

Κεφάλαιο 4

Η ΗΛΕΚΤΡΟΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΚΑΡΔΙΑΣ

4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε το σύστημα της καρδιάς που αποτελεί ένα ηλεκτροφυσιολογικό σύστημα μεγάλου ενδιαφέροντος. Ο σκοπός μας είναι να περιγράψουμε μερικές εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν και συγχρόνως να μελετήσουμε ένα βιοηλεκτρικό σύστημα που έχει κατανοηθεί καλά και έχει μοντελοποιηθεί με επιτυχία. Θα αρχίσουμε το κεφάλαιο με μία σύντομη περιγραφή των βασικών μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων της καρδιάς.

4.2. Μηχανική δραστηριότητα της καρδιάς.

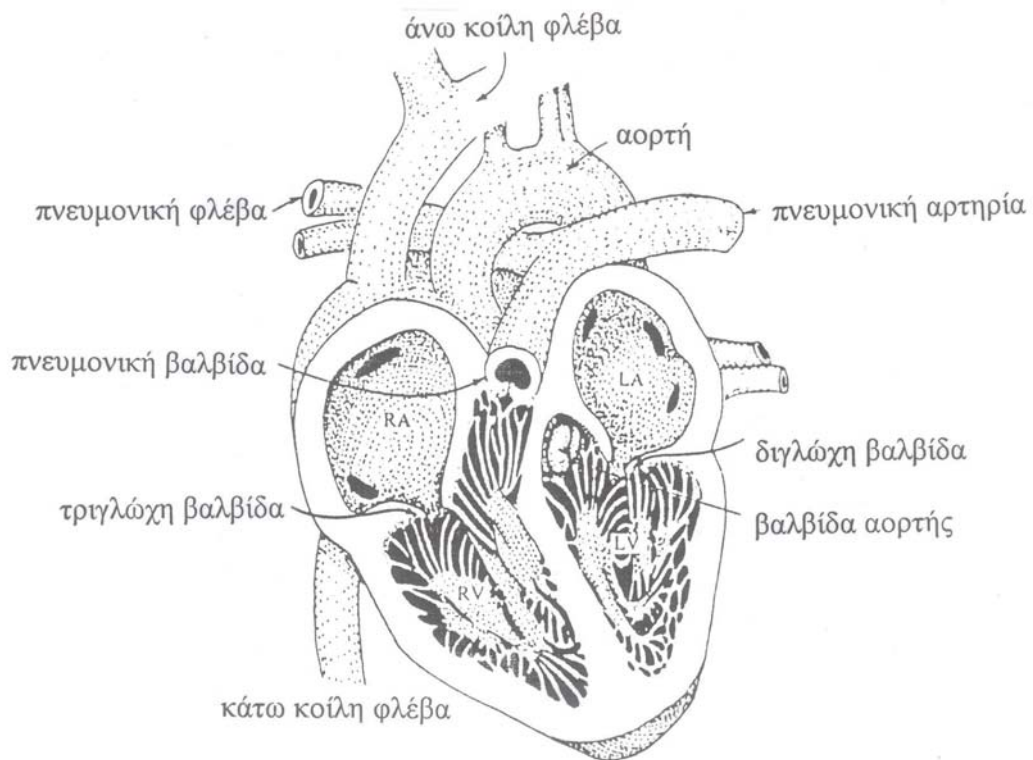
Η καρδιά είναι ένα κοίλο μυώδες όργανο του σώματος που μετατρέπει την μεταβολική ενέργεια σε μηχανική, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό τη δύναμη που απαιτείται για τη συνεχή κυκλοφορία του αίματος μέσα στο κυκλοφοριακό σύστημα. Λειτουργεί δηλαδή ως αντλία. Η καρδιά είναι εφοδιασμένη με 4 ξεχωριστές αντλίες : δύο προαντλίες, τους κόλπους και δύο προωθητικές αντλίες, τις κοιλίες.

Υπό φυσιολογικές συνθήκες, το αίμα ρέει συνεχώς από τις μεγάλες φλέβες στους κόλπους. Το 70% περίπου απ' αυτό, ρέει κατευθείαν από τους κόλπους προς τις κοιλίες πριν ακόμη οι κόλποι συσταλούν. Η κοιλική συστολή προσθέτει το υπόλοιπο 30% για την πλήρωση των κοιλιών. Κατά συνέπεια οι κόλποι λειτουργούν ως προαντλίες που αυξάνουν την αποτελεσματικότητα των κοιλιών ως αντλιών περίπου 30%.

Με τη βοήθεια των κόλπων, των κοιλιών και των διαφόρων άλλων τμημάτων της καρδιάς (βλέπε Σχ.4.1), γίνεται εφικτή η πραγματοποίηση ενός καρδιακού κύκλου. Μία συνοπτική περιγραφή του καρδιακού κύκλου είναι η εξής :

Το αίμα αφού διαβιβάσθει στα διάφορα μέρη του σώματος επιστρέφει στην καρδιά μέσω των κοίλων (άνω και κάτω) φλεβών και εισέρχεται στο δεξιό κόλπο (RA). Κατόπιν το αίμα ρέει στη δεξιά κοιλία (RV), απ' όπου διοχετεύεται στα πνευμόνια, οξυγονώνεται και επιστρέφει στον αριστερό κόλπο (LA). Απ' εδώ, εισέρχεται στην αριστερή κοιλία (LV), από την οποία καθαρό πλέον διοχετεύεται στα άλλα μέρη του σώματος μέσω της αορτής. Στη συνέχεια το αίμα επιστρέφει και πάλι στην καρδιά μέσω των κοίλων φλεβών για την έναρξη ενός νέου κύκλου λειτουργίας. Η ρυθμική δραστηριότητα της καρδιάς αποτελείται από τα εξής διακεκριμένα διαστήματα :

- (α) Γέμισμα της κοιλίας
- (β) Ισομετρική συστολή της κοιλίας
- (γ) Κοιλιακή εξώθηση
- (δ) Ισομετρική χαλάρωση της κοιλίας



Σχήμα 4.1. Διατομή της ανθρώπινης καρδιάς.

(α) Γέμισμα της κοιλίας

Όταν αρχίζει η διαστολή των κοιλιών, οι κοιλιακές πιέσεις γίνονται μικρότερες από τις κολπικές, με αποτέλεσμα να έχουμε το άνοιγμα των κολποκοιλιακών βαλβίδων (που μέχρι εκείνη τη στιγμή ήταν κλειστές) και εισροή του αίματος με μεγάλη ταχύτητα στις κοιλίες. Αυτή η περίοδος διαρκεί περίπου το πρώτο τρίτο της διαστολής. Κατά το δεύτερο τρίτο εισέρχεται στις κοιλίες μία μικρή ποσότητα αίματος. Πρόκειται για αίμα που εξακολουθούν να αδειάζουν οι φλέβες στους κόλπους από τους οποίους μεταβιβάζεται κατευθείαν στις κοιλίες. Κατά το τελευταίο τρίτο της κοιλιακής διαστολής, οι κόλποι συστέλλονται και ωθούν προς τις κοιλίες το 30% περίπου της ποσότητας του αίματος που υπολείπεται για το γέμισμα αυτών. Δηλαδή στα δύο τελευταία τρίτα της κοιλιακής διαστολής παρατηρείται μία επιβράδυνση του γεμίματος των κοιλιών. Η φάση αυτή της επιβράδυνσης είναι γνωστή ως περίοδος διάστασης.

(β) Ισομετρική συστολή της κοιλίας.

Όταν αρχίσει η κοιλιακή συστολή, η πίεση στις κοιλίες αυξάνει απότομα (ο όγκος τους παραμένει σταθερός). Η αύξηση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα το κλείσιμο των κολποκοιλιακών βαλβίδων. Οι βαλβίδες της αορτής και της πνευμονικής αρτηρίας παραμένουν κλειστές μέχρι να αναπτυχθεί αρκετή πίεση στις κοιλίες για να προκαλέσει τη διάνοιξη τους. Επομένως κατά τη διάρκεια της χρονικής αυτής περιόδου οι κοιλίες συστέλλονται χωρίς όμως να αδειάζουν.

(γ) Κοιλιακή εξώθηση.

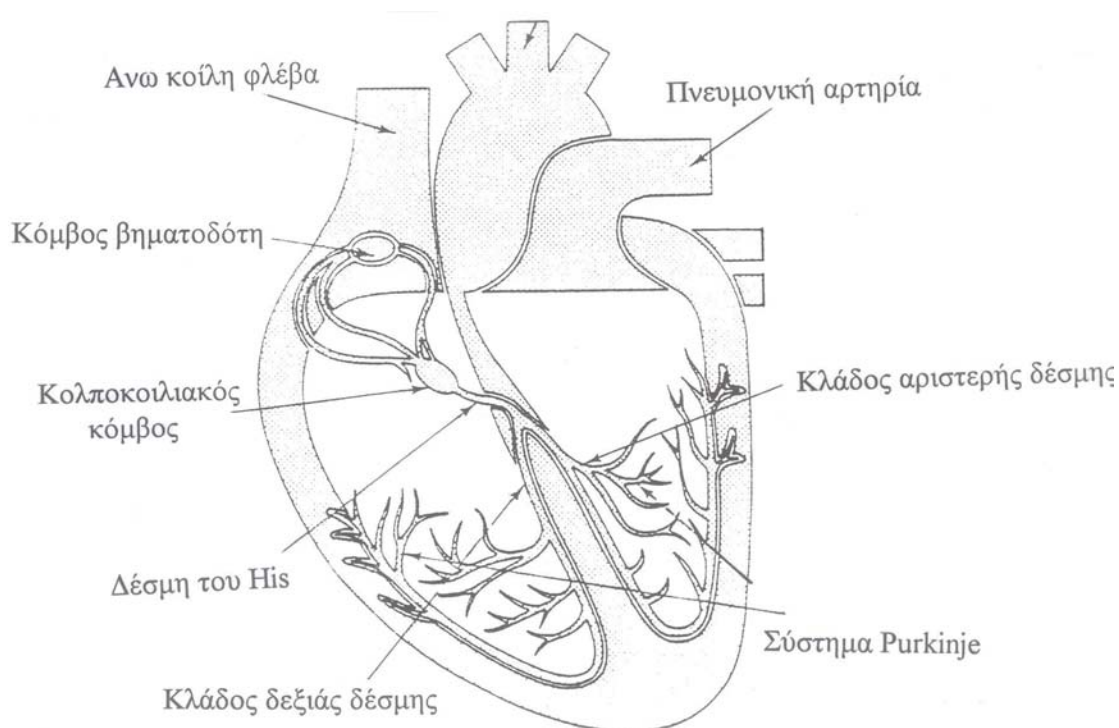
Όταν οι πιέσεις στις κοιλίες γίνουν λίγο μεγαλύτερες από 80 mm Hg στην αριστερή και από 8 mm Hg στη δεξιά, ανοίγουν οι μηννοειδείς βαλβίδες. Αμέσως αρχίζει η έξοδος του αίματος από τις κοιλίες που εκκενώνονται κατά 60% στο πρώτο τέταρτο της συστολής και κατά το μεγαλύτερο μέρος από τα υπόλοιπα 40% στα δύο επόμενα τέταρτα της. Αυτά τα τρία τέταρτα του χρόνου συστολής ονομάζονται περίοδος εξώθησης.

(δ) Ισομετρική χαλάρωση της κοιλίας.

Στο τέλος της συστολής αρχίζει απότομα η διαστολή των κοιλιών με συνέπεια τη γρήγορη πτώση των ενδοκοιλιακών πιέσεων. Οι αυξημένες πιέσεις των μεγάλων

αρτηριών προκαλούν παλινδρόμηση του αίματος προς τις κοιλίες με αποτέλεσμα το απότομο κλείσιμο της αορτικής και της πνευμονικής αρτηρίας. Η χαλάρωση του μυοκαρδίου των κοιλιών συνεχίζεται για λίγο ακόμη και οι ενδοκοιλιακές πιέσεις επιστρέφουν γρήγορα στις πολύ χαμηλές διαστολικές τους τιμές. Η περίοδος αυτή της χαλάρωσης του μυοκαρδίου των κοιλιών λέγεται περίοδος ισομετρικής χαλάρωσης. Στη συνέχεια ανοίγουν οι κολποκοιλιακές βαλβίδες και αρχίζει νέος κύκλος της λειτουργίας των κοιλιών ως αντλιών.

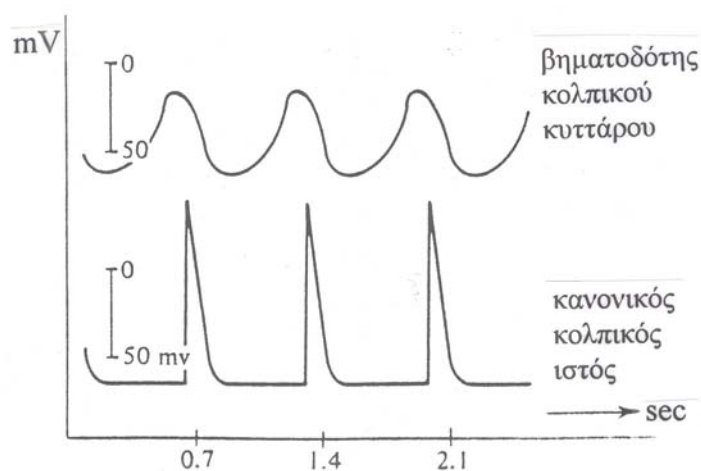
Όπως αναφέρθηκε, οι κολποκοιλιακές βαλβίδες (η τριγλώχη και η μιτροειδής) κλείνουν όταν αρχίσει η συστολή, ώστε να εμποδιστεί η παλινδρόμηση του αίματος από τις κοιλίες προς τους κόλπους. Οι δε μηννοειδείς βαλβίδες (αορτική και πνευμονική) κλείνουν όταν αρχίζει η διαστολή των κοιλιών, ώστε να εμποδίζουν τη ροή του αίματος προς τα πίσω, δηλ. από την αορτή και την πνευμονική αρτηρία προς τις κοιλίες.



Σχήμα 4.2. Βηματοδότης (κόμβος SA) και ειδικευμένες περιοχές μετάδοσης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (κόμβος AV, δέσμες δεξιά και αριστερή) της ανθρώπινης καρδιάς.

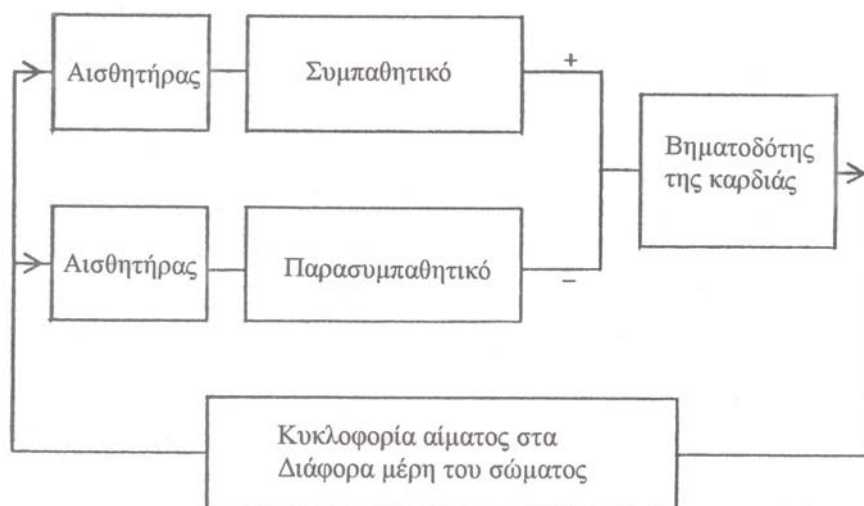
4.3. Ηλεκτρική δραστηριότητα της καρδιάς

Η μηχανική δραστηριότητα της καρδιάς συνοδεύεται από την ηλεκτρική δραστηριότητα. Η δραστηριότητα αυτή αρχίζει στο φλεβόκομβο (SA κόμβο, βλέπε Σχ. 4.2), ο οποίος είναι γνωστός ως βηματοδότης. Τα κύτταρα που βρίσκονται στην περιοχή του SA κόμβου έχουν το χαρακτηριστικό της αυτοδιέγερσης. Δηλαδή το δυναμικό της μεμβράνης του κυττάρου μετά από ένα ηλεκτρικό παλμό αντί να διατηρηθεί στο δυναμικό ηρεμίας αυξάνει απότομα μέχρι την τιμή κατωφλίου με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού παλμού. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία αδιάκοπη σειρά από ηλεκτρικούς παλμούς στο SA κόμβο. Αυτοί οι ηλεκτρικοί παλμοί οδηγούν στη δημιουργία μιας φυσιολογικής σειράς καρδιακών παλμών (βλέπε Σχ. 4.3).



Σχήμα 4.3. Δραστηριότητα ενός απλού κοιλιακού βηματοδότη και ενός απλού κυττάρου κοιλιακού ιστού.

Ο ρυθμός της καρδιάς (*heart rate*) καθορίζεται από τη δραστηριότητα του βηματοδότη, ο οποίος ενεργεί σαν ένας ελεύθερος πολυταλαντωτής (*multivibrator*). Ο ρυθμός όμως τροποποιείται από τις ανταγωνιστικές επιδράσεις των παρασυμπαθητικών και των συμπαθητικών νεύρων (βλέπε Σχ. 4.4). Η επίδραση των παρασυμπαθητικών νεύρων (ιδίως του πνευμονογαστρικού) ελαττώνει το ρυθμό της καρδιάς, ενώ η επίδραση των συμπαθητικών νεύρων αυξάνει το ρυθμό. Αν κόψουμε και τα δύο είδη νεύρων που συνδέονται με την καρδιά βλέπουμε ότι ο ρυθμός αυξάνει, το οποίο φανερώνει ότι οι επιδράσεις των παρασυμπαθητικών νεύρων



Σχήμα 4.4. Διάγραμμα στο οποίο δείχνεται πως το αυτόνομο νευρικό σύστημα (συμπαθητικά και παρασυμπαθητικά νεύρα) ελέγχει το βηματοδότη της καρδιάς μέσω ενός βρόγχου ανάδρασης.

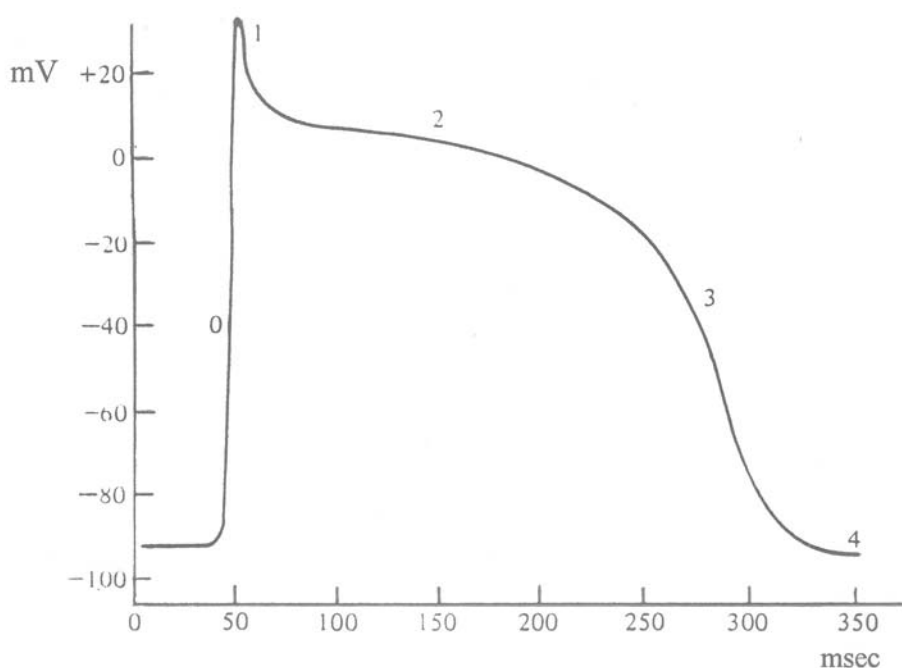
υπερισχύουν κάτω από συνθήκες ηρεμίας. Ας σημειωθεί ότι η παραγωγή της καρδιάς εξαρτάται και από το ρυθμό της και από τη μεταβολή του όγκου της, έτσι ώστε μία αύξηση στο ρυθμό της καρδιάς, για παράδειγμα, δεν συνεπάγεται και μία αυξημένη παραγωγή.

Η δραστηριότητα που αρχίζει στο SA κόμβο μεταδίδεται μέσω του κολπικού μυ με ταχύτητα 1m/sec περίπου. Στην περίπτωση της ανθρώπινης καρδιάς χρειάζεται 80 ms για την πλήρη ενεργοποίηση του κόλπου. Προς το τέλος αυτής της περιόδου, η ηλεκτρική δραστηριότητα φθάνει στο AV κόμβο (βλέπε Σχ. 4.2). Μέσω του κόμβου αυτού ειδικευμένα κύτταρα αγωγής μεταφέρουν τη διέγερση στις κοιλίες. Επειδή μη-αγώγιμος ινώδης ιστός χωρίζει τους κόλπους από τις κοιλίες, η διέγερση φθάνει στις κοιλίες μόνο μέσω του AV κόμβου. Η διάδοση της διέγερσης στο AV κόμβο γίνεται πάρα πολύ αργά με ταχύτητα 0.1 m/sec. Κατόπιν μέσω των ειδικευμένων αριστερών και δεξιών δεσμών του δεματίου (ίνες του Purkinje) η διέγερση μεταδίδεται σ' όλα τα σημεία των κοιλιών. Δηλαδή, η ηλεκτρική δραστηριότητα αφού φθάσει πρώτα στην εσωτερική επιφάνεια των κοιλιών, σχεδόν αμέσως εξαπλώνεται και στην εξωτερική επιφάνεια αυτών μέσω των ινών του Purkinje. Το σύστημα αυτό βοηθάει στην έναρξη της ηλεκτρικής διέγερσης στη μυϊκή περιοχή (βλέπε Σχ. 4.2).

Το μυοκάρδιο συμπεριφέρεται σαν ένα απλό κύτταρο. Η διεγερσιμότητα μεταδίδεται με ταχύτητα 0.5 m/sec και προκαλεί μηχανικές συστολές μ' ένα αποτελεσματικό και συγχρονισμένο τρόπο.

4.4. Κυτταρική ενεργοποίηση

Ένας τυπικός παλμός καρδιακού κυττάρου της περιοχής της κοιλίας περιγράφεται στο Σχ. 4.5.



Σχήμα 4.5. Ηλεκτρικός παλμός κοιλιακού νηματίου.

Η ανύψωση του δυναμικού ονομάζεται φάση 0 και είναι όμοια μ' εκείνη που παρατηρείται στα νευρικά κύτταρα. Η φάση γρήγορης επαναπόλωσης ονομάζεται φάση 1. Αυτή η φάση ακολουθείται από μία περίοδο παρατεταμένης και βραδείας επαναπόλωσης (φάση 2) και είναι γνωστή σαν οροπέδιο. Μία φάση (φάση 3) γρήγορης επαναπόλωσης συμπληρώνει τον κύκλο, ενώ η φάση 4 παριστάνει την περίοδο διαστολής των κοιλιών.

Αν και υπάρχουν διαφορές μεταξύ των νευρικών και καρδιακών κυττάρων, οι συγκεντρώσεις των ιόντων (κυρίως Na^+ και K^+) είναι οι ίδιες στο εσωτερικό και το εξωτερικό των κυττάρων. Ο μηχανισμός ενεργοποίησης είναι επίσης ο ίδιος και για τα δύο είδη κυττάρων (αυξημένη δηλ. διαπερατότητα της μεμβράνης σε σχέση με τα ιόντα Na^+). Επιπλέον το δυναμικό ηρεμίας είναι της ίδιας τάξης μεγέθους και η αντλία ιόντων $Na^+ - K^+$ φαίνεται ότι είναι η ίδια.

Παρ' όλα αυτά, ο καρδιακός παλμός διαφέρει από το νευρικό παλμό σε αρκετά σημεία :

1. Το οροπέδιο διαρκεί πολύ περισσότερο από το αντίστοιχο του νευρικού κυττάρου.
2. Το φαινόμενο του βηματοδότη συμβαίνει στο νευρικό κύτταρο κάτω από ειδικές συνθήκες.
3. Μία μέτρηση της σύνθετης αντίστασης της μεμβράνης καθ' όλη τη διάρκεια του καρδιακού παλμού αποκαλύπτει μία αύξηση κατά την επαναπόλωση η οποία μερικές φορές ξεπερνά εκείνη που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια ηρεμίας.

4.5. Διάδοση της κυτταρικής ενεργοποίησης

Τα καρδιακά κύτταρα δεν έχουν κανονικό σχήμα, αλλά οι διαστάσεις τους είναι 15 μικρά πάχος, 15 μικρά πλάτος και 100 μικρά μήκος. Τα κύτταρα είναι τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο όπως περίπου τα τούβλα σε μία κατασκευή. Οι πλασματικές μεμβράνες των κυττάρων που συνδέονται στα άκρα τους σχηματίζουν την κατασκευή του παρεμβαλλόμενου δίσκου. Μέσα σε κάθε κύτταρο τα μικρά νημάτια του μυ προσκολλώνται στον παρεμβαλλόμενο δίσκο και είναι παράλληλα προς τον άξονα του κυττάρου, διακόπτονται μόνο κατά μήκος του άξονα z.

Εκτός από το κανονικό ενδοκυττάριο κενό των 200 \AA μεταξύ των προσκολλώμενων πλασματικών μεμβρανών, υπάρχουν και άλλοι τρόποι επαφής μεταξύ των κυττάρων. Ένας απ' αυτούς είναι και ο λεγόμενος συνδετικός κρίκος. Αυτός ο τρόπος επαφής προέρχεται από τη συγκόληση των μεμβρανών γειτονικών κυττάρων κατά μήκος των εξωτερικών τους τμημάτων και πιστεύεται ότι αποτελεί μία σύνδεση χαμηλής αντίστασης.

Σε μεγαλύτερη κλίμακα τα καρδιακά κύτταρα σχηματίζουν δέσμες με διάμετρο περίπου έξη κυττάρων σε μήκος οι οποίες ονομάζονται δοκίδες. Οι δέσμες αυτές αναφύονται, διαιρούνται και τείνουν να σχηματίσουν μεγαλύτερες δέσμες, οι διαστάσεις των οποίων είναι της τάξης των χιλιοστών. Αυτές με τη σειρά τους διακλαδίζονται, ξανασχηματίζονται και δημιουργούν το μυοκάρδιο.

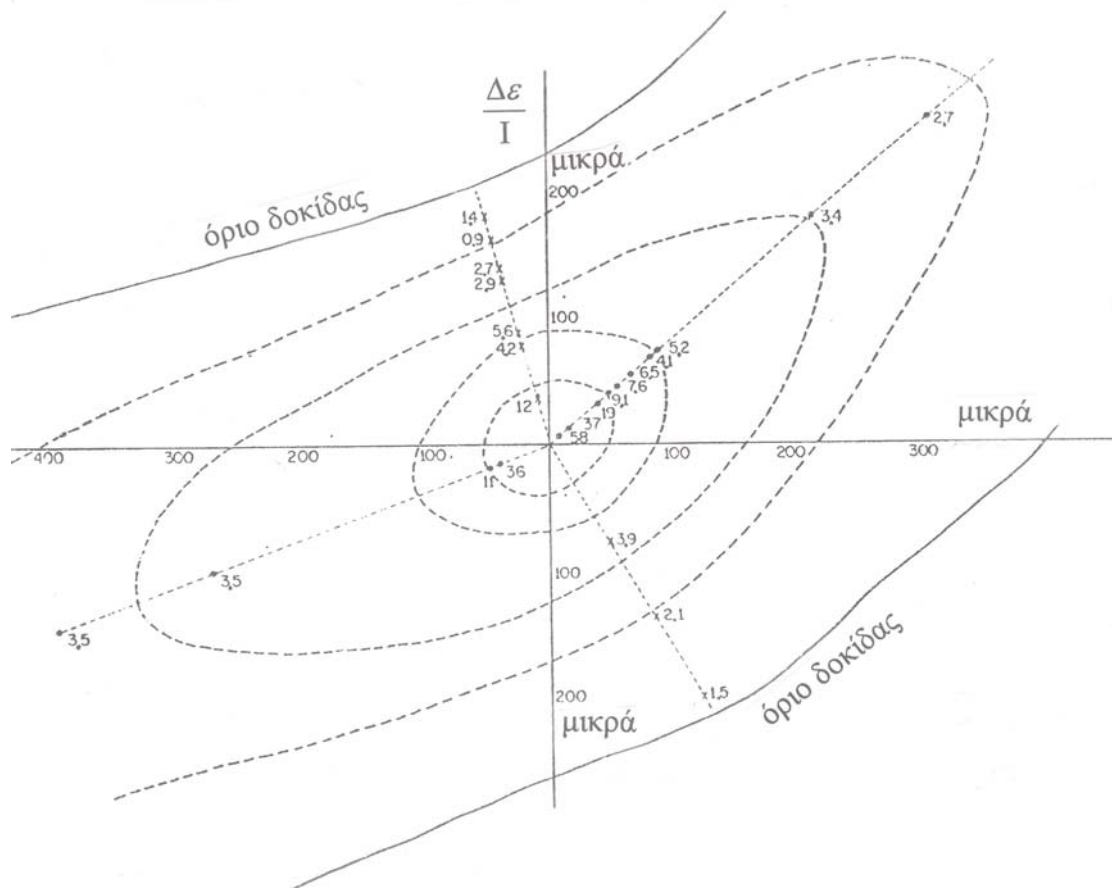
Η ενεργοποίηση που άρχισε σ' ένα κύτταρο του μυοκαρδίου μεταδίδεται στα παραπλήσια κύτταρα μέχρι την ενεργοποίησή τους. Η ενεργοποίηση στην επιφάνεια της μεμβράνης ενός κυττάρου είναι η ίδια μ' αυτή του νευρικού κυττάρου. Υπάρχει όμως κάποιο ερώτημα σχετικά με το πως γίνεται η μετάδοση της ενεργοποίησης μεταξύ των κυττάρων. Οι περισσότερες θεωρίες υποστηρίζουν ότι ο συνδετικός

κρίκος στον παρεμβαλλόμενο δίσκο είναι μία περιοχή υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας που επιτρέπει μία αρκετά μεγάλη πυκνότητα ρεύματος να μεταδοθεί από ένα ενεργό κύτταρο σε μερικά γειτονικά. Αυτό το τοπικό ρεύμα επαρκεί για να εκπολώσει τα γειτονικά κύτταρα κατά τον ίδιο τρόπο που η ενεργοποίηση μεταδίδεται κατά μήκος της μεμβράνης του ίδιου κυττάρου.

Ένα σπουδαίο πείραμα που παρέχει ένδειξη για την ηλεκτρική μετάδοση μεταξύ των κυττάρων της καρδιάς πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την κολπική δοκίδα (βλέπε Σχ. 4.6). Επειδή η δοκίδα έχει πάχος 75 μικρά και μήκος 500 μέχρι 700 μικρά, το δυναμικό πεδίο που επακολουθεί θα είναι δύο διαστάσεων. Δηλαδή, αν υποθέσουμε ότι ο άξονας z είναι κάθετος προς την επιφάνεια, η έκταση της επιφάνειας είναι πολύ μεγάλη συγκρινόμενη με το πάχος, οπότε αναμένουμε οι μεταβολές του δυναμικού ως προς τον άξονα z να είναι αμελητέες. Αυτό σημαίνει ότι η ένταση του πεδίου είναι μία συνάρτηση των πολικών συντεταγμένων ρ , φ και μπορεί να χαρακτηριστεί ότι προέρχεται από ένα λεπτό φύλλο καρδιακών κυττάρων που συνδέονται μαζί στους παρεμβαλλόμενους δίσκους. Αν οι δίσκοι αυτοί αποτελούν συνδέσεις χαμηλής αντίστασης, το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται απ' ένα επίπεδο κύτταρο με το ίδιο πάχος και δύο μεμβρανικές επιφάνειες πάνω και κάτω. Για ένα τέτοιο κύτταρο που βρίσκεται σε εξωκυττάριο μέσο μεγάλης έκτασης, όπου η εξωτερική αντίσταση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε σύγκριση με την ενδοκυττάριο αντίσταση, ο νόμος του *Ohm* μπορεί να εφαρμοσθεί για να υπολογίσουμε τις λεγόμενες "καλωδιακές εξισώσεις" (*cable equations*), οι οποίες είναι κατάλληλες για τη γεωμετρία των δύο διαστάσεων :

$$\frac{\partial V}{\partial \rho} = \frac{I(\rho)}{2\pi r \sigma d} \quad , \quad (4.1)$$

όπου V είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού της μεμβράνης, $I(\rho)$ είναι το ολικό εσωτερικό ρεύμα σε ακτίνα ρ (θετικό είναι ακτινικά προς τα μέσα), σ είναι η κυτταροπλαστική αγωγιμότητα και d είναι το πάχος του κυττάρου.



Σχήμα 4.6. Ισοδυναμικές γραμμές κολπικής περιοχής της καρδιάς ενός ποντικού. Ένα ρεύμα εφαρμόζεται στον ιστό μέσω ενός ενδοκυττάριου ηλεκτροδίου που τοποθετείται στην αρχή των αξόνων. Οι επακολουθούσες αλλαγές στο δυναμικό ($\Delta\epsilon$) μετρούνται μ' ένα άλλο ενδοκυττάριο ηλεκτρόδιο στα σημεία που σημειώνονται με τελείες ή x's. Οι τελείες δηλώνουν μετρήσεις που πραγματοποιούνται κατά μήκος ακτινικών δρόμων παράλληλων προς το άκρο της δοκίδας και τα x's δηλώνουν μετρήσεις που γίνονται κάθετα προς το άκρο της δοκίδας. Ο αριθμός που αναγράφεται σε κάθε σημείο είναι ο λόγος $\Delta\epsilon/I$ σε μονάδες $mV/\mu A$, όπου I είναι το μέγεθος του εφαρμοζόμενου ρεύματος. Οι διακεκομμένες γραμμές αποτελούν προσεγγιστικά ισοδυναμικές γραμμές. Από το εσωτερικό στο εξωτερικό οι ισοδυναμικές γραμμές έχουν τιμές 10, 5, 3.5 και 2.5 $mV/\mu A$ αντίστοιχα. Ας σημειωθεί ότι το ρεύμα μεταδίδεται αρκετά μακρύτερα στη κατεύθυνση που είναι παράλληλη προς το όριο της δοκίδας απ' ό,τι στην κάθετη προς αυτή.

Η σχέση (4.1) προκύπτει ως εξής :

Από το νόμο του *Ohm* έχουμε ότι $\vec{J} = g \vec{E}$. Γνωρίζουμε επίσης ότι η ένταση του πεδίου σε κυλινδρικές συντεταγμένες δίνεται από τη σχέση

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V = -\left(\frac{\partial V}{\partial \rho} \hat{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial \phi} \hat{\phi} + \frac{\partial V}{\partial z} \hat{z}\right) \quad (4.2)$$

Επειδή το δυναμικό είναι αμελητέο ως προς τον άξονα z θα ισχύει $\frac{\partial V}{\partial z} = 0$. Επίσης

λόγω κυλινδρικής συμμετρίας έχουμε $\frac{\partial V}{\partial \varphi} = 0$.

Επομένως

$$\vec{E} = -\frac{\partial V}{\partial \rho} \hat{\rho} \quad (4.3)$$

Η πυκνότητα ρεύματος θα δίνεται από τη σχέση

$$\vec{J} = \frac{I}{S} (-\hat{\rho}) = -\frac{I}{2\pi\rho d} \hat{\rho} \quad (4.4)$$

Το μείον στην (4.4) προκύπτει από το γεγονός ότι το ρεύμα είναι θετικό προς τα μέσα. Από τις (4.3) και (4.4) έχουμε

$$\frac{I(\rho)}{2\pi\rho d} = \sigma \frac{\partial V}{\partial \rho} \Rightarrow \frac{\partial V}{\partial \rho} = \frac{I(\rho)}{2\pi\rho\sigma d} \quad (4.4)$$

όπου στο νόμο του *Ohm* θέσαμε $g = \sigma$.

Αν θεωρήσουμε ότι i_m είναι το ρεύμα που διέρχεται μέσα από τη μεμβράνη ανά μονάδα επιφάνειας (με κατεύθυνση προς τα έξω), τότε

$$i_m = \frac{1}{2\pi\rho} \frac{\partial I}{\partial \rho} \quad (4.5)$$

Η (4.5) μπορεί προσεγγιστικά να γραφεί στην ακόλουθη μορφή

$$I(\rho) \cong I(\rho + \Delta\rho) - i_m 2\pi\rho \Delta\rho.$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι το ολικό ρεύμα σε ακτίνα ρ ισούται με το ολικό ρεύμα σε ακτίνα $\rho + \Delta\rho$ μείον το ρεύμα που διέρχεται από την επιφάνεια $2\pi\rho\Delta\rho$ με κατεύθυνση προς τα έξω.

Αν τώρα παραγωγίσουμε την (4.1) ως προς ρ βρίσκουμε

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} = -\frac{I}{2\pi\rho^2\sigma d} + \frac{\partial I / \partial \rho}{2\pi\rho\sigma d} \quad (4.6)$$

Αντικαθιστώντας την (4.5) στην (4.6) επιτυγχάνουμε

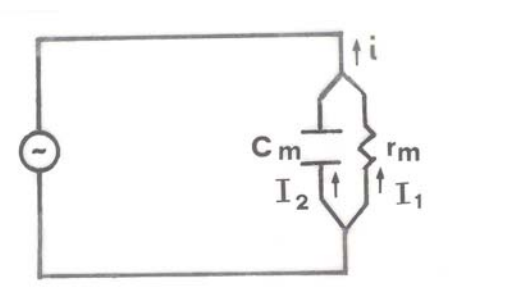
$$\frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} = -\frac{2\pi\rho\sigma d}{2\pi\rho^2\sigma d} \frac{\partial V}{\partial \rho} + \frac{2\pi\rho i_m}{2\pi\rho\sigma d} \quad (4.7)$$

$$\text{ή} \quad \frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial \rho} = \frac{i_m}{\sigma d} \quad (4.8)$$

Αν χρησιμοποιήσουμε το πλέγμα μεμβράνης, τότε i_m και V μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της αντίστασης r_m και της χωρητικότητας C_m (η χωρητικότητα και η αντίσταση θεωρούνται για μια μοναδιαία επιφάνεια) καθώς

$$\frac{i_m}{2} = \frac{V}{r_m} + C_m \frac{\partial V}{\partial t}, \quad (4.9)$$

όπου με $i_m/2$ λαμβάνουμε υπόψη το ρεύμα που διέρχεται εξ ίσου μέσα από τις δύο επιφάνειες (άνω και κάτω) της μεμβράνης.

 <p>Σχήμα 4.7. Παράταση της μεμβράνης σαν ένα κύκλωμα που περιέχει μία σύνθετο αντίσταση.</p>	<p>Το αποτέλεσμα αυτό επιτυγχάνεται εάν θεωρήσουμε τη μεμβράνη σαν ένα κύκλωμα που παριστάνεται στο Σχ.4.7. Το ρεύμα που ρέει μέσω του κυκλώματος δίνεται από τη σχέση $i = I_1 + I_2$. Για τα ρεύματα I_1 και I_2 έχουμε ότι $I_1 = \frac{V}{r_m}$ και $I_2 = \frac{dQ}{dt} = C_m \frac{\partial V}{\partial t}$ επειδή $Q = C_m V$.</p>
---	---

Επομένως

$$\frac{i_m}{2} = i = \frac{V}{r_m} + C_m \frac{\partial V}{\partial t}, \quad (4.10)$$

Αν τώρα αντικαταστήσουμε την (4.9) στην (4.7) βρίσκουμε μετά από κάποιες αλγεβρικές πράξεις

$$\lambda^2 \left(\frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial \rho} \right) - V - \tau \frac{\partial V}{\partial t} = 0, \quad (4.11)$$

όπου $\lambda = \sqrt{\frac{\sigma d r_m}{2}}$ και $\tau = r_m C_m$.

Η ποσότητα $l/\sigma d$ μπορεί να θεωρηθεί ως η αντίσταση μιας τομής κυτταροπλάσματος μοναδιαίου μήκους και μοναδιαίου πλάτους (πάχους d) και θέτοντας $r_c = \frac{1}{\sigma d}$

παίρνουμε $\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{2r_c}}$. Υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης έχουμε $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$ και η

(4.10) παίρνει τη μορφή της εξίσωσης *Bessel*, δηλ.

$$\frac{d^2 V}{d \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d V}{d \rho} - \frac{V}{\lambda^2} = 0 \quad (4.12)$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής δίνεται από τη σχέση

$$V(\rho) = A K_0 \left(\frac{\rho}{\lambda} \right) + B I_0 \left(\frac{\rho}{\lambda} \right), \quad (4.13)$$

όπου I_0 και K_0 είναι οι τροποποιημένες συναρτήσεις *Bessel* μηδενικής τάξης του πρώτου και του δευτέρου είδους αντίστοιχα. Επειδή το I_0 αυξάνει απεριόριστα όταν το ρ αυξάνει μπορούμε να θέσουμε $B=0$. Ας σημειωθεί ότι η συνάρτηση K_0 έχει μία ανωμαλία όταν $\rho \rightarrow 0$, η οποία αντιστοιχεί στην υπόθεση μιας γραμμικής πηγής ρεύματος στη θέση αυτή. Η δύναμη της πηγής μετρείται από τη σταθερά A . Στο Σχ. 4.8 περιγράφεται η λύση της εξίσωσης *Bessel* με τη συμπαγή γραμμή η οποία προσαρμόζεται στα πειραματικά δεδομένα (τελείες) για $\lambda = 170\mu$, $d = 15\mu$, $r_m = 4000 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$ και $\sigma = 0.01 \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Μετρήσεις που έγιναν σε γωνίες κάθετες προς τα όρια της δοκίδας μπορούν εξίσου καλά να προσαρμοσθούν από τη λύση (4.12) της εξίσωσης *Bessel*. Στην περίπτωση αυτή η σταθερά λ είναι λίγο μεγαλύτερη από το μισό της τιμής που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη περίπτωση (δηλ. στην περίπτωση που οι μετρήσεις έγιναν παράλληλα προς τα όρια της δοκίδας).

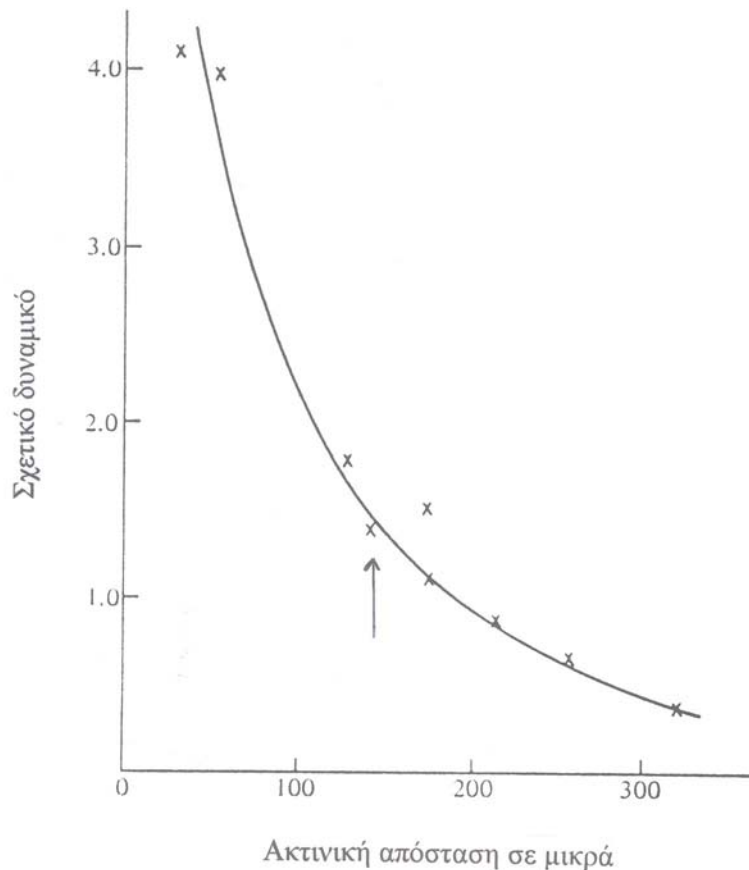
Η μετάδοση της δραστηριότητας στα καρδιακά κύτταρα είναι ηλεκτροτονική, αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα που ρέει τοπικά διαμέσου της μεμβράνης ενός κυττάρου πρέπει σημαντικά να επηρεάζει τα δυναμικά των μεμβρανών γειτονικών κυττάρων. Η απόδειξη της ηλεκτρονικής μετάδοσης του ρεύματος στον καρδιακό μυ είναι δυσκολότερο να μετρηθεί πειραματικά και να ερμηνευθεί θεωρητικά από παρόμοια συμβάντα σε νευρικές ή σκελετικές μυϊκές ίνες, επειδή το ρεύμα διαδίδεται σε δύο ή τρεις διαστάσεις στην καρδιά και σε μία μόνο διάσταση στα νευρικά κύτταρα και στους σκελετικούς μυς. Η ανωτέρω ανάλυση με τη βοήθεια της επίλυσης της εξίσωσης *Bessel* μας βοηθάει να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- (α) Ένα εφαρμοζόμενο ρεύμα ενδοκυττάρια παράγει σημαντικές μεταβολές στα δυναμικά των μεμβρανών σε παραπλήσια καρδιακά κύτταρα.
- (β) Το ρεύμα διαδίδεται περίπου δύο φορές μακρύτερα σε κατευθύνσεις παράλληλες προς τα όρια της δοκίδας απ' ότι σε κάθετες κατευθύνσεις, δηλ. οι ισοδυναμικές γραμμές είναι περίπου ελλειπτικές με το μεγάλο άξονα παράλληλο προς το όριο της δοκίδας (βλέπε Σχ. 4.6).
- (γ) Η πτώση του δυναμικού της σταθερής κατάστασης σε σχέση με την ακτινική απόσταση από το σημείο εφαρμογής του ρεύματος μέσω του ηλεκτροδίου είναι πιο απότομη από την εκθετική, όπως θα αναμενόταν για μια σημειακή πηγή ρεύματος που μεταδίδεται σε δύο διαστάσεις (βλέπε Σχ. 4.8).

4.6. Εισαγωγή στο ηλεκτροκαρδιογράφημα (ECG)

Λόγω της ηλεκτρικής δραστηριότητας του καρδιακού μυ έχουμε την εμφάνιση ενός ηλεκτρικού πεδίου στην αγωγίμη περιοχή του σώματος που περιβάλλει την καρδιά. Τα δυναμικά που εμφανίζονται στην επιφάνεια του σώματος σαν επακόλουθα της καρδιακής δραστηριότητας είναι γνωστά σαν ηλεκτρο-καρδιογράφημα (*ECG*).

Η δημιουργία του *ECG* μελετάται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται, κατά κάποιο τρόπο, ο καθορισμός των πηγών των ρευμάτων στην καρδιά. Επιπλέον μπορούμε να καθορίσουμε την κατανομή της διπολικής ροπής ανά μονάδα όγκου \vec{J}_i . Μία απλή προσέγγιση στο πρόβλημα μας είναι να υπολογίσουμε το άθροισμα όλων των διανυσμάτων των διπολικών στοιχείων $\vec{J}_i dV$. Δηλαδή, σχηματίζουμε το



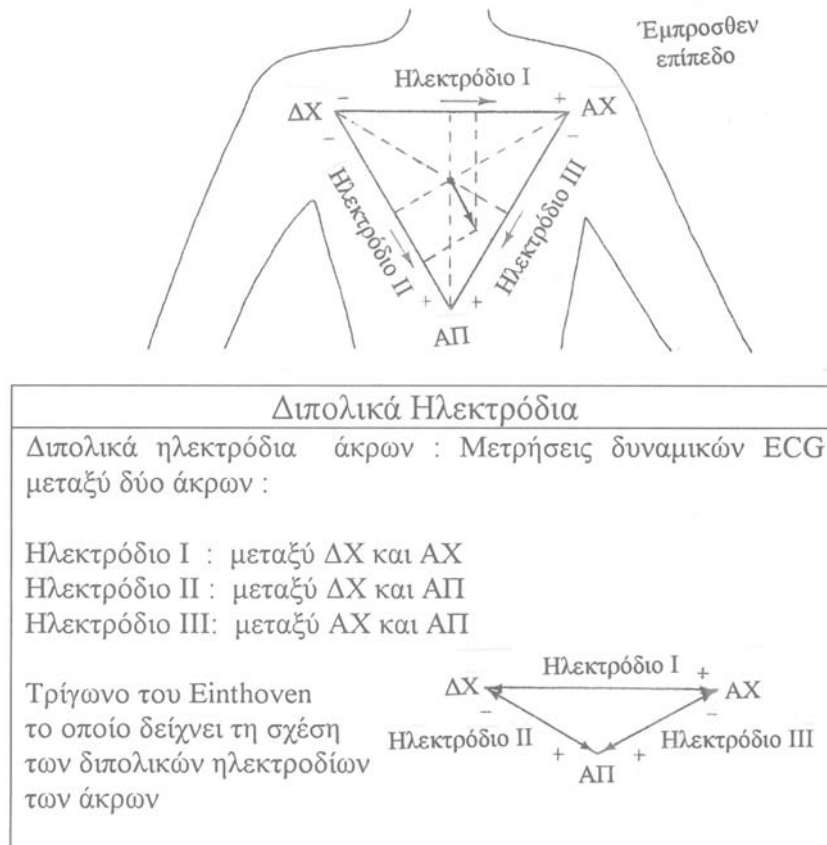
Σχήμα 4.8. Χωρική ελάττωση του ηλεκτροτονικού δυναμικού της κοιλιακής περιοχής ενός ποντικού. Η κάθετος συνιστώσα παριστάνει τη μεταβολή στο δυναμικό της μεμβράνης ($\Delta\epsilon$) στο εφαρμοζόμενο ρεύμα I_s . Η οριζόντια συνιστώσα συμβολίζει την απόσταση από ένα ενδοκυττάριο ηλεκτρόδιο με το οποίο εφαρμόζεται ρεύμα κατά μήκος ακτινικών δρόμων παράλληλων προς το άκρο της δοκίδας. Οι τελείες παριστάνουν σημεία που υπολογίσθηκαν από την εκτέλεση ενός πειράματος. Η συμπαγής γραμμή δίνει τη θεωρητική καμπύλη του δυναμικού ως προς την ακτινική απόσταση για ένα απλό επίπεδο κύτταρο. Η σταθερά (λ) δείχνεται με το βέλος ότι αντιστοιχεί στην τιμή 170 μ . Η θεωρητική καμπύλη υπολογίζεται από την εξίσωση του Bessel για $d=15 \mu$, $r_m = 400 \text{ Ohm.cm}^2$ και $\sigma = 0.01 \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

διάνυσμα $\vec{p} = \int_V \vec{J}_i dV$ και θεωρούμε ότι αυτό το απλό δίπολο παριστάνει την ηλεκτρική δραστηριότητα της καρδιάς. Σχεδόν όλη η κλινική ηλεκτροκαρδιογραφία βασίζεται σ' αυτό το γεγονός.

Στο δεύτερο μέρος της μελέτης του *ECG* γίνεται ο καθορισμός των επιφανειακών δυναμικών που οφείλονται στο δίπολο της καρδιάς. Στην ανάλυση αυτή το σώμα θεωρείται γραμμικό, ομογενές, ομοιόμορφο και ιστροπικό, όχι ιδιαίτερα καλές προϋποθέσεις, οι οποίες όμως δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

4.7. Κανονικά ηλεκτρόδια του Einthoven

Η πρώτη μελέτη στην ηλεκτροκαρδιογραφία έγινε από τον *Einthoven*, ο οποίος ανέπτυξε ένα σύστημα ηλεκτροδίων που τοποθετούνται στις άκρες του



Σχήμα 4.9. Διπολικά ηλεκτρόδια του Einthoven που τοποθετούνται στα τρία άκρα ΔX, ΑΧ και ΑΠ.

ανθρωπίνου σώματος με σκοπό να ανεβάσει το κύρος του καρδιακού διπολικού μοντέλου. Στο Σχ. 4.9 διακρίνονται τα ηλεκτρόδια του Einthoven στα άκρα ΔX (δεξί χέρι), ΑΧ (αριστερό χέρι) και ΑΠ (αριστερό πόδι). Επίσης δείχνονται και οι φορές των ηλεκτροδίων.

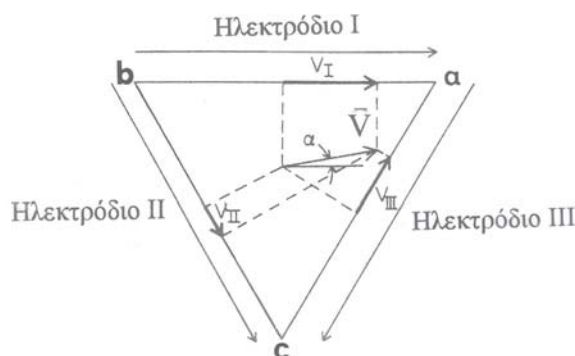
Θα εξετάσουμε το σύστημα αυτό των ηλεκτροδίων, το οποίο παρά τις ανεπάρκειες του αποτελεί το πλέον κοινό κλινικό σύστημα. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται στο σύστημα αυτό είναι γνωστά σαν κανονικά ηλεκτρόδια του *Einthoven*. Ορίζουμε τα δυναμικά V_I , V_{II} και V_{III} σαν τα κανονικά ηλεκτρόδια του *Einthoven*. Αυτά ορίζονται από τις σχέσεις

$$V_I = V_{ab} , \quad V_{II} = V_{cb} \quad \text{και} \quad V_{III} = V_{ca} \quad (4.14)$$

όπου a αντιστοιχεί στο άκρο AX , b στο άκρο $ΔX$ και c στο άκρο $ΑΠ$. Με V_{ab} συμβολίζουμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων a και b .

Από το νόμο *Kirchoff* για τα δυναμικά έχουμε

$$V_{ca} + V_{ab} = V_{cb} \Rightarrow V_{III} + V_I = V_{II} \quad (4.15)$$



Σχήμα 4.10. Το τρίγωνο του Einthoven. Οι θετικές φορές των ηλεκτροδίων παριστάνονται με τις φορές των βελών.

Η εξίσωση (4.15) μπορεί να υπολογισθεί με τις ακόλουθες διανυσματικές σχέσεις στο ισόπλευρο τρίγωνο του Einthoven (βλέπε Σχ. 4.10). Θεωρούμε ένα διάνυσμα του \vec{V} οποιού η αρχή είναι στο κέντρο του τριγώνου ενώ η αρχή για κάθε ηλεκτρόδιο είναι η προβολή στην αντίστοιχη πλευρά. Θετικές κατευθύνσεις των ηλεκτροδίων λαμβάνονται όπως δείχνεται στο Σχ. 4.10. Οπότε έχουμε

$$V_I = V \cos a$$

$$V_{II} = V \cos(60^\circ + a) = \frac{V}{2} \cos a - \frac{\sqrt{3}}{2} V \sin a$$

$$V_{III} = -V \sin(30^\circ + a) = -\frac{V}{2} \cos a - \frac{\sqrt{3}}{2} V \sin a$$

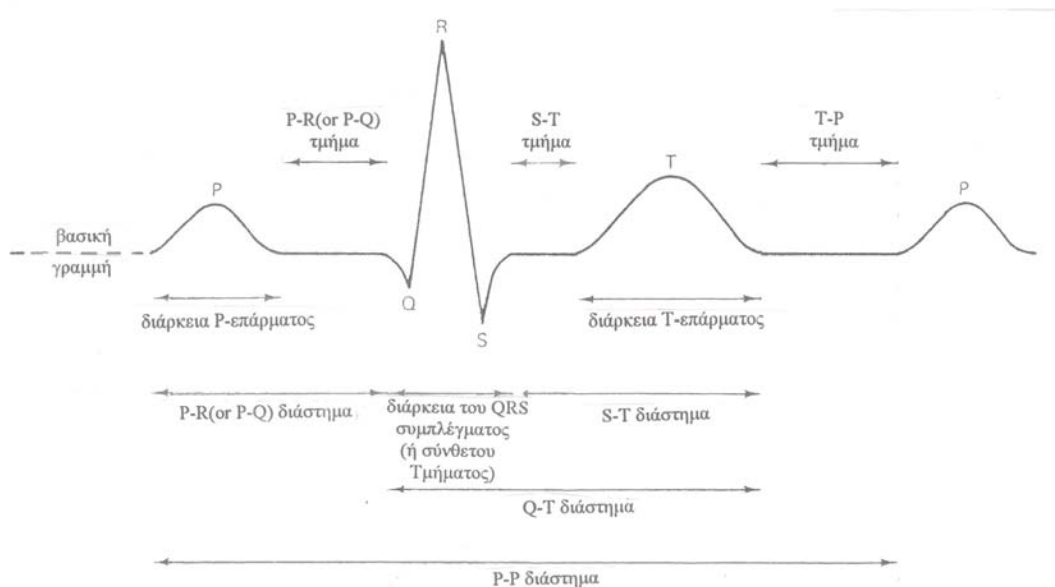
Από τις σχέσεις αυτές προκύπτει ότι

$$V_{III} + V_I = +\frac{V}{2} \cos a - \frac{\sqrt{3}}{2} V \sin a = V_{II}$$

Το διάνυσμα V περιέχει όλη την πληροφορία των τριών διαφορετικών συνιστωσών V_I , V_{II} και V_{III} . Η κατεύθυνση και το μέγεθος του V αλλάσσει με το ρυθμό της καρδιάς και επομένως η τιμή κάθε ηλεκτροδίου αλλάσσει με το χρόνο. Η κατεύθυνση του V , όταν παριστάνεται γραφικά σε χαρακτηριστικές στιγμές του καρδιακού κύκλου, βρέθηκε ότι αποτελεί ένα σημαντικό διαγνωστικό μέσο. Αν η θετική γωνία α μετρηθεί κατά τη φορά των δεικτών του ωρολογίου από την οριζόντιο, τότε ονομάζεται ηλεκτρικός άξονας. Στο κανονικό ηλεκτροκαρδιογράφημα $0 < \alpha < 90^\circ$. Στο Σχ. 4.9 η γωνία α είναι αρνητική, μία συνθήκη που αναφέρεται σαν απόκλιση του αριστερού άξονα. Για $\alpha > 90^\circ$ η συνθήκη αναφέρεται σαν απόκλιση του δεξιού άξονα.

Στο ηλεκτροκαρδιογράφημα (βλέπε Σχ. 4.11) οι σημαντικές ποσότητες είναι τα ύψη P , Q , R , S και T των επαρμάτων, οι διάρκειες τους και τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των επαρμάτων. Το χρονικό σημείο αναφοράς εκλέγεται συνήθως ως η κορυφή του R επάρματος και η διάρκεια του καρδιακού κύκλου είναι το διάστημα RR .

- (α) Το έπαρμα P προκαλείται από ηλεκτρικά ρεύματα που παράγονται καθώς οι κόλποι εκπολώνονται πριν από τη συστολή τους.
- (β) Το QRS προκαλείται από ηλεκτρικά ρεύματα που παράγονται όταν οι κοιλίες εκπολώνονται πριν από τη συστολή τους.



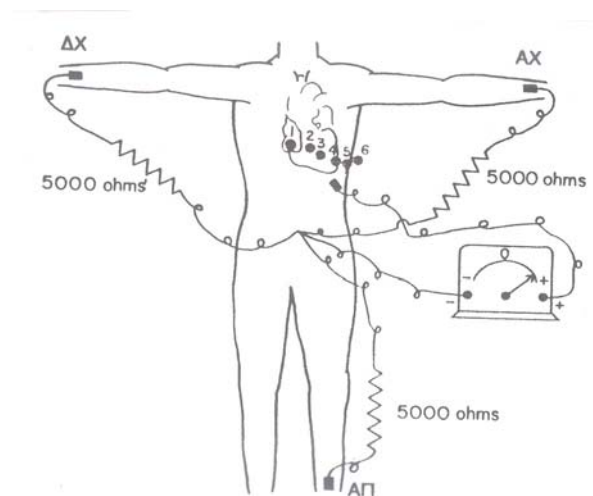
Σχήμα 4.11. Σημαντικά χαρακτηριστικά ενός κανονικού ηλεκτροκαρδιογραφήματος.

- (γ) Το έπαρμα T προκαλείται από ρεύματα που παράγονται καθώς οι κοιλίες επαναπολώνονται πριν από τη διαστολή τους.
- (δ) Το διάστημα PR είναι ένα μέτρο του AV χρόνου αγωγιμότητας και παραμορφώσεις με την αγωγιμότητα σχετίζονται με το διάστημα αυτό.
- (ε) Η βασική γραμμή δίνεται από το τμήμα PT . Το σχετικό επίπεδο του τμήματος ST είναι ένα σπουδαίο διαγνωστικό μέτρο.
- (στ) Το διάστημα QT δίνει την ολική διάρκεια της κοιλιακής συστολής.

Η ανάλυση του ECG είναι πολύτιμη στη διάγνωση των διαταράξεων του καρδιακού ρυθμού και της αγωγιμότητας, στην αύξηση των καρδιακών κοιλοτήτων, στην ισχαιμία (ή νέκρωση του καρδιακού μυ), σε ασθένειες που οφείλονται σε μολύνσεις λόγω τοξικών χημικών ουσιών ή ναρκωτικών και στην ασθένεια του περικαρδίου. Το ECG δείχνει επίσης χαρακτηριστικές αλλαγές στην παρουσία πλεονασμού ή έλλειψης ιόντων καλίου, ασβεστίου και μαγνησίου.

4.8. Προκάρδιες καταγραφές

Σύμφωνα με τη μέθοδο των ηλεκτροδίων μπορούμε να κατασκευάσουμε την ακόλουθη διάταξη (Σχ. 4.12), όπου η καταγραφή του ECG γίνεται με την τοποθέτηση ενός ηλεκτροδίου στο πρόσθιο θωρακικό τοίχωμα πάνω στην καρδιά σε έξι διαφορετικές θέσεις.



Σχήμα 4.12. Το ECG όπως εφαρμόζεται στην πράξη με τις προκάρδιες καταγραφές.

Το άλλο άκρο του ηλεκτροδίου συνδέεται στο θετικό τερματικό βύσμα του ηλεκτροκαρδιογράφου. Το δεύτερο ηλεκτρόδιο που λέγεται ουδέτερο, συνδέεται ταυτόχρονα με τρεις ίσες ηλεκτρικές αντιστάσεις, στο δεξί χέρι, στο αριστερό χέρι και στο αριστερό πόδι. Το άλλο άκρο του ηλεκτροδίου αυτού συνδέεται με το αρνητικό τερματικό βύσμα. Συνήθως από το πρόσθιο θωρακικό τοίχωμα καταγράφονται έξι διαφορετικές τυπικές μορφές του ECG με αντίστοιχη τοποθέτηση του θωρακικού ηλεκτροδίου στα έξι σημεία του θώρακα. Οι διάφορες μορφές του ECG που καταγράφονται με τη μέθοδο αυτή είναι γνωστές ως προκάρδιες καταγραφές V_1 , V_2 , V_3 , V_4 , V_5 , και V_6 .

Επειδή η επιφάνεια της καρδιάς βρίσκεται κοντά στο θωρακικό τοίχωμα, κάθε προκάρδια καταγραφή δίνει κυρίως το ηλεκτρικό δυναμικό του τμήματος του μυοκαρδίου που βρίσκεται αμέσως κάτω από το ηλεκτρόδιο. Κατά συνέπεια και οι σχετικά μικρές διαταραχές των κοιλιών, ιδιαίτερα του προσθίου τοιχώματος τους, προκαλούν έκδηλες αλλοιώσεις του ECG οι οποίες δίνονται από τις προκάρδιες καταγραφές.

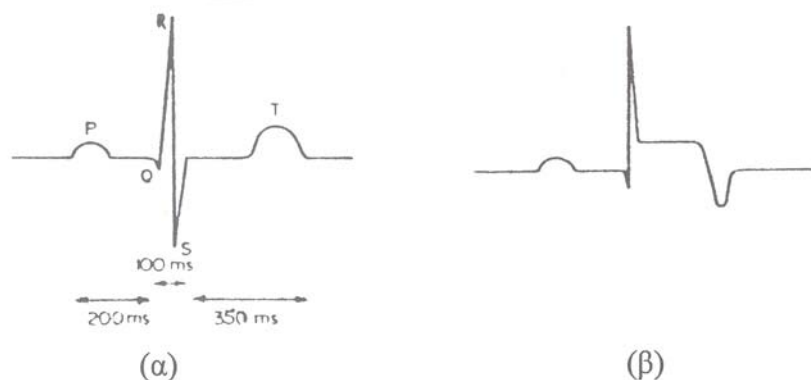
4.9. Εφαρμογές του ECG στην Ιατρική

Οι διακλαδώσεις της στεφανιαίας αρτηρίας μεταφέρουν αίμα στους μυς της καρδιάς. Αν μερικές από τις διακλαδώσεις αυτές μπλοκαρισθούν, τότε οι μυς της καρδιάς δεν οξυγονώνονται και αυτό προκαλεί ισχυρότατη στηθάγχη (έντονους πόνους στο στήθος). Σε πολλές περιπτώσεις τα κύτταρα του μυ πεθαίνουν, προκαλώντας έμφραγμα του μυοκαρδίου.

Μέσα σ' ένα μικρό χρονικό διάστημα από την έμφραξη της στεφανιαίας αρτηρίας και την παραγωγή της ανεπάρκειας του μυοκαρδίου, το τμήμα *ST* του ECG ανυψώνεται (περίπου 10 mm από τη βασική γραμμή). Κατόπιν το *Q* έπαρμα βαθαίνει και το *T* έπαρμα αντιστρέφεται (βλέπε Σχ. 4.13).

Μία πρόσφατη τεχνική που ονομάζεται διαμυοκαρδιακή επαναγγείωση (*transmyocardial revascularisation*) χρησιμοποιεί *Λείζερ* προηγμένης τεχνολογίας για να διαπεράσει το μυοκάρδιο, μέσα από τη δίοδο 12-15 μικροσκοπικών καναλιών και να φθάσει στην αριστερή κοιλία της καρδιάς. Αυτά τα κανάλια επιτρέπουν το αίμα να

κυκλοφορήσει από την κοιλία στο μυοκάρδιο, όπου οι μπλοκαρισμένες αρτηρίες



Σχήμα 4.13. (α) Το ECG ενός φυσιολογικού ανθρώπου. (β) Το ECG σε οξύ έμφραγμα του μυοκαρδίου το οποίο δείχνει ανύψωση του τμήματος ST και αντιστροφή του επάρματος T.

εμποδίζουν τη σωστή κυκλοφορία του οξυγόνου. Το αίμα, όταν έρχεται σε επαφή με τον αέρα πήζει, με αποτέλεσμα να κλείσουν οι απολήξεις των καναλιών, εμποδίζοντας έτσι τη ροή του αίματος στην καρδιά.

Τα διάφορα στάδια της μεθόδου αυτής μπορούν να περιγραφούν ως εξής :

- 1) Γίνεται μία χειρουργική τομή 10 εκατοστών ανάμεσα στα πλευρά προκειμένου να έχουμε πρόσβαση στην αριστερή κοιλία της καρδιάς.
- 2) Η απόληξη του Λείζερ τοποθετείται πάνω από την κοιλία. Το Λείζερ (στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται Λείζερ του διοξειδίου του άνθρακα) που ελέγχεται από τον υπολογιστή, "πυροβολεί" μία ακτίνα ισχύος 1000 Watt μεταξύ των κτύπων της καρδιάς του ασθενούς, όταν ακόμη η κοιλία είναι γεμάτη με αίμα. Και αυτό, επειδή η ακτίνα Λείζερ διασκορπίζεται από τα υγρά στοιχεία, επομένως όταν η κοιλία είναι γεμάτη από αίμα, η καρδιά προστατεύεται από την καθολική ισχύ του Λείζερ.
- 3) Η ακτίνα Λείζερ ανοίγει σε τμήμα του μυοκαρδίου, που ισχαιμεί, περίπου 12 με 15 τρύπες με διάμετρο ενός χιλιοστού εκάστη.
- 4) Η αριστερή κοιλία συσπάται διοχετεύοντας έτσι με δύναμη αίμα στις τρύπες. Το αίμα περνάει πλαγίως στα κύτταρα του μυ και τα οξυγονώνει.
- 5) Η τρύπα σταματά να αιμορραγεί μέσα σε λίγα λεπτά. Οι μικρές ουλές επουλώνονται μέσα σε δύο ημέρες.

Η διαδικασία αυτή εξαλείφει την ανάγκη για καθετηριασμό μέσα από φλέβες ή αρτηρίες, ή τη χρήση καρδιοπνευμονικού μηχανήματος. Η μέθοδος αυτή είναι

πρωτοποριακή και γίνεται προς το παρόν όταν πλέον δεν μπορεί να εφαρμοσθεί μία από τις κλασικές μεθόδους.

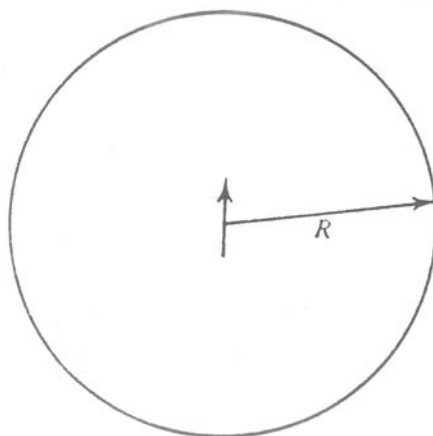
Η κυνάγχη είναι ασθένεια της καρδιάς που συνοδεύεται από διαστήματα έντονου πόνου και συμβαίνει όταν οι απαιτήσεις σε οξυγόνο ξεπερνούν την προμήθεια. Παρότι το ECG σε κατάσταση ηρεμίας μπορεί να είναι φυσιολογικό, μετρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια και μετά από ασκήσεις κόπωσης αποκαλύπτουν την παρουσία της ασθένειας.

4.10 Κεντρικό διπολικό μοντέλο

Για ένα αρκετά εξιδανικευμένο κορμό σώματος που παριστάνεται σαν μία αγωγίμη σφαίρα και μ' ένα καρδιακό μοντέλο που αποτελείται από ένα κεντρικό δίπολο (βλέπε Σχ. 4.14), τα επιφανειακά δυναμικά μπορούν εύκολα να υπολογισθούν.

Το δυναμικό Φ ικανοποιεί την εξίσωση

$$\nabla^2 \Phi = 0, \quad (4.16)$$



Σχήμα 4.14 .Το κεντρικό διπολικό μοντέλο σε αγωγίμη σφαίρα.

υπό την προϋπόθεση

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right|_{r=R} = 0 \quad (4.17)$$

Οι λύσεις της (4.15) σε σφαιρικές συντεταγμένες, με $\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0$ λόγω συμμετρίας, δίνονται στη μορφή

$$\Phi = \sum_{n=0}^{\infty} \left[a_n r^n P_n(\cos \theta) + b_n r^{-(n+1)} P_n(\cos \theta) \right], \quad (4.18)$$

όπου με $P_n(\cos \theta)$ συμβολίζουμε τα πολυώνυμα *Legendre* τάξης n . Επειδή το δυναμικό είναι μία συνάρτηση ανάλογη του r^{-2} , εκλέγουμε $n=1$. Αυτό σημαίνει ότι όλοι οι συντελεστές $b_n = 0$ για $n \neq 1$. Λόγω της (4.16) θα πρέπει να έχουμε $a_n = 0$ για $n \neq 1$. Συνεπώς, επειδή $P_1(\cos \theta) = \cos \theta$ έχουμε

$$\Phi = ar \cos \theta + \frac{b}{r^2} \cos \theta \quad (4.19)$$

Από τη συνθήκη (4.16) βρίσκουμε

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right|_{r=R} = a \cos \theta - \frac{2b}{r^3} \cos \theta \Big|_{r=R} = 0 \Rightarrow a = \frac{2b}{R^3} \quad (4.20)$$

Αν αντικαταστήσουμε τώρα την (4.19) στην (4.18) παίρνουμε

$$\Phi = \frac{2br}{R^3} \cos \theta + \frac{b}{r^3} \cos \theta = \frac{b}{R^2} \cos \theta \left[\frac{2r}{R} + \left(\frac{R}{r} \right)^2 \right] \quad (4.21)$$

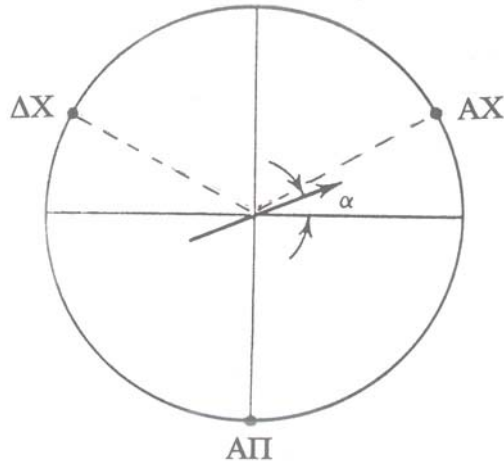
Το δυναμικό στην επιφάνεια της σφαίρας θα δίδεται από τη σχέση

$$\Phi = \frac{3b}{R^2} \cos \theta, \quad (4.22)$$

το οποίο αντιστοιχεί στο δυναμικό ενός σώματος με άπειρη επιφάνεια ($R \rightarrow \infty$).

Αν δεχθούμε την υπόθεση ότι τα σημεία $\theta=30^\circ$, $\theta=150^\circ$ και $\theta=270^\circ$ είναι τα AX , ΔX και $A\Pi$ αντίστοιχα, τότε τα δυναμικά που παράγονται από το κεντρικό δίπολο αυθαίρετου προσανατολισμού και μεγέθους είναι ακριβώς εκείνα που δίδονται από το

τρίγωνο του *Einthoven*. Αν θεωρήσουμε ένα διπολικό διάνυσμα τέτοιο ώστε $\frac{3b}{R^2} = 1$, το οποίο σχηματίζει μία γωνία a με την οριζόντιο και



Σχήμα 4.15. Προσομοίωση σφαιρικού μοντέλου στο σύστημα *Einthoven*.

χρησιμοποιήσουμε την (4.21) μπορούμε να υπολογίσουμε τα δυναμικά στις θέσεις των ηλεκτροδίων (βλέπε Σχ. 4.15).

$$\Phi_{\Delta X} = \cos(30^\circ - a) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cos a + \frac{1}{2} \sin a \quad (4.23)$$

$$\Phi_{\Delta X} = \cos(150^\circ - a) = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos a + \frac{1}{2} \sin a \quad (4.24)$$

$$\Phi_{\text{ΑΠ}} = \cos(270^\circ - a) = \cos(90^\circ + a) = -\sin a \quad (4.25)$$

Για ένα διάνυσμα με μέτρο $\frac{V}{\sqrt{3}}$ έχουμε

$$V_I = \frac{V}{\sqrt{3}} (\Phi_{\Delta X} - \Phi_{\Delta X}) = V \cos a$$

$$V_{II} = \frac{V}{\sqrt{3}} (\Phi_{\text{ΑΠ}} - \Phi_{\Delta X}) = \frac{V}{2} \cos a - \frac{\sqrt{3}}{2} V \sin a$$

$$V_{III} = \frac{V}{\sqrt{3}} (\Phi_{AII} - \Phi_{AX}) = -\frac{V}{2} \cos a - \frac{\sqrt{3}}{2} V \sin a$$

Επομένως $V_I + V_{III} = V_{II}$.

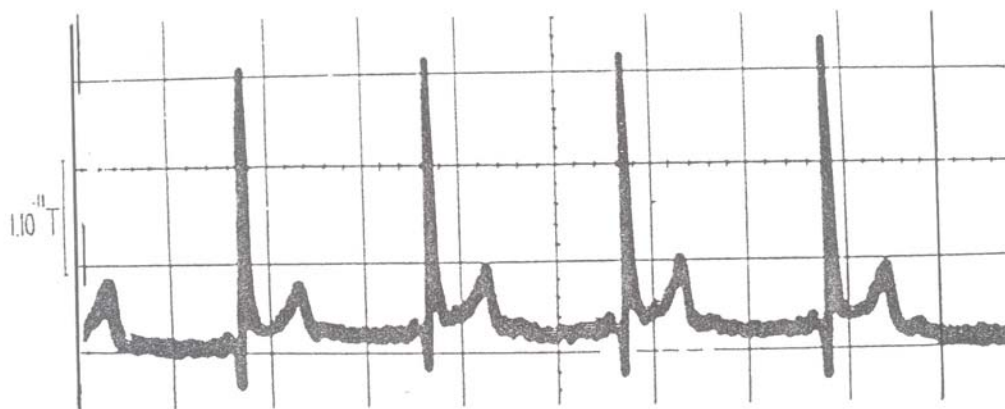
Βλέπουμε λοιπόν ότι το κεντρικό διπολικό μοντέλο επαληθεύει το τρίγωνο του *Einthoven*.

4.11. Μαγνητοκαρδιογράφημα

Όταν η ηλεκτρική δραστηριότητα εξαπλώνεται μέσα στην καρδιά, στους ιστούς γύρω απ' αυτήν παράγονται ηλεκτρικά ρεύματα. Τα ρεύματα αυτά δημιουργούν ασθενή μαγνητικά πεδία (της τάξης εκατομμυριοστών του *Gauss*), τα οποία ανιχνεύονται στην εξωτερική επιφάνεια του σώματος με το βιομαγνητόμετρο *SQUID* (μία περιγραφή του *SQUID* γίνεται στο Κεφάλαιο 6). Η καμπύλη που καταγράφεται (βλέπε Σχ. 4.16) αποτελεί το μαγνητοκαρδιογράφημα (*MCG*).

Μερικές διαφορές μεταξύ του ECG και του MCG είναι οι ακόλουθες :

- (α) Το ECG αποτελεί μία καταγραφή τάσεων (ηλεκτρικά δυναμικά).
- (β) Η καταγραφή του MCG δεν απαιτεί ηλεκτρόδια και το βιομαγνητόμετρο *SQUID* δεν είναι ανάγκη να έρθει σε επαφή με το σώμα.



Σχήμα 4.16. Το μαγνητοκαρδιογράφημα ενός φυσιολογικού ανθρώπου.

- (γ) Σχετικά με το σύμπλεγμα QRS, μπορούμε να πούμε ότι η τριφασική του μορφή είναι εντονότερη στο MCG παρά στο ECG.
- (δ) Μία αξιολογική διαφορά αναφέρεται στην πληροφορία που περιέχεται στο ECG και στο MCG. Όπως ήδη αναφέραμε οι βιοηλεκτρικές πηγές μέσα στην καρδιά παράγουν ηλεκτρικά δυναμικά η καταγραφή των οποίων αποτελεί το ECG. Τα μαγνητικά πεδία και κατ' επέκταση το MCG προέρχεται από τις ίδιες πηγές και επιπλέον από πηγές στροβιλισμού. Οι δύο μέθοδοι καταγραφής είναι δυνατόν να δώσουν διαφορετική πληροφορία για τη φυσιολογική ηλεκτρική δραστηριότητα της καρδιάς.