

ΚΕΦ. ΙΙ

ΠΑΡΑΓΩΓΗ

ΔΙΑΔΟΣΗ ΚΑΙ

ΜΕΤΡΗΣΗ

ΒΙΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ

1. ηλεκτρικές ιδιοτητες
των νευρων

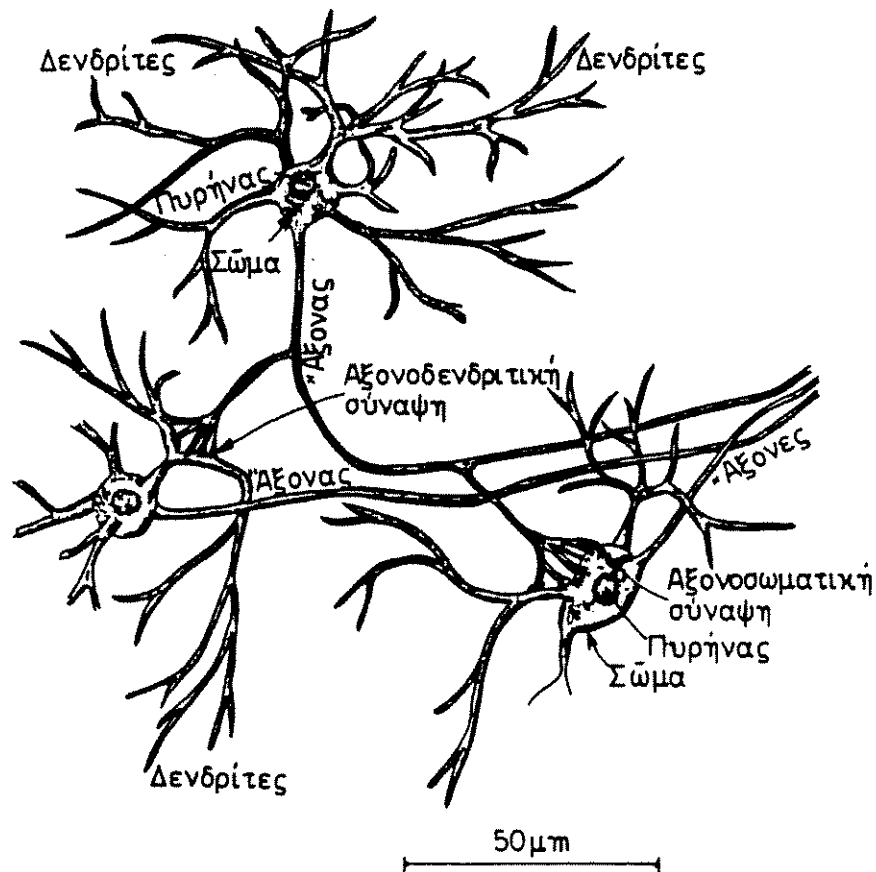
2. ηλεκτροκαρδιογραφια

3. ηλεκτρομυογραφια

4. ηλεκτροεγκεφαλογραφια

5. προκλητα δυναμικα

1. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝ



1.1. Γενικά.

Πηγή σχεδόν κάθε ηλεκτρικού δυναμικού μέσα στο σώμα μας είναι κάποια ήμισδιαβατή μεμβράνη. Αποτέλεσμα της δομής, των ηλεκτρικών ιδιοτήτων και της βιοχημικής λειτουργίας της μεμβράνης είναι η εμφάνιση μεταξύ των δύο επιφανειών της, μιας διαφοράς δυναμικού της τάξης του 0,1V (δυναμικό ηρεμίας). Οι τοπικές μεταβολές αυτών των δυναμικών και η διάδοση των μεταβολών αυτών κατά μήκος των μεμβρανών που περιβάλλουν τα νευρικά και τα μυϊκά κύτταρα, δημιουργούν ηλεκτρικά σήματα, που η καταγραφή τους δίνει τα: ηλεκτροκαρδιογράφημα (ΗΚΓ), ηλεκτρομυογράφημα (ΗΜΓ) και ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (ΗΕΓ).

Ἡ Ἄνατομία καί ἡ Φυσιολογία τοῦ νευρικοῦ συστήματος εἶναι ἀντικείμενο τῶν ἀντίστοιχων μαθημάτων. Σέ τούτη τήν εἰσαγωγή θά περιγραφεῖ ἡ βασική ὀργάνωση τοῦ νευρικοῦ συστήματος καί θά εἰσαχθεῖ ἡ σχετική ὀρολογία γιά νά ἐκτεθεῖ ἀργότερα ἡ φυσική τῆς λειτουργίας τῶν νεύρων καί τῆς δημιουργίας τοῦ ΗΚΓ τοῦ ΗΜΓ καί τοῦ ΗΕΓ.

Τό νευρικό σύστημα διαιρεῖται στό "κεντρικό νευρικό σύστημα" καί στό "αὐτόνομο νευρικό σύστημα".

Τό "κεντρικό" περιλαμβάνει τόν ἐγκέφαλο, τό νωτιαῖο μυελό καί τὰ περιφερικά νεῦρα. Ἀπό αὐτά τὰ νεῦρα, ἄλλα μεταφέρουν αἰσθητικές πληροφορίες (π.χ. ζέστη, ψῦχος, ἀφή, πόνος) πρὸς τόν ἐγκέφαλο ἢ τό νωτιαῖο μυελό καί ἄλλα μεταφέρουν πληροφορίες-ἐντολές ἀπό τόν ἐγκέφαλο ἢ τόν νωτιαῖο μυελό πρὸς μῦς καί ἀδένες.

Τό "αὐτόνομο νευρικό σύστημα" ἐλέγχει διάφορα ἐσωτερικά ὄργανα (καρδιά, ἔντερα, ἀδένες) καί ἡ λειτουργία του εἶναι σχετικά ἀκούσια.

Ἡ βασική μονάδα τοῦ νευρικοῦ συστήματος εἶναι ὁ "νευρώνας". Αὐτός εἶναι τό νευρικό κύτταρο πού παίρνει σήματα ἀπό κάποιο ἀποδέκτη ἢ ἀπό ἄλλο νευρικό κύτταρο, μέσω μιᾶς "σύναψης" καί τὰ μεταφέρει γιά νά τὰ μεταδόσει μέσω ἄλλης σύναψης σέ ἄλλο νευρικό ἢ μυϊκό κύτταρο. Ἡ κατασκευὴ τοῦ νευρώνα θά περιγραφεῖ ἀμέσως παρακάτω.

Λειτουργικά τό νευρικό σύστημα μοιάζει περισσότερο μέ ψηφιακό, παρά μέ ἀναλογικό ὑπολογιστή. Τὰ σήματα πού ταξιδεύουν κατὰ μήκος τῶν νεύρων εἶναι ἠλεκτρικοί παλμοί τῶν ὁποίων ἡ συχνότητα ἀλλάζει ἐνῶ τό ὕψος (ἢ πλάτος) παραμένει σταθερό. Δηλ. τὰ σήματα κωδικοποιοῦνται καί διαδίδονται κατὰ μήκος τῶν νεύρων μέ "διαμόρφωση συχνότητας" (frequency modulation ἢ F.M.). Γιά παράδειγμα, μιὰ μηχανική πίεση στό δέρμα μεταλλάσσεται ἀπό τόν αἰσθητικό ὑποδοχέα πού τῆ δέχεται σέ σήμα πού μεταδίδεται διὰ τῶν νεύρων στόν ἐγκέφαλο. Ὅσο ὑψηλότερη ἡ πίεση τόσο ὑψηλότερη ἡ συχνότητα τῆς σειρᾶς τῶν (σοῦψῶν παλμῶν (πυκνότεροι παλμοί) πού τρέχουν κατὰ μήκος τοῦ νεύρου.

Φαίνεται παράξενο νά ἐλέγχονται οἱ μῦς μέ τόν ψηφιακό αὐτό τρόπο, ἀφοῦ μπορούμε νά ἀσκοῦμε συνεχῶς μεταβαλλόμενη καί ὄχι ἀσυνεχῆ κίνηση ἢ πίεση. Ἀπό τό ψηφιακό αὐτό σύστημα θά περιμέναμε ἀπότομη καί ὀρισμένου βαθμοῦ συστολή τοῦ μυός γιά ὀρισμένη συχνότητα πού τοῦστελε ὁ ἐγκέφαλος. Ἡ συστολή ὅμως εἶναι συνεχῆς διότι ὁ μῦς ἀποτελεῖται ἀπό πολλές "κινητικές μονάδες". Λίγες ἀπ'αὐτές συστέλλονται ἀκανόνιστα, ἕτεροχρονικά καί μέ χαμηλό ρυθμό ὅταν ἡ συχνότητα τοῦ σήματος εἶναι μικρή, δηλ. ὅταν ἀπαιτεῖται μικρὴ δύ-

ναμη. Όσο αυξάνει ή συχνότητα του σήματος πυροδοτούνται πιο κανονικά, πιο συχνά και πιο πολλές κινητικές μονάδες του βίου μυός. Το ολοκληρωμένο αποτέλεσμα της συνεχούς αύξησης των μικρών και απότομων συστολών, όλο και περισσότερων μονάδων, είναι ή συνεχής αύξηση της συστολής του μυός.

Πληροφορίες (πίεση, φως, θερμοκρασία, κίνηση, όσμή, ήχοι, κ.λ.) μεταλλάσσονται στα αίσθητήρια μέρη του σώματός μας σε αντίστοιχα ηλεκτρικά σήματα. Αυτά αν είναι πολύ ασθενή (μικρή ηλεκτρική τάση) σβύνουν σε μικρή απόσταση από τή θέση πού γεννήθηκαν και λέγονται "τοπικά" ή "υποβαθμιζόμενα". Αν είναι ψηλότερα "σκανδαλίζουν" ή "διεγείρουν" τό νευρικό κύτταρο στη θέση πού αρχικά εφαρμόζονται. Τό κύτταρο αποκρίνεται με τοπική έκλυση ηλεκτρικής ενέργειας, πού είχε αποθηκεύσει και δημιουργεί όρισμένο ηλεκτρικό παλμό. Ο παλμός ταξιδεύοντας κατά μήκος της νευρικής ίνας (νευράξονας) εξασθενεί αλλά και επανενισχύεται, σε ένδιάμεσους σταθμούς (κόμβοι ή περισφίξεις Ranvier).

Αυτοί οι παλμοί και ή άρχή διάδοσή τους κατά μήκος του νευράξονα, είναι πολύ διαφορετικοί από τους τηλεφωνικούς παλμούς και τή διαδόσή τους με ταχύτητα σχεδόν ίση με εκείνη του φωτός κατά μήκος του χάλκινου σύρματος. Σε αντίθεση με τό χάλκινο σύρμα, πού αποτελείται από άτομα ενός στοιχείου και όφείλει τήν άγωγιμότητά του στα έλεύθερα ηλεκτρόνια του, ό νευράξονας είναι περίπλοκη κατασκευή και λειτουργεί με βιοχημικές διεργασίες.

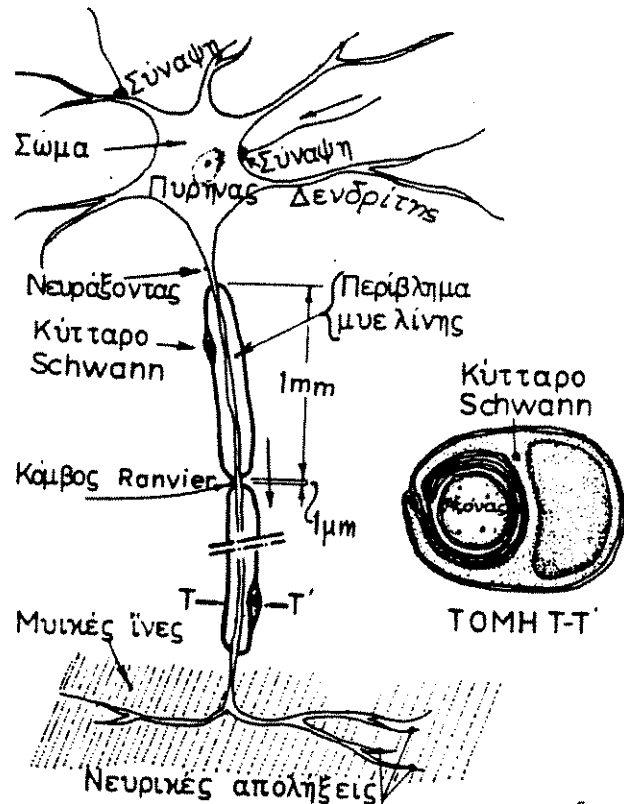
Σέ σύγκριση με τό μονωμένο χάλκινο σύρμα, ό νευράξονας παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση στην κατά μήκος δίοδο του ρεύματος και κακή ηλεκτρική μόνωση (μικρή αντίσταση) προς τό περιβάλλον του, γι' αυτό και χρειάζεται ή επανενίσχυση του σήματος σε μικρές αποστάσεις (ανά -1 mm).

Θά προσπαθήσουμε νά έξηγήσουμε τή δημιουργία δύο ηλεκτρικών τάσεων πού έμφανίζονται στα νεύρα. Η πρώτη τάση ή διαφορά δυναμικού ή άπλά "δυναμικό" ύπάρχει μεταξύ του έσωτερικού του νευράξονα (χαμηλότερο δυναμικό) και του περιβάλλοντος ύγρου (δυναμικό αναφοράς ή δυναμικό μηδέν). Όταν τό νεύρο δέν είναι διεγερμένο, τό δυναμικό αυτό είναι σταθερό σ' όλο τό μήκος του νευράξονα και λέγεται "δυναμικό ήρεμίας" (resting potential). Τό δεύτερο δυναμικό έμφανίζεται στό σημείο εφαρμογής του σήματος έάν τό σήμα έχει άρκετό ύψος. Ο δυναμικός αυτός παλμός λέγεται "δυναμικό δράσεως" (action potential) έχει όρισμένο ύψος και όπως προαναφέρθηκε ταξιδεύει κατά μήκος του νευράξονα μεταφέροντας τήν πληροφορία.

1.2. Ἡ κατασκευὴ τοῦ νευρώνα.

Τό νευρικό κύτταρο ἢ ὁ "νευρώνας" (σχ.63) περιβάλλεται ἀπό μία μεμβράνη πού περιορίζει μερικά τή ροή τῶν ὑλικῶν. Εἶναι ἰδιόμορφο (σέ σχέση μέ τά ἄλλα κύτταρα). Πλόκαμοι ἢ "δενδρίτες" καί ἕνας μακρὺς "νευράξονας" ξεκινοῦν ἀπό τό κεντρικό σῶμα τοῦ κυττάρου πού περιέχει καί τόν πυρήνα του. Οἱ νευράξονες ἔχουν διάμετρο ἀπό 1μm μέχρι 20μm, ἀλλά τά μήκη τους μπορεῖ νά φθάνουν τό 1m, (ἀπό τή σπονδυλική στήλη μέχρι τό ἄκρο τοῦ ποδιοῦ). Ὁ ἕνας νευρώνας ἐπικοινωνεῖ μέ τόν ἄλλο σέ λειτουργικούς ἀποδέκτες, τίς "συνάψεις".

Οἱ νευράξονες πιά ἐξελιγμένων ζῶων περιβάλλονται ἀπό κύτταρα Schwann πού σχηματίζουν πολλαπλό στρώμα "μυελίνης". Αὐτό τό περίβλημα, αὐξάνοντας τήν ἠλεκτρική ἀντίσταση στή διαρροή ρεύματος (κάθετα πρὸς τό νευράξονα) καί ἐλαττώνοντας τήν ἠλεκτρική χωρητικότητα, ἐπιτρέπει στό νευρικό παλμό νά ταξιδεῦει μακρύτερα χωρίς ἐνίσχυση. Ἔτσι ἐλαττώνει τήν μεταβολική ἐνέργεια πού ἀπαιτεῖται γιά τίς ἐπανενισχύσεις τοῦ παλμοῦ. Κάθε σωληνίσκος μυελίνης ἔχει μήκος περίπου 1mm. Τό διάκενο μεταξύ δύο διαδοχικῶν σωληνίσκων εἶναι μόνο 1μm καί λέγεται κόμβος Ranvier. Στούς κόμβους αὐτούς, πού ὁ νευράξονας εἶναι σέ στενωτέρη ἐπαφή μέ τό ἐξωκυττάριο ὑγρόσυμβαίνει ἡ ἐνίσχυση τοῦ σήματος ἢ δυναμικοῦ δράσεως. Ἀντίθετα στούς ἀμέλους ἄξονες τά σήματα θά ἐξασθενοῦσαν σέ μικρές ἀποστάσεις ἀν δέν ἐνισχύονταν καθ' ὅλο τό μήκος τῶν νευραξόνων.



σχ.63. Κινητικός νευρώνας. Στήν τομή ΤΤ ἡ μεμβράνη τοῦ κύτταρου Schwann, περιβάλλοντας πολλές φορές τόν νευράξονα, δημιουργεῖ μυελίνη.

1.3. Γεωμετρικές και ηλεκτρικές παραμέτρους του άμύελου νευράξονα.

1.3.1. Αντίσταση και χωρητικότητα.

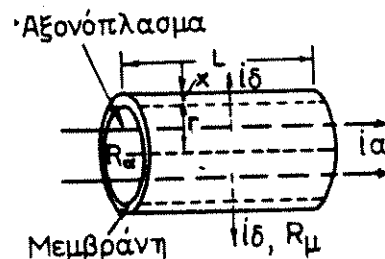
Πολλές ηλεκτρικές ιδιότητες του νευράξονα κατανοούνται εύκολότερα με τη βοήθεια ενός μοντέλου που τον εξομοιάζει (Σχ.64) με ηλεκτρικό καλώδιο μεγάλης κατά μήκος αντίστασης και κακής έγκρασιας μόνωσης από το περιβάλλον του. Θεωρούμε δηλ. ότι ο νευράξονας αποτελείται από σωληνοειδή μεμβράνη γεμάτη αγώγιμο υγρό, το "άξονόπλασμα" ειδικής αντίστασης ρ_a . Το ρεύμα i_a ρέει κατά μήκος του υγρού (Σχ.64) ενώ το i_g διαρρέει προς τα έξω διαμέσου της μεμβράνης που έχει πάχος x και ειδική αντίσταση ρ_m .

Ο Πίνακας 3 δίνει χαρακτηριστικές τιμές του ρ_a και του $R_m = \rho_m \cdot x$ καθώς και της χωρητικότητας ανά μονάδα επιφάνειας μεμβράνης C_m και της ακτίνας r του μυελομένου και του άμύελου νευράξονα.

Η γνωστή σχέση $R_a = \rho_a \cdot \frac{L}{S}$ δίνει για τμήμα νευράξονα μήκους 1cm κατά μήκος αντίσταση

$$R_a = \frac{2 \cdot \Omega \cdot \text{m} \cdot 0,01 \text{ m}}{\pi (5 \times 10^{-6} \text{ m})^2} = 25 \times 10^7 \Omega$$

Η τεράστια αυτή αντίσταση ισοϋται προς εκείνη του λεπτότερου



Σχ.64. Έξομοίωση τμήματος νευράξονα προς ηλεκτρικό καλώδιο.

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικές τιμές παραμέτρων νευράξονα.

(Από τό βιβλίο Physics των J.W.Kane και Sternheim).

Μέγεθος	Μυελωμένος νευράξονας	Άμύελος νευράξονας
Ειδική αντίσταση άξονόπλάσματος ρ_a	2 $\Omega \cdot \text{m}$	2 $\Omega \cdot \text{m}$
Ειδική αντίσταση επί πάχους μεμβράνης : $R_m = \rho_m \cdot x$	40 $\Omega \cdot \text{m}^2$	0,2 $\Omega \cdot \text{m}^2$
Χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης C_m	5 $\times 10^{-5} \text{ F} \cdot \text{m}^{-2}$	10 ⁻² $\text{F} \cdot \text{m}^{-2}$
Ακτίνα νευράξονα r	5 $\mu\text{m} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	5 μm

χάλκινου σύρματος (διαμέτρου 0,08 mm) μήκους 70.000 χιλιομέτρων ! Δηλ. η φύση κατασκεύασε ένα καλό σύστημα επικοινωνιών χρησιμοποιώντας ειδικό υγρό πού οι μηχανικοί θά θεωρούσαν εξαιρετικά μονωτικό.

Λόγω της λεπτότητας της μεμβράνης ($x \ll r$) μπορούμε να υπολογίσουμε τη χωρητικότητα κομματιού νευράξονα μήκους L , από τη σχέση: $C=2\pi \cdot r \cdot L \cdot C_m$, χωρίς να λάβουμε υπόψη τη μεταβολή του r κατά x .

Από τον Πίνακα 3 για $C_m=5 \cdot 10^{-5} \text{ F} \cdot \text{m}^{-2}$ βρίσκουμε ότι ο άμυελος άξονας μήκους $L=1\text{cm}$ και ακτίνας $r=5 \mu\text{m}$ έχει $C=3,1 \cdot 10^{-9} \text{ F}$, ενώ ο αντίστοιχος μυελωμένος έχει χωρητικότητα 200 φορές μικρότερη γιατί έχει πάχος τοιχώματος 200 φορές μεγαλύτερο.

Η αντίσταση της μεμβράνης σε ρεύμα διαρροής είναι:

$$R_{\mu} = \rho_m \frac{x}{2\pi r \cdot L} \quad \text{ή} \quad R_{\mu} = \frac{R_m}{2\pi r \cdot L}$$

Ο Πίνακας 3 για άμυελο άξονα μήκους $L=1\text{cm}$, δίνει αντίσταση διαρροής $R_{\mu}=6,4 \cdot 10^5 \Omega$ πού είναι περίπου 400 φορές μικρότερη από την κατά μήκος αντίσταση $R_{\alpha}=25 \cdot 10^7 \Omega$ του αντίστοιχου άξονοπλάσματος. Άρα τό περισσότερο από τό ρεύμα πού εισέρχεται στό νευράξονα διαρρέει εγκάρσια πρός τά έξω σε μήκος πολύ μικρότερο του 1cm.

Μπορούμε να υπολογίσουμε τό μήκος λ για τό όποιο η κατά μήκος αντίσταση R_{α} γίνεται ίση μέ την αντίσταση διαρροής R_{μ} .

$$\text{Δηλαδή} \quad \frac{\rho_{\alpha} \cdot \lambda}{\pi \cdot r^2} = \frac{R_m}{2\pi \cdot r \cdot \lambda} \quad \text{ή} \quad \lambda = \sqrt{\frac{R_m \cdot r}{2\rho_{\alpha}}}$$

Η απόσταση λ δείχνει πόσο μακριά ταξιδεύει τό ρεύμα κατά μήκος του νευράξονα πρίν να διαρρεύσει τό περισσότερο πρός τά έξω και λέγεται "παράμετρος χώρου".

Βάζοντας τίς τιμές του Πίνακα 3 έχουμε $\lambda=0,5\text{mm}$ για άμυελο και $\lambda=7\text{mm}$ για μυελωμένο άξονα.

Άρα ένας ηλεκτρικός παλμός ταξιδεύει πολύ μακρότερα χωρίς ενίσχυση σ' ένα μυελωμένο παρά σ' ένα άμυελο νευράξονα.

Ο Πίνακας 4, πού προέρχεται από άλλη πηγή, δίνει για ένα άμυελο νευράξονα πληρέστερα στοιχεία από τον Πίνακα 3. Παρατηρούμε ότι οι δύο αυτοί Πίνακες συμφωνούν απόλυτα ως πρός την ακτίνα ($r=5 \mu\text{m}$) και τη χωρητικότητα ανά m^2 μεμβράνης ($C_m=10^{-2} \text{ F} \cdot \text{m}^{-2}$) του άμυελου νευράξονα, ενώ ως πρός τά δύο άλλα μεγέθη του Πίνακα 3 δίνουν τιμές της ίδιας τάξης μεγέθους.

Πίνακας 4. Τιμές γεωμετρικών και ηλεκτρικών παραμέτρων ενός άμυελου νευράξονα. (Κατά Kotz και Hodgkin).

Σύμβολο-σχέση.	Περιγραφή παραμέτρου	Τιμή
r	Άκτινα νευράξονα	$5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
x	Πάχος μεμβράνης	$6 \cdot 10^{-9} \text{ m}$
ρ_a	Ειδική αντίσταση άξονοπλάσματος	$0.5 \ \Omega \text{ m}$
$R_a = \frac{\rho_a}{\pi \cdot r^2}$	Άντίσταση ανά μονάδα μήκους άξονοπλάσματος	$6,4 \times 10^9 \ \Omega \text{ m}^{-1}$
ϵ	Διηλεκτρική σταθερά μεμβράνης	7
ρ_m	Ειδική αντίσταση μεμβράνης	$\sim 1,6 \times 10^7 \ \Omega \text{ m}$
$C_m = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0}{x}$	Χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας μεμβράνης	10^{-2} F m^{-2}
$2\pi r \cdot C_m$	Χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους νευράξονα	$3 \cdot 10^{-7} \text{ F m}^{-1}$
$G_m = \frac{1}{R_m} = \frac{1}{\rho_m \cdot x}$	Άγωγιμότητα διαρροής ανά μονάδα επιφάνειας μεμβράνης	10^{-1} m^{-2}
V_n	Δυναμικό ήρεμίας	-70 mV
$E = \frac{V_n}{x}$	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου μέσα στη μεμβράνη	$12 \times 10^6 \text{ V m}^{-1}$
$\sigma = \frac{Q}{S} = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot E$	Φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας μεμβράνης	$7 \times 10^{-4} \text{ C m}^{-2}$
$n = \frac{\sigma}{e}$	Πλήθος ιόντων (φορτίου $1e$) ανά μονάδα επιφάνειας μεμβράνης	$4,4 \times 10^{15} \frac{\text{ιόντα}}{\text{m}^2}$

Από τις τιμές των ειδικών αντιστάσεων μεμβράνης και άξονοπλάσματος του Πίνακα 2 βγαίνει $\rho_m/\rho_a = 1,6 \times 10^7 / 0,5 = 33 \times 10^6$. Δηλ. το υλικό του άξονοπλάσματος ενώ είναι κακός αγωγός συγκρινόμενος προς το χαλκό ($\rho_{Cu} = 1,69 \times 10^{-8} \Omega m$) είναι 33 εκατομμύρια φορές πιο άγώγιμο από το υλικό της μεμβράνης. Μπορούμε λοιπόν να δεχθούμε ότι το άξονόπλασμα και το έξωκυττάριο υγρό αποτελούν δύο σχετικά καλούς αγωγούς χωριζόμενους όπως στον κυλινδρικό πυκνωτή (1.8.3) από μία λεπτότατη ($x = 6 \cdot 10^{-3} \mu m$) μονωτική μεμβράνη. Άρα σε κατάσταση ηρεμίας μέσα στον όγκο του άξονοπλάσματος και του έξωκυττάριο υγρού δεν υπάρχει ούτε περίσσεια φορτίων (τά θετικά ίσοονται με τά αρνητικά) ούτε ηλεκτρικό πεδίο.

13.2. Πεδίο και επιφανειακές πυκνότητες στή μεμβράνη.

Όταν ηρεμεί το κύτταρο όλο το άξονόπλασμα βρίσκεται στο ίδιο δυναμικό ηρεμίας (U_σ) που είναι χαμηλότερο από το δυναμικό του έξωκυττάριου υγρού (U_E). Δηλ. ηλεκτρ. πεδίο υπάρχει μόνο μέσα στη μεμβράνη με ένταση \vec{E} κάθετη στις επιφάνειές της και κατευθύνεται προς τά έξω του νευράξονα. Έπειδή δεχόμαστε σαν δυναμικό αναφοράς ή δυναμικό μηδέν εκείνο του έξωκυττάριου υγρού, ($U_E = 0$), τό $U_\sigma = V_\eta$ έχει άρνητική τιμή και κυμαίνεται από -70mV μέχρι -90mV.

Πάρονοντας τις τιμές $V_\eta = -70mV$ και $x = 6 \times 10^{-9} m$ από τόν Πίνακα 2, βρίσκουμε ότι, η πεδιακή ένταση έχει τήν πολύ ύψηλή τιμή:

$$E = \frac{70 \cdot 10^{-3} V}{6 \times 10^{-9} m} = 11,7 MVm^{-1} = 117 kV \cdot cm^{-1}$$

Έπειδή βρέθηκε πειραματικά ότι η διηλεκτρική σταθερά του υλικού της μεμβράνης είναι $\epsilon = 7$ (Πίνακας 2) ή χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας ($S = 1m^2$) μεμβράνης είναι:

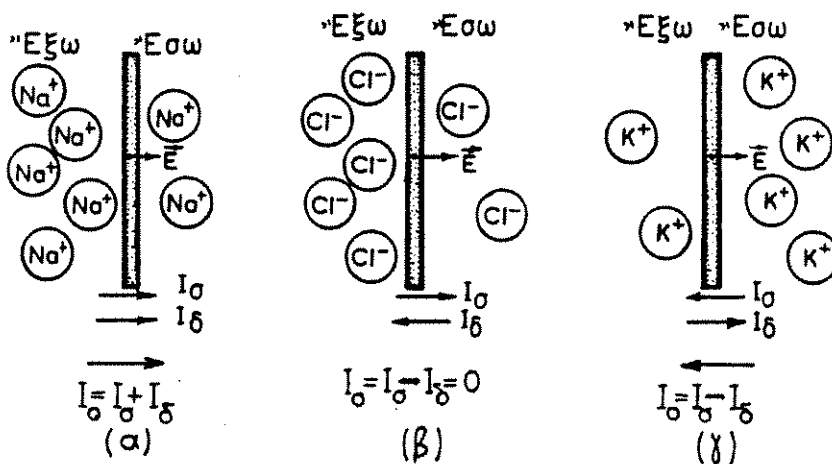
$$C_m = \frac{C}{S} = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0}{x} = \frac{7 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{6 \cdot 10^{-9}} = 0,01 F m^{-2}$$

και η πυκνότητα του φορτίου πάνω στην επιφάνεια της είναι:

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{C \cdot V_\eta}{S} = C_m \cdot V_\eta = 0,01 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 7 \cdot 10^{-4} C \cdot m^{-2}$$

Άν κάθε ίόν είναι απλά ιοντισμένο, δηλ. έχει φορτίο ίσο μέ τό του ηλεκτρονίου ($e = 1,6 \times 10^{-19} C$) τότε η παραπάνω επιφανειακή πυκνότητα φορτίου αντιστοιχεί προς:

Τό Σχῆμα 66 δείχνει τίς συγκεντρώσεις καί στατιστικές κινήσεις κάθε είδους ιόντων χωριστά. Ἐξετάσουμε πρώτα τά Na^+ (Σχ.66α). Ἀκόμα καί ἀφόρτιστα ἂν ἦταν τά άτομα τοῦ Na θά διαχέονταν λόγω τῆς θερμικῆς τῶν κίνησης ἀπό τήν περιοχή ὑψηλῆς συκέντρωσης (ἔξω) διαμέσου τῆς μεμβράνης πρὸς τήν περιοχή χαμηλῆς συκέντρωσης (ἔσω). Δηλ. δημιουργεῖται πρὸς τά ἔσω ἓνα ρεῦμα I_{σ} (λόγω συγκεντρώσεων) σέ $\text{I} \text{ (Ions / (m}^2\text{s))}$. Ἐξάλλου τό δυναμικό ἡρεμίας $V_{\eta} = -90\text{mV}$ δημιουργεῖ τό ἠλεκτρικό πεδίο \vec{E} . Αὐτό ἔλκει μέ δύναμη $\vec{F} = \vec{E} \cdot q$ κάθε Na^+ ἀπ' ἔξω πρὸς τά μέσα καί προκαλεῖ ἓνα, ὁμόροο πρὸς τό I_{σ} , ρεῦμα I_{δ} (λόγω δυναμικοῦ). Ἄρα τό ὄλικό "παθητικό" ρεῦμα τῶν Na^+ κατευθύνεται πρὸς τά μέσα καί εἶναι: $I_0 = I_{\sigma} + I_{\delta}$. Αὐτό τό διαμέσου τῆς μεμβράνης ρεῦμα I_0 τό ὀνομάζουμε "παθητικό" γιατί προκαλεῖται ἀπό τή διαφορά συγκεντρώσεων καί τήν διαφορά δυναμικοῦ καί μετατρέπει μηχανική καί ἠλεκτρική ἐνέργεια σέ θερμότητα. Εἶναι ὅπως τό "παθητικό" ρεῦμα πού διαρρέει μιά ὀμική ἀντίσταση κατά τήν κατεύθυνση τοῦ πεδίου καί μετατρέπει ἠλεκτρική ἐνέργεια σέ θερμότητα. Ἀντίθετα τό ρεῦμα μέσα σέ μιά πηγή (π.χ. μιά μπαταρία) πού παράγει τήν παραπάνω ἠλεκτρική ἐνέργεια, λέγεται "ἐνεργό ἢ ἐνεργητικό" γιατί ρέει ἀντίθετα πρὸς τό πεδίο μέ δαπάνη ἐνέργειας (χημικῆς στήν μπαταρία).



Σχ.66. Παθητικά ρεύματα ιόντων I_{σ} καί I_{δ} πού ὀφείλονται στίς συγκεντρώσεις καί στά δυναμικά .

- (α) Ἀμώτερα τά I_{σ} καί I_{δ} ἄρα καί τό $I_0 = I_{\sigma} + I_{\delta}$ τῶν Na^+ ρέουν πρὸς τά ἔσω.
- (β) Τά I_{σ} καί I_{δ} τῶν Cl^- εἶναι ἴσα καί ἀντίθετα. Ἄρα τό καθαρό ρεῦμα (net current) εἶναι $I_0 = I_{\sigma} - I_{\delta} = 0$.
- (γ) Τό I_{σ} τοῦ K^+ ρέει πρὸς τά ἔξω καί ἔχει λίγο ψηλότερη τιμή ἀπό τό I_{δ} πού κατευθύνεται πρὸς τά ἔσω. Ἄρα τό καθαρό ρεῦμα τῶν K^+ εἶναι $I_0 = I_{\sigma} - I_{\delta}$ πρὸς τά ἔξω.

Επειδή είναι: $V_{\eta} = -90\text{mV}$ = σταθερό μετά κάποιο χρόνο θά έπρεπε τό I_o νά μειώσει τήν C_E τοῦ Na^+ καί τελικά νά τήν κάμει τόσο μικρότερη από τήν C_o τοῦ Na^+ ὥστε τό ανάστροφο πιά (πρὸς τά ἔξω) I_o νά ἔξισορροπεῖ τό I_{δ} καί νά γίνει $I_o = 0$. Ἀφοῦ οἱ C_E καί C_o τοῦ Na^+ μένουν χρονικά ἀμετάβλητες, πρέπει κάποια "ἀντλία" νά μεταφέρει τά Na^+ ἀπό μέσα πρὸς τά ἔξω, ἀντίθετα καί πρὸς τό ἠλεκτρικό πεδίο καί πρὸς τή διάχυση. Τό ρεύμα τῆς "ἐνεργητικῆς" αὐτῆς μεταφορᾶς τῶν Na^+ πού προσφέρει ἡ ἀντλία πρέπει νά εἶναι ἴσο καί ἀντίθετο πρὸς τό I_o (σταθερές C_E καί C_o).

Τό Σχῆμα 66β δείχνει τίς ροές τῶν Cl^- . Τό I_o τῶν Cl^- κατευθύνεται πρὸς τά ἔσω (μεγαλύτερη συγκέντρωση ἔξω) ἐνῶ τό I_{δ} τῶν Cl^- πηγαίνει πρὸς τά ἔξω γιατί τό φορτίο τους εἶναι ἀρνητικό. Τά δύο αὐτά ἀντίθετα ρεύματα ἰόντων ἔχουν τήν ἴδια τιμή, δηλ. ἀλληλοεξουδετερώνονται ($I_o = 0$). Ἄρα γιά τή διατήρηση τῶν C_E καί C_o τῶν Cl^- δέν ἀπαιτεῖται "ἀντλία".

Τά K^+ (ἀντίθετα πρὸς τά Cl^-) ἔχουν I_o πρὸς τά ἔξω καί I_{δ} πρὸς τά ἔσω. Στόν ἠρεμο νευράξονα ($V_{\eta} = -90\text{mV}$) τό I_o εἶναι μεγαλύτερο ἀπό τό I_{δ} . Ἄρα τό "καθαρό" ρεύμα $I_o = I_o - I_{\delta}$ κατευθύνεται πρὸς τά ἔξω. Ὅπως καί στά Na^+ ἔτσι καί τά K^+ γιά νά διατηροῦνται οἱ C_E καί C_o σταθερές πρέπει πάλι κάποια "ἀντλία" νά ἐκτελεῖ τήν ἀντίθετη "ἐνεργητική μεταφορά" τῶν K^+ (πρὸς τά ἔσω) καί μάλιστα μέ ρεύμα τῆς ἴδιας τιμῆς (I_o). Τῆ δραστηριότητα αὐτῆς τῆς "ἀντλίας νατρίου-καλίου" θά περιγράψομε περισσότερο ἀργότερα.

1.5. Ἐξίσωση N e r n s t.

Γιά νά βροῦμε ἀν ἰσορροποῦν ἢ ὄχι οἱ δοσμένες C_E καί C_o κάποιου ἰόντος πού χωρίζονται ἀπό μία διαβατή μεμβράνη ὑπολογίζομε ἕνα θεωρητικό "δυναμικό ἰσορροπίας" V_L τό ὁποῖο ἀν ἐφαρμοσθεῖ μεταξύ τῶν δύο πλευρῶν τῆς μεμβράνης θά γίνει $I_o = 0$. Δηλ. γιά τό δυναμικό ἰσορροπίας (V_L) τά I_o καί I_{δ} εἶναι ἴσα καί ἀντίθετα. Ἄν τό δυναμικό πού πραγματικά ὑπάρχει (ὅπως τό $V_{\eta} = -90\text{mV}$ τοῦ νευράξονα) εἶναι διαφορετικό ἀπό τό V_L τότε δέν ὑπάρχει παθητική ἰσορροπία ($I_o \neq 0$). Τότε γιά νά διατηρηθεῖ ἡ ἰσορροπία τῶν C_E καί C_o χρειάζεται καί "ἀντλία" (ἐνεργητικό ρεύμα ἴσο καί ἀντίθετο πρὸς τό I_o).

Ἐξετάζομε τήν κίνηση τῶν ἰόντων μέσα στό διάλυμα σάν νά ἦσαν μόρια ἰδανικοῦ ἀερίου. Τά θετικά ἰόντα πού βρίσκονται στήν πλευρά τοῦ ψηλότερου δυναμικοῦ ἔχουν ἠλεκτρική δυναμική ἐνέργεια ψηλότερη κατά $q \cdot V_L$ ἀπό ἐκεῖνα τῆς ἄλλης πλευρᾶς. Παθητική ἰσο-

ροπία (σταθερά C_E και C_O) έπέρχεται όταν η ένέργεια $q \cdot V_L$ πού δίνει σ' ένα ίόν τό ήλεκτρικό πεδίο όταν περνά τή μεμβράνη είναι ίση πρός τό έργο πού καταναλώνει τό ίδιο ίόν κατά τό περασμά του αυτό από τήν χαμηλή στήν ύψηλή συγκέντρωση ίόντων (χαμηλή σε ύψηλή μερική πίεση για τά άέρια). Τό έργο αυτό σύμφωνα μέ τό μοντέλο του ίδανικού αέριου είναι: $k \cdot T \cdot \ln(C_E/C_O)$.

Όπου k είναι η σταθερά του Boltzmann και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία (σε βαθμούς Kelvin). Έτσι καταλήγομε στην εξίσωση

$$\text{Nernst: } q \cdot V_L = k \cdot T \cdot \ln(C_E/C_O)$$

Για τις $C_E=145$ και $C_O=12$ του Na^+ (Σχ.65), για $T=310\text{K}$ (δηλ. 37°C) για $q=e=1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$ και για $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$, από

$$\text{την } V_L = \frac{k \cdot T}{q} \ln \frac{C_E}{C_O} \quad \text{έχομε } V_L = +66 \text{ mV.}$$

Άρα θά είχαμε παθητική ίσοροπία των Na^+ αν τό δυναμικό του νευράξονα ήταν $+66\text{mV}$. Τότε τό ήλεκτρικό πεδίο \vec{E} θά κατευθυνόταν πρός τά έξω και θά άπωθούσε τά Na^+ πρός τά έξω. Έτσι τό ρεύμα διάχυσης I_O (πρός τά έσω) θά ήταν ίσο και αντίθετο πρός τό ρεύμα δυναμικού I_D (πρός τά έξω). Έπειδή όμως για τά Na^+ είναι $V_L \neq V_N$ άπαιτείται η παρέμβαση τής "άντλίας" μέ ένεργό ρεύμα Na^+ πρός τά έξω ίσο σε μέτρο πρός τό $I_O = I_{O'} + I_D$, ώστε να διατηρηθούν οι $C_E=145$ και $C_O=12 \text{ mole/m}^3$.

Έπαναλαμβάνοντας τά ίδια για τά Cl^- βρίσκομε $V_L = -90\text{mV}$. Δηλ. για τά Cl^- είναι $V_L = V_N$. Άρα $I_O = 0$ και δέν χρειάζεται άντλία για τή διατήρηση των $C_E = 120$ και $C_O = 4 \text{ mole/m}^3$.

Για τά K^+ βρίσκομε ότι άπαιτείται $V_L = -98\text{mV}$. Δηλ. τό έσωτερικό του νευράξονα δέν είναι αρκετά άρνητικό για να έχομε $I_O = 0$. Ένα παθητικό ρεύμα K^+ άνάλογο πρός τή διαφορά $V_N - V_L = -90 - (-98) = 2\text{mV}$ θά ρέει πρός τά έξω. Για τή διατήρηση λοιπόν των $C_E = 4$ και $C_O = 155$ των K^+ άπαιτείται άντλία πού θά προκαλέσει ένεργό ρεύμα K^+ ίσο πρός I_O πρός τά έσω.

Η σκέψη ότι στην ίσοροπία τό ρεύμα I_O πού προκαλείται από τή διαφορά συγκεντρώσεων, είναι ίσο και αντίθετο πρός τό ρεύμα I_D πού προκαλείται από τή διαφορά δυναμικού V_L , μάς οδήγησε στη σκέψη ότι ίσως θά εύκολύνομε τήν κατανόηση αν θεωρήσομε και τό I_O σαν ένα ρεύμα πού προκαλείται από μία διαφορά δυναμικού $-V_L$. Έτσι επινοήσαμε τό ήλεκτρικό μοντέλο του σχήματος 67.

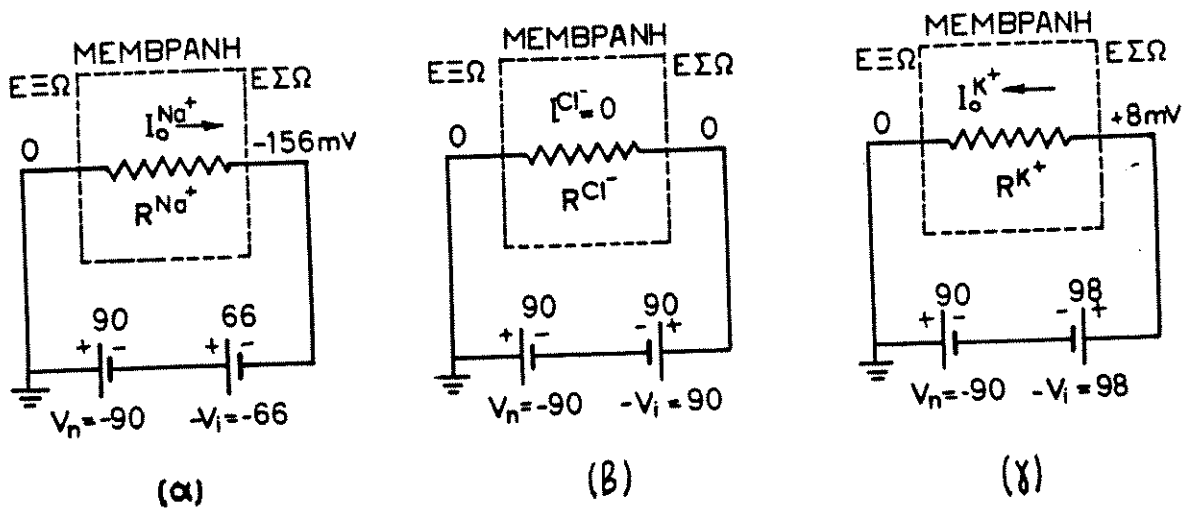
Αν R^{Na} είναι η αντίσταση ενός m^2 μεμβράνης (στην διέλευση των Na^+) και η θετική φορά τάσεων και ρευμάτων είναι από τά έσω

πρός τα έξω της μεμβράνης, τότε το ρεύμα των Na^+ λόγω δυναμικού είναι: $I_{\delta} = V_{\eta} / R^{\text{Na}^+}$ και το ρεύμα των Na^+ λόγω συγκεντρώσεων είναι $I_{\sigma} = -V_L / R^{\text{Na}^+}$. Άρα (σχ.67α) το όλικό ρεύμα των Na^+ είναι

$I_o^{\text{Na}^+} = I_{\delta} + I_{\sigma} = (V_{\eta} - V_L) / R^{\text{Na}^+} = -156\text{mV} / R^{\text{Na}^+}$. Το αρνητικό πρόσημο, που βγήκε, σημαίνει ότι το $I_o^{\text{Na}^+}$ κατευθύνεται προς τα έξω.
 Με τον ίδιο τρόπο προκύπτει για τα Cl^- ότι $I_o^{\text{Cl}^-} = I_{\delta} + I_{\sigma} = (V_{\eta} - V_L) / R^{\text{Cl}^-} = (-90\text{mV} + 90\text{mV}) / R^{\text{Cl}^-} = 0$

Επίσης για τα K^+ (σχ.67γ) συνάγεται:
 $I_o^{\text{K}^+} = (V_{\eta} - V_L) / R^{\text{K}^+} = +8\text{mV} / R^{\text{K}^+}$. Το θετικό πρόσημο σημαίνει ότι το $I_o^{\text{K}^+}$ κατευθύνεται προς τα έξω.

Για να διατηρηθεί η κατάσταση ηρεμίας (διατήρηση των συγκεντρώσεων του σχήματος 65) πρέπει να υπάρχει κάποια αντλία νατρίου-καλίου που θα δώσει ρεύματα $-I_o^{\text{Na}^+}$ και $-I_o^{\text{K}^+}$.



σχ. 67. Το ορθογώνιο με διακοπτόμενη γραμμή συμβολίζει τεμάχιο μεμβράνης που έχει επιφάνεια 1m^2 και αντιστάσεις R^{Na^+} , R^{Cl^-} και R^{K^+} σε παθητικά ρεύματα Na^+ , Cl^- και K^+ αντίστοιχα. Για τη δημιουργία ηλεκτρικού μοντέλου θέσαμε σε σειρά με την $V_{\eta} = -90\text{mV}$ την εκάστοτε $-V_L$, που θα προκαλούσε ρεύμα ίσο με κείνο που προκαλούν πραγματικά οι συγκεντρώσεις.

- (α) Το παθητικό ρεύμα $I_o^{\text{Na}^+}$, είναι ίσο με κείνο που θα προκαλούσε δυναμικό $V_o^{\text{Na}^+} = V_{\eta} - V_L^{\text{Na}^+} = -90 - 66 = -156\text{mV}$ αν εφαρμόζονταν στα άκρα της αντίστασης R^{Na^+} .
- (β) Το $I_o^{\text{Cl}^-}$, είναι ίσο με το προκαλούμενο από το $V_o^{\text{Cl}^-} = V_{\eta} - V_L = -90 + 90 = 0$, δηλ. $I_o^{\text{Cl}^-} = 0$.
- (γ) Το $I_o^{\text{K}^+}$, είναι ίσο με το προκαλούμενο από το $V_o^{\text{K}^+} = V_{\eta} - V_L^{\text{K}^+} = -90 + 98 = +8\text{mV}$ στην R^{K^+} .

1.6. Ἡ ἀντλία νατρίου-καλίου.

Οἱ παραπάνω παθητικές ροές (I_o) τῶν Na^+ πρὸς τὰ ἔσω καὶ τῶν K^+ πρὸς τὰ ἔξω, πού ὀφείλονται στή διάχυση καὶ στο ἠλεκτρικό πεδίο, μετατρέπουν δυναμική ἐνέργεια σέ θερμότητα καὶ αὐξάνουν τήν ἐντροπία τοῦ συστήματος.

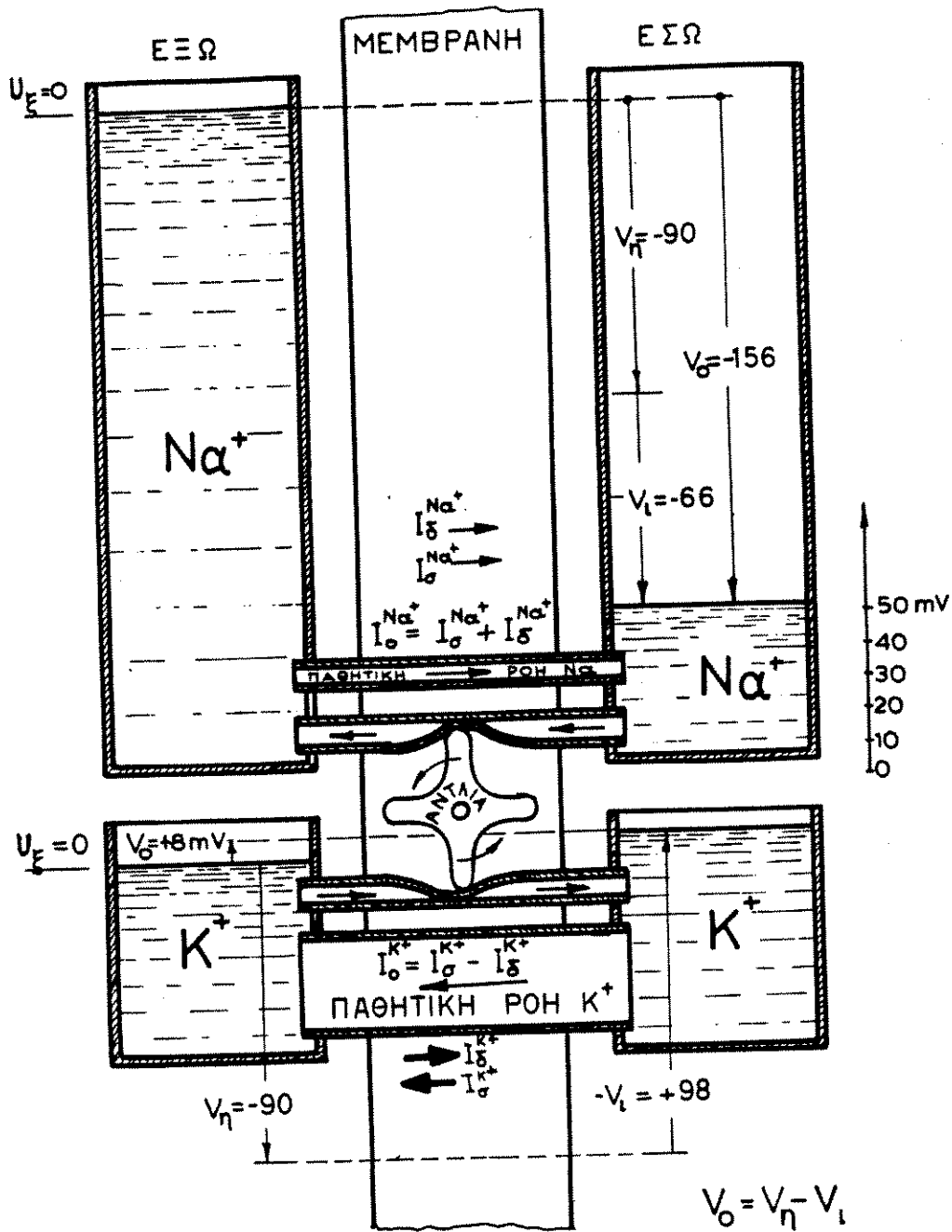
Κάποιος ἄλλος μηχανισμός, πού δεν ἔχει διαλευκανθεῖ ἐντελῶς, πρέπει νά ἐπιστρέφει (διαμέσου τῆς μεμβράνης) τὰ Na^+ ἔξω καὶ τὰ K^+ μέσα, ἀντίθετα πρὸς τό συνιστάμενο ἀποτέλεσμα τῆς διάχυσης καὶ τοῦ πεδίου. Ἔτσι διατηροῦνται οἱ μὴ ἰσορροπημένες (σέ σχέση πρὸς τό δυναμικό $V_{\eta} = -90$ mV) συγκεντρώσεις τῶν Na^+ καὶ K^+ . Αὐτή ἡ διεργασία ἐκτελεῖται ἀπό τήν "ἀντλία νατρίου-καλίου". Ἡ ἀντλία αὐτή θά δίνει σέ κάθε m^2 μεμβράνης τουλάχιστο ἰσχύ: $P = I_o Na^+ \cdot 156$ mV $+ I_o K^+ \cdot 8$ mV

Ἡ ἐνέργεια $W = P \cdot t$ παρέχεται ἀπό τήν ἀποθηκευμένη ἐνέργεια τοῦ ὀργανισμοῦ (μεταβολική ἐνέργεια).

Στήν κατάσταση ἡρεμίας ἡ μεμβράνη τοῦ νευράξονα εἶναι περίπου 100 φορές πιά διαπερατή στά K^+ παρά στά Na^+ . Παρά τή σχέση αὐτή τῶν ἀντιστάσεων διαβάσεως οἱ παθητικές ροές (I_o) τῶν Na^+ καὶ τῶν K^+ ἔχουν λόγο $\approx 3:2$ γιατί τό δυναμικό ἡρεμίας ($V_{\eta} = -90$ mV) εἶναι πολύ πλησιέστερα στό δυναμικό ἰσορροπίας ($V_l = -98$ mV) τῶν K^+ παρά σ' ἐκεῖνο ($V_l = +66$ mV) τῶν Na^+ . Πιστεῦεται δηλ. ὅτι ἡ "ἀντλία" μεταφέρει δύο K^+ μέσα, γιά κάθε τρία Na^+ πού βγάζει ἔξω ἀπό τό κύτταρο.

Ὁ ρόλος τῆς ἀντλίας Na-K ἴσως γίνει πιά κατανοητός ἂν θεωρήσουμε ὅτι ἀρχικά τὰ δυναμικά εἶναι ἴσα ($U_{\xi} = U_{\sigma} = 0$) καὶ οἱ συγκεντρώσεις τῶν Na^+ , K^+ καὶ Cl^- εἶναι ἐπίσης ἴσες καὶ στίς δύο πλευρές τῆς μεμβράνης. Ἡ ἀντλία σέ μικρό χρόνο λειτουργίας θά μεταφέρει μερικά K^+ μέσα καὶ 50% περισσότερα Na^+ , ἔξω. Ἀφοῦ ἡ διαβατότητα τῆς μεμβράνης εἶναι μεγάλη γιά τὰ K^+ , περισσότερα K^+ θά διαχυθοῦν πρὸς τὰ ἔξω παρά Na^+ πρὸς τὰ μέσα. Ἔτσι τό ἔξω θά γινόταν θετικότερο ἀπό τό μέσα ἀκόμα καὶ ἂν ἡ ἀντλία μετέφερε ἴσα πλήθη Na^+ καὶ K^+ . Ἡ θετικότητα τοῦ ἔξω ἐλαττώνεται ἔλκοντας Cl^- ἀπό τὰ μέσα πρὸς τὰ ἔξω, ἀλλά δέν μηδενίζεται. Ἡ ἠλεκτρική οὐδετερότητα τοῦ ὄλου προκαλεῖ μικρή περίσσεια ἀρνητικῶν ἰόντων μέσα, ἴση πρὸς τήν περίσσεια τῶν θετικῶν ἔξω.

Ἡ ἀντλία τῶν Na^+ καὶ K^+ συνεχίζει νά αὐξάνει τίς C_{ξ} τῶν Na^+ καὶ τῶν Cl^- καὶ τήν C_{σ} τῶν K^+ . Ἡ ἰσορροπία (σταθεροποίηση τῶν



Σχ. 68 . Σχηματική ανάλυση τών παθητικών καί ένεργητικών ροών K^+ καί Na^+ διαμέσου τής μεμβράνης. Οί παθητικές ρέουν πρός χαμηλότερη καί οί ένεργητικές πρός ύψηλότερη στάθμη. Ή κάθε ροή λόγω συγκεντρώσεων (I_σ) ίσοϋται μέ τή ροή πού θά προκαλούσε τό δυναμικό, άν ήταν ίσο πρός $-V_l$. Γι' αυτό στό σχήμα ή I_σ δίνεται σαν ροή λόγω δυναμικοϋ $-V_l$.

C_E και C_σ έρχεται όταν οι παθητικές ροές (I_σ) γίνουν ίσες και αντίθετες προς τις ένεργητικές ροές της άντλίας. Τότε έχουμε $V = V_\eta = -90$ mV. Το V_η είναι πλησιέστερα στο $V_i = -98$ mV των K^+ παρά στο $V_l = +66$ mV των Na^+ λόγω της μεγαλύτερης διαβατότητας της μεμβράνης στα K^+ .

Τό σχήμα 68 δείχνει σχηματικά τις διάφορες ροές των K^+ και Na^+ . Οι παθητικές ροές ρέουν, όπως τό νερό, από ύψηλότερη σε χαμηλότερη στάθμη. Έτσι οι παθητικές έντάσεις I_δ (λόγω δυναμικού) ρέουν από ύψηλότερο σε χαμηλότερο δυναμικό (από 0 προς -90 mV), ενώ οι παθητικές ροές I_σ (λόγω συγκεντρώσεων) ρέουν από ύψηλότερη προς χαμηλότερη συγκέντρωση. Οι I_σ είναι ίσες με τις ροές που θά δημιουργούσε τό ήλεκτρικό πεδίο αν τό δυναμικό ήταν $-V_l$. Γι' αυτό στο σχήμα 68 οι I_σ έχουν αντίκατασταθεϊ με ίσες ροές προκαλούμενες από τά αντίστοιχα ίσοδύναμα δυναμικά $-V_l$.

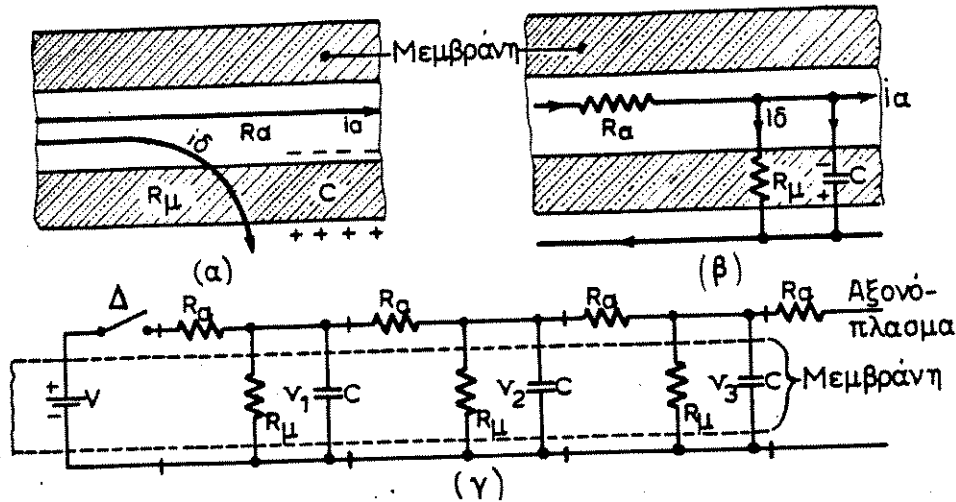
Οι ένεργητικές ροές ρέουν από χαμηλότερη σε ύψηλότερη στάθμη και όπως ή άνοδική ροή του νερού, άπαιτούν παροχή ένεργειας ίσης προς τήν αύξηση της δυναμικής ένεργειας. Αύτή τήν ένεργεια παρέχει ό μεταβολισμός που περιστρέφει στο σχ. 68 τή συμβολική άντλία $Na^+ - K^+$.

Τά διαφορετικά πλάτη των καναλιών ροής ύποδηλώνουν τις διαφορετικές τιμές των αντίστοιχων άντιστάσεων διαβάσεως της μεμβράνης.

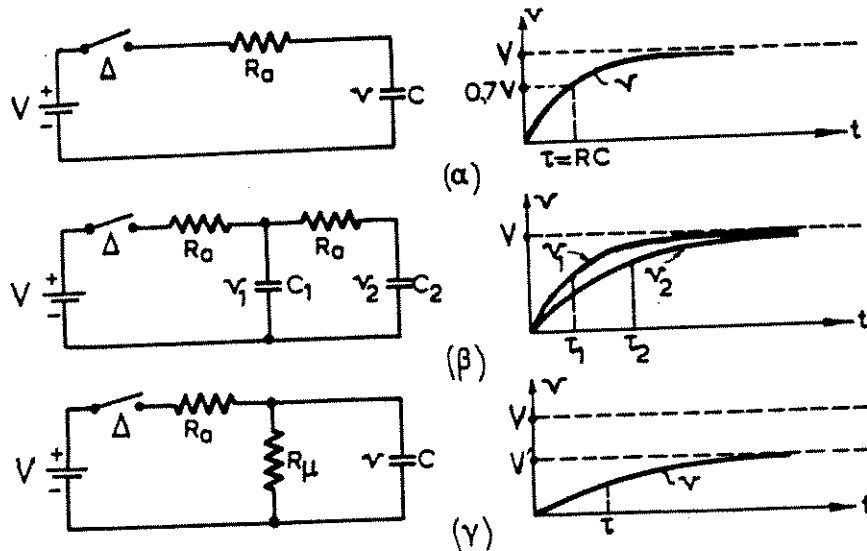
1.7. Άπό κριση σε άσθενή σηματα.

Έάν εφαρμοσθεϊ ένα άσθενές ήλεκτρικό σήμα σε μία θέση του νευράξονα και αύξήσει τοπικά τό δυναμικό του από -90 mV σε μία τιμή (π.χ. -60 mV), που βρίσκεται κάτω από κάποια κρίσιμη τιμή, δέν αλλάζουν οι ιδιότητες του νευράξονα. Τότε κάθε κομμάτι του νευράξονα (σχ. 69α) μπορεί να θεωρηθεϊ ότι άποτελεϊται από μία κατά μήκος άντίσταση R_a (άξονόπλασμα) από μία έγκάρσια άντίσταση R_μ και μία έγκάρσια χωρητικότητα C της μεμβράνης (σχ. 69β). Τό έξωκυττάριο ύγρό παρουσιάζει μικρή σχετικά άντίσταση και μπορεί να θεωρηθεϊ σαν τέλειος άγωγός. Τό σχ. 69γ δείχνει τή σύνδεση μιας σειράς τριών διαδοχικών όμοιων στοιχείων-μοντέλων, προς ήλεκτρική πηγή (σήμα).

Στόν "ήλεκτρισμό" (2.13) μελετήσαμε τήν φόρτιση του πυκνωτή μετά τό κλείσιμο του διακόπτη Δ σε κύκλωμα όπως αυτό του σχ. 70α. Είδαμε ότι ή χρονική μεταβολή της τάσης του πυκνωτή δίνεται από τήν $v = V(1 - e^{-t/\tau})$ όπου $\tau = R \cdot C$ είναι ή σταθερά χρόνου του κυκλώματος, και παριστάνεται από καμπύλη σαν αύτή του



Σχ. 69. (α) Μικρό τμήμα νευράξονα. (β) Ίσοδύναμο του τμήματος κύκλωμα. (γ) Ίσοδύναμο κύκλωμα για μακρύ τμήμα νευράξονα και πηγή που δίνει τό έρέθισμα.



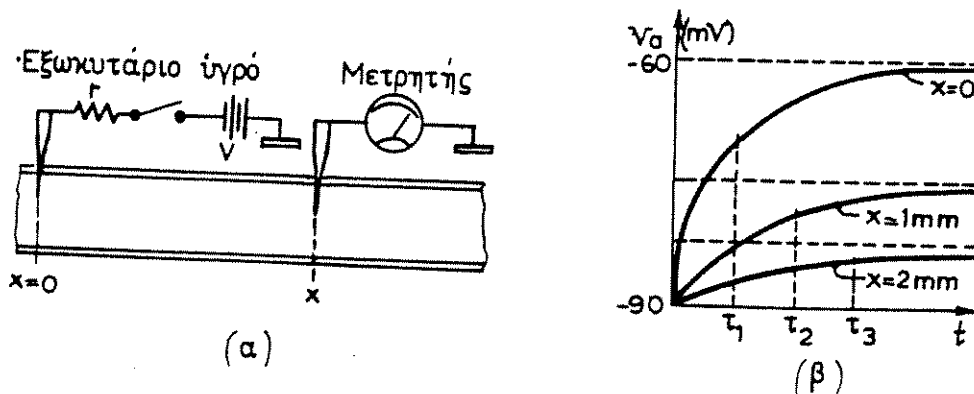
Σχ. 70. Κυκλώματα και χρονικές μεταβολές της τάσης των αρχικά άφορτιστων πυκνωτών.
 (α) Άπλό κύκλωμα RC. (β) Ή τάση v_2 ανεβαίνει βραδύτερα από την v_1 αλλά τελικά φθάνουν και οι δύο την τάση V της πηγής. (γ) Ή προσθήκη αντίστασης διαρροής R_μ παράλληλα προς τον πυκνωτή C μειώνει την τελική τιμή της τάσης v του πυκνωτή.

Σχήματος 70α. Προσθέτοντας και δεύτερο στοιχείο R-C όπως στο Σχ. 70β, παίρνουμε για τις τάσεις v_1 και v_2 των δύο πυκνωτών τις αντίστοιχες καμπύλες. Αύτες δείχνουν ότι όσο μακρύτερα από το έρεθισμα βρίσκεται το εξεταζόμενο σημείο τόσο περισσότερο αργεί ν' ανέβει η τάση. Αν τώρα προσθέσουμε και την αντίσταση διαρροής R_{μ} (Σχ. 70γ) ή τελική τάση του πυκνωτή μειώνεται τόσο περισσότερο όσο μικρότερη είναι η R_{μ} .

Αρα κλείνοντας το διακόπτη στο κύκλωμα εξομοίωσης του νευράξονα (Σχ. 69γ) η τάση v των πυκνωτών ανεβαίνει τόσο αργότερα και είναι τόσο μικρότερη από το "έρεθισμα" V , όσο απομακρυνόμαστε από τη θέση του έρεθίσματος.

Όμοια είναι η συμπεριφορά ενός άμυελου νευράξονα σε ασθενή έρεθίσματα. Το Σχήμα 71α δείχνει μία διάταξη έπιβολής σημάτων στη θέση $x=0$ και μέτρησης της απόκρισης σε διάφορες αποστάσεις x (Σχ. 71β). Αρα το ασθενές σήμα σβύνει σε απόσταση λίγων mm.

Τό μοντέλο (Σχ. 69γ) του νευράξονα εκτός από την παραπάνω ποιοτική ανάλυση, μās δίνει και ποσοτικά τη μεταβολή της τάσης v με την απόσταση x . Δηλ. $v = v_0 \cdot e^{-x/\lambda}$, όπου λ είναι η "παράμετρος χώρου". Για $\lambda = 0.05 \text{ cm}$ (άμυελος άξονας) η τάση γίνεται $v = v_0 \cdot e^{-x/0.05} = 0.37 v_0$ σε απόσταση $x = \lambda = 0.05 \text{ cm}$ και $v = v_0 \cdot e^{-2} = 0.135 v_0$ σε $x = 0.1 \text{ cm}$. Αύτη η εξάρτηση του v από την x συμφωνεί με το πείραμα.



Σχ. 71. (α) Διάταξη για μεταβολή του δυναμικού του νευράξονα στη θέση $x=0$ και παρατήρηση της χρονικής μεταβολής που προκαλεί στο δυναμικό άλλης θέσης x .
 (β) Δυναμικό ως προς τό χρόνο σ' αυτές θέσεις $x=0, x=1$ και $x=2 \text{ mm}$.

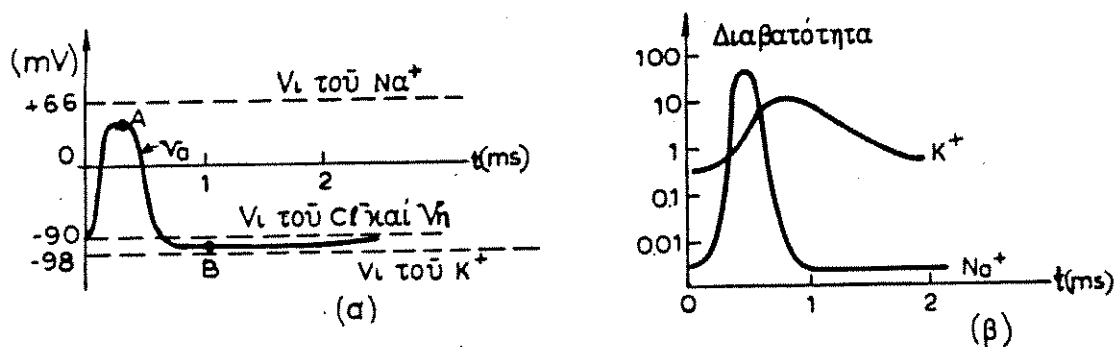
1.8. Το δυναμικό δράσης.

(The action potential).

Στά παραπάνω άσθενή σήματα ή μεταβολή του δυναμικού του νευράξονα ήταν ανάλογο προς τό ύψος του έρεθίσματος. Έάν όμως τό έρεθισμα (π.χ. αυτό που έπιβάλλει ή μπαταρία του Σχ.71) άνεβάσει τό δυναμικό μιας θέσης $x=0$ του νευράξονα σέ $V_a = -50$ mV τότε ό νευράξονας "διεγείρεται" ή "πυροδοτείται". Μετά κάποιο χρόνο, τό δυναμικό που μετράμε σέ κάποια θέση $x \neq 0$ άνεβαίνει (Σχ.72α) σέ θετικές τιμές (σημείο A) και σέ μερικούς άξονες φθάνει +50 mV. Στή συνέχεια τό δυναμικό (στή θέση x) πέφτει σέ τιμή κατώτερη και άπό τό "δυναμικό ήρεμίας" V_n και σιγά-σιγά έπανέρχεται στό $V_n = -90$ mV. Αύτός ό δυναμικός παλμός λέγεται "δυναμικό δράσης" (action potential).

Γιά τόν ίδιο νευράξονα τό σχήμα και τό ύψος της κυματομορφής (Σχ.72α) του δυναμικού δράσης είναι άνεξάρτητο και άπό τό ύψος του άρχικού "ίσχυροϋ" (πάνω άπό τήν κρίσιμη στάθμη πυροδότησης) έρεθίσματος και άπό τήν άπόσταση x (έκτός πολύ κοντά στή $x=0$).

Άρα τό δυναμικό δράσης ταξιδεύει κατά μήκος του νευράξονα και έχει ύψος σταθερό (όχι άνάλογο του ύψους του έρεθίσματος). Είναι δηλ. μία άπόκριση τύπου: "όλο ή τίποτα", που μοιάζει μέ τή διαδική άπόκριση ενός κοινού ήλεκτρικού διακόπτη στό έρεθισμα (πίεση) του χεριού μας. Ό διακόπτης ή κλείνει έντελώς ή μένει άνοιχτός αντίστοιχα μέ τό άν τό μηχανικό μας έρεθισμα πέρασε ή δέν πέρασε τήν κρίσιμη στάθμη "πυροδότησης" ή "διέγερσης" του διακόπτη.



Σχ.72. (α) Χρονική μεταβολή του δυναμικού δράσης σέ ένα σημείο.
(β) Άντίστοιχες χρονικές μεταβολές διαβατότητας σέ Na^+ και K^+ .

1.9. Διάρδοση παλμού στον άμύελο νευράξονα. Μοντέλο Hodgkin - Huxley.

Τό δυναμικό δράσης δημιουργείται από τις τεράστιες τοπικές αλλαγές στην διαβατότητα της μεμβράνης στά Na^+ και K^+ πού προκαλεί τό άρχικό "ίσχυρό" έρέθισμα (Σχ.72β). Άρχικά αύξάνει ή διαβατότητα σέ Na^+ πάνω από 1000! φορές. Έτσι εισβάλλουν στό κύτταρο Na^+ και άναστρέφουν τοπικά τό δυναμικό του. Αυτό μετά 0.3 ms έχει αλλάξει από -90mV σέ +50mV τείνοντας πρός τό δυναμικό ίσοροπίας $V_L = +66\text{mV}$ του Na^+ . Στο μεταξύ όμως έχει άρχίσει νά αύξάνει και ή διαβατότητα σέ K^+ . Αύτή άνεβαίνει λιγότερο (30 φορές) και βραδύτερα φθάνοντας στό μέγιστό της όταν ή διαβατότητα σέ Na^+ έχει πέσει σχεδόν στην κανονική τιμή της (Σχ.72β). Έτσι K^+ βγαίνουν έξω και τό v_a πέφτει πάλι σέ άρνητικές τιμές και μάλιστα χαμηλότερες από τό $V_{\eta} = -90\text{mV}$, τείνοντας πρός τό $V_L = -98\text{mV}$ των K^+ . Αύτός ό παλμός διάρκειας περίπου 1ms παράγεται μέ δαπάνη δυναμικής ενέργειας πού είχε άποθηκεύσει τοπικά ή μεμβράνη-πυκνωτής και όφείλεται στην άλλαγή της διαβατότητας σέ Na^+ και K^+ , τήν όποία άλλαγή "πυροδότησε" τό άρχικό "ίσχυρό" έρέθισμα. Η σχετικά βραδυκίνητη άντλία Na-K έπαναφέρει τήν τοπική τάξη στις C_E και C_S των Na^+ και K^+ σέ χρόνο περίπου 50ms μετά τό πέρασμα του παλμού.

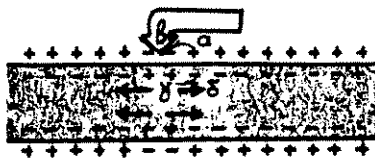
Τό Σχ.73α δείχνει ένα κομμάτι άμύελου νευράξονα σέ ήρεμία μέ τις περίσσειες των θετικών και άρνητικών ιόντων νά σχηματίζουν αντίστοιχα τήν έξωτερική και τήν έσωτερική στρώση φορτίου της μεμβράνης. Στο Σχ.73β ένα "ίσχυρό" τοπικό έρέθισμα (βέλος) προκάλεσε τή διεγερση δηλ. τό "δυναμικό δράσης". Αυτό σημαίνει στιγμιαία άναστροφή πολικότητας λόγω είσοδης των Na^+ . Η κίνηση του δυναμικού δράσης πρός τις δύο φορές μπορεί νά έξηγηθει ως εξής. Η διαφορά δυναμικού στην έξωτερική έπιφάνεια μεταξύ της διεγερμένης θέσης και των γειτονικών θέσεων και ή μεγάλη άγωγιμότητα του έξωκυττάριου ύγρου προκαλεί κίνηση του Na^+ από τήν θέση α στην β. Τό ίδιο προκαλεί και ή διαβατότητα της μεμβράνης από τήν θέση β στη γ. Στο μεταξύ ένα άλλο θετικό ίόν πήγε λόγω διαφοράς δυναμικού από τήν γ στη δ. Έτσι τό δυναμικό στη δ πέρασε τή στάθμη πυροδότησης και τό τελικό αποτέλεσμα είναι ή διάδοση της "έκπόλωσης" ή του δυναμικού δράσης κατά μία θέση πρός τά δεξιά. Τά ίδια συμβαίνουν και πρός τά άριστερά. Στο Σχ.73γ φαίνεται ένα μεταγενέστερο στογμιότυπο ($t \approx 0.5\text{ms}$) όταν ό παλμός έχει διαδοθει σέ άπόσταση x και πρός τις δύο κατευθύνσεις. Στο στιγμιότυπο $t = 2\text{ms}$, του Σχ.73δ τό μέτωπο της έκπόλωσης

Έχει βγει πιά εκτός Σχήματος, αλλά τό σταμάτημα τών έντονων ροών Na^+ πρὸς τὰ μέσα καί K^+ πρὸς τὰ έξω καί ἡ λειτουργία τῆς ἀντλίας Na^+-K^+ ἔφεραν ἐπαναπόλωση στήν ἀρχική θέση. Τό κύμα ἐπαναπόλωσης τῆς μεμβράνης προχωρώντας καί πρὸς τίς δύο κατευθύνσεις ἔχει ἤδη διαδοθεῖ σέ ἀπόσταση x' .

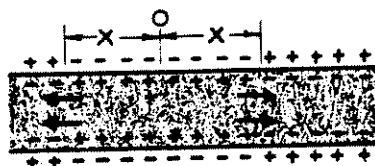
Ἄρα τό σῆμα κατά τή διάδοσή του μένει σταθερό (δέν ἔξασθενεῖ) γιατί ἐνισχύεται συνεχῶς (σέ κάθε θέση) μέ τή διεργασία: Πυροδότηση-ἐκπόλωση, πού δαπανᾷ δυναμική ἐνέργεια ἀποθηκευμένη στή μεμβράνη. Αὐτή τήν ἐνέργεια, ἐπαναποθηκεύει ἡ ἀντλία $\text{Na}-\text{K}$ κάθε θέσης, βγάζοντας έξω τόσα Na^+ καί βάζοντας μέσα τόσα K^+ ὅσα ἀλλάξαν πλευρά κατά τό πέρασμα τοῦ παλμοῦ. Τήν ἐνέργεια αὐτή παρέχει στήν ἀντλία ὁ μεταβολισμός.



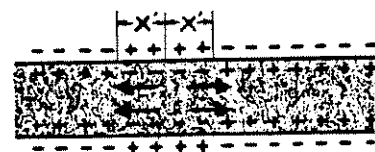
- (α) Ἠρεμία. Μembrάνη νευράξονα πολωμένη.
Χρόνος $t=0$.
 $V_{\alpha} = V_{\eta} = -90\text{mV}$ σέ ὅλες τίς θέσεις.



- (β) Τό ἐρέθισμα (βέλος). Τοπική πυροδότηση ἐκπόλωσης καί πρόκληση δυναμικοῦ δράσης. Χρόνος $t \approx 0,3 \text{ms}$.



- (γ) Ἡ διάδοση τῆς ἐκπόλωσης καί τοῦ δυναμικοῦ δράσης πρὸς τίς δύο κατευθύνσεις. Κύμα εἰσροῆς Na^+ . Χρόνος $t=0,5\text{ms}$.



- (δ) Ἡ ἐπαναπόλωση τῆς μεμβράνης ἀρχισε καί διαδίδεται.
Χρόνος $t \approx 2 \text{ms}$.

Σχ. 73. Διαδοχικά στιγμιότυπα δημιουργίας καί διάδοσης τοῦ δυναμικοῦ δράσης σ' ἓνα ἀμύελο νευράξονα.

1.10. Ύδραυλικό μοντέλο διάδοσης παλμοῦ.

Ίσως διευκολύνουμε τήν κατανόηση τῶν παραπάνω (τουλάχιστο από ἐνεργειακή ἀποψη) μέ τό παρακάτω μοντέλο πού ἐπινοήσαμε.

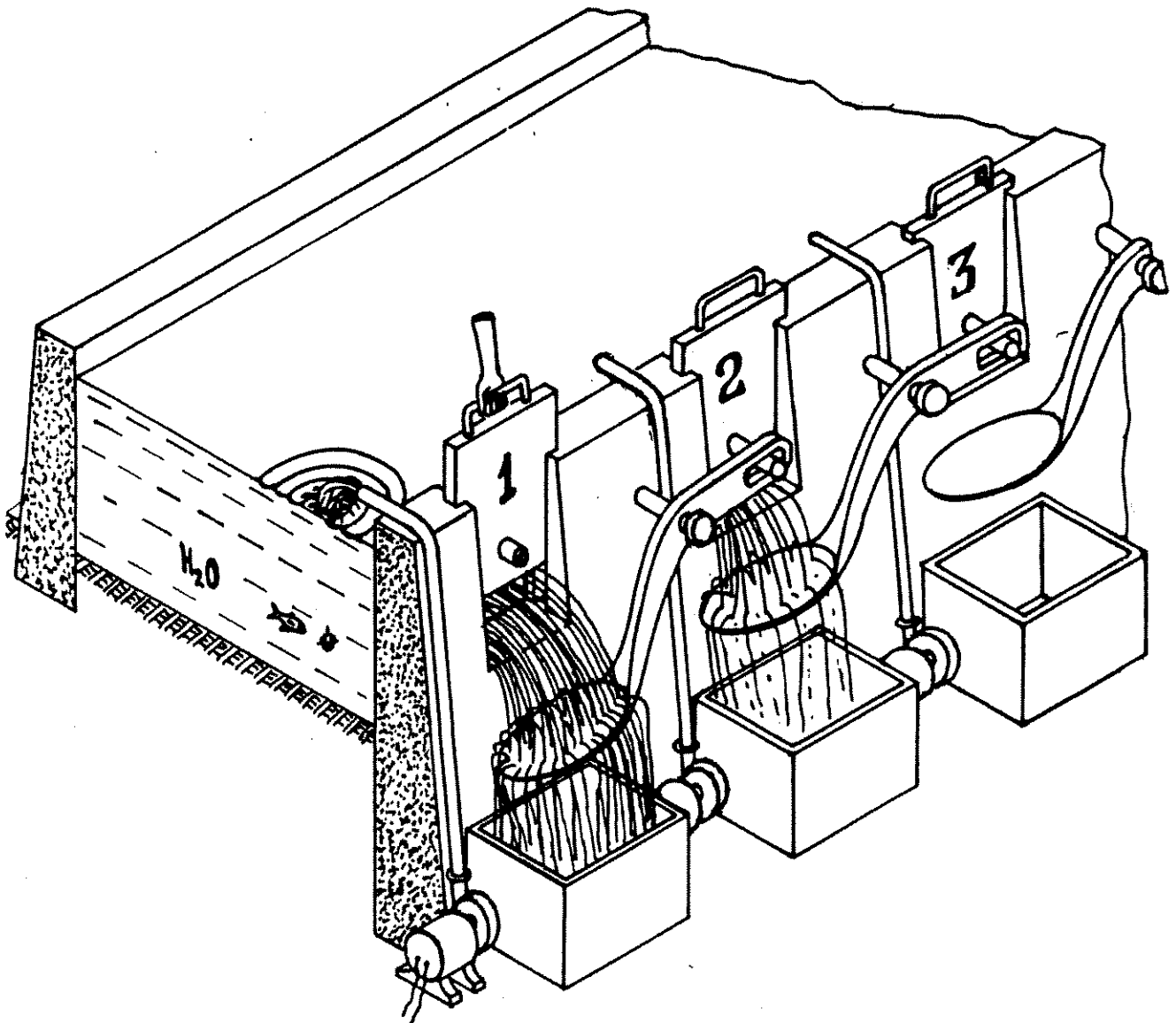
Ένα φράγμα νεροῦ ἔχει μιά σειρά ἀπό κατακόρυφα συρόμενες σιδερένιες θύρες. Κάθε θύρα συνδέεται μέ τά χέρια δύο κουταλιῶν-μοχλῶν. Τό ἕνα κουτάλι κατευθύνεται πρὸς τή δεξιά καί τό ἄλλο πρὸς τήν ἀριστερή γειτονική θύρα. Στό Σχ. 74 γιά ἀπλούστευση σχεδιάστηκε μόνο ἡ μιά σειρά τῶν κουταλιῶν καί θά περιγραφεῖ ἡ διάδοση τοῦ παλμοῦ μόνο πρὸς τή δεξιά. Ὁ ἀναγνώστης ὅμως θά φαντασθεῖ τή διάδοση τοῦ παλμοῦ καί πρὸς τή ἀριστερά διαμέσου μιᾶς δεύτερης σειρᾶς κουταλιῶν. Τά δεύτερα αὐτά κουτάλια εἶναι συμμετρικά τῶν πρώτων ὡς πρὸς τή κατακόρυφα ἐπίπεδα πού περνοῦν ἀπό τόν κοινό γιά κάθε ζευγάρι κουταλιῶν ἄξονα περιστροφῆς. Ὁ ἀναγνώστης θά δεχθεῖ καί ὅτι, ὅταν μιά θύρα ἀνοίγοκλείσει δέν μπορεῖ νά ξαναοίξει γιά κάποιο χρόνο μεγαλύτερο ἀπό τόν παλμό.

Ἀνασύρομε (ἐρεθίζομε) γιά λίγο τήν θύρα 1 καί τήν ἀφήνομε, ὅποτε τήν ξανακλείνει τό βάρος της. Ὁ παλμός τοῦ νεροῦ πού βγήκε πέφτει καί προσκρούει στή κοιλότητα τοῦ κουταλιοῦ πού συνδέεται μέ τή θύρα 2. Ἐτσι τό κουτάλι-μοχλός περιστρέφεται ἀπό τόν πρῶτο παλμό καί ἀνασύρει κατά ἴσο χρόνο τήν θύρα 2 πού ἐλευθερώνει δεύτερο ἴσο παλμό, πάλι μέ δαπάνη τῆς δυναμικῆς (ἀποθηκευμένης) ἐνέργειας τοῦ νεροῦ τῆς δεξαμενῆς κ.ο.κ. Ὁ παλμός διαδίδεται ἀμείωτος ἀπό θύρα σέ θύρα κατά μῆκος τοῦ φράγματος. Τό νερό πού βγαίνει ἀπό τήν κάθε θύρα πέφτει σ' ἕνα δοχεῖο. Μία ἀντλία μέ δαπάνη ἐνέργειας (π.χ. ἠλεκτρικῆς ἂν τήν κινεῖ ἠλεκτροκινητήρας) ξαναεβάζει σιγά-σιγά τό νερό στήν ὑψηλότερη στάθμη τῆς δεξαμενῆς.

Εἶναι προφανεῖς οἱ ἀντιστοιχίες:

- (α) Φράγμα \longrightarrow μεμβράνη
- (β) Δυναμική ἐνέργεια νεροῦ \longrightarrow δυναμική ἐνέργεια Na^+ καί K^+ .
- (γ) Θύρες διάβασης νεροῦ \longrightarrow πόροι διάβασης Na^+ καί K^+ .
- (δ) Ἐξωτερική δύναμη ἀνέλκυσης, μεγαλύτερη ἀπό βάρος Β θύρας \longrightarrow ἐξωτερικό ἐρέθισμα μεγαλύτερο ἀπό κρίσιμη στάθμη "πυροδότησης" νευράξονα.
- (ε) Διάδοση "νευροπαλμοῦ" κατά μῆκος φράγματος \longrightarrow διάδοση "νευροπαλμοῦ" (δυναμικοῦ δράσης) κατά μῆκος μεμβράνης.

- (στ) Ένισχυση του διαδιδόμενου νεροπαλμού σε κάθε θύρα του φράγματος με δαπάνη δυναμικής ενέργειας του αποθηκευμένου νερού → ένισχυση του διαδιδόμενου δυναμικού δράσης σε κάθε θέση μεμβράνης, με δαπάνη δυναμικής ενέργειας των αποθηκευμένων Na^+ και K^+ .
- (ζ) Έπαναφορά στην ύψη στάθμη του νερού που χύθηκε με ενέργεια που προσφέρει η ύδραντλία παίρνοντάς την από τη ΔΕΗ. → έπαναφορά των Na^+ έξω και των K^+ μέσα με ενέργεια που προσφέρει η άντλία $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ παίρνοντάς την από τον μεταβολισμό.



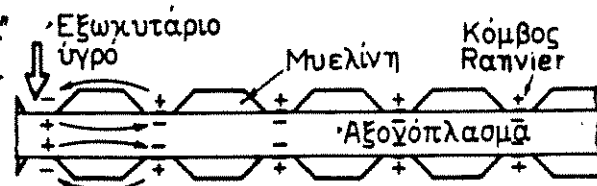
Σχ. 74. Ύδραυλικό ανάλογο "νευροπαλμού". Παραγωγή και διάδοση "νευροπαλμού" κατά μήκος φράγματος. Το νερό έπαναφέρουν ενεργητικά από την χαμηλή στην ύψη στάθμη οι άντλίες.

1.11. Μυελωμένος νευράξονας.

1.11.1. Γενικά.

Ελάχιστα ιόντα περνούν τό περίβλημα της μυελίνης σε σχέση με την έντονη διάβαση ιόντων στις περισφύξεις ή στους κόμβους Ranvier. Αύτοί απέχουν μεταξύ τους περίπου 1mm και ή μεμβράνη τους αποκρίνεται σε ερεθίσματα μεγαλύτερα από τό κρίσιμο, όπως εκείνη του άμύελου νευράξονα.

Δηλ. ή μεμβράνη "σκανδαλίζεται" (βέλος) και δημιουργεί δυναμικό δράσης. Αυτό στή συνέχεια προκαλεί ροή ρεύματος (Σχ.75) από τόν κόμβο μέσα στον άξονα



καί πρός τόν κόμβο έξω από τόν άξονα. Λίγο από τό ρεύμα αυτό διαρρέει διαμέσου της μυελίνης αλλά τό περισσότερο φθάνει στον επόμενο κόμβο γιατί ή απόσταση του 1mm μεταξύ των κόμβων είναι

Διάδοση δυναμικού δράσης σε έμυελο νευράξονα. Τό δυναμικό δράσης σ' ένα κόμβο "σκανδαλίζει" τόν επόμενο κόμβο και τόν αναγκάζει νά δημιουργήσει δυναμικό δράσης.

μικρή σε σχέση με τή "σταθερά χώρου" λ. Τό ρεύμα αυτό ελαττώνοντας τά φορτία της μεμβράνης στον επόμενο κόμβο, ανεβάζει τό δυναμικό της στην κρίσιμη τιμή "πυροδότησης" και προκαλεί δυναμικό δράσης. Έτσι το δυναμικό δράσης ταξιδεύει "πηδώντας" με μικρές απώλειες από κόμβο σε κόμβο. Έπειδή ή ένίσχυση (από κρίσιμο δυναμικό σε δυναμικό δράσης) και ή αλληλένδετη διάβαση ιόντων συμβαίνει μόνον στους κόμβους, ό έμυελος νευράξονας χρειάζεται λιγότερη μεταβολική ενέργεια για τήν επαναφορά του δυναμικού ήρεμίας, σε σχέση με τόν άμυελο νευράξονα.

Τό μοντέλο μας του Σχ. 74 για τόν άμυελο άξονα μπορεί να συμπληρωθεί, για ν' άντιστοιχεί στον έμυελο. Ας υποθέσουμε ότι αύξάνεται ή μεταξύ των θυρών απόσταση (ώστε ν' άντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ των κόμβων Ranvier) χωρίς όμως νά μακρύνουν τά κουτάλια. Τό νερό βγαίνοντας από τή θύρα 1 πέφτει σ' ένα όριζόντιο αύλακι και τρέχει με μικρές διαρροές (στεγανό αύλακι) και μικρές τριβές (λεϊτο αύλακι) κατά μήκος του φράγματος μέχρι τή "χούφτα" του γειτονικού κουταλιού. Πέφτοντας στή χούφτα αυτή άνοίγει διαμέσου του κουταλιού τή θύρα 2 κ.ο.κ. Έτσι ό νεροπαλμός "πηδώντας" ή τρέχοντας διά του αύλακιού από θύρα σε θύρα διαδίδεται με μικρότερες απώλειες μακρότερα και ταχύτερα.

*1.11.2. Αντίσταση και χωρητικότητα στον μυελωμένο νευράξονα.

Στους μυελωμένους άξονες τό πάχος τόυ τοιχώματος (μεμβράνη + μυελίνη $= \beta - \alpha = 2 \mu\text{m}$) είναι συγκρίσιμο μέ τήν έσωτερική άκτίνα ($\alpha = 5 \mu\text{m}$) τόυ νευράξονα. Αυτό πρέπει νά ληφθεϊ υπόψη στόυς ύπολογισμούς τής αντίστασης και τής χωρητικότητας τόυ τοιχώματος.

Έστω Q τό φορτίο πού είναι κατανεμημένο ομοιόμορφα στήν έσωτερική έπιφάνεια τής μεμβράνης, ενός τμήματος μήκους L τόυ νευράξονα. Τότε η πεδιακή ένταση E μέσα στή μεμβράνη βγαίνει άπό τό νόμο τής ροής:

$$\Psi = \int_S E \cdot dS = \frac{Q}{\epsilon \cdot \epsilon_0} \quad \eta \quad E \cdot (2\pi \cdot r \cdot L) = \frac{Q}{\epsilon \cdot \epsilon_0} \quad \eta \quad E = \frac{1}{2\pi \epsilon_0 \epsilon} \frac{Q/L}{r}$$

Όπου r είναι άκτίνα ($\alpha < r < \beta$).

Έστω $q = \frac{Q}{L}$ τό φορτίο ανά μονάδα μήκους νευράξονα. Τότε $E = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 \epsilon \cdot r}$

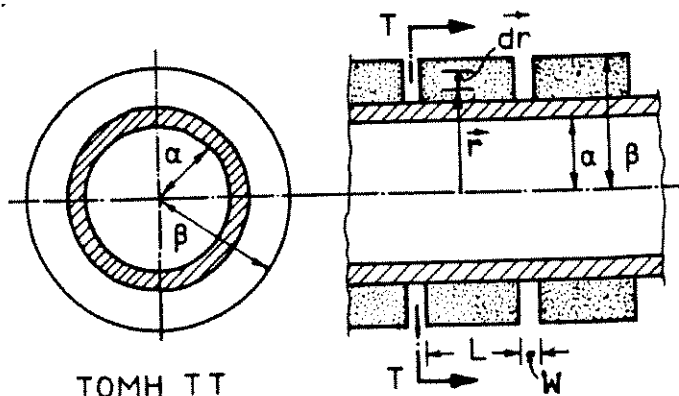
Τό δυναμικό ήρεμίας τόυ νευράξονα είναι:

$$V_{\eta} = \int_{\alpha+\beta}^{\alpha} \vec{E} \cdot d\vec{r} = - \int_{\alpha+\beta}^{\alpha} E \cdot dr = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 \epsilon} \int_{\alpha}^{\alpha+\beta} \frac{dr}{r} = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 \epsilon} \cdot \ln \frac{\alpha+\beta}{\alpha}$$

Η πυκνότητα ροής τόυ ρεύματος διαροφής (κάθετα στό τοίχωμα) είναι: $j = \frac{I}{S}$ και ό νόμος τόυ ΟΗΜ δίνει:

$$j = \frac{E}{\rho}. \quad \text{Άρα} \quad j = \frac{q}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \rho \cdot r}$$

Τό συνολικό ρεύμα πού ρέει πρός τά μέσα (τό q είναι άρνητικό) άπό τμήμα μήκους L είναι $I = j \cdot 2\pi r \cdot L = \frac{q \cdot L}{\epsilon_0 \epsilon \cdot \rho}$.



Σχήμα 76 . Έγκάρσια και έπιμήκης τομή έμυελου νευράξονα.

Η έγκάρσια αντίσταση R_{μ} νευράξονα μήκους L είναι:

$$R_{\mu} = \frac{V_{\eta}}{I} \quad \eta \quad R_{\mu} = \frac{(q/2\pi \epsilon_0 \epsilon)}{q \cdot L / \epsilon_0 \epsilon \cdot \rho} \ln(1+\beta/\alpha) \quad \eta \quad R_{\mu} L = (\rho/2\pi) \cdot \ln(1+\beta/\alpha)$$

Μετρήθηκε πειραματικά: $R_{\mu} \cdot L = 2,90 \cdot 10^5 \Omega \text{m}$.

Έπίσης ό Tasaki μέτρησε σέ μυελωμένο νευράξονα βατράχου τά α και β και βρήκε ότι $\alpha/(\alpha+\beta) = 0,7$ μέχρι 0,8. Δεχόμενοι τίσ παραπάνω τιμές βρίσκουμε άπό τήν τελευταία έξίσωση ότι η είδική αντίστα-

ση της μυελίνης είναι: $\rho = 5 \times 10^6 \Omega \text{m}$ μέχρι $8 \cdot 10^6 \Omega \text{m}$.

Η χωρητικότητα τμήματος μήκους L είναι:

$$C = \frac{Q}{V} \quad \eta \quad C = \frac{q \cdot L}{(q/2\pi\epsilon_0\epsilon) \ln(1+\beta/a)} \quad \eta \quad C = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot L}{\ln(1+\beta/a)} \quad \text{όποτε:}$$

$$C_m = \frac{C}{L} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln(1+\beta/a)}$$

Δεχόμενοι τις πειραματικές τιμές: $C/L = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{Fm}^{-1}$ και $(1+\beta/a) = 1,2$ ως $1,3$ του Tasaki, βρίσκουμε ότι η διηλεκτρική σταθερά της μυελίνης είναι $\epsilon = 6,5$ ως 10 .

Πολλαπλασιάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις που δίνουν τό $R_\mu \cdot L$ και τό C/L έχουμε: $(R_\mu \cdot L) (C/L) = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \rho \quad \eta \quad (\epsilon \cdot \rho) = \frac{(R_\mu L) \cdot (C/L)}{\epsilon_0}$

Το $\epsilon \cdot \rho$ είναι ανεξάρτητο της γεωμετρίας και έπειδή τά $(R_\mu L)$ και (C/L) είναι άμεσως μετρήσιμα με ακρίβεια, αξίζει νά σημειωθεί ότι βρέθηκε $\epsilon \cdot \rho = 52 \cdot 10^6 \Omega \text{m}$.

Μετρήσεις στον κόμβο ή περίσφυξη Ranvier έδωσαν:

$$R_{\text{κόμβου}} = 41 \times 10^6 \Omega \quad \text{και} \quad C_{\text{κόμβου}} = 1,5 \times 10^{-12} \text{F}$$

Αν η μεμβράνη αποτελείται από λιπίδια και πόρους τότε η διηλεκτρική σταθερά ϵ καθορίζεται από τά λιπίδια, ενώ η είδική της αντίσταση ρ καθορίζεται από τούς πόρους. Φαίνεται λογικό νά δεχθοϋμε ότι $\epsilon \approx 7$ για όλες τις περιπτώσεις όποτε από τις τιμές του $\epsilon \cdot \rho$ βρίσκουμε τις τιμές του ρ του παρακάτω Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Τιμές της ρ για διάφορα ύλικά τοιχώματος νευράξονα.

Ύλικο τοιχώματος →	Καθαρή διπλή στρώση λιπιδίων	Άμυελος νευράξονας καλαμαριού.	Μυελίνη	Κόμβος Ranvier
ρ σε Ωm →	$1,4 \times 10^{12}$	14×10^6	$7,4 \times 10^6$	1×10^6

Μέ τά παραπάνω στοιχεία μπορεί νά υπολογισθοϋν και συγκριθοϋν οι αντίστασεις σε ρεύμα διαρροής και της μεμβράνης του άμυελου νευράξονα και της μυελίνης. Από τή σχέση $R = \rho \cdot \frac{L}{S}$ βρίσκουμε ότι 1m^2 άμυελης μεμβράνης παρουσιάζει αντίσταση $R_\mu = 14 \times 10^6 \cdot 6 \times 10^{-9} = 0,064 \Omega$ ενώ 1m^2 μυελίνης έχει αντίσταση $R_\mu = 7,4 \times 10^6 \cdot 2 \times 10^{-6} = 15 \Omega$. Άρα η προσθήκη της μυελίνης κάνει τήν αντίσταση 300 φορές μεγαλύτερη.

τερη. Έτσι περιορίζεται το ρεύμα διαρροής και το σήμα μπορεί να φθάσει όχι μόνο στον επόμενο αλλά και στο μεθεπόμενο κόμβο Ranvier και να είναι ακόμα αρκετά υψηλό ώστε να σκανδαλίσει στον κόμβο το μηχανισμό δημιουργίας δυναμικού δράσης, δηλ. να ενισχυθεί μέχρι της αρχικής τιμής και μορφής του. Το σήμα λοιπόν εξασθενούμενο στο μυελωμένο τμήμα και ενισχυόμενο στον κόμβο είναι σαν να διαδίδεται "πηδώντας" από κόμβο σε κόμβο, γι' αυτό και η άγωγη αυτή λέγεται "άλμα-τώδης" (saltatory conduction).

Ένα τοπικό αναισθητικό όπως η προκαΐνη εμποδίζει τις αλλαγές διαβατότητας της μεμβράνης. Δηλ. εμποδίζει την ενίσχυση στον κόμβο. Για να είναι αποτελεσματικό το αναισθητικό πρέπει να δράσει σε απόσταση αρκετών κόμβων (τουλάχιστον 1cm) ώστε το σήμα βγαίνοντας από το αναισθητοποιημένο τμήμα του νεύρου να είναι τόσο ασθενές που να μη μπορεί να πυροδοτήσει την αναγέννησή του.

1.11.3. Ταχύτητα διάδοσης παλμού στον μυελωμένο νευράξονα.

Η ταχύτητα διάδοσης v του δυναμικού δράσης από κόμβο σε κόμβο μπορεί να υπολογισθεί προσεγγιστικά. Αυτή θα ίσούται με το πηλίκο της απόστασης $x=1\text{mm}$ μεταξύ των κόμβων, διά του χρόνου t που χρειάστηκε το δυναμικό δράσης για να καλύψει την απόσταση αυτή. Ο χρόνος αυτός t είναι συγκρίσιμος με τη σταθερά χρόνου $\tau = R \cdot C$ (Σχ.70). Όπου R είναι η αντίσταση από τον κόμβο μέχρι την απόσταση $x/2$ συνδέσεως του πυκνωτή C .

$$\text{Άρα } \tau = R \cdot C = \frac{\rho_a \cdot x}{2\pi r^2} \cdot 2\pi r \cdot x \cdot C_m = \rho_a \cdot C_m \cdot \frac{x^2}{r} \quad \text{και } v \approx \frac{x}{\tau}$$

$$\text{ή } v \approx \frac{r}{\rho_a \cdot C_m \cdot x}$$

Για $x=1\text{mm}$ και για τις τιμές των ρ_a και C_m που δείχνει ο Πίνακας 1 έχουμε $v=10x(\text{ms}^{-1}) \cdot (\mu\text{m})^{-1}$ που δίνει την ταχύτητα v διάδοσης του σήματος σε ms^{-1} όταν είναι γνωστή η ακτίνα r του νευράξονα σε μm . Οι πειραματικές τιμές του v είναι πράγματι μεταξύ $12x$ και $17x$ (σε ms^{-1} όταν η r είναι σε μm).

Η άνω σχέση δείχνει ότι ο παλμός ταξιδεύει άργα. Για $r=5\mu\text{m}$ έχουμε $v=50\text{ms}^{-1}$. Έτσι το μήνυμα χρειάζεται 0.08s για να πάει από το δάχτυλο του ποδιού, που π.χ. πάτησε καρφί, στον εγκέφαλο και να γυρίσει στους μύες που θα σηκώσουν το πόδι. Αυτός ο χρόνος ελ-

ναι υπερβολικά μακρὺς σὲ πολλές περιπτώσεις. Π.χ. ἡ ἐπαφή μετὰ καυτό ἀντικείμενο δὲν θὰ προλάβανε νὰ μᾶς προκαλέσει σοβαρὸ ἔγκαυμα ἂν ὁ χρόνος διαδόσεως τῶν σημάτων κατὰ μῆκος τῶν νεύρων ἦταν πολὺ μικρότερος. Αὐξάνοντας τὴν ἀκτίνα r μεγαλώνει ἡ ταχύτητα διάδοσης ($v=10r$) ἀλλὰ αὐξάνει καὶ ὁ χῶρος πού καταλαμβάνει ὁ νευράξονας (ἀνάλογος τοῦ $\pi \cdot r^2$) καὶ ἡ ἀπαιτούμενη μεταβολικὴ ἐνέργεια ἐπαναπόλωσης (ἀνάλογη τοῦ $2\pi r$). Ἐπομένως ἡ φύση ἔπρεπε νὰ συμβιβαστεῖ. Οἱ ἄξονες μεγάλου μήκους πρέπει νὰ προσφέρουν μεγάλες ταχύτητες γιὰ νὰ μειώσουν τὸ χρόνο μεταβίβασης σπουδαίων πληροφοριῶν. Γι' αὐτὸ ἔχουν συνήθως μεγαλύτερη ἀκτίνα. Ἐτσι περίπου 60% τῶν ἄξόνων πού πηγαίνουν στοὺς μύες ἔχουν $r=6 \div 10.5$ μm . Ἀντίθετα στὸν ἐγκέφαλο (νεύρα μικροῦ μήκους) τὰ 90% τῶν ἄξόνων ἔχουν $r=2\mu\text{m}$.

Ἐπίσης ἡ ἐπιλογή τῆς τιμῆς $x=1\text{mm}$ γιὰ τὴν ἀπόσταση μεταξὺ τῶν κόμβων δὲν εἶναι τυχαία. Ἀπὸ τὴ σχέση $v=r/(\rho_a \cdot C_m \cdot x)$, βγαίνει ὅτι αὐξάνοντας τὴν x ἐλαττώνεται ἡ v , πού εἶναι ἀνεπιθύμητο. Ἡ αὐξηση ὁμως τῆς x μειώνει τὸ πλῆθος τῶν κόμβων γιὰ τὸ ἴδιο μῆκος ἄξονα, ἐπομένως ἐλαττώνεται ἡ ἀπαιτούμενη μεταβολικὴ ἐνέργεια, πού εἶναι καλὸ. Πάλι λοιπὸν ἀπαιτεῖται συμβιβασμὸς. Ἡ ἐξέλιξη τῶν εἰδῶν κατέληξε ὅτι ἡ τιμὴ $x=1 \div 2$ mm βελτιστοποιεῖ λειτουργικὰ τὴν κατάσταση (ικανοποιητικὴ ταχύτητα μετὰ ἀνεκτὴ κατανάλωση ἐνέργειας).

2. Ηλεκτροκαρδιογραφία

2.1. Ο καρδιακός μύς.

Ο "καρδιακός" μύς είναι "γραμμωτός", όπως και οι "σκελετικοί" μύς. Έχει όμως κατασκευαστικές ιδιομορφίες που πρέπει να εκτεθούν εδώ για να κατανοηθεί η δημιουργία των δυναμικών που μετρά η ΗΚΓ στην επιφάνεια του σώματος.

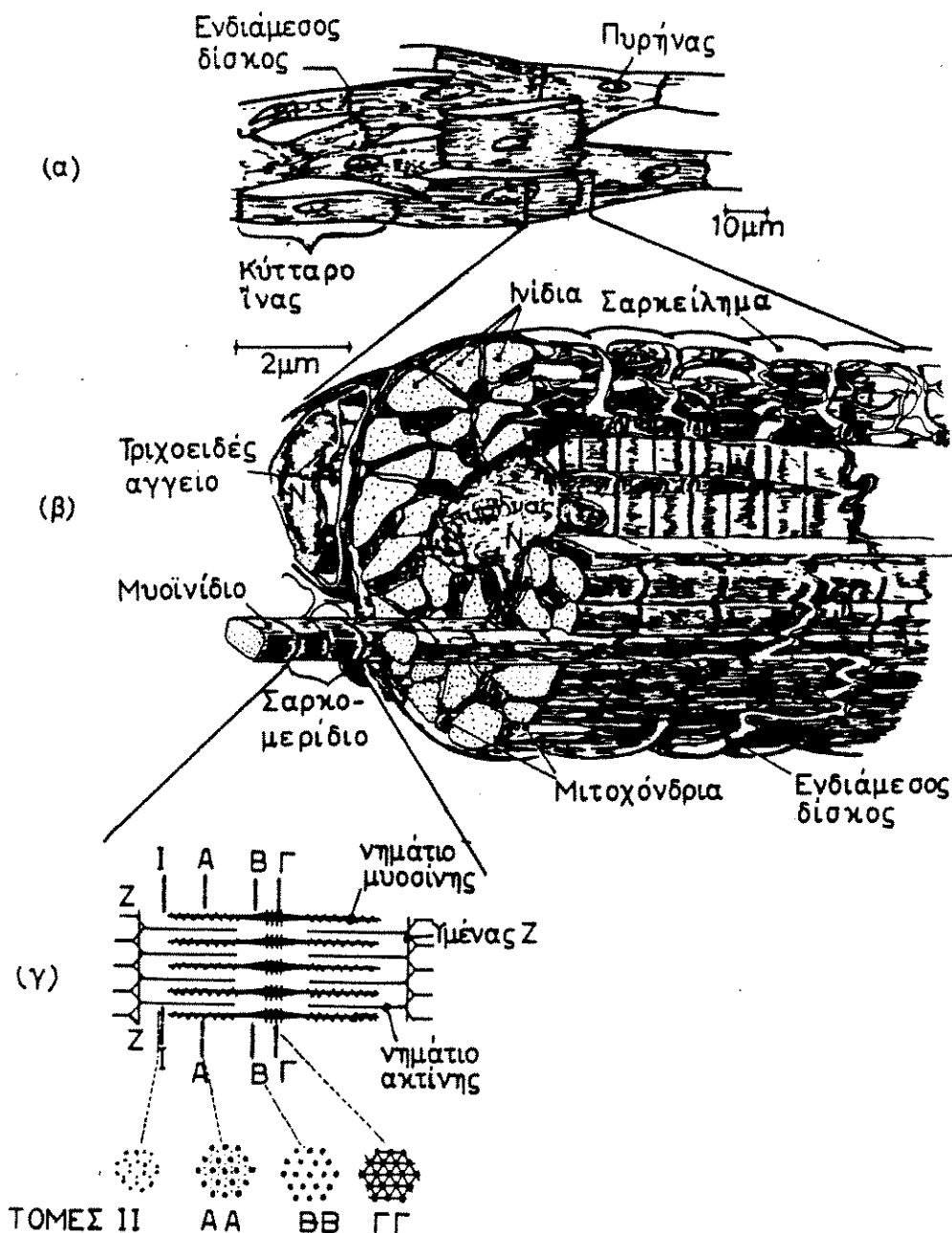
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 78α, οι ίνες του μυός ενώνονται και ξαναχωρίζουν σχηματίζοντας ένα δίκτυο. Τα κύτταρα των ινών ενώνονται μεταξύ τους με ενδιάμεσους δίσκους (intercalated discs). Αυτοί οι δίσκοι είναι 400 φορές πιο αγωγιμοί από τη μεμβράνη που περιβάλλει την ίνα και συμπιπτουν με "υμένες Z" στους οποίους τερματίζουν τα "σαρκομερίδια" (Σχ. 78 β). Σαρκομερίδιο είναι το επαναλαμβανόμενο σε σειρά δομικό στοιχείο του "μυοϊνιδίου". Κάθετα σε κάθε εγκάρσιο "υμένα Z" προβάλλουν και προς τις δύο πλευρές του, σαν παράλληλοι πλόκαμοι, τα λεπτά νημάτια της "άκτινης", που διαπλέκονται με τα πιο χοντρά νημάτια της "μυοσίνης" (Σχ. 78 γ). Όταν "έκπολωθεϊ" ένα κύτταρο (πέραςμα δυναμικού δράσης) τα ινίδια της άκτινης γλιστρούν παράλληλα προς εκείνα της μυοσίνης και τραβώντας πλησιάζουν τους δύο "υμένες Z". Έτσι μικραίνει το μήκος κάθε σαρκομερίδιου. Δηλ. βραχύνεται κάθε μυοϊνίδιο. Άρα βραχύνεται το κύτταρο και ο μύς συστέλλεται.

Η παραπάνω σύντομη ανατομική περιγραφή δείχνει ότι όταν ένα καρδιακό κύτταρο έκπολωθεϊ, τό δυναμικό δράσης διαδίδεται κατά μήκος της ίνας από κύτταρο σε κύτταρο διαμέσου των δίσκων και από ίνα σε ίνα, λόγω των διασυνδέσεων των δίσκων. Έτσι όλα τα κύτταρα που έχουν διασυνδεθεϊ με τους δίσκους και αποτελούν ένα "συγκύτιο" έκπολώνονται και μετά συστέλλονται.

Η καρδιά έχει δύο τέτοια "συγκύτια": τό "κολπικό" και τό "κοιλιακό". Αυτά χωρίζονται ηλεκτρικά με τον μονωτικό, ινώδη ιστό που περιβάλλει τους βαλβιδικούς δακτυλίους.

2.2. Παραγωγή και διάδοση του ρυθμικού παλμού.

Η καρδιά είναι διπλή άντλία με τέσσερεις θαλάμους (Σχ. 79). Η μηχανική λειτουργία της, που θα εκτεθεϊ παρακάτω, βασίζεται στην παραπάνω συστολή των δύο "συγκύτιων". Πρώτα συστέλλεται τό πάνω, τό κολπικό συγκύτιο, για να συμπληρωθεϊ ή μεταφορά του αίματος δια-



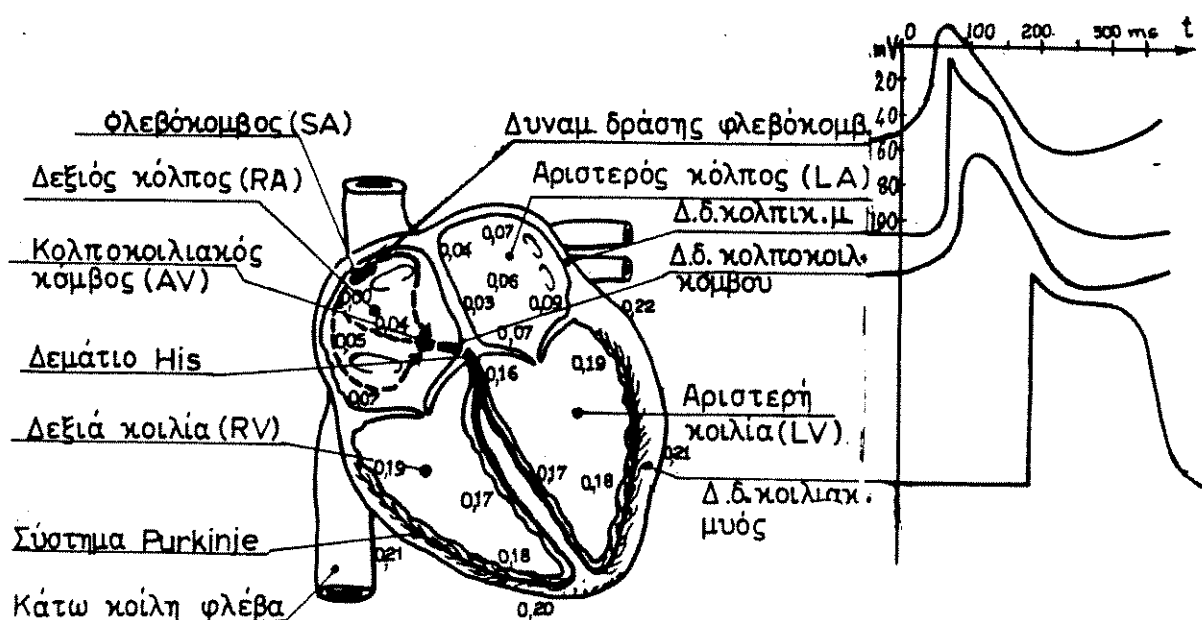
Εχ.78 (α) Παράσταση καρδιακού μύος όπως φαίνεται στο μικροσκόπιο φωτός.Οι "σπαστές" (ζίκ-ζάκ) χοντρές γραμμές δείχνουν τους ενδιάμεσους αγωγίμους δίσκους που χωρίζουν τὰ κύτταρα τῶν καρδιακῶν ἰνῶν.
 (β) Τμήμα ἴνας, πού περιλαμβάνει τό τέλος ἑνός κυττάρου καί τήν ἀρχή τοῦ ἐπόμενου, ὅπως φαίνεται μεγεθυμένο στό ἤλεκτρονικό μικροσκόπιο.
 (γ) Διάταξη τῶν νηματίων ἀκτίνης καί μυοσίνης.

μέσου των δύο βαλβίδων από τους δύο κόλπους στις δύο αντίστοιχες κοιλίες. Στη δεύτερη φάση συστέλλεται το κάτω, το κοιλιακό συγκύτιο, για να εκτοξευθεί το αίμα από τις κοιλίες στις δύο αντίστοιχες κυκλοφορίες, την πνευμονική και τη συστηματική. Αυτός ο διπλός παλμός επαναλαμβάνεται περίπου 72 φορές ανά λεπτό.

Πού παράγεται και πώς μεταφέρεται στους μύς των δύο συγκύτιων ή έντολή για αυτές τις δύο διαδοχικές συστολές;

Η καρδιά έχει ένα ειδικό κέντρο παραγωγής του περιοδικού παλμού (περιοδικού δυναμικού δράσης) που λέγεται "φλεβοκόμβος" (Sino-Atrial ή SA node) γιατί βρίσκεται κοντά στη θέση που εκβάλλει στο δεξιό κόλπο ή άνω κοίλη φλέβα.

Ο φλεβοκόμβος έχει διαστάσεις $1\text{mm} \times 3\text{mm}$ και τα κύτταρα των ινών του έχουν "δυναμικό ήρεμίας" μόνο -55 ως -60 mV (τά άλλα καρδιακά κύτταρα έχουν -85 ως -95 mV). Αυτό το καταχρηστικά ονομαζόμενο



Σχ. 79. Αριστερά: Τομή της καρδιάς με τους τέσσερις θαλάμους της. Φαίνεται το σύστημα παραγωγής (SA) και διάδοσης του παλμού έκπόλωσης των κυττάρων. Οι αριθμοί δίνουν σε δευτερόλεπτα το χρόνο άφιξης του παλμού σε κάθε θέση.

Δεξιά: Κυματομορφές του δυναμικού δράσης σε διάφορες θέσεις. Η κλίμακα χρόνου (οριζόντια σε ms) είναι ενιαία για όλες τις κυματομορφές. Η κλίμακα δυναμικού (κατακόρυφη σε mV) αρχίζει από άλλο ύψος (άλλο σημείο για το μηδέν) σε κάθε κυματομορφή, ώστε να διαχωρισθούν οπτικά οι κυματομορφές.

"δυναμικό ήρεμίας" (τά φλεβοκομβικά κύτταρα δέν "ήρεμοῦν" ἠλεκτρικά ὅσο ζοῦμε) εἶναι πολὺ κοντὰ στὴ στάθμη (οὐδὸ) "πυροδότησης" (περίπου -50 mV) τοῦ δυναμικοῦ δράσης, λόγω ὑψηλῆς διαπερατότητας σὲ Na^+ τῆς μεμβράνης τους.

Κατὰ τὸ τέλος ἑνὸς δυναμικοῦ δράσης (II.1.8. τὸ δυναμικὸ δράσης, Σχ.72), ἡ διαπερατότητα τῆς μεμβράνης σὲ K^+ εἶναι αὐξημένη. Βγαίνοντας τὰ K^+ ἔξω ἀπὸ τὸ κύτταρο τὸ "ὑπερπολώνουν", δηλ. κατεβάζουν τὸ δυναμικὸ του κάτω ἀπὸ τὸν οὐδὸ (π.χ. σὲ -57 mV). Στὴ συνέχεια, ἡ διαπερατότητα σὲ K^+ μειώνεται στὴν κανονικὴ τιμὴ τῆς ἀλλὰ ἡ μόνιμα αὐξημένη διαπερατότητα σὲ Na^+ ἐπιτρέπει τὴν εἰσροὴ Na^+ . Ἔτσι σὲ περίπου 0.6 s τὸ δυναμικὸ τοῦ κυττάρου ἀνεβαίνει βαθμιαῖα πάνω ἀπὸ τὸν οὐδὸ (σὲ περίπου -48 mV). Τότε πυροδοτεῖται αὐτόματα τὸ δεῦτερο δυναμικὸ δράσης. Αὐτὸ ἐπαναλαμβάνεται ρυθμικὰ σὲ ὅλη τὴ ζωὴ μας (περίπου 72 φορές ἀνά λεπτὸ).

Τὸ παραπάνω δυναμικὸ ἀπὸ τὶς ἴνες τοῦ φλεβόκομβου ἐξαπλώνεται στὶς μυϊκὲς ἴνες τῶν δύο κόλπων (Σχ.79) μὲ ταχύτητα περίπου $0,3$ m/s. Δεσμίδες νευρομυϊκῶν ἰνῶν μεταδίδουν μὲ μεγαλύτερη ταχύτητα ($\sim 0,5$ m/s) τὸν παλμὸ στὸν "κολποκοιλιακὸ κόμβο" (Atrio-Ventricular ἢ AV node). Ἐκεῖ φθάνει μετὰ περίπου 40 ms ἀπὸ τὴ στιγμὴ τῆς παραγωγῆς του στὸν φλεβόκομβο. Ἀπὸ τὴν εἰσοδὸ του στὸν κολποκοιλιακὸ κόμβο μέχρι τὴν ἔξοδο του πρὸς τὸ κολποκοιλιακὸ "δεμάτιο τοῦ His", ὁ παλμὸς καθυστερεῖ ~ 110 ms. Οἱ ἴνες τοῦ Purkinje πού σχηματίζουν αὐτὸ τὸ δεμάτιο ἀποτελοῦν ἀγώγιμο δίαυλο. Τὸ δεμάτιο ἀγεί τὸν παλμὸ διαμέσου μονωτικοῦ ἰστοῦ ἀπὸ τὸ κολπικὸ στὸ κοιλιακὸ συγκύτιο καὶ μὲ τὰ δύο σκέλη του τὸν ἐξαπλώνει στὸ μυοκάρδιο τῶν κοιλιῶν μὲ μεγάλη ταχύτητα ($\sim 1,5$ ὠς $4,0$ m/s). Ἔτσι ὅλες οἱ κοιλιακὲς ἴνες συστέλονται σχεδὸν ταυτόχρονα ἀλλὰ μὲ καθυστέρηση ~ 120 ms ὡς πρὸς τὴ συστολὴ τῶν κολπικῶν ἰνῶν. Αὕτὴ ἡ καθυστέρηση δίνει τὸ χρόνο γιὰ νὰ συμπληρωθεῖ ἡ ροὴ τοῦ αἵματος ἀπὸ τοὺς κόλπους στὶς κοιλίες ὅπως περιγράφεται στὴ συνέχεια.

2.3. Ἡ καρδιά σὰν διπλὴ ἀντλία.

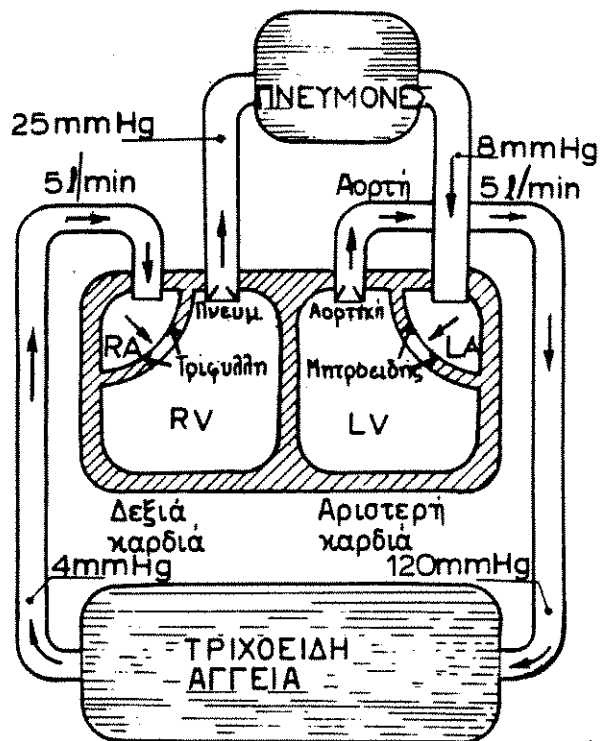
Τὸ Σχῆμα 80 δείχνει σχηματικὰ τὴν κυκλοφορία τοῦ αἵματος μέσα κι' ἔξω ἀπὸ τὴν καρδιά.

Τὸ δεξιὸ μέρος τῆς καρδιᾶς ἢ ἡ "δεξιὰ καρδιά" εἶναι μιὰ ἀντλία μὲ δύο θαλάμους, τὸ "δεξιὸ κόλπο" (Right Atrium ἢ RA) καὶ τὴ "δεξιὰ κοιλία" (Right Ventricle ἢ RV). Ὁ κόλπος RA δέχεται τὸ ἀπόξυγονωμένο αἷμα, πού τοῦ φέρνουν οἱ "κοῖλες φλέβες". Διαμέσου τῆς "τρίφυλλης" βαλβίδας πού εἶναι ἀνοιχτὴ, τὸ διοχετεύει στὴν κοιλία

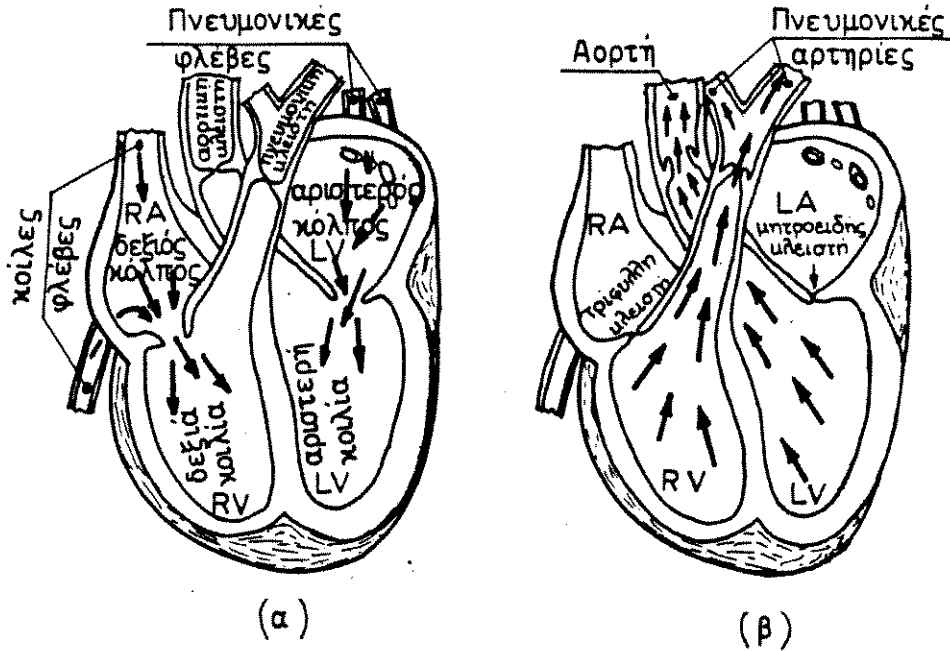
RV (Σχήματα 80 και 81α). Κατά τό τελευταίο τρίτο τής φάσης αυτής (πλήρωσης τής RV) ὁ RA συστέλλεται, αὐξάνοντας ἔτσι λίγο τήν πίεση του καί ἐπιταχύνοντας τήν πλήρωση τής RV. Στή συνέχεια, ἡ κοιλία συστέλλεται καί ἔτσι ἀνεβάζει μέσα της τήν πίεση τοῦ αἵματος. Ἡ πίεση αὐτή, περίπου 25mm Hg, κλείνει τήν "τριφυλλή" καί ἀνοίγει τήν πνευμονική βαλβίδα, γιά νά φύγει τό αἷμα πρὸς τοὺς πνεύμονες (Σχήματα 80 καί 81 β).

Ἐπιστρέφοντας τό αἷμα ἀπό τοὺς πνεύμονες, ὅπου ἀπαλλάχτηκε ἀπό τό CO_2 καί πήρε O_2 , φθάνει στήν "ἀριστερή καρδιά". Αὐτή εἶναι μιά δεύτερη ἀντλία. Ἀποτελεῖται πάλι ἀπό δύο θαλάμους: τόν ἀριστερό κόλπο, Left Atrium ἢ LA καί τήν ἀριστερή κοιλία, Left Ventricle ἢ LV. Αὐτοί οἱ δύο θάλαμοι (LA καί LV) λειτουργοῦν συντονισμένα μέ τοὺς ἀντίστοιχους πρώτους (RA καί RV). Δηλ. οἱ LA καί RA συστέλλονται σχεδόν ταυτόχρονα καί οἱ LV καί RV συστέλλονται πάλι ταυτόχρονα, ἀλλά μέ καθυστέρηση ὡς πρὸς τοὺς LA καί RA.

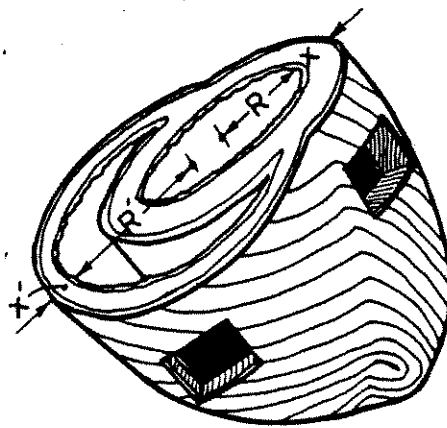
Ὁ κόλπος LA δέχεται τό ὀξυγονωμένο αἷμα πού τοῦ φέρνουν οἱ πνευμονικές φλέβες καί τό διοχετεύει διαμέσου τής "μητροειδοῦς" βαλβίδας στήν κοιλία LV (Σχήματα 80 καί 81 α). Στή συνέχεια ἡ LV συστέλλεται ἀπότομα καί ἔντονα ἀνεβάζοντας ἔτσι τήν πίεση τοῦ αἵματος της ἀπό περίπου 10 σέ 120 mm Hg. Ἡ αὕξηση αὐτή τής πίεσης ἀναγκάζει τή μητροειδῆ νά κλείσει καί τήν ἀορτική βαλβί-



Σχ.80. Σχηματικό διάγραμμα τοῦ κυκλοφοριακοῦ συστήματος πού δείχνει τοὺς τέσσερις θαλάμους καί τίς τέσσερις βαλβίδες τής καρδιάς καθώς καί τίς πιέσεις καί τή ροή τοῦ αἵματος.



Σχ. 81. (α) φάση πλήρωσης κοιλιών (άνοικτες βαλβίδες: ή τριφύλλη και ή μητροειδής).
 (β) φάση εκτόξευσης αίματος από κοιλίες προς αορτή και προς πνευμονικές αρτηρίες (άνοικτες βαλβίδες ή αορτική και ή πνευμονική).



Σχ. 82. Σχήμα τών κοιλιών και διάταξη τών μυϊκών ίνων τους σε καρδιά κομμένη εγκάρσια κάτω από τούς κόλπους.

δα ν'άνοιξει για νά έκτοξευθεϊ τό αίμα πρός τήν άορτή καί νά διανεμηθεϊ στή μεγάλη ή συστηματική κυκλοφορία τοῦ σώματος (Σχήματα 80 καί 81 β).

Άπό τά παραπάνω φάνηκε ὅτι ἡ άριστερή κοιλία (LV), λόγω τῆς ὕψηλης πίεσεως, παράγει καί παρέχει στό αίμα μηχανική ἰσχύ: $P \cdot I$ (ὅπου $P \equiv$ διαφορά πίεσης $\approx 100 \text{ mm Hg}$ καί $I \equiv$ παροχή $\approx 5 \text{ l/min}$). Αὐτή εἶναι πολύ μεγαλύτερη ἀπό τήν ἰσχύ πού προσφέρει ἡ δεξιή κοιλία (RV).

Βρήκαμε στή Μηχανική (σελ. 107, Σχ. 96) τή σχέση $P = 2\sigma/R$ πού συνδέει τή διαφορά πίεσης P (έσωτερική πλὴν έξωτερική πίεση) μέ τή μηχανική τάση σ καί τό πάχος x τοῦ τοιχώματος σφαιρικοῦ δοχείου άκτίνας R . Ἐρα για δοσμένο ὕλικό, ὅπως εἶναι οἱ ἴνες τοῦ καρδιακοῦ μυός (δοσμένες: άντοχή καί έπιτρεπτή τιμή τοῦ σ) ὅσο ὕψηλότερη εἶναι ἡ διαφορά πίεσης P , τόσο μεγαλύτερο πρέπει νά εἶναι τό πάχος x ἢ/καί τόσο μικρότερη ἡ άκτίνα R τοῦ τοιχώματος.

Ἐτσι ἐξηγεῖται γιατί ἡ LV συγκρινόμενη μέ τήν RV, ὅπως φαίνεται στό Σχήμα 82, έχει: (α) παχύτερο τοίχωμα ($x > x'$) (β) περίπου σφαιρικό σχῆμα καί (γ) μικρότερη άκτίνα καμπυλότητας ($R < R'$).

Ἐάν τό διαχωριστικό, μεταξύ LV καί RV, τοίχωμα (septum) ἦταν επίπεδο, θά έπρεπε (για ν'άντέξει στή διαφορά πίεσης μεταξύ τῶν δύο πλευρῶν του) νά εἶναι κατασκευασμένο ἀπό ἰσχυρό καί άκαμπτο ὕλικό (π.χ. ὀστοῦν). Αὐτό βέβαια θά δυσκόλευε πολύ τίς παραπάνω συστολές καί διαστολές, δηλ. τήν λειτουργία τῆς καρδιάς. Ἐπίσης θά μεγάλωνε τήν άκτίνα R για τόν ἴδιο ὄγκο τῆς ἡμισφαιρικής τότε LV, ἔρα θά χρειαζόταν μεγαλύτερο πάχος τοιχώματος x .

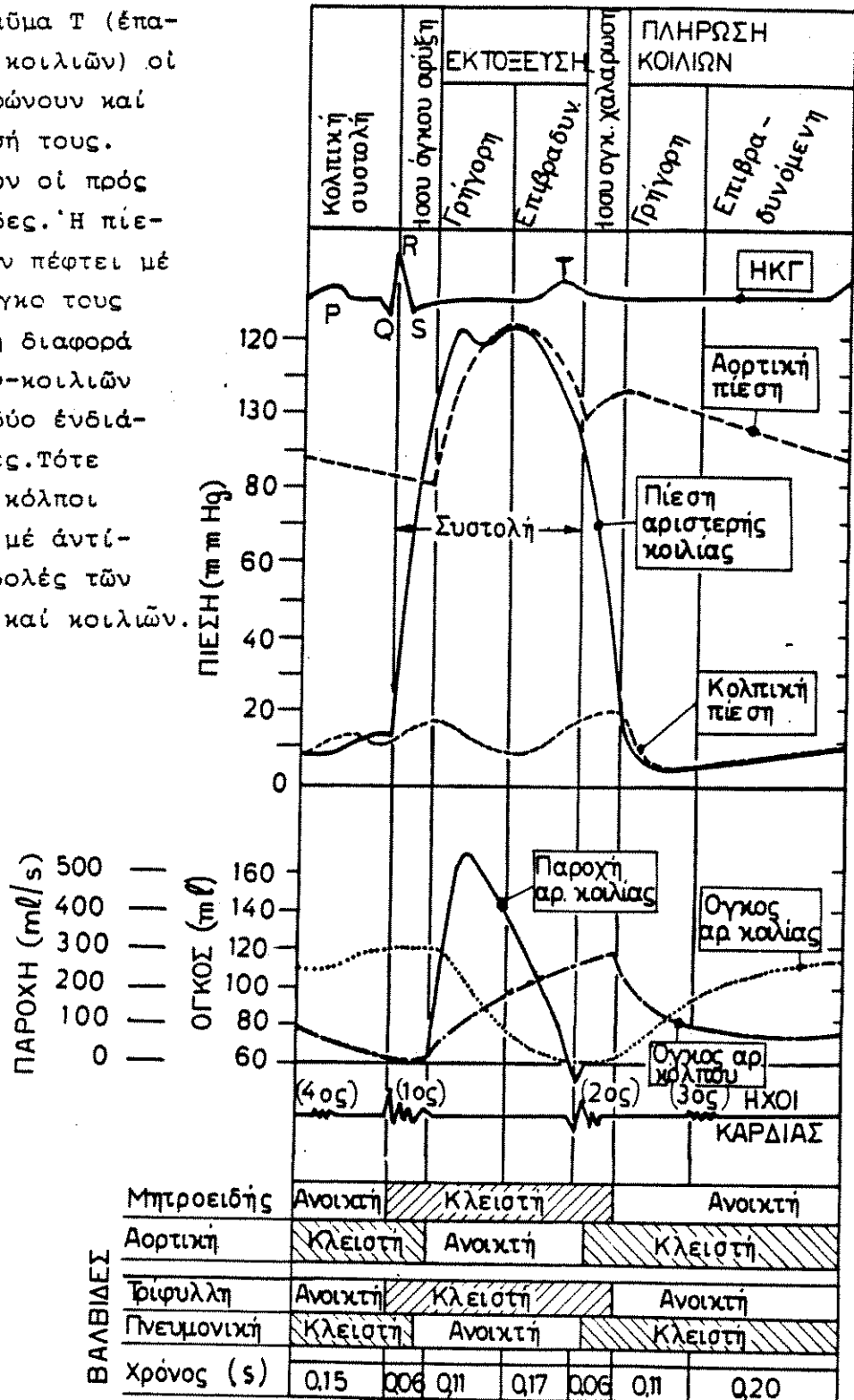
Τό Σχ. 83 παρουσιάζει τή χρονική μεταβολή πολλῶν παραμέτρων τῆς καρδιάς καί θά ἐξετασθεϊ ἀπό άριστερά πρός τά δεξιή.

Μετά τό κύμα P (ἡλεκτρική έκπόλωση τῶν κόλπων), οἱ κόλποι συστέλλονται (μειώνεται ὁ ὄγκος τους), αύξάνει ἡ "κολπική πίεση" καί συμπληρώνεται ἔτσι ἡ πλήρωση τῶν κοιλιῶν (αύξάνει ὁ ὄγκος τους). Οἱ "ένδιάμεσες" βαλβίδες (τρίφυλλη καί μητροειδής) εἶναι άνοικτές ἔνω οἱ βαλβίδες παροχῆς "πρός τά έξω" (πνευμονική καί άορτική) εἶναι κλειστές.

Μετά τό κύμα QRS (έκπόλωση τῶν κοιλιῶν), συστέλλονται οἱ κοιλίες, γι'αὐτό άνεβαίνει γρήγορα ἡ πιεσή τους καί άναγκάζει τίς δύο ένδιάμεσες βαλβίδες νά κλείσουν. Ἐπειδή τό αίμα εἶναι ὕγρό (άσυμπίεστο) ὁ ὄγκος τῶν κοιλιῶν δέν αλλάζει ὅσο ὅλες οἱ βαλβίδες εἶναι κλειστές. Ἡ αύξηση τῆς πίεσῆς τους άναγκάζει τίς "πρός τά έξω" βαλβίδες ν'άνοιξουν. Τότε έκτοξεύεται τό αίμα πρός τίς δύο "κυκλοφορίες".

Στό μεταξύ οί κόλποι έχουν επαναπολωθεί, αλλά τό κύμα επαναπόλωσης τους καλυπτόμενο από τό QRS δέν φαίνεται στό ΗΚΓ. Ό όγκος τους αύξάνει καθώς ξαναγεμίζουν.

Μετά τό κύμα T (έπαναπόλωση τών κοιλιών) οί κοιλίες χαλαρώνουν καί πέφτει ή πιεσή τους. Έτσι κλείνουν οί πρόστά έξω βαλβίδες. Η πιεσή τών κοιλιών πέφτει μέ σταθερό τόν όγκο τους μέχρις ότου ή διαφορά πίεσης κόλπων-κοιλιών ανοίξει τίς δύο ένδιάμεσες βαλβίδες. Τότε άδειάζουν οί κόλποι στίς κοιλίες μέ αντίστοιχες μεταβολές τών όγκων κόλπων καί κοιλιών.



Σχ. 83. Χρονοδιάγραμμα του καρδιακού κύκλου.

2.4. Δυναμικό από δίπολο.

Για να κατανοήσουμε πώς δημιουργούνται πάνω στο δέρμα τά δυναμικά που μετρά το ηλεκτροκαρδιογράφημα, θα θεωρήσουμε αρχικά ότι η καρδιά περιβάλλεται από διηλεκτρικό υλικό και ότι οι διαστάσεις της καρδιάς είναι μικρές σε σχέση με τις αποστάσεις της από τα σημεία μετρήσεως (ηλεκτρόδια) στο δέρμα.

Ένα απομονωμένο σημειακό ηλεκτρικό φορτίο q (Παράρτημα Β, Περίληψη) δημιουργεί σε κάθε σημείο A , του άπειρου διηλεκτρικού που το περιβάλλει, δυναμικό $U_1 = q / 4\pi\epsilon_0\epsilon r$, όπου r είναι η απόσταση του A από το q (Σχ. 84). Για εύκολία γραφής ονομάζουμε $K \equiv 1/4\pi\epsilon_0\epsilon$, οπότε $U_1 = K \cdot q / r$.

Αν υπάρχει και αντίθετο σημειακό φορτίο ($-q$) σε απόσταση x (μικρή σε σχέση με το r) από το q , τα δύο φορτία σχηματίζουν ένα "δίπολο" (I.1.9.2.).

Το δεύτερο αυτό φορτίο ($-q$) προκαλεί στο A δυναμικό $U_2 = -K \cdot q / (r + \Delta r)$.

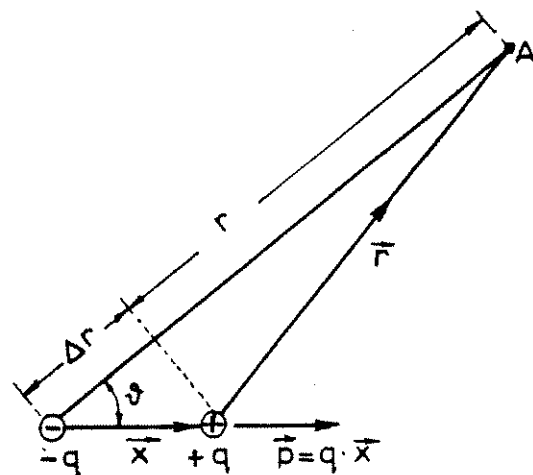
Άρα το δίπολο δημιουργεί στο A δυναμικό: $U = U_1 + U_2$ ή

$$U = K \cdot q \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r + \Delta r} \right) \quad \text{ή} \quad U = \frac{K \cdot q \cdot \Delta r}{r(r + \Delta r)}$$

Η απόσταση x είναι πολύ μικρή (πάχος μεμβράνης κυττάρου) σε σχέση με την r (απόσταση καρδιάς δέρματος). Γι' αυτό μπορούμε να γράψουμε: $\Delta r = x \cdot \cos\theta$ και $r \approx r + \Delta r$, οπότε $U = K \cdot q \cdot x \cdot \cos\theta / r^2$.

Η ροπή \vec{p} του διπόλου (I.1.92) ορίστηκε: $\vec{p} = q \cdot \vec{x}$, όπου το \vec{x} είναι άνωθεν από το $-q$ προς το $+q$ (Σχ. 84). Έπειδή $(\vec{p} \cdot \vec{r}) = p \cdot r \cdot \cos\theta = q \cdot x \cdot r \cdot \cos\theta$ το δυναμικό γράφεται: $U = K \frac{(\vec{p} \cdot \vec{r})}{r^3}$.

Τα δύο αντίθετα σημειακά φορτία του Σχ. 84 αντικαταστάθηκαν στο Σχ. 85 από δύο αντίθετα φορτία στρωμένα με πυκνότητα σ (σε Coulomb / m²) πάνω σε δύο στοιχειώδεις παράλληλες επιφάνειες dS . Αυτό συμβαίνει στις δύο επιφάνειες (έσω και έξω) ενός κομματιού κυτταρικής μεμβράνης επιφάνειας dS και πάχους x .

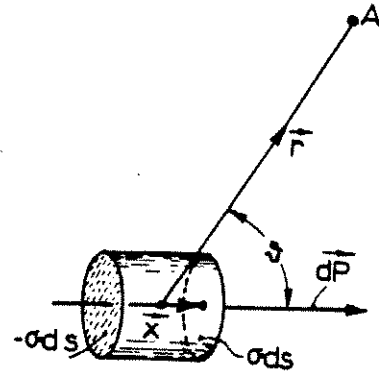


Σχ. 84. Υπολογισμός δυναμικού από δίπολο.

Τό νέο αυτό στοιχειώδες δίπολο, πού έχει ροπή $d\vec{p} = \vec{x} \cdot \sigma \cdot dS$ δημιουργεί στό A δυναμικό: $dU = K \cdot (d\vec{p} \cdot \vec{r}) / r^3$ ή $dU = K \cdot x \cdot \sigma \cdot dS \cdot \cos\theta / r^2$.

Άλλά $dS \cdot \cos\theta / r^2 = d\Omega$ είναι ή στερεά γωνία υπό τήν όποία τό A "βλέπει" τήν dS . Άρα $dU = K \cdot \sigma \cdot x \cdot d\Omega$.

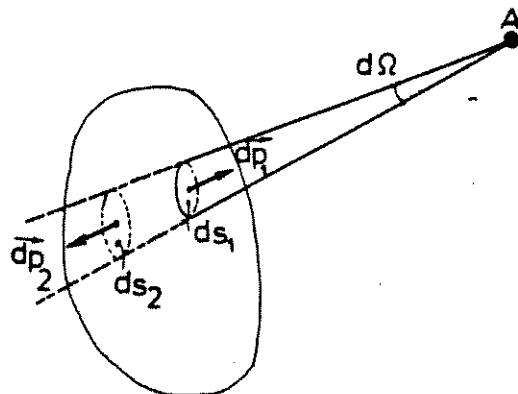
Άπό τά παραπάνω φαίνεται ότι τό δυναμικό dU είναι θετικό όταν $\cos\theta > 0$. Δηλ. τό dU του A έχει τό ίδιο πρόσημο (θετικό ή άρνητικό) μέ τό φορτίο πού είναι πλησιέστερα στό A.



Σχ.85. Δίπολο από διπλή στρώση φορτίων πυκνότητας σ .

2.5. Δυναμικό από κλειστή διπλή στρώση ή από κύτταρο σε ήρεμία.

Στό Σχ.86 φαίνεται ένα λεπτό κλειστό μονωτικό κέλυφος όπως ή μεμβράνη πού περιβάλλει τό κύτταρο. Αυτό τό κέλυφος ή ή μεμβράνη φέρει διπλή στρώση φορτίων (θετικών έξω και άρνητικών μέσα), πού έχουν κατανεμηθεϊ όμοιόμορφα μέ πυκνότητα σ .



Σχ.86. Διπλή όμοιόμορφη στρώση φορτίων σε κλειστό κέλυφος, προκαλεί έξω (στό A) δυναμικό μηδέν.

Ένας στοιχειώδης κώνος στερεάς γωνίας $d\Omega$ διαπερνά τό κέλυφος κόβοντας στήν έπιφάνεια του τούς δίσκους ds_1 και ds_2 . Τό δυναμικό dU_1 , πού δημιουργοϋν στό A τά φορτία τής ds_1 είναι θετικό γιατί τά θετικά φορτία είναι πιο κοντά στό A, ένω τό dU_2 πού δημιουργοϋν στό A τά φορτία τής ds_2 είναι άρνητικό. Έπειδή $|dU_1| = |dU_2| = K \cdot \sigma \cdot x \cdot d\Omega$ έχουμε: $dU = dU_1 + dU_2 = 0$. Τό ίδιο ίσχύει για κάθε άλλη γωνία $d\Omega$ πού συναντά τό κλειστό κέλυφος.

Άρα ένα κύτταρο σε ήρεμία (πολωμένο) δημιουργεί στό γύρω του χώρο δυναμικό μηδέν.

Στό έσωτερικό του κέλυφους ή του πολωμένου κυττάρου τό δυναμικό U_0 σε κάθε σημείο είναι τό ίδιο και βρίσκεται ολοκληρώ-

νοντας τή $dU = K \cdot \sigma \cdot x \cdot d\Omega$. Δηλ. $U_{\sigma} = K \cdot \sigma \cdot x \int_0^{4\pi} d\Omega$ ή $U_{\sigma} = K \cdot \sigma \cdot x \cdot 4\pi$ ή $U_{\sigma} = \frac{\sigma \cdot x}{\epsilon_0 \epsilon}$.

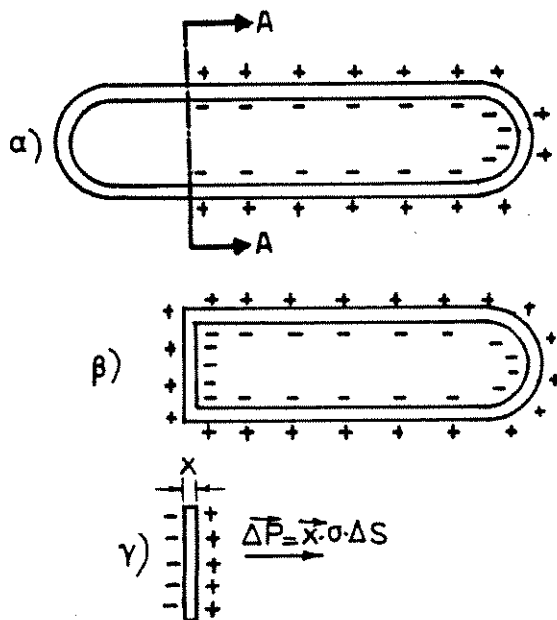
2.6. Δυναμικό από εκπολούμενο κύτταρο.

Είδαμε ότι τά κύτταρα του καρδιακού μυός έχουν σχήμα κυλινδρικό και συνδέονται μεταξύ τους με τους αγωγίμους ενδιάμεσους δίσκους.

Έστω ότι τό κύμα της εκπόλωσης μπήκε από τό άριστερό άκρο στο κύτταρο του Σχήματος 87α και αυτή τή στιγμή έχει φθάσει στη θέση ΑΑ. Η εκπόλωση προχωρώντας αφήνει πίσω της εκφορτισμένο κάθε σημείο της κυτταρικής μεμβράνης για σχετικά μακρύ χρόνο, όπως δείχνουν οι κυματομορφές κολπικού και κοιλιακού κυττάρου στα Σχήματα 79 και 88. Στο χρόνο αυτό τό κύμα της εκπόλωσης διατρέχει όλόκληρο τό συγκύτιο των κόλπων ή των κοιλιών αντίστοιχα.

Η κατανομή των φορτίων του κυττάρου στο (α) του Σχ.87 είναι (βια (ταυτή) με την κατανομή που θά προκύψει αν προστεθούν οι ομοιόμορφες κατανομές (β) και (γ). Τό (γ) είναι δίσκος με διάμετρο ίση και διπλή στρώση αντίθετη προς εκείνες του άριστερού άκρου του (β). Άρα τό δυναμικό που παράγει ή πραγματική κατανομή (α) σ' ένα σημείο Α του δέρματος, είναι ίσο με τό δυναμικό που προκαλούν οι φανταστικές κατανομές (β) & (γ) μαζί. Δηλ. όταν ή (γ) προστεθεί στο άριστερό άκρο της (β) εξουδετερώνει τά αντίστοιχα φορτία και έτσι προκύπτει ή κατανομή (α).

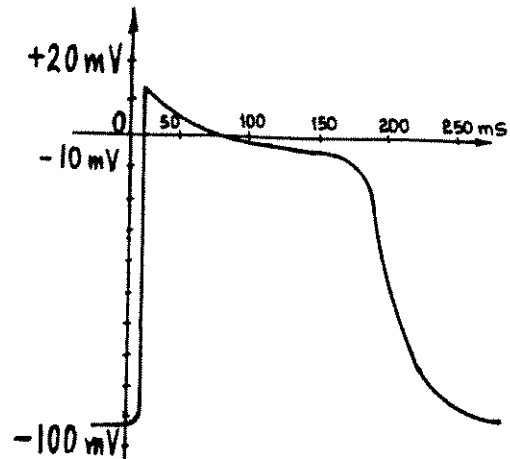
Έπειδή όμως ή (β) είναι ομοιόμορφη και κλειστή διπλή στρώση, προκαλεί έξω από τό κέλυφος δυναμικό μηδέν.



Σχ.87. (α) Σχηματική παράσταση κυττάρου του καρδιακού μυός. Τό κύμα εκπόλωσης μπήκε από τό άριστερό άκρο του και έχει φθάσει στη θέση ΑΑ. Η κατανομή των ηλεκτρικών φορτίων στο (α) είναι άκριβώς ή βια με εκείνη που θά προκύψει αν ο δίσκος του (γ) προστεθεί στο άριστερό άκρο του (β).

Άρα σε κάθε σημείο του δέρματος τό δυναμικό πού προκαλεί ή (α) είναι ίδιο μ'έκείνο πού θά προκαλούσε μόνη ή διπλή στρώση του δίσκου τής (γ) αν ήταν στή θέση AA του κυττάρου. Αύτός ο δίσκος έχοντας επιφάνεια ΔS , πυκνότητα φορτίου σ και πάχος x δίνει ροπή διπόλου $\Delta \vec{p} = \vec{x} \cdot \sigma \cdot \Delta S$. Τό \vec{x} είνσι άνυσμα κάθετο στό δίσκο μέ κατεύθυνση από τά άρνητικά πρós τά θετικά φορτία. Δηλ. τό $\Delta \vec{p}$ έχει τήν ίδια κατεύθυνση μέ τή διάδοση τής έκπόλωσης.

Τελικά συμπεραίνουμε ότι ένα πλήρως πολωμένο ή πλήρως έκπολωμένο κύτταρο έχει μηδενική ροπή διπόλου. Ένα κύτταρο πού έκπολώνεται έχει ροπή διπόλου $\Delta \vec{p}$ πού κατευθύνεται όπως διαδίδεται τό κύμα έκπόλωσης.



Σχ.88. Έκπόλωση (δυναμικό μηδέν) και έπαναπόλωση (δυναμικό ήρεμίας -85 ως -90mV) κάθε σημείου τής μεμβράνης ενός κοιλιακού κυττάρου του μυοκαρδίου.

2.7. Τό άνυσμα ροπής του ίσοδύναμου διπόλου της καρδιάς.

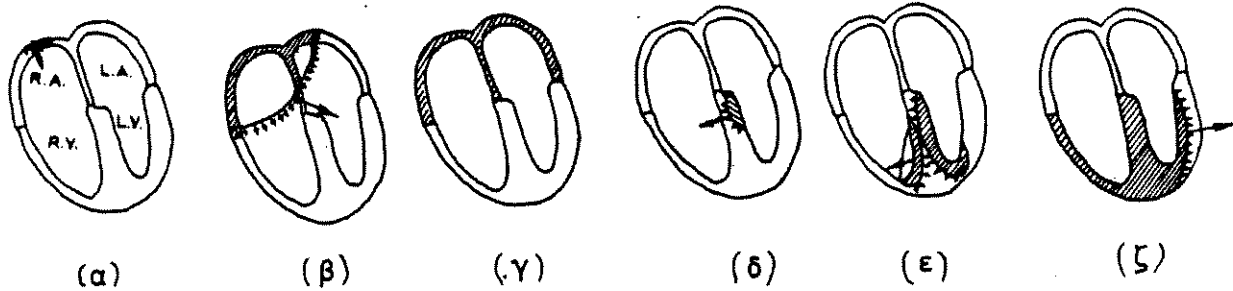
Σέ κάθε παλμό τής καρδιάς ή έκπόλωση τών κυττάρων της αρχίζει από τόν φλεβόκομβο και έξαπλώνεται πρώτα στους δύο κόλπους. Όταν φθάσει στόν φλεβοκοιλιακό κόμβο καθυστερεί λίγο και μετά έπεκτείνεται γρήγορα στά κύτταρα τών δύο κοιλιών.

Μέ τήν άνακρίβεια τών παραπάνω παραδοχών, αυτή ή διαδικασία μπορεί νά έκφρασθεϊ ήλεκτρικά από ένα συνιστάμενο άνυσμα \vec{p} , όλικης ροπής διπόλου τής καρδιάς, πού θά είναι τό άνυσματικό άθροισμα όλων τών συνιστωσών ροπών διπόλου $\Delta \vec{p}$ τών κυττάρων. Αυτό δείχνει τό Σχήμα 89 για έξη διαδοχικά στιγμιότυπα τής έκπόλωσης. Σέ κάθε στιγμιότυπο τό έκπολωμένο τμήμα του μυοκαρδίου έχει σκιασθεϊ. Στο στιγμιότυπο (δ), λόγω τής καθυστέρησης του σήματος στόν κολποκοιλιακό κόμβο, οί κόλποι πρόλαβαν νά έπαναπολωθοῦν πρίν έξαπλωθεϊ πολύ ο παλμός στις κοιλίες. Τά μικρά βέλη δείχνουν τις συνιστώσες $\Delta \vec{p}$ τών κυττάρων και τό μεγάλο βέλος δείχνει τή στιγμιαία συνισταμένη ή

όλική ροπή διπόλου ($\vec{p} = \sum \Delta\vec{p}$) της καρδιάς. Για να συνθέσουμε τα πολλά $\Delta\vec{p}$ σ' ένα \vec{p} δεχθήκαμε ότι οι διαστάσεις της καρδιάς είναι μικρές σε σχέση με τις αποστάσεις της (r) από τα σημεία μετρήσεως δυναμικού.

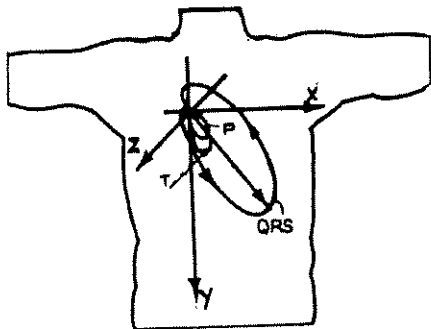
Τό Σχ.90 δείχνει τούς τρεις διαδοχικούς βρόχους P, QRS και T που γράφει η αίχμη του άνύσματος \vec{p} κατά τόν καρδιακό κύκλο.

Τό \vec{p} ορίζεται στό χώρο σε κάθε στιγμή, αν είναι γνωστές οι συ-

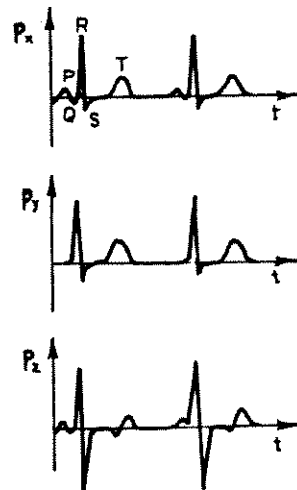


Σχ.89. Έξη διαδοχικά στιγμιότυπα της έκπόλωσης του μυοκαρδίου.

Σε κάθε στιγμιότυπο τά μικρά βέλη συμβολίζουν τίς ροπές διπόλου $\Delta\vec{p}$, πού έμφανίζουν τά κύτταρα, ένώ τό μεγάλο βέλος δείχνει τή συνισταμένη τους ($\vec{p} = \sum \Delta\vec{p}$) όλική ροπή διπόλου της καρδιάς. (α) Ή έκπόλωση άρχίζει από τόν φλεβόκομβο, (β) Οί κόλποι σχεδόν έκπολώθηκαν. (γ) Οί κόλποι έκπολώθηκαν πλήρως. Ή ροπή διπόλου είναι καί μένει μηδενική όσο περνά τό δυναμικό δράσης διά του κολποκοιλιακού κόμβου. (δ) Άρχίζει ή έκπόλωση της άριστερης κοιλίας καί οι κόλποι έπαναπολώνονται. (ε) καί (z) Συνεχίζεται ή έκπόλωση τών κοιλιών.



Σχ.90. Γεωμετρικός τόπος της αίχμης του άνύσματος \vec{p} της όλικης ροπής διπόλου της καρδιάς.



Σχ.91. Οί τρεις συνιστώσες p_x, p_y, p_z του \vec{p} κατά τούς άξονες X, Y, Z του Σχ.90, συναρτήσεϊ του χρόνου t.

νιστώσες του P_x, P_y, P_z , κατά τούς άξονες X, Y, Z. Η χρονική μεταβολή αυτών των συνιστωσών φαίνεται στο Σχ.91.

Κατά την εκπόλωση των κόλπων (στιγμιότυπα α, β και γ στο Σχ.89) τό \vec{p} γράφει τό μικρό βρόχο P, πού είναι σχεδόν όριζόντιος ($p_y=0$ στο Σχ.91). Η εκπόλωση των κοιλιών δίνει τό μεγάλο βρόχο QRS. Κατά την έπαναπόλωση των κυττάρων των κοιλιών, σκεπτόμενοι όπως στην εκπόλωση (Σχ.87), βρίσκομε ότι τό Δp θά έχει φορά αντίθετη από τή φορά κίνησης του κύματος έπαναπόλωσης. Τό συνιστάμενο άνυσμα ροής διπόλου \vec{p} τής έπαναπόλωσης των κοιλιών, γράφει τό βρόχο T. Η έπαναπόλωση των κόλπων δίνει μικρό άνυσμα πού καλύπτεται από τό μεγάλο άνυσμα τής εκπόλωσης των κοιλιών, πού έχει ήδη αρχίσει.

2.8. Η διαφορά δυναμικού δύο σημείων το \vec{u} δέρματος.

Γιατί τό μοντέλο του διηλεκτρικού μέσου λειτουργεί και τί θά βρούμε αν πλησιάσομε περισσότερο την πραγματικότητα, θεωρώντας ότι η καρδιά περιβάλλεται από άγώγιμο υλικό ειδικής αντίστασης ρ ;

Στό άγώγιμο μέσον τά φορτία κινούνται και προκαλούν ρεύμα. Τό δίπολο τώρα, αντί των δύο στατικών φορτίων $+q$ και $-q$, αποτελείται από δύο πηγές έντάσεως $+i$ και $-i$.

Εφαρμόζοντας τό νόμο του Gauss για ένα μοναχικό φορτίο q :

$$\int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon} \quad \text{βρήκαμε: } \underline{\underline{E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \cdot \epsilon} \cdot \frac{q}{r^2}}}, \text{ στο διηλεκτρικό μέσο σταθεράς } \epsilon.$$

Όμοια, θεωρώντας μία μοναχική σημειακή πηγή έντασης i πού περιβάλλεται από σφαίρα άκτίνας r , βρίσκομε από την $\int_S \vec{j} \cdot d\vec{s} = i$ ότι η πυκνότητα ροής είναι: $j = \frac{i}{4\pi r^2}$. Επειδή όμως ο γενικός νόμος του Ohm δίνει $E = j \cdot \rho$ έχομε: $\underline{\underline{E = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{i}{r^2}}}$

Παρατηρούμε ότι τή θέση του q πήρε τό i , τή θέση του $\frac{1}{4\pi\epsilon_0 \epsilon} \equiv K$ πήρε τό $\frac{\rho}{4\pi}$ και η κατανομή τής E του άγώγιμου μέσου είναι τής ίδιας μορφής (αντίστροφα ανάλογη προς r^2) με εκείνη του μονωτικού μέσου.

Επαναλαμβάνοντας τό σκεπτικό του 2.4. βρίσκομε ότι δίπολο σημειακών πηγών $+i$ και $-i$ πού απέχουν απόσταση \vec{x} (άνυσμα από τό $-i$ στο $+i$) δημιουργεί σε κάθε θέση A πού όρίζεται από την αίχμη του \vec{r} (τό \vec{r} αρχίζει πάλι από τό δίπολο) δυναμικό: $U = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{(\vec{p} \cdot \vec{r})}{r^3}$ όπου $\vec{p} = i \cdot \vec{x}$.

Συγκρίνοντας την $U = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{(\vec{p} \cdot \vec{r})}{r^3}$ με την $U = K \frac{(\vec{p} \cdot \vec{r})}{r^3}$ βλέπομε

ότι: είτε μονωτικό είτε αγώγιμο είναι το ομοιογενές μέσον που περιβάλλει ένα δίπολο, ή κατανομή του δυναμικού έχει την ίδια μορφή. Έπομένως μπορούμε να συνεχίσουμε με το πρώτο μοντέλο (του διηλεκτρικού μέσου).

Έστω λοιπόν ότι η καρδιά βρίσκεται στο 0 (Σχ.92) και έχει ροπή διπόλου \vec{p} . Τα σημεία 1 και 2 ορίζονται από τα άκρα των άνωσμάτων \vec{r}_1 και \vec{r}_2 όπου $r_1 \approx r_2 = r$. Η διαφορά δυναμικού τους σύμφωνα με τη σχέση:

$$U = K(\vec{p} \cdot \vec{r}) / r^3 \text{ είναι: } v_{12} = U_1 - U_2 =$$

$$= K(\vec{p} \cdot \vec{r}_1) / r^3 - K(\vec{p} \cdot \vec{r}_2) / r^3 \text{ ή}$$

$$v_{12} = K \cdot \vec{p} \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}_2) / r^3$$

Επειδή: $\vec{r}_1 - \vec{r}_2 = \vec{R}$ γίνεται:

$$v_{12} = K(\vec{p} \cdot \vec{R}) / r^3$$

Αν φέρομε από το 0 ευθεία παράλληλη προς το \vec{R} σχηματίζεται η γωνία θ και η τελευταία σχέση γράφεται:

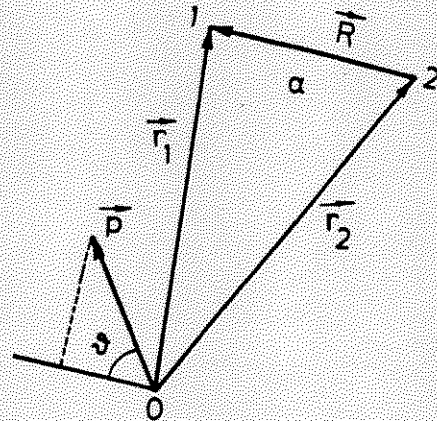
$$v_{12} = K \cdot R \cdot p \cdot \cos \theta / r^3$$

Άρα η στιγμιαία διαφορά δυναμικού v_{12} που μετράμε μεταξύ των σημείων 1 και 2 του δέρματος είναι ανάλογη της προβολής $(p \cdot \cos \theta)$ του στιγμιαίου \vec{p} πάνω στην ευθεία που ενώνει το 1 με το 2. Ακριβέστερα (άλλα λιγότερο απλά), η v_{12} είναι ανάλογη του αλγεβρικού άθροισματος των προβολών των πολλών κυτταρικών \vec{p} πάνω στο \vec{R} . Επίσης η v_{12} είναι ανάλογη του μήκους R και αντίστροφα ανάλογη του r^3 .

2.9. Ο ί "ά π α γ ω γ έ ς" τ ο υ Η.Κ.Γ.

Θεωρητικά τρεις μόνο μετρήσεις διαφορών δυναμικού αρκούν για να ορισθούν από την $v_{12} = K \cdot R \cdot p \cdot \cos \theta / r^3$ τρεις προβολές: $(p \cdot \cos \theta)$ της \vec{p} (π.χ. οι p_x, p_y, p_z) και επομένως να ορισθεί ή \vec{p} .

Τό τυπικό ήλεκτροκαρδιογράφημα όμως, καταγράφει 12 διαφορές δυναμικού ή τάσεις, χρησιμοποιώντας έννεα ήλεκτρόδια. Υπάρχουν πολλοί λόγοι γι' αυτό. Τό σώμα δέν έχει κατασκευασθεί από ομοιογενές ύλικό (μονωτικό ή αγώγιμο) όπως δεχτήκαμε. Οι αποστάσεις των ήλεκτροδίων από την καρδιά δέν είναι τόσο μεγάλες σε σχέση με τίς διαστάσεις της καρδιάς ώστε νά είναι ακριβής ή παραδοχή μας ότι ή καρδιά είναι σημείο που ίσαπέχει από τά δύο ήλεκτρόδια. Τό δυναμικό U που προκαλεί ένα δίπολο σ' ένα σημείο του δέρματος είναι αντίστροφα ανάλογο προς τό τετράγωνο της απόστασης του σημείου



Σχ.92. Υπολογισμός της διαφοράς δυναμικού V_{AB} που προκαλεί μεταξύ των Α και Β τό δίπολο ροπής \vec{p} .

από τό δίπολο. Έτσι τό U έπηρεάζεται πολύ από τά κύτταρα τής καρδιάς πού είναι πιο κοντά στό σημείο αυτό.

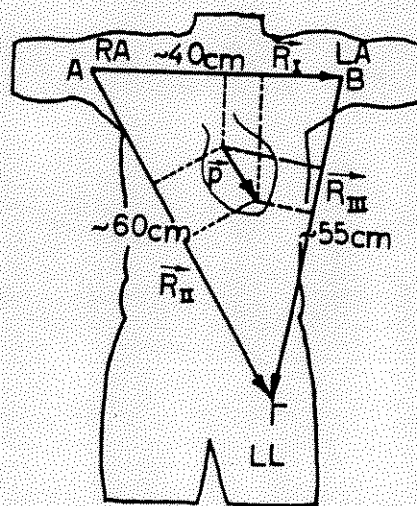
Τά ήλεκτρόδια έχουν αρκετή έπιφάνεια και αλοιφονται με άγωγιμη κρέμα ώστε νά μειωθεί ή αντίσταση διαβάσεως από τό ήλεκτρόδιο στό σώμα και νά μείνει σταθερή κατά τή λήψη του ΗΚΓ, άκόμα και άν κινηθεί λίγο ο άσθενής.

Τά πρώτα τρία ήλεκτρόδια προσαρμόζονται στους δύο καρπούς και τό τρίτο στην άριστερή κνήμη.

Η "άντίσταση εισόδου" του ήλεκτροκαρδιογράφου είναι τεράστια. Δηλ. τό όργανο αυτό "αίσθάνεται", παίρνει και ένισχύει τήν τάση (διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του δέρματος) τραβώντας ελάχιστη (σχεδόν μηδενική) ένταση ρεύματος. Έτσι τό ρεύμα και έπομένως ή πτώση δυναμικού (νόμος Ohm) κατά μήκος των άκρων μελών είναι άσήμαντα. Μπορούμε δηλ. νά θεωρήσουμε ότι τά άκρα (τά δύο χέρια και τό άριστερό πόδι) αποτελούν άγωγιμες έπεκτάσεις των αντίστοιχων καλωδίων και ότι μετράμε τό δυναμικό στά σημεία A, B και Γ (Σχ.93) όπου τά άκρα μέλη ένώνονται με τον κορμό. Απόδειξη τής όρθότητας τής παραδοχής αυτής, αποτελεί τό γεγονός ότι όταν μετράμε τήν τάση μεταξύ των δύο καρπών τό καταγραφόμενο σήμα δέν αλλάζει μέγεθος, άν ο άσθενής κινήσει τά χέρια του. Δηλ. το \vec{R} (Σχ.92) και ή προβολή του \vec{p} πάνω στό \vec{R} μένουν άμετάβλητα.

Στό Σχήμα 93 φαίνονται τά σημεία A, B και Γ και οι άποστάσεις τους για μέσο ένήλικα. Τά σημεία A, B και Γ συμβολίζονται και RA (Right Arm), LA (Left Arm) και LL (Left Leg). Οι τρεις τάσεις μεταξύ των κορυφών του τριγώνου λέγονται "άπαγωγές", συμβολίζονται I, II, και III και είναι: $I=U_B-U_A$, $II=U_\Gamma-U_A$ και $III=U_\Gamma-U_B$. Αύτές οι άπαγωγές και τό τρίγωνο ABΓ φέρουν τό όνομα του Willen Einthoven, Ολλανδού φυσιολόγου πού τά εισηγήθηκε στην άρχή του αιώνα.

Η τάση πού παίρνουμε μεταξύ δύο κορυφών του τριγώνου

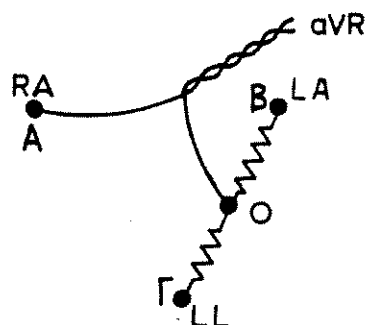


Σχ.93. Μετρώντας τά δυναμικά στους καρπούς και στην άριστερή κνήμη είναι σαν νά τά μετράμε στά σημεία A, B και Γ.

σύμφωνα με την $v = k \cdot R \cdot p \cdot \text{συν}\theta / r^3$, είναι ανάλογη του μήκους R της αντίστοιχης πλευράς και της προβολής ($p \cdot \text{συν}\theta$) του \vec{p} πάνω στην πλευρά αυτή. Αφού η R μένει σταθερή κατά τη μέτρηση, τό "σημα" που ένισχύει και καταγράφει ο καρδιογράφος είναι ανάλογο της προβολής της \vec{p} πάνω στην \vec{R} . Η \vec{p} αλλάζει συνεχώς κατεύθυνση και μέγεθος επομένως και η κάθε προβολή της αλλάζει μέγεθος κατά τον καρδιακό κύκλο.

Εκτός από τις τρεις "τυποποιημένες άπαγωγές άκρων μελών" I, II, III, παίρνουμε και άλλες τρεις μετωπικές άπαγωγές που λέγονται "αύξημένες άπαγωγές" (Augmented Leads) ή άπαγωγές Goldberger και συμβολίζονται: aVR , aVL και aVF .

Τό Σχ.94 δείχνει πώς παίρνουμε την aVR . Δύο αντιστάσεις συνδέονται στα LA και LL. Τά άλλα δύο άκρα των αντιστάσεων αυτών συνδέονται μεταξύ τους στο O. Η τάση aVR μετράται μεταξύ του RA και του O.



Με τον ίδιο τρόπο παίρνουμε και τις άλλες δύο: aVL και aVF .

$$\text{Άρα: } aVR = U_A - \frac{1}{2}(U_B + U_\Gamma)$$

$$aVL = U_B - \frac{1}{2}(U_A + U_\Gamma)$$

$$aVF = U_\Gamma - \frac{1}{2}(U_A + U_B)$$

Σχ.94. Διάταξη για λήψη "αύξημένης άπαγωγής".

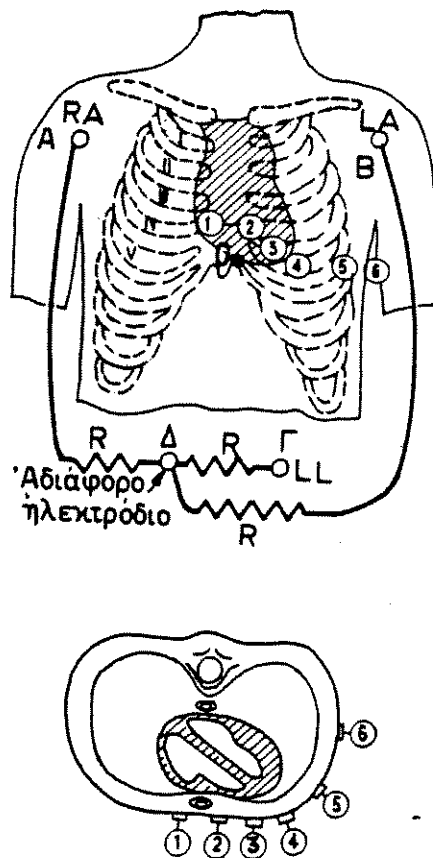
Οι τάσεις αυτές είναι ανάλογες προς τις προβολές της \vec{p} στις αντίστοιχες διαμέσους του τριγώνου ABΓ.

Κατά τη λήψη του ΗΚΓ μπορούν να καταγραφούν ταυτόχρονα (έπί π.χ. 5s) οι τρεις άπαγωγές I, II, III και μετά να καταγραφούν πάλι ταυτόχρονα (έπί π.χ. 5s) οι τρεις άπαγωγές aVR , aVL και aVF .

Οι παραπάνω έξη άπαγωγές καταγράφουν προβολές της \vec{p} πάνω σε εύθειες της μετωπικής επιφάνειας του σώματος και μάλιστα σε σημαντική απόσταση από την καρδιά. Γι' αυτό μπορεί να μας διαφύγουν διαταραχές στην έκπόλωση και επαναπόλωση τμημάτων του μυοκαρδίου, αν δέν τά "κοιτάξομε" από πιο κοντά. Γι' αυτό καταγράφομε και τις λεγόμενες "προκαρδίες άπαγωγές" ή "άπαγωγές Wilson", που φαίνονται στο Σχ.95.

Δημιουργομε ένα "άδιάφορο" ηλεκτρόδιο Δ, συνδεόντάς το μέσω έσων αντιστάσεων με τις κορυφές του τριγώνου ABΓ. Έτσι, αυτό τό ηλεκτρόδιο έχει δυναμικό $U_0 = (U_A + U_B + U_\Gamma) / 3$. Μετράμε την τάση V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 και V_6 μεταξύ του άδιαφόρου ηλεκτροδίου και καθενός

από τὰ ἔξη ἀριθμημένα ἠλεκτρόδια, πού ἔχουν τοποθετηθεῖ σέ μιά σχεδόν ἐγκάρσια διατομή τοῦ θώρακα. Οἱ ἔξη ἀπαγωγές ($V_1=U_1-U_0$, $V_2=U_2-U_0$ κ.λ.) μετροῦν τίς ἀντίστοιχες προβολές τοῦ \vec{p} πάνω στά ἔξη ἀνύσματα ($\vec{R}_{01}, \vec{R}_{02}, \vec{R}_{03}$, κ.λ.) πού ἐνώνουν τό κέντρο βάρους O τοῦ τριγώνου $AB\Gamma$ πρὸς τὰ σημεῖα 1, 2, 3, 4, 5 καί 6. Ἐπειδὴ οἱ ἀποστάσεις R_{01}, R_{02}, R_{03} κ.λ. εἶναι πολύ μικρότερες ἀπὸ τίς προηγούμενες (π.χ. τίς R_I, R_{II}, R_{III}) οἱ τάσεις V_1, V_2, V_3 κ.λ. εἶναι σημαντικά ὑψηλότερες γιατί π.χ. $V_1=K \cdot p \cdot \text{συν}\theta / R_{01}^2$. Ἐτσι κάθε προκάρδια ἀπαγωγή (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 , καί V_6) ἐπηρεάζεται (ιδιαίτερα ἀπὸ τό μέρος τῆς καρδιάς πού πρόσκειται στό ἀντίστοιχο ἠλεκτρόδιο. Δηλαδή "βλέπει" κύρια τό πλησιέστερο πρὸς αὐτή μυοκάρδιο καί δείχνει καθαρότερα τήν τυχόν παθησὴ του.



Σχ. 95. Διάταξη ἠλεκτροδίων γιὰ τίς προκάρδιες ἀπαγωγές σέ πρόσθια ὄψη καί σέ ἐγκάρσια τομή.

2.10. Φυσικὴ ἀνασκόπηση τῆς Η.Κ.Γ.

Ἡ θεωρία τοῦ "Στατικοῦ Ἠλεκτρισμοῦ" μέ τίς ἐννοιες τοῦ ἠλεκτρικοῦ διπόλου καί τῆς ροπῆς του, (Σχήματα 84, 85, 86 καί 87) μᾶς ἐξήγησε τήν ἐμφάνιση ἠλεκτρικοῦ πεδίου \vec{E} , μέσα στό ὁμοιογενές ὑλικό τοῦ ἀπειρου χώρου, πού περιβάλλει ἕνα ἐκπολούμενο ἢ ἐπαναπολούμενο κύτταρο.

Στή συνέχεια δεχτήκαμε ὅτι οἱ διαστάσεις τῆς καρδιάς εἶναι πολύ μικρές, σέ σχέση μέ τίς ἀποστάσεις τῆς ἀπὸ τὰ δερματικά μᾶς ἠλεκτρόδια καί ὅτι ὁ θώρακας εἶναι γεμάτος ὁμοιογενές ὑλικό. Αὐτό τό μοντέλο τῆς ὁμοιογενούς σφαίρας, μέ τήν καρδιά-σημεῖο νά λειτουργεῖ στό κέντρο τῆς σφαίρας, ἀπέχει βέβαια πολύ ἀπὸ τήν πραγματικότητα. Ἡ ὑπεραπλούστευση ὁμως αὐτή μᾶς ἔδωσε τήν εὐνατότητα νά συνθέσουμε (θεωρητικά) τίς μυριάδες ροπές $\Delta\vec{p}$, τῶν

μικροσκοπικών διπόλων των διεγερμένων κυττάρων, σε μία συνισταμένη ροπή \vec{p} , μακροσκοπικού διπόλου της σημειακής πιά καρδιάς.

Έτσι κατανοήσαμε σχετικά εύκολα τη φυσική του ΗΚΓ. Δηλ. εξηγήσαμε πώς η ηλεκτρική δραστηριότητα (έκπόλωση-έπαναπόλωση) των κυττάρων του μυοκαρδίου δημιουργεί δυναμικά στο δέρμα. Επίσης υπολογίσαμε τη διαφορά δυναμικού v_{12} μεταξύ δύο σημείων 1 και 2 του δέρματος ("άπαγωγές") και βρήκαμε ότι η v_{12} είναι ανάλογη της προβολής $p \cdot \sin\theta$ (της ροπής \vec{p} πάνω στο \vec{R}) ανάλογη της απόστασης R και αντίστροφα ανάλογη της r^3 ; (Σχ.92).

2.11. Τό "π ρ ό ς τ ά έ μ π ρ ό ς" π ρ ό β λ η μ α.

Μετά παραπάνω η φυσική εξήγησε ποιοτικά την δημιουργία του ΗΚΓ και συνέδεσε τα "κύματα" του (P, QRS και T) με τα αντίστοιχα μεγέθη και τις κατευθύνσεις του ηλεκτρικού άνύσματος \vec{p} της σημειακής καρδιάς.

Με τό μηδενισμό των διαστάσεων της καρδιάς κερδίσαμε την παραπάνω απλή και έποπτική εικόνα της λειτουργίας της, αλλά τό απλοϊκό μοντέλο μας δέν έπιτρέπει συσχετισμό του ΗΚΓ με τις παθήσεις των διαφόρων τμημάτων της καρδιάς. Γι' αυτό αξίζει να πλησιάσουμε την πραγματικότητα περισσότερο, με την βοήθεια και του 'Ηλεκτρονικού 'Υπολογιστή (Η.Υ) ως εξής: "Ας αφήσουμε την καρδιά τρισδιάστατη όπως είναι." Ας την χωρίσουμε σε χιλιάδες μικρούς κύβους. Ας θεωρήσουμε τό μικρό ηλεκτρικό δίπολο του κάθε κυβίσκου. Ας εφαρμόσουμε την ανάλυση πού αντιστοιχεί στο Σχήμα 92. Έτσι θά βρούμε τη μεταξύ δύο σημείων 1 και 2 διαφορά δυναμικού Δv_{12} πού προκαλεί τό κάθε μικρό δίπολο, αν γνωρίζουμε την θέση του, καθώς και τό μέγεθος και την κατεύθυνση της ροπής του $\Delta \vec{p}$. Προσθέτοντας τότε άλγεβρικά τά Δv_{12} , όλων των διπόλων θά βρούμε ακριβέστερα την "άπαγωγή" v_{12} , πού προκαλεί ή καρδιά και πού "άπάγει" και μετρά ή καρδιογράφος.

Τό μοντέλο μας θά βελτιωνόταν ακόμη περισσότερο αν βρίσκαμε και τις ηλεκτρικές άνομοιογένειες του θώρακα, οι όποιες διαμορφώνουν τά πεδία πριν φθάσουν στο δέρμα και τις λαμβάναμε υπόψη στους υπολογισμούς. Προσωπικά νομίζω ότι θά μπορούσε να εφαρμοσθεί ή νέα μέθοδος της Τομογραφίας με (έξωτερική) Έπιβολή Δυναμικών (TEΔ) στο σώμα (Applied Potential Tomography ή APT). Αύτη δίνει εικόνες τομών του σώματος με διαβαθμίσεις του γκρίζου, πού αντιστοιχοϋν στις τιμές της ηλεκτρικής έμπέδησης του υλικού κάθε κυβίσκου της τομής.

Μέ όλα τα παραπάνω θά είχαμε λύσει ικανοποιητικά τό "πρός τά εμπρός" (forward) πρόβλημα: "Γνωρίζοντας τή στιγμιαία χωρική κατανομή καί τῶν μικρῶν διπόλων στόν ὄγκο τῆς καρδιᾶς καί τῆς ἐμπέδησης τῶν ὑλικῶν στόν ὄγκο τοῦ θώρακα, ὑπολογίστε τή στιγμιαία διαφορά δυναμικοῦ v_{12} μεταξύ δύο δοσμένων σημείων τοῦ δέρματος."

2.12. Τό "ἀντίστροφο" πρόβλημα καί μιᾶ λύση τοῦ.

Ἡ παραπάνω ἀνάλυση ἔχει ἀκαδημαϊκό ἐνδιαφέρον ἀλλά δέν λύνει τό πρακτικό ἱατρικό πρόβλημα, πού εἶναι ἀκριβῶς τό ἀντίστροφο τοῦ παραπάνω. Δηλ. ὁ καρδιολόγος ζητᾶ: "Μετρώντας τά δυναμικά πού ὑπάρχουν τήν ἴδια στιγμή σέ ὄσα σημεία τοῦ δέρματος θέλετε, ὑπολογίστε τό στιγμιαῖο δίπολο (θέση, κατεύθυνση καί μέγεθος τῆς ροπῆς \vec{D}_p) κάθε κυβίσκου τῆς καρδιᾶς καί δώστε μου τήν κατανομή τους πάνω καί μέσα στό μυοκάρδιο, γιά κάθε φάση τῆς λειτουργίας του".

Τό θεώρημα Thevenin (2.14., Σχ.23) λέει ὅτι δέν ἀλλάζει ἡ ἐνταση I_L (ἐπομένως καί ἡ τάση V_{EZ}) τῆς R_L ἂν ἀντικαταστήσουμε τό περίπλοκο κύκλωμα τοῦ ἀριστεροῦ διακοπτόμενου ὀρθογώνιου, μέ τό ἀπλό κύκλωμα (μιᾶς V_{th} καί μιᾶς R_{th}) τοῦ δεξιοῦ ὀρθογώνιου. Ὑπάρχει ὅμως τεράστιο πλῆθος κυκλωμάτων (ὅπως τό ἀριστερό) πού δίνουν τά ἴδια V_{th} καί R_{th} τοῦ δεξιοῦ. Ἐπομένως ἂν τό διακοπτόμενο ὀρθογώνιο ἀντιπροσωπεύει τό θώρακα, ἡ μέτρηση τῶν V_{th} καί R_{th} μεταξύ τῶν δύο σημείων E καί Z τοῦ δέρματος, δέν φθάνει γιά νά ὀρίσει μονοσήμαντα τό κύκλωμα μέσα στό θώρακα. Χρειάζονται κι ἄλλες μετρήσεις γιά ν' ἀνακαλυφθοῦν τά στοιχεῖα (πηγές, ἀντιστάσεις καί διασυνδέσεις), πού ἀποτελοῦν τό συγκεκριμένο κύκλωμα.

Ἀπ' αὐτά φαίνεται ὅτι ὄσο περισσότερες ἐπιφανειακές μετρήσεις ἔχομε, τόσο περισσότερες παραμέτρους τῆς ζητούμενης πηγῆς τῶν σημάτων (τῆς καρδιᾶς) μπορούμε νά προσδιορίσουμε ἀλλά καί τόσο δυσκολώτερη γίνεται ὑπολογιστικά ἡ λύση τοῦ "ἀντίστροφου προβλήματος". Δηλ. ἂν δέν ὑπῆρχαν οἱ Η.Υ. δέν θά εἶχε πρακτικό ἐνδιαφέρον ἡ παρούσα ἀνάπτυξη.

Μιά προσέγγιση τοῦ προβλήματος θά ἦταν:

- (α) Κατασκευή μοντέλου τῆς πηγῆς σημάτων (τῆς καρδιᾶς) βασισμένου στήν Ἀνατομία καί Φυσιολογία καθώς καί στίς εἰκόνες (τομογραφίες) μέ ἕνα πλῆθος ζητούμενων ἀνεξάρτητων μεταβλητῶν (ροπῶν Δp μικρῶν διπόλων).
- (β) Ὅμοια κατασκευή μοντέλου τοῦ ἀγώγιμου θώρακα ἀπό εἰκόνες (ΑΡΤ, ΣΤ, κ.λ.).

γ) Άνεξάρτητες μετρήσεις δυναμικών του δέρματος, τουλάχιστο τόσες όσες οι ανεξάρτητες μεταβλητές της πηγής.

(δ) Λύση του προβλήματος προσδιορισμού των μεταβλητών από τον υπολογιστή.

Η διαδικασία αυτή φαίνεται πρακτικά άπραγματοποίητη. Τό [διο όμως φαινόταν αδύνατο, πριν από 15 χρόνια, να υπολογισθούν οι συντελεστές έξασθένησης ακτινοβολίας, της ύλης των χιλιάδων κυβίσκων μιας τομής του σώματος, από έξωτερικές μετρήσεις της έξασθένησης της δέσμης που τους διαπερνά. Κι' όμως σήμερα οι υπολογιστικές τομογραφίες, που βγαίνουν απ' αυτόν τον υπολογισμό είναι πραγματικότητα.

Σήμερα ο καρδιολόγος βλέπει τις 12 κυματομορφές ενός ΗΚΓ, που παίρνει από το δέρμα, και συγκρίνοντάς τις με τις αντίστοιχες φυσιολογικές και παθολογικές κυματομορφές, που έχει απομνημονεύσει, προσπαθεί να "βγάλει" την καρδιακή διάγνωση. Πρόκειται δηλ. για μία έμπειρική συγκριτική διαδικασία στην οποία ο έξεταστής δεν βλέπει την ηλεκτρική δραστηριότητα της ίδιας της καρδιάς. Βλέπει μόνον το ηλεκτρικό αποτέλεσμα που έφθασε στην επιφάνεια του δέρματος αφού (περνώντας από τα άνομοιογενή υλικά του θώρακα) έξασθένησε και παραμορφώθηκε κατά τρόπο που δεν είναι δυνατό να λάβει υπόψη του ο έξεταστής.

Αντίθετα, με τη διαδικασία που προτείναμε παραπάνω (αν και όταν έπιτευχθεί) τό σύστημα θά ξεκινά από τη μέτρηση πολλών δερματικών δυναμικών (για κάθε φάση της καρδιακής λειτουργίας) και λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του περάσματος των πεδίων από την γνωστή του πιά κατανομή των υλικών του θώρακα, θά δίνει (στη μικρή όθόνη) απ' εύθείας τη χαρτογράφηση της ηλεκτρικής δραστηριότητας πάνω στην επιφάνεια ή σε τομές της ίδιας της καρδιάς. Για παράδειγμα, όραματιζόμαστε τό σύστημα των ίσοδυναμικών γραμμών του μετώπου έκπόλωσης να προχωρεί πάνω στην καρδιά (άκολουθούμενο από τό σύστημα της έπαναπόλωσης) και να σταματά όταν συναντήσει τον ούλώδη ιστό της άδρανοϋς περιοχής που δημιούργησε τό έμφραγμα του μυοκαρδίου.

Μέ αύξηση του πλήθους των κυβίσκων του μυοκαρδίου και των μετρήσεων στο δέρμα (αύξηση του όγκου των υπολογισμών για τον Η.Υ.) θά μπορούσε να βελτιωθεί αρκετά η διακριτική ικανότητα των ηλεκτρικών αυτών εικόνων της καρδιάς. Έτσι η κατανομή των $\Delta \vec{p}$ και η χρονική μεταβολή τους μέσα και πάνω στο μυοκάρδιο θά έδιναν ακριβή διάγνωση για κάθε νόσημά του.

2.13. Άξία και τεχνολογική εξέλιξη της ηλεκτροκαρδιογραφίας.

Η ηλεκτροκαρδιογραφία αποτελεί σπουδαία μη-τραυματική διαγνωστική μέθοδο. Εφαρμόζεται εύκολα, γρήγορα, άνόδυνα και ακίνδυνα για τον ασθενή και για το προσωπικό. Οποιαδήποτε σοβαρή πάθηση, είτε του συστήματος αγωγής των παλμών στην καρδιά (άρρυθμίες) είτε του μυοκαρδίου (υπερτροφία, έμφραγμα κ.λ.), επηρεάζει την κυματομορφή μιας ή περισσότερων από τις παραπάνω άπαγωγές. Η αντίστοιχη παθήσεων προς τις αλλαγές του ΗΚΓ, περιγράφονται με λεπτομέρεια σε άλλα μαθήματα (φυσιολογία και Παθολογία).

Παρά τα 80 χρόνια του, το ΗΚΓ συνεχίζει να ανέλισσεται και μάλιστα με αύξανόμενο ρυθμό στα τελευταία χρόνια, για τους εξής λόγους. Τα καρδιαγγειακά νοσήματα αποτελούν την πρώτη αίτια θανάτου στις "ανεπτυγμένες" χώρες. Οι τεχνολογικές εξελίξεις δίνουν κάθε χρόνο πιο καλούς, πιο μικρούς και πιο φθηνούς καρδιογράφους. Οι μεθοδολογικές πρόοδοι στην καρδιολογική διάγνωση είναι έντυπιακές. Γι' αυτούς τους λόγους, διπλασιάστηκε το πλήθος των καρδιογραφημάτων στην τελευταία δεκαετία. Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ τα ΗΚΓ αύξηθηκαν από 53 εκατομμύρια το 1972, σε 100 εκατομμύρια το 1980 και το ποσοστό των ΗΚΓ που "διαβάζονται" και αξιολογούνται αυτόματα από Ηλεκτρονικό Υπολογιστή (Η.Υ) ανέβηκε από 1% το 1971, σε 20% το 1980.

Σήμερα αξιολογείται η καρδιακή λειτουργία με λήψη ΗΚΓ σε ανάπαυση και σε κόπωση. Επίσης το μακρόχρονο ΗΚΓ που καταγράφεται σε μαγνητοταινία είτε με τηλεμετρικό σύστημα, είτε με φορητό καταγραφέα (Holter), προσφέρει σημαντικές υπηρεσίες στην παρακολούθηση περιπατητικών ασθενών, που εμφανίζουν παροδικές άρρυθμίες ή άλλες καρδιακές διαταραχές.

Στις "Μονάδες Έντατικής Παρακολούθησης" το ΗΚΓ φαίνεται συνεχώς πάνω στην οθόνη λυχνίας παλμογράφου ή λυχνίας τηλεοράσεως. Αύτα τα συστήματα μπορούν να σταματούν πάνω στην οθόνη ένα τμήμα του ΗΚΓ, επίσης μπορούν να αποθηκεύουν το ΗΚΓ, να το ανακαλούν από τη μνήμη του Η.Υ. και να είσοποιούν οπτικά και ακουστικά το γιατρό και την αδελφή όταν ο παρακολουθούμενος ασθενής εμφανίσει άρρυθμία ή άλλη καρδιακή διαταραχή.

2.11. Αυτόματοποιημένη ηλεκτροκαρδιογραφία.

Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα υποστηρίζει ένα έρευνητικό πρόγραμμα επί 3 χρόνια που εξελίσσεται στις χώρες της και λέγεται "Κοινά πρό-

τυπα για ποσοτικοποιημένη ηλεκτροκαρδιογραφία " (Common Standards for Quantitative Electrocardiography). Αύτη ή έρευνα δημιούργησε μιá "πληροφορική βάση" (data base) από καρδιογραφήματα (φυσιολογικά και παθολογικά) στη διάγνωση τών όποιων συμφώνησαν οί διακεκριμένοι καρδιολόγοι πού έλαβαν μέρος.

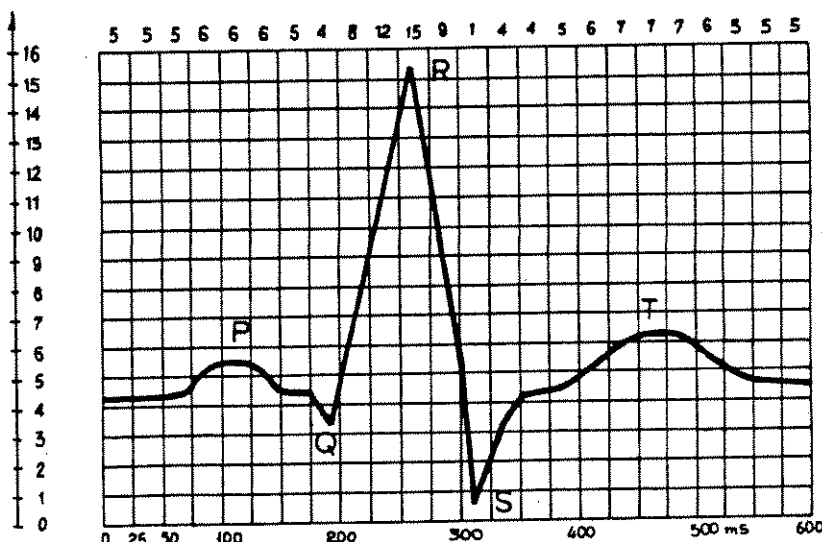
Παρόμοια προγράμματα αναπτύχθηκαν και αναπτύσσονται στις ΗΠΑ, τήν Ίαπωνία κ.λ.

Ό Ηλεκτρονικός Υπολογιστής (Η.Υ) καλεΐται νά συγκρίνει τό νέο ΗΚΓ, του παρόντος άσθενούς, μέ τά πρότυπα ΗΚΓ τής παραπάνω "βάσης" και βασιζόμενος στη σύμφωνη γνώμη τών καρδιολόγων για τά πρότυπα, νά συμπεράνει τίς πιθανές διαγνώσεις πού βγαίνουν από τό νέο ΗΚΓ, δίνοντας και τήν πιθανότητα τής κάθε διάγνωσης.

Ό Η.Υ. όμως έπεξεργάζεται και συγκρίνει διακεκριμένους άριθμούς (ψηφία) και όχι συνεχείς καμπύλες όπως τό ΗΚΓ. Αύτές οί καμπύλες έχουν σε κάθε στιγμή πλάτος ή ύψος ανάλογο του σήματος.

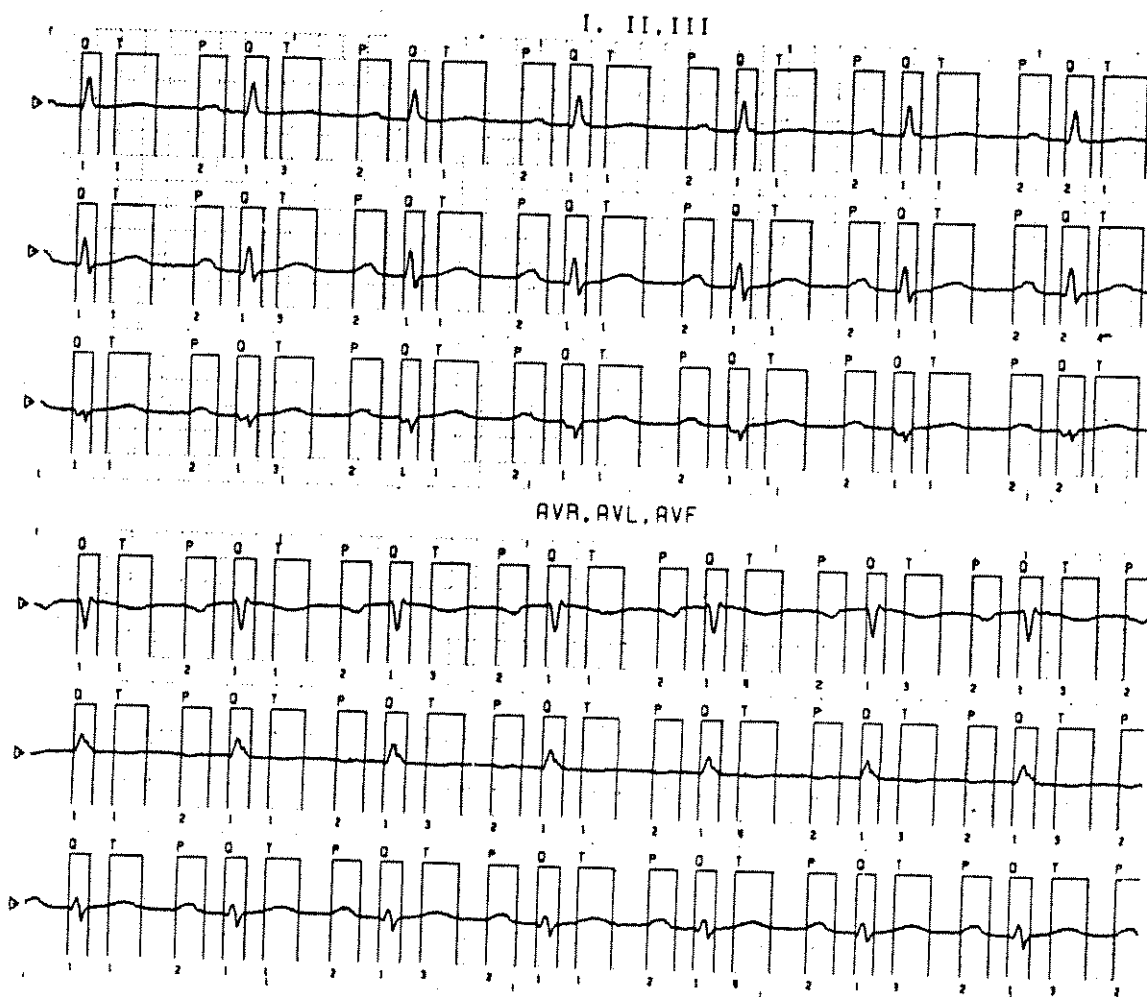
Γι' αυτό πρέπει πρώτα νά γίνει "αναλογική προς ψηφιακή μετατροπή" ("Analogue to Digital Conversion") όλων τών ΗΚΓ.

Ένα ΗΚΓ μετατρέπεται από αναλογικό σε ψηφιακό μέ τόν τρόπο πού δείχνει τό Σχ.96. Κάθε τετραγωνίδιο πού διασχίζει ή καμπύλη του ΗΚΓ χαρακτηρίζεται από δύο άριθμούς (τίς συντεταγμένες του). Δηλ. στο Σχ.96 κάθε 25 ms, λαμβάνεται αυτόματα μιá μέτρηση του πλάτους πού έχει κάποια τιμή μεταξύ 1 και 16. Αύτη ή τιμή είναι γραμμένη στο πάνω μέρος τής κάθε στήλης του Σχ. 96. Είναι προφα-



Σχ.96. Ψηφιακή έκτίμηση του πλάτους και του χρόνου. Τό πλάτος χωρίζεται σε 16 βήματα (περίπου 0,1mV ανά βήμα) και ό χρόνος χωρίζεται σε τμήματα τών 25 ms.

νές ότι όσο περισσότερα και έπομένως μικρότερα, είναι τὰ τετραγωνίδια, τόσο άκριβέστερα θά πάρει τήν κυματομορφή του ΗΚΓ ο Η.Υ. Σέ κάποιο σημερινό πρόγραμμα διαιρείται τό πλάτος σέ 2048 βήματα και ο χρόνος σέ τμήματα τών 4ms .Αυτό σημαίνει ότι κάθε 4ms λαμβάνονται 3 τιμές πλάτους από κάθε τριάδα ταυτόχρονων άπαγωγών όπως τίσ δύο τριάδες του Σχ.97. Έπειδή οι τριάδες αυτές είναι τέσσερεις : (I, II, III), (aVR, aVL, aVF), (V₁, V₂, V₃) (V₄, V₅, V₆), για 5s καταγραφής κάθε τριάδας έχουμε: 20s ή 20.000 ms καταγραφής για τό όλο ΗΚΓ. Άφου σέ κάθε 4ms παίρνομε 3 μετρήσεις πλάτους, έχουμε συνολικά 15000 μετρήσεις για ένα ΗΚΓ. Όλες αυτές οι μετρήσεις γίνονται αυτόματα από τό μηχάνημα κατά τή λήψη του ΗΚΓ.



Σχ.97. Αυτόματος διαχωρισμός και αυτόματος χαρακτηρισμός τών κυμάτων P, QRS και T, σέ δύο τριάδες ταυτόχρονων άπαγωγών τών άκρων (I, II, III και aVR, aVL, aVF). Ο άριθμός κάτω από κάθε κύμα χαρακτηρίζει τόν τύπο του κύματος.

Επίσης τό μηχανήμα έχει προγραμματισθεῖ νά ἀναγνωρίζει καί νά χωρίζει πάνω στό ΗΚΓ τό κάθε "κύμα" (P, QRS, T) καί νά χαρακτηρίζει τόν τύπο τοῦ κύματος μέ ένα ἀριθμό (στό κάτω μέρος τοῦ κύματος). Βλέπομε ὅτι στίς δύο τριάδες (I, II, III καί aVR, aVL, aVF) τοῦ ΗΚΓ τοῦ Σχ. 97, τά κύματα P χαρακτηρίζονται ὅλα τύπου 2 καί τά QRS εἶναι σχεδόν ὅλα τύπου 1, ἐνῶ τά T ποικίλουν ἀπό 1 ὡς 4.

Επίσης τό μηχανήμα ὑπολογίζει γιά κάθε νέο ΗΚΓ τίς παράμετρος πλάτους καί χρόνου πού φαίνονται στό Σχ. 98. Βάσει τοῦ προγράμματος, πού τοῦ έχει δοθεῖ, συγκρίνει τίς τιμές τῶν παραμέτρων μέ τίς συμφωνημένες πρότυπες τιμές. Γιά τόν καθορισμό τοῦ κυρίαρχου ρυθμοῦ τοῦ ΗΚΓ, ὁ Η.Υ. ὑπολογίζει:

(α) Τόν ρυθμό τῶν κόλπων ὁμαδοποιώντας τούς χρόνους μεταξύ διαδοχικῶν P κυμάτων.

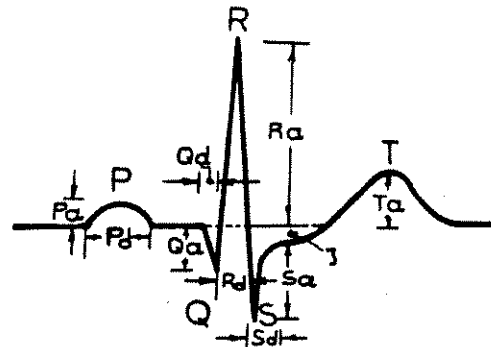
(β) τό ρυθμό τῶν κοιλιῶν ὑπολογίζοντας τούς χρόνους μεταξύ διαδοχικῶν R κυμάτων,

(γ) τό χρόνο PQ ἀγωγῆς τοῦ σήματος ἀπό τούς κόλπους στίς κοιλίες.

Ἄλλοι ὑπολογισμοί καί ἀναλύσεις πού γίνονται ἀπό τόν Η.Υ. μέ βάση τίς ἀρχικές 15000 μετρήσεις τῶν κυματομορφῶν καί τίς ὁδηγίες πού τοῦ δίνει τό πρόγραμμα, ἀφοροῦν τήν ἐπιφάνεια QRS, διάφορες γωνίες τῶν βρόχων τοῦ ἀνύσματος \vec{p} , τό κύμα T κ.λ.

Τά εὐρύματα τοῦ Η.Υ. βασίζονται στίς αὐτόματες μετρήσεις του καί στά διαγνωστικά κριτήρια πού ἐκφράζουν τήν ἐμπειρική ἰατρική γνώση στήν Καρδιολογία.

Σήμερα ἡ συμφωνία μεταξύ τῆς ὀπτικῆς προσωπικῆς διάγνωσης τοῦ καρδιολόγου, πού δέν γνωρίζει ἀκόμα τή "γνώμη" τοῦ Η.Υ. καί τῆς ὑπολογιστικῆς ἀπρόσωπης διάγνωσης τοῦ Η.Υ., ἔχει φθάσει στό 76% τῶν ΗΚΓ. Ἡ διαφωνία στά ὑπόλοιπα 24% ὀφείλεται κύρια στίς διαφορές τῶν κριτηρίων (20%) καί λιγότερο σέ λάθη τοῦ ὑπολογιστικοῦ προγράμματος (4%). Δηλ. ὁ Η.Υ. ἐφαρμόζει μέ τέλεια ἀκρίβεια, ταχύτητα καί ἐπαναληψιμότητα τά κριτήρια πού τοῦ δόθηκαν, ἀλλά μπορεῖ νά λαθέψει γιὰτί ὁ καρδιολόγος διαβάζοντας τό ΗΚΓ χρησιμοποιεῖ συνηθιστά ἢ ὑποσυνήθιστα καί ἄλλα κριτήρια (ἀπό προσωπικές ἐντυπώσεις καί ἐμπειρίες) πού δέν ἔχουν δοθεῖ ὀκόμενη στόν Η.Υ.



Σχ. 98. Ὑπολογιζόμενες ἀπό τόν Η.Υ. παράμετρος πλάτους (μέ δείκτες α), χρονικῆς διάρκειας (μέ δείκτες δ) καί ἀπόκλισης (j).

3. ηλεκτρομυογραφία

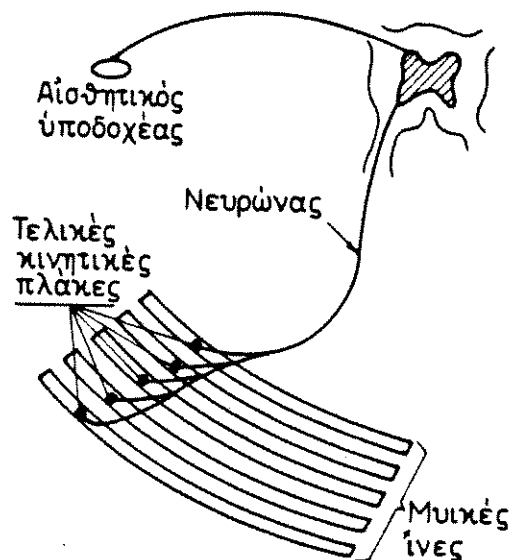
3.1. Είσαγωγή.

Ἡ ηλεκτρομυογραφία βασικά περιλαμβάνει τὶς μεθόδους πού καταγράφουν τὴν ηλεκτρικὴ δραστηριότητα τῶν μυῶν. Ἀφοῦ ἐπινοήθηκε τὸ ὁμοαξονικὸ ηλεκτρόδιο-βελόνα ἀπὸ τοὺς Adrian καὶ Bronk (1929), ἡ ΗΜΓ ἐπεκτάθηκε καὶ στὶς ηλεκτροδιαγνωστικὲς τεχνικὲς πού μελετοῦν τὴ λειτουργικότητα τῶν περιφερικῶν νεύρων καὶ τῶν νευρομυϊκῶν συνάψεων.

Ἡ διάδοση τοῦ παλμοῦ κατὰ μῆκος τῆς ἐμμύελης νευρικής ἴνας περιγράφηκε ἤδη (ἠλεκτρικὲς ἰδιότητες τῶν νεύρων). Ἐδῶ θὰ περιγραφεῖ σύντομα ἡ διαβίβαση τοῦ παλμοῦ ἀπὸ τὴ νευρική στή μυϊκή ἴνα καὶ ἡ διαδοσὴ του κατὰ μῆκος τῆς μυϊκῆς ἴνας γιὰ νὰ δοθεῖ μετὰ ἔμφαση στὶς τεχνικὲς μετρήσεως τοῦ παλμοῦ στὴν μυϊκή ἴνα καὶ στὸ δέρμα.

3.2. Διαβίβαση τοῦ παλμοῦ ἀπὸ τὴ νευρική στή μυϊκή ἴνα.

Ὁ μῦς ἀποτελεῖται ἀπὸ πολλὰς κινητικὲς μονάδες (Σχ.99). Κάθε κινητικὴ μονάδα περιλαμβάνει ἕνα νευρῶνα καὶ τὶς μυϊκὲς ἴνες πού αὐτὸς νευρώνει. Ὁ νευρῶνας ἐρχεται ἀπὸ τὸν ἐγκέφαλο ἢ τὸν νωτιαῖο μυελὸ καὶ διακλαδίζεται σὲ πολλὰς ἐμμύελες νευρικές ἴνες. Αὐτὲς συνδέονται πρὸς ἀντίστοιχες μυϊκὲς ἴνες, μέσω "νευρικῶν συνάψεων" πού λέγονται καὶ "τελικὲς κινητικὲς πλάκες". Ὅταν ὁ παλμὸς φθάσει στὴ σύναψη ἀπελευθερώνει μετὰ τῆς πλάκας καὶ τῆς κινητικῆς μεμβράνης μιὰ οὐσία τὴν "ἀκετυλχολίνη". Αὕτῃ



Σχ.99. Σχηματικὴ παράσταση κινητικῆς μονάδας: νευρῶνας με νευρικές ἴνες, τελικὲς κινητικὲς πλάκες, καὶ μυϊκὲς ἴνες.

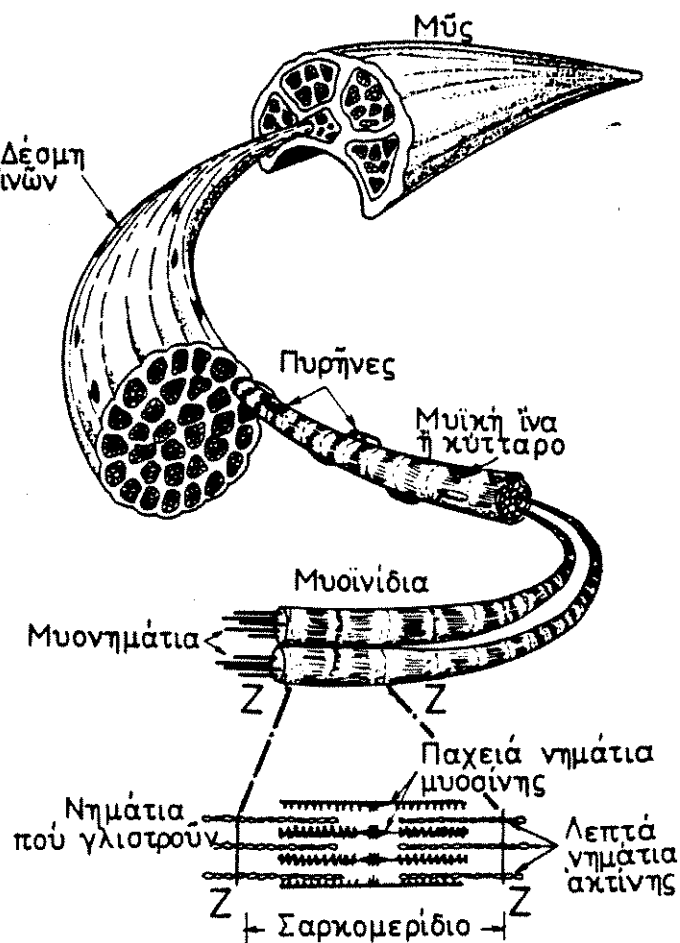
λέγεται "διαβιβαστής", γιατί διαβιβάζει τον παλμό στην μυϊκή ίνα. Η άκετυλχολίνη, μέχρι να υδρολυθεί από ένα ένζυμο, την "χολινεστεράση", ($2 \div 3$ ms) προλαμβάνει να ανοίξει τους πόρους της μυϊκής μεμβράνης. Έτσι μπαίνουν πολλά ιόντα νατρίου και αυξάνουν τοπικά (κάτω από την πλάκα) το δυναμικό της μεμβράνης κατά 50 ως 75mV. Άρα το δυναμικό ανεβαίνει πολύ πιο πάνω από τον ούδο πυροδότησης και προκαλεί άσφαλως δυναμικό δράσης στο διεγερσιμο μυϊκό κύτταρο. Η νευρομυϊκή σύναψη δηλ. λειτουργεί με ύψηλό "βαθμό ασφάλειας".

3.3. Διάδοση του παλμού και συστολή της ίνας.

Τό νέο δυναμικό δράσης, πού έχει διάρκεια περίπου διπλάσια από τό δυναμικό δράσης του νευράξονα, διαδίδεται από τή θέση της πλάκας και πρós τις δύο κατευθύνσεις και έκπολώνει τήν μυϊκή ίνα.

Οί σκελετικοί μύες, πού αποτελούν τό 40% της μάζας του σώματος, είναι γραμμωτοί και μοιάζουν με τό μύ της καρδιάς. Αποτελούνται από δέσμες παράλληλων μυϊκών ίνων (Σχ.100). Η κάθε ίνα έχει πολλά μυοϊνίδια και τό κάθε ίνίδιο αποτελείται από "σαρκομερίδια" πού συνδέονται στή σειρά μέσω ύμένων Z.

Μετά τήν παραπάνω έκπόλωση τά σαρκομερίδια των ίνιδίων και έπομένως ό μύς συστέλλονται. Δεν είναι ακόμα έντελως γνωστός ό μηχανισμός



Σχ.100. Δομή σκελετικού μύς.

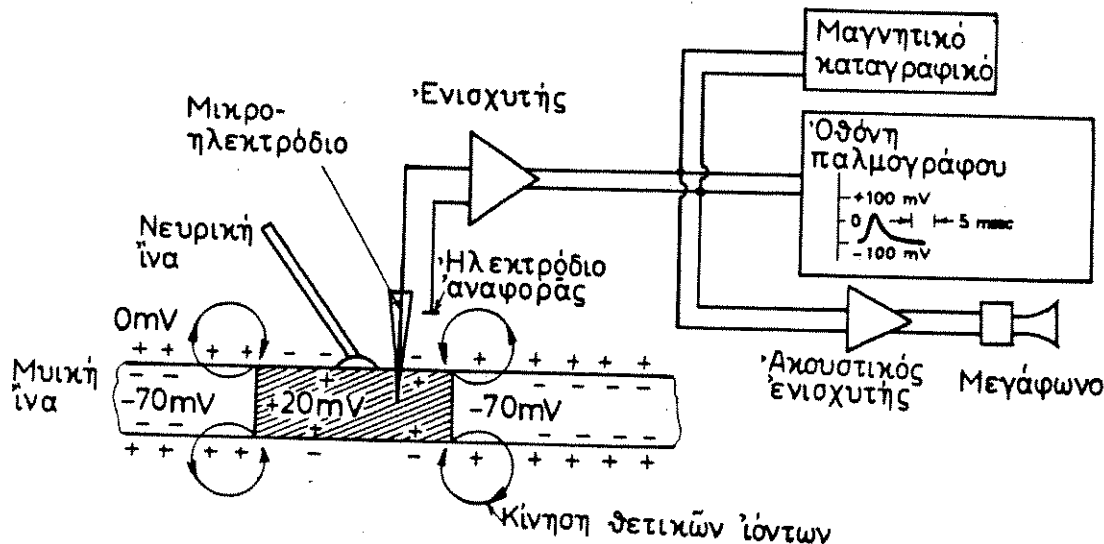
πού οδηγεί από τό πέρασμα του δυναμικού δράσης στη μηχανική συστολή. Είναι γνωστό όμως ότι τά παράλληλα νημάτια της άκτίνης πού προβάλλουν από τίς δύο πλευρές του κάθε ύμένα Z, γλιστρούν ανάμεσα στά παράλληλα νημάτια της μυοσίνης και αναγκάζουν τούς γειτονικούς ύμένες Z νά πλησιάσουν μεταξύ τους. Έτσι συστέλλεται τό σαρκομερίδιο και έπομένως συστέλλονται τό ίνίδιο, ή ίνα και ό μύς.

3.4. Παραγωγή, λήψη και παρουσίαση του ΗΜΓ.

Όπως στό μυοκάρδιο έτσι και στους σκελετικούς μύς, τό πέρασμα ενός δυναμικού δράσης κατά μήκος μιās ίνας προκαλεί μεταβαλλόμενο δυναμικό σέ κάθε σημείο του δέρματος. Όταν τό δυναμικό δράσης διατρέχει ταυτόχρονα πολλές παράλληλες ίνες του ίδιου μύς, τότε φυσικά μεγαλώνει και ή μεταβολή του δυναμικού πού μετράμε σ' ένα σημείο του γειτονικού δέρματος.

Τό Σχ. 101 δείχνει μιá διάταξη μέτρησης του δυναμικού δράσης πού διατρέχει τή μυϊκή ίνα.

Το μονοπολικό μικροηλεκτρόδιο είναι συνήθως λεπτότατο σύρμα άνοξειδωτου χάλυβα και είναι μονωμένο σ' όλο τό μήκος του, εκ-



Σχ.101. Διάταξη μέτρησης της χρονικής μεταβολής του δυναμικού δράσης πού διαδίδεται από τήν κινητική πλάκα της νευρικής ίνας πρós τίς δύο κατευθύνσεις της μυϊκής ίνας. Τό μικροηλεκτρόδιο είναι μονωμένο έκτός από τήν άίχμη του και τό ήλεκτρόδιο αναφοράς βρίσκεται στό έξωκυτόριο ύγρό.

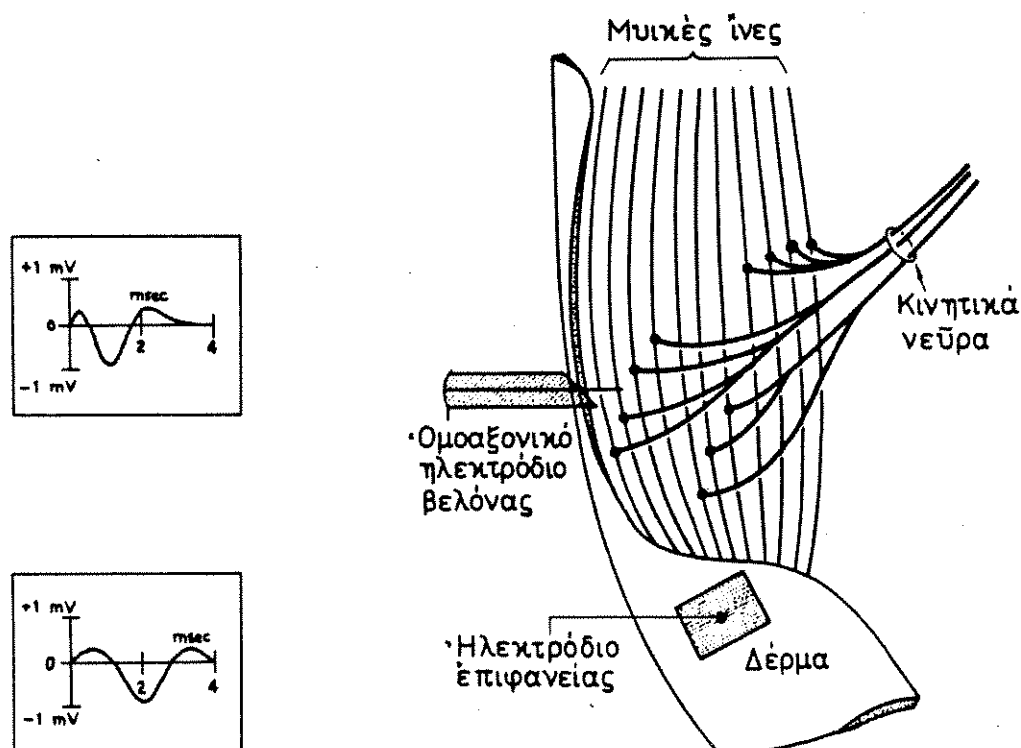
τός από την αίχμη του. Αύτη έχει εισαχθεί στο έσωτερικό του κυττάρου για να μετρηθεί ή διαφορά δυναμικού του με το έξωκυττάριο υγρό στο οποίο έχει βαφτιστεί το δεύτερο ηλεκτρόδιο (άναφορας) του ηλεκτρομυογράφου.

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων (σήμα) ενισχύεται από ένα "διαφορικό ενισχυτή" και δίνεται στον παλμογράφο. Παράλληλα το ενισχυμένο σήμα μπορεί να δοθεί και σ' ένα μαγνητικό καταγραφικό και σ' ένα μεγαφωνικό σύστημα.

Συνήθως, οι μετά τον ενισχυτή διπολικές γραμμές (δύο σύρματα) παριστάνονται με μία συνεχή γραμμή. Αύτος, ο πιο άπλος συμβολισμός, θα εφαρμοσθεί στα επόμενα σχήματα.

Η οριζόντια κλίμακα του παλμογράφου έχει βαθμονομηθεί να μετρά χρόνο ενώ η κατακόρυφη μετρά τη διαφορά δυναμικού μεταξύ έσωτερικού και έξωτερικού του κυττάρου.

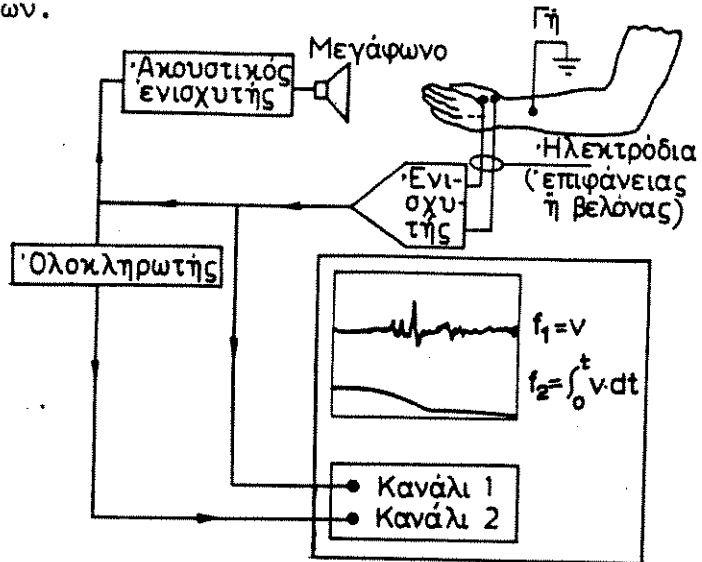
Είναι δύσκολο να απομονωθεί μία μυϊκή ίνα και να μετρηθεί ή χρονική μεταβολή του δυναμικού της. Γι' αυτό στα συνήθη ΗΜΓ καταγράφεται ή ηλεκτρική δραστηριότητα περισσότερων ινών, με ηλεκτρόδια έπιφάνειας δέρματος ή με ηλεκτρόδιο όμοαξονικής βελόνας (Σχ. 102).



Σχ. 102. Διάταξη λήψης και αντίστοιχο ΗΜΓ με ήλεκτροδιο όμοαξονικής βελόνας και ήλεκτροδιο έπιφάνειας δέρματος.

Τό ηλεκτρόδιο επιφάνειας δέχεται σήματα από πολλές κινητικές μονάδες, κύρια από τίς πλησιέστερες πρός τό ηλεκτρόδιο. Τό ηλεκτρόδιο όμοαξονικής βελόνας μετρά συνήθως τή δραστηριότητα μιᾶς ἤ λίγων κινητικῶν μονάδων.

Μέ τή διάταξη τοῦ Σχήματος 103 τά σήματα ἀφοῦ ἐνισχυθοῦν ἐκτίθενται σέ ἕνα κανάλι τῆς ὁθόνης παλμογράφου (σέ mV) καί τό χρονικό ὁλοκλήρωμα τους: $\int_0^t v \cdot dt$ ἐκτίθεται σέ δεύτερο κανάλι (σέ mV·s) ἐνῶ ταυτόχρονα ἀκούγονται ἀπό τό μεγάφωνο. Τό ὕψος τοῦ ὁλοκληρώματος εἶναι σχετικό μέτρο τῆς ποσότητας ἠλεκ-



Σχ.103. Διάταξη λήψης, ἐνίσχυσης καί παρουσίαισης ΗΜΓ.

τρικοῦ φορτίου πού μετακινήθηκε κατά τό πέρασμα τοῦ δυναμικοῦ δράσης. Ὅσο ἐντονώτερη ἡ ἐκούσια συστολή τοῦ μυός, τόσο ὑψηλότερη ἡ τιμή τοῦ ὁλοκληρώματος. Εἶναι εὐκολώτερη ἡ ἀξιολόγηση τῆς μυϊκῆς λειτουργίας διαμέσου τῆς ὁλοκληρωμένης μορφῆς τοῦ ΗΜΓ γιατί ἡ καμπύλη εἶναι πιό λεία (Σχ.103).

Ἡ ἐκούσια συστολή διαρκεῖ συνήθως πάνω ἀπό 100ms γιατί ἐέν "πυροδοτοῦνται" ταυτόχρονα ὅλες οἱ κινητικές μονάδες καί γιατί κάθε μιᾶ μπορεῖ νά πυροδοτηθεῖ περισσότερο ἀπό μιᾶ φορές.

3.5. Ἀ κ ο ὄ σ ι ο Η.Μ.Γ. λ ό γ ω ἡ ἡ λ ε κ τ ρ ι κ ῆ ς δ ι έ γ ε ρ σ η ς.

Ἐκτός ἀπό τήν ἐκούσια συστολή μπορεῖ νά προκληθεῖ καί ἀκούσια συστολή τοῦ μυός μέ ἐξωτερική ἠλεκτρική διέγερση καί νά ληφθεῖ ΗΜΓ. Στήν προκλητή αὐτή συστολή, ἡ στιγμή καί ἡ διάρκεια τοῦ ἠλεκτρικοῦ ἐρεθίσματος ἐλέγχονται ἀκριβῶς ἀπό τό ὄργανο (διεγέρτης) καί ὅλες οἱ μυϊκές ἑνες πυροδοτοῦνται σχεδόν ταυτόχρονα. Τό ἐρέθισμα μπορεῖ νά ἔχει ὕψος 100 V καί διάρκεια 0,1 μέχρι 0,5ms.

Τό Σχ. 104 δείχνει τή διάταξη διέγερσης καί καταγραφῆς τοῦ ΗΜΓ. Τό δυναμικό δράσης ἐμφανίζεται μέ κάποια καθυστέρηση (ὡς πρός τό ἐρέθισμα) πού λέγεται λανθάνων χρόνος.

Συχνά συγκρίνονται τά δυναμικά και οι λανθάνοντες χρόνοι είτε από ΗΜΓ συμμετρικών μυών του σώματος είτε από ΗΜΓ άσθενών και υγιών ανθρώπων.

Ήλεκτρικά μπορούν να διεγερθούν και τά αισθητικά νεύρα που φέρουν πληροφορίες στον εγκέφαλο. Τό σύστημα των αντανακλαστικών μπορεί να μελετηθεί παρατηρώντας στο ΗΜΓ τό αποτέλεσμα της διεύερσης σ' ένα αισθητικό νεύρο.

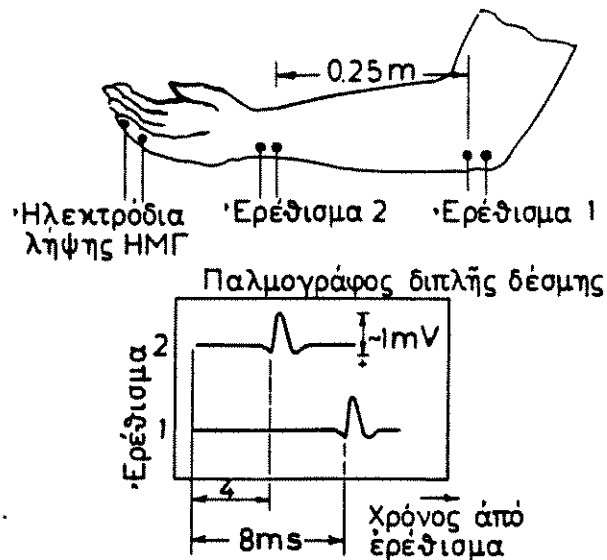
Αν τό ήλεκτρικό έρέθισμα είναι μικρό, ό παλμός θά πάει διά του αισθητικού νεύρου στό νωτιαίο μυελό και θά προκαλέσει τόν αντανακλαστικό παλμό που θά γυρίσει μέσω του αντίστοιχου κινητικού νεύρου για να προκαλέσει συστολή στό μύ. Γι' αυτό ή έκπόλωση του μύς που θά καταγράψει το ΗΜΓ θά καθυστερήσει κατά περίπου 15 ms.

Μέ μέσο έρέθισμα, θά διεγερθεί από τήν αρχή και τό κινητικό νεύρο, μαζί μέ τό αισθητικό. Ο παλμός του κινητικού, διατρέχοντας μικρότερη απόσταση θάρθει πρώτος (σέ περίπου 7 ms) στό μύ και μετά (σέ ~15 ms) θά ακολουθήσει ό παραπάνω παλμός που όφείλεται στή διεύερση του αισθητικού νεύρου.

Αν τό έρέθισμα είναι πολύ έντονο παίρνομε μόνο μία έντονη απόκριση του μύς που ήρθε απ' αθείας από τό κινητικό νεύρο.

Μπορεί επίσης να μετρηθεί ή ταχύτητα του παλμού σέ κινητικό νεύρο. Τό Σχ. 105 δείχνει μιά διάταξη έφαρμογής έρεθίσματος σέ δύο θέσεις. Τά δύο έρεθίσματα έφαρμόζονται ταυτόχρονα. Λόγω όμως της διαφοράς απόστάσεως (0,25 m) φθάνουν στά ήλεκτρόδια λήψης σέ διαφορετικές στιγμές, δηλ. μέ διαφορά χρόνου $8-4=4$ ms. Άρα ή ταχύτητα άγωγής του παλμού κατά μήκος του κινητικού νεύρου είναι $0,25\text{m}/4 \cdot 10^{-3}\text{s} = 62,5 \text{ m/s}$.

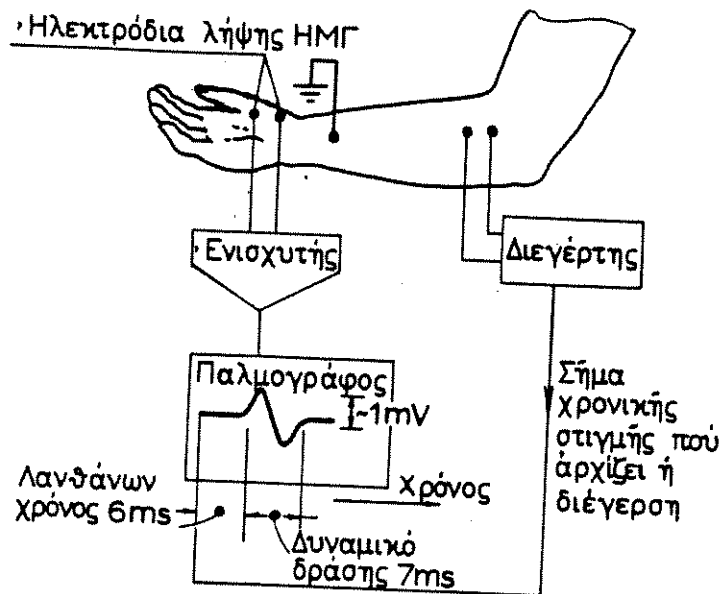
Η ταχύτητα άγωγής αισθητικού νεύρου μπορεί να μετρηθεί δίνοντας ένα έρέθισμα π.χ. σέ δάκτυλο του χεριού και μετρώντας τους χρόνους άφιξης του παλμού σέ διάφορες απόστάσεις κατά μήκος του



Σχ.104. Διάταξη λήψης ΗΜΓ που προκλήθηκε από έξωτερική ήλεκτρική διεύερση.

νεύρου. Πολύ μειωμένη ταχύτητα υποδηλώνει νευρική βλάβη.

Η κόπωση των μυών προσδιορίζεται με πολλαπλές διεγέρσεις. Οι μεγάλοι μύς μπορούν να επαναδιεγείρονται με ρυθμούς 5 μέχρι 15 Hz. Φυσιολογικά νεύρα και μύς δείχνουν μικρές αλλαγές σε παρατεταμένη παλμική διεύερση, όταν ο ρυθμός είναι κάτω των 5 Hz. Η συμπεριφορά των νεύρων και μυών σε παλμική διεύερση έχει συχνά διαγνωστική αξία.



Σχ.105. Τεχνική μέτρησης της ταχύτητας άγωγής του σήματος σε κινητικό νεύρο.

4. Ηλεκτροεγκεφαλογραφία

4.1. Είσαγωγή.

Τά νευρικά κύτταρα δέν ήρεμοῦν ήλεκτρικά. Ἡ διαφορά δυναμικοῦ μεταξύ τῶν δύο πλευρῶν τῆς μεμβράνης τους συνεχῶς ἀλλάζει. Στά νεῦρα, ὅπως εἶδαμε, ἡ ήλεκτρική δραστηριότητα ὑπηρετεῖ τή λήψη καί μεταβίβαση σημάτων (ροή πληροφοριῶν).

Σέ νευρῶνες τοῦ ἐγκέφαλου, ἡ ήλεκτρική δραστηριότητα προκαλεῖται ἀπό ἐσωκυτταρικές μεταβολικές διεργασίες, πού μπορεῖ νά ἀποτελοῦν καί τή βιοχημική συνέπεια τῆς λήψης καί ἐπεξεργασίας πληροφοριῶν. Καί στίς δύο περιπτώσεις οἱ ήλεκτρικές αὐτές ἀλλαγές μποροῦν νά ληφθοῦν μέ μικροηλεκτρόδια εἰσαγόμενα μέσα ἢ κοντά στόν κάθε νευρῶνα.

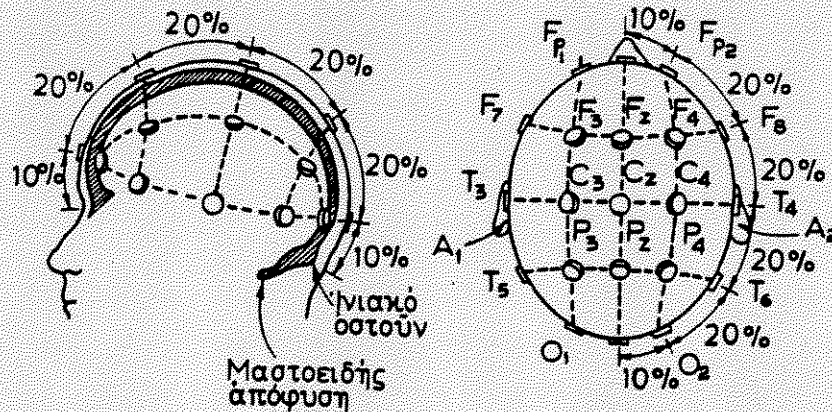
Ἡλεκτρόδιο σέ ἀμεση ἐπαφή μέ τόν ἐγκέφαλο παίρνει σήματα ἀπό 0,1 μέχρι 5mV σέ διάφορες συχνότητες. Ἡ σημαντικότερη διαγνωστική περιοχή συχνότητων εἶναι 1 μέχρι 15 Hz. Τά ἴδια κύματα μποροῦν νά καταγραφοῦν μέ μή τραυματικό τρόπο τοποθετώντας ἐπίπεδα ήλεκτρόδια σέ ἐπαφή μέ τήν ἐπιφάνεια τοῦ δέρματος τῆς κεφαλῆς. Ἡ παρεμβολή μεταξύ τοῦ ήλεκτροδίου καί τοῦ ἐγκεφάλου ἐνός στρώματος πάχους $2\div 3$ cm (δέρμα, κρονίο, σκληρά μήνιγγα), ἐξασθενεῖ τό σῆμα κατά τοῦλάχιστο 10 φορές. Ἡ ἐνίσχυση καί καταγραφή αὐτῶν τῶν κυμάτων, πού ἀντιπροσωπεύουν ἕνα ἄθροισμα ταυτόχρονων ήλεκτρικῶν ἀλλαγῶν πολλῶν ἐγκεφαλικῶν κυττάρων, ἀποτελεῖ τό "ήλεκτροεγκεφαλογράφημα" (HEG).

Ὅταν ἐπιβληθεῖ ἕνα αἰσθητικό ἐρεθίσμα, π.χ. λάμψη στά μάτια, ἤχος στά αὐτιά, πίεση στό δέρμα κ.λ., ἡ πληροφορία τοῦ ἐρεθίσματος μεταβιβάζεται διαμέσου τῶν αἰσθητικῶν νεύρων στήν ὑπεύθυνη γιά τήν ἐπεξεργασία τῆς περιοχῆ τοῦ ἐγκεφάλου. Ἐκεῖ προκαλεῖ μικρή ἀλλαγή δυναμικοῦ πού ὑπερτίθεται στό HEG καί λέγεται "προκλητό δυναμικό". Τά "προκλητά δυναμικά" θά ἐκτεθοῦν στό ἐπόμενο ὑποκεφάλαιο.

4.2. Θέσεις ήλεκτροδίων.

Ἡ ήλεκτρική δραστηριότητα ἀνιχνεύθηκε ἀπό τόν Caton τό 1875 σέ ἐκτεθειμένους ἐγκεφάλους ζῶων.

Ὁ Berger σέ σειρά ἀρθρῶν, ἀπό τό 1929 ὡς τό 1936, παρουσίασε τήν ἀνακάλυψη τοῦ HEG. Δηλ. ἀπέδειξε ὅτι μέ ήλεκτρόδια τοποθετημένα σέ ἐπαφή μέ τό δέρμα παίρνουμε δυναμικά πού ἂν ἐνισχυθοῦν μποροῦν νά καταγραφοῦν πάνω σε κινούμενη λωρίδα χαρτιοῦ ὅπως τό ΗΚΓ.



Σχ.106. Διεθνές πρότυπο σύστημα: "10-20" θέσεων ηλεκτροδίων για ΗΕΓ. Τά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών ηλεκτροδίων είναι 10% ή 20% αποστάσεων μεταξύ χαρακτηριστικών σημείων του κρανίου. 'Η λνιακή και η μαστοειδής όστική προβολή είναι δύο τέτοια σημεία.

Τά ηλεκτρόδια είναι συχνά μικροί δίσκοι χλωριοϋχου άργύρου. Οί θέσεις του δέρματος της κεφαλής που τοποθετούνται τά ηλεκτρόδια εξαρτώνται από τό εξέταζόμενο τμήμα του έγκεφάλου. Το Σχ.106 δείχνει τό διεθνές πρότυπο σύστημα 10-20. Το Σχ.107 δείχνει χαρακτηριστικά ΗΕΓ για διάφορα ζεύγη ηλεκτροδίων. Τό ηλεκτρόδιο αναφοράς (A₁ ή A₂) τοποθετείται πίσω από τό αυτί.

Συνήθως καταγράφεται ταυτόχρονα ή χρονική μεταβολή 8 μέχρι 16 δυναμικών. Τά σήματα της δεξιάς πλευράς συγκρίνονται μέ κείνα της άριστερης, γιατί ασύμμετρη δραστηριότητα συχνά δείχνει έγκεφαλική άσθένεια.

4.3. Ρυθμοί του Η.Ε.Γ.

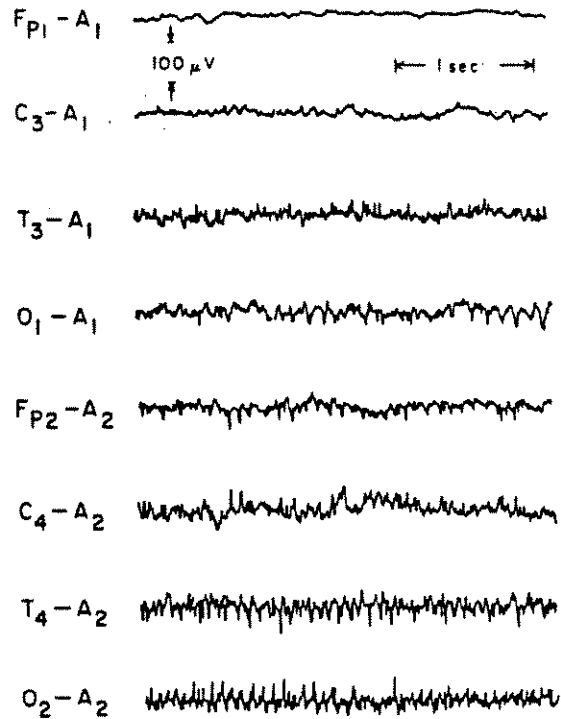
Συνήθως καταγράφονται ΗΕΓ ένηλίκων. Πρίν από τήν ηλικία των 13 χρόνων, τά ΗΕΓ είναι άκανόνιστα (χωρίς σαφή ρυθμό και συγχρονισμό). Δηλ. δέν έχουν σημαντική διαγνωστική άξία. 'Η πιο διακριτή συχνότητα του ΗΕΓ αύξάνει από 3÷4 Hz κατά τή γέννηση, σε 8÷12 Hz στον ένηλικά. 'Η τελευταία λαμβάνεται σαφώς σε όλη τήν έγκεφαλική έπιφάνεια.

'Αν ό εξέταζόμενος αναπαύεται μέ κλειστά μάτια και μέ ηλεκτρόδια στο δεξιό και άριστερό λνιακό (occipital) τμήμα του έγκεφάλου καταγράφεται δυναμικό συχνότητας 8÷13 Hz. Αυτό όνομάζεται ρυθμός α ή

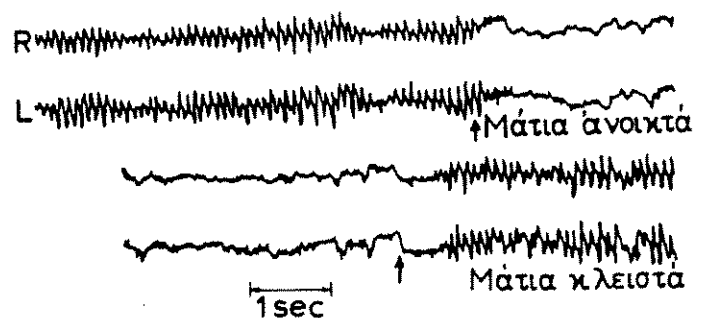
κύματα α (Σχῆμα 108). Μόλις ανοίξουν τὰ μάτια, ἀκόμη καί σέ σκοτεινό δωμάτιο, ὁ ρυθμός α διακόπτεται. Μᾶλλον ἡ προσοχή καί ἡ προσπάθεια νά δεῖ τό άτομο, παρά τό ἴδιο τό ὀπτικό ἐρέθισμα, διακόπτουν τό ρυθμό α. Ἐπίσης ἡ ἐντονη προσπάθεια ἐπίλυσης δύσκολου προβλήματος διακόπτει τό ρυθμό α ἀκόμα καί ἂν τὰ μάτια εἶναι κλειστά.

Ὁ χαρακτηριστικός ρυθμός ἀλλάζει μέ την κατάσταση ἐγρήγορης, ἀνάπαυσης ἢ ὕπνου τοῦ ἀτόμου. Τά κύματα διεγερμένου ἐγκεφάλου ἔχουν μεγάλη συχνότητα καί μικρό πλάτος. Ὅσο ἡρεμεῖ ὁ ἐγκέφαλος μεγαλώνει τό πλάτος καί μειώνεται ἡ συχνότητα τοῦ ρυθμοῦ, ὅπως δείχνει τό Σχ.109. Οἱ δύο ἐνδιάμεσες περιοχές μεγάλης συχνότητας στήν κατάσταση ὕπνου (Σχ.109) συνοδεύονται ἀπό γρήγορη κίνηση τῶν ματιῶν καί πιστεύεται ὅτι προκαλοῦνται ἀπό ὄνειρα.

Οἱ διάφορες χαρακτηριστικές περιοχές συχνότητων τοῦ ΗΕΓ χαρακτηρίζονται διεθνῶς μέ Ἑλληνικά γράμματα. Δέλτα: $<4 \text{ Hz}$, θῆτα: $4,0 \div 8,0 \text{ Hz}$, ἄλφα: $8 \div 13 \text{ Hz}$, βῆτα: $>13 \text{ Hz}$.



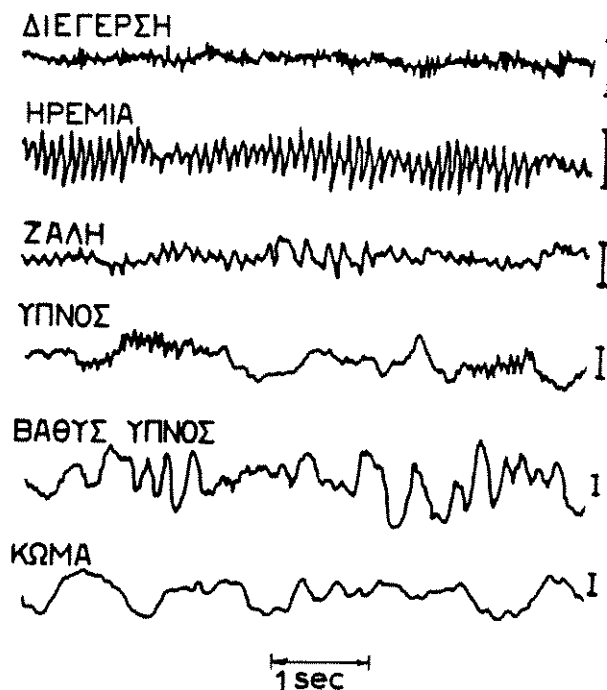
Σχ.107. Φυσιολογικό ΗΕΓ. Οἱ θέσεις τῶν ἡλεκτροδίων φαίνονται στό Σχ.106.



Σχ.108. ΗΕΓ ἀπό τή δεξιά καί ἀριστερή ἰνιακή πλευρά τοῦ ἐγκεφάλου. Ὁ ρυθμός α ἐμφανίζεται ὅσο τὰ μάτια εἶναι κλειστά καί διακόπτεται μόλις ἀνοίξουν.

4.4. Ίατρικὴ χρησιμότητα τοῦ Η.Ε.Γ.

Τὸ ΗΕΓ βοηθᾷ στὴ διάγνωση ἀσθενειῶν τοῦ ἐγκεφάλου. Εἶναι χρῆσιμο στὴ διάγνωση καὶ κατάταξη τῶν ἐπιληπτικῶν κρίσεων. Ἐπίσης βοηθᾷ στὴν ἐπιβεβαίωση ὄγκων τοῦ ἐγκεφάλου, γιατί ἡ ἠλεκτρικὴ δραστηριότητα μειώνεται στὴν περιοχὴ τοῦ ὄγκου. Στὴ χειρουργικὴ λαμβάνεται συνήθως ἓνα μόνον δυναμικὸ ΗΕΓ, ὅταν δὲν μπορεῖ νὰ ληφθεῖ ΗΚΓ καὶ γιὰ παρακολούθηση τῆς στάθμης ἀναισθησίας τοῦ ἀσθενοῦς. Τελευταῖα, τὸ ΗΕΓ χρησιμοποιεῖται καὶ γιὰ τὸ νόμιμο ὄρισμό τοῦ θανάτου (ἐγκεφαλικὸς θάνατος) ὥστε νὰ ἐπιτρέπεται ἡ ἀφαίρεση ὀργάνων γιὰ μεταμόσχευση ὅταν ὁ φλοιὸς τοῦ ἐγκεφάλου δὲν ἔχει ἠλεκτρικὴ δραστηριότητα.



Σχ. 109. Χαρακτηριστικὰ ΗΕΓ σὲ διάφορες καταστάσεις. Ἡ κλίμακα φαίνεται μὲ κατακόρυφα τμήματα τῶν 50 μV.

4.5. Τεχνικὰ προβλήματα.

Οἱ διαφορὲς δυναμικοῦ πού καταγράφει τὸ ΗΕΓ μετριοῦνται σὲ μV. Δηλ. εἶναι περίπου 100 φορές μικρότερες καὶ ἀπὸ κείνες πού καταγράφει τὸ ΗΚΓ. Ἐπειδὴ τὰ σήματα τοῦ ΗΕΓ εἶναι τόσο ἀσθενῆ, εἶναι πολὺ εὐάλωτα. Ἡ κυματομορφή τοῦ ΗΕΓ παραμορφώνεται εὐκόλα, λόγω παρεμβολῆς καὶ προσθήκης ξένων (μὴ ἐγκεφαλικῶν) σημάτων πού μπορεῖ νὰ εἶναι πολὺ ὑψηλότερα ἀπὸ κείνα πού θέλομε νὰ καταγράψομε. Γιὰ ν' ἀποφύγομε ἢ τουλάχιστο νὰ περιορίσομε, τὴν παραγωγή καὶ ὑπέρθεση στοῦ ΗΕΓ τέτοιων παρασιτικῶν σημάτων, πρέπει νὰ γνωρίσομε τίς παρακάτω κυριότερες πηγές τους.

4.5.1. Παράσιτα ἠλεκτροδίων.

Αὐτὰ εἶναι συνήθως τὰ ἐνοχλητικότερα ἀπὸ τὰ ἀνεπιθύμητα σήματα. Ἄν κινηθεῖ ὁ ἀσθενὴς ἢ ἂν κινηθοῦν τὰ καλώδια πού συνδέουν τὰ ἠλεκτρόδια του μὲ τὸ μὴχάνημα, διαταράσσεται ἡ ἠλεκτροχημικὴ ἰσορροπία μεταξὺ ἠλεκτροδίων καὶ δέρματος, ἐκεῖ δηλαδή πού μετατρέπεται

τό ρεύμα ιόντων (στόν άσθενή) σέ ρεύμα ήλεκτρονίων (στά ήλεκτρόδια καί στά σύρματα). Έτσι μπορεί νά παραχθοϋν αλλαγές δυναμικοϋ, πού αποτελοϋν σήματα για τό μηχανήμα. Αϋτά ενισχύονται μαζί μέ τά επιθυμητά σήματα καί αλλάζουν τό ΗΕΓ.

Αν ό άσθενής ιδρώνει, ό ιδρώτας θά έπηρεάσει επίσης τήν ισορροπία κάτω από τά ήλεκτρόδια. Έτσι θά έμφανισθοϋν μεγάλες αλλά βραδείας μεταβολής αλλαγές δυναμικοϋ. Δηλαδή έπηρεάζουν τήν γραμμή βάσεως τοϋ ΗΕΓ.

4.5.2. Δυναμικά από καρδιά καί μάτια.

Η λειτουργία τής καρδιάς παράγει όπως είδαμε στην ΗΚΓ δυναμικά στό δέρμα. Αϋτό βέβαια ισχύει καί για τό δέρμα τής κεφαλής. Εϋτυχώς ή απόσταση (r στό Σχήμα 92) μεταξύ καρδιάς καί κεφαλής είναι μεγάλη. Έτσι τό σήμα πού παίρνουν τά ήλεκτρόδια ($v_{12} = K \cdot R \cdot p \cdot \sin \theta / r^3$) είναι πολύ μικρό, όταν μάλιστα είναι μικρή καί ή απόσταση R μεταξύ τών ήλεκτροδίων. Όταν είναι σημαντικό τό καρδιακό σήμα δίνει στό ΗΕΓ όξετες αιχμές (άποκλίσεις τής γραφίδας) μέ τήν περιοδικότητα τής καρδιάς (δηλ. ανά $-0,8s$). Η παρεμβολή, πού προκαλείται στό ΗΕΓ όταν ύπάρχει έμφυτευμένος βηματοδότης τής καρδιάς, είναι ισχυρότατη καί δέν μπορεί νά έξαλειφθεϊ.

Η διαφορά δυναμικοϋ μεταξύ τοϋ πρόσθιου καί τοϋ όπίσθιου τμήματος τοϋ ματιοϋ είναι αρκετά mV. Αϋτό τό δίπολο δίνει ρεύματα διά τών ιστών καί δυναμικά στό δέρμα τής κεφαλής, πού αλλάζουν όταν κινούνται τά μάτια τοϋ έξεταζόμενου.

4.5.3. Ηλεκτρική καί μαγνητική παρεμβολή από γειτονικά ρεύματα.

Έστω ότι ένα ήλεκτροφόρο καλώδιο (220V, 50 Hz) περνά σέ μικρή απόσταση από τόν άσθενή. Τό μονωμένο σώμα τοϋ άσθενοϋς, έπειδή βρίσκεται μέσα στό ήλεκτρικό πεδίο, θά αποκτήσει ένα δυναμικό μεταξύ τοϋ δυναμικοϋ τοϋ σύρματος καί εκείνου τής γής. Αϋτό τό έναλλασσόμενο δυναμικό τοϋ σώματος μπορεί νά φθάνει σέ ύψηλότατες τιμές σέ σχέση μέ τά δυναμικά τοϋ ΗΕΓ. Στο τέλος τοϋ βιβλίου (14 Πρόβλημα) υπολογίστηκε ότι άνθρωπος πού στέκεται στό δάπεδο καί απέχει 1m από άθωράκιστο καλώδιο Ε.Ρ. 220V θά αποκτήσει έναλλασσόμενο δυναμικό ένεργοϋ τιμής περίπου 20V. Αϋτό είναι περίπου ένα έκατομμύριο φορές ύψηλότερο από τά δυναμικά πού μετρά τό ΗΕΓ.

Έξ άλλου μέρος από τό χωρητικό ρεύμα πού διαρρέει από τό σύρμα πρός τή γή περνά διά τοϋ σώματος τοϋ άσθενοϋς. Έτσι δημιουργεί διαφορές δυναμικοϋ ($V = I \cdot R$) μεταξύ τών θέσεων τοϋ δέρματος πού φέ-

ρουν τά ηλεκτρόδια. Αύτά τά δυναμικά αποτελούν για τό μηχανήμα σήματα πού υπερτίθενται στό ΗΕΓ.

"Αν τό παραπάνω καλώδιο διαρρέεται από ρεύμα έντασης i , δημιουργεί καί στό γύρω του χώρο μαγνητικό πεδίο (νόμος Biot-Savart). "Αν Φ είναι ή ροή του μαγνητικού πεδίου πού περνά μέσα από ένα βρόχο, σχηματιζόμενο από τά καλώδια συνδέσεως του άσθενους με τον ΗΕΓ θά έπαχθει σ' αυτόν τάση $v = \frac{d\Phi}{dt}$. Αυτό τό δυναμικό πού θά υπερτεθει στό ΗΕΓ υπολογίστηκε στό "15 Πρόβλημα".

Σέ αντίθεση με τίς ηλεκτρικές, οι μαγνητικές παρεμβολές προκαλούν άσθενή παράσιτα. "Η κάθε γραμμή έχει συνήθως δύο σύρματα πού σέ κάθε στιγμή διαρρέονται από ίσα ρεύματα αντίθετης φοράς. "Επειδή τά σύρματα είναι παράλληλα καί έχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους, τά μαγνητικά πεδία τους σχεδόν άλληλοεξουδετερώνονται.

"Η κατάσταση διάφέρει αν τό "Εργαστήριο γειτνιάζει προς κάποιο ύποσταθμό της ΔΕΗ. Τότε τά ύψηλά ρεύματα καί οι πολλές στροφές (σπειρες) των πηνίων των μετασχηματιστών δημιουργούν (σχυρά μαγνητικά πεδία (θεώρημα Ampere) πού έπάγουν ανάλογα σήματα στους βρόχους των καλωδίων άσθενους καί όργάνου.

4.5.4. Παρεμβολή από πεδία ύψηλής (ραδιοφωνικής) συχνότητας.

Κάθε σύρμα διαρρεόμενο από ύψίσυχο ρεύμα έκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα, πού διαδίδονται σέ μεγάλες αποστάσεις. "Η πηγή αυτών των κυμάτων μπορεί νά είναι ή κεραία ενός ραδιοφωνικού σταθμού ή ό σπινθήρας πού παράγεται κατά την διακοπή κάποιου ηλεκτρικού ρεύματος. Αύτά τά μεταβατικά κύματα, φεύγοντας από τον ηλεκτρικό διακόπτη καί ταξιδεύοντας κατά μήκος της τροφοδοτικής γραμμής, μπορούν νά φθάσουν καί νά δημιουργήσουν ένοχλητική παρεμβολή στό μέτρητικό μας όργανο (ΗΚΓ, ΗΜΓ, ΗΕΓ).

Τά πεδία ραδιοφωνικής συχνότητας πού προέρχονται από ραδιοφωνικούς καί τηλεοπτικούς πομπούς έχουν μικρή ένταση (λίγα mV ανά μέτρο μήκος στον άέρα). "Ετσι τά παράσιτα τους έξαλείφονται εύκολα με βαθυπερατό φίλτρο, δεδομένου ότι τά βιοδυναμικά πού θέλομε νά καταγράψομε δέν περιέχουν ύψίσυχνες συνιστώσες. "Αν όμως ό πομπός είναι κοντά ή αν στον ίδιο (ή σέ γειτονικό) χώρο λειτουργεί μιά φυσιοθεραπευτική ή χειρουργική διαθερμία, τό ηλεκτροφυσιολογικό μας όργανο μπορεί νά δεχθεί ύψηλά ύψίσυχνα σήματα. Για παράδειγμα, σέ απόσταση 1500m από πομπό VHF των 100W τό πεδίο είναι περίπου 20mV/m, ένω αν θωρακισθεί τό δωμάτιο μειώνεται σέ -10mV/m. Σέ απόσταση 6m από χειρουργική διαθερμία, πού λειτουργεί σέ 400W καί σέ 400kHz, τό πεδίο είναι περίπου 10mV/m.

4.6. Μείωση των ανεπιθύμητων παρεμβολών.

Ἡ κατασκευή θωρακισμένου δωματίου (ἐλεύθερου ἠλεκτρικῶν καὶ ὑψίσουχων πεδίων) εἶναι δαπανηρή. Τό θυρόφυλλο πρέπει νά εἶναι χάλκινο καί νά ἔχει περιμετρικά καλές ἠλεκτρικές ἐπαφές μέ τό ἐπίσης ἀγώγιμο πλαίσιο του (τήν κάσα του). Ἐπειδή τά παράθυρά δέν θωρακίζονται ἀποτελεσματικά, πρέπει ν'ἀποφεύγονται. Δηλ. νά χρησιμοποιεῖται τεχνητός φωτισμός συνεχῶς. Οἱ τοῖχοι, τό δάπεδο καί ἡ ὀροφή πρέπει νά ἔχουν ἀγώγιμα καί γειωμένα πλέγματα.

Εὐτυχῶς στίς περισσότερες περιπτώσεις δέν εἶναι ἀναγκαῖα ἡ κατασκευή θωρακισμένου δωματίου. Ἡ προσεκτική χρήση καί ἡ σωστή κατασκευή τῶν ἠλεκτροφυσιολογικῶν ὀργάνων ἀρκοῦν γιά νά ἐλαττώσουν ἱκανοποιητικά τίς παρεμβολές.

Μερικές πρακτικές συμβουλές εἶναι:

1. Τό μὴνῆμα πρέπει νά εἶναι πάντοτε γειωμένο.
2. Τά καλώδια τῶν συνδέσεων ἀσθενοῦς-μηχανήματος καί τό καλώδιο τροφοδοσίας τοῦ μηχανήματος πρέπει νά εἶναι προστατευμένα μέ ἀγώγιμο περίβλημα. Αὐτή ἡ προστασία ἀφαιρεῖ σχεδόν ὅλη τήν παρεμβολή ἠλεκτρικῶν πεδίων.
3. Οἱ λαμπτήρες φθορισμοῦ προκαλοῦν σημαντική ἠλεκτρική παρεμβολή μέχρι ἀπόσταση 2m. Στήν ΗΚΓ καί ΗΕΓ ὁ ἀσθενής δέν πρέπει νά εἶναι κοντά σέ λαμπτήρες φθορισμοῦ. Οἱ λαμπτήρες πυρακτώσεως εἶναι πολύ προτιμώτεροι.
4. Τά ἠλεκτροφόρα τροφοδοτικά καλώδια δέν πρέπει νά γειτνιάζουν οὔτε στόν ἀσθενῆ οὔτε στά καλώδια συνδέσεως ἀσθενοῦς-ὀργάνου. Τό μαγνητικό τους πεδίο ἐπάγει παρεμβολές.
5. Ὁ μετρούμενος ἀσθενής πρέπει νά ἀπέχει ἀπό ὅποιονδήποτε μετασχηματιστή, ἀκόμα καί ἀπό κεῖνον πού τυχόν περιέχεται στό ὄργανο. Ἄρα ὁ ἀσθενής δέν πρέπει νά βρίσκεται δίπλα στό ὄργανο.
6. Φθαρμένα καλώδια καί κακοτοποθετημένα ἠλεκτρόδια εἶναι οἱ συνηθέστερες πηγές παρεμβολῆς.
7. Τά ἠλεκτροφόρα καλώδια κατά τήν κατασκευή τοῦ Ἐργαστηρίου, πρέπει νά ἐγκατασταθοῦν μέσα σέ μεταλλικούς γειωμένους καί ὄχι σέ πλαστικούς σωλῆνες.
8. Γενικά ἡ ἀπόσταση εἶναι ἀποτελεσματικός καί φθηνός προστατευτής. Κάθε παρεμβολή μειώνεται αὐξάνοντας τήν ἀπόσταση τῆς θέσης μετρήσεως ἀπό τήν πηγή τῆς παρεμβολῆς.

5. προκλητα δυναμικα

5.1. Γενικά.

Τό έρέθισμα πρὸς μία ἀπὸ τὶς πέντε αἰσθήσεις μεταφέρεται μετὰ αἰσθητήρια ἢ αἰσθητικὰ νεῦρα στὸν ἐγκέφαλο. Γιά τὴ μεταφορὰ του καὶ τὴν ἐπεξεργασία του στὸν ἐγκέφαλο διεγείρονται κύτταρα. Ἡ ἠλεκτρικὴ δραστηριότητα αὐτῶν τῶν κυττάρων προκαλεῖ στὴν ἐπιφάνεια τοῦ δέρματος δυναμικά. Γι' αὐτὰ τὰ δυναμικά, τὰ "προκαλούμενα" ἢ "προκληθέντα" (evoked) ἀπὸ τὸ ἀρχικὸ έρέθισμα, ἐπεκράτησε τὸ ἐπίθετο "προκλητά", δηλ. πού μποροῦν νὰ προκληθοῦν, ἴσως ἐπειδὴ εἶναι συντομώτερο.

Τὰ Π.Δ. φθάνουν μέχρι 5 μV, δηλ. ἀποτελοῦν μικρὸ ποσοστὸ τῶν δυναμικῶν τοῦ ΗΕΓ (5 μέχρι 100 μV), πού δίνει τὸ σύνολο τῶν ἐγκεφαλικῶν κυττάρων, (ἀνεξάρτητα ἀπὸ τὴν ἀνωτέρω διεγερση τῶν αἰσθήσεων). Γι' αὐτὸ τὰ Π.Δ. εἶναι δύσκολο νὰ διακριθοῦν καὶ νὰ μετρηθοῦν.

Ὁ Caton, πού πῆρε τὰ πρῶτα ΗΕΓ τὸ 1875, κατέγραψε (ἀπὸ ἐκτεθειμένη ἐγκεφαλικὴ ἐπιφάνεια ζῶων) καὶ Π.Δ., διεγείροντας τὸ μάτι με ἕνα φῶς (ὀπτικά προκλητὸ δυναμικὸ, Ο.Π.Δ.).

Ὁ Dawson, τὸ 1947, διεγείρει πολλές φορές τὸ ἴδιο νεῦρο τοῦ καρποῦ ἀνθρώπου καὶ κατέγραψε τὸ ΗΕΓ μετὰ ἀπὸ κάθε διεγερση. Προσθέτοντας ὅλα τὰ ΗΕΓ πῆρε ἕνα ὑψηλὸ ὀριζόντιο ὑπόστρωμα ἀπὸ τὰ τυχαῖα α-κύματα καὶ πάνω ἀπὸ αὐτὸ τὸ ὑπόστρωμα, διακρινόταν ἐνισχυμένο, τὸ Π.Δ. λόγω τῆς πρόσθεσης (σωματικὰ προκλητὸ δυναμικὸ, Σ.Π.Δ.).

Σήμερα μοντέρνες τεχνικὲς με ἠλεκτρονικὸ ὑπολογιστὴ ἐκθέτουν τὰ Π.Δ. με αὐτόματη ἀφαίρεση τοῦ ὑποστρώματος τῶν α καὶ β κυμάτων. Τὸ ὕψος τῆς κυματομορφῆς αὐξάνει βέβαια με τὸ πλῆθος (π.χ. 100) τῶν ἴδιων διαδοχικῶν διεγέρσεων τῶν ὁποίων προστέθηκαν τὰ Π.Δ.

Ἔχουν ἐρευνηθεῖ καὶ Π.Δ. ὀφειλόμενα σέ ὀσφυρτικὲς καὶ γευστικὲς διεγέρσεις ἀλλὰ ἡ κύρια ἐρευνα καὶ ἐφαρμογὴ ἀφορᾷ Π.Δ. ἀπὸ ὀπτικά, ἀκουστικά καὶ σωματικὰ έρεθίσματα.

Ἐκτός ἀπὸ τὸ τριχῶτό τῆς κεφαλῆς, Π.Δ. μετροῦνται καὶ σέ ἄλλα σημεῖα τῆς ἐπιφάνειας τοῦ δέρματος. Γιά παράδειγμα γύρω στό μάτι μετροῦμε τὸ Π.Δ. πού ὀφείλεται στὴν κίνησή του ἢ στὴν δραστηριότητα τοῦ ἀμφιβληστροειδοῦς μετὰ ἀπὸ φωτεινὸ έρέθισμα.

5.2. Ὀπτικά προκλητὸ δυναμικὸ (Ο.Π.Δ.).

Συνήθως λαμβάνεται ἀπὸ ἰνιακὸ-βρεγματικὰ ἠλεκτρόδια τῆς μέσης γραμμῆς (τομὴ ὀβελιαίου ἐπίπεδου καὶ δέρματος).

Ὅπως δείχνει τὸ Σχ.110, ἡ κυματομορφὴ ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴ θέση πάνω στὴ μέση γραμμὴ τῶν δύο ἠλεκτροδίων λήψεως.

Μέγεθος χαρακτηριστικὸ ἀσθένειας ἢ χρήσης φαρμάκων πού μετρά-

ται από τό Ο.Π.Δ. είναι ο "λανθάνων" χρόνος μεταξύ του έρεθίσματος και της εμφάνισης της κυματομορφής.

Συγγενής όπτική βλάβη μπορεί στά πρώτα χρόνια της ζωής νά προκαλέσει αντίστοιχη έγκεφαλική βλάβη. Γι' αυτό έπινοήθηκαν τεχνικές έλέγχου της όρασης μικρών παιδιών πού δέν μιλούν ακόμα.

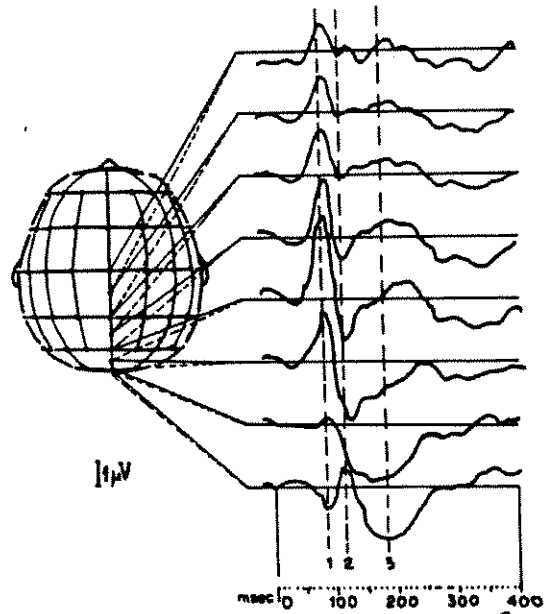
Τό Ο.Π.Δ. από ομοιόμοφο φωτισμό όθόνης και τό Ο.Π.Δ. από προβολή σχεδίου πάνω στην όθόνη είναι διαφορετικά. Αφαιρώντας τό πρώτο από τό δεύτερο βρίσκουμε την επίδραση του σχεδίου στό Ο.Π.Δ. Αύτή ή τεχνική εφαρμόζεται για τόν έλεγχο της όπτικής όξύτητας και για την έπιλογή διορθωτικών φακών σέ πολύ μικρά παιδιά.

Γιά παράδειγμα προβάλλεται στην όθόνη σχέδιο σκακιέρας μέ τετράγωνα πού συνεχώς μικραίνουν. Όταν ή πλευρά του τετραγωνιδίου γίνεται ίση μέ την διακριτική ικανότητα του ματιού, τό παιδί δέν βλέπει πιά τό σχέδιο και τό Ο.Π.Δ. γίνεται εκείνο της ομοιόμοφα φωτισμένης όθόνης (μηδενική επίδραση του σχεδίου).

Τά Ο.Π.Δ. εφαρμόζονται στην διάγνωση και ποσοτική αξιολόγηση και της άμβλυοπίας των παιδιών. Τά παραπάνω μεγάλα τετραγωνίδια τά βλέπει από μόνο του και τό "καλό" και τό "άμβλυοπικό" μάτι. Όταν όμως μικραίνουν άρκετά τά τετραγωνίδια τά βλέπει μόνο τό καλό μάτι. Έτσι τό κάθε μάτι δίνει διαφορετικό Ο.Π.Δ. όταν είναι κλειστό τό άλλο.

Μέ τά Ο.Π.Δ. μπορεί επίσης νά έλεγχθει άν ένα νήπιο έχει άχρωματοψία.

Τά Ο.Π.Δ. (έπί πλέον των κλασικών νευρολογικών έξετάσεων) βοηθούν σημαντικά στην διάγνωση και παρακολούθηση της "σκλήρυνσης κατά πλάκας". Αύτή ή ασθένεια πού προκαλεί άπομύελωση των νευρικών ίνων και βλάβη των συνάψεων, μπορεί νά προσβάλλει και ίνες του όπτικού νεύρου. Αύτή ή "όπτική νευρίτιδα" είναι συνήθως όδυνηρή και συχνά προκαλεί άπώλεια της όπτικής όξύτητας του ενός ή και των δύο ματιών. Τό Ο.Π.Δ. του ενός ματιού συγκρίνεται μέ τό Ο.Π.Δ. του άλλου ή και τά δύο Ο.Π.Δ. συγκρίνονται μέ φυσιολογικά.



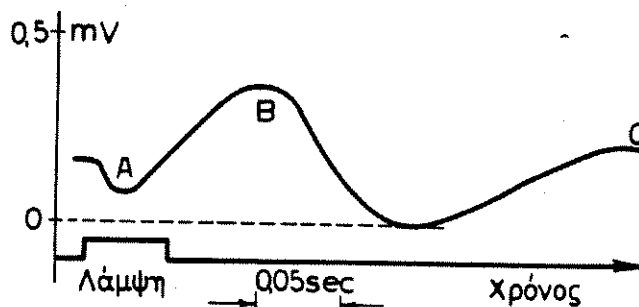
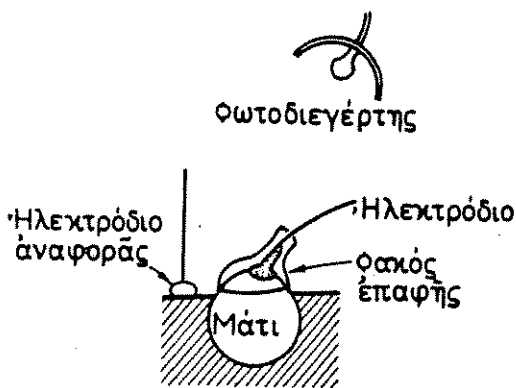
Σχ.110. Όκτώ Ο.Π.Δ. από τό ίδιο έρέθισμα αλλά από διάφορες θέσεις των δύο ήλεκτροδίων.

5.3. Ἡ λ ε κ τ ρ ο - ἄ μ φ ι β λ η σ τ ρ ο ε ι δ ο - γ ρ ᾶ φ η - μ α (Η.Α.Γ.).

Ἡ καταγραφή δυναμικοῦ πού προκαλεῖται στό μάτι ὅταν ὁ ἀμφιβληστροειδής ἐκτεθεῖ σέ μιά λάμψη φωτός ἀποτελεῖ τό Η.Α.Γ. Ἔιναι δηλ. ἕνα "προκλητό" δυναμικό πού μετριέται στό μάτι ἐνώ παράλληλα μπορεῖ νά μετρηθεῖ καί στό τριχωτό τῆς κεφαλῆς τό Ο.Π.Δ., πού θά προκαλέσει ἡ ἴδια λάμψη ὅταν τό σῆμα φθάσει διὰ τοῦ ὀπτικοῦ νεύρου στόν ἐγκέφαλο.

Τό ἕνα ἠλεκτρόδιο εἶναι μέσα σέ φακό ἐπαφῆς πού προσαρμόζεται στόν κερατοειδῆ καί τό δεύτερο τοποθετεῖται στό μέτωπο ἢ στό αὐτί (Σχ.112) γιά νά πλησιάζει τό πίσω μέρος τοῦ ματιοῦ.

Τό Σχ.113. δείχνει ἕνα ΗΑΓ. Τό κύμα Β εἶναι πιά ἐνδιαφέρον, γιὰτί δημιουργεῖται ἀπό ἠλεκτρική δραστηριότητα στόν ἀμφιβληστροειδῆ. Φλεγμονή τοῦ ἀμφιβληστροειδοῦς, πού καταλήγει σέ μελαχρωστική ἀμφιβληστροειδοπάθεια, ἀφαιρεῖ τό κύμα Β ἀπό τό ΗΑΓ.



Σχ.112. Θέσεις τῶν δύο ἠλεκτροδίων. Τό τῆς ἀναφορᾶς εἶναι στό αὐτί ἢ στό μέτωπο.

Σχ.113. ΗΑΓ. Τό κύμα Β προέρχεται ἀπό τόν ἀμφιβληστροειδῆ.

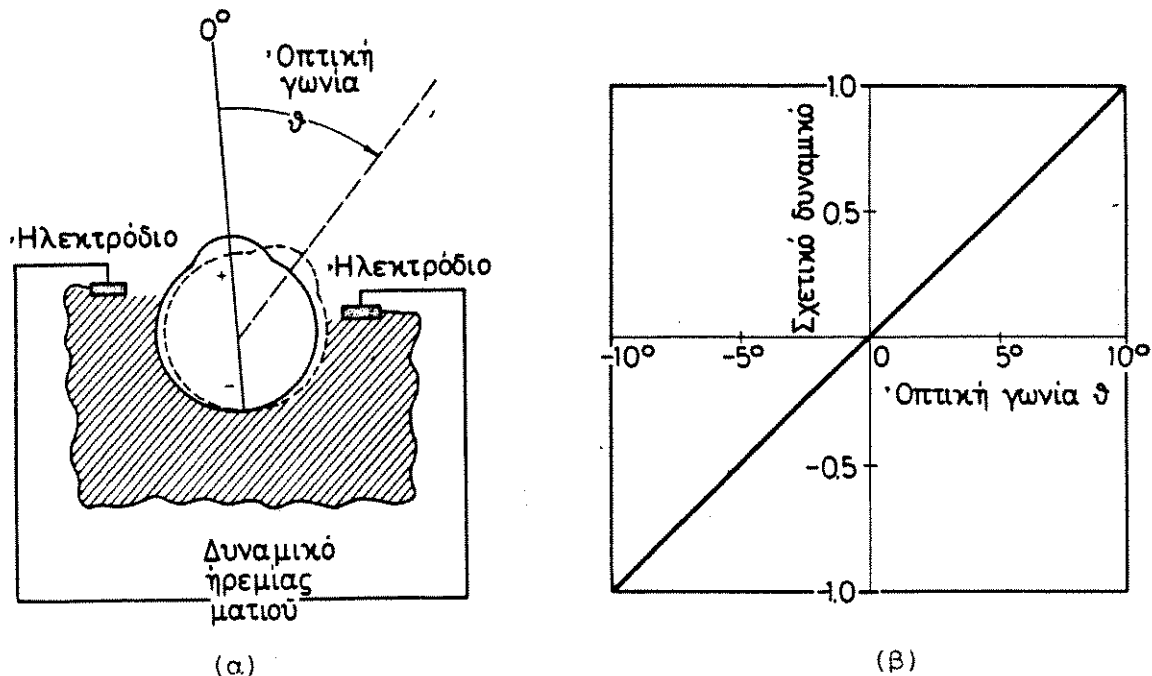
5.4. Ἡ λ ε κ τ ρ ο - ὀ φ θ α λ μ ο - γ ρ ᾶ φ η μ α (Η.Ο.Γ.).

Μέ τό ΗΟΓ καταγράφονται μεταβολές δυναμικοῦ πού ὀφείλονται στίς κινήσεις τῶν ματιῶν. Γιά τίς μετρήσεις ὀριζόντιας στροφῆς τοῦ ὀπτικοῦ ἀξονα τοῦ ματιοῦ, τοποθετοῦνται δύο ἠλεκτρόδια στίς δύο πλευρές τοῦ ματιοῦ, ὅπως δείχνει τό Σχ.114α. Τό δυναμικό ΗΟΓ ὀρίζεται ἴσο πρὸς μηδέν (δυναμικό ἀναφορᾶς) ὅταν τό μάτι κοιτάζει κατ' εὐθείαν ἐμπρός (0° στό Σχ.114.α). Τό Σχ.114β δείχνει τή μεταβολή

της τάσης (διαφοράς δυναμικού) μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων όταν το μάτι στρέφεται οριζόντια δεξιά ή αριστερά. Δηλ. η μετρούμενη τάση είναι γραμμικά ανάλογη της οπτικής γωνίας θ κατά την οποία έστριψαν τα μάτια ($V=K \cdot \theta$ όπου K σταθερό).

Τό ΗΟΓ δίνει πληροφορίες για τον προσανατολισμό των ματιών καθώς και για τη γωνιακή ταχύτητα και τη γωνιακή επιτάχυνση κατά την περιστροφή τους.

Έτσι μπορεί να ανιχνευθεί η γρήγορη κίνηση των ματιών (Rapid Eye Movement ή REM) κατά τον ύπνο, πού φαίνεται να συμπίπτει με τα όνειρα και με την αλλαγή ρυθμού στο ΗΕΓ. Επίσης τό ΗΟΓ χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη της επίδρασης διαφόρων φαρμάκων. Δηλ. τό ΗΟΓ εφαρμόζεται περισσότερο στην έρευνα και λιγότερο στην καθημερινή άσκηση της Οφθαλμολογίας.



Σχ.114α. Θέση ηλεκτροδίων στα πλάγια των ματιών για να μετρηθεί τό ΗΟΓ, δηλ. η τάση σε σχέση με τη γωνία θ των ματιών.

β. Μεταβολή της τάσης σαν συνάρτηση της οπτικής γωνίας θ .

5.5. Ακουστικά προκλητό δυναμικό (ΑΠΔ).

Τά ΑΠΔ διαφέρουν πολύ από τά ΟΠΔ και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Τά ταχεία ΑΠΔ εμφανίζονται μέσα στα πρώτα 10 ms από τό ακουστικό έρέθισμα και αποτελούν εικόνα της ηλεκτρικής δραστηριότητας κατά τη διαδρομή του σήματος από τό ατί μέχρι τον φλοιό του κροταφικού λοβού.

Τά βραδέα Α.Π.Δ. αρχίζουν περίπου 100ms και τελειώνουν περίπου 400ms μετά τό έρέθισμα. Πιστεύεται ότι αποτελούν απόκριση τής κορυφής του έγκεφαλικού φλοιού.

5.5.1. Ταχεία Α.Π.Δ.

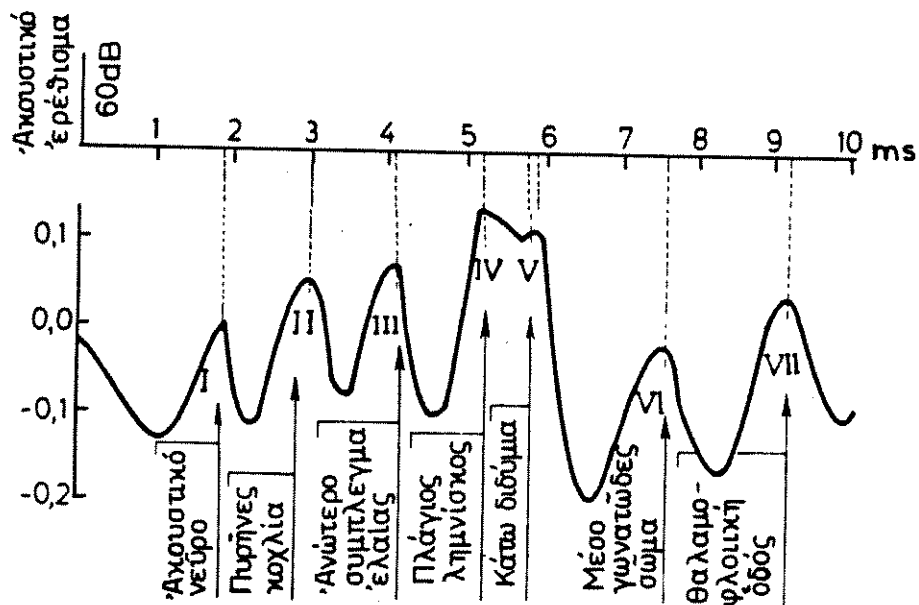
Αυτά έχουν έπτά σαφείς κορυφές ή κύματα και πολύ μικρότερο λανθάνοντα χρόνο ή ύστέρηση από τά Ο.Π.Δ.

Τά Α.Π.Δ. συνήθως μετρούνται μεταξύ ενός ήλεκτροδίου στήν κορυφή (vertex) του έγκεφάλου και του ήλεκτροδίου αναφοράς στό λωβό του αύτιου ή στή μαστοειδή απόφυση.

Τό σύνηθες έρέθισμα είναι βραχείς ήχοι (κλίκ) πού δίνονται στό ένα ή στό άλλο αύτί ή στά δύο μαζί, μέ συχνότητα 10 ανά sec και ένταση περίπου 60dB πάνω από τό κατώφλι άκουστότητας. Στό Σχ.111 φαίνονται οί έπτά κορυφές ή έπάσματα του Α.Π.Δ. πού παίρνομε μέ τά δύο ήλεκτρόδια μέσα σέ 10ms μετά από κάθε "κλίκ".

Αντίθετα πρós τά Ο.Π.Δ., τά Α.Π.Δ. λαμβάνονται ανεξάρτητα από τήν ηλικία και τήν κατάσταση του ανθρώπου. Δηλ. τά Α.Π.Δ. παίρνονται από ένα νεογνό ή από ένα ένήλικα ξύπνιο ή κοιμώμενο ή σέ κωματώδη κατάσταση.

Εισάγοντας ήλεκτρόδια στόν έγκέφαλο ζώων και προκαλώντας τραύματα στή νευρική άκουστική όδό, από τά τριχοειδή αίσθητήρια κύττα-



Σχ.111. Ακουστικά προκλητά δυναμικά από άνθρωπο, προκαλούμενα μέ στιγμιαίους κρότους (κλίκ). Στήν όριζόντια κλίμακα φαίνεται ο λανθάνων χρόνος ή ή ύστέρηση μεταξύ του κλίκ και τής κάθε κορυφής του Α.Π.Δ.

ρα (αίσθητικοί υποδοχείς-μεταλλάκτες) του αὐτιοῦ μέχρι τὸν ἐγκέφαλο, κατῶρθωσαν νὰ ἀφαιροῦν ἐκλεκτικὰ μερικὰ ἀπὸ τὰ παραπάνω ἐπτά ἐπάρματα. Ἔτσι ἀνακάλυψαν σὲ ποιῶν κυττάρων τὴν ἠλεκτρικὴ δραστηριότητα ὀφείλεται τὸ κάθε ἐπάρμα τοῦ Α.Π.Δ. καὶ ἀπόκτησαν ἰσχυρὸ τρόπο ἀνίχνευσης τῶν βλαβῶν τοῦ ὄλου ἀκουστικοῦ συστήματος ὅπως περιγράφεται παρακάτω.

Τὸ πλάτος (ὕψος), καὶ ἡ ὑστέρηση τοῦ κάθε ἐπάρματος τοῦ Α.Π.Δ. ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴν ἔνταση τοῦ ἠχητικοῦ ἐρεθίσματος. Αὐξάνοντας τὴν ἔνταση ἀπὸ 25 σὲ 75dB μειώνεται ἡ ὑστέρηση προοδευτικά: κατὰ $-1,5$ ms γιὰ τὸ πρῶτο, μέχρι $-2,5$ ms γιὰ τὸ τελευταῖο ἐπάρμα. Ἄρα σύγκριση τοῦ Α.Π.Δ. τοῦ ἀσθενοῦς μὲ τὸ φυσιολογικὸ Α.Π.Δ. δίνει τὸ μέτρο τοῦ βαθμοῦ κωφώσεως καὶ τὴν πιθανὴ θέση τῆς βλάβης. Ἡ μέθοδος εἶναι χρησιμώτατη γιὰ τὴν ἀνίχνευση κωφώσεως σὲ νήπια καὶ σὲ ἀσθενεῖς σὲ κῶμα. ἔχει ἐφαρμοσθεῖ καὶ στὸν προσδιορισμὸ κωφώσεως ἀπὸ βιομηχανικοὺς ἢ... μουσικοὺς (ρόκ) ἤχους.

Ἡ ἐξαφάνιση μερικῶν ἐπαρμάτων καὶ ἡ μεταβολὴ τῆς ὑστέρησης τῶν ὑπολοίπων ἀπὸ τὸ Α.Π.Δ. τοῦ ἑνός ἢ τοῦ ἄλλου αὐτιοῦ βοηθοῦν στὴ διάγνωση "σκλήρυνσης κατὰ πλάκας" ἢ ὄγκων, ὅταν ἔχει προσβληθεῖ τὸ ἐγκεφαλικὸ στέλεχος.

Τὰ Α.Π.Δ. βοηθοῦν στὴ διάγνωση τῆς κώφωσης νηπίων καὶ στὴν διακρισὴ τῆς ἀπὸ τὸν αὐτισμὸ. Ὄταν προστεθεῖ τὸ ἀκουστικὸ βοήθημα στὸ κωφὸ παιδί, ἐμφανίζονται τὰ ἐπάρματα τοῦ Α.Π.Δ.

Ἡ ὑστέρηση τῶν Ο.Π.Δ. καὶ τῶν Α.Π.Δ. εἶναι μεγάλη στὰ νεογνά καὶ μειώνεται πολὺ μέσα στοὺς πρώτους δέκα μῆνες τῆς ζωῆς. Τὸ ἀντίθετο συμβαίνει μὲ τὰ ὕψη τῶν ἐπτά ἐπαρμάτων ἢ κυμάτων τοῦ Α.Π.Δ. Αὐτὰ αὐξάνουν ἐντυπωσιακὰ στὸν ἴδιο χρόνον, ἐκτός ἂν ὑπάρχει βλάβη στὸ κεντρικὸ νευρικὸ σύστημα τοῦ νεογνοῦ, ὅποτε ἡ αὐξηση εἶναι πολὺ μικρότερη. Ἄρα τὸ Α.Π.Δ. συμβάλλει καὶ στὴ διάγνωση τέτοιας βλάβης.

5.5.2. Βραδέα Α.Π.Δ.

Αὐτὰ ὀνομάζονται καὶ P300 ἐπειδὴ ἀποτελοῦνται ἀπὸ ἓνα κύριο κύμα ποῦ εἶναι θετικὸ (Positive) καὶ ἡ αἰχμὴ του ἐμφανίζεται μετὰ περίπου 300 ms.

Λαμβάνονται ἀπὸ τίς ἴδιες θέσεις ἠλεκτροδίων ὅπως καὶ τὰ ταχέα Α.Π.Δ. ἀλλὰ ἔχουν πολὺ μεγαλύτερο πλάτος (περίπου 10 mV). Τὸ πλάτος ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴν ἀβεβαιότητα τοῦ ἐξεταζόμενου σχετικὰ μὲ τὸ ἐρέθισμα. Ἄν περιμένει ὀπτικὸ ἢ ἀκουστικὸ ἐρέθισμα τὸ πλάτος εἶναι πολὺ μικρότερο. θεωροῦν ὅτι τὸ Α.Π.Δ. προκαλεῖται ἀπὸ ἐγκεφαλικὴ διεργασία ἀξιολόγησης καὶ κατάταξης τοῦ ἐρεθίσματος.

Οι Ιατρικοί μηχανικοί κατασκεύασαν άποδοτικές, εύρηστες και σχετικά φθηνές συσκευές μέτρησης τών προκλητών δυναμικών. Έτσι σήμερα ένας χειριστής μπορεί νά πάρει τό Α.Π.Δ. χωρίς μετακίνηση του άσθενούς από τό κρεβάτι του. Η κλινική άξία του Α.Π.Δ. άνέρχεται γρήγορα. Πολλά τμήματα Ψυχιατρικής και Ψυχολογίας εφαρμόζουν τά προκλητά δυναμικά στη διερεύνηση άσθενειών και έπεξεργασίας έρεθισμάτων στον έγκέφαλο.

5.6. Σ ω μ α τ ι κ á π ρ ο κ λ η τ ó δ υ ν α μ ι κ ó (Σ.Π.Δ.).

Τό ΣΠΑ είναι δυναμικό στό δέρμα του τριχωτού της κεφαλής ή του αύχένος πού προκαλείται μέ διεύερση άλλων νεύρων (έκτός του όπτικού και άκουστικού) του σώματος.

Σειρά ήλεκτρικών παλμών μικρής διάρκειας μπορούν νά εφαρμοσθούν μέσω ήλεκτροδίων σ' ένα περιφερικό νεύρο του σώματος. Για παράδειγμα, ήλεκτρικοί παλμοί διάρκειας $-0,1ms$ διεγείρουν τό μέσο νεύρο του δεξιού καρπού. Η νευροηλεκτρική δραστηριότητα, πού προκαλείται από τό έρέθισμα αυτό στον έγκέφαλο, άνιχνεύεται μέ δύο ήλεκτρόδια-δίσκους στην άριστερή πλευρά του τριχωτού της κεφαλής.

Ο λανθάνων χρόνος για τή μετάδοση του σήματος και ή κυματομορφή του, δίνουν χρήσιμες νευροφυσιολογικές πληροφορίες.