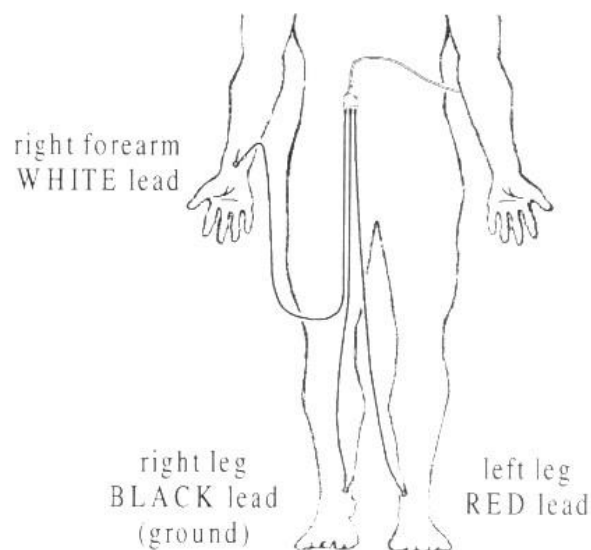
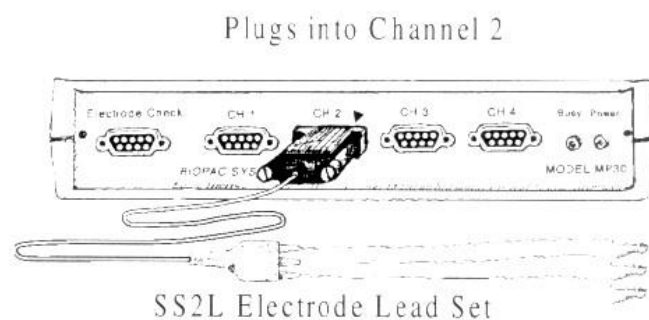


## 2.4.1 Πειραματικό μοντέλο καταγραφής ΗΚΓ

### 2.4.1.1 Εισαγωγή

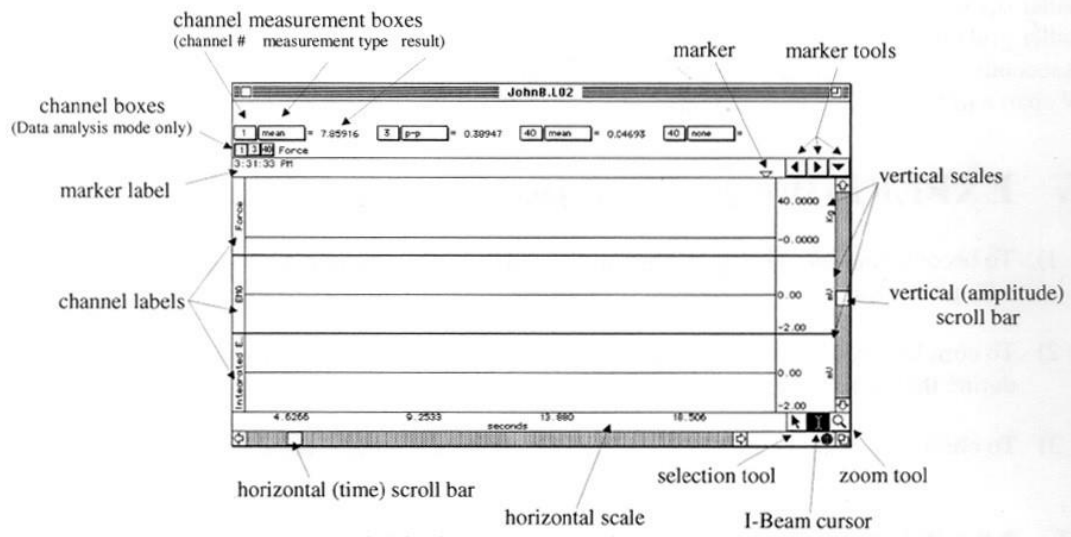
Το Biopac Student Lab αποτελείται από ένα SET ηλεκτροδίων (SS2L) τα οποία τοποθετούνται ως εξής:

1. Το άσπρο ηλεκτρόδιο τοποθετείται στον δεξιό καρπό
2. Το μαύρο ηλεκτρόδιο τοποθετείται στο δεξιό πόδι, και 3. Το κόκκινο ηλεκτρόδιο τοποθετείται στο αριστερό πόδι.



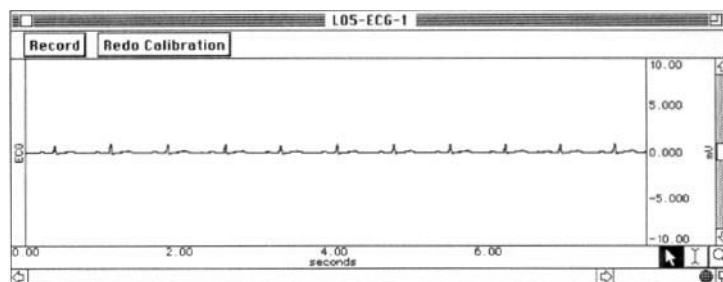
Σχήμα 17: Τοποθέτηση ηλεκτροδίων στο σώμα.

Ανοίγουμε το πρόγραμμα Biopac Student Lab όπως στο πιο κάτω σχήμα.



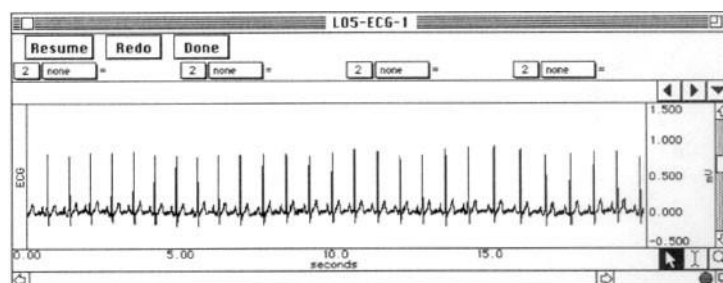
Σχήμα 18: Βασικές λειτουργίες του προγράμματος Biopac Lab

Για να αρχίσει η καταγραφή του ηλεκτροκαρδιογραφήματος πατάμε το πλήκτρο Record και το ΗΚΓ παρουσιάζεται στην οθόνη μας.



Σχήμα 19: Καταγραφή ΗΚΓ.

Αν έχουμε σφάλμα στην καταγραφή του ΗΚΓ επιλέγουμε την εντολή REDO και το ΗΚΓ θα αρχίσει να καταγράφεται και πάλι. Όταν έχουμε τελειώσει την καταγραφή του ΗΚΓ μπορούμε να το αποθηκεύσουμε με το όνομα TEST1.



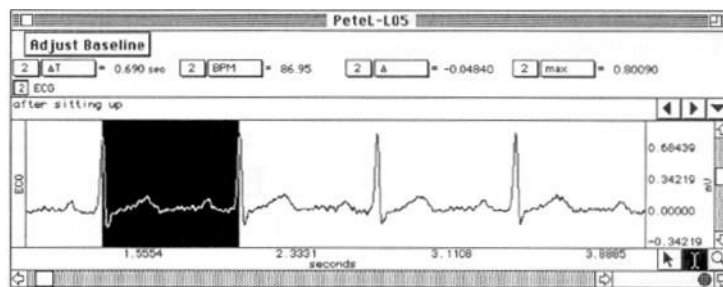
Σχήμα 20: Επανεκκίνηση καταγραφής ΗΚΓ

### 2.4.1.2 Επεξεργασία ΗΚΓ

Αφού έχουμε αποθηκεύσει το ΗΚΓ μας προσπαθούμε να το επεξεργαστούμε και να βγάλουμε σημαντικά αποτελέσματα. Το Biopac Student Lab έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας του ΗΚΓ με τις εξής λειτουργίες:

1. Αυτόματη οριζόντια κλίμακα
2. Αυτόματη κάθετη κλίμακα
3. Εργαλεία ZOOM
4. Οριζόντιος άξονας χρόνου
5. Κάθετος άξονας σε mV (πλάτος)

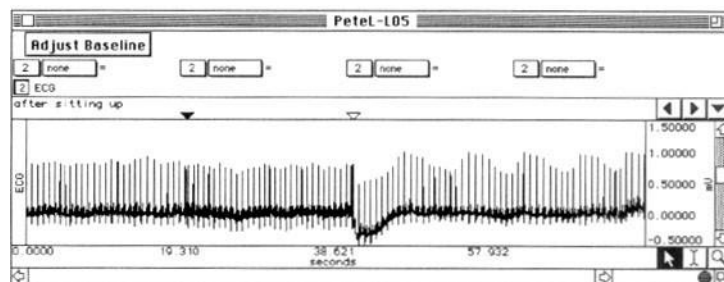
Επίσης, μας επιτρέπει να μετακινούμε την κυματομορφή μπρος και πίσω παρατηρώντας τις αλλαγές του σήματος.



Σχήμα 21: Επιλογές επεξεργασίας ΗΚΓ.

Χρησιμοποιώντας τις 4 επιλογές που βρίσκονται στο πίνακα Adjust Baseline παίρνουμε τις πιο κάτω μετρήσεις:

1. ΔT: Η μέτρηση Delta Time είναι η χρονική διαφορά μεταξύ της αρχής και του τέλους της επιλεγμένης περιοχής
2. BPM: Το μέγεθος Beats Per Minute είναι ο χρονικός υπολογισμός του τέλους και της αρχής της επιλεγμένης μας περιοχής (όπως πιο πάνω) διαιρεμένης κατά 60 δευτερόλεπτα / λεπτά.
3. Η επιλογή Δ είναι η διαφορά του πλάτους της επιλεγμένης περιοχής.
4. Τέλος έχουμε την επιλογή MAX που μας δίνει τη μεγαλύτερη κατά πλάτος κορυφή.



Σχήμα 22: Παρουσίαση μετρήσεων.

## **2.4.2 Διαδικασία**

### **2.4.2.1 Λειτουργία Biopac Student Lab**

1. Τοποθετούμε τα ηλεκτρόδια - απαγωγές (SSL2) στο κανάλι 2.
2. Βάζουμε σε λειτουργία το Biopac Lab.
3. Τοποθετούμε τις 3 απαγωγές στα κατάλληλα σημεία του σώματος.

### **2.4.2.2 Καταγραφή του ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ΗΚΓ)**

1. Τρέχουμε το πρόγραμμα Biopac Student Lab.
2. Επιλέγουμε το πρόγραμμα - μάθημα ECG I.
3. Αρχίζουμε την καταγραφή του ΗΚΓ πατώντας το RECORD.
4. Εάν έχουμε πρόβλημα στην καταγραφή του ΗΚΓ επαναλαμβάνουμε τη μέτρηση πατώντας το εικονίδιο REDO CALIBRATION.
5. Σταματάμε την καταγραφή του ΗΚΓ πατώντας το εικονίδιο SUSPEND.
6. Εάν εξακολουθούμε να έχουμε σφάλματα στις μετρήσεις μας επιλέγουμε το εικονίδιο REDO και αρχίζουμε καινούργια καταγραφή.
7. Τελειώνοντας τη μέτρηση επιλέγουμε το εικονίδιο DONE.

### **2.4.2.3 Εργαλεία επεξεργασίας**

1. Αυτόματη οριζόντια κλίμακα
2. Αυτόματη κάθετη κλίμακα
3. Εργαλεία ZOOM
4. Οριζόντιος άξονας χρόνου
5. Κάθετος άξονας σε mV (πλάτος)

### **2.4.2.4 Εμφάνιση αριθμητικών δεδομένων**

1. ΔΤ: Η μέτρηση Delta Time είναι η χρονική διαφορά μεταξύ της αρχής και του τέλους της επιλεγμένης περιοχής
2. BPM: Το μέγεθος Beats Per Minute είναι ο χρονικός υπολογισμός του τέλους και της αρχής της επιλεγμένης μας περιοχής (όπως πιο πάνω) διαιρεμένης κατά 60 δευτερόλεπτα / λεπτά.
3. Η επιλογή Δ είναι η διαφορά του πλάτους της επιλεγμένης περιοχής.
4. Επιλογή MAX που μας δίνει τη μεγαλύτερη κατά πλάτος κορυφή.