

ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ.....	5
1. Εισαγωγή.....	5
2. Οι μύες.....	6
2.1. Οργάνωση και συστολή του μυός.....	7
2.2. Μέγιστη δύναμη και μήκος μυός.....	8
3. Η σπονδυλική στήλη.....	10
4. Στατική ισορροπία του σώματος.....	11
4.1. Μύες και μοχλοί.....	11
4.2. Δυνάμεις γύρω από τον αγκώνα.....	13
4.3. Δυνάμεις γύρω από τον ώμο.....	16
4.4. Δυνάμεις επαφής κατά τη στήριξη του σώματος.....	17
4.5. Δυνάμεις κατά την ισορροπία στο ένα πόδι.....	19
4.6. Στήριξη με μπαστούνι.....	21
4.7. Δυνάμεις στη σπονδυλική στήλη.....	23
5. Βάδιση.....	25
5.1. Τριβή κατά τη βάδιση.....	27
6. Συγκρούσεις του ανθρωπίνου σώματος.....	28
6.1. Σύγκρουση με το κεφάλι.....	29
6.2. Σύγκρουση με τα πόδια.....	29
6.3. Συνέπειες των συγκρούσεων.....	30
7. Βιβλιογραφία.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΙΕΣΗ ΚΑΙ ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ – ΚΑΡΔΙΑΓΓΕΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	33
1. Γενικά.....	33
2. Πίεση.....	33
2.1. Μέτρηση της πίεσης.....	33
2.2. Πιέσεις στο σώμα.....	35
2.2.1 Οφθαλμός.....	35
2.2.2 Οστά.....	36
2.2.3 Κατάδυση.....	36
2.2.3.1 Η νόσος των δυτών.....	38
2.2.4 Υπερβαρικός θάλαμος.....	38
3. Ροή Ρευστών.....	39
3.1 Νόμος των Ιδανικών Αερίων.....	39
3.2 Αρχή του Pascal.....	39
3.3 Αρχή του Αρχιμήδη.....	39
3.4 Νόμος Laplace.....	39
3.5 Ρευστά σε κίνηση.....	40
3.6 Νόμος της Συνέχειας.....	40
3.7 Νόμος του Bernoulli.....	41
3.8 Αντίσταση στη ροή.....	42
3.9 Εσωτερική τριβή και νόμος του Poiseuille.....	42
3.10 Ρευστά στο ανθρώπινο σώμα.....	44
3.10.1 Αίμα.....	44
3.10.2 Πνεύμονες.....	44

3.10.3	Πεπτική οδός.....	44
3.10.4	Ουροδόχος κύστη.....	45
3.10.5	Εγκέφαλος.....	46
4.	Το Καρδιαγγειακό Σύστημα.....	47
4.1	Το κυκλοφορικό σύστημα.....	47
4.2	Ιδιότητες του αίματος.....	48
4.2.1	Τα έμμορφα συστατικά του αίματος.....	49
4.2.2	Μέτρηση των ερυθρών αιμοσφαιρίων.....	49
4.2.3	Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής (γλοιότητα) του αίματος.....	50
4.2.4	Μέτρηση της πίεσης του αίματος.....	52
4.3	Δομή των αγγείων.....	54
4.4	Η πίεση του αίματος.....	55
4.5	Μέτρηση της ροής του αίματος στα αγγεία.....	56
4.6	Πίεση από φυγόκεντρο δύναμη.....	58
4.7	Τριχοειδή και οσμωτική πίεση.....	59
4.7.1	Ροή οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα.....	60
4.8	Ροή και ταχύτητα αίματος.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΚΟ ΣΩΜΑ (ΒΙΟΣΗΜΑΤΑ)..... 62

1.	Εισαγωγή.....	62
2.	Η κυτταρική μεμβράνη.....	63
3.	Δυναμικό ηρεμίας της κυτταρικής μεμβράνης.....	65
4.	Νευρικό σύστημα.....	69
5.	Νευρώνες.....	69
6.	Δυναμικό Δράσης.....	72
7.	Καρδιά.....	78
8.	Καρδιακός μυς.....	79
9.	Σύστημα διέγερσης της καρδιάς.....	80
10.	Παραγωγή και διάδοση των διεγέρσεων στον καρδιακό μυ.....	81
11.	Ηλεκτρικά σήματα στον καρδιακό μυ.....	83
12.	Ηλεκτρο-Καρδιο-Γράφημα (ΗΚΓ).....	85
13.	Ηλεκτροκαρδιογραφικές απαγωγές.....	87
14.	Ηλεκτρο-Μυο-Γράφημα (ΗΜΓ).....	94
15.	Λήψη και καταγραφή του ΗΜΓ.....	97
16.	ΗΜΓ λόγω ηλεκτρικής διέγερσης.....	98
17.	Ηλεκτρο-Εγκεφαλο-Γράφημα (ΗΕΓ).....	101
18.	Ηλεκτροφυσιολογία του ματιού.....	106
19.	Ηλεκτρο-Αμφιβληστροειδο-Γράφημα (ΗΑΓ).....	106
20.	Ηλεκτρο-Οφθαλμο-Γράφημα (ΗΟΓ).....	108
21.	Δυναμικά Ινιακού Λοβού (ΔΙΛ).....	109
22.	Μαγνητικά σήματα από την καρδιά και τον εγκέφαλο - Μαγνητοκαρδιογράφημα και Μαγνητοεγκεφαλογράφημα.....	111
23.	Βιβλιογραφία.....	114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΦΩΣ, ΟΦΘΑΛΜΟΙ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ..... 115

1.	Εισαγωγή.....	115
2.	Δομή του Οφθαλμού.....	115
3.	Εστίαση του φωτός.....	117

4.	Απορρόφηση του φωτός	118
5.	Πραγματικό και φανταστικό είδωλο	120
5.1.	Προσαρμογή του οφθαλμού	122
6.	Ανιχνευτική ικανότητα του οφθαλμού.....	123
7.	Διόφθαλμη, στερεοσκοπική όραση	123
8.	Προσαρμογή στη φωτεινότητα	124
9.	Όρια Οπτικής Οξύτητας	125
9.1.	Περίθλαση και διαστάσεις των φωτοϋποδοχέων.....	125
9.2.	Σφαιρική και χρωματική εκτροπή	127
10.	Η ελαττωματική όραση.....	128
11.	Διορθωτικοί φακοί	130
12.	Μόνιμη διόρθωση	131
13.	Είδη οπτικής δυσλειτουργίας.....	132
14.	Οπτική αντίληψη	133
15.	Βιβλιογραφία	134

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ

Κωνσταντίνος Λουκάς

Επίκουρος Καθηγητής

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική Σχολή, ΕΚΠΑ

1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε ορισμένες εφαρμογές της εμβιομηχανικής στο ανθρώπινο σώμα. Η εμβιομηχανική (biomechanics) αποτελεί ένα επιστημονικό πεδίο που ασχολείται με τη μελέτη της δομής και λειτουργίας των βιολογικών συστημάτων υπό το πρίσμα της Μηχανικής. Σύμφωνα με το «Oxford English Dictionary»: 'Η εμβιομηχανική είναι η μελέτη των νόμων της μηχανικής στα βιολογικά συστήματα, με έμφαση στο κινητικό σύστημα'. Η σχέση της με την κλασσική μηχανική είναι στενή, δεδομένου ότι χρησιμοποιεί έννοιες, μεθόδους και νόμους για την ανάλυση των βιολογικών συστημάτων.

Στο ανθρώπινο σώμα η εμβιομηχανική επικεντρώνεται στη στατική και την κίνηση τμημάτων, ή ολόκληρου, του σώματος με χρήση μοντέλων που υπακούν στους νόμους της μηχανικής. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, απλές εφαρμογές της Νευτώνειας μηχανικής μπορούν να βοηθήσουν στην κατανόηση μίας στατικής κατάστασης ή κίνησης που εκτελούμε. Συγκεκριμένα, ο κινητικός μηχανισμός του ανθρώπου περιλαμβάνει τους μύες (ενεργητικό μέρος-δυνάμεις), τις αρθρώσεις και τα οστά (παθητικό μέρος-μοχλοί). Μέσω αυτού του συστήματος οι κινητικές ενέργειες μπορούν να χωριστούν σε στατικές και δυναμικές. Η πρώτη κατηγορία αφορά κινήσεις που αποσκοπούν στη διατήρηση της θέσης των τμημάτων του σώματος μεταξύ τους, ή ολόκληρου του σώματος, σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο, ενώ η δεύτερη κατηγορία αφορούν κινήσεις για τη μεταβολή της θέσης. Ανεξάρτητα από την κατηγορία στην οποία ανήκει μια κίνηση, απαιτείται η ενεργή συμμετοχή του κινητικού μηχανισμού και κυρίως του μυϊκού συστήματος. Έτσι μεγάλο μέρος της εμβιομηχανικής επικεντρώνεται στην ενεργή δραστηριότητα του κινητικού μηχανισμού. Οι επιμέρους επιστημονικοί κλάδοι της εμβιομηχανικής περιλαμβάνουν την:

A) Στατική: αφορά συστήματα που βρίσκονται σε ισορροπία.

B) Κινητική: μελετά τα αίτια της κίνησης ενός συστήματος, τις δυνάμεις που ασκήθηκαν, κλπ. Προσπαθεί να απαντήσει στο ερώτημα: 'πως προκλήθηκε αυτή η κίνηση;'.

Γ) Κινηματική: μελετά το αποτέλεσμα των δυνάμεων, όπως για παράδειγμα την τροχιά μίας κίνησης, τη μεταβολή της ταχύτητας στο χώρο/χρόνο, το συσχετισμό της μετατόπισης με το αίτιο που προκάλεσε την κίνηση, κλπ. Προσπαθεί να απαντήσει στο ερώτημα: 'πως εξελίσσεται η κίνηση;'.

Σκοπός του κεφαλαίου είναι να μελετήσουμε ορισμένες από τις παραπάνω εφαρμογές στο ανθρώπινο σώμα, όπως για παράδειγμα: το ρόλο των μυών για την εκτέλεση μίας κίνησης, τη στατική ισορροπία του ανθρωπίνου σώματος, τις δυνάμεις που ασκούνται σε όρθια στάση, τις δυνάμεις-ροπές που ασκούνται όταν κρατάμε ένα αντικείμενο και τις δυνάμεις κατά τη σύγκρουση.

Το κεφάλαιο ακολουθεί την παρακάτω δομή. Πρώτα κάνουμε μία εισαγωγή στο μυϊκό σύστημα, στην οργάνωση και συστολή των μυών. Στη συνέχεια εξετάζουμε τη συνεισφορά του σκελετού στην ισορροπία του ανθρωπίνου σώματος και τις στατικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτές τις συνθήκες. Η

ενότητα αυτή αποτελεί το κύριο μέρος του κεφαλαίου όπου αναλύονται διάφορα παραδείγματα στατικής ισορροπίας. Στην επόμενη ενότητα εξετάζουμε τη βάρδια, μία εφαρμογή δυναμικής ισορροπίας. Τέλος, αναλύουμε ορισμένα παραδείγματα σύγκρουσης και τις συνέπειές τους στο ανθρώπινο σώμα.

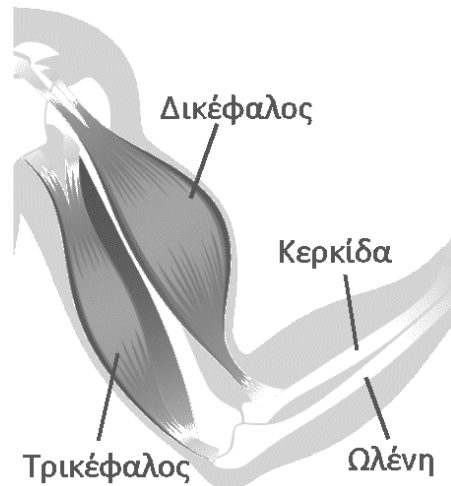
2. Οι μύες

Οι μύες είναι μαλακός ιστός και αποτελεί ένα από τα τέσσερα είδη ζωικών ιστών (μαζί με τον συνδετικό, τον επιθηλιακό και τον νευρικό ιστό). Οι μύες αποτελούν τις κινητήριες μονάδες του ανθρώπινου σώματος και κατατάσσονται σε τρεις τύπους, ανάλογα με την ιστολογική τους δομή:

A) Σκελετικοί μύες: ευθύνονται για την κίνηση του σκελετού, των ματιών, της γλώσσας και τις εκφράσεις του προσώπου. Ονομάζονται και εκούσιοι καθώς η κίνηση βρίσκεται υπό συνειδητό έλεγχο. Στο μικροσκόπιο οι ίνες των μυών αυτών παρουσιάζουν γραμμώσεις, για αυτό ονομάζονται και γραμμωτοί.

B) Λείοι μύες: δεν παρουσιάζουν γραμμώσεις και γενικά είναι ακούσιοι λόγω της ακούσιας κίνησης που εκτελούν (π.χ. οι κινήσεις των τοιχωμάτων του εντέρου ή του στομάχου). Εντοπίζονται κυρίως στο τοίχωμα των εσωτερικών οργάνων όπως στο γαστρεντερικό σωλήνα, στην ουροδόχο κύστη και στο τοίχωμα των αγγείων ελέγχοντας την αιματική ροή. Γ) Καρδιακός μυς (μυοκάρδιο): τα καρδιακά μυϊκά κύτταρα εντοπίζονται μόνο στα τοιχώματα της καρδιάς και αποτελούν το σύστημα συσταλτικότητάς της. Αποτελεί ένα ιδιαίτερο τύπο μυός που μοιάζει, ως προς τη δομή του, με το σκελετικό μυ (λόγω των γραμμώσεων), ενώ ως προς τη λειτουργία του με τους λείους μύες (λόγω της ακούσιας λειτουργίας της καρδιάς). Στο κεφάλαιο αυτό θα εστιάσουμε στη μηχανική των κινήσεων που προκαλούνται από τη λειτουργία του σκελετικού μυός, αφού πρώτα δώσουμε ορισμένα βασικά στοιχεία για την οργάνωση και τη δομή του.

Στο ανθρώπινο σώμα υπάρχουν πάνω από 650 σκελετικοί μύες με συνολική μάζα περίπου το 40% της μάζας ενός μέσου σώματος. Στα άκρα τους οι μύες στενεύουν δημιουργώντας κεφαλές, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τους τρικέφαλους ή τους δικέφαλους (Εικόνα 1). Κάθε σκελετικός μυς έχει δύο ή περισσότερες προσφύσεις. Η πρόσφυση που κινείται λιγότερο λέγεται έκφυση ενώ η πρόσφυση που κινείται περισσότερο λέγεται κατάφυση. Στα άκρα, οι κεφαλές του μυός προσφύονται σε οστά, χόνδρους ή συνδέσμους, με δέσμες ινώδους ιστού που λέγονται τένοντες. Οι τένοντες είναι παρόμοιοι με τους συνδέσμους, με τη διαφορά ότι οι σύνδεσμοι ενώνουν οστό με οστό. Μύες με δύο τένοντες στο ένα άκρο τους ονομάζονται δικέφαλοι, με τρεις τρικέφαλοι, και με τέσσερις τετρακέφαλοι (ο μυς στο πρόσθιο διαμέρισμα του μηρού).

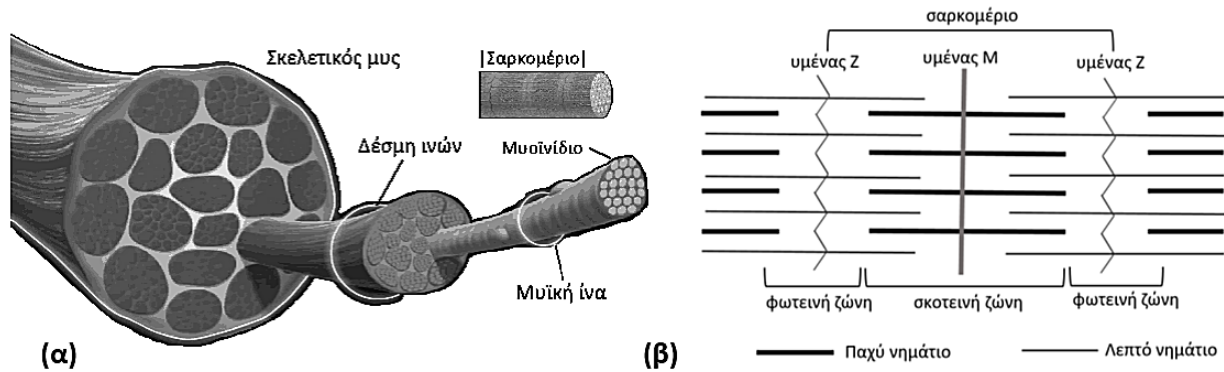


Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση του μυϊκού συστήματος του βραχίονα και των δύο οστών του αντιβραχίου (πήχης). Το οστό του βραχίονα (βραχιόνιο) βρίσκεται μεταξύ δικέφαλου και τρικέφαλου.

Στην Εικόνα 1 παρατηρούμε ότι στο βραχιόνιο υπάρχει ένα ζεύγος μυϊκών ομάδων (δικέφαλος και τρικέφαλος). Το ζεύγος αυτό συνεισφέρει στην κίνηση του αντιβραχίου γύρω από τον αγκώνα. Συγκεκριμένα, όταν λυγίζουμε το αντιβράχιο (προς το βραχιόνιο), ο δικέφαλος είναι ο μυς που ασκεί τη δύναμη. Αντίθετα, όταν εκτείνουμε το αντιβράχιο η δύναμη ασκείται από τον τρικέφαλο. Από αυτό το παράδειγμα βλέπουμε ότι δύο διαφορετικοί μύες ασκούν δυνάμεις με διαφορετική κατεύθυνση, ανάλογα με την κίνηση που εκτελούμε. Οι μυϊκές ομάδες εμφανίζονται κατά ζεύγη δεδομένου ότι οι μύες έχουν την ικανότητα μόνο να συστέλλονται. Έτσι οι δύο ομάδες εκτελούν κινήσεις με διαφορετική κατεύθυνση γύρω από την άρθρωση. Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι η παραπάνω περιγραφή είναι μια απλούστευση, μιας και υπάρχουν και άλλοι μύες στην περιοχή οι οποίοι συνεισφέρουν στη σταθεροποίηση του αγκώνα και της άρθρωσης του ώμου. Ωστόσο, ο δικέφαλος και ο τρικέφαλος έχουν κύριο ρόλο στην κάμψη/έκταση του αντιβραχίου.

2.1. Οργάνωση και συστολή του μυός

Σε μικροσκοπικό επίπεδο, ο μυς αποτελείται από μυϊκές ίνες οι οποίες κατανέμονται χωρικά σε δέσμες διαφορετικών διαστάσεων που ονομάζονται μυϊκές δέσμες (Εικόνα 2). Ο χώρος μεταξύ των μυϊκών ινών καλύπτεται από συνδετικό ιστό. Κάθε μυϊκή δέσμη καλύπτεται εξωτερικά από ένα συνδετικό ιστό ενώ ολόκληρος ο μυς καλύπτεται από ένα πιο ανθεκτικό επίστρωμα συνδετικού ιστού.



Εικόνα 2: (α) Δομή του σκελετικού μυός. Οι μυϊκές ίνες οργανώνονται παράλληλα μεταξύ τους και προς τον επιμήκη άξονα του μυός. Οι μυϊκές δέσμες αποτελούνται από ομάδες γειτονικών παράλληλων ινών. (β) Οργάνωση των νημάτων της μυοσίνης και της ακτίνης στο μυϊκό ινίδιο. (Βασισμένη στο [1]).

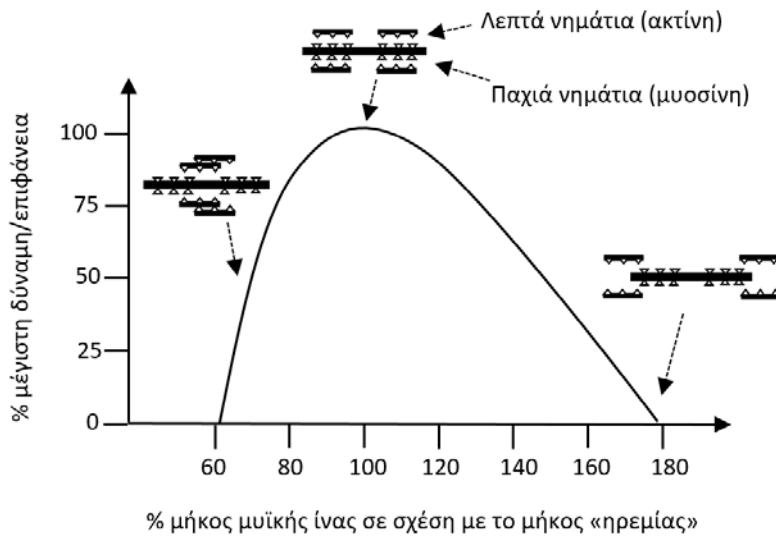
Η μυϊκή ίνα διαιρείται σε πολλά ινίδια διαμέτρου περίπου 1μm. Κάθε ινίδιο αποτελείται από συσταλτικές μονάδες που ονομάζονται σαρκομέρια και οι οποίες συνδέονται σειριακά. Σε κάθε σαρκομέριο υπάρχουν δύο είδη νημάτων: Α) λεπτά νημάτια (διαμέτρου 5nm και μήκους 1500 nm), που αποτελούνται από την πρωτεΐνη ακτίνη, και Β) παχιά νημάτια (διαμέτρου 12nm και μήκους 2000 nm), που αποτελούνται από την πρωτεΐνη μυοσίνη. Τα νημάτια της μυοσίνης σταθεροποιούνται στο κέντρο του σαρκομερίου που ονομάζεται «υμένας Μ», ενώ τα νημάτια της ακτίνης σταθεροποιούνται στις άκρες που ονομάζονται «υμένας Ζ». Οι πρωτεΐνες αυτές ονομάζονται και κινητήριες, επειδή παίζουν βασικό ρόλο στη συσταλτική κίνηση του μυ. Η μυϊκή συστολή γίνεται με το «μηχανισμό ολίσθησης» των νημάτων της ακτίνης κατά μήκος των νημάτων της μυοσίνης. Αν και ο μηχανισμός δεν είναι τελείως κατανοητός, πιστεύεται ότι ασκούνται ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των νημάτων. Έτσι τα παράλληλα νημάτια ακτίνης, που προβάλλουν από τις δύο πλευρές του κάθε υμένας Ζ, ολισθαίνουν ανάμεσα στα νημάτια της μυοσίνης αναγκάζοντας τους γειτονικούς υμένας Ζ να πλησιάσουν μεταξύ τους με κατεύθυνση προς το κέντρο του σαρκομερίου (υμένας Μ). Μολονότι ο μηχανισμός περιγράφεται σαν ολίσθηση, στην ουσία το νημάτιο της μυοσίνης έλκει (κατά μήκος) αυτό της ακτίνης προς το κέντρο του σαρκομερίου. Έτσι το σαρκομέριο συστέλλεται χωρίς να μεταβάλλεται το μήκος των νημάτων. Μέσω του μηχανισμού αυτού συστέλλεται το σαρκομέριο και συνεπώς το ινίδιο, η ίνα και εν τέλει ο μυς. Σαν τελικό αποτέλεσμα, έχουμε την ανάπτυξη μίας μηχανικής δύναμης μεταξύ των οστών με τα οποία συνδέεται ο μυς στα άκρα του.

2.2. Μέγιστη δύναμη και μήκος μύος

Οι μύες συστέλλονται/χαλαρώνουν όταν λάβουν κατάλληλα ηλεκτρικά σήματα στα σημεία επαφής τους με τους νευρώνες (νευρομυϊκές συνάψεις· περισσότερα για τον τρόπο διάδοσης των ηλεκτρικών σημάτων δίνονται στο κεφάλαιο των βιοσημάτων). Ωστόσο, δεν έχουν όλοι οι μύες την ικανότητα να παράγουν την ίδια δύναμη, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των ινών που συστέλλονται. Υπό φυσιολογικές συνθήκες, μία μεμονωμένη ίνα όταν λάβει ένα ηλεκτρικό ερέθισμα έχει την ικανότητα να συστέλλεται στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Όταν απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη διεγείρεται μεγαλύτερος αριθμός ινών προκειμένου να συσταλεί ο μυς. Η μέγιστη τάση (δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας) που μπορεί να ασκήσει ένας

μυς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μήκος του, το ρυθμό με τον οποίο συστέλλεται και την ενεργό διατομή του (στο επίπεδο κάθετα στις μυϊκές ίνες). Για αρκετούς μύες η τάση αυτή εκτιμάται ότι είναι περίπου 30-70N/cm².

Ένας μυς μπορεί να συσταλεί και να διασταλεί σε ένα ελάχιστο και ένα μέγιστο μήκος, αντιστοίχως. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3, στα δύο άκρα η δύναμη που παράγεται είναι ελάχιστη. Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να καταβάλει ο μυς επιτυγχάνεται για ένα βέλτιστο μήκος L_0 , το οποίο είναι σχεδόν το μήκος του σε κατάσταση ηρεμίας (πριν την ενεργοποίησή του). Η μέγιστη αυτή δύναμη μειώνεται κατά 50% όταν ο μυς έχει περίπου 30% μεγαλύτερο/μικρότερο μήκος από το L_0 . Όταν ο μυς τεντωθεί σε μήκος διπλάσιο του L_0 , είναι πολύ πιθανό να επέλθει σοβαρός τραυματισμός.

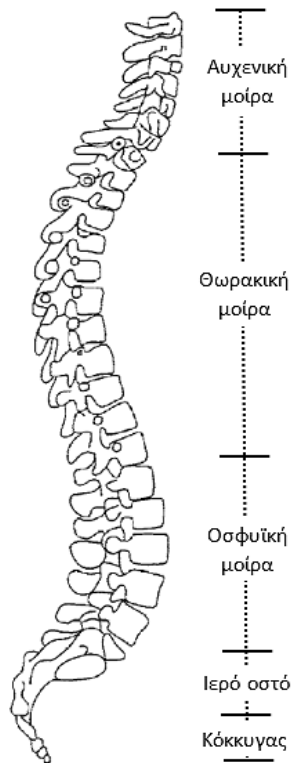


Εικόνα 3: Διάγραμμα μεταβολής της μέγιστης τάσης που μπορεί να ασκήσει ο μυς σε σχέση με το μήκος του. Στο ίδιο διάγραμμα αποτυπώνεται η επικάλυψη μεταξύ παχίων και αραιών νημάτων για διάφορα μήκη του μυός. (Βασισμένη στο [1]).

Το παραπάνω φαινόμενο μπορεί να αιτιολογηθεί από το ποσοστό επικάλυψης των μορίων ακτίνης και μυοσίνης των παχίων και λεπτών νημάτων. Συγκεκριμένα, στο μήκος ηρεμίας του μυ τα ζεύγη ακτίνης-μυοσίνης επικαλύπτονται στο μέγιστο βαθμό. Όταν το σαρκομέριο συρρικνώνεται ή χαλαρώνει (άρα και ο μυς), τότε υπάρχει μικρότερη αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των νημάτων λόγω των λιγότερων επαφών ακτίνης-μυοσίνης. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων ακτίνης-μυοσίνης είναι γνωστές με την ονομασία «διασταυρούμενες γέφυρες» μεταξύ πυκνών και αραιών νημάτων, και το πλήθος τους παίζει καθοριστικό ρόλο για τη δύναμη που μπορεί να ασκήσει ο μυς.

3. Η σπονδυλική στήλη

Η σπονδυλική στήλη μαζί με το στέρνο και τα πλευρά σχηματίζουν τον σκελετό του κορμού του σώματος. Η σπονδυλική στήλη συνδέει τα πάνω με τα κάτω άκρα του ανθρώπινου σκελετού, στηρίζει το κεφάλι και επιτρέπει την κίνηση στα τρία επίπεδα: εγκάρσιο, μετωπιαίο, οβελιαίο. Επίσης προστατεύει το νωτιαίο μυελό, τη λεπτή σωληνοειδή δέσμη νευρώνων που κατευθύνεται από τον εγκέφαλο μέσα στη σπονδυλική στήλη. Η σπονδυλική στήλη αντιστοιχεί περίπου στο 40% του συνολικού ύψους του σώματος και αποτελείται από 33 σπονδύλους οι οποίοι ταξινομούνται σε 5 τμήματα ανάλογα με τη θέση τους(Εικόνα 4). Με κατεύθυνση από πάνω προς το κάτω, οι σπόνδυλοι χωρίζονται σε 5 τμήματα: Α) αυχενική μοίρα (7), Β) θωρακική μοίρα (12), Γ) οσφυϊκή μοίρα (5), Δ) ιερό οστό (5συνοστεωμένοι) και Ε) κόκκυγας (4-μικροί συνοστεωμένοι). Η αυχενική, η θωρακική και η οσφυϊκή μοίρα μπορούν να κινηθούν ενώ τα άλλα 2 τμήματα είναι ακίνητα.



Εικόνα 4. Τα 5 τμήματα της σπονδυλικής στήλης. Παρατηρείστε ότι από τη θωρακική μοίρα και κάτω η σπονδυλική στήλης έχει σχήμα 'S'.(Από[1]).

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η σπονδυλική στήλη δεν είναι ευθύγραμμη αλλά κάθε τμήμα της είναι κυρτό. Εάν την δούμε από δεξιά το κάτω μέρος της έχει σχήμα 'S'. Στη γέννηση είναι σχηματισμένες μόνο η θωρακική και η ιερή μοίρα (πρωτεύουσες μοίρες). Τρεις μήνες μετά αναπτύσσεται η αυχενική μοίρα προκειμένου το μωρό να στηρίζει το κεφάλι του. Όταν το μωρό μπορεί να στηρίζεται στα πόδια του και να περπατά τότε αναπτύσσεται και η οσφυϊκή μοίρα.

Το πάχος και η διατομή των σπονδύλων αυξάνει διαδοχικά καθώς κατευθυνόμαστε από την αυχενική προς την οσφυϊκή μοίρα. Αυτό συμβαίνει προκειμένου η σπονδυλική στήλη να παρέχει την απαιτούμενη στήριξη για την επιπλέον μάζα του σώματος που βρίσκεται πάνω από κάθε σπόνδυλο. Σαν γενικός κανόνας, η επιφάνεια της διατομής των οστών του ανθρώπινου σκελετού αυξάνει καθώς κατευθυνόμαστε προς τα πόδια, αν και υπάρχουν εξαιρέσεις (π.χ., το μηριαίο οστό είναι μεγαλύτερο από τα οστά στήριξης του ποδιού-κνήμη και περόνη).

Μεταξύ των σπονδύλων βρίσκονται οι μεσοσπονδύλιοι δίσκοι, οι οποίοι περιφερειακά αποτελούνται από ινώδη δακτύλιο και στο κέντρο τον πηκτοειδή πυρήνα. Ο ρόλος των δίσκων είναι σημαντικός για το σχηματισμό της άρθρωσης, την κίνηση της σπονδυλικής στήλης και την απορρόφηση των κραδασμών. Στους δίσκους ασκείται σχεδόν η ίδια πίεση ενώ ρήξη επέρχεται όταν αυτή είναι περίπου 1.000N/cm^2 . Σε συνθήκες συμπίεσης οι δίσκοι πιέζονται με αποτέλεσμα το σχήμα τους να πλαταίνει και να εμφανίζονται προεξοχές στο μεσοσπονδύλιο χώρο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κήλη μεσοσπονδύλιου δίσκου (ή δισκοκήλη), πάθηση κατά την οποία έχουμε οπίσθια προβολή ή μετατόπιση του πηκτοειδή πυρήνα διαμέσου του ινώδη δακτυλίου. Σαν αποτέλεσμα, η κήλη μπορεί να ερεθίσει/πιέσει τα γειτονικά νεύρα επιφέροντας πόνο, ο οποίος μπορεί να εντοπίζεται όχι μόνο στο σημείο της κήλης αλλά να επεκτείνεται και στα πόδια.

Το μήκος της σπονδυλικής στήλης σε ένα μέσο ενήλικα άνδρα είναι περίπου 71 cm και σε μία γυναίκα 61 cm. Κατά τη διάρκεια του ύπνου το μήκος αυξάνεται περίπου κατά 1,5 cm ενώ επανέρχεται όταν σηκωνόμαστε. Το μήκος της σπονδυλικής στήλης μειώνεται επίσης σε ηλικιωμένα άτομα ως αποτέλεσμα της συμπίεσης των μεσοσπονδύλιων δίσκων και της οστεοπόρωσης (κυρίως σε γυναίκες). Κατά την οστεοπόρωση μειώνεται η πυκνότητα των οστών με την πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα αυτά να εξασθενούν και να συμπιέζονται περισσότερο.

4. Στατική ισορροπία του σώματος

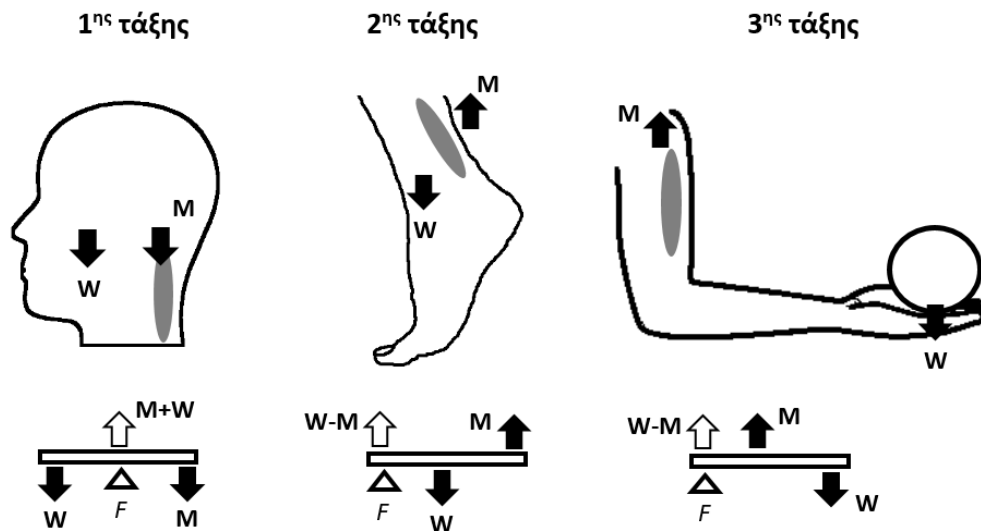
4.1. Μύες και μοχλοί

Η μελέτη των μυϊκών δυνάμεων γύρω από τις αρθρώσεις γίνεται πιο κατανοητή με τη βοήθεια των μοχλών. Το μυοσκελετικό σύστημα μπορούμε να το περιγράψουμε σαν ένα σύστημα μοχλών, η δράση των οποίων μπορεί να παράγει κίνηση στο σώμα και μεταφορά ενέργειας σε άλλα σώματα. Υπό το πρίσμα της μηχανικής, ο μοχλός αποτελείται από ένα άκαμπτο αντικείμενο (συνήθως ευθύγραμμο) το οποίο μπορεί να περιστραφεί γύρω από ένα σταθερό σημείο (υπομόχλιο) με την εφαρμογή δύναμης. Με το μοχλό μπορούμε να ασκήσουμε δύναμη σε ένα σώμα εφαρμόζοντας δύναμη σε διαφορετικό σημείο του μοχλού («μεταφορά δύναμης»). Επίσης, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τη μηχανική δύναμη που ασκούμε με κατάλληλη επιλογή της απόστασης μεταξύ του σημείου εφαρμογής της δύναμης και του υπομοχλίου. Για παράδειγμα η ανύψωση ενός φορτίου πάνω σε ράβδο επιτυγχάνεται με εφαρμογή μικρής δύναμης σε μεγάλη απόσταση από το υπομόχλιο. Η κάθετη απόσταση μεταξύ της διεύθυνσης της δύναμης και του υπομοχλίου ονομάζεται μοχλοβραχίονας.

Προκειμένου να εφαρμόσουμε τη φυσική των μοχλών στο ανθρώπινο σώμα θεωρούμε ότι στις αρθρώσεις δεν υπάρχουν τριβές και ότι οι μύες συνδέονται με τα οστά σε σταθερά σημεία. Οι απλουστεύσεις αυτές γίνονται προκειμένου να είναι πιο εύκολη η περιγραφή της κίνησης στις

αρθρώσεις με τους νόμους της Φυσικής, χωρίς ωστόσο το μηχανικό μοντέλο να απέχει από την πραγματικότητα.

Οι μοχλοί κατατάσσονται σε τρεις τύπους ανάλογα με τη διάταξη του υπομοχλίου, της δύναμης που ασκούμε και του φορτίου που θέλουμε να ισορροπήσουμε/ανυψώσουμε. Το φορτίο μπορεί να είναι το βάρος του σώματος (τμήμα ή ολόκληρο), ή/και κάποιο εξωτερικό φορτίο (π.χ. ένα αντικείμενο που κρατάμε). Στην Εικόνα 5 απεικονίζονται παραδείγματα μοχλών στο ανθρώπινο σώμα καθώς και το αντίστοιχο μηχανικό μοντέλο για κάθε τύπο. Αυτό που αλλάζει μεταξύ των τριών τύπων μοχλών είναι η κατεύθυνση των δυνάμεων και η σχετική θέση του σημείου εφαρμογής τους σε σχέση με το υπομόχλιο.



Εικόνα 5. Παραδείγματα μοχλών στο ανθρώπινο σώμα και το αντίστοιχο μηχανικό μοντέλο τους βασισμένο σε άκαμπτη ράβδο. Τα M , W , F αντιστοιχούν στη μυϊκή δύναμη, το βάρος και το υπομόχλιο αντίστοιχα. Ο μυς που ασκεί την απαιτούμενη δύναμη απεικονίζεται σαν ελλειψοειδές. (Βασισμένη στο [1],[2]).

Στους μοχλούς 1^{ης} τάξης το φορτίο και η μυϊκή δύναμη έχουν την ίδια κατεύθυνση και το υπομόχλιο βρίσκεται μεταξύ των σημείων εφαρμογής τους. Στους μοχλούς 2^{ης} τάξης το σημείο εφαρμογής του φορτίου βρίσκεται μεταξύ του υπομοχλίου και του σημείου εφαρμογής της δύναμης. Στους μοχλούς 3^{ης} τάξης η μυϊκή δύναμη βρίσκεται μεταξύ υπομοχλίου και φορτίου. Οι περισσότεροι μοχλοί στο ανθρώπινο σώμα είναι 3^{ης} τάξης ενώ 1^{ης} τάξης είναι ελάχιστοι.

Στην Εικόνα 5, αν οι δυνάμεις M , W εφαρμόζονται σε αποστάσεις d_M και d_W από το υπομόχλιο αντίστοιχα, για να ισορροπεί το σύστημα θα πρέπει η συνισταμένη των δυνάμεων και των ροπών να είναι μηδέν ($\sum F = 0, \sum \tau = 0$). Η πρώτη συνθήκη είναι προφανής, όπως φαίνεται και στο σχήμα, ενώ για τις ροπές ισχύει:

$$Md_M = Wd_W \quad (1)$$

Οπότε η απαιτούμενη δύναμη είναι:

$$M = W \frac{d_W}{d_M} \quad (2)$$

Παρατηρούμε ότι αν $d_W < d_M$ η δύναμη που απαιτείται είναι μικρότερη από αυτή του φορτίου. Το μηχανικό πλεονέκτημα (ΜΠ) του μοχλού ορίζεται ως Φορτίο/Δύναμη:

$$ΜΠ = \frac{W}{F} = \frac{d_M}{d_W} \quad (3)$$

Το ΜΠ ουσιαστικά δείχνει πόσες φορές πολλαπλασιάζεται η δύναμη που ασκούμε. Όσο πιο μεγάλο είναι το μηχανικό πλεονέκτημα τόσο πιο εύκολα μετακινείται ένα φορτίο. Οι τρεις τύποι μοχλών οδηγούν σε διαφορετικό ΜΠ. Στους μοχλούς 1^{ης} τάξης μπορούμε να επιτύχουμε μεγάλο ΜΠ εάν το φορτίο τοποθετηθεί σε μικρότερη απόσταση (από το υπομόχλιο) σε σχέση με το μοχλοβραχίονα της δύναμης ($d_W < d_M$). Στο μοχλό 2^{ης} τάξης η απόσταση του φορτίου είναι πάντα μικρότερη από αυτή της δύναμης, οπότε $ΜΠ > 1$. Στο μοχλό 3^{ης} τάξης συμβαίνει το αντίθετο, οπότε $ΜΠ < 1$.

Παραπάνω εξετάσαμε την κατάσταση όπου το σύστημά μας βρίσκεται σε ισορροπία. Εάν ασκήσουμε λίγο μεγαλύτερη δύναμη, τότε το σύστημα θα αρχίσει να περιστρέφεται γύρω από το υπομόχλιο. Έστω ότι κατά την περιστροφή τα σημεία που ασκείται το φορτίο και η δύναμη μετατοπίζονται κάθετα σε σχέση με την αρχική διεύθυνση της ράβδου κατά ℓ_W και ℓ_M αντίστοιχα. Τότε αποδεικνύεται ότι:

$$\frac{v_W}{v_M} = \frac{\ell_W}{\ell_M} = \frac{d_W}{d_M} \quad (4)$$

Όπου v_W , v_M είναι η γραμμική ταχύτητα του σημείου εφαρμογής των W , M αντίστοιχα. Η παραπάνω σχέση ισχύει και για τους τρεις τύπους μοχλών. Παρατηρούμε ότι ο λόγος των ταχυτήτων και των μετατοπίσεων ισούται με $\frac{1}{ΜΠ}$. Επίσης, η ταχύτητα και η μετατόπιση του φορτίου είναι αντιστρόφως ανάλογη του ΜΠ. Αυτές οι παρατηρήσεις έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην περίπτωση των μοχλών 3^{ης} τάξης, οι οποίοι είναι πιο συχνοί στο ανθρώπινο σώμα και ισχύει $ΜΠ < 1$. Μία μικρή συστολή του μυός επιφέρει μεγάλη μετατόπιση του χεριού μας. Φαίνεται ότι αυτό που μας «στερεί» η φύση από πλευράς μηχανικού πλεονεκτήματος, το «ανταποδίδει» σε ταχύτητα κινήσεων.

4.2. Δυνάμεις γύρω από τον αγκώνα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο δικέφαλος και ο τρικέφαλος έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην κίνηση του αντιβραχίου γύρω από τον αγκώνα (άρθρωση). Στη συνέχεια θα μελετήσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στο αντιβράχιο όταν στηρίζουμε ένα αντικείμενο με την παλάμη μας.

- Αρχικά θεωρούμε ότι η γωνία μεταξύ βραχίονα και αντιβραχίου είναι 90° και το βάρος του αντιβραχίου είναι αμελητέο σε σχέση με τις άλλες δυνάμεις (Εικόνα 5). Εάν M είναι η μυϊκή δύναμη από το δικέφαλο, R η δύναμη αντίδρασης από το βραχιόνιο στην ωλένη, και W το βάρος της σφαίρας, τότε:

$$R = W - M \quad (5)$$

Επίσης, η μυϊκή δύναμη αντισταθμίζει τη δυνητική περιστροφή γύρω από τον αγκώνα λόγω του βάρους της σφαίρας, ενώ η ροπή της R είναι μηδενική (τέμνει τον άξονα περιστροφής). Στην περίπτωση αυτή η M μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση (2). Για άνθρωπο ύψους 1.75cm, το αντιβράχιο έχει μήκος ≈ 25 cm, ενώ το μήκος της παλάμης ≈ 18 cm. Εάν θεωρήσουμε ότι το φορτίο ασκείται στο μέσο της

παλάμης, τότε $d_W = 34 \text{ cm}$. Για $d_M = 4 \text{ cm}$ και $W = 100 \text{ N}$, η μυϊκή δύναμη που απαιτείται για τη στήριξη του αντικειμένου είναι: $M = 850 \text{ N}$, όσο δηλαδή το βάρος ενός μέσου ενήλικα άντρα!

- Στο προηγούμενο παράδειγμα θεωρήσαμε ότι το βάρος του αντιβραχίου είναι αμελητέο. Εάν συνυπολογίσουμε αυτό το βάρος ($W_f = 15 \text{ N}$), τότε στο δεξί μέρος της εξίσωσης (1) πρέπει να προστεθεί και η ροπή λόγω του W_f . Το βάρος αυτό κατανέμεται κατά μήκος του αντιβραχίου και οφείλεται στους μαλακούς ιστούς και τα οστά από τα οποία αποτελείται. Εάν θεωρήσουμε ότι το κέντρο μάζας του πήχη (αντιβράχιο) βρίσκεται περίπου στο κέντρο του ($d_f = 13 \text{ cm}$), τότε με τη βοήθεια της εξίσωσης (1) θα έχουμε:

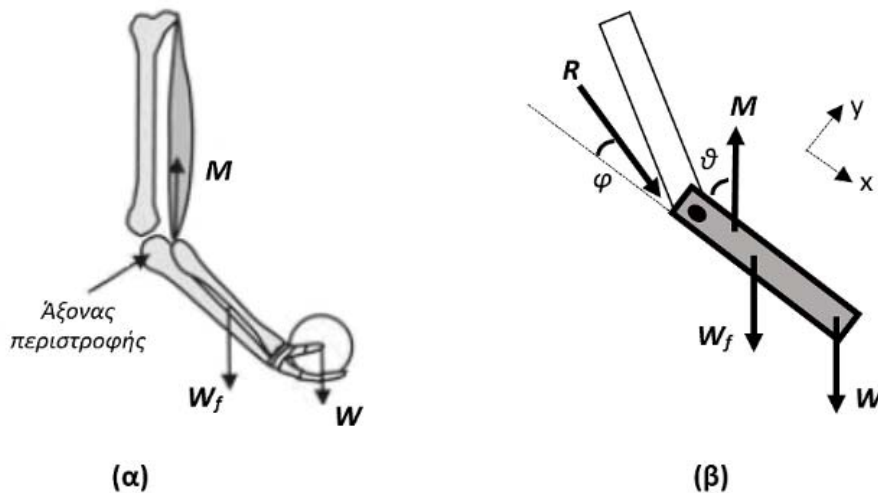
$$M d_M = W d_W + W_f d_f \Rightarrow$$

$$M = W \frac{d_W}{d_M} + W_f \frac{d_f}{d_M} \quad (6)$$

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (1),(6) παρατηρούμε ότι απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη, η οποία για τις παραπάνω τιμές είναι: $M \approx 900 \text{ N}$.

- Στη συνέχεια θα εξετάσουμε μία πιο γενική περίπτωση όπου η γωνία μεταξύ βραχίονα αντιβραχίου είναι $> 90^\circ$, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6. Η ανάλυσή μας θα επικεντρωθεί αρχικά στον υπολογισμό της απαιτούμενης δύναμης M από τον δικέφαλο και στη συνέχεια της αντίδρασης R .

Τα δεδομένα μας είναι οι αποστάσεις: $d_W = 34 \text{ cm}$, $d_M = 4 \text{ cm}$, $d_f = 13 \text{ cm}$ και τα βάρη: $W_f = 15 \text{ N}$, $W = 100 \text{ N}$. Παρατηρήστε ότι σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις οι δυνάμεις M , R δεν είναι πλέον κάθετες στον πήχη. Η M παραμένει αντίρροπη των W , W_f αλλά τώρα σχηματίζει γωνία ϑ σε σχέση με το αντιβράχιο. Η αντίστοιχη γωνία για την R είναι φ .



Εικόνα 6. (α) Το αντιβράχιο καθώς λυγίζουμε το χέρι μας και οι δυνάμεις που ασκούνται (Από[1]). (β) Το αντίστοιχο μηχανικό μοντέλο.

Το σύστημά μας είναι σε στατική ισορροπία, $\sum \tau = 0$:

$$d_M M_y = d_f W_{f,y} + d_W W_y \Rightarrow$$

$$d_M M \sin \theta = d_f W_f \sin \theta + d_W W \sin \theta \Rightarrow$$

$$M = \frac{d_f}{d_M} W_f + \frac{d_W}{d_M} W \quad (7)$$

Παρατηρήστε ότι ο όρος 'sinθ' απαλείφεται, οπότε καταλήγουμε στο ίδιο αποτέλεσμα σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου η γωνία μεταξύ βραχίονα-αντιβραχίου ήταν 90°. Συνεπώς, η δύναμη που απαιτείται για να κρατήσουμε το φορτίο είναι η ίδια.

Ωστόσο, υπάρχει μία σημαντική λεπτομέρεια μεταξύ των δύο περιπτώσεων. Ο δικέφαλος δεν έχει την ικανότητα να ασκήσει την ίδια δύναμη όταν λυγίζουμε/ εκτείνουμε το αντιβράχιο και αυτό οφείλεται στο ότι μεταβάλλεται το μήκος του. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3, η μυϊκή δύναμη που μπορεί να καταβάλει ο μυς εξαρτάται από το μήκος του. Συγκεκριμένα υπάρχει ένα ελάχιστο/μέγιστο μήκος το οποίο μπορεί να αποκτήσει ο μυς, ανάλογα με την κίνηση που κάνουμε. Στα δύο αυτά άκρα η δύναμη που μπορεί να ασκηθεί είναι η ελάχιστη, ενώ σε ένα ενδιάμεσο μήκος είναι η μέγιστη. Σε σχέση με το προηγούμενο παράδειγμα μπορούμε να πούμε ότι το μήκος του μυός εξαρτάται από τη γωνία θ. Ο μυς αποκτά το μέγιστο/ελάχιστο μήκος του για γωνίες μεγαλύτερες/μικρότερες μίας γωνίας θ_i, αντίστοιχα. Συνεπώς στα δύο αυτά άκρα η δύναμη που μπορεί να ασκηθεί είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή για κάποια ενδιάμεση γωνία θ_i. Εάν η δύναμη που απαιτείται είναι μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να ασκήσει ο μυς, προφανώς δεν υπάρχουν συνθήκες ισορροπίας και μπορεί να επέλθει τραυματισμός, όπως αναφέραμε και προηγουμένως.

Για τον υπολογισμό της R, θα εφαρμόσουμε τις εξισώσεις ισορροπίας για τις δυνάμεις. Στον άξονα x:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \Rightarrow \\ M_x &= R_x + W_{f,x} + W_x \Rightarrow \\ R \cos \varphi &= M \cos \theta - W_f \cos \theta - W \cos \theta \end{aligned} \quad (8)$$

Στον άξονα y:

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 \Rightarrow \\ M_y &= R_y + W_{f,y} + W_y \Rightarrow \\ R \sin \varphi &= M \sin \theta - W_f \sin \theta - W \sin \theta \end{aligned} \quad (9)$$

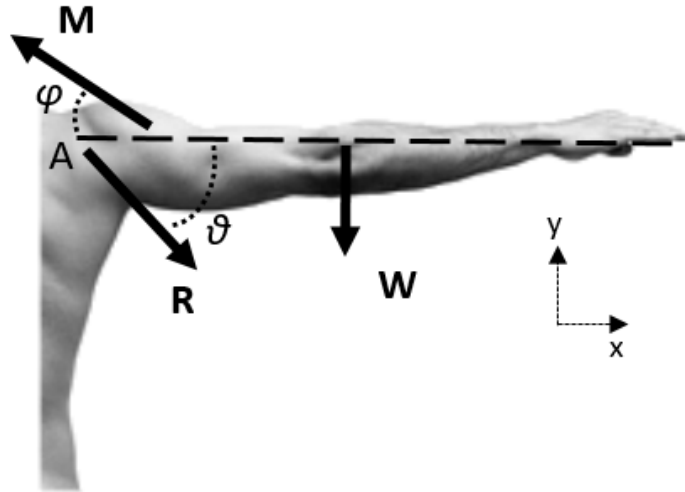
Διαιρώντας τις εξισώσεις (9),(8)κατά μέλη βρίσκουμε:

$$\tan \varphi = \tan \theta$$

Με αντικατάσταση τιμών σε μία από τις δύο εξισώσεις βρίσκουμε: $R = 785 \text{ N}$. Συνεπώς οι δυνάμεις R, M είναι παράλληλες με αντίθετη κατεύθυνση.

4.3. Δυνάμεις γύρω από τον ώμο

Η Εικόνα 7 απεικονίζει τις δυνάμεις που ασκούνται στο χέρι μας όταν είναι τεντωμένο σε οριζόντια θέση στο ύψος του ώμου. Ο βραχίονας και το αντιβράχιο έχουν συνολικό βάρος $W = 70\text{ N}$, το οποίο ασκείται σε απόσταση d_a από την άρθρωση του ώμου (σημείο A). Στην περιοχή του ώμου ασκούνται δύο δυνάμεις: η δύναμη από το δελτοειδή μυ, M , και η αντίδραση στην άρθρωση R . Η M ασκείται υπό γωνία φ σε σχέση με τη διεύθυνση του χεριού, ενώ η απόσταση του σημείου εφαρμογής της από την άρθρωση είναι d_m . Η R ασκείται υπό γωνία θ . Θέλουμε να υπολογίσουμε τις R , M . Δίνονται: $d_m = 20\text{ cm}$, $d_a = 35\text{ cm}$, $\varphi = 15^\circ$ και $\theta = 6.5^\circ$.



Εικόνα 7. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο χέρι μας όταν το εκτείνουμε σε οριζόντια θέση.

Για τις ροπές θα έχουμε:

$$\begin{aligned}\sum \tau_A &= 0 \Rightarrow \\ d_m M \sin \varphi &= d_a W \Rightarrow \\ M &= \frac{d_a W}{d_m \sin \varphi}\end{aligned}\quad (10)$$

Για τις δυνάμεις στον άξονα x:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \Rightarrow \\ M \cos \varphi &= R \cos \theta \Rightarrow \\ R &= M \frac{\cos \varphi}{\cos \theta}\end{aligned}\quad (11)$$

Με αντικατάσταση τιμών: $M = 473\text{ N}$ και $R = 460\text{ N}$.

Στην περίπτωση που κρατάμε με την παλάμη μας ένα αντικείμενο βάρους W_o , η εξίσωση της μυϊκής δύναμης θα είναι:

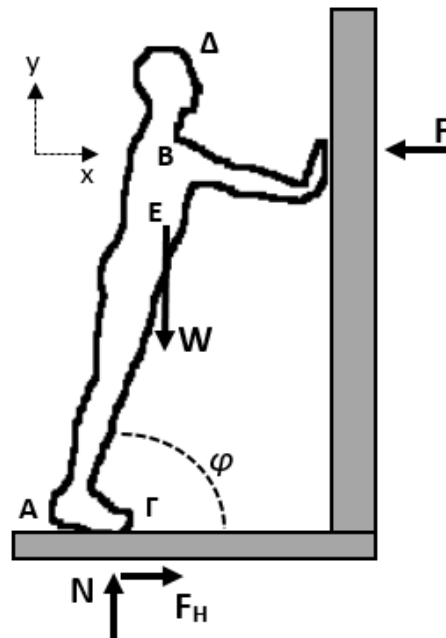
$$M = \frac{d_a W + d_o W_o}{d_m \sin \varphi} \quad (12)$$

Όπου d_o είναι η απόσταση μεταξύ του αντικειμένου και της άρθρωσης. Από την παραπάνω εξίσωση είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι η δύναμη που πρέπει να καταβάλει ο μυς είναι πολύ μεγαλύτερη από τα βάρη του χεριού και του αντικειμένου ($M > W + W_o$).

4.4. Δυνάμεις επαφής κατά τη στήριξη του σώματος

Στην Εικόνα 8 απεικονίζεται ένας άνθρωπος ο οποίος στέκεται όρθιος και στηρίζεται με τα χέρια στον τοίχο. Θεωρούμε την τριβή μεταξύ χεριών-τοίχου αμελητέα. Η πτέρνα εφάπτεται οριακά με το έδαφος με αποτέλεσμα ο άνθρωπος ουσιαστικά να στηρίζεται στα δάκτυλα των ποδιών του, εκεί όπου ασκείται η δύναμη M από το έδαφος (σημείο Γ). Η κάθετη και η οριζόντια συνιστώσα της M είναι: N , F_H , αντίστοιχα. Οι άλλες δυνάμεις που ασκούνται στον άνθρωπο είναι: το βάρος του W , και η οριζόντια δύναμη F από τον τοίχο.

Ο άνθρωπος έχει βάρος $W = 750 \text{ N}$, το ύψος του είναι $AD = 175 \text{ cm}$, και η απόσταση $BD = 25 \text{ cm}$. Επίσης δίνονται: $AE = 100 \text{ cm}$, $AG = 22 \text{ cm}$ (απόσταση πτέρνας-δακτύλων) και $\varphi = 70^\circ$. Στόχος μας είναι να υπολογίσουμε τις δυνάμεις F , F_H .



Εικόνα 8. Άνθρωπος στέκεται στα δάκτυλα των ποδιών του και στηρίζεται με τα χέρια τεντωμένα στον τοίχο. Στο σχήμα απεικονίζονται οι δυνάμεις που ασκούνται και τα σημεία εφαρμογής τους. (Βασισμένη στο [3]).

Αρχικά εφαρμόζουμε τις εξισώσεις ισορροπίας για τις δυνάμεις. Στον άξονα x :

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow$$

$$F = F_H \quad (13)$$

Στον άξονα γ:

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow$$

$$W = N \quad (14)$$

Ο άνθρωπος είναι σε ισορροπία, οπότε $\sum \tau = 0$ (επιλέγουμε το σημείο Α):

$$\sum \tau_A = 0 \Rightarrow$$

$$W AE \cos \varphi = F AB \sin \varphi + N AG$$

Κάνοντας χρήση των προηγούμενων εξισώσεων:

$$F = \frac{W(AE \cos \varphi - AG)}{AB \sin \varphi} \quad (15)$$

Με αντικατάσταση τιμών (όπου: $AB = A\Delta - B\Delta$), βρίσκουμε: $F = F_H = 65N$.

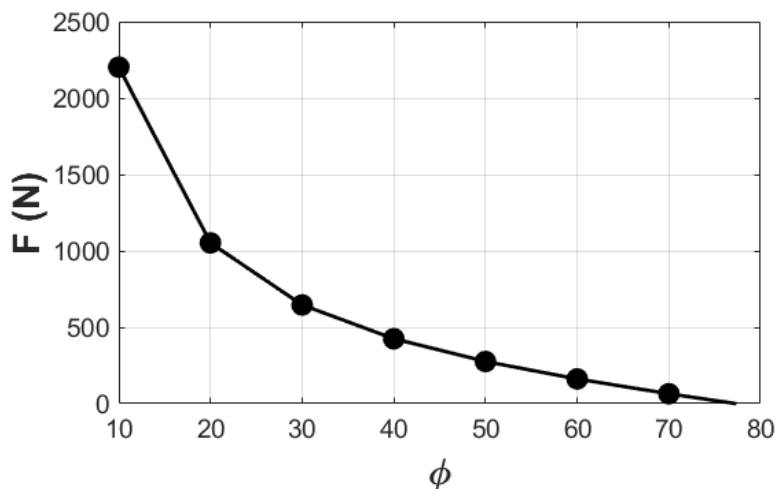
Εάν θέλουμε να υπολογίσουμε τη δύναμη M από το έδαφος:

$$M = \sqrt{N^2 + F_H^2}$$

Η διεύθυνση της M σε σχέση με το έδαφος δίνεται από τη γωνία:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{N}{F_H}$$

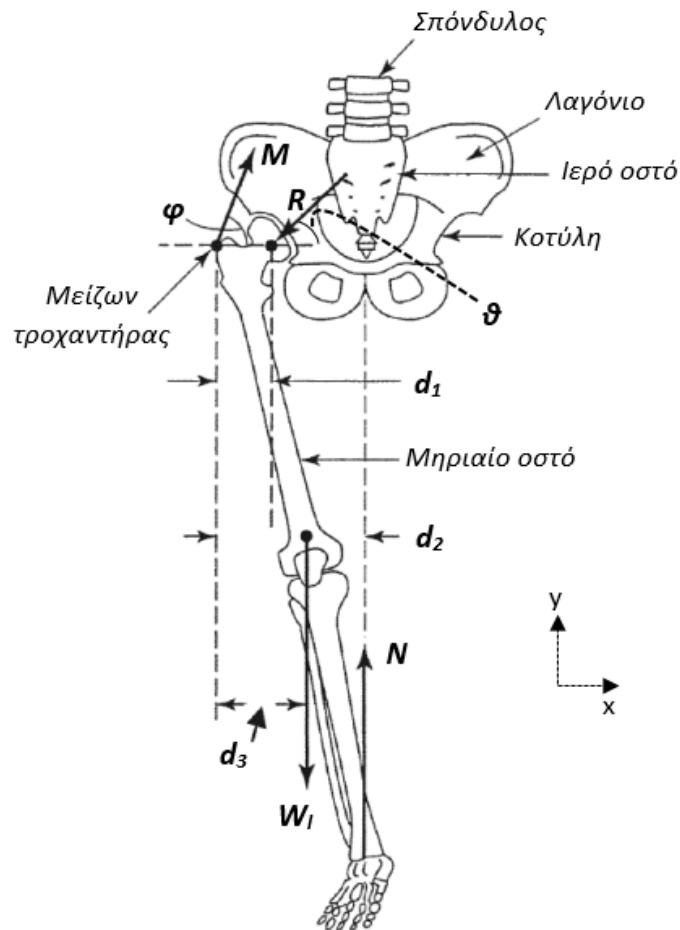
Στην Εικόνα 9 απεικονίζεται το διάγραμμα της δύναμης F για διάφορες τιμές της γωνίας φ (σε μοίρες), για τα δεδομένα του παραδείγματος. Παρατηρούμε ότι έχει φθίνουσα εκθετική μορφή. Για να μπορέσει ο άνθρωπος να σταθεί σε ισορροπία με μικρή γωνία φ , απαιτείται μεγάλη μυϊκή δύναμη και τριβή μεταξύ εδάφους-πέλματος. Εάν αυτό δεν ισχύει, τότε ο άνθρωπος θα πέσει γλιστρώντας δεξιόστροφα.



Εικόνα 9. Διάγραμμα μεταβολής της F ως συνάρτηση της γωνίας φ .

4.5. Δυνάμεις κατά την ισορροπία στο ένα πόδι

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα μας όταν στεκόμαστε στο ένα πόδι (βλ. Εικόνα 10). Σημαντικό ρόλο σε αυτή την περίπτωση έχουν οι δυνάμεις στην περιοχή του ισχίου (πύελος). Το ισχίο αποτελείται από την πυελική ζώνη και δύο τμήματα της σπονδυλικής στήλης (ιερό οστό και κόκκυγας). Η πυελική ζώνη αποτελείται από δύο οστά (δεξί και αριστερό), κάθε ένα εκ των οποίων αποτελείται από: το λαγόνιο (άνω), το ηβικό (κάτω και πρόσθια) και το ισχιακό οστό (κάτω και οπίσθια). Η κοτύλη είναι η κοιλότητα στην οποία συνδέεται η κεφαλή του μηριαίου οστού με το ισχίο. Ο μείζων τροχαντήρας του μηριαίου οστού προβάλλει προς τα πάνω και χρησιμεύει ως περιοχή κατάφυσης μυών που δρουν ως απαγωγείς και έξω στροφείς. Όπως θα δούμε, οι ισχιακοί απαγωγοί μύες έχουν σημαντικό ρόλο στη δύναμη που απαιτείται για την ισορροπία του ποδιού. Σε αυτό το παράδειγμα το πόδι θεωρείται σαν ένα ελεύθερο άκαμπτο αντικείμενο τα μέρη του οποίου (μηρός, κνήμη, πέλμα) είναι ενωμένα και η μόνη αλληλεπίδρασή του με το υπόλοιπο σώμα είναι η κάθετη δύναμη από το ισχίο.



Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση των δυνάμεων και των σχετικών αποστάσεων όταν στεκόμαστε στο ένα πόδι. (Από [1]).

Συνολικά οι δυνάμεις που ασκούνται στο πόδι καθώς ακουμπά στο έδαφος είναι:

- Η δύναμη των ισχιακών απαγωγών μυών, M , η οποία ασκείται υπό γωνία φ σε σχέση με τον άξονα x .
- Η αντίδραση, R , η οποία ασκείται μεταξύ ισχίου και μηριαίου οστού. Η δύναμη αυτή είναι κάθετη στην ισχιακή κοιλότητα και ασκείται υπό γωνία ϑ σε σχέση με τον άξονα x .
- Το βάρος του ποδιού, W_l , το οποίο ασκείται στο κέντρο του.
- Η κάθετη δύναμη, N , στο πέλμα από το έδαφος. Το βάρος του σώματος ασκείται στο κέντρο μάζας, το οποίο βρίσκεται στην ευθεία που τέμνει το ισχίο στη μέση. Η ευθεία αυτή επίσης τέμνει το πέλμα, το οποίο αποτελεί τη βάση στήριξης του σώματος. Στο σώμα δεν ασκούνται δυνάμεις στον άξονα χοπότε λόγω ισορροπίας: $N = W_b$. Επίσης, οι N, W_b είναι αντίρροπες και έτσι το σώμα δεν μπορεί να περιστραφεί.

Τα δεδομένα μας είναι: οι αποστάσεις $d_1 = 7.2 \text{ cm}$, $d_2 = 17.6 \text{ cm}$, $d_3 = 10 \text{ cm}$, τα βάρη $W_l = 0.14W_b$, $W_b = 800 \text{ N}$, και η γωνία $\varphi = 70^\circ$. Στόχος είναι να υπολογίσουμε τα μέτρα των δυνάμεων M , R και τη διεύθυνση της R (γωνία ϑ σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα x).

Λύση 1

Για να λύσουμε την άσκηση έχουμε τις τρεις εξισώσεις ισορροπίας ($\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$, $\sum \tau = 0$), με τρεις αγνώστους (M , R , ϑ ή ισοδύναμα M , R_x , R_y). Θεωρούμε ως άξονα περιστροφής τον κάθετο άξονα (στο επίπεδο xy), που διέρχεται από το κέντρο της κεφαλής του μηριαίου οστού. Αυτό κάνει την ανάλυση ευκολότερη επειδή η (άγνωστη) δύναμη R διέρχεται από αυτό το σημείο, οπότε η ροπή της είναι μηδέν. Ωστόσο η λύση θα ήταν η ίδια εάν επιλέγαμε οποιοδήποτε άλλο σημείο (στο τέλος παραθέτουμε και 2^η λύση).

Αρχικά για τις ροπές θα έχουμε:

$$\begin{aligned} \sum \tau &= 0 \Rightarrow \\ M \sin \varphi d_1 + W_l(d_3 - d_1) &= N(d_2 - d_1) \Rightarrow \\ M &= \frac{N(d_2 - d_1) - W_l(d_3 - d_1)}{d_1 \sin \varphi} \end{aligned} \quad (16)$$

Με αντικατάσταση τιμών βρίσκουμε: $M = 1.48W_b = 1184 \text{ N}$.

Για τις δυνάμεις σε κάθε άξονα έχουμε:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \Rightarrow \\ R_x &= M \cos \varphi \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 \Rightarrow \\ M \sin \varphi + N &= R_y + W_l \Rightarrow \\ R_y &= M \sin \varphi + N - W_l \end{aligned} \quad (18)$$

Όπου R_x, R_y είναι η οριζόντια και η κάθετη συνιστώσα της R στον άξονα x , αντίστοιχα ($R_x = R \cos \theta, R_y = R \sin \theta$).

Διαιρώντας τις προηγούμενες εξισώσεις κατά μέλη μπορούμε να υπολογίσουμε την θ :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{M \sin \varphi + N - W_L}{M \cos \varphi} \quad (19)$$

Με αντικατάσταση τιμών: $\theta = 77^\circ$.

Το μέτρο της R μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$R^2 = (R_x^2 + R_y^2)^{0.5} \quad (20)$$

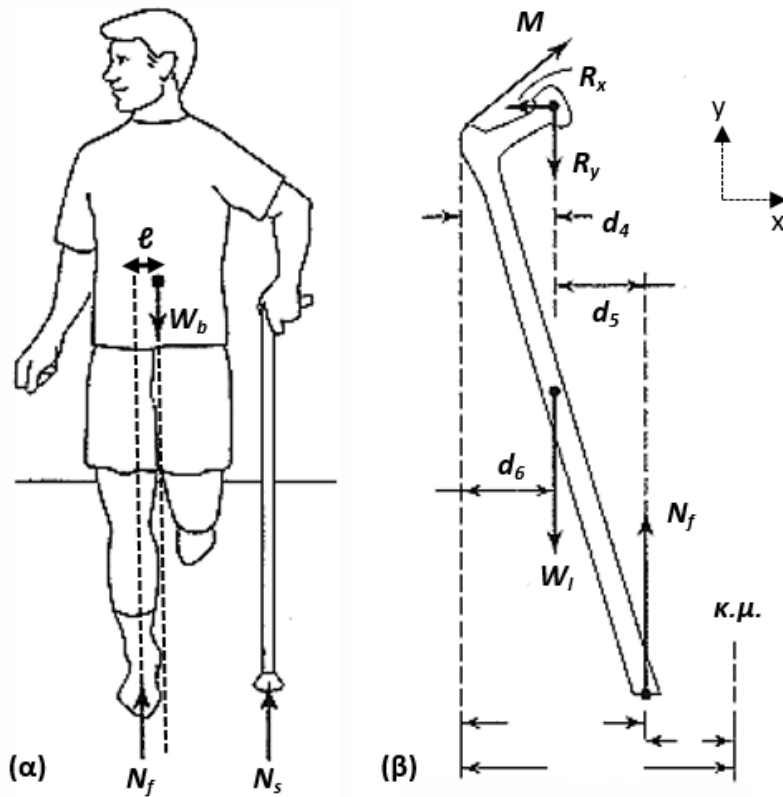
Κάνοντας χρήση των προηγούμενων εξισώσεων για τις R_x, R_y , βρίσκουμε: $R = 2.3 W_b = 1840N$.

Λύση 2

Εάν θεωρήσουμε ότι ο άξονας περιστροφής διέρχεται από το σημείο επαφής του ποδιού με το έδαφος, τότε καταλήγουμε στο ίδιο αποτέλεσμα, αν και με λίγο περισσότερες πράξεις. Συγκεκριμένα, από τις εξισώσεις ισορροπίας: $\sum \tau = 0, \sum F_y = 0$ μπορούμε να υπολογίσουμε την M (με απαλοιφή της R_y). Στη συνέχεια, με αντικατάσταση της M στις εξισώσεις: $\sum F_x = 0, \sum F_y = 0$ (και κάνοντας χρήση της: $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$), υπολογίζουμε την R . Η γωνία θ υπολογίζεται από την $\sum F_x = 0$, με αντικατάσταση της R .

4.6. Στήριξη με μπαστούνι

Σε συνέχεια του προηγούμενου παραδείγματος, θα εξετάσουμε την περίπτωση όπου ο άνθρωπος καθώς στέκεται στο δεξί πόδι στηρίζεται σε ένα μπαστούνι με το αριστερό χέρι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11α.



Εικόνα 11. (α) Οι δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα για ένα άνθρωπο που στέκεται στο ένα πόδι και στηρίζεται σε μπαστούνη. (β) Σχηματική αναπαράσταση των δυνάμεων στο πόδι και των σχετικών αποστάσεων. Το κέντρο μάζας (κ.μ.) βρίσκεται στην προέκταση της διακεκομμένης ευθείας. (Από [1]).

Το μπαστούνη θεωρείται αβαρές. Στη βάση του μπαστουνιού θα υπάρχει μία κάθετη αντίδραση, N_s , από το έδαφος. Έτσι η αντίδραση από το έδαφος στο δεξί πόδι, N_f , δεν θα είναι πλέον ίδια με το βάρος του σώματος. Εάν υποθέσουμε ότι: $N_s = \frac{W_b}{6}$, από την ισορροπία δυνάμεων για όλο το σώμα μπορούμε να βρούμε την N_f :

$$N_f + N_s = W_b \Rightarrow$$

$$N_f = 0.83W_b \quad (21)$$

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η N_f δεν είναι πλέον στην ίδια ευθεία με το κέντρο μάζας, αλλά η διεύθυνσή της έχει μετατοπιστεί κατά ℓ . Η απόσταση αυτή είναι εύκολο να υπολογιστεί από την εξίσωση ροπών, εάν γνωρίζουμε την απόσταση μεταξύ W_b και N_s . Επίσης, οι αποστάσεις d_i έχουν μεταβληθεί σε σχέση με το προηγούμενο παράδειγμα, λόγω της μεταβολής της γωνίας του ποδιού σε σχέση με το έδαφος. Οι νέες αποστάσεις φαίνονται στην Εικόνα 11β. Ωστόσο η γωνία της μυϊκής δύναμης M σε σχέση με τον άξονα x παραμένει η ίδια ($\varphi = 70^\circ$). Τα δεδομένα μας είναι: οι αποστάσεις $d_4 = 6.98 \text{ cm}$, $d_5 = 4.7 \text{ cm}$, $d_6 = 6.65 \text{ cm}$, το βάρος του σώματος $W_b = 800 \text{ N}$, το βάρος του ποδιού $W_f = 0.14W_b$ και η γωνία φ . Επίσης, έχουμε ήδη υπολογίσει την $N_f = 0.83W_b$. Στόχος μας είναι να υπολογίσουμε τα μέτρα των δυνάμεων M , R και τη διεύθυνση της R .

Αρχικά θα εργαστούμε με την εξίσωση ισορροπίας των ροπών για το πόδι, θεωρώντας σαν άξονα περιστροφής τον κάθετο άξονα που διέρχεται από το κέντρο της κεφαλής του μηριαίου οστού, όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα.

$$\begin{aligned}\sum \tau &= 0 \Rightarrow \\ M \sin \varphi d_4 &= N_f d_5 + W_l(d_4 - d_6) \Rightarrow \\ M &= \frac{0.83d_5 + 0.14(d_4 - d_6)}{d_4 \sin \varphi} W_b\end{aligned}\quad (22)$$

Με αντικατάσταση τιμών βρίσκουμε: $M = 0.6W_b = 480N$. Παρατηρήστε ότι η δύναμη αυτή είναι $\approx 60\%$ μικρότερη σε σχέση με το προηγούμενο παράδειγμα ($M = 1.48W_b$).

Για να βρούμε την R , θα χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις ισορροπίας των δυνάμεων σε κάθε άξονα:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \Rightarrow \\ R_x &= M \cos \varphi \Rightarrow \\ R_x &= 0.21W_b\end{aligned}\quad (23)$$

$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \Rightarrow \\ M \sin \varphi + N_f &= R_y + W_l \Rightarrow \\ R_y &= 1.25W_b\end{aligned}\quad (24)$$

Όπου έχει γίνει χρήση των δεδομένων: $M = 0.6W_b$, $N_f = 0.83W_b$, $\varphi = 70^\circ$ και $W_l = 0.14W_b$.

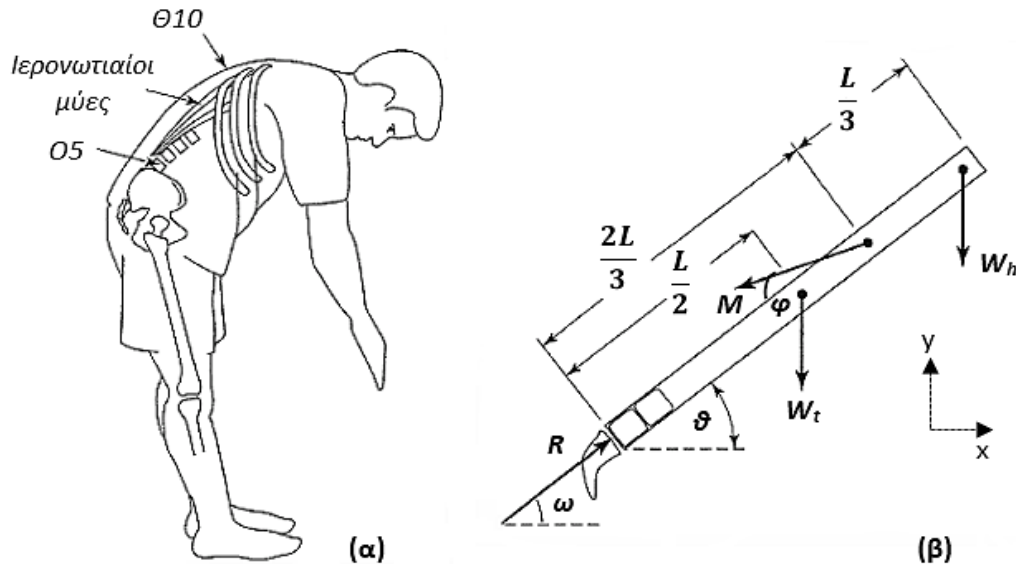
Το μέτρο της R μπορεί να υπολογιστεί όπως προηγουμένως ($R^2 = (R_x^2 + R_y^2)^{0.5}$), οπότε: $R = 1.27W_b = 1016 N$. Παρατηρήστε ότι και η R είναι μικρότερη σε σχέση το προηγούμενο παράδειγμα ($R = 2.3W_b$).

Ο υπολογισμός της κλίσης της R δίνεται από την: $\tan \theta = \frac{R_y}{R_x}$, οπότε $\theta = 80^\circ$.

4.7. Δυνάμεις στη σπονδυλική στήλη

Στο παράδειγμα αυτό θα εξετάσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στη σπονδυλική στήλη όταν σκύβουμε (Εικόνα 12α). Μολονότι η σπονδυλική στήλη δεν είναι ευθύγραμμη, για λόγους απλούστευσης την προσομοιάζουμε με μία συμπαγή μπάρα μήκους L (βλ. Εικόνα 12β). Η κλίση της σπονδυλικής στήλης σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα που περνά από τον 5° οσφυϊκό σπόνδυλο (σημείο καμπής) είναι ϑ . Το βάρος, W_t , του κορμού (πάνω από το ισχίο, εκτός από το κεφάλι και τα πόδια) ασκείται στο μέσο της σπονδυλικής στήλης. Το κεφάλι και τα χέρια έχουν συνολικό βάρος W_h , με σημείο εφαρμογής το άνω άκρο της μπάρας. Καθώς σκύβουμε, ενεργοποιούνται οι ιερονωτιαίοι μύες για τη σταθεροποίηση του κορμού, τους οποίους εδώ προσομοιάζουμε με ένα ενιαίο μυ που ασκεί δύναμη M σε απόσταση $2L/3$ από τον 5° οσφυϊκό σπόνδυλο. Επίσης, η M σχηματίζει γωνία φ με τη διεύθυνση της σπονδυλικής στήλης. Με R συμβολίζουμε τη δύναμη αντίδρασης από το ιερό οστό στον 5° οσφυϊκό σπόνδυλο.

Τα δεδομένα μας είναι: $\theta = 30^\circ$, $\varphi = 12^\circ$, $W_t = 0.4W_b$, $W_h = 0.2W_b$, όπου $W_b = 800N$ είναι το βάρος του σώματος. Η συγκεκριμένη κλίση θ αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου κάνουμε βαθιά υπόκλιση. Στόχος μας είναι να υπολογίσουμε τις δυνάμεις M , R καθώς και τη διεύθυνση της R (γωνία ω σε σχέση με τον άξονα x).



Εικόνα 12. (α) Η θέση των ιερονωτιαίων μυών σε σχέση με τον 5° οσφυϊκό και 10° θωρακικό σπόνδυλο όταν σκύβουμε. (β) Σχηματική αναπαράσταση των δυνάμεων στη σπονδυλική στήλη και των σχετικών αποστάσεων. (Από [1]).

Στο άσκηση υπάρχουν τρεις εξισώσεις (δύο για τις δυνάμεις και μία για τις ροπές) με τρεις αγνώστους. Αρχικά επιλέγουμε τον άξονα περιστροφής στον 5° οσφυϊκό σπόνδυλο, προκειμένου να βρούμε τη δύναμη M , χωρίς να χρειαστεί να υπολογίσουμε την R (δεδομένου ότι η ροπή της R ως προς τον άξονα αυτό είναι μηδέν):

$$\sum \tau = 0 \Rightarrow$$

$$M \frac{2L}{3} \sin \varphi = W_t \frac{L}{2} \cos \theta + W_h L \cos \theta \Rightarrow$$

$$M = (0.75W_t + 1.5W_h) \frac{\cos \theta}{\sin \varphi} \quad (25)$$

Με αντικατάσταση τιμών βρίσκουμε: $M = 2.5W_b = 2000N$.

Στη συνέχεια, η δύναμη R μπορεί να υπολογιστεί από τις συνιστώσες τις R_x , R_y . Επειδή η γωνία φ αντιστοιχεί στη διεύθυνσή της M σε σχέση με τη μπάρα, στην παρακάτω ανάλυση θα χρειαστεί η γωνία της M σε σχέση με τον άξονα x . Αυτή η γωνία μπορεί εύκολα να υπολογισθεί με απλή τριγωνομετρία: $\varphi_2 = \theta - \varphi = 18^\circ$. Οπότε, για τις δυνάμεις σε κάθε άξονα θα έχουμε:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow$$

$$R_x = M \cos \varphi_2 \Rightarrow$$

$$R_x = 2.38W_b \quad (26)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow$$

$$R_y = M \sin \varphi_2 + W_t + W_h \Rightarrow$$

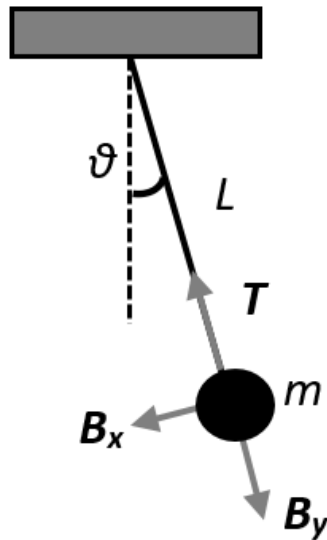
$$R_y = 1.37W_b \quad (27)$$

Οπότε το μέτρο της R ($R^2 = (R_x^2 + R_y^2)^{0.5}$), είναι: $R = 2.74W_b = 2192N$. Ο υπολογισμός της κλίσης της R δίνεται από την: $\tan \omega = \frac{R_y}{R_x}$, οπότε $\omega = 30^\circ$.

Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι η δύναμη που ασκείται στον 5° οσφυϊκό σπόνδυλο είναι πολύ μεγάλη, πολύ πάνω από το διπλάσιο ανθρώπινο βάρος. Πολλοί άνθρωποι αναπτύσσουν χρόνια προβλήματα στην οσφυϊκή μοίρα λόγω καταστάσεων που έχουν να κάνουν με την άρση βαριών αντικειμένων και το σκύψιμο. Η οσφυϊκή δισκοκήλη (κήλη μεσοσπονδυλίου δίσκου) είναι μια σχετικά συχνή πάθηση της οσφυϊκής μοίρας. Ο μεσοσπονδύλιος δίσκος ενεργεί σαν ελαστικό «μαξιλαράκι» ανάμεσα σε δύο σπονδύλους και ρόλος του είναι να απορροφά τους κραδασμούς και να διευκολύνει τις κινήσεις. Ωστόσο, ο δίσκος μπορεί να φθαρεί και τελικά σε κάποιο σημείο του να εμφανιστεί μια ρωγμή, από όπου ένα μικρό μέρος βγαίνει και προβάλλει στον σπονδυλικό σωλήνα. Το τμήμα αυτό που προεξέχει είναι η δισκοκήλη και μπορεί να προκαλέσει δυνατούς πόνους όταν φτάσει σε σημείο να πιέζει τα νεύρα που περνούν μέσα από τους σπονδύλους (μεσοσπονδύλια τμήματα). Συνήθης θεραπεία σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η ξεκούραση, οι φυσιοθεραπείες και σε πιο δύσκολες περιπτώσεις η χειρουργική επέμβαση.

5. Βάδιση

Προηγουμένως είδαμε ορισμένες εφαρμογές στατικής ισορροπίας στο ανθρώπινο σώμα. Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε μία εφαρμογή δυναμικής ισορροπίας, τη βάδιση. Στην περίπτωση αυτή διατηρούμε τον έλεγχο του κέντρου μάζας του σώματος καθώς κινούμαστε, ενώ η βάση στήριξης μεταβάλλεται. Άλλα παραδείγματα δυναμικής ισορροπίας είναι όταν τρέχουμε, όταν ανεβαίνουμε μία σκάλα ή όταν σηκωνόμαστε από την καρέκλα. Για να περιγράψουμε την κίνηση που εκτελεί το πόδι καθώς βαδίζουμε χρησιμοποιούμε το απλό εκκρεμές, δηλαδή μία σφαίρα μάζας m που βρίσκεται στην άκρη αβαρούς νήματος μήκους ℓ (βλ. Εικόνα 13). Αυτός ο τρόπος περιγραφής της βάδισης είναι γνωστός ως βαλλιστικό μοντέλο ή μοντέλο εκκρεμούς της βάδισης.



Εικόνα 13. Απλό εκκρεμές: σώμα μάζας m κρέμεται από νήμα μήκους L υπό γωνία ϑ σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα. Οι συνιστώσες του βάρους είναι B_x , B_y και η τάση του νήματος T .

Αν ϑ (σε rad) η γωνιακή απόκλιση της σφαίρας από την κατακόρυφο, τότε η σφαίρα θα έχει διαγράψει τόξο μήκους $s = L\vartheta$. Η ταχύτητα της σφαίρας, κάθετα στο νήμα, θα είναι: $v = \frac{ds}{dt} = L \frac{d\vartheta}{dt}$, και η επιτάχυνση, κάθετα στο νήμα, θα είναι: $a = \frac{d^2s}{dt^2} = L \frac{d^2\vartheta}{dt^2}$. Επειδή $B_y = -T$, η δύναμη που υπεισέρχεται στην εξίσωση κίνησης είναι η εφαπτομενική, στην τροχιά, συνιστώσα του βάρους (B_x), η οποία τείνει να ελαττώσει το μέγεθος της ϑ :

$$mL \frac{d^2\vartheta}{dt^2} = -mg \sin \vartheta \quad (28)$$

Αν περιοριστούμε σε μικρές γωνίες ($|\vartheta| \ll 1$), θα έχουμε: $\sin \vartheta \cong \vartheta$, οπότε καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$\frac{d^2\vartheta}{dt^2} = -\omega^2 \vartheta \quad (29)$$

όπου $\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$. Η παραπάνω εξίσωση περιγράφει ένα απλό αρμονικό ταλαντωτή με συχνότητα συντονισμού ω και έχει λύση της μορφής:

$$\vartheta = \vartheta_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (30)$$

Όπου ϑ_0 το πλάτος (μέγιστη τιμή) της γωνιακής απόκλισης και φ η φάση (μπορεί να υπολογιστεί από τις αρχικές συνθήκες $t_0 = 0$).

Σύμφωνα με το βαλλιστικό μοντέλο, το πόδι κινείται σαν εκκρεμές με κυκλική συχνότητα ω , οπότε μία περίοδος ολοκληρώνεται σε χρόνο $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Ένας βηματισμός προς τα εμπρός αντιστοιχεί σε μισό 'κύκλο', οπότε η χρονική διάρκεια ενός βήματος θα είναι $T/2$:

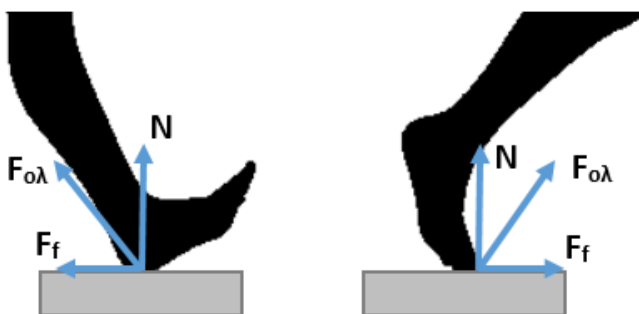
$$t_{\beta\eta\mu\alpha} = \pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (31)$$

Εάν σε ένα βήμα το πόδι διαγράφει τόξο $\Delta\theta$, τότε σύμφωνα με την προσέγγιση που κάναμε παραπάνω η απόσταση που διανύεται θα είναι: $d_{\beta\eta\mu\alpha} \cong L_{\text{ποδίου}}\Delta\theta$ και η μέση ταχύτητα: $v_{\beta\eta\mu\alpha} = d_{\beta\eta\mu\alpha}/t_{\beta\eta\mu\alpha}$. Το παραπάνω μοντέλο δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την περίπτωση αργής βάδισης ενώ για ταχεία βάδιση η ταλάντωση δεν είναι πλέον απλή αλλά εξαναγκασμένη.

Σύμφωνα με το βαλλιστικό μοντέλο η μάζα του ποδιού είναι συγκεντρωμένη σε ένα σημείο, το κέντρο μάζας της σφαίρας, το οποίο αποτελεί μία απλούστευση. Στην πραγματικότητα η μάζα του ποδιού είναι κατανομημένη ανομοιογενώς, οπότε στην παραπάνω εξίσωση δεν μπορούμε να θεωρήσουμε σαν L το μήκος του ποδιού. Στην περίπτωση αυτή, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πίνακες αντιστοίχισης από πειραματικά αποτελέσματα σύγκρισης της περιόδου ταλάντωσης του ποδιού και της περιόδου ενός απλού εκκρεμούς με μήκος L' . Το μήκος L' ονομάζεται 'ενεργό μήκος του ποδιού' και ουσιαστικά αντιστοιχεί στο μήκος που πρέπει να έχει το απλό εκκρεμές έτσι ώστε η περιόδός του να είναι ίδια με αυτή του βήματος ενός ανθρώπου με συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

5.1. Τριβή κατά τη βάδιση

Η τριβή παίζει σημαντικό ρόλο στη βάδιση. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 14, όταν η πτέρνα ακουμπά στο έδαφος ασκείται σε αυτή μία δύναμη $F_{ολ}$, η οποία αναλύεται στην κάθετη συνιστώσα N (αντίσταση του εδάφους), και την οριζόντια συνιστώσα F_f (συνολική δύναμη τριβής). Η μέγιστη δύναμη της τριβής δίνεται από τη σχέση $F_f = \mu N$, όπου μ ο συντελεστής τριβής των δύο επιφανειών. Όταν το μετατόπισμα του πέλματος απομακρύνεται από το έδαφος, η τριβή έχει αντίθετη φορά. Συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση η τριβή αντιστέκεται στην ολίσθηση προς τα εμπρός, επιβραδύνοντας την κίνηση. Στη δεύτερη περίπτωση η τριβή αντιστέκεται στην ολίσθηση προς τα πίσω, υποβοηθώντας την ώθηση προς τα εμπρός. Αυτή η αρχική επιβράδυνση και η επακόλουθη επιτάχυνση του ποδιού απαιτεί δυνάμεις $\cong 0.15mg$. Οπότε για να μην ολισθαίνουμε ο συντελεστής στατική τριβής θα πρέπει να είναι $\mu_s > 0.15$, όπως για παράδειγμα στη περίπτωση σόλας από λάστιχο-τσιμεντένιοςδρόμος όπου $\mu_s = 1$. Άλλα παραδείγματα συντελεστών τριβής: $\mu_s = 0.7$ (ατσάλι-ατσάλι), $\mu_s = 0.25-0.50$ (ξύλο-ξύλο), $\mu_s = 0.1$ (πάγος-πάγος), $\mu_{ολισθ} = 0.005-0.02$ (αρθρικός χόνδρος στο ανθρώπινο γόνατο) και $\mu_{ολισθ} = 0.01-0.04$ (αρθρικός χόνδρος στον ανθρώπινο γοφό).



Εικόνα 14. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πόδι όταν η πτέρνα ακουμπά στο έδαφος (αριστερά), και όταν τα δάκτυλα απομακρύνονται από το έδαφος (δεξιά). (Βασισμένη στο [1]).

6. Συγκρούσεις του ανθρωπίνου σώματος

Έχοντας περιγράψει ένα παράδειγμα κίνησης του ανθρωπίνου σώματος, στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται όταν η κίνηση σταματά απότομα, όπως σε μία σύγκρουση. Στη περίπτωση αυτή τα διάφορα μέλη του σώματος διανύουν μικρές αποστάσεις με μεγάλη επιβράδυνση, μέχρι να ακινητοποιηθούν. Στα παρακάτω παραδείγματα θεωρούμε ότι η επιβράδυνση είναι σταθερή και η κίνηση γίνεται σε μία διάσταση.

Υπενθυμίζουμε τις εξισώσεις για την τελική ταχύτητα v_1 και την απόσταση dx που θα διανύσει, ένα αντικείμενο μάζας m με αρχική ταχύτητα v_0 όταν κινείται με επιτάχυνση a :

$$v_1 = v_0 + at \quad (32)$$

$$dx = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

Για τις συγκρούσεις που θα εξετάσουμε θεωρούμε ότι το αντικείμενο προσκρούει σε ένα σώμα πολύ μεγαλύτερης μάζας και ακινητοποιείται ($v_1 = 0$). Με απαλοιφή του χρόνου, η απόσταση που θα διανύσει το αντικείμενο κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης είναι:

$$dx = \frac{v^2}{2a} \quad (33)$$

Όπου a η επιβράδυνση (απόλυτη τιμή) και $v = v_0$.

Η δύναμη που θα ασκηθεί στο αντικείμενο κατά τη σύγκρουση ισούται με το ρυθμό μεταβολής της ορμής του:

$$F = \frac{dp}{dt} = m \frac{v_0}{t_0} \quad (34)$$

Όπου t_0 χρόνος που διαρκεί η σύγκρουση ενώ η F έχει φορά αντίθετη από την αρχική ταχύτητα v_0 .

Από το 2^ο νόμο του Νεύτωνα, για τη συνολική ορμή του συστήματος ισχύει:

$$\vec{p}_{\text{τελ}} = \vec{p}_{\text{αρχ}} + \sum \vec{F}_i \Delta t \quad (35)$$

Το γινόμενο $\vec{F}_i \Delta t$ αποτελεί την ώθηση, $\vec{\Omega}_{F_i}$, κάθε δύναμης που δέχεται το σύστημα των σωμάτων κατά τη διάρκεια της κρούσης Δt (εδώ θεωρούμε την \vec{F}_i σταθερή στο διάστημα Δt). Για ένα μηχανικά μονωμένο σύστημα (δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις ή η συνισταμένη τους είναι μηδενική), ισχύει: $\sum \vec{F}_i \Delta t = 0$, οπότε $\vec{p}_{\text{τελ}} = \vec{p}_{\text{αρχ}}$ (αρχή διατήρησης ορμής).

Η παραπάνω διανυσματική σχέση αποτελεί έκφραση του *θεωρήματος ώθησης-ορμής* για ένα σύστημα σωμάτων που συγκρούονται. Ωστόσο, το θεώρημα ισχύει και για μεμονωμένα σώματα: *Η τελική ορμή που αποκτά ένα σώμα όταν πάνω σε αυτό ασκηθούν διάφορες δυνάμεις για ορισμένο χρόνο, είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα της αρχικής του ορμής και της ώθησης της συνισταμένης των δυνάμεων αυτών για το θεωρούμενο χρόνο.* Στην παραπάνω περίπτωση όπου το αντικείμενο ακινητοποιείται μετά την κρούση, ισχύει: $\sum \vec{F}_i \Delta t = -\vec{p}_{\text{αρχ}}$. Εάν η κρούση ήταν ελαστική, ή μερικώς ελαστική, το αντικείμενο θα εκτινασσόταν προς τα πίσω, οπότε η μεταφορά ορμής και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι μεγαλύτερες.

Τέλος, η πίεση (τάση), που θα δεχθεί το αντικείμενο στην περιοχή της σύγκρουσης (εμβαδού S) θα είναι:

$$P = \frac{F}{S} = m \frac{v_0}{St_{ολ}} \quad (36)$$

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε ορισμένα παραδείγματα συγκρούσεων που θα μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε τις συνέπειές τους στο ανθρώπινο σώμα.

6.1. Σύγκρουση με το κεφάλι

Ένας άνθρωπος που κινείται με ταχύτητα $v = 1 \text{ m/s}$, προσκρούει με το κεφάλι (μάζας $m = 3 \text{ kg}$) σε ατσάλινη δοκό και ακινητοποιείται σε $t = 10 \text{ ms}$. Η επιβράδυνση που υφίσταται το κεφάλι υπολογίζεται: $\alpha = 100 \text{ m/s}^2$, η οποία αντιστοιχεί σε $10g$ (g η επιτάχυνση της βαρύτητας). Η απόσταση που θα διανύσει το κεφάλι θα είναι: $dx = 5 \text{ mm}$. Η δύναμη που θα ασκηθεί το κεφάλι υπολογίζεται: $F = 300 \text{ N}$. Η δύναμη αυτή αντιστοιχεί περίπου στο βάρος ενός παιδιού 10 ετών. Όταν η πρόσκρουση γίνει επάνω σε σκληρά ή μεταλλικά αντικείμενα, όπως για παράδειγμα αυτά που υπήρχαν στα αυτοκίνητα παλιάς τεχνολογίας, αναπτύσσεται μεγάλη επιβράδυνση και μπορούν να προκληθούν κατάγματα στο κρανίο.

Σε συνέχεια του προηγούμενου παραδείγματος, θεωρούμε ότι η δοκός καλύπτεται από μαλακό στρώμα πάχους $dx = 2 \text{ cm}$ και το κεφάλι ακινητοποιείται αφού διανύσει απόσταση όσο το πάχος του στρώματος. Τότε η επιβράδυνση θα είναι: $\alpha = 25 \text{ m/s}^2$ (περίπου $2.5 g$). Η δύναμη που θα ασκηθεί το κεφάλι σε αυτή την περίπτωση θα είναι $F = 75 \text{ N}$, δηλαδή το $\frac{1}{4}$ της δύναμης όταν δεν υπήρχε στρώμα.

6.2. Σύγκρουση με τα πόδια

Αντίστοιχα είναι τα συμπεράσματα όταν εκτελούμε άλματα από ύψος. Στην περίπτωση αυτή η επιβράδυνση συνδέεται με τη συμπίεση του υλικού που υπάρχει στο πέλμα μας. Αν πέσουμε ξυπόλητοι με τεντωμένα τα πόδια υπάρχει μεγάλο ρίσκο να υποστούμε κάταγμα. Επιμηκύνοντας το χρόνο της πρόσκρουσης (μέχρι να ακινητοποιηθούμε) είναι δυνατό να αποφευχθούν αυτές οι συνέπειες. Για παράδειγμα, αν η πτώση γίνει από ύψος h , η δυναμική ενέργεια (mgh) ισούται με την κινητική ενέργεια ($0.5mv^2$), οπότε η ταχύτητα λίγο πριν την πρόσκρουση θα είναι:

$$v^2 = 2gh \quad (37)$$

Εάν η πτώση γίνει επάνω σε υλικό το οποίο κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης συμπιέζεται κατά ℓ , τότε η επιβράδυνση θα είναι:

$$a = \frac{h}{\ell} g \quad (38)$$

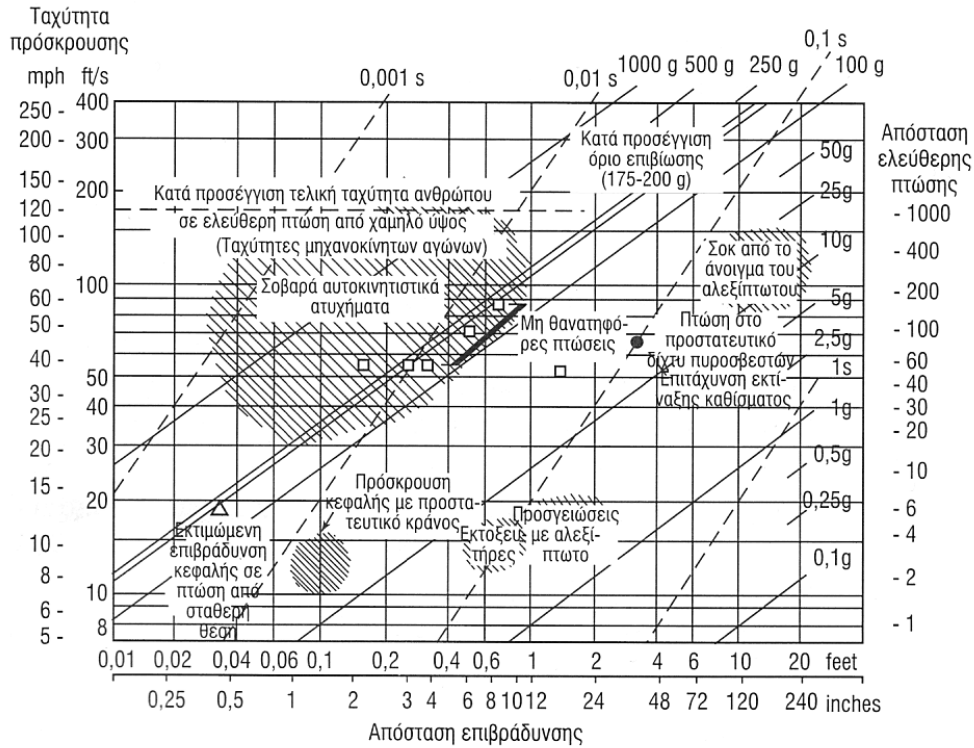
Δηλαδή ο 'αριθμός των g ' που θα δεχθούμε ισοδυναμεί με το λόγο h/ℓ . Για τις τιμές: $h = 1 \text{ m}$ και $\ell = 1 \text{ cm}$ (στρώμα λεπτού πάχους), η επιβράδυνση θα είναι $100g$ ή αλλιώς η δύναμη που θα ασκηθεί στα πόδια ισοδυναμεί με 100 φορές το βάρος του σώματος! Για ένα άτομο μάζας 75 kg , η δύναμη που θα ασκηθεί στο πόδι είναι: $F = 7.5 \times 10^4 \text{ N}$. Αν η προσγείωση γίνει σε στρώμα με μεγαλύτερο πάχος, ο χρόνος μέχρι να ακινητοποιηθούμε θα είναι μεγαλύτερος και η δύναμη μικρότερη. Επίσης, αν λυγίσουμε τα γόνατα αυξάνεται ο χρόνος της σύγκρουσης ενώ η επίπτωσή της επιμερίζεται και στους μύες.

Η μέγιστη δύναμη που μπορούν να αντέξουν τα οστά πριν σπάσουν ονομάζεται 'ανώτατη συμπιεστική τάση' (ultimate compressive stress'-UCS), ή πιο απλά 'τάση θραύσης'. Για τα συμπαγή οστά ισχύει $UCS = 170 \text{ N/mm}^2$. Η εγκάρσια επιφάνεια της κνήμης γύρω από τον αστράγαλο είναι $S = 3 \text{ cm}^2$, οπότε για το προηγούμενο παράδειγμα μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση στην περιοχή της κνήμης κατά την πρόσκρουση: $P = 250 \text{ N/mm}^2$. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από την UCS, συνεπώς για ένα άτομο μάζας 75kg, άλμα με τεντωμένο πόδι από ύψος 1m θα του προκαλέσει κάταγμα. Ωστόσο, από την εξίσωση (36) βλέπουμε ότι η τάση στο πόδι μπορεί να μειωθεί αν αυξηθεί ο χρόνος της πρόσκρουσης, ή η επιφάνεια επαφής, με το έδαφος. Έτσι οι συνέπειες μετριάζονται: (α) φορώντας παπούτσια από μαλακό υλικό, (β) προσκρούοντας σε προστατευτικό υλικό (π.χ. στρώμα), (γ) λυγίζοντας τα πόδια μας κατά την πρόσκρουση έτσι ώστε η δύναμη να επιμεριστεί όχι μόνο στα οστά αλλά και στους μύες, και (δ) κυλώντας στο πλάι, όπως οι αλεξιπτωτιστές, προκειμένου να αυξήσουμε την επιφάνεια πρόσκρουσης με το έδαφος.

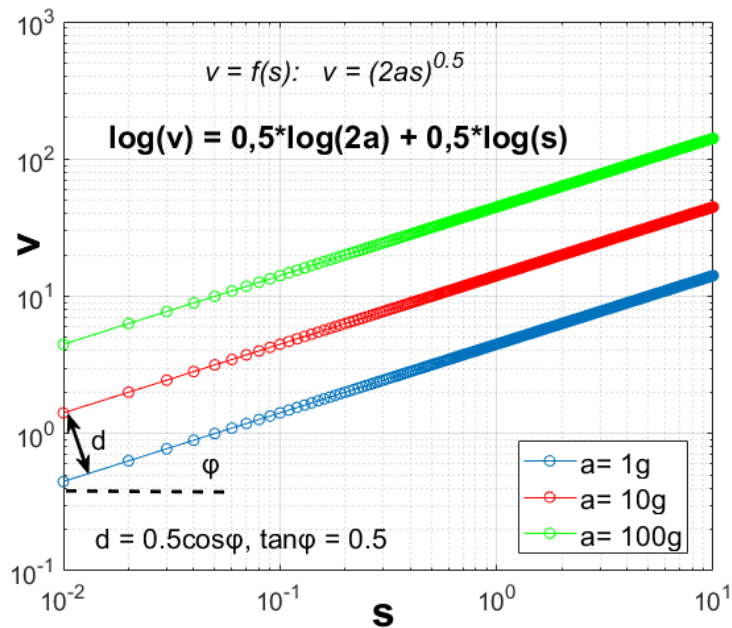
6.3. Συνέπειες των συγκρούσεων

Η Εικόνα 15 απεικονίζει δεδομένα από διάφορες περιπτώσεις σύγκρουσης του ανθρωπίνου σώματος, όπως αυτοκινητιστικά ατυχήματα, άνοιγμα αλεξιπτωτου, πρόσκρουση κεφαλιού με κράνος, κλπ. Το διάγραμμα απεικονίζει σε λογαριθμική κλίμακα τη σχέση μεταξύ ταχύτητας σύγκρουσης και απόστασης μέχρι να ακινητοποιηθεί το σώμα: $v = f(s)$. Η λογαριθμική κλίμακα χρησιμοποιείται επειδή η $v = f(s)$ είναι της μορφής: $y = kx^n$ (βλ. Εικόνα 16).

Οι ευθείες μη-διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν σε τιμές v , s , για σταθερή επιβράδυνση (σε g), ενώ οι διακεκομμένες ευθείες για σταθερό χρόνο σύγκρουσης. Συγκρούσεις στις οποίες η επιβράδυνση είναι μεγαλύτερη από 175g-200g θεωρούνται θανατηφόρες. Ωστόσο σημαντικό ρόλο παίζει και το μέρος του σώματος με το οποίο γίνεται η σύγκρουση. Για παράδειγμα, πτώση με την πίσω πλευρά του σώματος με ταχύτητα 12 m/s μπορεί να αποβεί θανατηφόρα, ενώ για πτώση με την ίδια ταχύτητα αλλά με πρόσκρουση πρώτα των κάτω άκρων οι συνέπειες περιορίζονται.



Εικόνα 15. Διάγραμμα log-log μεταξύ ταχύτητας σύγκρουσης (άξονας y) και απόστασης επιβράδυνσης (άξονας x). Οι σκιαγραφημένες περιοχές αντιστοιχούν σε διάφορες περιπτώσεις συγκρούσεων. Η ζώνη των ευθειών 175g-200g διαχωρίζει τις θανατηφόρες από τις μη θανατηφόρες περιοχές (Από [1] και [4]).



Εικόνα 16. Διάγραμμα $v = f(s)$ σε λογαριθμική κλίμακα (α: επιτάχυνση σε g).

Πειραματικές μελέτες έχουν οδηγήσει στην εξαγωγή διαφόρων ημιποσοτικών δεικτών που σχετίζονται με την πιθανότητα επιβίωσης από συγκρούσεις. Για παράδειγμα, ο δείκτης GSI (Gadd Severity Index), αντανακλά την πιθανότητα πρόκλησης εγκεφαλικής βλάβης σε μία μετωπιαία σύγκρουση:

$$GSI = \int_0^{t_{ολ}} \left(\frac{a_t}{g} \right)^{2.5} dt \quad (39)$$

Η ολοκλήρωση γίνεται για τη συνολική διάρκεια της σύγκρουσης ($t_{ολ}$), η επιβράδυνση εκφράζεται σε g και ο χρόνος σε sec. Εάν η επιβράδυνση είναι σταθερή, τότε για $\alpha = \Delta v/t_{ολ}$ η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$GSI = t_{ολ} \left(\frac{\Delta v}{gt_{ολ}} \right)^{2.5} \quad (40)$$

Υπολογίζοντας την τιμή του GSI σε μία σύγκρουση, με τη βοήθεια πινάκων συσχέτισης μπορούμε να βρούμε την πιθανότητα κατάγματος, κάκωσης, ή εγκεφαλικής βλάβης. Παράδειγμα, για $GSI \approx 1000$ υπάρχει 50% πιθανότητα θανάσιμου τραυματισμού, ενώ για αρκετά μεγαλύτερες τιμές ο θάνατος είναι σχεδόν αναπόφευκτος. Για τιμές $GSI \approx 400$ s, υπάρχει σοβαρή πιθανότητα εγκεφαλικής διάσεισης.

Προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος τραυματισμών κατά τη σύγκρουση, χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα προστασίας όπως για παράδειγμα αερόσακοι στα αυτοκίνητα, προστατευτικά δίχτυα/στρώματα (για άλματα από ύψος), και εσωτερική επένδυση στα κράνη των μοτοσικλετιστών. Ειδικά στα κράνη, το μαλακό υλικό στο εσωτερικό τους λειτουργεί έτσι ώστε το κεφάλι να ακινητοποιείται σε μεγαλύτερο χρόνο. Ταυτόχρονα, το υλικό παραμορφώνεται απορροφώντας την κινητική ενέργεια του κεφαλιού χωρίς να προκαλεί ανάκρουση. Επίσης, η κρούση διαχέεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια σε σχέση με τις τυπικές περιοχές σύγκρουσης με μία 'γυμνή' επιφάνεια.

7. Βιβλιογραφία

1. Herman I.P., 'Φυσική του ανθρωπίνου σώματος', Ελληνική Έκδοση, Εκδόσεις: Π. Χ. Πασχαλίδης, 2009.
2. Cameron J.R., Skofronick, J.G., Grant, R.M., 'Φυσική του ανθρωπίνου σώματος', Ελληνική Έκδοση, Εκδόσεις: Παρισιάνου, 2001.
3. Tözeren A., 'Human body dynamics: classical mechanics and human movement', Springer, 2000.
4. Snyder R.G., 'Chapter 6: Impact'. In: Bioastronautics data book, J.F. Parker Jr., V.R. West (editors). (NASA, Washington, DC 1973),
5. Gadd C.C. 'Use of a Weighted-Impulse Criterion for Estimating Injury Hazard'. Society of Automotive Engineers. Proceedings of the 10th Car Crash Conference, New York, 1966, pp. 164-174.
6. Davidovits P., 'Physics in biology and medicine', 3rd edition, Academic Press (imprint of Elsevier), 2007.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΙΕΣΗ ΚΑΙ ΡΟΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ – ΚΑΡΔΙΑΓΓΕΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Σοφία Κόττου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική Σχολή, ΕΚΠΑ

1. Γενικά

Όσον αφορά το ανθρώπινο σώμα, η κίνηση των ρευστών μας ενδιαφέρει σε δυο περιπτώσεις: (α) τη ροή του αίματος στην καρδιά και στα αγγεία και (β) τη ροή του αέρα στο αναπνευστικό σύστημα.

Βέβαια η λειτουργία του σώματος «περικλείει» πολλές περιπτώσεις κίνησης ρευστών, κυρίως υγρών, όπως π.χ. στο ουροποιητικό σύστημα ή διάφορες περιπτώσεις διάχυσης. Διάχυση συμβαίνει όταν η «διαδρομή» του ρευστού είναι πολύ μικρή, της τάξης των μm. Οι υπόλοιπες κινήσεις ρευστών ακολουθούν, σε γενικές γραμμές, τους νόμους των δυο περιπτώσεων που προαναφέρθηκαν και θα αναλυθούν στα επόμενα υποκεφάλαια.

2. Πίεση

2.1. Μέτρηση της πίεσης

Η πίεση είναι δύναμη ανά μονάδα κάθετης επιφάνειας και μετράται σε $N \cdot m^{-2}$. Μια στήλη υγρού εξασκεί δύναμη στη βάση της λόγω βάρους. Η πίεση στη βάση είναι η γνωστή υδροστατική πίεση: $P = \rho \cdot g \cdot h$, όπου ρ η πυκνότητα του υγρού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και h το ύψος της στήλης του υγρού. Μονάδες πίεσης στην καθημερινή πράξη είναι και το ύψος της στήλης του υγρού, συνήθως υδράργυρου, δηλαδή τα mmHg.

Υπάρχει η απόλυτη πίεση $P_{\text{απ}}$ (που είναι η συνολική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας) και η σχετική πίεση $P_{\text{σχ}}$ (δηλαδή η σύγκριση της τιμής της με μια πίεση αναφοράς, π.χ. την ατμοσφαιρική P_{α}). Συνήθως έχουμε:

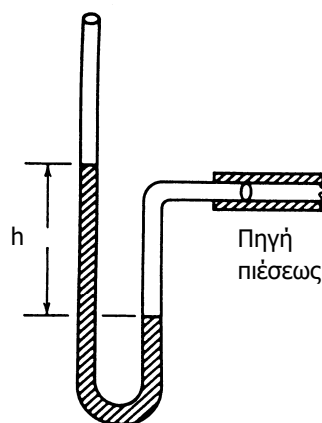
$$P = P_{\text{σχ}} = P_{\text{απ}} - P_{\alpha}$$

οπότε και θεωρείται πως η P στους πνεύμονες, κατά την εισπνοή, είναι αρνητική.

Τυπικές τιμές πίεσης στο σώμα

	Τυπικές τιμές πίεσης	
	kPa	mm Hg
Αρτηριακή Πίεση		
Μεγάλη (συστολική)	13-18	100-140
Μικρή (διαστολική)	8-12	60-90
Φλεβική Πίεση	0,4-0,9	3-7
Μεγάλες Φλέβες	<0,1	<1
Πίεση τριχοειδών αγγείων		
Αρτηριακό άκρο	4	30
Φλεβικό άκρο	1,3	10
Πίεση μέσου ωτός	<0,1	<1
Πίεση οφθαλμού – υδατοειδές υγρό	2,6	20
Πίεση εγκεφαλονωτιαίου υγρού στον εγκέφαλο (ξαπλωμένος)	0,6-1,6	5-12
Πίεση Γαστρεντερική	1,3-2,6	10-20
Πίεση Ενδοθωρακική	-1,3	-10
(μεταξύ πνεύμονα και θωρακικού τοιχώματος)		

Η πίεση μετράται με το πιεσόμετρο ή μανόμετρο. Η απλή του μορφή είναι σωλήνας σε σχήμα U, το ένα στόμιο του οποίου συνδέεται με το δοχείο της άγνωστης πίεσης, ενώ το δεύτερο στόμιο παραμένει ελεύθερο.



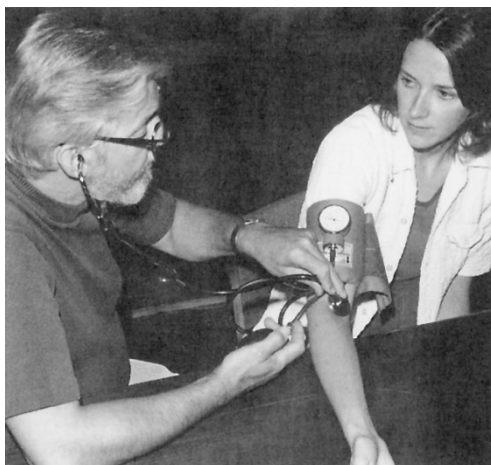
Η βάση του σωλήνα περιέχει ένα υγρό, που στην κατάσταση «ηρεμίας» παρουσιάζει ελεύθερη επιφάνεια ίδιου ύψους στα δυο σκέλη του σωλήνα.

Όταν το πρώτο στόμιο συνδεθεί με το δοχείο της άγνωστης πίεσης, το προσκείμενο σκέλος θα εμφανίσει χαμηλότερη ελεύθερη επιφάνεια του υγρού. Το βάρος της στήλης του υγρού που έχει ύψος, όσο η διαφορά των ελεύθερων επιφανειών στα δύο σκέλη, εξασκεί την ίδια πίεση με την άγνωστη και εύκολα υπολογίζεται.

Η πίεση του αίματος στο ανθρώπινο σώμα μετράται με το σφυγμομανόμετρο, που αποτελείται από το περιβραχιόνιο (αναπτύσσει πίεση στο βραχίονα), τη μετρητική κλίμακα και ένα στηθοσκόπιο που τοποθετείται πάνω από τη βραχιόνια αρτηρία στο ύψος του αγκώνα. Το περιβραχιόνιο γεμίζει με αέρα, διογκώνεται και ασκεί πίεση ικανή να διακόψει την κυκλοφορία του αίματος. Στη συνέχεια ο αέρας αποβάλλεται σταδιακά από το περιβραχιόνιο, μειώνοντας την πίεση.

Τη στιγμή που η πίεση από το περιβραχιόνιο γίνει μικρότερη από τη συστολική (μεγάλη) πίεση του αίματος, το αίμα εισρέει με ταχύτητα στην αρτηρία, η ροή είναι στροβιλώδης και παράγει ήχους (Korotkoff) που εισέρχονται στο στηθοσκόπιο και γίνονται ακουστοί. Καθώς η πίεση συνεχίζει να μειώνεται, οι ήχοι ακούγονται πιο δυνατά και στη συνέχεια εξασθενούν σταδιακά. Οι ήχοι σταματούν οριστικά όταν η τιμή της πίεσης που εξασκεί το περιβραχιόνιο γίνει μικρότερη και από τη διαστολική (μικρή) πίεση του αίματος, δηλαδή όταν η ροή του αίματος στην αρτηρία αφεθεί ελεύθερη (ομαλή).

Σε κάθε χτύπο της καρδιάς (περίπου 1 ανά δευτερόλεπτο) η πίεση του αίματος στις μεγάλες αρτηρίες (όπως η βραχιόνιος) κυμαίνεται μεταξύ της συστολικής τιμής (~ 120 mmHg) και της διαστολικής τιμής (~ 80 mmHg).



2.2. Πιέσεις στο σώμα

Οι πιέσεις στο σώμα μπορούν να διαχωριστούν σε κατηγορίες.

2.2.1 Οφθαλμός

Η πίεση στο υαλώδες υγρό (πίσω από τον φακό) στον οφθαλμό καθορίζει το σχήμα του βολβού.

Το υδατοειδές υγρό (το υγρό που βρίσκεται στο πρόσθιο μέρος του φακού) αποτελείται κυρίως από νερό.

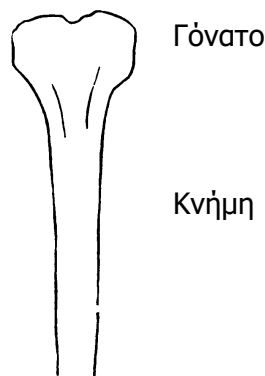
Ο οφθαλμός παράγει συνεχώς υδατοειδές υγρό και η περίσσεια αυτού απομακρύνεται μέσω ειδικού παροχευτικού συστήματος.

Μερική απόφραξη του συστήματος αυτού προκαλεί αύξηση της πίεσης, η οποία μπορεί να περιορίσει την παροχή του αίματος στον αμφιβληστροειδή επηρεάζοντας με τον τρόπο αυτό την όραση. Η παθολογική αυτή κατάσταση καλείται *γλαύκωμα* και προκαλεί, σε μέτριες καταστάσεις, συγκεντρική στένωση του οπτικού πεδίου και σε βαριές καταστάσεις, τύφλωση.

2.2.2 Οστά

Η πίεση στα οστά έχει διαφορετικές τιμές ανάλογα αν στεκόμαστε, αν περπατάμε ή αν ανασηκωνόμαστε από βαθύ κάθισμα, όπως και η πίεση του αίματος είναι διαφορετική όταν καθόμαστε από όση όταν τρέχουμε.

Όταν για παράδειγμα περπατάμε όλο το βάρος του σώματός μας στηρίζεται πάνω στο ένα πόδι μας και η τάση που ασκείται στην άρθρωση του γόνατος μπορεί να είναι και μεγαλύτερη από 106 Pa (10 atm)!



2.2.3 Κατάδυση

Η αλλαγή της πίεσης κατά την κατάδυση δεν επηρεάζει το μεγαλύτερο μέρος του σώματος, αφού το ανθρώπινο σώμα αποτελείται κυρίως από στερεά και υγρά, τα οποία είναι σχεδόν ασυμπίεστα.

Υπάρχουν όμως κοιλότητες του σώματος που περιέχουν αέρα και οι μεταβολές της πίεσης μπορεί να έχουν σοβαρές επιπτώσεις.

Για να γίνει αντιληπτό γιατί συμβαίνει αυτό πρέπει να θυμηθούμε το νόμο του Boyle: για δεδομένη ποσότητα αέρα, υπό σταθερή θερμοκρασία, το γινόμενο της απόλυτης πίεσης και του όγκου είναι σταθερό ($P \cdot V = \text{σταθερό}$).

Επομένως, αν η απόλυτη πίεση διπλασιαστεί ο όγκος υποδιπλασιάζεται έτσι ώστε το γινόμενο των δύο να παραμένει σταθερό.

Μία από τις κοιλότητες αέρα που υπάρχουν στο ανθρώπινο σώμα είναι αυτή του μέσου ωτός. Η πίεση σε αυτό είναι περίπου ίση με την ατμοσφαιρική πίεση έξω από το τύμπανο.

Η εξίσωση των δύο πιέσεων προκύπτει από τη ροή αέρα δια μέσου της *ευσταχιανής σάλπιγγας*, η οποία είναι συνήθως κλειστή εκτός όταν καταπίνουμε, μασάμε ή χασμουριόμαστε.

Πολλοί άνθρωποι, κατά τη διάρκεια της κατάδυσης, παρουσιάζουν δυσκολία στην εξίσωση των πιέσεων και αισθάνονται πίεση στα αυτιά τους.

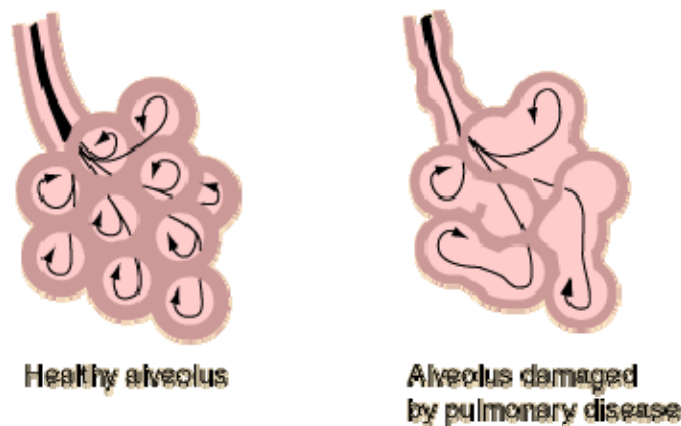
Διαφορά πίεσης της τάξης 17 kPa (120 mmHg) μεταξύ των δύο πλευρών του τυμπάνου, που μπορεί να συμβεί σε βάθος περίπου 1,7 m νερού, μπορεί να προκαλέσει διάρρηξή του.

Μία λιγότερο σοβαρή κατάσταση είναι η συμπίεση στις κοιλότητες του προσώπου. Κατά την κατάδυση η πίεση στις κοιλότητες συνήθως εξισώνεται με την εξωτερική πίεση. Αν όμως ο δύτης είναι κρωμένος, οι κοιλότητες μπορεί να αποφραχθούν και η πίεση σε αυτές δεν εξισώνεται με την εξωτερική προκαλώντας πόνο.

Επίσης, πόνος είναι δυνατό να προκληθεί, κατά τη διάρκεια ή μετά την κατάδυση, από μικρές ποσότητες αέρα που παγιδεύονται κάτω από τυχόν σφραγίσματα στα δόντια.

Αν ένας αυτοδύτης βρίσκεται σε βάθος 10 m, κρατήσει την αναπνοή του και επιστρέψει στην επιφάνεια, ο όγκος που καταλαμβάνει ο αέρας θα διπλασιαστεί προκαλώντας έτσι σημαντική αύξηση της πίεσης στους πνεύμονες.

Αν οι πνεύμονες είναι γεμάτοι από αέρα αρκούν 1,2 m ανάδυσης για την πρόκληση σοβαρής βλάβης στους πνεύμονες.



Όλοι οι αυτοδύτες, κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσής τους, μαθαίνουν πώς να αποφεύγουν την κατάσταση αυτή και να εκπνέουν συνεχώς αν απαιτείται γρήγορη ανάδυση.

Η πίεση στους πνεύμονες σε οποιοδήποτε βάθος είναι μεγαλύτερη από την πίεση στους πνεύμονες στην επιφάνεια της θάλασσας.

Δηλαδή, ο αέρας που βρίσκεται μέσα στους πνεύμονες είναι πυκνότερος όταν βρισκόμαστε κάτω από το νερό και η μερική πίεση που ασκεί κάθε συστατικό του αέρα είναι αναλογικά μεγαλύτερη.

Η υψηλότερη μερική πίεση του οξυγόνου προκαλεί μεταφορά περισσότερων μορίων οξυγόνου στο αίμα και δηλητηρίαση από οξυγόνο, όταν η μερική πίεση του οξυγόνου γίνει πολύ μεγάλη.

Αυτό συμβαίνει συνήθως όταν η μερική πίεση του οξυγόνου στους πνεύμονες ξεπεράσει την τιμή των 80 kPa (όταν η απόλυτη τιμή της πίεσης του αέρα είναι πάνω από 4 atm) ή σε βάθος μεγαλύτερο των 30 m.

2.2.3.1 Η νόσος των δυτών

Ενώ το οξυγόνο μεταφέρεται κατά κύριο λόγο με χημική σύνδεση στα ερυθρά αιμοσφαίρια, το άζωτο διαλύεται στο αίμα και στους ιστούς.

Σύμφωνα με τον νόμο του Henry η ποσότητα του αερίου που διαλύεται μέσα σε ένα υγρό είναι ανάλογη της μερικής πίεσης του αερίου που βρίσκεται σε επαφή με το υγρό.

Όσο ο δύτης πηγαίνει σε μεγαλύτερα βάθη, η πίεση του αέρα και επομένως η μερική πίεση του αζώτου αυξάνει. Αύξηση της μερικής πίεσης του αζώτου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας του αζώτου που διαλύεται στο αίμα και από αυτό στους ιστούς.

Το ίδιο ισχύει και για το οξυγόνο, αλλά αυτό χρησιμοποιείται από τους ιστούς. Όταν ο δύτης ανεβαίνει προς την επιφάνεια της θάλασσας η περίσσεια του αζώτου που υπάρχει στους ιστούς πρέπει να απομακρυνθεί διαμέσου του αίματος και των πνευμόνων.

Η απομάκρυνση του αζώτου είναι μια αργή διαδικασία και όταν ο δύτης αναδύεται γρήγορα, δημιουργούνται φυσαλίδες στους ιστούς και τις αρθρώσεις. Η νόσος των δυτών είναι πολύ επώδυνη.

Δύτες που πάσχουν από τη νόσο αυτή συνήθως επανασυμπιέζονται σε ένα θάλαμο αποσυμπίεσης, στον οποίο η πίεση ελαττώνεται αργά, έτσι ώστε το άζωτο να απομακρυνθεί από τους ιστούς διαμέσου του αίματος και των πνευμόνων.

2.2.4 Υπερβαρικός θάλαμος

Η ατμόσφαιρα μέσα στην οποία ζει το ανθρώπινο σώμα αποτελείται περίπου από ένα πέμπτο οξυγόνο και τέσσερα πέμπτα άζωτο.

Σε μερικές ιατρικές καταστάσεις απαιτείται η αύξηση της αναλογίας του οξυγόνου για να παρέχεται περισσότερο οξυγόνο στους ιστούς.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται συχνά σκηνές οξυγόνου. Για να αυξηθεί το ποσό του οξυγόνου οι μηχανικοί ιατρικής κατασκεύασαν ειδικούς θαλάμους υψηλής πίεσης οξυγόνου (*υπερβαρικοί*).

Οι διαστάσεις των θαλάμων ποικίλουν ευρέως ανάλογα με το εάν χρησιμοποιούνται για ένα μόνο ασθενή ή ως θάλαμοι χειρουργείων.

Πριν ανακαλυφθεί η θεραπεία με υπερβαρικό οξυγόνο, πάνω από τους μισούς ασθενείς που υπέφεραν από γάγγραινα έχασαν τη ζωή τους.

Αφού ο βάκιλος που προκαλεί τη γάγγραινα δεν επιβιώνει παρουσία οξυγόνου, στον υπερβαρικό θάλαμο θεραπεύονται όλοι σχεδόν οι ασθενείς και έτσι δεν χρειάζεται να γίνει ακρωτηριασμός, όπως γινόταν παλαιότερα.

Σε περίπτωση δηλητηριάσεως με μονοξείδιο του άνθρακα, τα ερυθρά αιμοσφαίρια δεν μπορούν να μεταφέρουν οξυγόνο στους ιστούς, λόγω του ότι το μονοξείδιο του άνθρακα εμποδίζει την αιμοσφαιρίνη να μεταφέρει οξυγόνο.

Η παρουσία ακόμη και ελάχιστων μορίων μονοξειδίου του άνθρακα σε ένα ερυθρό αιμοσφαίριο ελαττώνει σημαντικά την ικανότητά του να μεταφέρει οξυγόνο.

Συνήθως το ποσοστό του οξυγόνου που είναι διαλυμένο στο αίμα είναι περίπου το 2% του συνολικού οξυγόνου που μεταφέρεται από τα ερυθρά αιμοσφαίρια.

Στον υπερβαρικό θάλαμο η μερική πίεση του οξυγόνου μπορεί να αυξηθεί κατά έναν παράγοντα 15, επιτρέποντας την απελευθέρωση οξυγόνου σε ποσότητα που καλύπτει τις ανάγκες του σώματος.

Πολλά θύματα δηλητηρίασης από μονοξείδιο του άνθρακα επέζησαν χάρη σε αυτή την τεχνική.

3. Ροή Ρευστών

Ενδιαφέρουσα για τη λειτουργία του ανθρώπινου σώματος είναι η μελέτη της συμπεριφοράς και της κίνησης αμφότερων των ρευστών: υγρών και αερίων.

3.1 Νόμος των Ιδανικών Αερίων

Η πίεση P ενός ιδανικού αερίου εξαρτάται από την πυκνότητά του και τη θερμοκρασία: $P = n \cdot R \cdot T$ όπου $n = N/V$

N ο αριθμός των μορίων σε έναν όγκο V

R η σταθερά των αερίων $= N_A k_B = 8,31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$

N_A ο αριθμός Avogadro $= 6,02 \cdot 10^{23}$

k_B η σταθερά Boltzmann $= 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

T η απόλυτη θερμοκρασία

3.2 Αρχή του Pascal

Η πίεση που θα εξασκηθεί στη μάζα συγκεκριμένου ρευστού θα αυξήσει την προϋπάρχουσα πίεση, κατά τον ίδιο τρόπο, σε όλη του τη μάζα.

3.3 Αρχή του Αρχιμήδη

Η άνωση που δέχεται ένα σώμα βυθισμένο σε ρευστό είναι ίση με το βάρος του ρευστού που εκτοπίζει.

3.4 Νόμος Laplace

Ο νόμος Laplace συσχετίζει τη διαφορά της διατοιχωματικής πίεσης ΔP , π.χ. σε ένα δοχείο (με λεπτό τοίχωμα συγκεκριμένου σχήματος), με την τάση (T) (δύναμη ανά μονάδα μήκους) στο τοίχωμα.

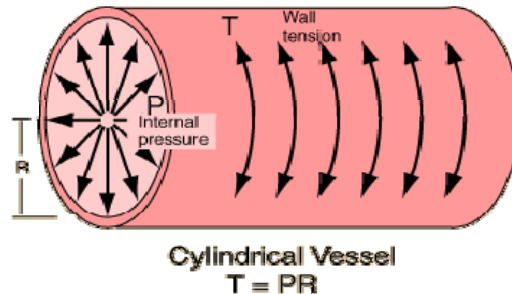
Η πίεση που εξασκεί το αίμα στο τοίχωμα του αιμοφόρου αγγείου είναι μεγαλύτερη κατά ΔP από την εξωτερική πίεση στο τοίχωμα.

Ο νόμος Laplace, που ισχύει για οποιοδήποτε κύλινδρο, δίνει απάντηση στο ερώτημα: πόση δύναμη τάσης μπορεί να αντέξει το τοίχωμα του αιμοφόρου αγγείου;

Για τον κύλινδρο $\Delta P = T/r$ όπου r η ακτίνα του.

Για την σφαίρα $\Delta P = 2T/r$

Ενώ γενικότερα, για περίπου σφαιρικό δοχείο (ελλειψοειδές) $\Delta P = T/r_1 + T/r_2$



3.5 Ρευστά σε κίνηση

Προκειμένου να μελετηθεί η κίνηση ενός ρευστού πρέπει να έχουν καθοριστεί τα εξής χαρακτηριστικά:

- (i) αν η ροή είναι ομαλή (στρωτή) ή τυρβώδης (στροβιλώδης). Στην ομαλή ροή κάθε «μόριο» του ρευστού εκτελεί ομαλή κίνηση και οι τροχιές ομάδας μορίων μπορούν να παρασταθούν με περίπου παράλληλες αλλά μη διασταυρούμενες ρευματικές γραμμές.

Στην τυρβώδη ροή η κίνηση κάθε μορίου είναι τυχαία μεταβαλλόμενη σε χρόνο και χώρο. Ο αριθμός Reynolds Re είναι μια σταθερά (καθαρός αριθμός) που χαρακτηρίζει κάθε κινούμενο ρευστό και η τιμή της υπεισέρχεται στον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας v_c , πάνω από την οποία, η ομαλή ροή ενός ρευστού τρέπεται σε τυρβώδη. Η κρίσιμη ταχύτητα κάθε ρευστού εξαρτάται και από την πυκνότητά του (ρ) και από το συντελεστή εσωτερικής τριβής (η).

$$Re = 2r \cdot v \cdot \rho / \eta$$

Όσο η τιμή της $Re < 2000$ (περίπου) η ροή παραμένει στρωτή

Όταν η Re ξεπεράσει την τιμή 3000 περίπου, η ροή τρέπεται σε στροβιλώδη

- (ii) τα ρευστά μπορεί να είναι συμπιεστά (κυρίως τα αέρια) ή ασυμπίεστα
- (iii) τα ρευστά μπορεί να έχουν εσωτερική τριβή (όπως συμβαίνει στην πράξη) ή μπορεί να θεωρηθεί πως δεν έχουν
- (iv) η ροή μπορεί να είναι συνεχής ή παλμική (όπως στην περίπτωση του αίματος).

3.6 Νόμος της Συνέχειας

Πρόκειται, ουσιαστικά, για την αρχή της διατήρησης της μάζας κατά τη ροή. Σε κάθε διατομή εμβαδού S του σωλήνα θα περνά ένας στοιχειώδης όγκος dV του ρευστού σε χρόνο dt . Η παροχή Π (ρυθμός ροής) θα είναι:

$$\Pi = dV/dt = S \cdot dl/dt \text{ όπου } dl \text{ η στοιχειώδης διαδρομή.}$$

Όμως dl/dt είναι η ταχύτητα (v) του ρευστού. Επομένως:

$$\Pi = S \cdot v$$

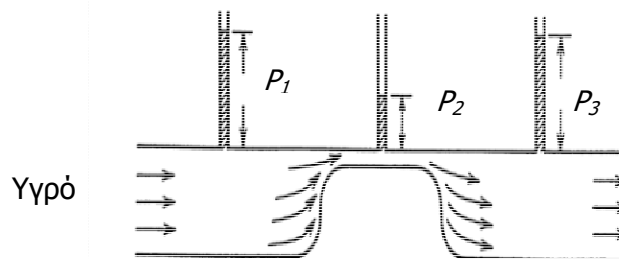
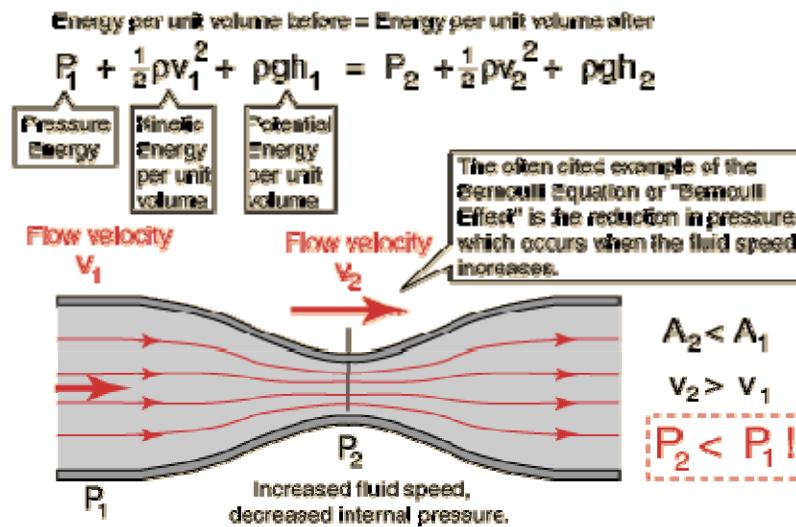
Εφόσον η μάζα διατηρείται (δεν χάνεται, ούτε συμπιέζεται) στην ομαλή ροή θα ισχύει:

$$\Pi = \text{σταθερό} = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

(όπου 1 και 2 δυο διαφορετικά σημεία κατά μήκος της ροής).

Αυτός είναι ο νόμος της συνέχειας.

3.7 Νόμος του Bernoulli



Είναι ουσιαστικά η αρχή της διατήρησης της ενέργειας κατά τη ροή:

$$P_1 + 1/2 \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + 1/2 \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

όπου 1 και 2 δυο διαφορετικά σημεία κατά μήκος της ροής και

P η στατική πίεση στο ρευστό

ρ η πυκνότητα (μάζας) του ρευστού

v η ταχύτητα του ρευστού

g η επιτάχυνση της βαρύτητας

h η υψομετρική διαφορά από ένα επίπεδο αναφοράς (π.χ. το χαμηλότερο στο πεδίο – δίκτυο της ροής).

Ο νόμος του Bernoulli ισχύει για ασυμπίεστα και χωρίς εσωτερική τριβή ρευστά και αν επρόκειτο για ενέργεια (αντί για πίεση) θα μπορούσε να εκφραστεί ως: 'το άθροισμα της εσωτερικής, κινητικής και δυναμικής ενέργειας είναι σταθερό σε κάθε σημείο κατά μήκος της ροής'.

Συνδυασμός των νόμων της συνέχειας και του Bernoulli (και θεωρώντας, για απλούστευση, ροή σε ένα σταθερό ύψος) ερμηνεύει το γεγονός ότι σε σημείο (μικρή περιοχή) αρτηρίας με αθηρωματική πλάκα (στένωση) η ταχύτητα ροής αυξάνεται και η πίεση μειώνεται.

3.8 Αντίσταση στη ροή

Η πίεση P , ο όγκος V και η παροχή Π συσχετίζονται κατά τη ροή σε αγγεία, είτε όταν πρόκειται για τη ροή αίματος στο κυκλοφορικό, είτε όταν πρόκειται για τη ροή αέρα κατά την αναπνοή.

Η αντίσταση R στη ροή είναι ανάλογη της διαφοράς πίεσης ΔP που απαιτείται για την πρόκληση παροχής Π και ισχύει

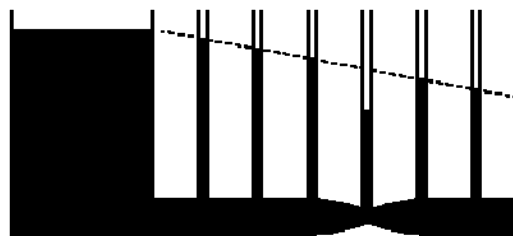
$$R = \Delta P / \Pi, \text{ ενώ υπενθυμίζεται πως } \Pi = \Delta V / \Delta t$$

Η αντίσταση στη ροή είναι εννοιολογικά ανάλογη της ηλεκτρικής αντίστασης, η ΔP είναι ανάλογη της διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού και η παροχή Π είναι ανάλογη με την έννοια της έντασης του ρεύματος.

3.9 Εσωτερική τριβή και νόμος του Poiseuille

Από το νόμο του Bernoulli συμπεραίνεται ότι η πίεση δεν μεταβάλλεται στη διάρκεια της ροής, αν δεν μεταβληθεί η διατομή ή το ύψος.

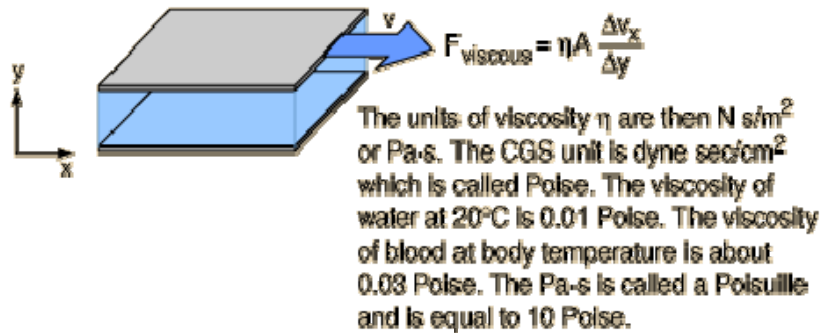
Αυτό ισχύει μόνο για ιδανικά υγρά χωρίς εσωτερική τριβή. Δεν ισχύει για τα πραγματικά υγρά των οποίων η πίεση μειώνεται εξαιτίας της εσωτερικής τριβής.



Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής η ορίζεται από τη σχέση:

$$F = \eta \cdot A/\gamma \cdot v$$

όπου F η δύναμη που απαιτείται για τη μετακίνηση (κατά την κατεύθυνση της ροής έστω x) επιφάνειας (εμβαδού A) του ρευστού, με ταχύτητα v , όταν η επιφάνεια A απέχει γ από το (παράλληλο) τοίχωμα του σωλήνα ή δοχείου (x και γ σύστημα αξόνων, με x οριζόντιο, όταν η ροή είναι οριζόντια).



Αν $\tau = F/A$, η ανωτέρω σχέση γράφεται: $\tau = \eta \cdot dv/dy$, όπου ο λόγος dv/dy λέγεται βάρθρωση της ταχύτητας και όσα ρευστά υπακούουν στην ανωτέρω σχέση καλούνται νευτώνια (για τα μη νευτώνια ρευστά η παραπάνω σχέση έχει τη βάρθρωση της ταχύτητας σε κάποια δύναμη).

Στο Διεθνές Σύστημα μονάδων ο συντελεστής η μετρείται σε $N \cdot s/m^2$, δηλαδή $kg \cdot s/m$ ή $Pa \cdot s$.

Επειδή υπάρχει ο συντελεστής εσωτερικής τριβής στα ρευστά, για να διατηρηθεί η ροή σε ένα αγγείο – σωλήνα απαιτείται η «παρουσία» «κινητήριας» διαφοράς πίεσης.

Ο νόμος του Poiseuille συσχετίζει την παροχή με την «κινητήρια» διαφορά πίεσης και το συντελεστή εσωτερικής τριβής η :

$$\Pi = [\pi \cdot r^4 / 8\eta \cdot l] \cdot (P_1 - P_2)$$

όπου Π η παροχή

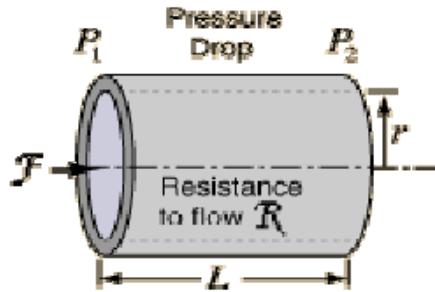
r η ακτίνα του αγγείου – σωλήνα

l η απόσταση μεταξύ των σημείων 1 και 2

P η πίεση

Ανακαλώντας και πάλι το νόμο του Ohm από τον Ηλεκτρισμό, όπως στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, η αντίσταση ροής θα είναι

$$R = 8\eta \cdot l / \pi \cdot r^4$$



$$\text{Volume Flowrate} = \mathcal{F} = \frac{P_1 - P_2}{\mathcal{R}} = \frac{\pi(\text{Pressure difference})(\text{radius})^4}{8(\text{viscosity})(\text{length})}$$

$$\text{Resistance to Flow } \mathcal{R} = \frac{8\eta L}{\pi r^4}$$

Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής του ύδατος είναι $1,78 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ στους 0°C , αλλά μειώνεται στο $1,00 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, στους 20°C , επειδή η αύξηση της κινητικής ενέργειας των μορίων τα «απελευθερώνει» από διαμοριακές δυνάμεις. Ο συντελεστής του πλάσματος είναι $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ στους 37°C , ενώ του αίματος είναι $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής των αερίων αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (αντίθετα από που ισχύει στα υγρά), επειδή αυξάνεται η διάχυση μεταξύ γειτονικών στρωμάτων.

3.10 Ρευστά στο ανθρώπινο σώμα

3.10.1 Αίμα

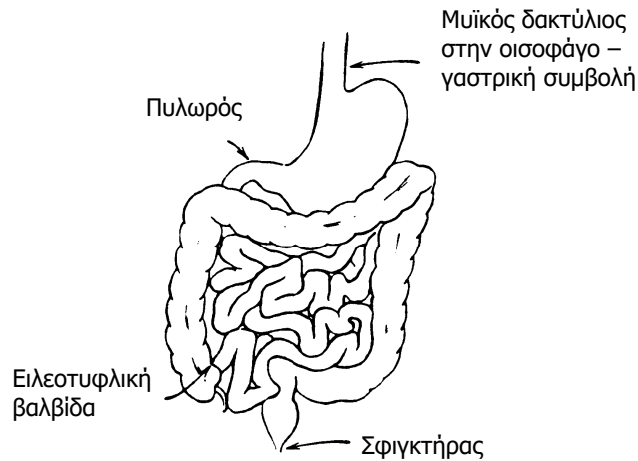
Η πίεση του αίματος στον άνθρωπο κυμαίνεται μεταξύ 1-140 mmHg στα διάφορα αγγεία και η ταχύτητα μεταξύ 0,05 – 50 cm ανά δευτερόλεπτο. Από την καρδιά περνούν περίπου 5 L (λίτρα) ανά λεπτό.

3.10.2 Πνεύμονες

Η διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού των πνευμόνων και του εξωτερικού είναι αρκετά mmHg και ο εισπνεόμενος όγκος αέρα είναι περίπου 6L ανά λεπτό (ίσος με τον εκπνεόμενο).

3.10.3 Πεπτική οδός

Η ροή στην πεπτική οδό είναι πολύ αργή και εξαρτάται από τη θέση: είναι λίγο ταχύτερη στο στόμα, τον φάρυγγα και τον οισοφάγο και αποκτά πολύ χαμηλότερες τιμές στο στομάχι και το έντερο.



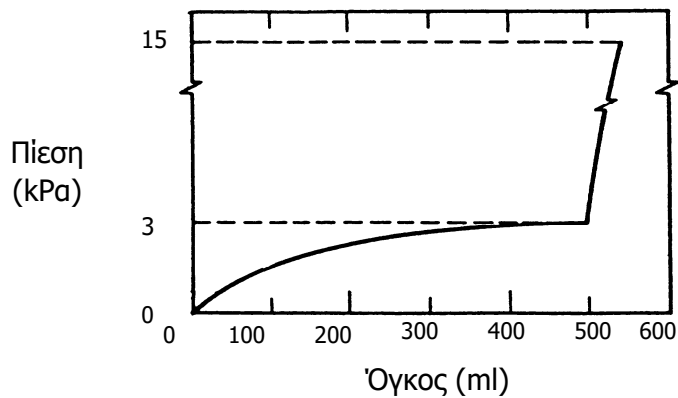
Η κίνηση στην πεπτική οδό υποβοηθείται ή ενεργοποιείται με μυϊκές συσπάσεις. Ευαίσθητοι αισθητήρες και σύστημα ανάδρασης διεγείρουν μια βαθμιαία σύσφιξη του τοιχώματος του εντέρου, ώστε να ωθήσει το περιεχόμενο προς τον έξοδο. Περισταλτική δράση των μυών διευκολύνει και την συχνή ανάμειξη του περιεχομένου. Η περισταλτική κίνηση είναι ένα προσδευτικό κύμα χάλασης που ακολουθείται από συστολή - σύσφιξη.

Η σχέση μεταξύ όγκου και πίεσης είναι σημαντική στο πεπτικό σύστημα. Η τάση στο τοίχωμα του στομάχου αυξάνεται με την είσοδο της τροφής. Ο όγκος του στομάχου είναι ανάλογος της ακτίνας r^3 (στην τρίτη δύναμη), ενώ η τάση στο τοίχωμα είναι ανάλογη της ακτίνας r (στην πρώτη δύναμη). Η εσωτερική πίεση όμως στο στομάχι αυξάνεται αισθητά από

- (i) τον αέρα που καταπίνουμε αναπόφευκτα όσο τρώμε και
- (ii) τη δράση των βακτηριδίων που παράγουν αέρια.

3.10.4 Ουροδόχος κύστη

Στην ουροδόχο κύστη, όπως και στο στομάχι, η εσωτερική πίεση αυξάνεται με βραδύτερο ρυθμό από τον ρυθμό της αύξησης του όγκου της. Ο όγκος των ούρων μπορεί να φθάσει 200-300 mL με μικρή μόνον αύξηση της εσωτερικής πίεσης. Όμως όταν ο όγκος ξεπεράσει τα 400 mL περίπου, η πίεση αυξάνεται με ταχύ ρυθμό και εμφανίζεται η ανάγκη ούρησης. Η τάση στο τοίχωμα αυξάνει ανάλογα της ακτίνας και ένας ευαίσθητος αισθητήρας θα έπρεπε να «παρακολουθεί» αυτήν την τάση και όχι την εσωτερική πίεση, που διατηρείται σχεδόν σταθερή.

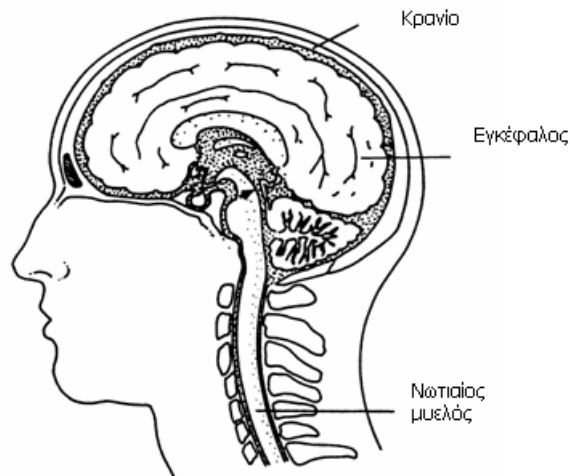


3.10.5 Εγκέφαλος

Στην εικόνα διακρίνονται η θέση του εγκεφαλονωτιαίου υγρού ΕΝΥ (σκιασμένη περιοχή). Το υγρό αυτό, αφενός συγκρατεί και προστατεύει τον ευαίσθητο εγκέφαλο, αφετέρου συνεχώς παράγεται και κυκλοφορεί στο εσωτερικό του κρανίου και στη σπονδυλική στήλη.

Μία από τις κοιλίες του εγκεφάλου, ο υδραγωγός, είναι αρκετά στενή. Αν για κάποιο λόγο κατά τη γέννηση δημιουργηθεί απόφραξη στην κοιλότητα αυτή, το ΕΝΥ παγιδεύεται μέσα στο κρανίο και αυξάνει την εσωτερική πίεση. Η αύξηση της εσωτερικής πίεσης στο κρανίο προκαλεί αύξηση των διαστάσεων του κρανίου. Η σοβαρή αυτή κατάσταση ονομάζεται *υδροκεφαλία* και δεν είναι σπάνιο φαινόμενο στα βρέφη.

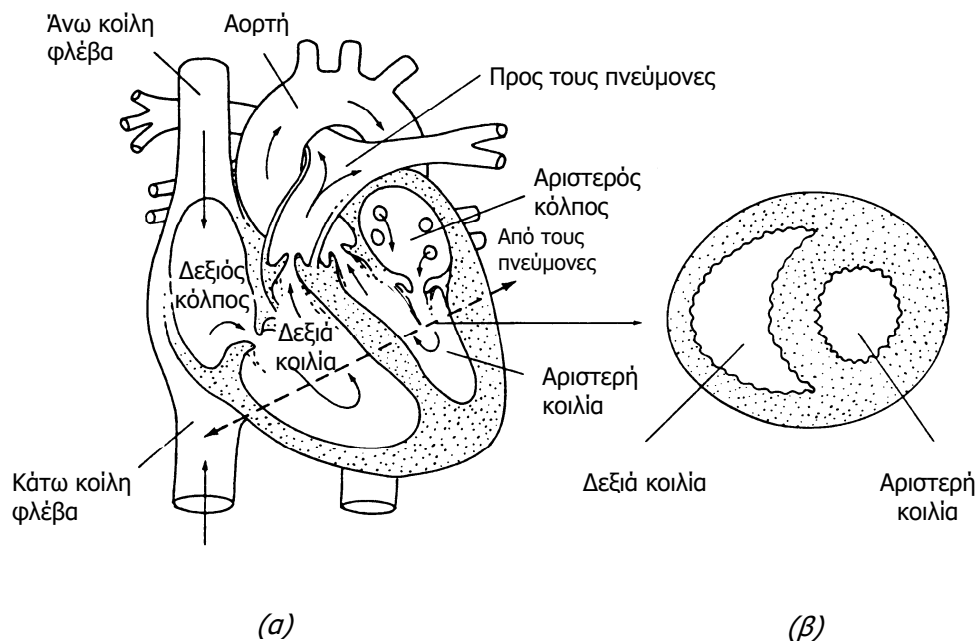
Παρόλα αυτά, αν η βλάβη διαγνωσθεί έγκαιρα, συνήθως διορθώνεται με χειρουργική παράκαμψη (bypass) για την απελευθέρωση της κυκλοφορίας και την απαγωγή του ΕΝΥ.



4. Το Καρδιαγγειακό Σύστημα

Τρία μέρη συναποτελούν το καρδιαγγειακό σύστημα:

- (α) το αίμα που είναι το μέσο μεταφοράς
 - (i) θρεπτικών συστατικών (καύσιμα) προς τα κύτταρα
 - (ii) οξυγόνου από τις κυψελίδες των πνευμόνων προς τους ιστούς και
 - (iii) απόβλητων των αντιδράσεων καύσης από τους ιστούς προς το απεκκριτικό σύστημα (ήπαρ και νεφροί) και διοξειδίου του άνθρακα από τα κύτταρα προς τις κυψελίδες των πνευμόνων
- (β) το σύστημα διανομής, δηλαδή σειρά συνεχώς διακλαδούμενων αγγείων και
- (γ) η καρδιά, δηλαδή η αντλία - καρδιακός μυς τεσσάρων χώρων, που κρατά σε συνεχή λειτουργία τη ροή του αίματος.



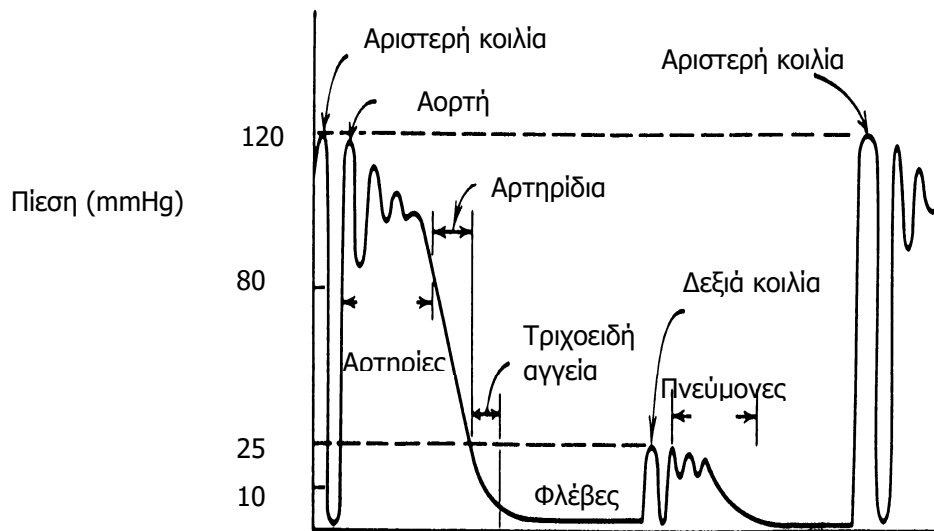
4.1 Το κυκλοφορικό σύστημα

Το αίμα κυλά στα αγγεία που κατανέμονται σε δυο μεγάλα υποσυστήματα:

(α) στη «μεγάλη κυκλοφορία», στην οποία αίμα πλούσιο σε οξυγόνο ξεκινά από το αριστερό μέρος της καρδιάς και κατευθύνεται προς όλα τα κύτταρα του σώματος, όπου ξοδεύει το οξυγόνο και συλλέγει το διοξείδιο του άνθρακα (μαζί με τα άλλα απόβλητα) και

(β) στη «μικρή κυκλοφορία», στην οποία το αίμα που έχει επιστρέψει στο δεξί μέρος της καρδιάς, «επανεκπέμπεται» προς τους πνεύμονες. Στις κυψελίδες το αίμα εναποθέτει το άχρηστο CO₂ προς εκπνοή και παραλαμβάνει νέο οξυγόνο. Το οξυγονομένο αίμα επιστρέφει στο αριστερό μέρος της καρδιάς, έτοιμο να κυλήσει πάλι στη μεγάλη κυκλοφορία.

Τα αγγεία που ξεκινούν από την αριστερή κοιλία είναι με τη σειρά: η αορτή, οι κύριες αρτηρίες, τα αρτηρίδια, το τριχοειδικό σύστημα (όπου και γίνεται το κύριο μέρος της ανταλλαγής $O_2 \leftrightarrow CO_2$), οι μικρές φλέβες (φλεβίδια), σταδιακά όλο και μεγαλύτερες φλέβες μέχρι το δεξί τμήμα της καρδιάς στο οποίο καταλήγουν οι άνω και κάτω κοίλες φλέβες. Η δεξιά κοιλία της καρδιάς, στην επόμενη κοιλιακή συστολή, θα στείλει το αίμα στις πνευμονικές αρτηρίες, στο τριχοειδικό σύστημα των πνευμόνων και στις κύριες φλέβες, που οδηγούν το οξυγονωμένο πλέον αίμα στο αριστερό τμήμα της καρδιάς.



Τα 5 L αίματος ενός μέσου ενήλικα κατανέμονται:

1 L στις αρτηρίες και

3,5 L στις φλέβες της μεγάλης κυκλοφορίας, ενώ

0,1 L και 0,4 L βρίσκονται στις αρτηρίες και φλέβες αντίστοιχα της μικρής κυκλοφορίας.

4.2 Ιδιότητες του αίματος

Το αίμα είναι ένα μη-νευτώνιο υγρό κυρίως επειδή είναι ανομοιογενές. Το αίμα αποτελείται από πλάσμα, ερυθρά αιμοσφαίρια (5 εκατομμύρια ανά κυβικό χιλιοστόμετρο, 45% του συνολικού όγκου του αίματος), λευκά αιμοσφαίρια (0,30%) και αιμοπετάλια (0,15%).

Τα ερυθροκύτταρα είναι αμφίκυκλοι δίσκοι με πολύ λεπτή κεντρική περιοχή και παχύτερη περιφέρεια. Η διάμετρός τους είναι περίπου 7,5 μm και το μέγιστο πάχος τους περίπου 2 μm . Η διάμετρός τους είναι της τάξης μεγέθους της εσωτερικής διαμέτρου των τριχοειδών αγγείων, αλλά τα ερυθροκύτταρα είναι ελαστικά και μπορούν να περάσουν και σε αγγεία μικρότερης διατομής.

Τα λευκοκύτταρα έχουν πιο σφαιρικό σχήμα με διάμετρο περίπου 7 μm , ενώ τα αιμοπετάλια είναι πολύ μικρότερα.

Το πλάσμα αποτελείται από 90% νερό (και 10% διαλυμένες ουσίες: ανόργανα ιόντα, πρωτεΐνες, σάκχαρο, αμινοξέα, λίπη, ορμόνες, βιταμίνες, O₂, CO₂) και συμπεριφέρεται ως νευτώνιο υγρό. Η ποσοστιαία αναλογία των ερυθρών αιμοσφαιρίων στο αίμα (το 45%) λέγεται και αιματοκρίτης και είναι αυτός που καθορίζει την εσωτερική τριβή κατά τη ροή του αίματος. Το πλάσμα έχει συντελεστή εσωτερικής τριβής $\eta_{\text{πλ}} = 0,0012 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, ενώ το αίμα ως σύνολο $\eta_{\text{αμ}} = 0,004 - 0,005 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

4.2.1 Τα έμμορφα συστατικά του αίματος

Μετά από τραυματισμό εκλύεται κυρίως φλεβικό αίμα δεδομένου ότι οι φλέβες βρίσκονται πλησιέστερα στο δέρμα. Το φλεβικό αίμα έχει σκούρο ερυθρό χρώμα λόγω μειωμένου οξυγόνου, όμως, όταν έρθει σε επαφή με την ατμόσφαιρα, οξυγονώνεται σε κλάσμα του δευτερολέπτου και εμφανίζει φωτεινό ερυθρό χρώμα.

Το ερυθρό χρώμα του αίματος οφείλεται στα ερυθρά κύτταρα (ή ερυθροκύτταρα ή ερυθρά αιμοσφαίρια) που αντιπροσωπεύουν το 45% του όγκου του αίματος. Η συγκέντρωσή τους είναι $5 \cdot 10^6$ ανά mm^3 αίματος και η μέση διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 3 μήνες.

Τα λευκά κύτταρα του αίματος (ή λευκοκύτταρα ή λευκά αιμοσφαίρια) είναι βασικό στοιχείο του ανοσοποιητικού συστήματος, παίζουν σημαντικό ρόλο στην καταπολέμηση των νόσων, αλλά είναι πολύ λιγότερα από τα ερυθρά: 8000 ανά mm^3 αίματος. Όταν όμως παρουσιαστεί κάποια λοίμωξη στο σώμα, ο αριθμός των λευκών αιμοσφαιρίων αυξάνεται. Υπάρχουν αρκετοί τύποι λευκοκυττάρων που αντιδρούν με διαφορετικό τρόπο στις λοιμώξεις. «Διαφορική μέτρηση» (λευκοκυτταρικός τύπος) παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για το είδος της λοίμωξης.

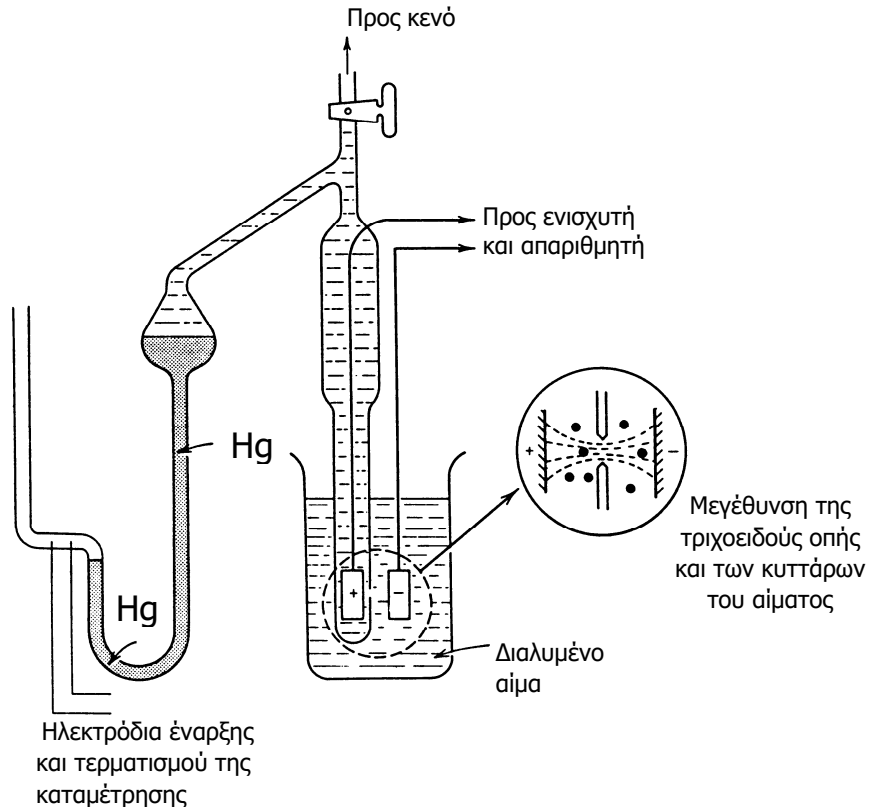
Τα αιμοπετάλια είναι πολύ μικρότερα (με διάμετρο 1-4 μm), σε αρκετή ποσότητα ($3 \cdot 10^5$ ανά mm^3 αίματος) και σχετίζονται με την θρομβωτική λειτουργία του αίματος. Ζουν μόνο 3 μέρες κατά μέσο όρο, δηλαδή κάθε δευτερόλεπτο πεθαίνουν περίπου 5 εκατομμύρια και αντίστοιχα άλλα τόσα παράγονται.

Το αίμα δρα ως μηχανισμός μεταφοράς και μικρών ποσοτήτων ορμονών (που ελέγχουν χημικές διεργασίες του σώματος), ηλεκτρολυτών (δηλαδή μεταλλικά ιόντα) (π.χ. 100 ml αίματος περιέχουν 10 mg Ca, που αν μειωθούν, το νευρικό σύστημα παύει να λειτουργεί φυσιολογικά), πρωτεϊνών, υδρογονανθράκων και λιπιδίων.

4.2.2 Μέτρηση των ερυθρών αιμοσφαιρίων

Παλαιότερα, η μέτρηση των ερυθρών αιμοσφαιρίων γινόταν με αραιώση γνωστής ποσότητας αίματος και (υποκειμενική) μέτρηση των κυττάρων μιας σταγόνας τοποθετημένης στην αντικειμενοφόρο πλάκα μικροσκοπίου. Δηλαδή μέτρηση κοπιαστική και περιορισμένης ακρίβειας.

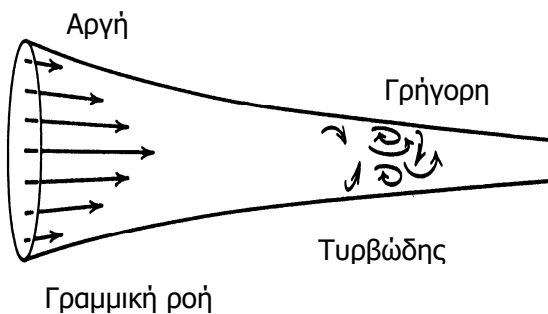
Σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως ο μετρητής Coulter, στον οποίο το αραιωμένο αίμα διέρχεται (με ελεγχόμενη πίεση) από τριχοειδή οπή τοποθετημένη ανάμεσα σε δυο ηλεκτρόδια, με τα οποία μετρείται η ηλεκτρική αντίσταση της οπής. Κάθε διερχόμενο ερυθρό αιμοσφαίριο προκαλεί στιγμιαία μεταβολή αυτής της αντίστασης που «μεταφράζεται» σε ηλεκτρικό παλμό.



4.2.3 Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής (γλοιότητα) του αίματος

Η γλοιότητα είναι μια έκφραση του βαθμού της ολισθηρότητας μεταξύ δυο γειτονικών στρωμάτων του υγρού. Για τη μελέτη της γλοιότητας του αίματος μέσα σε αγγείο η διαστρωμάτωση γίνεται κατά ομόκεντρες κυλινδρικές επιφάνειες. Η ταχύτητα του αίματος αυξάνεται από το τοίχωμα βαθμιαία προς τον κεντρικό άξονα του αγγείου και το προφίλ του ανύσματος της ταχύτητας θα ήταν παραβολικό αν το υγρό ήταν ομοιογενές και η ροή στρωτή. Όμως το αίμα μπορεί μεν να θεωρηθεί ασυμπίεστο υγρό, αλλά η σύστασή του δεν είναι ομοιογενής και η ροή του γίνεται με παλμούς και μερικές φορές με «δίνες».

Η ροή του αίματος είναι συνήθως στρωτή, τρέπεται όμως σε στροβιλώδη όπου η ακτίνα του αγγείου είναι μεγάλη (π.χ. αορτή) ή όταν η ταχύτητα αυξηθεί τοπικά (π.χ. στις βαλβίδες της καρδιάς ή σε κάποια στένωση από αθηρωματική πλάκα).

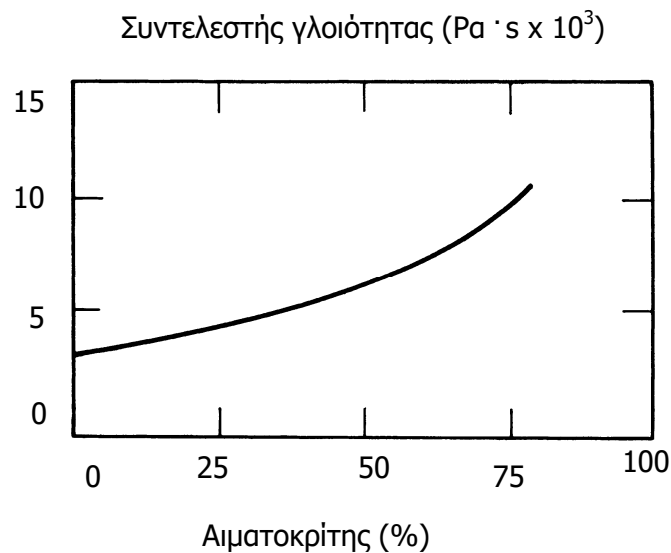


Η διάκριση μεταξύ στρωτής και στροβιλώδους ροής έχει μεγάλη κλινική σημασία. Η στρωτή ροή είναι σιωπηλή, ενώ η στροβιλώδης προκαλεί θόρυβο, τα αποκαλούμενα «φυσήματα», που είναι ήχοι Korotkoff, χρήσιμοι για την παραδοσιακή ακουστική μέθοδο προσδιορισμού της αρτηριακής πίεσης ή για τη διάγνωση στένωσης αγγείου.

Η τιμή του συντελεστή εσωτερικής τριβής του αίματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι κυριότεροι των οποίων είναι

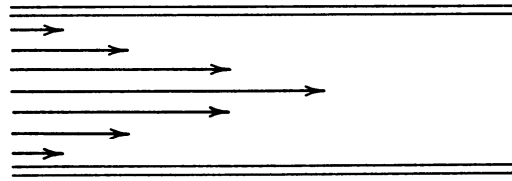
(α) η συγκέντρωση του ινωδογόνου (κύριο πρωτεϊνικό συστατικό του αίματος που σε ακραίες καταστάσεις οδηγεί σε συσσωματώματα ερυθροκυττάρων),

(β) ο αιματοκρίτης (με αιματοκρίτη > 60% τα ερυθροκύτταρα είναι τόσο κοντά το ένα με το άλλο που είναι πιθανό να προσκολλούνται μεταξύ τους),

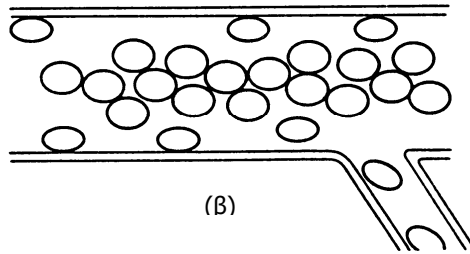


(γ) η ακτίνα του αγγείου (για $r > 1 \text{ mm}$ η γλοιότητα του αίματος είναι ανεξάρτητη της ακτίνας. Όμως για μικρότερα αγγεία η γλοιότητα ελαττώνεται σημαντικά για τέσσερις λόγους:

- (i) η συγκέντρωση των ερυθροκυττάρων είναι μεγαλύτερη γύρω από τον κεντρικό άξονα του αγγείου, ενώ κοντά στο τοίχωμα κυριαρχεί το πλάσμα. Τα διακλαδιζόμενα μικρότερα αγγεία διαχωρίζουν επιλεκτικά το πλάσμα από το κύριο ρεύμα αίματος στο «μητρικό» αγγείο, παρόλη την πάχυνση του αρτηριακού τοιχώματος στο στόμιο της διακλάδωσης που παρεμποδίζει κατάτι την επιλεκτική απομάκρυνση του πλάσματος



(a)



(b)

- (ii) τα πολύ μικρά αγγεία επιτρέπουν τη διέλευση λίγων, μόνο, ερυθροκυττάρων ανά διατομή
- (iii) σε ακόμη μικρότερα αγγεία, όπως τα τριχοειδή, η διάμετρος είναι περίπου ίση με τη διάμετρο του δίσκου – ερυθροκυττάρου με αποτέλεσμα η μεμβράνη του ερυθρού αιμοσφαιρίου να κυλιέται γύρω από το κυτταρόπλασμα του. Δυο διαδοχικά ερυθροκύτταρα που εκτελούν αυτήν την κίνηση θέτουν σε περιστροφή την παγιδευμένη ανάμεσά τους ποσότητα πλάσματος
- (iv) σε αγγεία με διάμετρο μικρότερη των ερυθροκυττάρων, τα ερυθρά αιμοσφαίρια παραμορφώνονται μειώνοντας την αντίστασή τους στη ροή του αίματος.

(δ) ο συντελεστής εσωτερικής τριβής του αίματος εξαρτάται και από την *ταχύτητα ροής*. Η σχέση πίεσης-ροής αποκλίνει ελαφρά από την γραμμική μορφή σε μικρές ταχύτητες. Η απόκλιση είναι μεγαλύτερη στην πολυκυτταραιμία. Ερμηνεία γι' αυτό το φαινόμενο αποτελεί, εν μέρει, το ότι η αξονική συγκέντρωση των ερυθρών αιμοσφαιρίων είναι μικρότερη στις μικρές ταχύτητες. Όταν η ταχύτητα ροής αυξηθεί αρκετά, η αξονική συσσώρευση παρουσιάζει κορεσμό και η κατάσταση σταθεροποιείται.

(ε) με την μείωση της *θερμοκρασίας* η γλοιότητα του αίματος αυξάνεται, αλλά το φαινόμενο γίνεται αντιληπτό στους ανθρώπους μόνο σε περίπτωση υπερβολικής ψύξης των άκρων. Σε ορισμένους ασθενείς η παρουσία κρυσταλλών (ανοσοσφαιρίνες που καθιζάνουν όταν $T < 37^{\circ}\text{C}$) στο αίμα μπορεί να προκαλέσει παθολογική αύξηση της γλοιότητας ακόμη και με μικρή ψύξη των άκρων.

4.2.4 Μέτρηση της πίεσης του αίματος

Η πίεση του αίματος μπορεί να μετρηθεί άμεσα σε παρακέντηση του αγγείου, τοποθέτηση καθετήρα που συνδέεται με κλειστό θάλαμο, ένα τοίχωμα του οποίου είναι παραμορφώσιμο ή άκαμπτο διάφραγμα και ένα μετατροπέα της διαφοράς μηχανικής τάσης σε διαφορά ηλεκτρικής αντίστασης, χωρητικότητας ή αγωγιμότητας.

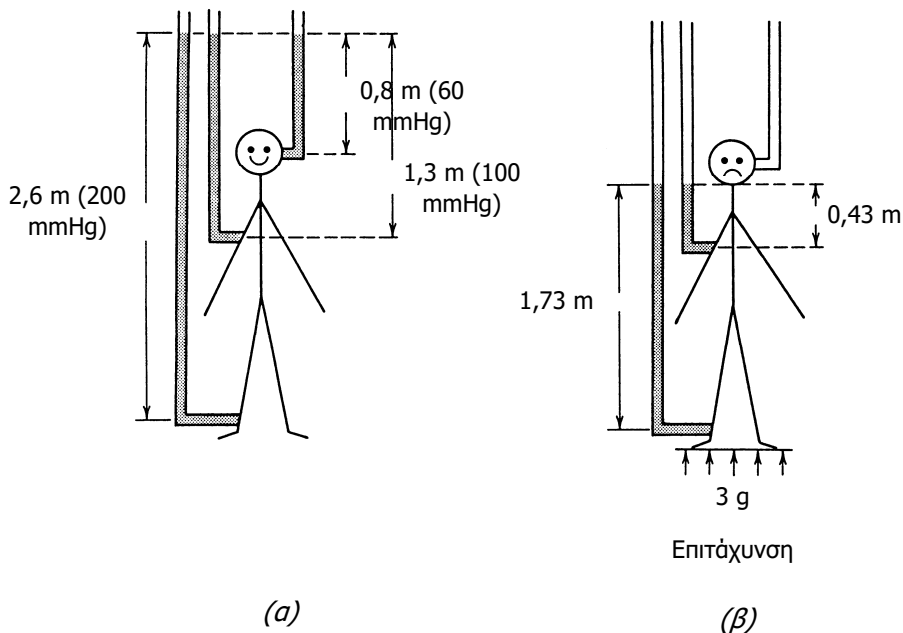
Η πίεση του αίματος μπορεί να μετρηθεί και έμμεσα με πολύ απλούστερο τρόπο. Το σφυγμομανόμετρο είναι μια μη διατατή περιχειρίδα που περιέχει έναν αεροθάλαμο. Η περιχειρίδα τυλίγεται γύρω από τον βραχίονα, μια ελαστική σφαίρα συμπιέζεται από τον χρήστη και διογκώνει τον αεροθάλαμο με εισροή αέρα. Όταν η πίεση στο βραχίονα υπερβεί την τιμή της συστολικής πίεσης, αποφράσσει την υποκείμενη βραχιόνια αρτηρία και σταματά την αιματική ροή. Ο χρήστης ελαττώνει βαθμιαία την πίεση, ανοίγοντας την ειδική βαλβίδα, μέχρι να ψηλαφήσει σφυγμό στην αρτηρία του καρπού ή μέχρι να ακροαστεί ήχους Korotkoff με το στηθοσκόπιό του. Οι ήχοι Korotkoff πηγάζουν από την στροβιλώδη ροή του αίματος στην στενευμένη από την πίεση αρτηρία.

Η πίεση του αεροθαλάμου μετράται με υδραργυρικό ή μηχανικό μανόμετρο. Η ένδειξη της πίεσης, τη στιγμή που αρχίζουν οι ήχοι, αντιστοιχεί στη (μεγάλη) συστολική πίεση. Η ένδειξη της πίεσης, τη στιγμή που σταματούν οι ήχοι, αντιστοιχεί στη (μικρή) διαστολική πίεση, επειδή τότε έχει ανοίξει η αρτηρία αρκετά ώστε η ροή του αίματος να γίνεται πλέον στρωτά.

Η επαναληψιμότητα της μέτρησης της πίεσης συστολής είναι καλύτερη από την αντίστοιχη της πίεσης διαστολής επειδή οι ήχοι στην πρώτη περίπτωση είναι πιο καθαροί.

Η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται από το πάχος του βραχίονα του εξεταζόμενου και το μέγεθος του περιβραχιόνιου πρέπει να προσαρμόζεται, π.χ. στην περίπτωση μέτρησης της πίεσης σε παιδιά, να είναι σημαντικά μικρότερο.

Η βραχιόνια αρτηρία επιλέγεται επειδή βρίσκεται στο ύψος της καρδιάς. Σε άλλες κύριες αρτηρίες η πίεση διαφέρει λόγω της δύναμης της βαρύτητας. Αν όμως επιδρούσε μόνο η βαρύτητα, σε όρθια στάση και λόγω της διαφοράς ύψους, με πίεση στην καρδιά 100 mmHg, θα έπρεπε η πίεση χαμηλά στο πόδι να ήταν περίπου 200 mmHg και στο κεφάλι περίπου 60 mmHg (εφαρμογή της σχέσης υδροστατική πίεση $P = \rho \cdot g \cdot h$, με ρ την πυκνότητα του αίματος, g την επιτάχυνση της βαρύτητας και h το – σχετικό – ύψος).



Στην πραγματικότητα οι διαφορές πίεσης είναι πολύ μικρότερες επειδή οι φλέβες των άκρων έχουν μια σειρά από βαλβίδες μονής κατεύθυνσης που επιτρέπουν στο αίμα να ρέει μόνο προς την καρδιά. Επίσης η υδροστατική πίεση θα μπορούσε να αυξήσει τη διατοιχωματική πίεση, με αποτέλεσμα την αύξηση της διαμέτρου των ελαστικών αγγείων.

Υπάρχουν όμως διάφοροι «ανατομικοί φραγμοί» που διαχωρίζουν διαφορετικά «ιστικά» διαμερίσματα με τρόπο που τελικά η βαρύτητα να μην επηρεάζει σημαντικά τη ροή του αίματος.

4.3 Δομή των αγγείων

Το τοίχωμα των αιμοφόρων αγγείων αποτελείται από τρεις χιτώνες με οργάνωση που εξαρτάται από το είδος του αγγείου. Διακρίνονται τέσσερα δομικά στοιχεία τους:

(α) τα ενδοθηλιακά κύτταρα που σχηματίζουν μια απλή, συνεχή στιβάδα επενδύοντας εσωτερικά τον αυλό όλων των αγγείων,

(β) τις ελαστικές ίνες που ευθύνονται για την τάση που αναπτύσσεται στα αγγεία υπό την επίδραση φυσιολογικών πιέσεων,

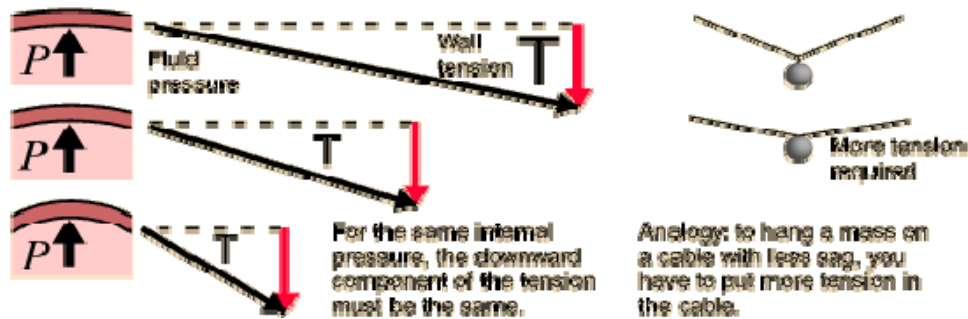
(γ) τα λεία μυϊκά κύτταρα (δεν υπάρχουν στο τοίχωμα των τριχοειδών) που δημιουργούν τάση κυρίως μέσω ενεργητικής συστολής και

(δ) τις ίνες κολλαγόνου που συνιστούν ένα περίβλημα ινών μικρής διατασιμότητας (δεν υπάρχουν στο τοίχωμα των τριχοειδών).

Οι ελαστικές ίνες και οι ίνες κολλαγόνου καθορίζουν την διατασιμότητα (ποσοστιαία μεταβολή του όγκου ανά μεταβολή της πίεσης) και την ενδοτικότητα (μικρή μεταβολή όγκου ανά μεταβολή της πίεσης) των αγγείων. Η ενδοτικότητα ελαττώνεται με την αύξηση του όγκου.

Η ελασίνη είναι το κύριο συστατικό της αορτής. Στις μικρότερες αρτηρίες υπάρχει ελασίνη σε μικρότερη αναλογία και στις φλέβες ακόμη λιγότερη.

	Μέση Πίεση		Ακτίνα (cm)	Τάση (N/m)
	(mmHg)	(kPa)		
Αορτή	100	13	1,2	156,0
Τυπική αρτηρία	90	12	0,5	60,0
Μικρό τριχοειδές	30	4	6×10^{-4}	0,024
Μικρή φλέβα	15	2	2×10^{-2}	0,40



4.4 Η πίεση του αίματος

Η πίεση του αίματος έχει τη μέγιστη τιμή τη στιγμή που το αίμα εξέρχεται από την αριστερή κοιλία της καρδιάς και εισέρχεται στην αορτή (κατά τη συστολή της αριστερής κοιλίας). Όσο το αίμα απομακρύνεται προς την περιφέρεια έχει όλο και μικρότερη πίεση, διατηρεί όμως την παλμική του κίνηση, δηλαδή την περιοδική αυξομείωση της πίεσης (συχνότητας περίπου 1 Hz).

Η φυσιολογική συστολική πίεση είναι 120 mmHg και η διαστολική περίπου 80 mmHg. Η συστολή διαρκεί περίπου το 1/3 του κύκλου και η διαστολή τα 2/3 και μια κανονικοποιημένη μέση τιμή της πίεσης είναι:

$$P_{\text{μέση}} = (120 + 2 \cdot 80) / 3 \text{ mmHg} \approx 94 \text{ mmHg}$$

όταν το αίμα ξεκινά από την καρδιά.

Μεγάλη πτώση της πίεσης παρατηρείται όταν το αίμα κυκλοφορήσει στις μικρές αρτηρίες και στα τριχοειδή και οφείλεται στην αντίστασή τους στη ροή. Στις φλέβες το αίμα δεν έχει σχεδόν καθόλου πίεση και δεν θα είχε τη «δύναμη» να επιστρέψει το αίμα στην καρδιά, αν δεν υπήρχε πρόσθετος μηχανισμός άντλησης με μυς που περιβάλλουν τις φλέβες και με περισταλτικές κινήσεις (και με τη βοήθεια μονο-κατευθυντήριων βαλβίδων) υποβοηθούν το αίμα να φθάσει στο δεξί μέρος της καρδιάς. Άλλος μηχανισμός με μυς-σφιγκτήρες εγκατεστημένους στην αρχή τριχοειδικών δικτύων επιτρέπει, σαν διακόπτης, τη διέλευση ή μη αίματος προς αυτά, ανάλογα με τις συνθήκες.

Η κατάσταση στη μικρή κυκλοφορία είναι παρόμοια, εκτός του ότι οι τιμές των πιέσεων είναι κατά πολύ μικρότερες.

Η βαρύτητα επηρεάζει την πίεση του αίματος στο σώμα μας. Η τιμή της διαστολικής πίεσης είναι περίπου 80 mmHg. Το κεφάλι μας είναι περίπου 40 cm ψηλότερα από την αορτή, δηλαδή η πίεση στον εγκέφαλο είναι μικρότερη κατά περίπου 30 mmHg, κατάσταση η οποία χειροτερεύει όταν βρισκόμαστε σε ανελκυστήρα που ανεβαίνει με ταχύτητα ή, ακόμη χειρότερα, σε αεροπλάνο που εκτελεί απότομη απογείωση. Ακραίες καταστάσεις δοκιμάζουν οι αστροναύτες κατά την αναχώρησή τους και εκτιμάται, ότι οι συνθήκες επιβίωσης σε πλανήτη με μεγάλο g , θα είναι δύσκολες (και) όσον αφορά την κυκλοφορία του αίματος.

Όταν ο άνθρωπος σηκώνεται, απότομα, οι φλέβες των ποδιών (πρέπει να) βοηθούν με συσπάσεις, για να διατηρηθεί πίεση αίματος αρκετή ώστε να μη διακοπεί η αιμάτωση του εγκεφάλου.

Ακροβατικά με κατακόρυφο δεν συνιστώνται (τουλάχιστον αν διαρκούν), επειδή δεν υπάρχουν αντίστοιχοι μηχανισμοί να βοηθούν το αίμα να επιστρέφει από το κεφάλι στην καρδιά και πολύ περισσότερο στα πόδια.

4.5 Μέτρηση της ροής του αίματος στα αγγεία

Για αγγείο μήκους l στο οποίο η παροχή στην είσοδο είναι P_1 και στην έξοδο P_2 , σε ήρεμη κατάσταση θα ισχύει $P_1 = P_2 = P$. Αν η πίεση στην είσοδο είναι P_1 και στην έξοδο P_2 , θα υπάρχει και μια $P_{εξ}$ στο χώρο γύρω από το αγγείο, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ίση με το μηδέν όσον αφορά στη ροή.

Υπάρχει μαθηματική σχέση μεταξύ αυτών των παραμέτρων, η οποία όμως εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του αγγείου – τοιχώματος. Σύμφωνα με αυτά τα χαρακτηριστικά διακρίνουμε δυο περιπτώσεις:

- (α) το αγγείο εμφανίζει αντίσταση στη ροή, επομένως απαιτείται μια διαφορά πίεσης στα άκρα του για να «επιτρέπει» τη ροή
- (β) το αγγείο παρουσιάζει ενδοτικότητα ως απόκριση στην πίεση (όπως το μπαλόνι που φουσκώνει όσο η πίεση αυξάνει στο εσωτερικό σε σχέση με τον εξωτερικό του χώρο).

Στην πρώτη περίπτωση ισχύει ο νόμος του Poiseuille:

$$P = [\pi \cdot r^4 / 8\eta \cdot L] (P_1 - P_2), \text{ όπου } 8\eta \cdot L / \pi \cdot r^4 = R \text{ η αντίσταση του αγγείου.}$$

Στην δεύτερη περίπτωση (ελαστικό αγγείο) δεν παρατηρείται πτώση πίεσης και $P_1 = P_2 = P$.

Ισχύει δε:

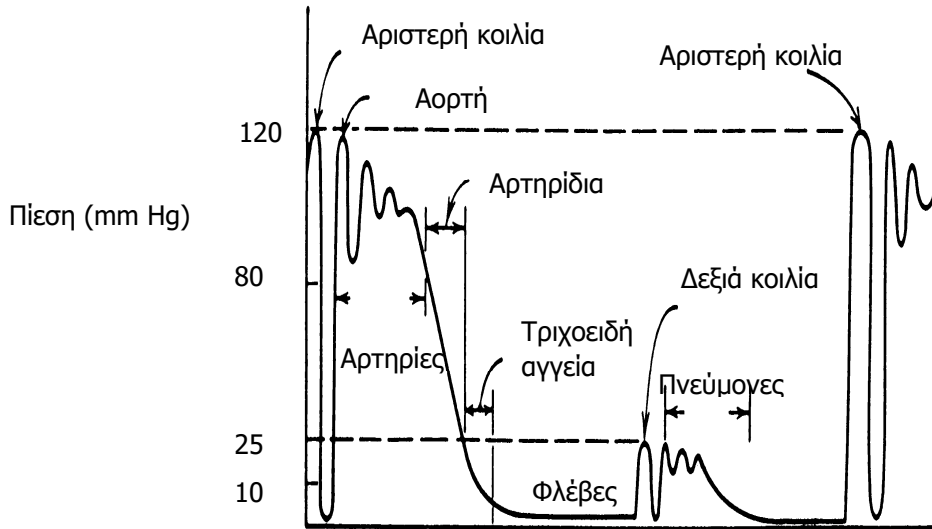
$$\text{Όγκος } V = C \cdot P \text{ όπου } C \text{ η ενδοτικότητα (διαφορά όγκου ανά διαφορά πίεσης).}$$

Επειδή όμως ο όγκος χωρίς πίεση (V_0) δεν είναι μηδέν, ορθότερη είναι η σχέση:

$$V = V_0 + C \cdot P$$

Τα πραγματικά αγγεία συμπεριφέρονται ως ενδιάμεσος τύπος από τους προαναφερθέντες. Κατά προσέγγιση όμως μπορούμε να πούμε πως η αορτή, οι μεγάλες αρτηρίες και οι μεγάλες φλέβες ανήκουν περισσότερο στη δεύτερη κατηγορία (με ενδοτικότητα), ενώ τα μικρά αγγεία ταιριάζουν περισσότερο στην πρώτη κατηγορία (με αντίσταση στη ροή).

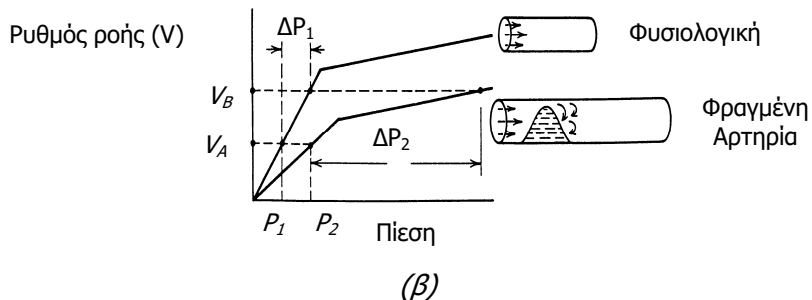
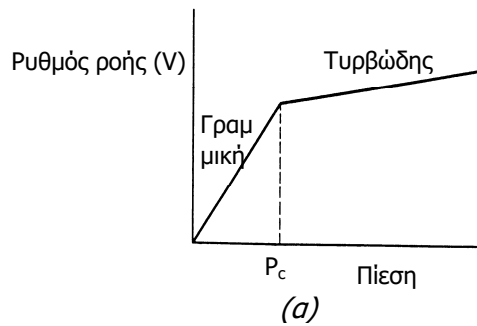
Αυτό διαπιστώνεται και στο σχήμα που παρουσιάζει την πίεση των αγγείων ως προς την θέση – απόστασή τους από την καρδιά. Η μεγαλύτερη πτώση πίεσης παρατηρείται κυρίως στα αρτηρίδια και, κατά δεύτερο λόγο, στα τριχοειδή. Αυτήν την πίεση αναπληρώνει η αντλία – καρδιά με το έργο της.



Η αορτή με ακτίνα περίπου 1,25 cm και μήκος περίπου 10 cm δίνει ασήμαντη πτώση πίεσης, ενώ οι μεγάλες αρτηρίες (περίπου 200) με ακτίνα 0,2 cm και μήκος 75 cm δίνουν περίπου ασήμαντη πτώση πίεσης $\Delta P = 1,4 \text{ mmHg}$.

Οι μικρές αρτηρίες (πλήθος $5 \cdot 10^5$) με μέση ακτίνα 30 μm και μέσο μήκος 0,6 cm = 6 mm, δίνουν $\Delta P = 91 \text{ mmHg}$, ενώ, τέλος, τα τριχοειδή (10^{10}) με ακτίνα στα 3,5 μm και μήκος 2 mm, δίνουν $\Delta P = 8,2 \text{ mmHg}$.

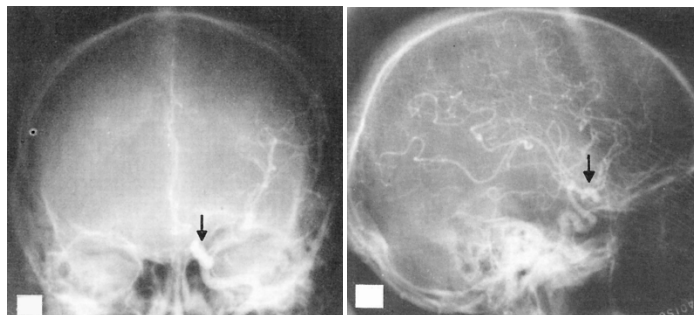
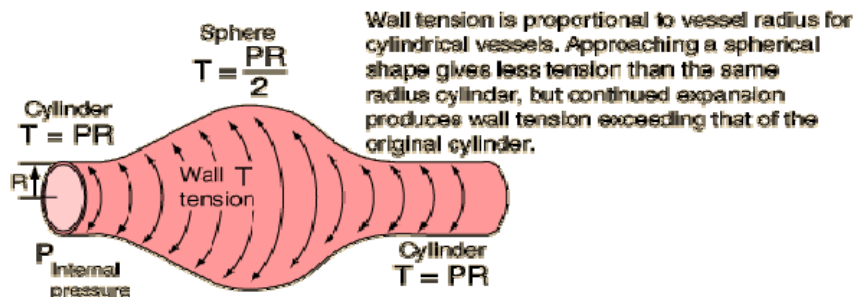
Σε αγγεία με αθηρωματική πλάκα (συσσώρευση και εναπόθεση λιπιδίων και ινώδους συνδετικού ιστού στο τοίχωμά τους) έχουν στενότερο αυλό (μικρότερη ακτίνα), επομένως απαιτούν μεγαλύτερη (διαφορά) πίεσης για να διατηρήσουν σταθερή την παροχή, ειδήλλως η παροχή μειώνεται σε αυτά, όπως συμβαίνει στη στεφανιαία νόσο.



Στα ελαστικά αγγεία με ενδοτικότητα ένας, κατά προσέγγιση, υπολογισμός δίνει μεταβολή της ακτίνας τους κατά περίπου 3% κατά τις εναλλαγές της πίεσης από διαστολική (120 mmHg) σε συστολική (80 mmHg).

Ο νόμος Laplace για τον κύλινδρο: $\Delta P = T/r$ (όπου ΔP η διατοιχωματική πίεση, r η ακτίνα και T η τάση στο τοίχωμα, δηλαδή η δύναμη ανά μονάδα μήκους παράλληλα με τον άξονα του κυλίνδρου) μας δίνει τιμές της τάσης στο τοίχωμα από $160 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ για την αορτή ως $24\cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ για τα τριχοειδή ($60 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ για μεσαίου μεγέθους αρτηρίες και $40\cdot 10^{-2} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ για μικρές φλέβες). Η τιμή όμως της τάσης αυτής ανά πάχος τοιχώματος έχει πολύ μικρότερη διακύμανση: από 53 kPa στην αορτή μέχρι 13-16 για τα τριχοειδή και τα φλεβίδια.

Στα νευτώνια ρευστά με εσωτερική τριβή, το προφίλ του διανύσματος της ταχύτητας σε κάθε διατομή έχει παραβολική μορφή. Αυτό δεν ισχύει για το αίμα που δεν συμπεριφέρεται ως νευτώνιο υγρό, κυρίως επειδή δεν έχει ομοιογενή μάζα, αλλά και επειδή ρέει κατά παλμούς.



4.6 Πίεση από φυγόκεντρο δύναμη

Η διατοιχωματική πίεση κατανέμεται ομοιόμορφα στην περιφέρεια του αγγείου. Όταν όμως το αγγείο κάμπτεται, στο μέρος του τοιχώματος στο έξω μέρος της στροφής επιδρά πρόσθετη δύναμη, φυγόκεντρος, από το ρέον αίμα του οποίου το διάνυσμα της ταχύτητας αλλάζει, όχι σε μέτρο, αλλά σε διεύθυνση.

Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο στην αορτή, η οποία, λίγα εκατοστά μετά την καρδιά κάμπτεται κατά σχεδόν 180° . Με ακτίνα (εσωτερική) της αορτής 1,25 cm, ακτίνα στροφής περίπου 2 cm, ταχύτητα ροής του αίματος ακόμη και 100 cm/s, υπολογίζεται πίεση από τη φυγόκεντρο δύναμη περίπου 5 mmHg, τιμή πολύ μικρή σε σχέση με την επικρατούσα (συστολική) πίεση των 100 mmHg. Επομένως τυχόν ανεύρυσμα στο τοίχωμα της αορτής (αδυναμία του τοιχώματος με τοπική αύξηση της διαμέτρου) δεν μπορεί να έχει αίτιο την πίεση λόγω φυγόκεντρου δύναμης.

4.7 Τριχοειδή και οσμωτική πίεση

Η πίεση που δημιουργεί η αντλία – καρδιά οδηγεί το αίμα στα τριχοειδή. Στα τριχοειδή παρατηρείται διάχυση - ανταλλαγή ουσιών διαμέσου των τοιχωμάτων, μεταξύ του αίματος (που βρίσκεται μέσα στα τριχοειδή) και του μεσοκυτταρικού υγρού (που βρίσκεται έξω από τα τριχοειδή). Στα τριχοειδή της μεγάλης κυκλοφορίας το οξυγόνο από τα ερυθρά αιμοσφαίρια διαχέεται από το αίμα προς το μεσοκυτταρικό υγρό και διοξείδιο του άνθρακα από το μεσοκυτταρικό υγρό προς το αίμα. Στα τριχοειδή της μικρής κυκλοφορίας συμβαίνει το αντίστροφο.

Σύμφωνα με απλουστευμένη περιγραφή, η διατοίχωματική πίεση στα τριχοειδή είναι συνισταμένη δυο αντίθετων συνιστωσών.

Η μια είναι η πίεση όπως αναφέρθηκε στο νόμο του Poiseuille και που έχει τιμή 36 mmHg στο άκρο του τριχοειδούς προς τα αρτηρίδια και 15 mmHg στο άκρο του τριχοειδούς προς τα φλεβίδια.

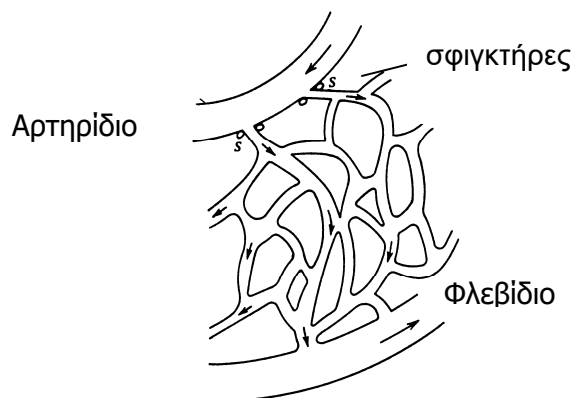
Η δεύτερη πίεση είναι η οσμωτική που η τιμή της είναι ανάλογη της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας στον διαλύτη (moles ανά μονάδα όγκου) και η οποία είναι περίπου σταθερή κατά μήκος του τριχοειδούς και ίση με 25 mmHg προς το εσωτερικό του τριχοειδούς.

Δηλαδή η συνισταμένη πίεση έχει κατεύθυνση από το τριχοειδές προς τα έξω ($36-25 = 11$ mmHg) στο άκρο προς τα αρτηρίδια και από το μεσοκυτταρικό υγρό προς το εσωτερικό των τριχοειδών ($25-15 = 10$ mmHg) στο άκρο του τριχοειδούς προς τα φλεβίδια.

Αν η «ανταλλαγή προϊόντων» γινόταν μόνον εξαιτίας της διαφοράς πίεσης, θα είχαμε έντονη «διατοίχωματική ροή» η οποία -ευτυχώς- δεν συμβαίνει. Τα μικρά μόρια, όπως του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα, μπορούν και διαπερνούν το τοίχωμα των τριχοειδών, όχι όμως και τα μεγαλύτερα μόρια όπως οι πρωτεΐνες.

Αυτό σημαίνει πως η συγκέντρωση των πρωτεϊνών είναι πολύ μεγαλύτερη στο εσωτερικό των τριχοειδών, στο αίμα, σε σχέση με τη συγκέντρωση των πρωτεϊνών στο μεσοκυτταρικό υγρό. Το φαινόμενο της όσμωσης επιβάλλει εισροή μεσοκυτταρικού υγρού προς το εσωτερικό των τριχοειδών, σε μια προσπάθεια εξισορρόπησης της συγκέντρωσης των πρωτεϊνών στις δυο πλευρές του τοιχώματος, το οποίο και εξηγεί την οσμωτική πίεση των 25 mmHg με κατεύθυνση προς το εσωτερικό των τριχοειδικών αγγείων.

Η μικρή διαφορά στη διαφορά της πίεσης ($11-10 = 1$ mmHg) στα δυο άκρα του τριχοειδούς απεικονίζει, μαθηματικά και με προσέγγιση, την καθαρή απώλεια υγρού από το δίκτυο των τριχοειδών προς το μεσοκυτταρικό υγρό.



Σε αυτή την απλουστευμένη περιγραφή θεωρήθηκε πως η ροή στα αγγεία (συμπεριλαμβανομένων και των τριχοειδών) είναι ομαλή, στρωτή. Αυτό δεν συμβαίνει στα τριχοειδή, πολλά από τα οποία έχουν διάμετρο 5 με 6 μm , ενώ η διάμετρος των ερυθρών αιμοσφαιρίων είναι 7,5 μm . Τα ερυθρά αιμοσφαίρια περνούν προσαρμόζοντας τον όγκο τους, με αποτέλεσμα αφενός η περιφέρειά τους να κυλιέται στο εσωτερικό τοίχωμα του τριχοειδούς, αφετέρου να παγιδεύεται ποσότητα πλάσματος ανάμεσα σε δυο διαδοχικά ερυθρά αιμοσφαίρια, η οποία ποσότητα πλάσματος εκτελεί επίσης περιστροφική κίνηση.

4.7.1 Ροή οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα

Τα τριχοειδή αγγεία έχουν «βασική υπευθυνότητα» στο να τροφοδοτούνται τα κύτταρα με οξυγόνο. Ο ρυθμός παροχής οξυγόνου στα κύτταρα είναι ανάλογος της καρδιακής απόδοσης (ποσότητα αίματος στη μονάδα του χρόνου) και της διαφοράς στη μερική πίεση οξυγόνου μεταξύ αρτηριδίων και φλεβιδίων. Το οξυγόνο μεταφέρεται με τις αρτηρίες στα τριχοειδή, όπου εγκαταλείπει τον φορέα του (ερυθρά αιμοσφαίρια) και με διάχυση περνά στο μεσοκυτταρικό υγρό. Το αίμα, που από τα τριχοειδή συνεχίζει να ρέει στα φλεβίδια, στερείται πλέον οξυγόνου.

Σε άνθρωπο με μέση φυσική κατάσταση, η καρδιά δημιουργεί ροή αίματος που φτάνει τα 5 L ανά λεπτό, ενώ κατά τη διάρκεια αεροβικής άσκησης τα 20 L ανά λεπτό και σε καλό αθλητή τα 35 L ανά λεπτό.

Το οξυγόνο συνδέεται με το μόριο της αιμοσφαιρίνης των ερυθρών αιμοσφαιρίων όταν το αίμα περνά από τους πνεύμονες, όπου η μερική πίεση του οξυγόνου είναι περίπου 100 mmHg (μερική πίεση $\text{O}_2 > 60$ mmHg είναι αρκετή για να «γεμίσει» την αιμοσφαιρίνη).

Όταν το αίμα φτάσει στα τριχοειδή (όπου η μερική πίεση του οξυγόνου είναι πολύ χαμηλότερη) απελευθερώνει το οξυγόνο.

Περισσότερο οξυγόνο απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια άσκησης η οποία οδηγεί σε μείωση του pH των ιστών στους μυς και σε αύξηση της τοπικής θερμοκρασίας και της τοπικής μερικής πίεσης του CO_2 . Κατά τη διάρκεια άσκησης η διαφορά στη μερική πίεση O_2 μεταξύ αρτηριδίων και φλεβιδίων αυξάνεται από 50 mL O_2 ανά L αίματος στα 150 mL O_2 ανά L αίματος, κυρίως επειδή η αιματική ροή κατευθύνεται εκλεκτικά προς τους μυς (και όχι τόσο στα υπόλοιπα όργανα).

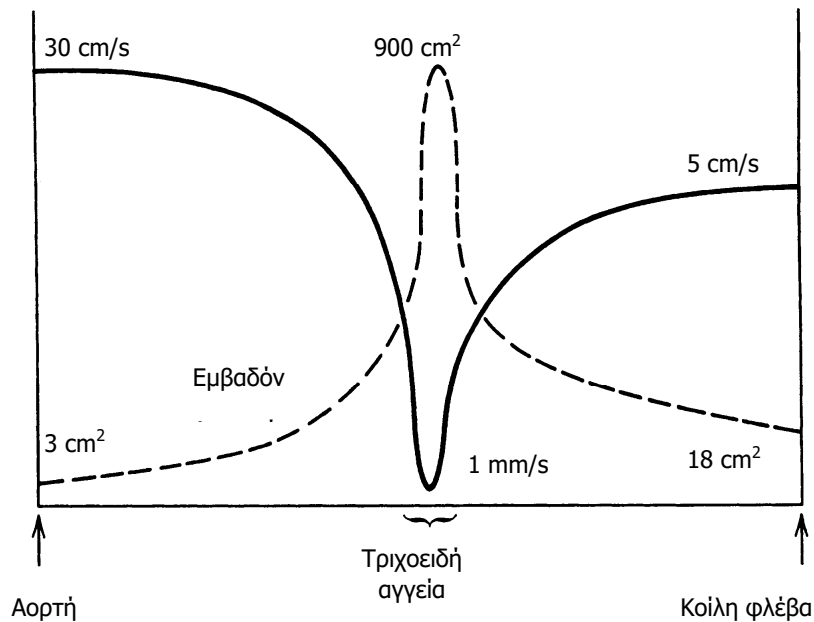
4.8 Ροή και ταχύτητα αίματος

Όλος ο όγκος αίματος (περίπου 5 L) περνά από την αντλία – καρδιά κάθε λεπτό («απόδοση» καρδιάς \approx 5 L ανά λεπτό) και ο ρυθμός ροής είναι περίπου σταθερός σε όλο το μήκος του δικτύου των αγγείων (λίγο μικρότερος στις φλέβες εξαιτίας της μικρής διαρροής που προηγήθηκε στα τριχοειδή).

Ο νόμος της συνέχειας «απαιτεί» το γινόμενο διατομής επί ταχύτητα να είναι σταθερό κατά τη ροή ρευστού.

Η διατομή της αορτής είναι 3 cm^2 και η ταχύτητα ροής 30 cm ανά δευτερόλεπτο (s). Η διατομή όλων των τριχοειδών, ως σύνολο, είναι 4000 cm^2 (ακτίνα περίπου 3,5 μm επί -αριθμός τους- 10^{10}) και η ταχύτητα ροής μειωμένη στα 0,02 cm ανά s.

Οι κοίλες φλέβες (2) έχουν διατομή 18 cm^2 και η ταχύτητα ροής αίματος σε αυτές έχει ενδιάμεση τιμή: 5 cm ανά s.



Η μειωμένη ταχύτητα ροής του αίματος στα τριχοειδή παρέχει τον απαιτούμενο χρόνο για την ανταλλαγή των αερίων O_2 και CO_2 και γενικότερα για την διάχυση ουσιών διαμέσου του τοιχώματος των τριχοειδών.

5. Βιβλιογραφία

1. Boron WF, Boulpaep EL. *Ιατρική Φυσιολογία*, ελλ. εκδ. Π. Χ. Πασχαλίδης, Αθήνα 2006.
2. Cameron JR, Skofronick JG, Grant RM. *Φυσική του Ανθρώπινου Σώματος*, ελλ. εκδ. Παρισιάνου, Αθήνα 2001.
3. Herman IP. *Physics of the Human Body*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΚΟ ΣΩΜΑ (ΒΙΟΣΗΜΑΤΑ)

Κωνσταντίνος Λουκάς

Επίκουρος Καθηγητής

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική Σχολή, ΕΚΠΑ

1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναφερόμαστε στον βιοηλεκτρισμό δηλαδή στα ηλεκτρικά ρεύματα που παράγονται από το ανθρώπινο σώμα. Σημαντικές λειτουργίες της ζώσας ύλης στηρίζονται σε ηλεκτρικά φαινόμενα. Για το λόγο αυτό θα εξετάσουμε ηλεκτρικά φαινόμενα σε σχέση με τους ζωντανούς οργανισμούς.

Πηγή κάθε ηλεκτρικού δυναμικού μέσα στο σώμα μας είναι κάποια κυτταρική μεμβράνη. Η εμφάνιση μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής πλευράς της μεμβράνης μιας διαφοράς δυναμικού της τάξης του 0,1V, οφείλεται στη δομή, στις ηλεκτρικές ιδιότητες και στη βιοχημική λειτουργία της.

Οι ταχείες τοπικές μεταβολές αυτών των δυναμικών και η διάδοση αυτών των μεταβολών κατά μήκος των μεμβρανών που περιβάλλουν τα νευρικά, καρδιακά και μυϊκά κύτταρα δημιουργούν ηλεκτρικά σήματα που περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τη λειτουργία που αντιπροσωπεύουν, η δε μελέτη τους προσφέρει πολλά στην κλινική διάγνωση και θεραπεία. Η καταγραφή αυτών των σημάτων μας δίνει το γνωστό ηλετροκαρδιογράφημα (ΗΚΓ), όταν αυτά προέρχονται από την καρδιά, το ηλετροεγκεφαλογράφημα(ΗΕΓ) όταν αυτά προέρχονται από τον εγκέφαλο και το ηλετρομυογράφημα (ΗΜΓ) όταν προέρχονται από τους μύες.

Πολλούς αιώνες πριν μελετηθεί επιστημονικά ο ηλεκτρισμός, οι άνθρωποι γνώριζαν τα ηλεκτρικά ψάρια (σαλάχια και χέλια) που παράγουν ηλεκτρισμό. Ο Luigi Galvani, το 1784, ένας Ιταλός ανατόμος, παρατήρησε το ρόλο του ηλεκτρισμού στη δραστηριοποίηση των μυών. Βρήκε ότι αν συνδέσουμε δύο κομμάτια από διαφορετικά μέταλλα και στη συνέχεια φέρουμε τα ελεύθερα άκρα τους σε επαφή με διαφορετικά μέρη ενός νεκρού βατράχου, τότε οι μύες του βατράχου συσπώνται. Σκέφτηκε ότι ο νεκρός βάτραχος παρήγαγε το ηλεκτρικό ερέθισμα. Στην πραγματικότητα ο μυς ερεθίστηκε από το ασθενές ηλεκτρικό ρεύμα που παράχθηκε τυχαία από την «μπαταρία» που αποτελείται από τα δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια και το υγρό του σώματος σαν ηλεκτρολύτης.

Ο Alessandro Volta διερεύνησε τα φαινόμενα και στη συνέχεια ανακάλυψε την μπαταρία, μία από τις σπουδαιότερες ανακαλύψεις στην ιστορία της φυσικής. Ήταν η πρώτη πηγή σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος.

Ιστορικά δεν είναι γνωστό ποιος σκέφτηκε για πρώτη φορά ότι οι ηλεκτρικές ώσεις ελέγχουν τους μυς και μεταβιβάζουν σήματα προς και από τον εγκέφαλο. Περίπου μέχρι έναν αιώνα αργότερα από την ανακάλυψη του Galvani, δεν ήταν διαθέσιμα ευαίσθητα όργανα (γαλβανόμετρο) για τη μέτρηση των ασθενών ηλεκτρικών δυναμικών που παράγονται από την καρδιά.

Ο Jacques D' Arsonval το 1880, ανακάλυψε το γαλβανόμετρο, ένα ευαίσθητο όργανο για τη μέτρηση του ηλεκτρικού ρεύματος. Λόγω της αργής απόκρισης του οργάνου, δεν μπορούσε να καταγράψει τη μορφή του σύντομου ηλεκτρικού σήματος που παράγεται με τη συστολή της καρδιάς.

Η ανίχνευση ενός πολύ σύντομου ηλεκτρικού σήματος από ένα νευρώνα, του δυναμικού δράσης που διαρκεί περίπου μερικά msec, επετεύχθη με την ανακάλυψη του παλμογράφου τον 20ο αιώνα.

Ο ηλεκτρισμός που παράγεται στο εσωτερικό του σώματος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των μυών και τη λειτουργία των νεύρων και των οργάνων. Στην ουσία, όλες οι λειτουργίες και δραστηριότητες του σώματος σχετίζονται κατά κάποιο τρόπο με τον ηλεκτρισμό. Οι δυνάμεις των μυών προκαλούνται από την έλξη αντίθετα φορτισμένων ηλεκτρικών φορτίων. Η δραστηριότητα του εγκεφάλου είναι κυρίως ηλεκτρική. Όλα τα νευρικά σήματα προς και από τον εγκέφαλο σχετίζονται με τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος.

Το νευρικό σύστημα παίζει βασικό ρόλο σε όλες σχεδόν τις λειτουργίες του σώματος. Ο εγκέφαλος, ο κεντρικός υπολογιστής, λαμβάνει εσωτερικά και εξωτερικά σήματα και (συνήθως) αντιδρά ανάλογα. Οι πληροφορίες διαβιβάζονται με τη μορφή ηλεκτρικών σημάτων διαμέσου των νεύρων. Αυτό το αποδοτικό σύστημα επικοινωνίας μπορεί να διαχειρισθεί πολλά εκατομμύρια πληροφοριών ταυτόχρονα. Για την πραγματοποίηση ειδικών λειτουργιών του σώματος, παράγονται πολλά ηλεκτρικά σήματα. Τα σήματα αυτά είναι αποτέλεσμα της ηλεκτροχημικής δράσης συγκεκριμένων τύπων κυττάρων. Μετρώντας επιλεκτικά, τα κατάλληλα σήματα, μπορούμε να συλλέξουμε χρήσιμες κλινικές πληροφορίες για συγκεκριμένες λειτουργίες του σώματος. Στο κεφάλαιο αυτό συζητούνται μερικά από αυτά τα ηλεκτρικά σήματα.

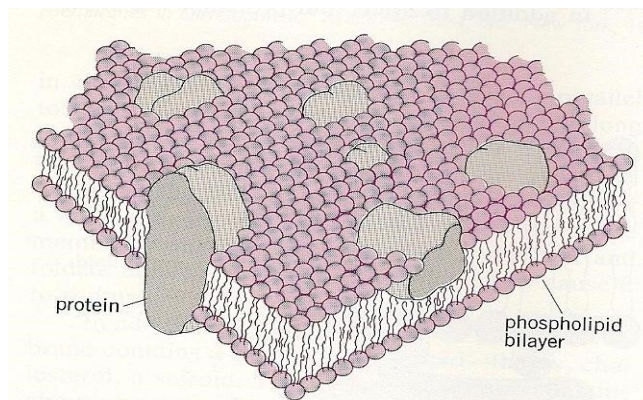
2. Η κυτταρική μεμβράνη

Τα κύτταρα του ανθρώπινου σώματος όπως και πολλών ζώων και φυτών έχουν το χαρακτηριστικό γνώρισμα ότι καλύπτονται από την κυτταρική μεμβράνη (Εικόνα 1). Η μεμβράνη είναι ένα από τα σημαντικότερα δομικά στοιχεία του κυττάρου. Μια από τις βασικές λειτουργίες της κυτταρικής μεμβράνης είναι η ιδιότητά της να ρυθμίζει τη διέλευση μορίων και ιόντων από και προς το εσωτερικό του κυττάρου.

Όλες οι μεμβράνες αποτελούνται από μια διπλή στοιβάδα λιπιδικών μορίων. Βυθισμένες σε αυτό το λιπιδικό πλέγμα με τυχαία κατανομή βρίσκονται οι πρωτεΐνες. Κάποιες από αυτές διαπερνούν όλο το πάχος της μεμβράνης, άλλες είναι βυθισμένες στο εσωτερικό της μεμβράνης και άλλες βρίσκονται στην επιφάνεια αυτής. Το συνολικό πάχος της κυτταρικής μεμβράνης είναι περίπου 7,5 nm. Ενώ το πάχος της διπλοστοιβάδας των λιπιδίων είναι περίπου 3,5 nm.

Τα λιπίδια είναι μια ομάδα βιολογικών μορίων που παίζουν σημαντικό βιολογικό ρόλο. Αρκετές βιταμίνες, ορμόνες καθώς και τα λίπη και έλαια ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

Τα φωσφολιπίδια είναι μια ομάδα λιπιδίων που αποτελούν το κύριο συστατικό των κυτταρικών μεμβρανών. Τα μόρια των φωσφολιπιδίων παριστάνονται από μία υδρόφιλη κεφαλή και δύο υδρόφοβες ουρές. Οι υδρόφιλες κεφαλές τοποθετούνται προς το εξωτερικό της διπλοστοιβάδας, ενώ οι υδρόφοβες ουρές προς το εσωτερικό της διπλοστοιβάδας μακριά από τα μόρια του ύδατος.



Εικόνα 1: Η κυτταρική μεμβράνη.

Τα λιπίδια έχουν λίγες φορτισμένες ομάδες και δεν μπορούν να μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα, επομένως συμπεριφέρονται σαν μονωτές, σε αντίθεση με το ενδοκυττάριο και εξωκυττάριο υγρό που περιέχουν πολλά ιόντα αλλά και πρωτεΐνες που έχουν μεγάλη πυκνότητα ηλεκτρονίων και επομένως μπορούν να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα.

Επομένως το λιπιδικό στρώμα της κυτταρικής μεμβράνης είναι μια διάταξη υψηλής αντίστασης που χωρίζει δυο διαμερίσματα το ενδοκυττάριο και το εξωκυττάριο υγρό. Όπως θα δούμε σε όλα τα κύτταρα με συνθήκες ηρεμίας ανάμεσα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό τοίχωμα της κυτταρικής μεμβράνης αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού περίπου -70 mV .

Επειδή η ακτίνα του κυττάρου ($\approx 1 \mu\text{m}$) είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με το πάχος της κυτταρικής μεμβράνης ($7-15 \text{ nm}$) μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ένα τμήμα κυτταρικής μεμβράνης είναι επίπεδο και ότι λειτουργεί σαν επίπεδος πυκνωτής.

Από τον ηλεκτρισμό γνωρίζουμε για τον επίπεδο πυκνωτή ότι ισχύουν οι σχέσεις:

$$\alpha) C = q/V$$

όπου C η χωρητικότητα του πυκνωτή, q είναι το φορτίο του κάθε οπλισμού του πυκνωτή και V είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των οπλισμών του.

$$\beta) C = \epsilon\epsilon_0 S/\ell$$

όπου S η επιφάνεια του οπλισμού, ℓ η απόσταση μεταξύ των οπλισμών, ϵ η διηλεκτρική σταθερά του μέσου και ϵ_0 η διαπερατότητα του κενού.

$$\gamma) E = V/\ell$$

όπου E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή, κάθετη προς την επιφάνεια της μεμβράνης με κατεύθυνση προς το εσωτερικό του κυττάρου. Αν στη σχέση αυτή θέσουμε τις τιμές όπως μετρήθηκαν στον άνθρωπο:

$$V = 70 \times 10^{-3} \text{ V}, \ell = 6 \times 10^{-9} \text{ m}$$

τότε

$$E = 70 \times 10^{-3} \text{ V} / 6 \times 10^{-9} \text{ m} = 11.7 \text{ MV} / \text{m}$$

Επομένως οι κυτταρικές μεμβράνες διατηρούν ένα πολύ ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο σε σχέση με το μικρό διατοιχωματικό δυναμικό της μεμβράνης.

3. Δυναμικό ηρεμίας της κυτταρικής μεμβράνης

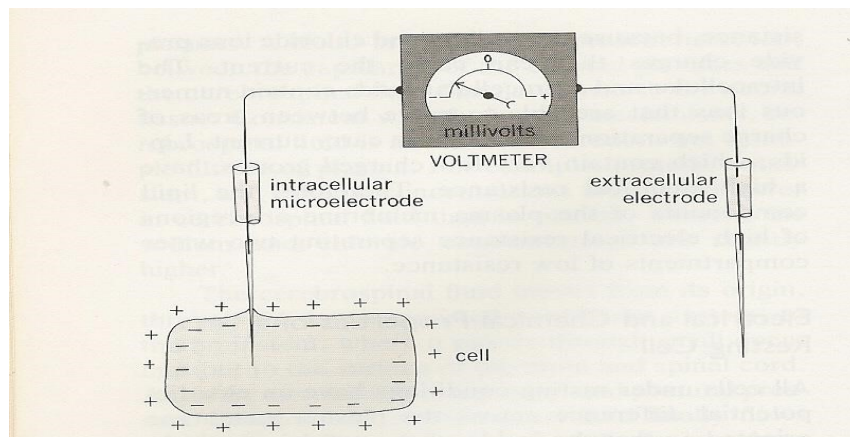
Σε όλα τα κύτταρα σε συνθήκες ηρεμίας αναπτύσσεται μία διαφορά δυναμικού στις δύο επιφάνειες της κυτταρικής μεμβράνης. Αν θεωρήσουμε το δυναμικό στο εξωκυττάριο χώρο ίσο με το μηδέν, τότε η διαφορά δυναμικού εκατέρωθεν της κυτταρικής μεμβράνης, ανάλογα με τον τύπο του κυττάρου παίρνει τιμές που κυμαίνονται από -9 έως -100mV. Η σταθερή αυτή διαφορά δυναμικού λέγεται *Δυναμικό ηρεμίας* της κυτταρικής μεμβράνης. Στα νευρικά κύτταρα το Δυναμικό ηρεμίας είναι περίπου -70 mV.

Οι πιο σημαντικές χημικές ουσίες στο εξωκυττάριο και ενδοκυττάριο υγρό (εκτός του νερού) μιας κυτταρικής μεμβράνης είναι τα ιόντα K^+ , Na^+ , Cl^- .

Υπάρχουν όμως και πολλά άλλα ιόντα όπως Mg^{2+} , Ca^{2+} , H^+ , HCO_3^- , HPO_4^{2-} , SO_4^{2-} αμινοξέα και πρωτεΐνες αρνητικά φορτισμένες και στα δύο διαμερίσματα.

Από τα ιόντα που μπορούν να διαπερνούν τη μεμβράνη K^+ , Na^+ , Cl^- παρουσιάζουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις και επομένως παίζουν το σημαντικότερο ρόλο στη γένεση των δυναμικών ηρεμίας της μεμβράνης.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2) φαίνεται ο τρόπος μέτρησης του δυναμικού ηρεμίας της μεμβράνης. Ένα μικροηλεκτρόδιο (συνήθως Ag-AgCl) φέρεται κοντά στη επιφάνεια του κυττάρου και μπορεί να διαπεράσει την μεμβράνη. Η διάμετρος της άκρης του μικροηλεκτροδίου είναι τόσο μικρή σε σχέση με το μέγεθος του κυττάρου χωρίς να μπορεί να διαταράξει την κυτταρική ισορροπία.



Εικόνα 2: Συσκευή μέτρησης των δυναμικών της μεμβράνης.

Όσο μεγαλύτερη είναι η διαπερατότητα σε ένα είδος ιόντος, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συνεισφορά του ιόντος αυτού στη δημιουργία του δυναμικού ηρεμίας της μεμβράνης.

Για να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός της δημιουργίας του δυναμικού ηρεμίας θεωρούμε ότι αρχικά δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού στις δυο πλευρές της μεμβράνης δηλαδή και το εσωτερικό και το εξωτερικό του κυττάρου περιέχει ίσο αριθμό θετικών και αρνητικών ιόντων.

Η κυτταρική μεμβράνη, η οποία αποτελείται από στρώματα λιποπρωτεϊνών, στην κατάσταση ηρεμίας δεν επιτρέπει την διέλευση των ενδοκυττάρων πρωτεϊνών και άλλων οργανικών ανιόντων (A^-) ενώ παρουσιάζει διαύλους (πόρους) για το Na^+ και περίπου 70 φορές περισσότερους για το K^+ και λιγότερους για το Cl^- .

Επομένως η συγκέντρωση των ιόντων K^+ στο ενδοκυττάριο υγρό είναι μεγαλύτερη από ότι στο εξωκυττάριο. Για το λόγο αυτό και εξαιτίας της διαπερατότητας που παρουσιάζει η μεμβράνη στα ιόντα K^+ διαχέονται αυτά λόγω της θερμικής τους κίνησης από την περιοχή υψηλής συγκέντρωσης προς την περιοχή χαμηλότερης συγκέντρωσης.

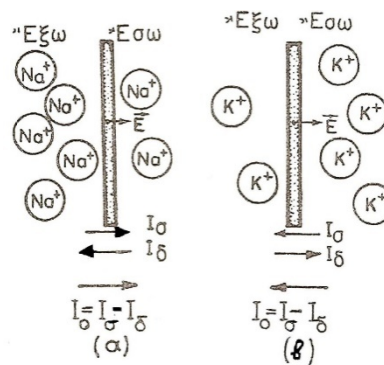
Δημιουργείται επομένως ένα ρεύμα ιόντων K^+ , I_o με φορά από το εσωτερικό του κυττάρου προς τα έξω. Η διάχυση των θετικών ιόντων K^+ έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανιστεί περίσσεια αρνητικού φορτίου στο εσωτερικό του κυττάρου και πλεόνασμα θετικού φορτίου στο εξωτερικό του κυττάρου. Αναπτύσσεται έτσι μια διαφορά δυναμικού εκατέρωθεν της μεμβράνης η οποία δημιουργεί ένα ρεύμα I_δ αντίθετο προς το I_o των ιόντων K^+ .

Το συνολικό ρεύμα των ιόντων K^+ σε μια χρονική στιγμή δίδεται από τη σχέση:

$$I_{ολ\ K^+} = I_o - I_\delta$$

Όσο το I_o παραμένει μεγαλύτερο από το I_δ θα εξακολουθεί η διάχυση των ιόντων K^+ από μέσα προς τα έξω του κυττάρου.

Καθώς όμως αυξάνει η συγκέντρωση των ιόντων K^+ στο εξωτερικό χώρο αυξάνει και η διαφορά δυναμικού εκατέρωθεν της μεμβράνης και επομένως και το I_δ . Κάποια στιγμή όταν το I_δ γίνει ίσο με το I_o (δηλαδή $I_{ολ\ K^+} = 0$) τότε η διαφορά δυναμικού εκατέρωθεν της μεμβράνης σταθεροποιείται και αυτή ονομάζεται δυναμικό ισορροπίας για τα ιόντα του K^+ .



Εικόνα 3: Ρεύματα ιόντων I_o και I_δ που οφείλονται στις συγκεντρώσεις και στις διαφορές δυναμικού.

Ακριβώς τα ίδια συμβαίνουν με τα ιόντα Na^+ . Επειδή η συγκέντρωση των ιόντων Na^+ είναι μεγαλύτερη στο εξωτερικό της μεμβράνης δημιουργείται ένα ρεύμα I_o από τα ιόντα Na^+ προς το εσωτερικό της μεμβράνης, ενώ ένα ρεύμα I_δ αντίθετου φοράς εμφανίζεται λόγω της αναπτυσσόμενης διαφοράς δυναμικού.

Όταν:

$$I_{\text{ολ Na}^+} = I_{\sigma} - I_{\delta} = 0$$

τότε η διαφορά δυναμικού εκατέρωθεν της μεμβράνης σταθεροποιείται και αυτή ονομάζεται δυναμικό ισορροπίας για το Na^+ (βλ. και Εικόνα 3).

Το δυναμικό ισορροπίας για κάθε ξεχωριστό ιόν, υπολογίζεται από την εξίσωση του Nerst, η οποία εξετάζει την κίνηση των ιόντων μέσα σε διάλυμα, σαν να ήταν μόρια ιδανικού αερίου:

$$V = V_1 - V_2 = \pm 2.3 \times \left(\frac{\kappa T}{e}\right) \times \log(C_1/C_2)$$

όπου κ η σταθερά Boltzman, T η απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin, e το φορτίο του ηλεκτρονίου (ή ενός μονοσθενούς ιόντος) και C_1 , C_2 οι συγκεντρώσεις του ιόντος έξω και μέσα στο κύτταρο.

Για θερμοκρασία ανθρωπίνου σώματος 37°C η ποσότητα ($\kappa T/e$) λαμβάνει την τιμή:

$$\kappa \frac{T}{e} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \frac{310\text{K}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 26,7\text{mV}$$

για τα ιόντα K^+ έχουμε $C_1=0,005 \text{ mol/l}$ και $C_2=0,141 \text{ mol/l}$, οπότε το δυναμικό ισορροπίας για τα ιόντα K^+ (που ονομάζεται δυναμικό Nerst) στις δύο πλευρές της κυτταρικής μεμβράνης είναι:

$$V = V_1 - V_2 = 2,3 \frac{\kappa T}{e} \cdot \log \frac{C_1}{C_2} = -89,2\text{mV}$$

Το δυναμικό ισορροπίας των ιόντων Na^+ αν υπολογιστεί με την εξίσωση Nerst θα βρεθεί περίπου $+60 \text{ mV}$. Η εξίσωση Nerst θεωρείται ότι αποτελεί καλή προσέγγιση του δυναμικού ηρεμίας της κυτταρικής μεμβράνης για ένα μεμονωμένο ιόν.

Μια πιο ακριβής έκφραση για το δυναμικό ισορροπίας, η οποία λαμβάνει υπόψη και την επίδραση και των άλλων ιόντων προτάθηκε από τον Goldman (1943) και τροποποιήθηκε από τους Hodgkin και Katz (1949) δίνεται από την εξίσωση Goldman:

$$V = \frac{RT}{F} \ln \left\{ \frac{P_{\text{K}^+} [\text{K}^+]_{\text{out}} + P_{\text{Na}^+} [\text{Na}^+]_{\text{out}} + P_{\text{Cl}^-} [\text{Cl}^-]_{\text{in}}}{P_{\text{K}^+} [\text{K}^+]_{\text{in}} + P_{\text{Na}^+} [\text{Na}^+]_{\text{in}} + P_{\text{Cl}^-} [\text{Cl}^-]_{\text{out}}} \right\}$$

όπου V : το δυναμικό ισορροπίας

R : η σταθερά των αερίων

T : η απόλυτη θερμοκρασία

F : σταθερά Faraday

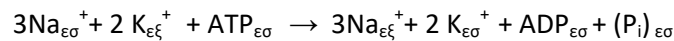
P_{K^+} , P_{Na^+} , P_{Cl^-} : η σταθερά διαπερατότητας της μεμβράνης των ιόντων K^+ , Na^+ , Cl^- .

και $[\text{Na}^+]$, $[\text{K}^+]$, $[\text{Cl}^-]$ είναι οι συγκεντρώσεις των ιόντων Na^+ , K^+ , Cl^- .

Το μετρούμενο με πειραματική μέθοδο δυναμικό ηρεμίας (όπως αναφέραμε $\approx -70\text{mV}$), δεν είναι το δυναμικό ισορροπίας ούτε του K^+ ούτε του Na^+ . Αυτό σημαίνει ότι εξακολουθεί να υπάρχει μια μετακίνηση ιόντων K^+ προς το εξωτερικό της μεμβράνης και ιόντων Na^+ προς το εσωτερικό. Λόγω του μηχανισμού που αναφέραμε θα περίμενε κανείς να συνεχίσει να μειώνεται η συγκέντρωση των ιόντων Na^+ στον εξωκυττάριο χώρο και των ιόντων K^+ στον εσωκυττάριο.

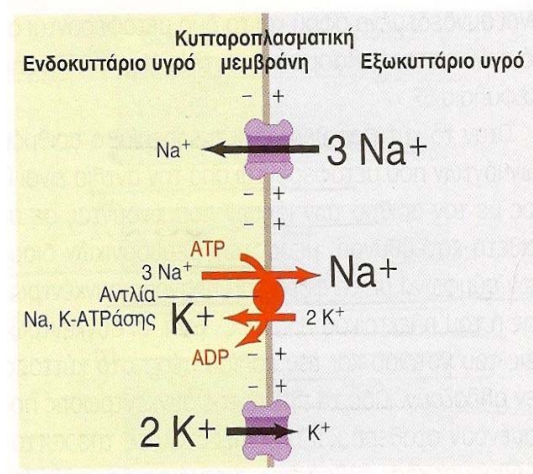
Στην πραγματικότητα όμως οι συγκεντρώσεις του Na^+ στον εξωτερικό χώρο και του K^+ στον εσωκυττάριο παραμένουν σταθερές. Η σταθερότητα αυτή των συγκεντρώσεων Na^+ και K^+ οφείλεται σε ένα μηχανισμό της ίδιας της κυτταρικής μεμβράνης, ενεργού μεταφοράς ιόντων (Na^+ προς το εξωκυττάριο χώρο και ιόντων K^+ στον ενδοκυττάριο χώρο), που συνήθως αναφέρεται ως αντλία Νατρίου-Καλίου.

Η ενέργεια για την λειτουργία της αντλίας αυτής προέρχεται από τον μεταβολισμό των τροφών (πρωτεΐνες, λίπη, υδατάνθρακες) και βρίσκεται αποθηκευμένη στο μόριο του νουκλεοτιδίου, τριφωσφορική αδενοσίνη (ATP). Η αντλία Νατρίου-Καλίου είναι πρωτεΐνη που δρώντας σαν ένζυμο διασπά το μόριο της ATP σε διφωσφορική αδενοσίνη (ADP) και μια ανόργανη φωσφορική ρίζα P_i . Έτσι εκλύεται ενέργεια ικανή για άντληση στο εξωτερικό Na^+ και στο εσωτερικό K^+ σε αναλογία 3/2. Σύμφωνα με την εξίσωση:



Όπου οι δείκτες εσ και εξ σημαίνουν εσωτερικός και εξωτερικός χώρος της μεμβράνης.

Το ένζυμο της μεμβράνης που προκαλεί την μεταφορά των 2 ιόντων είναι η Na, K-ATPάση και για αυτό η αντλία Νατρίου-Καλίου αναφέρεται και ως ηλεκτρονική αντλία του ενζύμου Na, K-ATPάση . (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Αντλία Na, K-ATPάσης . Οι μετακινήσεις ιόντων Na^+ και K^+ που οφείλονται στο δυναμικό ηρεμίας της κυτταρικής μεμβράνης ενός νευρώνα συμβολίζονται με μαύρα βέλη, ενώ οι μετακινήσεις που οφείλονται στην ενεργό μεταφορά λόγω της αντλίας $\text{Na}^+ \text{K}^+$ (κόκκινα βέλη) είναι σε αντίθετη κατεύθυνση.

4. Νευρικό σύστημα

Το Νευρικό σύστημα στο ανθρώπινο σώμα είναι ένα σύστημα ελέγχου και συντονισμού πολλών εσωτερικών λειτουργιών του οργανισμού. Το Νευρικό σύστημα παρόλο που όλα τα μέρη του συνεργάζονται στενά, μπορεί να διαιρεθεί στο:

- Κεντρικό νευρικό σύστημα (ΚΝΣ)
- Περιφερικό νευρικό σύστημα (ΠΝΣ)
- Αυτόνομο νευρικό σύστημα (ΑΝΣ)

Το ΚΝΣ περιλαμβάνει τον εγκέφαλο και το νωτιαίο μυελό.

Το ΠΝΣ περιλαμβάνει τα νεύρα που εκτείνονται έξω από το ΚΝΣ μέχρι της μυς και τα αισθητήρια όργανα και τα γάγγλια.

Το ΑΝΣ ρυθμίζει και ελέγχει τη λειτουργία διαφόρων εσωτερικών οργάνων της την καρδιά το έντερο και της αδένες. Το ΑΝΣ αν και είναι λειτουργικά διακριτό σύστημα, ανατομικά αποτελείται από τμήματα του ΚΝΣ και του ΠΝΣ.

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος είναι ο πιο πολύπλοκος ιστός του σώματος. Της πτυχές από της βασικές λειτουργίες του εγκεφάλου παρόλο την τεράστια πρόοδο που έχει γίνει της τελευταίες δεκαετίες δεν είναι πλήρως κατανοητές η κατανοούνται ελάχιστα.

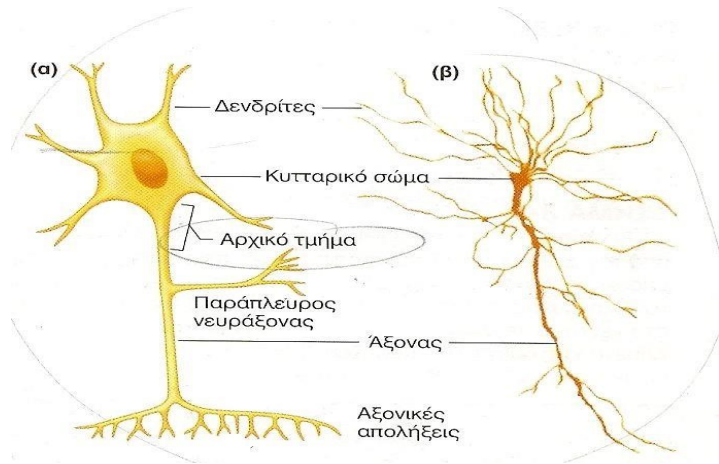
Η σημαντικότερη λειτουργία του εγκεφάλου του ανθρώπου που είναι ικανότητα να σκέφτεται δεν είναι κατανοητή. Οι απaráμιλλες δυνατότητες του εγκεφάλου θεωρείται ότι οφείλονται στη μεγάλη εξειδίκευση των περιοχών του, στην μεγάλη ποικιλία των συνδέσεων του και στο μεγάλο μέγεθός του. Η αναλογία του βάρους του ανθρώπινου εγκεφάλου σε σχέση με το σώμα του είναι η μεγαλύτερη σε όλο το ζωικό βασίλειο. Ο εγκέφαλος του μέσου ενήλικα άντρα ζυγίζει 1400 gr ενώ της μέσης ενηλίκου γυναίκας ζυγίζει περίπου 1300 gr.

Ο εγκέφαλος έχει μαλακή υφή και καλύπτεται από 3 μεμβράνες (μήνιγγες) μέσα στο κρανίο το οποίο τον προστατεύει από της μηχανικές κακώσεις. Της προστατεύεται γιατί επιπλέει μέσα στο εγκεφαλονωτιαίο υγρό που απορροφά της διάφορες δονήσεις. Ο εγκέφαλος συνδέεται με το νωτιαίο μυελό ο οποίος της περιβάλλεται από εγκεφαλονωτιαίο υγρό και προστατεύεται από τα οστά της σπονδυλικής στήλης.

5. Νευρώνες

Η βασική δομική και λειτουργική μονάδα του νευρικού συστήματος είναι το νευρικό κύτταρο ή νευρώνας. Τα νευρικά κύτταρα παράγουν ηλεκτρικά σήματα που μεταδίδονται από το ένα μέρος του κυττάρου στο άλλο, ενώ συγχρόνως εκλύουν βιοχημικές ουσίες (ακετυλοχολίνη – Ach) προκειμένου να επικοινωνήσουν με άλλα κύτταρα. Ένας νευρώνας αποτελείται από τα εξής 4 μέρη (Εικόνα 5):

- το κυρίως σώμα
- τους δενδρίτες
- τον άξονα ή νευρική ίνα
- τις αξονικές απολήξεις

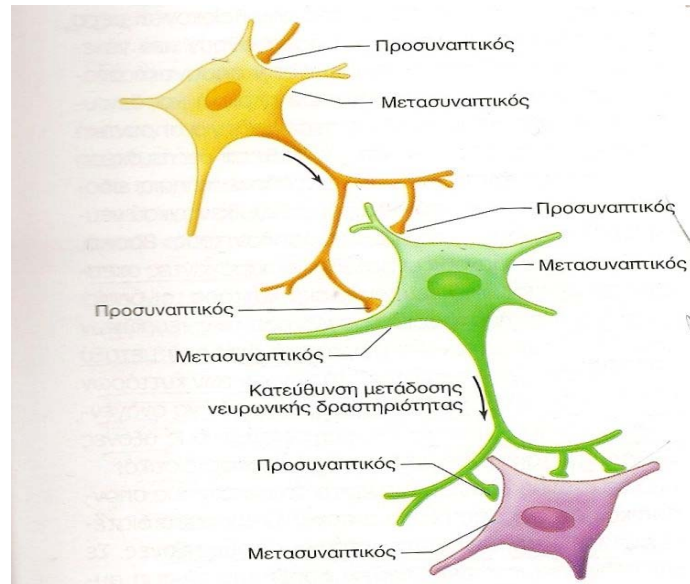


Εικόνα 5: α) Διαγραμματική αναπαράσταση νευρώνα, β) Νευρώνας όπως φαίνεται στο μικροσκόπιο.

Στο κυτταρικό σώμα του νευρώνα υπάρχει ο πυρήνας που περιέχει το DNA καθώς και οργανίδια απαραίτητα για τη σύνθεση πρωτεϊνών. Από το κυρίως σώμα ξεκινούν οι δένδριτες που σχηματίζουν δομές με πολλές διακλαδώσεις και συνδέονται χωρίς επαφή με τις συνάψεις άλλου νευρώνα εξασφαλίζοντας τη σύνδεση «εν σειρά» πολλών νευρικών κυττάρων που σχηματίζουν ένα νεύρο του περιφερικού νευρικού συστήματος.

Ο άξονας είναι μια ίνα με διάμετρο 30-50 μm και μήκος που ποικίλει από μερικά μικρόμετρα μέχρι πάνω από ένα μέτρο. Το τμήμα του άξονα που βρίσκεται πιο κοντά στο κυτταρικό σώμα μαζί με το τμήμα του κυτταρικού σώματος όπου συνδέεται ο άξονας ονομάζονται αρχικό τμήμα. Από αυτό ξεκινούν τα ηλεκτρικά σήματα που διαδίδονται μακριά από το κυτταρικό σώμα κατά μήκος του άξονα.

Ο άξονας μπορεί να έχει κάθετες διακλαδώσεις στην πορεία του, τους παράπλευρους νευράξονες. Ενώ στις απολήξεις τόσο του κυρίου άξονα όσο και των παράπλευρων νευραξόνων υπάρχουν και άλλες διακλαδώσεις. Κάθε διακλάδωση καταλήγει σε μια απόληξη που είναι υπεύθυνη για την απελευθέρωση χημικών ουσιών (νευροδιαβιβαστών) από τους νευρώνες στο απέναντι κύτταρο διαχέοντας αυτές στο μεταξύ τους εξωκυττάριο χώρο (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Προσυναπτικοί και μετασυναπτικοί νευρώνες.

Οι νευρώνες ανάλογα με την λειτουργία που επιτελούν διακρίνονται στους προσαγωγούς, απαγωγούς και διανευρώνες.

Οι προσαγωγοί νευρώνες μεταβιβάζουν πληροφορίες από τους ιστούς και τα όργανα του σώματος στο ΚΝΣ.

Οι απαγωγοί νευρώνες μεταφέρουν πληροφορίες από το ΚΝΣ στους κατάλληλους μύς και αδένες.

Οι διανευρώνες συνδέουν τους προσαγωγούς με τους απαγωγούς νευρώνες μέσα στο ΚΝΣ. Επομένως βρίσκονται μέσα σε αυτούς.

Οι διανευρώνες αποτελούν το 99% όλων των νευρώνων και παρουσιάζουν ποικίλες λειτουργίες σχήματα, ιδιότητες. Για κάθε προσαγωγό νευρώνα που εισέρχεται στο ΚΝΣ αντιστοιχούν 10 απαγωγοί νευρώνες και 200.000 διανευρώνες.

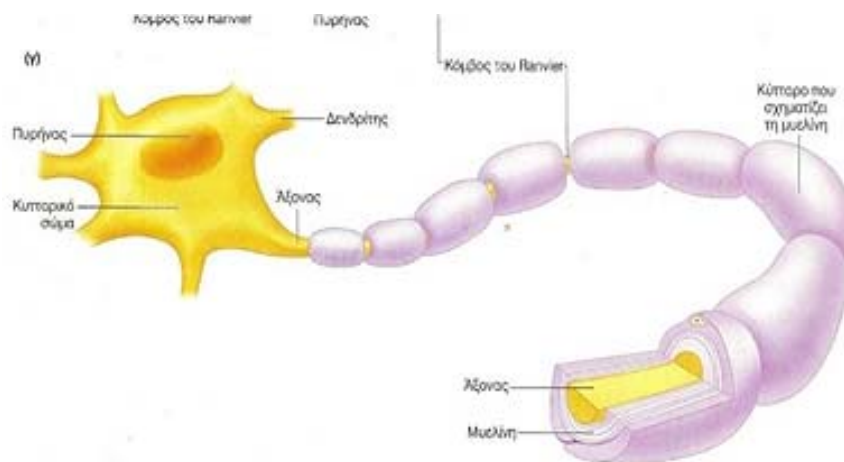
Η εξειδικευμένη σύνδεση μεταξύ δύο νευρώνων στο μονωτικό χώρο πάχους λίγο εκατοντάδων Α° δύο ή μεταξύ των τελικών απολήξεων του νευρώνα και του κυτταρικού σώματος ή δενδρίτη του επόμενου νευρώνα, όπου ο ένας μεταβάλλει την λειτουργία του άλλου, ονομάζεται σύναψη. Στις περισσότερες συνάψεις το σήμα διαδίδεται από τον ένα στον άλλο νευρώνα μέσω χημικών ουσιών που ονομάζονται νευροδιαβιβαστές με τις οποίες οι απαγωγοί νευρώνες επικοινωνούν με τα εκτελεστικά κύτταρα. Ο νευροδιαβιβαστής που εκλύεται από τον ένα νευρώνα διαχέεται στον μονωτικό χώρο μεταξύ αυτού και του επόμενου κυττάρου, το οποίο διεγείρει.

Συνήθως ένα νευρικό κύτταρο είναι σε επαφή με πολλές συνάψεις. Οι νευρώνες που άγουν σήματα προς μία σύναψη ονομάζονται προσυναπτικοί, ενώ οι νευρώνες που λαμβάνουν σήματα από τη σύναψη και τα οδηγούν μακριά από αυτή ονομάζονται μετασυναπτικοί.

Μια από τις ιδιότητες των συνάψεων είναι ο καθορισμός της αγωγής των ηλεκτρικών παλμών προς μια μόνο κατεύθυνση. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι οι συνάψεις λειτουργούν σαν ένας ημιαγωγός που επιτρέπει την διόδο ηλεκτρικού ρεύματος προς μια μόνο διεύθυνση.

Οι μεμβράνες των αξόνων με διάμετρο μεγαλύτερη από 1μm περιβάλλονται από μυελίνη, μια λιπιδειδή μονωτική μεμβρανική θήκη. Η μυελίνη σχηματίζεται από κύτταρα που στο ΚΝΣ ονομάζονται ολιγοδενδροκύτταρα και στο ΠΝΣ κύτταρα Schwann. Τα κύτταρα αυτά περιελίσσονται γύρω από τον άξονα.

Μεταξύ 2 θηκών μυελίνης παρεμβάλλεται ένα τμήμα του άξονα μη μονωμένο μήκους 1-2 mm, (ανάλογα με το είδος του κυττάρου) που είναι εκτεθειμένο στο εξωκυττάριο υγρό. Τα μέρη αυτά του άξονα που δεν καλύπτονται από μυελίνη ονομάζονται κόμβοι ή περισφίγγεις του Ranvier (Εικόνα 7).



Εικόνα 7: Νευρώνας με τις θήκες μυελίνης και τους κόμβους Ranvier.

Η επικάλυψη των αξόνων με μυελίνη λειτουργεί ως ηλεκτρικός μονωτής και επομένως επιταχύνει την διέλευση των ηλεκτρικών σημάτων κατά μήκος του άξονα.

Κατά μήκος του άξονα μετακινούνται διάφορες ουσίες και οργανίδια από το κυρίως σώμα του νευρώνα προς τις απολήξεις και αντίστροφα και έτσι διάφορες χημικές ουσίες όπως οι τοξίνες (πολυομυελίτιδας, τετάνου, έρπητα) μετακινούνται επηρεάζοντας τόσο τη μορφολογία και βιοχημεία του νευρώνα όσο και το ΚΝΣ.

6. Δυναμικό Δράσης

Αν ο άξονας ενός νευρικού κυττάρου διεγερθεί σ' ένα σημείο του με κάποιο ερέθισμα (ηλεκτρικό, χημικό, θερμικό, μηχανικό), τότε το δυναμικό ηρεμίας της μεμβράνης του κυττάρου σε εκείνο το σημείο μεταβάλλεται. Αν η μεταβολή αυτή είναι μικρότερη των 20mV παράγεται ένας μικρός ηλεκτρικός παλμός, ο οποίος αποσβένεται γρήγορα. Αν η μεταβολή είναι πάνω από 20mV τότε δημιουργείται ένας παλμός δυναμικού με ορισμένο ύψος και μορφή που ονομάζεται δυναμικό δράσης.

Η δημιουργία του δυναμικού δράσης λόγω εξωτερικής διέγερσης οφείλεται στην αύξηση της διαπερατότητας της μεμβράνης για τα ιόντα Na^+ από το εξωκυττάριο στο ενδοκυττάριο χώρο. Οι

παροδικές μεταβολές στο δυναμικό ηρεμίας της μεμβράνης προκαλούν ηλεκτρικά σήματα που μπορούν να αλλάζουν τη λειτουργία του κυττάρου. Οι αλλαγές αυτές είναι ο πιο σημαντικός τρόπος διαχείρισης και μεταφοράς ερεθισμάτων από τα νευρικά κύτταρα.

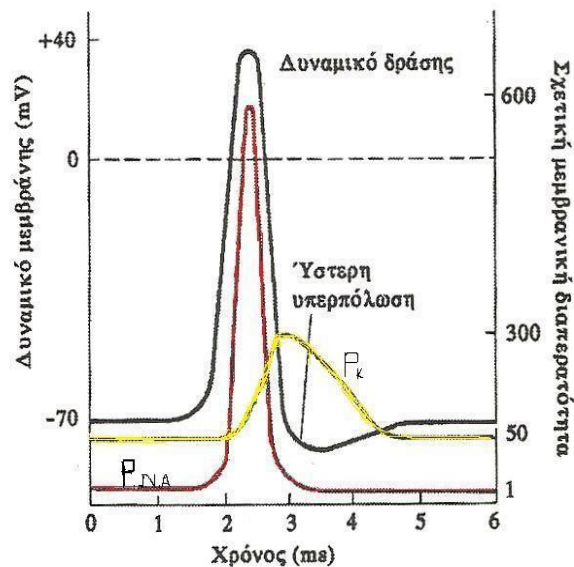
Για την καλύτερη κατανόηση των παραγράφων που ακολουθούν θα πρέπει να σημειώσουμε τα εξής:

Μία μεμβράνη είναι πολωμένη όταν το εσωτερικό της είναι αρνητικότερο του εξωτερικού της (δυναμικό ηρεμίας).

Μια μεμβράνη είναι εκπολωμένη όταν το δυναμικό της είναι λιγότερο αρνητικό (δηλαδή πιο κοντά στο μηδέν) από το δυναμικό ηρεμίας. Ο όρος αυτός περιλαμβάνει και την κατάσταση όπου το δυναμικό μεμβράνης αντιστρέφεται (όταν δηλαδή το εσωτερικό του κυττάρου γίνει ηλεκτρικά θετικότερο του εξωτερικού).

Η μεμβράνη ονομάζεται υπερπολωμένη όταν στο δυναμικό της είναι περισσότερο αρνητικό από το δυναμικό ηρεμίας. Όταν το δυναμικό ηρεμίας μιας μεμβράνης που έχει εκπολωθεί ή υπερπολωθεί επιστρέφει προς την τιμή του δυναμικού ηρεμίας, τότε λέμε ότι η μεμβράνη υφίσταται επαναπόλωση.

Κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος (δηλ. της φάσης της εκπόλωσης), τα θετικά φορτία που εισέρχονται στο κύτταρο με τη μορφή ιόντων Na^+ είναι περισσότερα από αυτά που εξέρχονται με τη μορφή ιόντων K^+ και έτσι το δυναμικό ηρεμίας της μεμβράνης γίνεται λιγότερο αρνητικό και στο τέλος αντιστρέφεται. Σ' αυτή τη φάση το δυναμικό της μεμβράνης πλησιάζει αλλά δεν φθάνει το δυναμικό ισορροπίας του Na^+ (60 mV).



Εικόνα 8: Χρονική μεταβολή του δυναμικού δράσης και της διαπερατότητας των ιόντων Na^+ και K^+ .

Το δυναμικό δράσης στο νευρικό κύτταρο διαρκεί περίπου 1 ms. Η πολύ γρήγορη αυτή επιστροφή του δυναμικού της μεμβράνης στο επίπεδο ηρεμίας οφείλεται στο κλείσιμο των διαύλων Na^+ που ήταν στο άνοιγμα των διαύλων K^+ . Η χρονική σειρά των δύο αυτών γεγονότων φαίνεται στην Εικόνα 8.

Το κλείσιμο μόνο των διόδων Na^+ θα αποκαθιστούσε το δυναμικό της μεμβράνης στη στάθμη ηρεμίας αφού η ροή K^+ προς τα έξω θα ήταν μεγαλύτερη της ροής Na^+ προς τα μέσα. Όμως η διαδικασία επιταχύνεται με την ταυτόχρονη αύξηση της διαπερατότητας K^+ . Τα δύο αυτά γεγονότα, το κλείσιμο των διόδων Na^+ και το άνοιγμα των διόδων K^+ , δημιουργούν διάχυση K^+ προς τον εξωκυττάριο χώρο, που είναι μεγαλύτερη από τη διάχυση Na^+ προς τα μέσα, έτσι η μεμβράνη επιστρέφει γρήγορα στη στάση ηρεμίας.

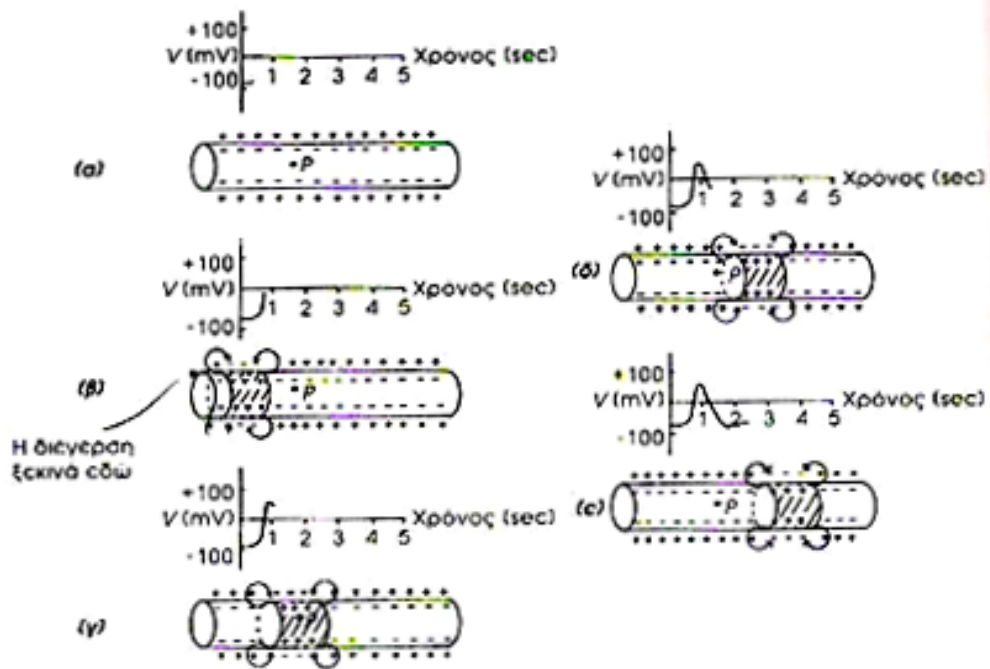
Στην πραγματικότητα, αφού κλείσουν οι δίοδοι Na^+ ορισμένοι δίοδοι K^+ παραμένουν ακόμη ανοικτοί και υπάρχει μια ύστερη υπερπόλωση του δυναμικού της μεμβράνης. Το δυναμικό της μεμβράνης στο οποίο παρατηρείται η εισροή των ιόντων Na^+ να είναι μεγαλύτερη της εκροής ιόντων K^+ ονομάζεται κατωφλικό δυναμικό. Το ερέθισμα των 20 mV που όπως αναφέρθηκε είναι αρκετά ισχυρό ώστε να εκπολώσει τη μεμβράνη σ' αυτό το επίπεδο ονομάζεται κατωφλικό ερέθισμα (κατωφλικό δυναμικό $V_K = -70 \text{ mV} + 20 \text{ mV} = -50 \text{ mV}$).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όταν μία μεμβράνη έχει αναπτύξει ένα δυναμικό δράσης μετά από κατάλληλο ερέθισμα, για να ανταποκριθεί και σε δεύτερο ερέθισμα χρειάζεται χρονικό διάστημα τουλάχιστον 1 msec (ανερέθιστη περίοδος). Η περίοδος του 1 ms περιορίζει τον αριθμό των δυναμικών δράσης που μπορούν να παραχθούν σ' ένα sec. Επομένως δεν μπορούν να παραχθούν παλμοί περισσότεροι από 1000 το δευτερόλεπτο.

Συνήθως οι συχνότητες εμφάνισης των δυναμικών δράσης στα νευρικά κύτταρα είναι περίπου 100 παλμοί / δευτερόλεπτο αλλά υπάρχουν και μερικά κύτταρα που μπορούν να παράγουν δυναμικά δράσης με πολύ υψηλότερες συχνότητες για σύντομα χρονικά διαστήματα. Η συχνότητα των δυναμικών δράσης εκφράζει το μέτρο της έντασης ενός ερεθίσματος.

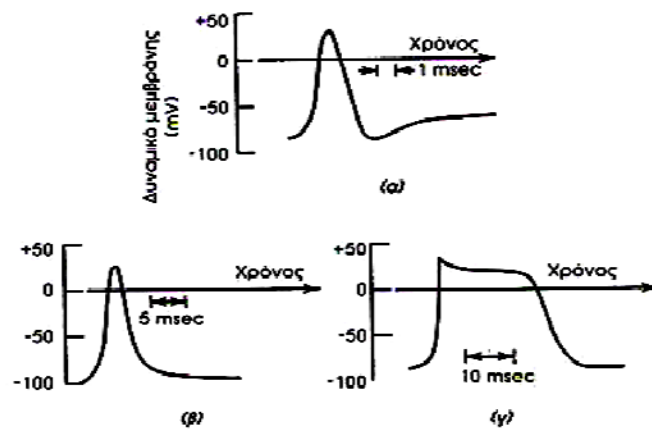
Μεγαλύτερη ένταση του ερεθίσματος δεν προκαλεί δυναμικό δράσης με μεγαλύτερο εύρος. Δηλαδή τα δυναμικά δράσης ή συμβαίνουν με το μεγαλύτερο εύρος τους ή δε συμβαίνουν καθόλου. Μόνη προϋπόθεση είναι να ξεπεράσουν το κατωφλικό δυναμικό ($V_K = -50 \text{ mV}$).

Εκείνο που αυξάνει με την αύξηση της έντασης του ερεθίσματος, είναι όπως ειπώθηκε, η συχνότητα διάδοσης των δυναμικών δράσης δηλ. ο αριθμός των δυναμικών δράσης που διαδίδονται στη μονάδα του χρόνου. Στην περιοχή που εκδηλώνεται ένα δυναμικό δράσης, το εσωτερικό του κυττάρου καθίσταται θετικότερο, σε σχέση με άλλες περιοχές που βρίσκονται στο δυναμικό ηρεμίας. Αυτή η διαφορά δυναμικού που προκύπτει προκαλεί ροή θετικών ιόντων προς εκείνη την περιοχή που γειτονεύει με το σημείο εκδήλωσης του δυναμικού δράσης και η ροή συνεχίζεται μέχρι το δυναμικό στην νέα περιοχή αυτή, αποκτήσει τιμή του κατωφλικού δυναμικού. Τότε ένα νέο δυναμικό δράσης προκύπτει σ' αυτή τη νέα περιοχή. Το νέο δυναμικό δράσης παράγει ρεύματα τα οποία δημιουργούν ένα νέο δυναμικό δράσης στην επόμενη γειτονική περιοχή και ούτω καθεξής, ώστε το δυναμικό δράσης να διαδοθεί κατά μήκος της μεμβράνης (βλ. Εικόνες 9, 10, 11).



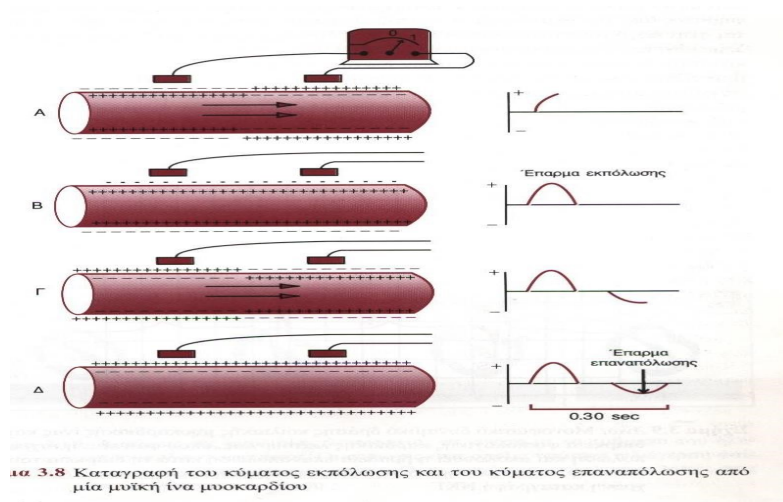
Εικόνα 9.4. Η μετάδοση ενός νευρικού παλμού κατά μήκος του άξονα. Ο παλμός της τάσης που κινείται κατά μήκος αυτού είναι το δυναμικό δράσης.

Εικόνα 9



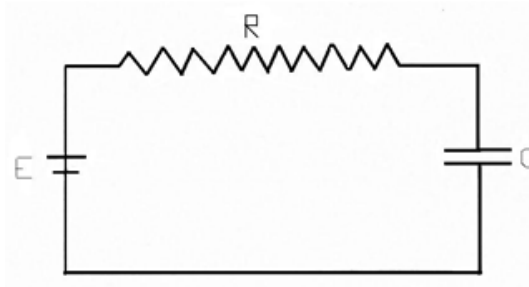
Εικόνα 9.5. Κυματομορφές δυναμικών δράσης από (α) ένα νευράξονα, (β) ένα γραμμωτό μυϊκό κύτταρο και (γ) ένα καρδιακό μυϊκό κύτταρο. Παρατηρήστε τη διαφορά στη χρονική κλίμακα.

Εικόνα 10



Εικόνα 11

Δύο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα διάδοσης του δυναμικού δράσης είναι η ηλεκτρική αντίσταση R που παρουσιάζει το εσωτερικό του άξονα και η χωρητικότητα C μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης. Μείωση είτε του R είτε του C αυξάνει την ταχύτητα διάδοσης του δυναμικού δράσης. Αυτό φαίνεται αν προσομοιώσουμε το νευρικό κύτταρο με ηλεκτρικό κύκλωμα που περιλαμβάνει εν σειρά αντίσταση R , πυκνωτή C και πηγή E (Εικόνα 12α).

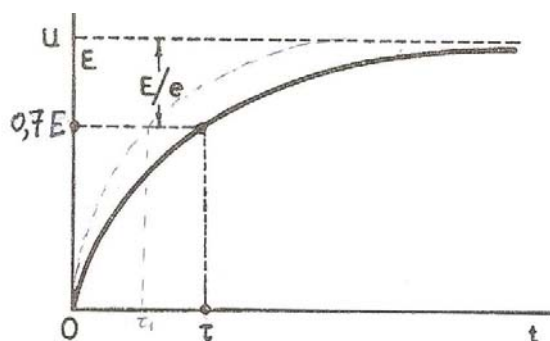


Εικόνα 12α: Ισοδύναμο κύκλωμα (με πυκνωτή και αντίσταση R προς το νευρικό κύκλωμα).

Η φόρτιση του πυκνωτή σε συνάρτηση με το χρόνο δίδεται από τη σχέση:

$$U = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

Η γραφική παράσταση αυτής, φαίνεται στην Εικόνα 12β, Καμπύλη I (συνεχόμενη γραμμή).



Εικόνα 12β: Μεταβολή της τάσεως φορτιζόμενου πυκνωτή.

Ο χρόνος $\tau = RC$ ονομάζεται «σταθερά χρόνου» του κυκλώματος (τ) και χαρακτηρίζει την ταχύτητα φόρτισης του πυκνωτή. Για $t = RC$ η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$U = E(1 - e^{-1}) \approx 0,7E$$

Όταν $R_1C_1 = \tau_1 < \tau$ τότε η καμπύλη φόρτισης παίρνει τη μορφή II (διακεκομμένη γραμμή), δηλαδή ο πυκνωτής θα φορτιστεί ταχύτερα.

Η εσωτερική ηλεκτρική αντίσταση ενός άξονα μειώνεται όσο η διάμετρος της διατομής του αυξάνεται. (Από τον ηλεκτρισμό: $R = \rho \frac{l}{S}$, όπου: S = διατομή του άξονα, ρ = ειδική αντίσταση, και l = μήκος).

Το περίβλημα της μυελίνης είναι καλός μονωτής και επομένως το τμήμα αυτό του άξονα έχει πολύ μικρή χωρητικότητα (λίγο αποθηκευμένο φορτίο). Λόγω της μικρότερης τιμής του C η ταχύτητα διάδοσης του δυναμικού δράσης είναι μεγαλύτερη στις εμύελες ίνες από ότι στις αμύελες, επειδή οι αμύελες παρουσιάζουν μεγαλύτερη χωρητικότητα (περισσότερο αποθηκευμένο φορτίο).

Το πλεονέκτημα των εμύελων νευρικών ινών στον άνθρωπο είναι ότι παρόλο που οι άξονες είναι μικρής διαμέτρου (δηλαδή μεγάλης αντίστασης R), η ταχύτητα διάδοσης του δυναμικού δράσης είναι μεγάλη.

Επομένως το δυναμικό δράσης φθάνει ταχύτερα στον επόμενο κόμβο Ranvier, όπου δημιουργείται πιο γρήγορα το κατωφλικό δυναμικό για να παραχθεί ένα νέο δυναμικό δράσης.

Το δυναμικό δράσης αναπηδά από ένα κόμβο στον επόμενο καθώς διαδίδεται κατά μήκος ενός άξονα με περίβλημα μυελίνης. Ο τρόπος αυτός διάδοσης ονομάζεται «διάδοση με άλματα».

Οι ταχύτητες διάδοσης κυμαίνονται από περίπου 0,5 m/s για μικρής διαμέτρου άξονες, χωρίς περίβλημα μυελίνης, έως περίπου 175 m/s για μεγάλης διαμέτρου άξονες με περίβλημα μυελίνης. Για 0,5 m/s ένα δυναμικό δράσης θα ταξιδέψει από το κεφάλι έως τα δάκτυλα του ποδιού για ένα άτομο μεσαίου μεγέθους σε 4s, ενώ αν έχει ταχύτητα 175 m/s η διάρκεια θα είναι 0,01 s.

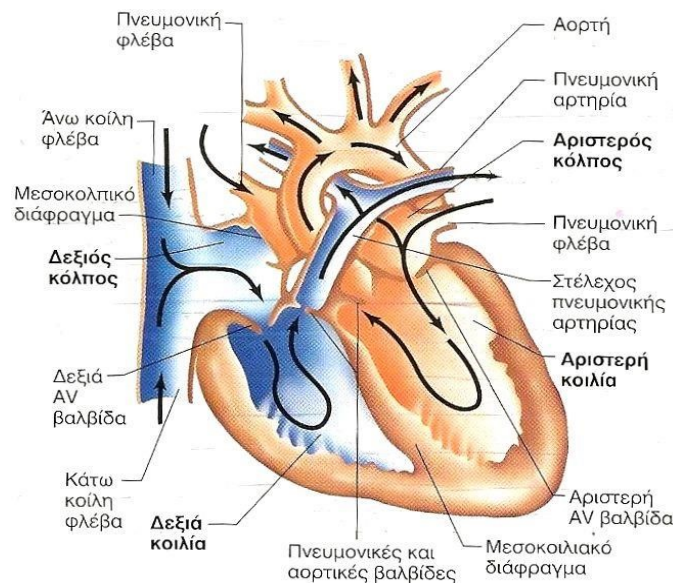
Συνοψίζοντας βλέπουμε ότι το δυναμικό δράσης εμφανίζεται μόνο όταν το ερέθισμα ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή (κατώφλι) και από κει και πέρα είναι ανεξάρτητο του μεγέθους του ερεθίσματος, είναι δηλαδή όπως λέγεται μια απόκριση τύπου «όλα ή τίποτα» που μοιάζει με τη δυαδική απόκριση ενός κοινού ηλεκτρικού διακόπτη στο ερέθισμα (πίεση) του χεριού μας. Ο διακόπτης ή

κλείνει εντελώς ή μένει ανοικτός ανάλογα αν το μηχανικό μας ερέθισμα πέρασε ή δεν πέρασε την κρίσιμη στάθμη "διέγερσης" του διακόπτη.

7. Καρδιά

Η καρδιά είναι το κεντρικό όργανο του καρδιαγγειακού συστήματος στο ανθρώπινο σώμα. Το καρδιαγγειακό σύστημα αποτελείται από την καρδιά, τα πολλά μεγάλου και μικρού εύρους αγγεία και το αίμα που μεταφέρεται από τα αγγεία σε όλο το σώμα.

Η λειτουργία του καρδιαγγειακού συστήματος εξυπηρετεί δύο βασικούς σκοπούς: ο ένας είναι η απελευθέρωση οξυγόνου και θρεπτικών συστατικών σε όλα τα όργανα του ανθρώπινου σώματος και ο άλλος η απομάκρυνση των άχρηστων προϊόντων του μεταβολισμού (των καύσεων) από τους ιστούς.



Εικόνα 13: Διαγραμματική τομή της καρδιάς. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση ροής του αίματος.

Η καρδιά είναι ένα μυϊκό όργανο μεγέθους μεγάλης γροθιάς, ζυγίζει 300 - 400 gr και βρίσκεται μέσα στην κοιλότητα του θώρακα. Ο μυς της καρδιάς ονομάζεται μυοκάρδιο και περιβάλλεται από ένα ινώδη σάκο το περικάρδιο. Ο στενός χώρος μεταξύ καρδιάς και περικάρδιου είναι γεμάτος με μια μικρή ποσότητα υγρού που παίζει το ρόλο λιπαντικού καθώς η καρδιά μετατοπίζεται μέσα στο σάκο.

Το εσωτερικό της καρδιάς καλύπτεται από μια στοιβάδα ενδοθηλιακών κυττάρων ή ενδοθήλιο. Το ενδοθήλιο καλύπτει και την εσωτερική επιφάνεια όλων των αγγείων.

Η καρδιά εσωτερικά χωρίζεται σε 4 κοιλότητες: το δεξιό κόλπο δεξιά κοιλία και αριστερό κόλπο - αριστερή κοιλία (Εικόνα 13).

Οι κόλποι επικοινωνούν με τις κοιλίες με τις κολποκοιλιακές βαλβίδες. Η κολποκοιλιακή βαλβίδα που συνδέει τον αριστερό κόλπο με την αριστερή κοιλία ονομάζεται μιτροειδής, ενώ εκείνη που συνδέει τον δεξιό κόλπο με τη δεξιά κοιλία λέγεται τριγωνχίνα (Εικόνα 13). Οι βαλβίδες αυτές

επιτρέπουν να περάσει ελεύθερα το αίμα από τους κόλπους προς τις κοιλίες, ενώ εμποδίζουν την αντίθετη ροή του κατά τη συστολή των κοιλιών.

Στο δεξιό κόλπο εκβάλλουν τρεις φλέβες, με τις οποίες επιστρέφει στην καρδιά το αίμα από όλα τα μέρη του σώματος (μεγάλη κυκλοφορία). Με την άνω κοίλη φλέβα επανέρχεται το αίμα από το πάνω μέρος του σώματος (κεφάλι, λαιμός, άνω μέρη θώρακα, άνω άκρα) ενώ από την κάτω κοίλη φλέβα το αίμα επανέρχεται από τα υπόλοιπα μέρη του σώματος. Με το στεφανιαίο κόλπο (της στεφανιαίας φλέβας) επανέρχεται το αίμα από τα τριχοειδή που βρίσκονται στα τοιχώματα της καρδιάς. Μέσω της τριγλωχίνας βαλβίδας το αίμα διοχετεύεται στη δεξιά κοιλία

Από τη δεξιά κοιλία το αίμα διοχετεύεται μέσω της πνευμονικής βαλβίδας στην πνευμονική αρτηρία και στη συνέχεια στο αγγειακό σύστημα των πνευμόνων (μικρή κυκλοφορία)

Στον αριστερό κόλπο εκβάλλουν τέσσερις πνευμονικές φλέβες με τις οποίες επιστρέφει στην καρδιά το αίμα από τα τριχοειδή των πνευμόνων (μικρή κυκλοφορία). Μέσω της μιτροειδούς βαλβίδας το αίμα διοχετεύεται στην αριστερή κοιλία

Η πνευμονική βαλβίδα και η αορτική βαλβίδα (αυτές με ένα όνομα λέγονται Μηνοειδείς), επιτρέπουν τη δίοδο του αίματος από τις κοιλίες στις αρτηρίες κα Από την αριστερή κοιλία το αίμα μέσω της αορτικής βαλβίδας και της αορτής στέλνεται σε όλο το αγγειακό σύστημα της μεγάλης κυκλοφορίας. Η πνευμονική βαλβίδα και η αορτική βαλβίδα (αυτές με ένα όνομα λέγονται Μηνοειδείς), επιτρέπουν τη δίοδο του αίματος από τις κοιλίες στις αρτηρίες κατά τη συστολή των κοιλιών, ενώ εμποδίζουν την αντίθετη ροή του αίματος κατά τη διαστολή των κοιλιών.

8. Καρδιακός μυς

Ο καρδιακός μυς, το μυοκάρδιο, συνδυάζει ιδιότητες και σκελετικού και λείου μυός. Το χαρακτηριστικό στους καρδιακούς μύες είναι η ύπαρξη κυτταρικών μεμβρανών που ονομάζονται εμβόλιμοι ή παρэнθετοι δίσκοι και διατρέχουν τις καρδιακές μυϊκές ίνες. Οι δίσκοι αυτοί είναι 400 φορές πιο αγώγιμοι από τη μεμβράνη που περιβάλλει την ίνα και δρουν σαν δίκτυο για τη μεταφορά των διεγέρσεων.

Στον καρδιακό μυ οι κυτταρικές μεμβράνες γειτονικών κυττάρων συγχωνεύονται και δημιουργούν ένα ενιαίο μόρφωμα γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τη συστολή μεγάλου αριθμού μυϊκών ινών σαν σύνολο. Όλες οι μυϊκές ίνες του μυοκαρδίου των κόλπων καθώς και όλες οι μυϊκές ίνες του μυοκαρδίου των κοιλιών συνδέονται μεταξύ τους με έναν ιδιαίτερο τρόπο σύνδεσης, αποτέλεσμα του οποίου είναι ότι η διέγερση μιας ίνας του μυοκαρδίου των κόλπων μεταδίδεται σε όλες τις ίνες του μυοκαρδίου των κόλπων. Το μυοκάρδιο δηλαδή συμπεριφέρεται σαν να αποτελείται από δύο λειτουργικά συγκύτια: ένα των κόλπων και ένα των κοιλιών.

Εξαιτίας αυτής της συγκυτιακής δομής του καρδιακού μυός ο ερεθισμός έστω και μίας κολπικής μυϊκής ίνας οδηγεί στην εξάπλωση του δυναμικού δράσης σε όλη τη μυϊκή μάζα των κόλπων. Επίσης, ο ερεθισμός μιας κοιλιακής μυϊκής ίνας προκαλεί διέγερση ολόκληρης της κοιλιακής μυϊκής μάζας. Αυτό ονομάζεται αρχή του *όλου ή ουδενός* και είναι η ίδια αρχή που ισχύει και για τα νευρικά κύτταρα.

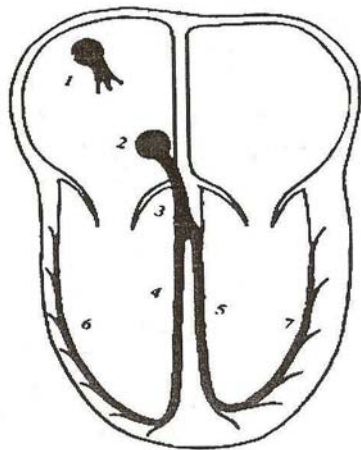
Η καρδιά αποτελείται εκτός από το μυοκάρδιο των κόλπων και των κοιλιών και από τις εξειδικευμένες μυϊκές ίνες διέγερσης και αγωγής της διέγερσης. Το μυοκάρδιο των κόλπων και των κοιλιών συστέλλονται σχεδόν όπως ένας σκελετικός μυς μόνο που η διάρκεια συστολής τους είναι πολύ μεγαλύτερη.

Οι εξειδικευμένες μυϊκές ίνες διέγερσης και αγωγής της διέγερσης συστέλλονται ελάχιστα γιατί περιέχουν λίγα συσταλά ινίδια. Η ρυθμική τους λειτουργία και η μεγάλη ταχύτητα αγωγής της διέγερσης προκαλούν τη διέγερση της καρδιάς και άγουν το σήμα, για τη διέγερση ολόκληρου του μυοκαρδίου.

Επίσης, το πάχος του μυοκαρδίου καθεμιάς από τις τέσσερις κοιλότητες της καρδιάς είναι ανάλογο προς το έργο που επιτελεί. Έτσι το μυοκάρδιο των κοιλιών είναι παχύτερο από το μυοκάρδιο των κόλπων, ενώ το μυοκάρδιο των αριστερών κοιλοτήτων είναι πολύ παχύτερο των δεξιών.

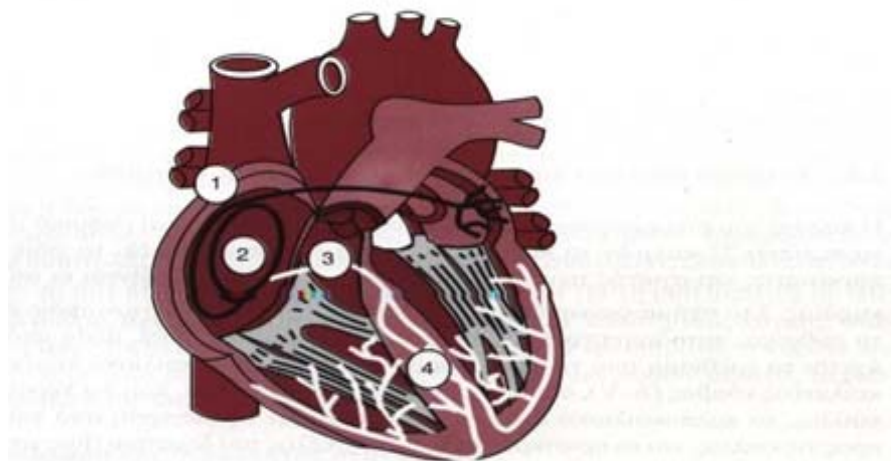
9. Σύστημα διέγερσης της καρδιάς

Η καρδιά διαθέτει ένα ειδικό σύστημα παραγωγής ρυθμικών ηλεκτρικών ώσεων, με τις οποίες προκαλείται η ρυθμική συστολή του μυοκαρδίου και αγωγής των ώσεων αυτών πολύ γρήγορα σε ολόκληρη την καρδιά (Εικόνα 14, 15).



Εικόνα 14: Το σύστημα παραγωγής και αγωγής των διεγέρσεων στην καρδιά.

- 1 Φλεβόκομβος
- 2 Κολποκοιλιακός
- 3 Δεμάτιο His
- 4 Δεξιό σκέλος
- 5 Αριστερό σκέλος
- 6,7 Διακλαδώσεις των σκελών μέσα στο μυοκάρδιο των κοιλιών



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

Εικόνα 15

Το σύστημα αυτό αποτελείται:

- από τον φλεβόκομβο (ή πρωτεύον κέντρο παραγωγής των διεγέρσεων ή βηματοδότης της καρδιάς), ο οποίος αποτελείται από εξειδικευμένο μυϊκό ιστό που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ικανότητα αυτοδιέγερσης. Δηλαδή της αυτόματης ηλεκτρικής διέγερσης με ρυθμό 75 παλμών ανά λεπτό περίπου που ελέγχεται από το αυτόνομο νευρικό σύστημα. Ο φλεβόκομβος βρίσκεται μέσα στο μυοκάρδιο του δεξιού κόλπου κοντά στην εκβολή της άνω κοίλης φλέβας
- από τον κολποκοιλιακό κόμβο, ο οποίος βρίσκεται στο πίσω μέρος του διαφράγματος του δεξιού κόλπου (πίσω από την τριγωνίνα βαλβίδα). Στον κολποκοιλιακό κόμβο και στις ειδικές ίνες αγωγής οφείλεται κατά κύριο λόγο η καθυστέρηση της μετάδοσης της διέγερσης από τους κόλπους στις κοιλίες. Η καθυστέρηση αυτή χρειάζεται για να δίδεται χρόνος ν' αδειάσουν οι κόλποι το περιεχόμενό τους προς τις κοιλίες πριν την έναρξη της συστολής των κοιλιών
- το κολποκοιλιακό δεμάτιο (δεμάτιο του His) που αποτελεί την προς τα κάτω συνέχεια του κολποκοιλιακού κόμβου. Παρατηρείται και σ' αυτό η τελευταία καθυστέρηση της μετάδοσης της διέγερσης. Χαρακτηριστικό του κολποκοιλιακού δεματίου είναι ότι εμποδίζει, εκτός από παθολογικές περιπτώσεις, την παλίνδρομη μετάδοση των δυναμικών δράσης από τις κοιλίες προς τους κόλπους
- τα σκέλη του δεματίου (δεξιό και αριστερό) που αποτελούν τη συνέχεια του δεματίου. Τα σκέλη αυτά φέρονται από τη μία και την άλλη πλευρά του μεσοκοιλιακού διαφράγματος, μέχρι την κορυφή της καρδιάς και από εκεί δίδουν πολλές διακλαδώσεις (ίνες του Purkinje) που καταλήγουν σε πολλά σημεία στο μυοκάρδιο των κοιλιών. Οι ίνες του Purkinje άγουν τα δυναμικά δράσης με ταχύτητα εξαπλάσια από εκείνη του συνήθους μυοκαρδίου, με αποτέλεσμα την άμεση μεταβίβαση της διέγερσης σε ολόκληρο το σύστημα των κοιλιών.

10. Παραγωγή και διάδοση των διεγέρσεων στον καρδιακό μυ

Όπως έχει ήδη περιγραφεί, η καρδιά είναι μια διπλή αντλία και η λειτουργία της βασίζεται στο συγχρονισμό της συστολής των δύο άνω κοιλοτήτων (αριστερού και δεξιού κόλπου) και στην ταυτόχρονη επίσης συστολή των κάτω κοιλοτήτων (αριστερής και δεξιάς κοιλίας).

Πρώτα συστέλλονται οι άνω κοιότητες για να συμπληρωθεί η μεταφορά του αίματος μέσα από τις δύο βαλβίδες από τους δύο κόλπους στις δύο αντίστοιχες κοιλίες.

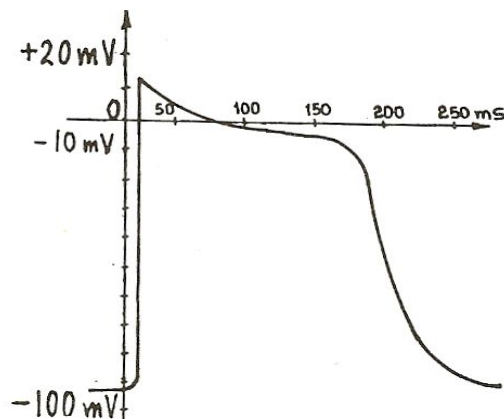
Στη δεύτερη φάση συστέλλονται οι κάτω κοιότητες, για να εκτοξευθεί το αίμα από τις κοιλίες στις δύο αντίστοιχες κυκλοφορίες: την πνευμονική (μικρή κυκλοφορία) και τη συστηματική (μεγάλη κυκλοφορία). Αυτός ο διπλός ηλεκτρικός παλμός (δυναμικό δράσης) επαναλαμβάνεται περίπου 75 φορές ανά λεπτό. Η καρδιά έχει ένα ειδικό κέντρο παραγωγής του περιοδικού παλμού (περιοδικού δυναμικού δράσης) που προκαλεί τις δύο αυτές συστολές, που όπως έχουμε αναφέρει είναι ο φλεβόκομβος.

Το δυναμικό δράσης που παράγεται στα κύτταρα των ινών του φλεβόκομβου (περίπου - 48mV) επαναλαμβάνεται ρυθμικά σε όλη τη ζωή μας (75 φορές το λεπτό). Το δυναμικό αυτό εξαπλώνεται στις μυϊκές ίνες των κόλπων (με ταχύτητα 0,3 m/s) προκαλώντας την εκπόλωση των κυττάρων τους που έχει σαν αποτέλεσμα τη συστολή των μυϊκών ινών.

Στη συνέχεια ακολουθεί επαναπόλωση των κόλπων. Δεσμίδες ειδικών νευρομυϊκών ινών μεταδίδουν με μεγαλύτερη ταχύτητα (0,5 m/s) τον παλμό στον κολποκοιλιακό κόμβο, ο οποίος φθάνει μετά περίπου 40 ms από τη στιγμή της παραγωγής του στον φλεβοκόμβο. Από την είσοδό του στον κολποκοιλιακό κόμβο μέχρι την έξοδό του από το δεμάτιο του His, ο παλμός καθυστερεί 110 ms και μετά οι ίνες του Purkinje που σχηματίζουν τα δύο σκέλη του άγουν τον παλμό στο μυοκάρδιο των κοιλιών με μεγάλη ταχύτητα (1,5 - 4 m/s).

Έτσι οι κοιλιακές ίνες εκπολώνονται και συστέλλονται σχεδόν ταυτόχρονα αλλά με καθυστέρηση περίπου 0,12 sec, σε σχέση με τη συστολή των κολπικών ινών. Αυτή η καθυστέρηση δίνει τον χρόνο για να προωθηθεί η ροή του αίματος από τους κόλπους στις κοιλίες, πριν από την έντονη κοιλιακή συστολή. Έτσι οι κόλποι επιτελούν υποβοηθητική αντλητική λειτουργία για την πλήρωση των κοιλιών, οι οποίες έχουν τη δύναμη για να εξωθήσουν το αίμα σ' όλο το αγγειακό σύστημα.

Τα δυναμικά ηρεμίας της μεμβράνης του καρδιακού μυός είναι περίπου -85 έως -95 mV. Η τιμή του δυναμικού δράσης που καταγράφεται στο μυοκάρδιο των κοιλιών είναι +105 mV. Δηλ. το δυναμικό της μεμβράνης αυξάνει από την πολύ αρνητική τιμή 95mV μέχρι την ελαφρά θετική τιμή των +10 mV. Η μεμβράνη μένει σε κατάσταση εκπόλωσης από 150 ms έως 300 ms. Έτσι εμφανίζεται ένα χαρακτηριστικό επίπεδο (plateau) στην τιμή των 0mV (Εικόνα 16), στο τέλος του οποίου ακολουθεί η επαναπόλωση.



Εικόνα 16: Δυναμικό δράσης από ένα κοιλιακό μυοκαρδιακό κύτταρο.

Το δυναμικό δράσης στο μυοκάρδιο των κοιλιών διαρκεί από 150 έως 300 msec, με αποτέλεσμα αντίστοιχη παράταση της συστολής των κοιλιών. Αντιθέτως στους σκελετικούς μύες το δυναμικό δράσης διαρκεί λίγα ms. Αυτό οφείλεται σε δύο διαφορές ανάμεσα στις ιδιότητες των μεμβρανών των μυοκαρδιακών ινών σε σχέση με τις ίνες των σκελετικών μυών, οι οποίες είναι:

α. Στις μυοκαρδιακές ίνες με την εμφάνιση του δυναμικού δράσης προκαλείται άνοιγμα των διαύλων ασβεστίου που βρίσκονται στην κυτταροπλασματική μεμβράνη, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τη ροή ιόντων ασβεστίου από τον εξωκυττάριο στον ενδοκυττάριο χώρο, που διαρκεί 0,2 έως 0,3sec. Το επίπεδο (plateau) αντιστοιχεί στην παρατεταμένη ροή των θετικών ιόντων ασβεστίου. Στις ίνες των σκελετικών μυών έχουμε μικρή ροή ιόντων ασβεστίου και για πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

β. Με την εμφάνιση του δυναμικού δράσης η διαπερατότητα της μεμβράνης του μυοκαρδίου για το κάλιο ελαττώνεται 5 φορές, γεγονός που συμβαίνει στο σκελετικό μυ. Η ελαττωμένη

διαπερατότητα για τα ιόντα καλίου έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη μείωση της εξόδου ιόντων καλίου για τα επόμενα 0,2 έως 0,3sec που εμποδίζει την επαναπόλωση της μεμβράνης και συντελεί στη διατήρηση του επιπέδου (plateau).

Η ταχύτης διάδοσης του δυναμικού δράσης της κοιλιακής μυϊκής ίνας είναι περίπου 0,3 έως 0,5 m/s, δηλ. 10 φορές μικρότερη από την ταχύτητα διάδοσης στην ίνα ενός σκελετικού μύος και 250 φορές μικρότερη από την ταχύτητα διάδοσης στην νευρική ίνα.

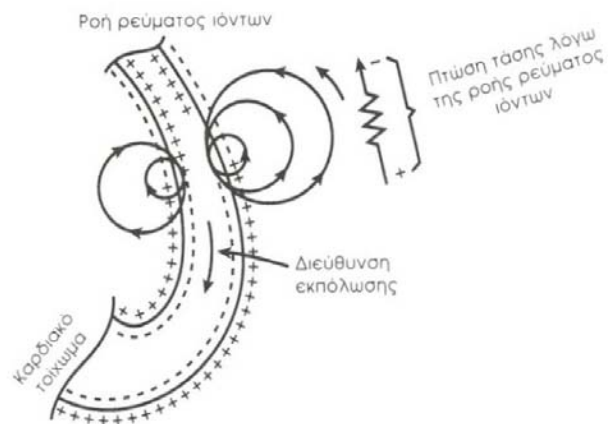
11. Ηλεκτρικά σήματα στον καρδιακό μυ

Τα σήματα αυτά είναι το άθροισμα των δυναμικών δράσης που συμβαίνουν ταυτόχρονα σε πολλά κύτταρα του μυοκαρδίου, χρονικά. Το πεδίο αυτό που αναπτύσσεται, μέσα από τους αγώγιμους ιστούς του σώματος φθάνει μέχρι την επιφάνεια του σώματος. Επομένως η μελέτη των ηλεκτρικών διεργασιών του μυοκαρδίου μπορεί να γίνει από μετρήσεις των ηλεκτρικών δυναμικών της καρδιάς στην επιφάνεια του σώματος.

Η τεχνική καταγραφής και μελέτης των ηλεκτρικών δυναμικών σε συνάρτηση με το χρόνο λέγεται ηλεκτροκαρδιογραφία.

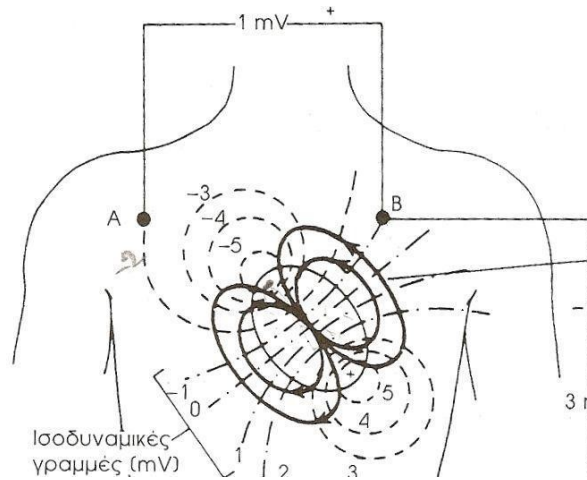
Η σχέση μεταξύ της αντλητικής λειτουργίας της καρδιάς και των ηλεκτρικών δυναμικών στο δέρμα γίνεται κατανοητή αν λάβουμε υπόψη τη διάδοση της εκπόλωσης από τμήμα του καρδιακού μύος.

Τα δυναμικά δράσης των καρδιακών μυϊκών κυττάρων όπως έχει αναφερθεί διαρκούν πολύ περισσότερο από το δυναμικό δράσης ενός άξονα νευρικού κυττάρου. Για αυτό στην Εικόνα 17 θα εξετάσουμε μόνο το ρεύμα της καρδιάς που εκπολώνεται. Η ροή του ρεύματος μέσω των ιστών του σώματος προκαλεί πτώση τάσης στην αντίσταση που φαίνεται στην εικόνα:



Εικόνα 17: Σχηματική παράσταση του κύματος εκπόλωσης καθώς κινείται προς το κάτω μέρος του κοιλιακού τοιχώματος, δημιουργώντας ρεύματα ιόντων που παρίστανται με τους κύκλους. Η αντίσταση υποδηλώνει την ηλεκτρική αντίσταση των ιστών. Το δυναμικό στο θωρακικό τοίχωμα οφείλεται στη ροή ρεύματος στην αντίσταση των ιστών.

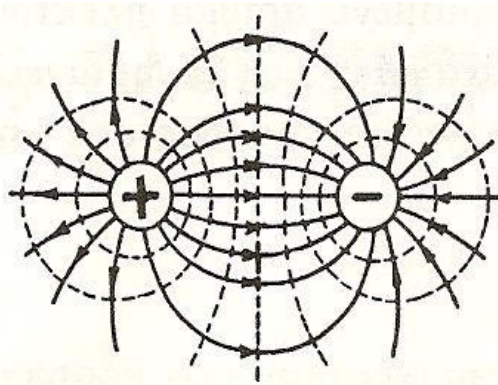
Στην Εικόνα 18 φαίνονται οι ισοδυναμικές γραμμές στο δέρμα του θώρακος κατά τη στιγμή της εκπόλωσης κατά το ήμισυ των κοιλιών.



Εικόνα 18: Ισοδυναμικές γραμμές στο θώρακα όταν οι κοιλίες έχουν εκπολωθεί κατά το ήμισυ. Τα ηλεκτρόδια που έχουν τοποθετηθεί στα σημεία Α,Β,Γ καταγράφουν τα δυναμικά τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Η μορφή των ισοδυναμικών γραμμών που φαίνονται στην Εικόνα 18 είναι σχεδόν ίδια με αυτή που προέρχεται από ένα ηλεκτρικό δίπολο, ένα σύστημα δύο ίσων και αντιθέτων φορτίων q , τα οποία βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους l .

Διπολική ροπή διπόλου ονομάζεται το άνυσμα: $p = ql$.



Εικόνα 19: Ηλεκτρικό πεδίο δύο ίσων και αντιθέτων φορτίων.

Στην Εικόνα 19 οι συνεχείς γραμμές παριστάνουν το ηλεκτρικό πεδίο του διπόλου, ενώ οι διακεκομμένες τις ισοδυναμικές γραμμές του διπόλου, όπως αποτυπώνονται αυτές σε μία επιφάνεια, η οποία διέρχεται από το δίπολο.

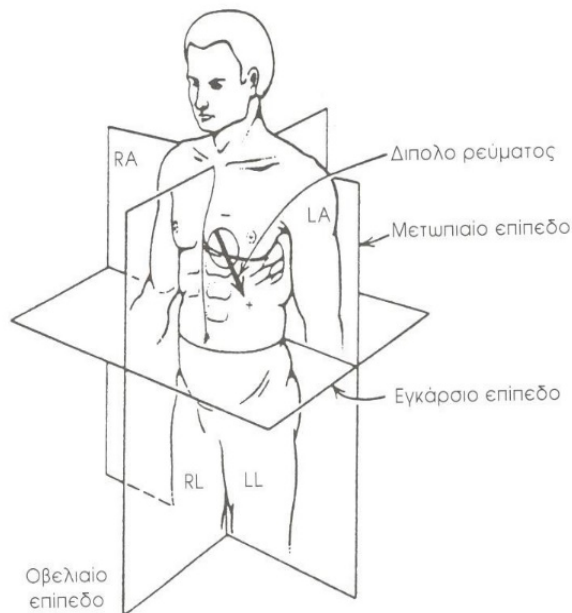
Μπορούμε επομένως να θεωρούμε στο εξής ότι ηλεκτρικά η καρδιά συμπεριφέρεται ως δίπολο. Το ηλεκτρικό δίπολο στην καρδιά προέρχεται από τα ρεύματα ιόντων (δυναμικά δράσης) που προέρχονται από την εκπόλωση της καρδιάς. Η διαφορά δυναμικού σε δύο σημεία στην

επιφάνεια του δέρματος είναι ανάλογη της προβολής του ανύσματος της διπολικής ροπής στον άξονα που περνάει από τα δύο αυτά σημεία.

Επειδή το μέτρο και η διεύθυνση της διπολικής ροπής μεταβάλλονται με το χρόνο, θα μεταβάλλεται και η προβολή του ανύσματος της διπολικής ροπής σε οποιοδήποτε άξονα.

Σε κάθε στιγμή του καρδιακού κύκλου αντιστοιχεί ένα άνυσμα διπολικής ροπής (που προκύπτει από το άθροισμα όλων των στιγμιαίων ανυσμάτων), το οποίο δείχνει τη μέση διεύθυνση κατά την οποία εξαπλώνεται το κύμα εκπόλωσης και ονομάζεται ηλεκτρικός άξονας της καρδιάς.

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται το ηλεκτρικό δίπολο της καρδιάς σε σχέση με τα τρία ηλεκτροκαρδιογραφικά επίπεδα.

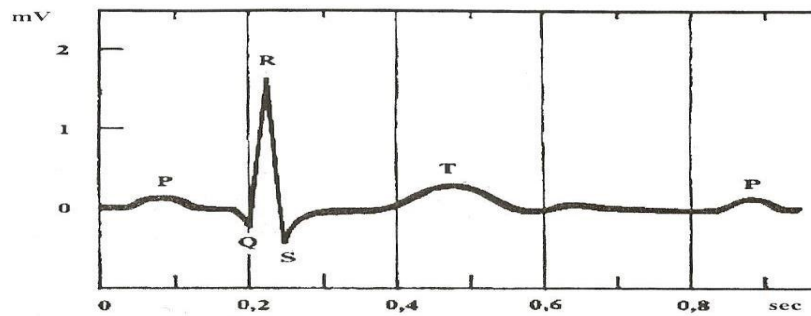


Εικόνα 20: Το ηλεκτρικό δίπολο της καρδιάς και τα τρία ηλεκτροκαρδιογραφικά επίπεδα.

12. Ηλεκτρο-Καρδιο-Γράφημα (ΗΚΓ)

Μέχρι εδώ έχει κατανοηθεί ότι η καρδιά ηλεκτρικά συμπεριφέρεται ως ηλεκτρικό δίπολο. Η ηλεκτρική δραστηριότητα (εκπόλωση - επαναπόλωση) των κυττάρων της καρδιάς δημιουργεί δυναμικά και στην επιφάνεια του σώματος. Εάν τοποθετηθούν ηλεκτρόδια μεταξύ δύο σημείων που βρίσκονται σε διάφορες θέσεις πάνω στο δέρμα καθίσταται δυνατή η καταγραφή των ηλεκτρικών δυναμικών που παράγονται από την καρδιά μέσω καταγραφικού οργάνου, το οποίο καλείται ηλεκτροκαρδιογράφος. Η καμπύλη που λαμβάνεται με αυτόν το τρόπο ονομάζεται ηλεκτροκαρδιογράφημα (ΗΚΓ).

Ένα φυσιολογικό ΗΚΓ που αφορά δύο διαδοχικούς καρδιακούς κύκλους απεικονίζεται στην Εικόνα 21 (βλ. και Εικόνες 22,23).



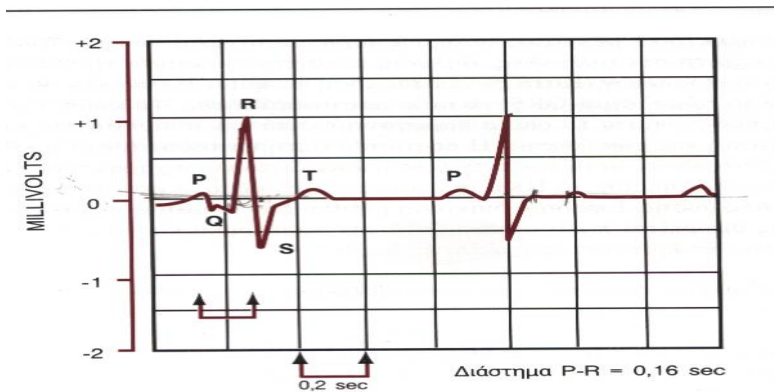
Εικόνα 21: Τυπικό ηλεκτροκαρδιογράφημα.

Το ΗΚΓ αποτελείται από ένα κύμα (ή έπαρμα) P, ένα σύμπλεγμα QRS και ένα κύμα T.

Το κύμα P είναι το δυναμικό που προκαλείται από ηλεκτρικά ρεύματα, που παράγονται κατά την εκπόλωση των κόλπων πριν από τη συστολή τους.

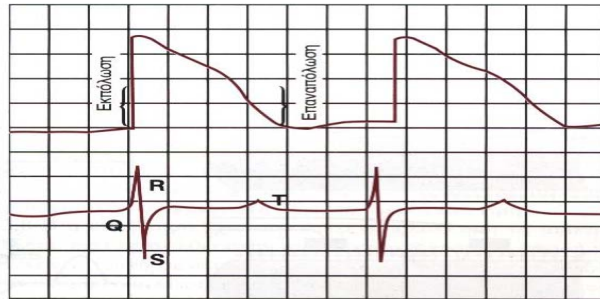
Το σύμπλεγμα QRS προκαλείται από ηλεκτρικά ρεύματα που παράγονται κατά την εκπόλωση των κοιλιών πριν από τη συστολή τους. Το κύμα T προκαλείται από ηλεκτρικά ρεύματα που παράγονται κατά την επαναπόλωση των κοιλιών.

Η επαναπόλωση των κόλπων δεν καταγράφεται λόγω των πολύ μικρών ηλεκτρικών ρευμάτων. Στα χρονικά διαστήματα που η διαφορά δυναμικού στο ΗΚΓ παρουσιάζει τιμή μηδέν, το ηλεκτρικό δίπολο της καρδιάς έχει προβολή μηδέν επάνω στον άξονα που συνδέει τα δύο σημεία με τα οποία μετράμε τη διαφορά δυναμικού.



Το φυσιολογικό ηλεκτροκαρδιογράφημα

Εικόνα 22



Άνω: Μονοφασικό δυναμικό δράσης κοιλιακής μυοκαρδιακής ίνας κατά τη διάρκεια φυσιολογικής καρδιακής λειτουργίας, όπου φαίνεται η ταχεία εκπόλωση και ακολουθεί η βραδεία επαναπόλωση κατά τη διάρκεια του επιπέδου (plateau) με σημαντική όμως επιτάχυνση προς το τέλος. *Κάτω:* Σύγχρονη καταγραφή ΗΚΓ

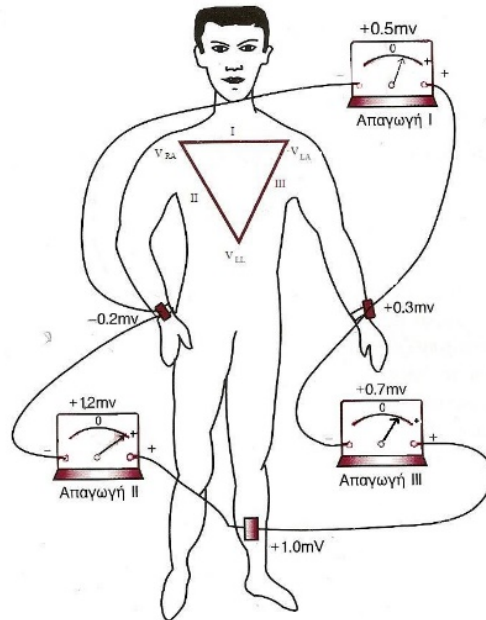
Εικόνα 23

13. Ηλεκτροκαρδιογραφικές απαγωγές

Η θέση που τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια του ηλεκτροκαρδιογράφου πάνω στο ανθρώπινο σώμα, ώστε να σχηματίζεται ένα πλήρες ηλεκτρικό κύκλωμα με αυτόν λέγεται απαγωγή. Οι απαγωγές διακρίνονται σε 3 διπολικές ή κλασσικές και 9 μονοπολικές (τρεις ενισχυμένες μονοπολικές των άκρων και 6 προκάρδιες απαγωγές).

Κλασσικές Απαγωγές

Στην Εικόνα 24 απεικονίζονται οι ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ των άκρων για την καταγραφή ΗΚΓ από τις ονομαζόμενες διπολικές ή κλασσικές απαγωγές των άκρων. Με τον όρο «διπολικές» εννοείται ότι το ΗΚΓ καταγράφεται από δύο ειδικά ηλεκτρόδια, τοποθετημένα στο σώμα μας και σε αυτήν την περίπτωση στα άκρα.



Εικόνα 24: Η σύνδεση των διπολικών ή κλασσικών απαγωγών I, II, III. Στο θώρακα είναι σχεδιασμένο το τρίγωνο του EINTHOVEN.

Οι τρεις κλασσικές απαγωγές συμβολίζονται με τους λατινικούς αριθμούς I, II, III. Η λήψη αυτών γίνεται με την τοποθέτηση ηλεκτροδίων στον καρπό του δεξιού χεριού, στον καρπό του αριστερού χεριού και στην κνήμη του αριστερού κάτω άκρου. Η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων αυτών αντιστοιχεί στις τρεις κορυφές του ισόπλευρου τριγώνου που ονομάζεται τρίγωνο του EINTHOVEN (Ολλανδός φυσιολόγος), του οποίου τριγώνου η κάτω κορυφή αντιστοιχεί στο ηβικό οστόν και οι γωνίες της βάσης του στους ώμους.

Διότι σύμφωνα με την υπόθεση του EINTHOVEN η καρδιά βρίσκεται στο κέντρο του τριγώνου και τα δυναμικά που παράγονται σε αυτήν μεταδίδονται χωρίς εμπόδια στις πλευρές του τριγώνου μέσα από τους ιστούς του σώματος, που θεωρούνται ότι έχουν την ίδια ηλεκτρική αγωγιμότητα και εντέλει καταγράφονται από τις 3 κλασσικές απαγωγές. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στους καρπούς και στην αριστερή κνήμη επειδή η μετάδοση των δυναμικών της καρδιάς μέχρι εκεί δεν επηρεάζεται από το πρόσθετο μήκος των άνω και κάτω άκρων και επομένως είναι σαν τα δυναμικά στην Εικόνα 24 που έχουν τοποθετηθεί στους δύο ώμους και στο ηβικό οστόν. Στην Εικόνα 24 οι θέσεις αυτές συμβολίζονται σαν V_{RA} , V_{LA} και V_{LL} αντίστοιχα και μπορούν να θεωρηθούν σαν οι τρεις κορυφές του τριγώνου EINTHOVEN.

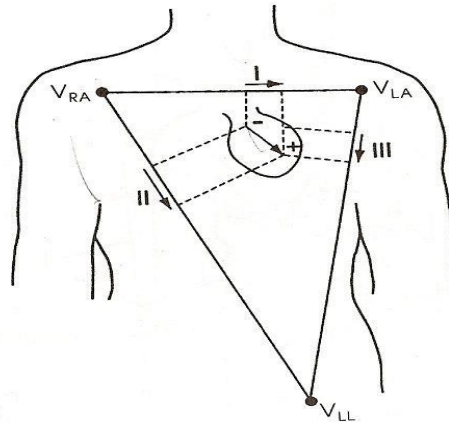
Η απαγωγή I καταγράφει διαφορές δυναμικού μεταξύ του αριστερού και του δεξιού άνω άκρου με το θετικό πόλο του ηλεκτροκαρδιογράφου συνδεδεμένο με το αριστερό άνω άκρο και τον αρνητικό πόλο με το δεξιό άνω άκρο. Επομένως όταν το σημείο του θώρακα όπου το δεξιό άνω άκρο συνδέεται με το σώμα είναι ηλεκτρο-αρνητικό σε σχέση με το σημείο στο οποίο το αριστερό άκρο συνδέεται με το θώρακα, τότε ο ηλεκτροκαρδιογράφος καταγράφει θετικό κύμα. Στην εικόνα η απαγωγή $I = V_{LA} - V_{RA}$ (οι τιμές λαμβάνονται με τα πρόσημά τους).

Η απαγωγή II καταγράφει διαφορές δυναμικού μεταξύ αριστερής κνήμης και του δεξιού άνω άκρου. Εδώ ο θετικός πόλος βρίσκεται στην κνήμη και ο αρνητικός στο δεξιό άνω άκρο.

Επομένως όταν το δεξιό άνω άκρο είναι ήλεκτρο-αρνητικό σε σχέση με το αριστερό κάτω άκρο ο ηλεκτροκαρδιογράφος καταγράφει θετικό κύμα. Στην εικόνα η απαγωγή II = $V_{LL} - V_{RA}$.

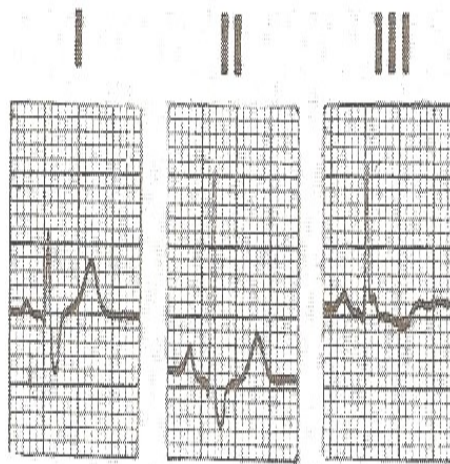
Η απαγωγή III καταγράφει διαφορές δυναμικού μεταξύ της αριστερής κνήμης και του αριστερού άνω άκρου με το θετικό πόλο στην κνήμη και τον αρνητικό στο αριστερό άνω άκρο.

Άρα ο ηλεκτροκαρδιογράφος καταγράφει θετικό κύμα όταν το αριστερό άνω άκρο είναι ήλεκτρο-αρνητικό σε σχέση με το αριστερό κάτω άκρο. Στην εικόνα η απαγωγή III = $V_{LL} - V_{LA}$.



Εικόνα 25: Σχηματική παρουσίαση του ηλεκτρικού διπόλου της καρδιάς όπως προβάλλεται στο μετωπιαίο επίπεδο.

Στην Εικόνα 25 φαίνεται σχηματικά το ηλεκτρικό δίπολο της καρδιάς όπως προβάλλεται στο μετωπιαίο επίπεδο. Στην εικόνα απεικονίζονται οι προβολές του ανύσματος της διπολικής ροπής του ηλεκτρικού διπόλου της καρδιάς, επάνω στις πλευρές του τριγώνου EINTHOVEN. Οι απαγωγές I, II, III είναι ανάλογες αντιστοίχως των προβολών αυτών.

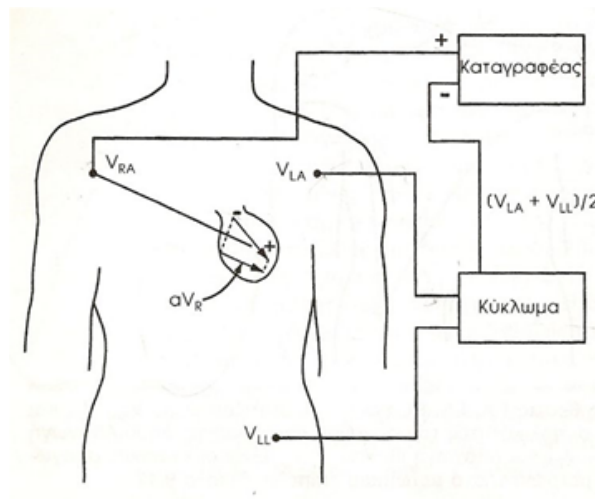


Εικόνα 26: Φυσιολογικά ηλεκτροκαρδιογραφήματα που λαμβάνονται με τις απαγωγές I, II, III.

Ενισχυμένες Απαγωγές

Οι ενισχυμένες μονοπολικές απαγωγές των άκρων aV_R , aV_L , aV_F λαμβάνονται επίσης στο μετωπιαίο επίπεδο.

Για την καταγραφή της aV_R ένα ηλεκτρικό κύκλωμα συνδυάζει τα δυναμικά V_{LA} και V_{LL} και υπολογίζει τη μέση τιμή τους. Η διαφορά μεταξύ της V_R και αυτής της μέσης τιμής δίνει την aV_R . Με αυτή τη διάταξη δίνεται η δυνατότητα καταγραφής μιας διαφορετικής προβολής του σήματος του ηλεκτρικού διπόλου πάνω στον άξονα που συνδέει την καρδιά με το δεξιό άνω άκρο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 27. Με παρόμοια διαμόρφωση λαμβάνονται και οι υπόλοιπες απαγωγές.



Εικόνα 27: Σχηματική παράσταση διάταξης για τη μέτρηση της ενισχυμένης απαγωγής aV_R .



! Φυσιολογικά ΗΚΓ που καταγράφηκαν από τις τρεις βασικές ηλεκτροκαρδιογραφικές απαγωγές των άκρων

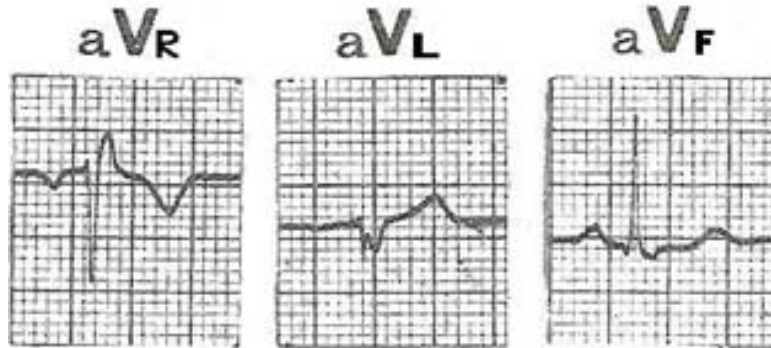
Εικόνα 28

Οι ενισχυμένες απαγωγές περιγράφονται ως εξής:

$$aV_R = V_{RA} - (V_{LA} + V_{LL})/2$$

$$aV_L = V_{LA} - (V_{RA} + V_{LL})/2$$

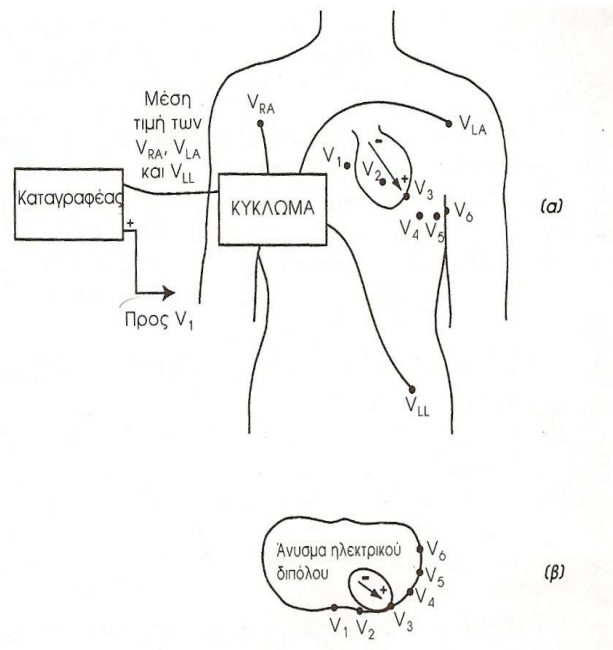
$$aV_F = V_{LL} - (V_{RA} + V_{LA})/2$$



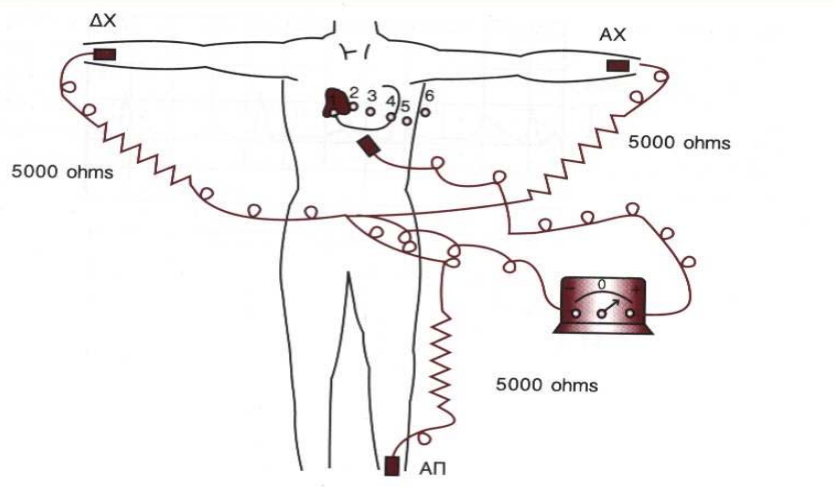
Εικόνα 29: Φυσιολογικά ηλεκτροκαρδιογραφήματα που λαμβάνονται με τις ενισχυμένες απαγωγές των άκρων aV_R , aV_L , aV_F .

Προκάρδιες απαγωγές

Οι μονοπολικές ή προκάρδιες απαγωγές λαμβάνονται στο εγκάρσιο επίπεδο με το ένα ηλεκτρόδιο τοποθετημένο στην πρόσθια επιφάνεια του θώρακα πάνω από την καρδιά., σε μία από τις έξι ειδικές θέσεις V1 - V6 , όπως φαίνεται στην Εικόνα 30 (βλ. και Εικόνα 31).



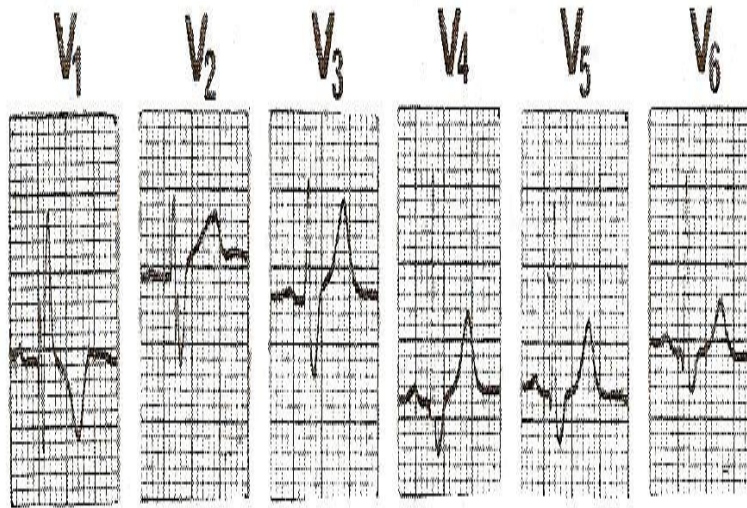
Εικόνα 30: Οι θέσεις των προκάρδιων απαγωγών: (α) πρόσθια όψη στην οποία φαίνεται το ηλεκτρονικό κύκλωμα που παρέχει το αδιάφορο ηλεκτρόδιο (αρνητικό) που λαμβάνεται από τη μέση τιμή των V_{RA} , V_{LA} , V_{LL} . Το θετικό ηλεκτρόδιο μετακινείται στα σημεία του θώρακα που συμβολίζονται με διάφορα V_1 μέχρι V_6 , (β) κάτοψη.



3.13 Συνδέσεις του σώματος με τον ηλεκτροκαρδιογράφο για την καταγραφή προκάρδιων απαγωγών

Εικόνα 31

Στην Εικόνα 32 απεικονίζονται τα ΗΚΓτα φυσιολογικής καρδιάς, όπως καταγράφονται από τις έξι προκάρδιες απαγωγές.



Εικόνα 32: Φυσιολογικά ηλεκτροκαρδιογραφήματα που λαμβάνονται από τις έξι προκάρδιες απαγωγές.

Κατά την κλινική πράξη εδώ και πολλά χρόνια έχει επικρατήσει το ΗΚΓ των 12 απαγωγών δηλ. όπως έχουμε αναφέρει λαμβάνονται 12 ΗΚΓτα: έξι στο εγκάρσιο επίπεδο και έξι στο μετωπιαίο. Χρησιμοποιούνται εννέα θέσεις ηλεκτροδίων και καταγράφουν 12 δυναμικά I, II, III, aV_R, aV_L, aV_F και V1 έως V6. Το ΗΚΓ των 12 απαγωγών καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της σύγχρονης ηλεκτροκαρδιογραφίας. Με αυτό καθορίζεται με ακρίβεια η συχνότητα της καρδιακής λειτουργίας και οι μεταβολές της.

Η συμβολή του είναι εξαιρετική στην άμεση διευκρίνιση και εκτίμηση της διαταραχής της καρδιακής συχνότητας εφ' όσον η εξέταση γίνεται κατά τη διάρκεια της καρδιακής αρρυθμίας, στη διάγνωση του οξέος εμφράγματος του μυοκαρδίου και άλλων κλινικών μορφών της στεφανιαίας νόσου, στην αποκάλυψη διαταραχών της αγωγής του ερεθίσματος (π.χ. αποκλεισμός σκέλους του δεματίου His, κολποκοιλιακός αποκλεισμός κλπ.) στην παρουσία έκτακτων συστολών, καθώς και η θέση παραγωγής του ερεθίσματος.

Επίσης, σημαντική είναι η συμβολή του ΗΚΓτος στη διάγνωση και εκτίμηση υπερτροφίας των κοιλιών ή των κόλπων, στη διάγνωση της περικαρδίτιδας, στη μελέτη μυοκαρδιοπαθειών, στις διαταραχές ασβεστίου και καλίου του αίματος. Αναγνωρίζονται επίσης με το ΗΚΓ διάφορες τοξικές επιδράσεις στο μυοκάρδιο (π.χ. της δακτυλιτίδας, της κινιδίνης και άλλων).

Ακόμα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και ηλεκτρονικοί υπολογιστές για την ανάλυση των ΗΚΓτων και μερικές φορές κάνουν καλύτερες διαγνώσεις από κάποιους καρδιολόγους. Στις μονάδες εντατικής θεραπείας (ΜΕΘ), καθώς και κατά τη διάρκεια χειρουργικών επεμβάσεων, λαμβάνονται συνεχώς ΗΚΓ/τα που προβάλλονται σε οθόνη (παλμογράφο). Το ΗΚΓ δείχνει τις διαταραχές στη φυσιολογική ηλεκτρική δραστηριότητα της καρδιάς. Για παράδειγμα, το ΗΚΓ

μπορεί να αποκαλύψει την παρουσία μιας παθολογικής κατάστασης που καλείται *κολποκοιλιακός αποκλεισμός*. Στην πάθηση αυτή το σήμα του φλεβοκόμβου δεν παράγεται στις κοιλίες οπότε η συστολή των κοιλιών ελέγχεται από ερεθίσματα που παράγονται στον κολποκοιλιακό κόμβο. Στην περίπτωση αυτή η συχνότητα των καρδιακών παλμών είναι 30 έως 50 παλμοί/min, δηλαδή πολύ χαμηλότερη από τη φυσιολογική (70-80 παλμοί/min). Ο κολποκοιλιακός αποκλεισμός αντιμετωπίζεται με την εμφύτευση τεχνητού βηματοδότη που επιτρέπει στον ασθενή να ζήσει φυσιολογικά.

14. Ηλεκτρο-Μυο-Γράφημα (ΗΜΓ)

Η ηλεκτρική δραστηριότητα των μυών παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τη μελέτη της μυϊκής λειτουργίας καθώς και της λειτουργικότητας των περιφερικών νεύρων και των νευρομυϊκών συνάψεων. Η διάδοση του δυναμικού δράσης κατά μήκος της εμμύελης νευρικής ίνας έχει ήδη περιγραφεί. Εδώ θα περιγράψουμε τη μεταβίβαση του δυναμικού δράσης από τον νευρικό άξονα στο μυ, στο οποίο προκαλεί συστολή. Η καταγραφή των ηλεκτρικών δυναμικών των μυών κατά τη διάρκεια της συστολής τους ονομάζεται ηλεκτρομυογράφημα (ΗΜΓ).

Διαβίβαση του δυναμικού δράσης από τη νευρική στη μυϊκή ίνα

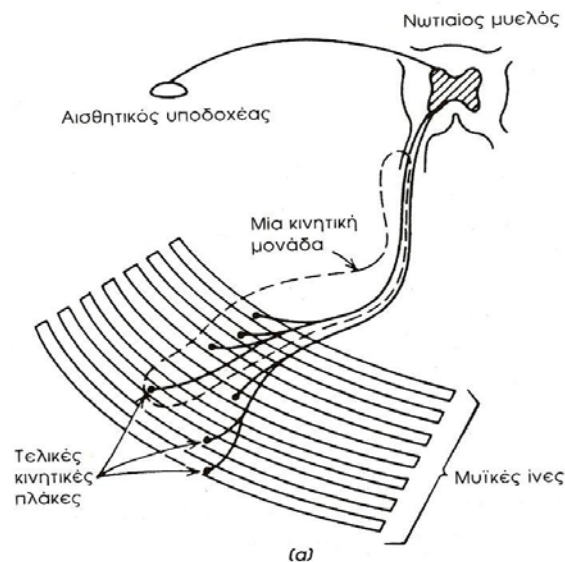
Ο σκελετικός μυς αποτελείται από πολλές κινητικές μονάδες.

Κάθε κινητική μονάδα αποτελείται από ένα κινητικό νευρώνα και τις μυϊκές ίνες (25 έως 2000) που ο ίδιος νευρώνει.

Το κυτταρικό σώμα του νευρώνα βρίσκεται στον εγκέφαλο ή στο νωτιαίο μυελό (στη σπονδυλική στήλη).

Οι άξονες των κινητικών νευρώνων είναι εμμύελοι και έχουν τη μεγαλύτερη διάμετρο νευράξονα στο ανθρώπινο σώμα. Μπορούν έτσι να μεταδίδουν δυναμικά δράσης με μεγάλη ταχύτητα επιτρέποντας διεγέρσεις από το ΚΝΣ να μεταφέρονται στις ίνες του σκελετικού μυ με ελάχιστη καθυστέρηση.

Κοντά στο μυ, ο άξονας του κινητικού νευρώνα παύει να καλύπτεται από μυελίνη και διακλαδίζεται σε διάφορες βραχείες νευρικές ίνες. Αυτές συνδέονται με τις αντίστοιχες μυϊκές ίνες μέσω «νευρομυϊκών» συνάψεων που λέγονται τελικές κινητικές πλάκες (Εικόνα 33).



Εικόνα 33: Σχηματική παράσταση ενός νευρώνα που προέρχεται από το νωτιαίο μυελό και καταλήγει σε πολλά μυϊκά κύτταρα. Ο νευρώνας και τα μυϊκά κύτταρα με τα οποία συνδέεται αποτελούν μια κινητική μονάδα (διακεκομμένη γραμμή).

Όταν το δυναμικό δράσης φθάσει στη σύναψη απελευθερώνει μεταξύ της πλάκας και της μεμβράνης της αντίστοιχης νευρικής ίνας μια ουσία, την ακετυλοχολίνη (Ach). Τα ίδια συμβαίνουν όπως έχει αναφερθεί και εκεί που συναντώνται δύο νευρώνες.

Η ακετυλοχολίνη είναι ένας χημικός νευροδιαβιβαστής, ο οποίος διαβιβάζει τον παλμό του δυναμικού δράσης στην μυϊκή ίνα. Η ακετυλοχολίνη μέχρι να διασπαστεί από ένα ένζυμο την ακετυλοχολινεστεράση (σε 2 έως 3 ms) προλαβαίνει να ανοίξει τους διαύλους της μεμβράνης της μυϊκής ίνας. Έτσι ιόντα K^+ και Na^+ μπορούν να διασχίσουν τους διαύλους αυτούς.

Επειδή υπάρχουν διαμεμβρανικές ηλεκτροχημικές διαφορές περισσότερο Na^+ κινείται προς τα μέσα από ότι K^+ προς τα έξω αυξάνοντας τοπικά το δυναμικό της μεμβράνης κατά 50 έως 75 mV. Έτσι το δυναμικό ηρεμίας του διεγερσιμου μυϊκού κυττάρου ανεβαίνει πολύ πιο πάνω από τον ουδό κατωφλίου (πυροδότησης) και προκαλεί ένα δυναμικό δράσης σε αυτό.

Διάδοση του δυναμικού δράσης και συστολή της μυϊκής ίνας

Το νέο μυϊκό δυναμικό δράσης που έχει διάρκεια περίπου διπλάσια από το δυναμικό δράσης του νευράξονα, διαδίδεται από τη θέση της τελικής κινητικής πλάκας και προς τις δύο κατευθύνσεις κατά μήκος της μυϊκής ίνας την οποία και εκπολώνει.

Η μεταβίβαση των διαδικασιών της εκπόλωσης κατά μήκος της μυϊκής ίνας και προς τις δύο κατευθύνσεις ονομάζεται μυϊκή ώση και το αποτέλεσμα της είναι το δυναμικό δράσης της μυϊκής ίνας. Το άθροισμα όλων των δυναμικών δράσης όλων των μυϊκών ινών μιας κινητικής μονάδας ονομάζεται δυναμικό δράσης κινητικής μονάδας και είναι το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται στις μυϊκές ίνες σαν αποτέλεσμα της κινητοποίησης της αντίστοιχης κινητικής μονάδας.

Οι σκελετικοί μύες που αποτελούν το 40% της μάζας του ανθρωπίνου σώματος είναι γραμμωτοί, όπως ο καρδιακός μυς. Οι βασικές μονάδες που απαρτίζουν το μυ είναι οι μυϊκές ίνες οι οποίες είναι τακτοποιημένες σε δέσμες διαφορετικών διαστάσεων που ονομάζονται μυϊκές δέσμες. Ο χώρος μεταξύ των μυϊκών ινών καλύπτεται από συνδετικό ιστό. Επίσης, κάθε μυϊκή δέσμη καλύπτεται εξωτερικά από ένα δυνατό συνδετικό ιστό και ολόκληρος ο μυς καλύπτεται από ένα πιο δυνατό επίστρωμα συνδετικού ιστού.

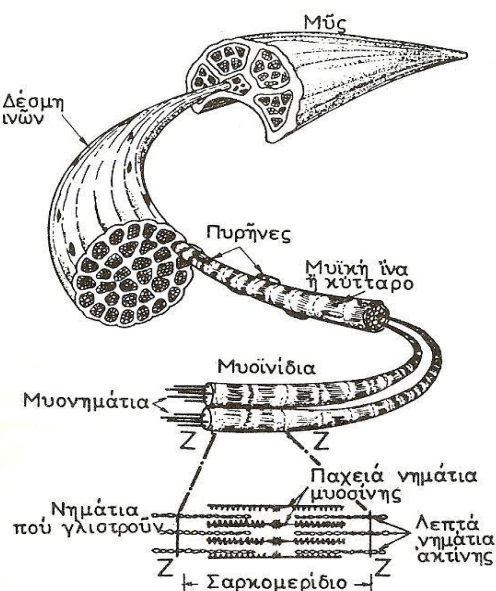
Η κάθε μυϊκή ίνα διαιρείται σε πολλά μυοϊνίδια (διαμέτρου περίπου 1μm) και το κάθε μυοϊνίδιο αποτελείται από «σαρκομερίδια» που συνδέονται στη σειρά μέσω υμένων Z. Σε κάθε σαρκομερίδιο υπάρχουν δύο είδη μυονημάτων:

α. τα μυονημάτια ακτίνης διαμέτρου 5 nm

β. τα μυονημάτια μουσίνης διαμέτρου 12 nm

Μετά την παραπάνω εκπόλωση, τα σαρκομερίδια των μυοϊνιδίων και επομένως ο μυς, συστέλλονται (βλ. και Εικόνα 34).

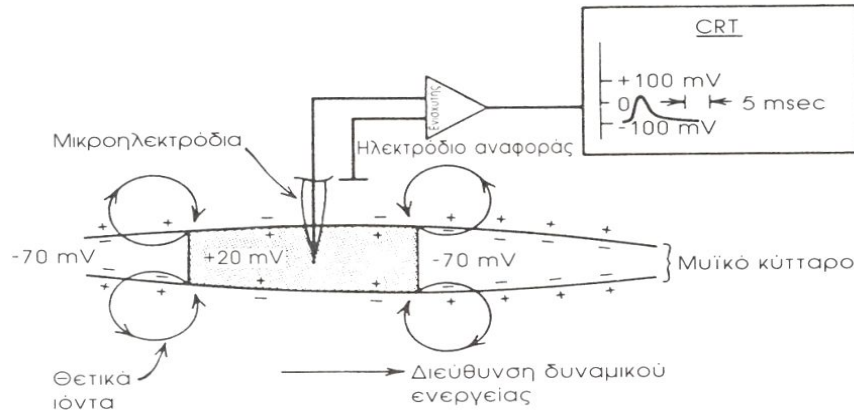
Δεν είναι ακόμα εντελώς γνωστός ο μηχανισμός με τον οποίο το δυναμικό δράσης προκαλεί τη μηχανική συστολή. Αυτό που πιστεύεται ότι γίνεται είναι ότι τα παράλληλα μυονημάτια ακτίνης, που προβάλλουν από τις δύο πλευρές του κάθε υμένα Z, ολισθαίνουν ανάμεσα στα μυονημάτια της μουσίνης και αναγκάζουν τους γειτονικούς υμένες Z να πλησιάσουν μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο συστέλλεται το σαρκομερίδιο και επομένως συστέλλονται το μυοϊνίδιο, η μυϊκή ίνα και ο μυς.



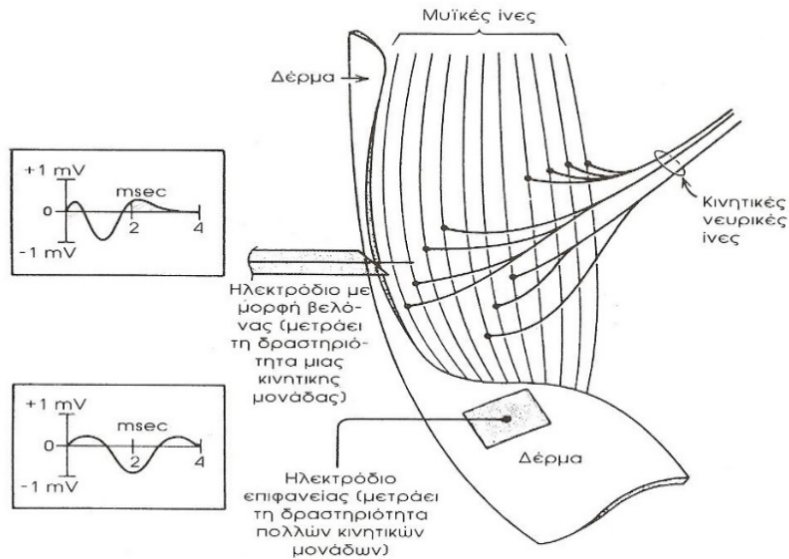
Εικόνα 34: Δομή σκελετικού μύος.

15. Λήψη και καταγραφή του ΗΜΓ

Όπως στο μυοκάρδιο έτσι και στους σκελετικούς μύες, όταν ένα δυναμικό δράσης διατρέχει μια μυϊκή ίνα προκαλεί ένα μεταβαλλόμενο δυναμικό στο γειτονικό δέρμα. Στην Εικόνα 35 απεικονίζεται μία διάταξη για τη μέτρηση του δυναμικού δράσης σε ένα μυϊκό κύτταρο. Μια τέτοια μέτρηση πραγματοποιείται με ένα μικροηλεκτρόδιο το οποίο τοποθετείται στη μυϊκή μεμβράνη. Όταν το δυναμικό δράσης διατρέχει πολλές παράλληλες μυϊκές ίνες (οι οποίες ταυτόχρονα συστέλλονται), τότε τα ηλεκτρικά δυναμικά αθροίζονται στο δέρμα δίνοντας υψηλές τιμές. Μια πλήρης διάταξη λήψης και απεικόνισης ΗΜΓ παρουσιάζεται στην Εικόνα 36.



Εικόνα 35: Διάταξη μέτρησης του δυναμικού δράσης από μια μυϊκή ίνα. Το μικροηλεκτρόδιο είναι μονωμένο εκτός από την αιχμή του και το ηλεκτρόδιο αναφοράς βυθίζεται στο εξωκυττάριο υγρό.



Εικόνα 36: Διάταξη λήψης και απεικόνισης ΗΜΓ με ηλεκτρόδιο ομοαξονικής βελόνας και ηλεκτρόδιο επιφάνειας δέρματος.

Είναι δύσκολο να απομονωθεί μία μυϊκή ίνα και να μετρηθεί η μεταβολή του δυναμικού της. Στα συνήθη ΗΜΓ καταγράφεται η ηλεκτρική δραστηριότητα περισσότερων μυϊκών ινών, με ηλεκτρόδια επιφανείας δέρματος ή ηλεκτρόδιο ομοαξονικής βελόνας. Τα επιφανειακά ηλεκτρόδια αποτελούνται από ένα μεταλλικό δίσκο, συνήθως Ag-AgCl, είναι μονωμένα σε όλο το μήκος τους εκτός από το σημείο επαφής τους και τοποθετούνται πάνω στο δέρμα, στην περιοχή του αντίστοιχου μυ με χρήση ηλεκτρολυτική κρέμας. Τα ηλεκτρόδια αυτά ανιχνεύουν τη μέση δραστηριότητα των επιφανειακών μυών.

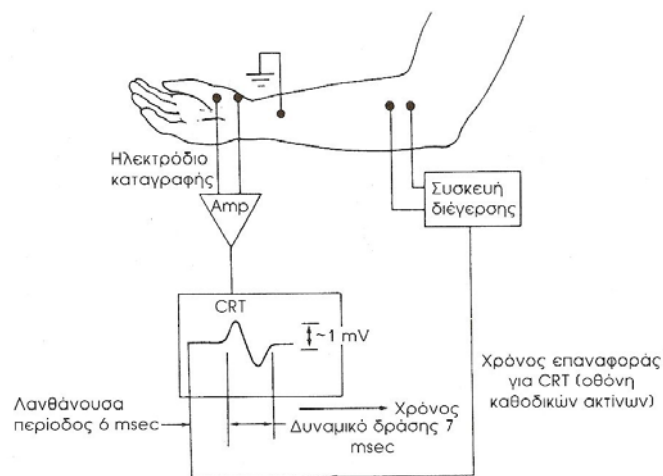
16. ΗΜΓ λόγω ηλεκτρικής διέγερσης

Εκτός από τη μέθοδο της εκούσιας συστολής, προτιμάται η μέθοδος της ακούσιας συστολής του μυός με εξωτερική ηλεκτρική διέγερση για τη λήψη ΗΜΓ.

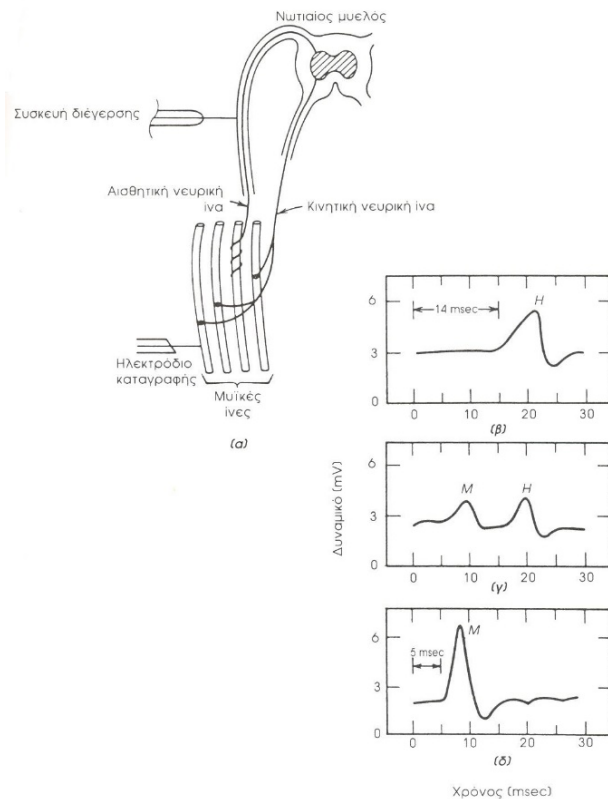
Η εκούσια συστολή διαρκεί συνήθως σε 100ms περίπου γιατί οι κινητικές μονάδες δε διεγείρονται ταυτόχρονα. Με τη μέθοδο της ηλεκτρικής διέγερσης, της προκλητής συστολής όπως λέγεται, η στιγμή και η διάρκεια του ηλεκτρικού ερεθίσματος ελέγχονται ακριβώς από το μηχάνημα (διεγέρτη) και όλες οι μυϊκές ίνες διεγείρονται σχεδόν ταυτόχρονα. Το ηλεκτρικό ερέθισμα μπορεί να έχει ύψος 100V και διάρκεια 0,1 μέχρι 0,5ms.

Στην Εικόνα 37 φαίνεται η διάρκεια διέγερσης και καταγραφής του ΗΜΓτος. Το δυναμικό δράσης παρουσιάζεται στο ΗΜΓ με κάποια καθυστέρηση σε σχέση με το ερέθισμα που λέγεται «λανθάνουσα» περίοδος. Συχνά συγκρίνονται τα δυναμικά δράσης και οι λανθάνουσες περίοδοι είτε από ΗΜΓ συμμετρικών μυών του σώματος, είτε από ΗΜΓ ασθενών και υγιών ανθρώπων.

Μπορούμε να μελετήσουμε το σύστημα των αντανακλαστικών που προκαλούνται από το ερέθισμα που μεταφέρουν οι αισθητικές ίνες στον εγκέφαλο, παρατηρώντας στο ΗΜΓ το αποτέλεσμα της διέγερσης (Εικόνα 38).



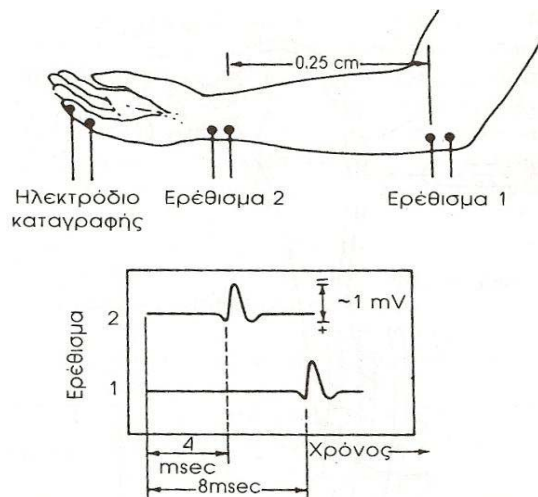
Εικόνα 37: Διάταξη λήψης, ενίσχυσης και απεικόνισης ΗΜΓ των κινητικών μονάδων που βρίσκονται μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων καταγραφής.



Εικόνα 38: Ηλεκτρική διέγερση των αισθητικών και κινητικών νευρικών ινών ενός βρέφους για να καθορισθεί η κατάσταση των αντανακλαστικών του. Οι αντιδράσεις προβάλλονται σε μία οθόνη καθοδικών ακτίνων. (α) Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης των οργάνων. (β) Για ασθενές ερέθισμα που χορηγείται σε χρόνο 0 λαμβάνεται μετά από 14 ms η αισθητική αντίδραση H από το ηλεκτρόδιο καταγραφής. (γ) Για μέσης έντασης ερεθίσματα λαμβάνονται δύο αντιδράσεις: η απόκριση της κινητικής ίνας M σε 5 ms περίπου μετά τη διέγερση και η αισθητική αντίδραση H σε 14ms. (δ) Για ισχυρό ερέθισμα, λαμβάνεται μόνο η αντίδραση M.

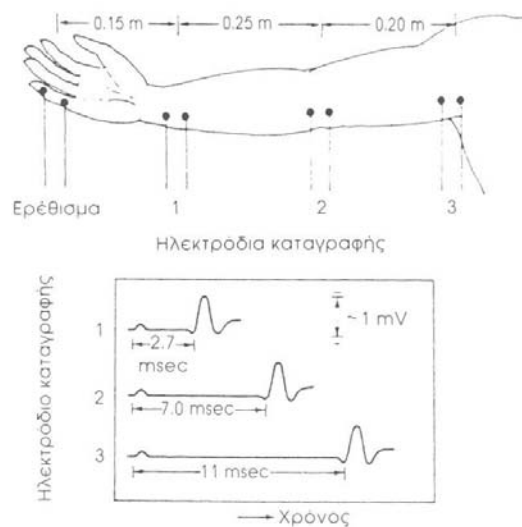
Επίσης, είναι δυνατόν να μετρηθεί η ταχύτητα αγωγής του δυναμικού δράσης στις κινητικές νευρικές ίνες. Στην Εικόνα 39 παρουσιάζεται μια διάταξη εφαρμογής ερεθίσματος σε 2 θέσεις.

Τα δύο ερεθίσματα εφαρμόζονται ταυτόχρονα. Λόγω όμως της διαφοράς απόστασης (0,25 m) τα ερεθίσματα φθάνουν στα ηλεκτρόδια λήψης σε διαφορετικές στιγμές δηλαδή με διαφορά 4 ms. Άρα η ταχύτητα αγωγής του δυναμικού δράσης κατά μήκος του κινητικού νεύρου είναι $0,25\text{m}/4 \times 10^{-3}\text{s} = 62,5\text{ m/s}$.



Εικόνα 39: Ταχύτητας διάδοσης του νευρικού. Μέθοδος μέτρησης της σήματος σε κινητικό νεύρο (κινητική νευρική ίνα).

Η ταχύτητα αγωγής των νευρικών σημάτων στις αισθητικές νευρικές ίνες μπορεί να μετρηθεί αν διεγείρουμε ένα σημείο πχ. το δάκτυλο του χεριού (Εικόνα 40) και μετρήσουμε τους χρόνους άφιξης του παλμού σε διάφορες γνωστές αποστάσεις κατά μήκος του νεύρου. Πολύ μειωμένη ταχύτητα κάτω από 10 m/s υποδηλώνει νευρική βλάβη. Τυπικές φυσιολογικές τιμές της ταχύτητας αγωγής είναι μεταξύ 40 m/s και 60 m/s.



Εικόνα 40: Η ταχύτητα διάδοσης νευρικού σήματος για μια αισθητική νευρική ίνα μπορεί να καθορισθεί διεγείροντας μια περιοχή και καταγράφοντας τις αντιδράσεις με ηλεκτρόδια που τοποθετούνται σε γνωστές αποστάσεις. Η αντίδραση διαδίδεται σε απόσταση 0,25 m από το σημείο 1 στο σημείο 2 σε 4,3 ms. Η ταχύτητα διάδοσης είναι $0,25m/4,3 \times 10^{-3}s = 58 \text{ m/s}$. Η ταχύτητα διάδοσης του σήματος από το σημείο 2 στο σημείο 3 είναι $0,20m/4 \times 10^{-3}s = 50 \text{ m/s}$.

Η κόπωση των μυών προσδιορίζεται με πολλαπλές διεγέρσεις. Οι μεγάλοι μύες μπορούν να επαναδιεγείρονται με ρυθμούς μεταξύ 5 και 15 Hz. Φυσιολογικά νεύρα και μύες δείχνουν να μη παρουσιάζουν αλλαγές σε παρατεταμένη παλμική διέγερση όταν ο ρυθμός είναι κάτω των 5 Hz ή επιτρέπει χρόνο χαλάρωσης της τάξης των 0,2 s μεταξύ των παλμών. Η συμπεριφορά των νεύρων και μυών σε παλμική διέγερση έχει συχνά διαγνωστική αξία.

17. Ηλεκτρο-Εγκεφαλο-Γράφημα (ΗΕΓ)

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος, προϊόν βιολογικής εξέλιξης εκατομμυρίων ετών, επιτελεί ένα σύνολο λειτουργιών που είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία της μνήμης, των σκέψεων, τον έλεγχο των δραστηριοτήτων του σώματος και των συναισθημάτων. Αυτό το έργο διεξάγουν οι περίπου 10^{11} νευρώνες του εγκεφάλου στα περίπου 10^{14} σημεία όπου συναντιούνται μεταξύ τους.

Το σύνολο των ηλεκτροχημικών επιδράσεων από νευρώνα σε νευρώνα είναι αυτό που ονομάζουμε εγκεφαλική λειτουργία. Ένα από τα εργαλεία για τη μελέτη της λειτουργίας του εγκεφάλου αποτελεί το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (ΗΕΓ).

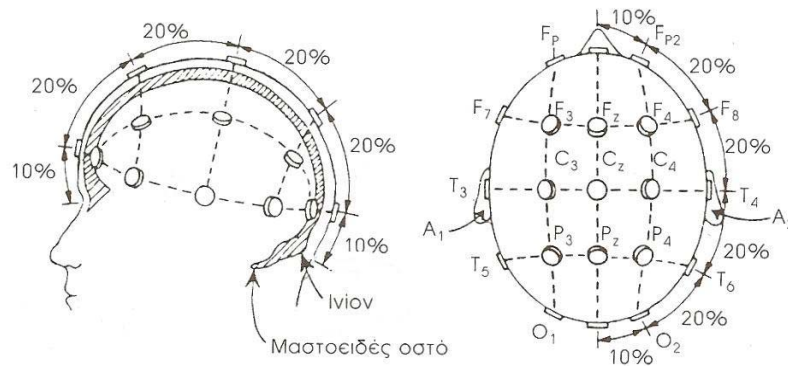
Η καταγραφή των διαφορών δυναμικού που εμφανίζονται στην εξωτερική δερματική επιφάνεια (τριχωτό) της ανθρώπινης κεφαλής ως αποτέλεσμα της ηλεκτρικής δραστηριότητας των νευρώνων του εγκεφαλικού φλοιού ονομάζεται ηλεκτροεγκεφαλογράφημα. Η απαγωγή των δυναμικών αυτών γίνεται με την τοποθέτηση ηλεκτροδίων στο τριχωτό της κεφαλής. Το πλάτος των μετρούμενων ηλεκτρικών σημάτων είναι μικρό, περίπου 1 μV έως 100 μV .

Η παρεμβολή μεταξύ των ηλεκτροδίων και του εγκεφάλου ενός στρώματος πάχους 2 ως 3 cm (δέρμα, κρανίο, σκληρή μήνιγγα), εξασθενεί το σήμα 10 φορές. Παρεμβολές από εξωτερικά ηλεκτρικά σήματα και δυναμικά που προέρχονται από τη δραστηριότητα των μυών κατά την κίνηση των οφθαλμών προκαλούν συχνά ψευδή σήματα στο ΗΕΓ. Για αυτούς τους λόγους υπάρχει ανάγκη όσο το δυνατό καλύτερης διάκρισης και ενίσχυσης των σημάτων.

Τα ηλεκτρόδια είναι δίσκοι διαμέτρου 0,5cm αποτελούμενοι από κράμα αργύρου (Ag) και χλωριούχου αργύρου (AgCl) που εφαρμόζονται στο κεφάλι, με τη βοήθεια ενός αυτοκόλλητου υλικού (κολλοδίου).

Στα σημεία όπου θα τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια, το δέρμα πρέπει να καθαριστεί από το λίπος με οινόπνευμα για να επιτευχθεί χαμηλή αντίσταση επαφής. Έτσι το ρεύμα ιόντων που προέρχεται από τον εγκέφαλο μετατρέπεται σε ρεύμα ηλεκτρονίων μέσα στα καλώδια που θα οδηγήσουν το ρεύμα αυτό στα επόμενα στάδια επεξεργασίας και στην καταγραφή του.

Για την επιλογή των θέσεων της τοποθέτησης των ηλεκτροδίων πάνω στο κεφάλι έχουν δημιουργηθεί διάφορα πρότυπα, από τα οποία το πλέον χρησιμοποιούμενο είναι στο Σύστημα 10-20 της Διεθνούς Ομοσπονδίας των ΗΕΓ Ενώσεων (International Federation of E.E.G. Societies 10-20 System) που φαίνεται στην Εικόνα 41.



Εικόνα 41: Διεθνές πρότυπο σύστημα 10-20 για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων στο ΗΕΓ. Τα ηλεκτρόδια που συμβολίζονται με γράμματα τοποθετούνται σε διαστήματα που αντιστοιχούν σε 10% και 20% των αποστάσεων μεταξύ συγκεκριμένων σημείων στο κρανίο. Το ινιακό οστό είναι οστικό εξόγκωμα που βρίσκεται στο κάτω μέρος στην πίσω πλευρά του κρανίου και το μαστοειδές βρίσκεται στο πίσω μέρος του αυτιού.

Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί συγκεκριμένα ανατομικά σημεία για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων. Οφείλει δε την ονομασία του στο ότι το διάστημα από το αυτί μέχρι το κοντινότερο ηλεκτρόδιο αντιστοιχεί στο 10% της απόστασης μεταξύ των δύο αυτιών και επίσης, το διάστημα μεταξύ δύο ηλεκτροδίων αντιστοιχεί στο 20% της απόστασης μεταξύ των δύο αυτιών.

Υπάρχουν τρεις τύποι σύνδεσης (μέτρησης) των ηλεκτροδίων:

- 1η Η «διπολική» σύνδεση, όταν το μετρούμενο σήμα προκύπτει ως διαφορά δυναμικού δύο ηλεκτροδίων τοποθετημένων σε δύο όπως λέγονται «ενεργά» σημεία του κεφαλιού, (σημεία που προέρχονται από εγκεφαλικές περιοχές που ενδεχομένως θα παρουσιάσουν δραστηριότητα). Σε μια τυπική κλινική νευρολογική εξέταση με ΗΕΓμα, γίνονται μετρήσεις μεταξύ διαδοχικών ζευγών ηλεκτροδίων, χρησιμοποιούνται δε συνήθως 15 έως 30 ηλεκτρόδια.
- 2η Η «μονοπολική» σύνδεση μεταξύ ενός ηλεκτροδίου σε ένα ενεργό σημείο του κεφαλιού και ενός ηλεκτροδίου (αναφοράς) που τοποθετείται σε ανενεργό σημείο που θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται από την εγκεφαλική λειτουργία. Τέτοια σημεία είναι το αυτί ή ο λαιμός.
- 3η Η σύνδεση μεταξύ ενός μονοπολικού καλωδίου και του μέσου όρου όλων. Στη σύνδεση αυτή το καλώδιο αναφοράς σχηματίζεται συνδέοντας όλα τα σημεία μέτρησης μέσω αντιστάσεων σε ένα κοινό σημείο.

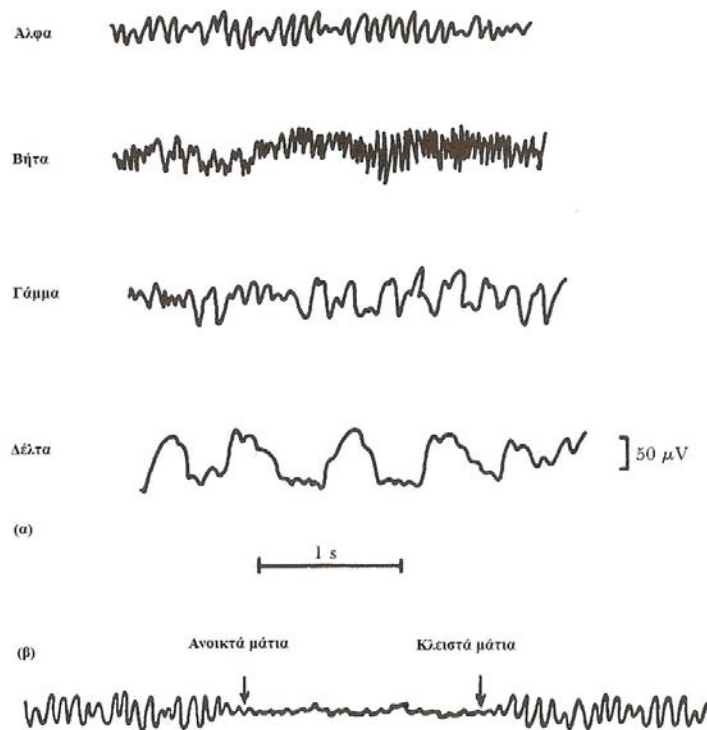
Με αυτούς τους τρεις τρόπους καταγραφής επιδιώκεται να υπάρχει μια ολοκληρωμένη και ταυτόχρονη από όλα τα ηλεκτρόδια ενεργών περιοχών πληροφόρηση σχετικά με κάθε εγκεφαλικό ρεύμα ιόντων, το οποίο φθάνει στην εξωτερική επιφάνεια του κεφαλιού.

Χαρακτηριστικά ΗΕΓτος

Οι συχνότητες των εγκεφαλικών αυτών κυμάτων κυμαίνονται από 0,5 Hz μέχρι 100 Hz. Η δε μορφή τους εξαρτάται πολύ από το βαθμό δραστηριότητας του εγκεφαλικού φλοιού.

Τον περισσότερο χρόνο τα εγκεφαλικά κύματα είναι ακανόνιστα και δεν είναι δυνατόν να παρατηρηθεί μια γενική μορφή. Όμως σε άλλες στιγμές υπάρχουν διακριτές μορφές. Κάποιες μορφές είναι χαρακτηριστικές συγκεκριμένων ανωμαλιών του εγκεφάλου, όπως η επιληψία.

Άλλες μορφές υπάρχουν στους φυσιολογικούς ανθρώπους και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μία από τις τέσσερις ομάδες κυμάτων ή ρυθμών, οι οποίοι είναι οι ρυθμοί άλφα, βήτα, θήτα και δέλτα, οι συχνότητες και τα συνήθη πλάτη των οποίων δίνονται στον Πίνακα 1 και η μορφή τους στην Εικόνα 42α.



Εικόνα 42: α) Διαφορετικοί τύποι φυσιολογικών ΗΕΓ κυμάτων, β) αντικατάσταση των ρυθμών άλφα από μικρής τάσης ασύγχρονα κύματα, όταν ο ασθενής ανοίγει τα μάτια του σε λαμπερό φως. Όταν τα ξανακλείνει τα κύτταρα άλφα επανέρχονται.

Ρυθμός	Περιοχή Συχνοτήτων (σε Hz)	Πλάτος (σε µV)
Δέλτα	0,5-3,5	Εως 100-200
Θήτα	4-7,5	< 30
Άλφα	8-12	30-50
Αργός Βήτα	13-19	< 20
Ταχύς Βήτα	20-30	< 20

Πίνακας 1: Οι κυριότεροι ρυθμοί με τις αντίστοιχες συχνότητες και πλάτη τους.

Ο ρυθμός α είναι ο φυσιολογικός βασικός ρυθμός στο ΗΕΓ του ενήλικου ατόμου όταν είναι ξύπνιος και ήσυχος, σε κατάσταση εγκεφαλικής χαλάρωσης! Αυτά τα κύματα εμφανίζονται πιο έντονα στην ινιακή περιοχή (οπίσθια περιοχή) του εγκεφάλου. Όταν ο ασθενής κοιμάται τα κύματα α εξαφανίζονται. Όταν ο ασθενής επικεντρώνεται σε μια πνευματική δραστηριότητα, τα κύματα α αντικαθίστανται από άλλα ασύγχρονα μεγαλύτερης συχνότητας και μικρότερου πλάτους. Ο ρυθμός αυτός πήρε το όνομα α-ρυθμός γιατί ήταν ο πρώτος που μελετήθηκε από τον Berger (1929), τον εφευρέτη του ΗΕΓτος.

Ο ρυθμός β, ο δεύτερος που μελετήθηκε, είναι ο ρυθμός που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της πλήρους εγρήγορσης (πνευματική δραστηριότητα, υπερένταση). Καταγράφεται κυρίως στη βρεγματική και μετωπιαία περιοχή (πρόσθιες περιοχές) του κρανίου.

Ο ρυθμός θήτα αποτελεί το βασικό ρυθμό στο παιδικό ΗΕΓ και είναι σπάνιος στο ΗΕΓ του ενήλικα. Κύματα θήτα εμφανίζονται στο ΗΕΓ ενός απογοητευμένου και εκνευρισμένου ατόμου.

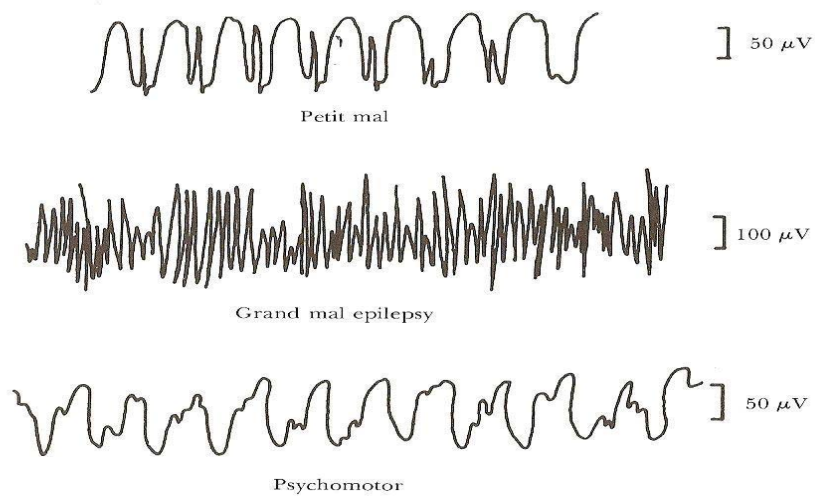
Ο ρυθμός δέλτα είναι σπάνιος στο φυσιολογικό ΗΕΓ ενός ενήλικα. Εμφανίζεται σε βαθύ ύπνο, σε νηπιακή ηλικία και σε σοβαρή εγκεφαλική βλάβη.

Στη διάρκεια διενέργειας του ΗΕΓτος, ο ασθενής παραμένει ξύπνιος, ακίνητος, ξαπλωμένος σε χαλαρή κατάσταση και έχει κλειστά τα μάτια. Τα ανοίγει μόνο κατόπιν παραγγελίας για μικρά χρονικά διαστήματα. Με τον ασθενή σε αυτή την κατάσταση, παράσιτα λόγω κίνησης των ηλεκτροδίων περιορίζονται σημαντικά, καθώς επίσης και παράσιτα από το κρανίο.

Γενικά υπάρχει μια σχέση μεταξύ του βαθμού της εγκεφαλικής δραστηριότητας και της μέσης συχνότητας του ρυθμού του ΗΕΓ. Τα κύματα του διεγερμένου εγκεφάλου έχουν μεγάλη συχνότητα και μικρό πλάτος. Όσο ηρεμεί ο εγκέφαλος μειώνεται η συχνότητα του ρυθμού και μεγαλώνει το πλάτος όπως φαίνεται στην Εικόνα 42β.

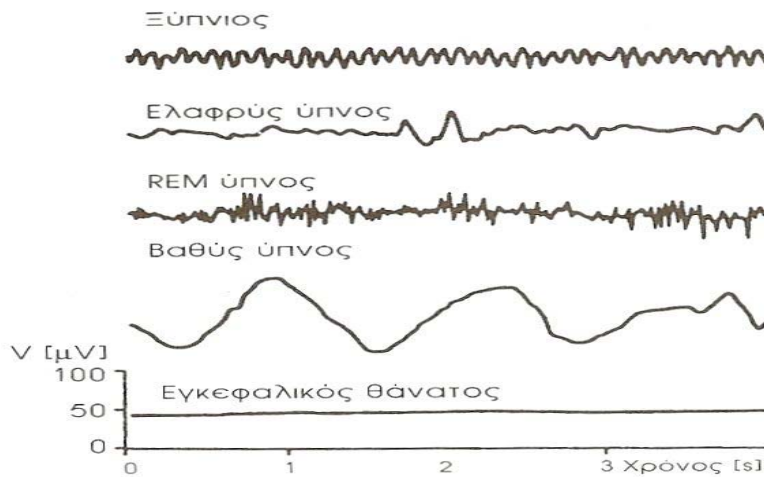
Η χρήση του ΗΕΓ στη Νευρολογία είναι ευρύτατη γιατί αποτελεί μία μέθοδο ανώδυνη, απλή στην εφαρμογή της και φθηνή. Από τη μελέτη του ΗΕΓ μπορούν να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη σωστή εξέλιξη του ΚΝΣ ενός ανθρώπου, από τη γέννησή του μέχρι την ενηλικίωσή του. Χρησιμεύει επίσης, στη διερεύνηση μεταβολικών διαταραχών, λοιμώξεων του ΚΝΣ, διαταραχών της συνείδησης, καθώς και εγκεφαλοπαθειών, όπως η νόσος Creutzfeldt - Jakob.

Μπορεί να βοηθήσει στην επιβεβαίωση όγκων του εγκεφάλου γιατί η ηλεκτρική δραστηριότητα μειώνεται στην περιοχή του όγκου. Όμως η συμμετοχή του ΗΕΓ στη διερεύνηση χειροκατακτητικών ή αγγειακών βλαβών είναι πλέον πολύ μικρή, καθώς έχει αντικατασταθεί από τις σύγχρονες νευροαπεικονιστικές μεθόδους.



Εικόνα 43: Αντιπροσωπευτικές κυματομορφές ΗΕΓ σε δύο διαφορετικούς τύπους επιληψίας.

Το ΗΕΓ συμβάλλει κυρίως στη διάγνωση της επιληψίας όπου εξακολουθεί να παραμένει αναντικατάστατο. Στην περίπτωση της επιληψίας το ΗΕΓ εμφανίζει «αιχμές» και «βραχεία κύματα» υψηλής συχνότητας με διάρκεια από 20-70 ms και 70-200 ms αντίστοιχα (Εικόνα 43). Η εντόπιση αυτών των ανωμαλιών στο καταγραφόμενο σήμα γίνεται σήμερα πολύ καλά με τη χρήση ψηφιακών τεχνικών επεξεργασίας, του ΗΕΓ.



Εικόνα 44: Παραδείγματα σημάτων ΗΕΓ για διάφορα στάδια του ύπνου συμπεριλαμβανομένου και του αιώνιου ύπνου (θάνατος).

Επίσης, μελετάται το ΗΕΓ στις περιπτώσεις κρανιοεγκεφαλικών κακώσεων, κώματος κλπ. Τέλος, το ΗΕΓ αποτελεί το κύριο εργαλείο για τη μελέτη του ύπνου. Στην Εικόνα 44 παρουσιάζονται ΗΕΓ σε διάφορα στάδια του ύπνου.

Όταν ένα άτομο νυστάζει και έχει τα μάτια του κλειστά, το ΗΕΓ αποτελείται κυρίως από κύματα α. Όταν το άτομο μεταβαίνει από τον ελαφρύ στο βαθύ ύπνο τότε ο ρυθμός αντικαθίστανται από κύματα (μικρότερης συχνότητας) και μεγαλύτερου πλάτους.

Μερικές φορές κατά τη διάρκεια του ύπνου τα μεγάλα πλάτους και χαμηλής συχνότητας κύματα αντικαθίστανται από κυματομορφή υψηλής συχνότητας και μικρής τάσης που μοιάζει με αυτή που παρατηρείται σε άνθρωπο που βρίσκεται σε κατάσταση εγρήγορσης. Ωστόσο ο ύπνος του ατόμου με αυτή τη κυματομορφή δεν διακόπτεται. Αυτή η κατάσταση λέγεται «παράδοξος ύπνος». Κατά τη διάρκειά της, το άτομο εμφανίζει σύντομες, περιπλανητικές κινήσεις των ματιών. Για αυτό το λόγο ονομάζεται επίσης, ύπνος σύντομων κινήσεων των ματιών ή REM (Rapid-Eye-Movement) ύπνος. Άνθρωποι ξύπνιοι σε στιγμή που το ΗΕΓ τους εμφανίζει παράδοξη (REM) κυματομορφή ύπνου, γενικά βρέθηκε να ονειρεύονται. Αυτή η παρατήρηση μαζί με άλλα στοιχεία δείχνουν ότι ο REM ύπνος και όνειρα συνδυάζονται.

18. Ηλεκτροφυσιολογία του ματιού

Μεταξύ του κερατοειδούς χιτώνα και του αμφιβληστροειδούς του οφθαλμού αναπτύσσεται μια σταθερή διαφορά δυναμικού (5-8mV). Αυτή η διαφορά δυναμικού είναι το δυναμικό ηρεμίας. Όταν ο αμφιβληστροειδής διεγερθεί με μία στιγμιαία λάμψη φωτός τότε αυτή η διαφορά δυναμικού μεταβάλλεται και τότε δημιουργείται το δυναμικό δράσης.

Για τον ηλεκτροφυσιολογικό έλεγχο του ματιού, οι μέθοδοι που υπάρχουν είναι:

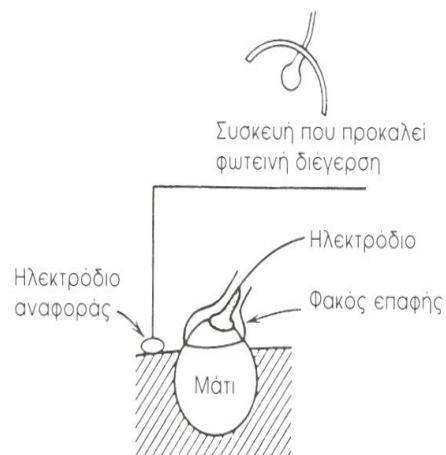
- το ηλεκτροαμφιβληστροειδογράφημα (ΗΑΓ)
- το ηλεκτροοφθαλμογράφημα (ΗΟΓ)
- το ηλεκτρονυσταγμογράφημα (ΗΝΓ)
- τα δυναμικά του ινιακού λοβού (ΔΙΛ)

19. Ηλεκτρο-Αμφιβληστροειδο-Γράφημα (ΗΑΓ)

Η καταγραφή των μεταβολών του δυναμικού ηρεμίας που παράγεται ονομάζεται ηλεκτροαμφιβληστροειδογράφημα (όταν ο αμφιβληστροειδής διεγείρεται με μία στιγμιαία λάμψη φωτός). Είναι δηλαδή ένα «προκλητό» δυναμικό που μετρείται στο μάτι, ενώ συγχρόνως μπορεί να μετρηθεί και ως ΗΕΓ/μα στο τριχωτό της κεφαλής, διότι το ερέθισμα (προκλητό δυναμικό) φθάνει μέσω του οπτικού νεύρου στον ινιακό λοβό του εγκεφάλου (Δυναμικά Ινιακού Λοβού), στα οποία θα αναφερθούμε αργότερα.

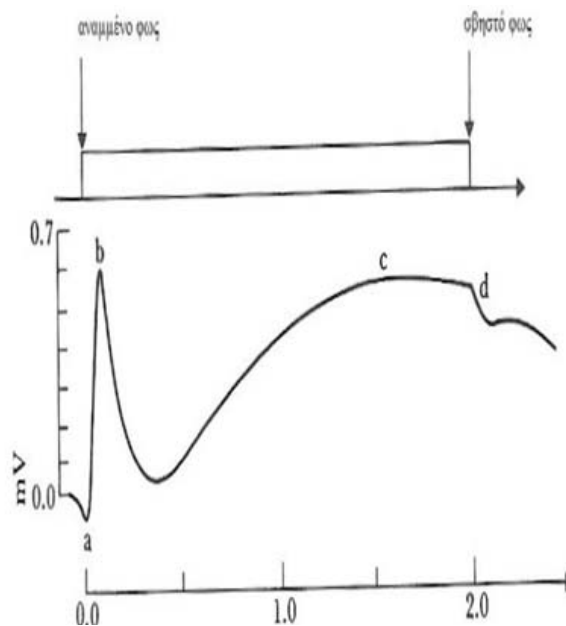
Για τον ηλεκτροφυσιολογικό έλεγχο του αμφιβληστροειδούς χρησιμοποιείται διάταξη που αποτελείται από συσκευή παραγωγής φωτεινών ερεθισμάτων και σύστημα απεικόνισης και καταγραφής των ηλεκτρικών δυναμικών, τα οποία παράγονται από τον αμφιβληστροειδή. Για τη λήψη των δυναμικών χρησιμοποιούνται ειδικά ηλεκτρόδια που τοποθετούνται στον κερατοειδή του εξεταζόμενου ματιού.

Ένα ηλεκτρόδιο Ag-AgCl τοποθετείται μέσα σε ένα ειδικό φακό επαφής, ο οποίος προσαρμόζεται στον κερατοειδή. Το δεύτερο ηλεκτρόδιο τοποθετείται στο λοβό του αυτιού για να προσεγγίσει το δυναμικό του αμφιβληστροειδή (Εικόνα 45).



Εικόνα 45: Η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων για τη λήψη ενός ΗΑΓ. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετείται στο αυτί ή στο μέτωπο.

Η τυπική μορφή ενός φυσιολογικού ΗΑΓτος παρουσιάζει 4 κορυφές a,b,c,d (Εικόνα 46). Την ίδια μορφή ΗΑΓτος εμφανίζουν ο άνθρωπος και τα περισσότερα σπονδυλωτά.



Εικόνα 46: ΗΑΓ ενός σπονδυλωτού οργανισμού.

Στην κλινική πράξη σημασία έχουν το a με αρνητική τιμή δυναμικού και το b με υψηλή θετική τιμή δυναμικού. Το a δημιουργείται από τις αρχικές μεταβολές που προκαλεί η φωτεινή λάμψη καθώς απορροφούνται τα φωτόνια της από μόρια των φωτοχρωστικών που βρίσκονται στους

φωτουποδοχείς του αμφιβληστροειδούς χιτώνα. Εμφανίζεται σχεδόν ταυτόχρονα με την έναρξη της φωτεινής διέγερσης και ονομάζεται δυναμικό αρχικής λήψης (Early Receptor Potential - ERP).

Το b λαμβάνεται με καθυστέρηση 1-5 ms ονομάζεται δυναμικό της καθυστερημένης λήψης (Late Receptor Potential - LRP), το οποίο παίρνει τη μέγιστη τιμή του κοντά στις συναπτικές απολήξεις των φωτουποδοχέων και άρα αντιστοιχεί στις εξόδους των φωτουποδοχέων.

Το ERP μεταβάλλεται γραμμικά με την ένταση του φωτεινού ερεθίσματος, ενώ το LRP είναι έντονα μη γραμμικό (μεταβάλλεται λογαριθμικά), σε σχέση με την ένταση του ερεθίσματος.

Παρά την ανατομική πολυπλοκότητα του αμφιβληστροειδούς το ΗΑΓ παρέχει πληροφορίες για τη λειτουργικότητα του αμφιβληστροειδούς στο σύνολό του.

Είναι ανεξάρτητο από τη λειτουργία του οπτικού νεύρου και επηρεάζεται ελάχιστα από βλάβη της οπτικής οδού.

Το ΗΑΓ βοηθάει στην αντικειμενική εκτίμηση της λειτουργίας του αμφιβληστροειδούς όταν η οφθαλμοσκόπηση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί όπως στις παρακάτω περιπτώσεις:

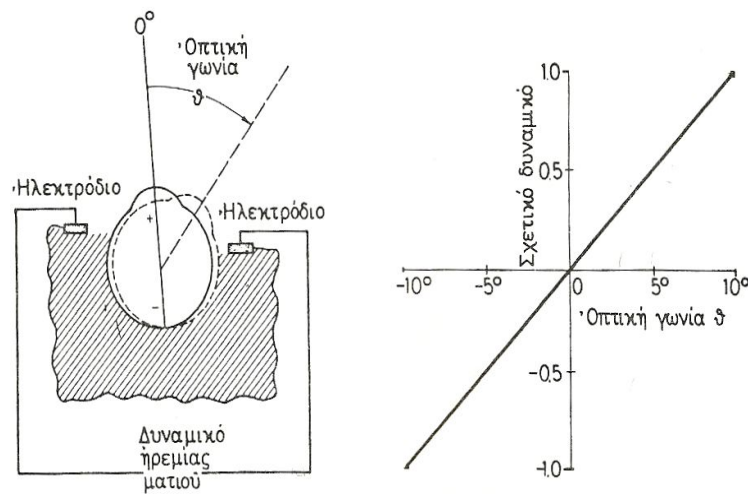
- σε βρέφη ή σε παιδιά.
- στην πρώιμη διάγνωση της μελαχρωστικής αμφιβληστροειδοπάθειας (κληρονομικής πάθησης του αμφιβληστροειδούς).
- στη διαφορική διάγνωση των πρωτοπαθών από τις δευτεροπαθείς εκφυλίσεις μετά από φλεγμονή.

20. Ηλεκτρο-Οφθαλμο-Γράφημα (ΗΟΓ)

Το ηλεκτροοφθαλμογράφημα (ΗΟΓ) είναι η καταγραφή των μεταβολών του ηλεκτρικού δυναμικού που οφείλονται στις κινήσεις του βολβού των οφθαλμών.

Για την πραγματοποίηση της μέτρησης της οριζόντιας μετακίνησης τοποθετούνται επιφανειακά ηλεκτρόδια αριστερά και δεξιά του ματιού (στη μύτη και στον κρόταφο).

Το δυναμικό του ΗΟΓτος ορίζεται ίσο προς μηδέν (δυναμικό αναφοράς), όταν το μάτι κοιτάζει κατευθείαν εμπρός (Εικόνα 47α) . Στην Εικόνα 47β φαίνεται η μεταβολή οριζόντια δεξιά ή αριστερά και της γωνίας στροφής θ. Βλέπουμε ότι η σχέση μεταξύ της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού και της γωνίας στροφής θ είναι γραμμική.



Εικόνα 47: α) Θέση ηλεκτροδίων σε καθμία από τις δύο πλευρές του ματιού για τη λήψη ΗΟΓτος. Φαίνεται η οπτική γωνία. β) Μεταβολή της διαφοράς δυναμικού σε συνάρτηση με την οπτική γωνία.

Το ΗΟΓ δίνει πληροφορίες για τον προσανατολισμό των ματιών καθώς και για τη γωνιακή ταχύτητα κατά της περιστροφής τους. Το ΗΟΓ χρησιμοποιείται κυρίως στην έρευνα. Δίνει πληροφορίες για τον καθορισμό της επίδρασης φαρμάκων στην κίνηση του οφθαλμού, για τη μελέτη της κίνησης του οφθαλμού κατά τη διάρκεια διαφόρων εγκεφαλικών καταστάσεων (ύπνος, όνειρα, νάρκωση κλπ.), καθώς και κατά τη διάρκεια οπτικής αναζήτησης. Έτσι μπορεί να ανιχνευθεί η γρήγορη κίνηση των ματιών (Rapid Eye Movement, REM) κατά τον ύπνο που φαίνεται να συμπίπτει με τα όνειρα και με την αλλαγή ρυθμού στο ΗΕΓ. Χρησιμεύει σε ορισμένες περιπτώσεις σαν εξεταστική μέθοδο συμπληρωματική του ΗΑΓτος.

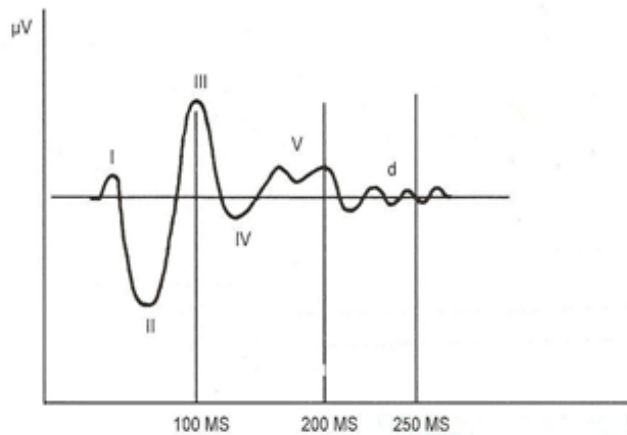
21. Δυναμικά Ινιακού Λοβού (ΔΙΛ)

Πρόκειται για μια ειδική μορφή ΗΕΓτος κατά το οποίο έχουμε καταγραφή ηλεκτρικών κυματομορφών του ινιακού φλοιού μετά από επίδραση φωτεινού ερεθίσματος στο μάτι. Είναι η μόνη αντικειμενική μέθοδος για τον έλεγχο της αγωγιμότητας της οπτικής οδού από τα γαγγλιακά κύτταρα του αμφιβληστροειδούς μέχρι τον οπτικό φλοιό του εγκεφάλου.

Τα προκλητά δυναμικά (Εγκεφαλικά δυναμικά που μπορούν να προκληθούν από κάποιο ερέθισμα, οπτικό, ακουστικό ή σωματοαισθητικό, Evoked Potentials – EP) του ινιακού λοβού λαμβάνονται από ηλεκτρόδια που τοποθετούνται στη γραμμή που προκύπτει από την τομή του κατακόρυφου επιπέδου στο μέσο του κρανίου και του δέρματος της κεφαλής. Αυτά καταγράφονται με την κυματομορφή που παρουσιάζει διάφορες κορυφές, οι οποίες εμφανίζονται σε διαφορετικό χρόνο. Από τις κορυφές αυτή που έχει κλινική σημασία είναι η A100 με «λανθάνοντα» χρόνο μεταξύ του ερεθίσματος και της εμφάνισής της 100 ms (Εικόνα 48) Κάθε μεταβολή του ύψους ή του «λανθάνοντα» χρόνου εμφάνισης της κορυφής A100 υποδηλώνει διαταραχή της αγωγιμότητας της οπτικής ίνας και επομένως βλάβη του οπτικού νεύρου και γενικότερα της οπτικής οδού από τα γαγγλιακά κύτταρα του αμφιβληστροειδούς μέχρι τον οπτικό φλοιό του εγκεφάλου.

Από τις κορυφές, αυτή που έχει κλινική σημασία είναι η A100 με «λανθάνοντα» χρόνο μεταξύ του ερεθίσματος και της εμφάνισής της 100 ms (Εικόνα 48). Κάθε μεταβολή του ύψους ή του «λανθάνοντα» χρόνου εμφάνισης της κορυφής A100 υποδηλώνει διαταραχή της αγωγιμότητας της οπτικής ίνας και επομένως βλάβη του οπτικού νεύρου και γενικότερα της οπτικής οδού από τα γαγγλιακά κύτταρα του αμφιβληστροειδούς μέχρι τον οπτικό φλοιό του εγκεφάλου.

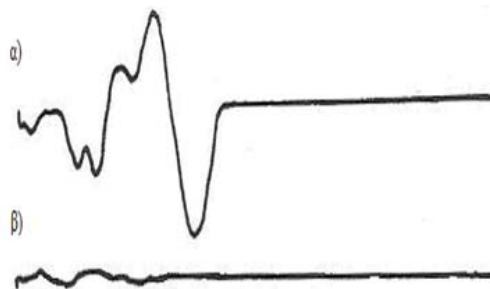
Όπως δείχνει η Εικόνα 48, η κυματομορφή εξαρτάται από το σημείο λήψεως του δυναμικού αυτού δηλ. πάνω στη γραμμή που έχουμε αναφέρει.



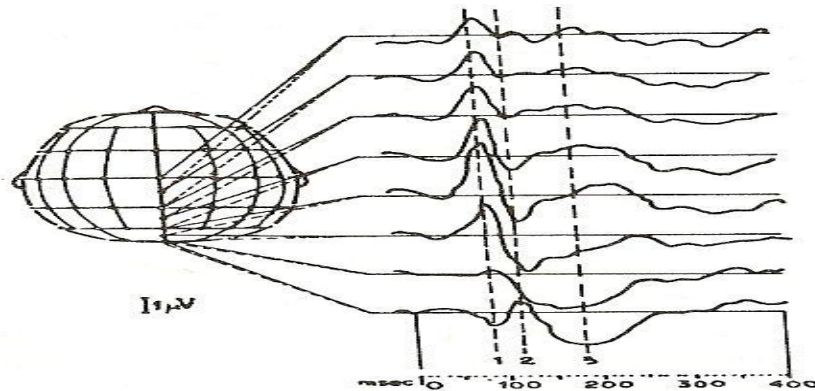
Εικόνα 48: Κυματομορφή δυναμικών ινιακού λοβού.

Τα δυναμικά ινιακού λοβού έχουν διαγνωστική αξία σε διάφορες περιπτώσεις :

- σε ατροφία του οπτικού νεύρου οποιασδήποτε αιτιολογίας (Εικόνα 49).
- στον έλεγχο της τοξικής δράσης ορισμένων φαρμάκων και χημικών ουσιών, στο οπτικό νεύρο (αντιβιοτικά, αιθυλική αλκοόλη κλπ.).
- σε φλεγμονές του οπτικού νεύρου (οπτική νευρίτιδα) που οφείλονται σε απομυελωτική νόσο (σκλήρυνση κατά πλάκας).



Εικόνα 49: (α) Φυσιολογικά Δυναμικά Ινιακού Λοβού (ΔΙΛ), (β) Απόντα Δυναμικά Ινιακού Λοβού (ΔΙΛ) λόγω ατροφίας οπτικού νεύρου.



Εικόνα 50: Οκτώ οπτικά προκλητά δυναμικά από το ίδιο ερέθισμα αλλά από διαφορετικές θέσεις των δύο ηλεκτροδίων.

22. Μαγνητικά σήματα από την καρδιά και τον εγκέφαλο Μαγνητοκαρδιογράφημα και Μαγνητοεγκεφαλογράφημα

Λόγω του ότι η ροή ηλεκτρικού φορτίου δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, το ρεύμα που παράγεται στην καρδιά κατά τη διάρκεια της εκπόλωσης και επαναπόλωσης της δημιουργεί, επίσης, μαγνητικό πεδίο. Η μαγνητοκαρδιογραφία μετρά αυτά τα πολύ ασθενή μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται γύρω από την καρδιά. Η καταγραφή του μαγνητικού πεδίου της καρδιάς καλείται *μαγνητοκαρδιογράφημα* (ΜΚΓ).

Το μαγνητικό πεδίο γύρω από την καρδιά έχει ένταση περίπου 5×10^{-11} Tesla (T), ή περίπου το ένα εκατομμυριοστό της έντασης του μαγνητικού πεδίου της γης. Η μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο σύστημα CGS (σύστημα μονάδων με θεμελιώδη μεγέθη το μήκος, μάζα και χρόνο και αντίστοιχες μονάδες το εκατοστό, γραμμάριο και δευτερόλεπτο) είναι το gauss, $1\text{T} = 10^4$ gauss. Για τη μέτρηση αυτών των ασθενών μαγνητικών πεδίων είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν θωρακισμένα δωμάτια και πολύ ευαίσθητοι ανιχνευτές μαγνητικών πεδίων (μαγνητόμετρα). Ένας τέτοιος ανιχνευτής είναι το SQUID (Superconducting QUantum Interference Device). Το SQUID λειτουργεί σε θερμοκρασία περίπου 5 K και μπορεί να ανιχνεύσει συνεχή και εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία μικρής έντασης μέχρι 10^{-14} T.

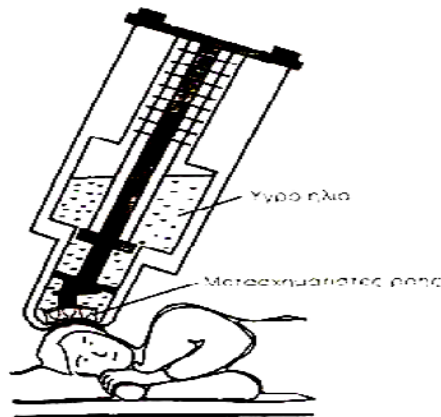
Το μαγνητόμετρο SQUID έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή του μαγνητικού πεδίου γύρω από τον εγκέφαλο. Η καταγραφή αυτού του πεδίου καλείται *μαγνητοεγκεφαλογράφημα* (ΜΕΓ). Κατά τη διάρκεια του ρυθμού α, το μαγνητικό πεδίο του εγκεφάλου είναι περίπου 1×10^{-13} T. Δηλαδή, περίπου το ένα δισεκατομμυριοστό του μαγνητικού πεδίου της γης.

Τόσο το ΜΚΓ όσο και το ΜΕΓ δεν είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν στο άμεσο μέλλον στην καθημερινή κλινική πράξη λόγω του υψηλού κόστους, τις πολλές τεχνικές δυσκολίες στην πραγματοποίηση και ερμηνεία των μετρήσεων, και λόγω του ότι η διαγνωστική τους αξία δεν έχει πλήρως καθοριστεί. Εντούτοις, ειδικά το ΜΕΓ αποτελεί έναν πολλά υποσχόμενο τρόπο μελέτης τον εγκέφαλου και αξίζει η αναλυτικότερη περιγραφή του. Ενώ με το ΗΕΓ, είναι πολύ δύσκολο να καθορισθεί το σημείο τον εγκεφάλου από το οποίο προέρχεται ένα συγκεκριμένο

σήμα, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με το MEG. Κατά τη λήψη του MEG χρησιμοποιούμε προκλητή διέγερση από ήχο, φως, αφή, οσμή ή εξωτερικά παλμικά μαγνητικά πεδία.

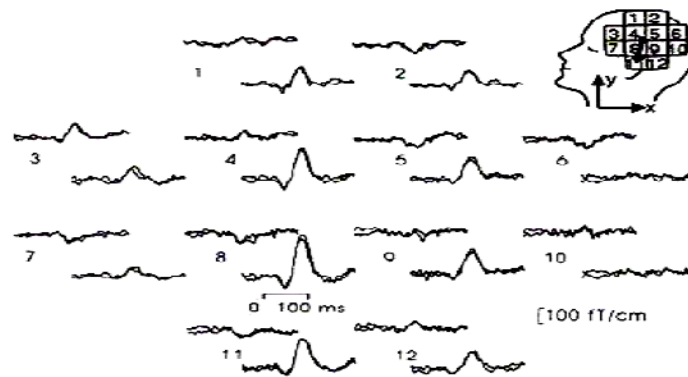
Η διέγερση μπορεί να επαναληφθεί και οι μαγνητικές απαντήσεις μπορούν να αποθηκευτούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο υπολογιστής προσδιορίζει τη μέση τιμή των ανεπιθύμητων σημάτων από άλλα μέρη του εγκεφάλου και από το μαγνητικό θόρυβο, τα αφαιρεί από το συνολικό μαγνητικό σήμα και έτσι αναδεικνύει τα μικρά επιθυμητά σήματα από την εξεταζόμενη περιοχή. Με τη μέτρηση των μαγνητικών σημάτων σε σημαντική περιοχή του εγκεφάλου, μπορεί να καθοριστεί η θέση του εγκεφάλου από την οποία προέρχονται τα σήματα με τη βοήθεια της θεωρίας του διπόλου.

Στην Εικόνα 51, παρουσιάζεται μια διάταξη σύγχρονου ανιχνευτή που χρησιμοποιείται για τη λήψη MEG/τος. Ο εξεταζόμενος βρίσκεται σε ένα δωμάτιο θωρακισμένο από τα εξωτερικά μαγνητικά πεδία, σε κρεβάτι με μαξιλάρι που σταθεροποιεί την κεφαλή και εμποδίζει τη μετακίνησή της. Ο ανιχνευτής αποτελείται από πολλά μαγνητόμετρα SQUID (που καλούνται μετασχηματιστές ροής) και βρίσκονται τοποθετημένα στον πυθμένα μίας φιάλης Dewar που διατηρείται σε ψύξη 5K με υγρό ήλιο. Ο ανιχνευτής φέρεται σε τέτοια θέση ώστε τα μαγνητόμετρα να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην κεφαλή. Συνήθως μετράτε η κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου.



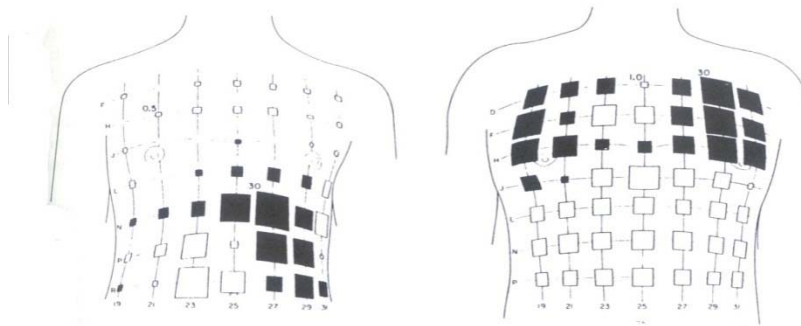
Εικόνα 9.33. Ανιχνευτική διάταξη για τη μέτρηση μαγνητοεγκεφαλογραφήματος (MEG). Το δοχείο Dewar που ψύχεται με υγρό ήλιο που περιέχει τα μαγνητόμετρα SQUID (που καλούνται μετασχηματιστές ροής). Τα SQUID βρίσκονται σε διάταξη πολύ κοντά στο κρανίο για την ανίχνευση της συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου με διεύθυνση κάθετη στην επιφάνειά τους. Στην περίπτωση αυτή ο εγκέφαλος του ασθενούς μπορεί να διεγερθεί από ένα ακουστικό σήμα μέσω πλαστικών σωληνών και ενός κατάλληλα διαμορφωμένου ακουστικού άκρου. (Μετά από άδεια από "Magnetoencephalography – Theory, Instrumentation, and Applications to Noninvasive Studies of the Working Human Brain". Matti Hämäläinen et al., *Reviews of Modern Physics*, Vol. 65, No. 2, 1993, p. 419.)

Εικόνα 51



Εικόνα 9.34. Μετρήσεις αντιδράσεων σε ακουστικά ερεθίσματα για το μαγνητικό πεδίο που μετρήθηκαν σε 12 θέσεις, όπως φαίνεται στο ένθετο πάνω δεξιά. Για κάθε θέση καταγράφονται δύο μετρήσεις που είναι η μέση τιμή από 66 προκλητά ακουστικά ερεθίσματα. Κάθε μία καταγραφή, άνω και κάτω, αντιστοιχεί στη μεταβολή της κάθετης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου (z διεύθυνση) για τις δύο διευθύνσεις x και y, αντίστοιχα. Το ερεθίσμα ξεκινά όταν $t=0$, ο χρόνος που ξεκινάει η καταγραφή του σήματος, καθώς και η χρονική κλίμακα δίνονται κάτω από τα δεδομένα που συμβολίζονται με το νούμερο 8 σχήμα. Η κλίμακα του μαγνητικού πεδίου βρίσκεται κάτω από το σήμα 8 και δίνεται σε fT/cm ($f=10^{-15}$). (Μετά από άρθρο από "Magnetoencephalography - Theory, Instrumentation, and Applications to Noninvasive Studies of the Working Human Brain". Matti Hamalainen et al., *Reviews of Modern Physics*, Vol. 65, No. 2, 1993, p. 420.)

Εικόνα 52



Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο θώρακα δύο ατόμων που έχουν μολυνθεί από μαγνητικά υλικά. Τα μαύρα τετράγωνα αντιστοιχούν στα πεδία προς τη μία διεύθυνση, ενώ τα άσπρα αντιστοιχούν στην πορεία επιστροφής. Το εμβαδό κάθε τετραγώνου είναι ανάλογο της έντασης του πεδίου. Η μεγαλύτερη και η μικρότερη τιμή του μαγνητικού πεδίου δίνονται σε μονάδες της τάξης των 10^{-11} T. Τα γραφήματα αυτά οφείλονται σε 100 mg οξειδίου του σιδήρου στο εσωτερικό των πνευμόνων ενός οξυγονοκολητή. (Από D. Cohen, *Science*, 180 (4087), σελ.747. Copyright 1973 by the American Association for the Advancement of Science.)

Εικόνα 53: Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο θώρακα δύο ατόμων που έχουν μολυνθεί από μαγνητικά υλικά.

23. Βιβλιογραφία

1. Cameron J.R., Skofronick J.G., Grant R.M., 'Φυσική του ανθρωπίνου σώματος', Εκδόσεις Παρισιάνου, 2001.
2. Herman I.P., 'Physics of the human body', 2nd edition, Springer, 2016.
3. Τούτουζας Π., 'Καρδιολογία', Β' Έκδοση, Επιστημονικές Εκδόσεις «Γρ. Παρισιάνος», Αθήνα, 1993.
4. Πρώϊμος Β., 'Ιατρική Φυσική', Τόμος 3^{ος}, 'Ηλεκτρισμός', Εκδόσεις Ελληνική Λιθογραφία, Αθήνα 1986.
5. Vander A.J., Sherman J.H., Luano D.S., 'Φυσιολογία του ανθρώπου. Μηχανισμοί της λειτουργίας του οργανισμού', Επιμέλεια Ελληνικές Εκδόσεις Ν. Γελαδάς - Μ. Τσακόπουλος. Ιατρικές Εκδόσεις Π. Χ. Πασχαλίδης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΦΩΣ, ΟΦΘΑΛΜΟΙ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ

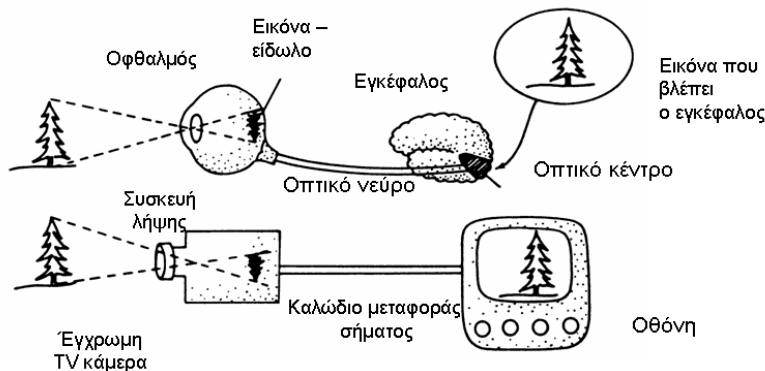
Σοφία Κόττου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική Σχολή, ΕΚΠΑ

1. Εισαγωγή

Οι οφθαλμοί δέχονται το φως από τα αντικείμενα του περιβάλλοντος και το εστιάζουν στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Τα φωτοευαίσθητα κύτταρα του αμφιβληστροειδή μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρικό σήμα, που «ταξιδεύει» με το οπτικό νεύρο και καταλήγει στον «οπτικό» φλοιό του εγκεφάλου. Ο εγκέφαλος επεξεργάζεται την πληροφορία και ο άνθρωπος «αντιλαμβάνεται» την εικόνα.



Καθένα από τα τέσσερα αυτά στάδια της διαδικασίας της όρασης είναι σημαντικό και εμπεριέχει ενδιαφέροντα στοιχεία φυσικής. Το πρώτο στάδιο είναι μέρος της οπτικής, το δεύτερο της κβαντομηχανικής (απορρόφηση φωτός), το τρίτο είναι μεταφορά ηλεκτρικών φορτίων και δυναμικού. Φυσικές διεργασίες περιέχονται και στο τέταρτο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι συνιστώσες (φυσικής και φυσιολογίας) κυρίως του πρώτου σταδίου.

2. Δομή του Οφθαλμού

Το φως προσπίπτει αρχικά στον κερατοειδή χιτώνα, διασχίζει το υδατοειδές υγρό, την κόρη (άνοιγμα) της ίριδας, το φακό και το υαλοειδές υγρό, πριν καταλήξει στα κύτταρα του αμφιβληστροειδή (τα κωνία και τα ραβδία).

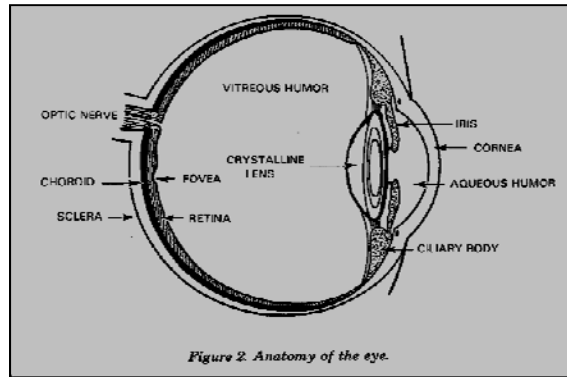
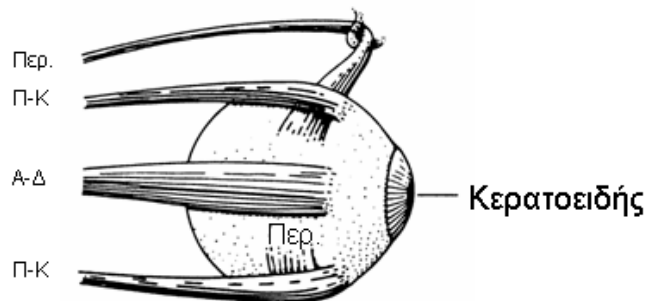


Figure 2. Anatomy of the eye.

Την περιστροφική κίνηση του βολβού ελέγχουν τρία ζεύγη μυών. Κάθε ζεύγος είναι υπεύθυνο για την περιστροφή σε διαφορετικό επίπεδο στο χώρο, κάθετο στα υπόλοιπα δύο.



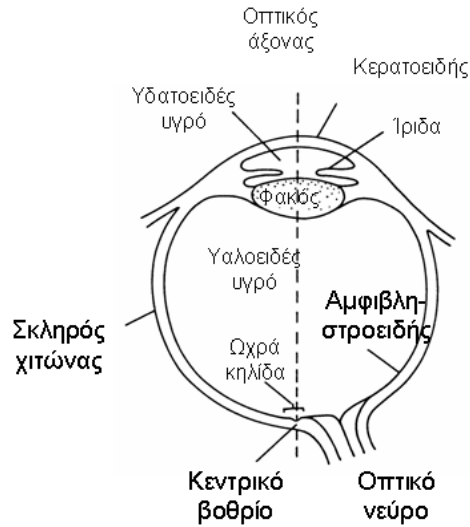
Ο κερατοειδής συντίθεται από 50 στρώματα ινών κολλαγόνου. Είναι διαφανής στο ορατό επειδή η κατασκευή του είναι ομοιογενής και χωρίς αιμοφόρα αγγεία, παρά μόνο στην περιφέρεια. Καλύπτεται εξωτερικά με στρώμα από δάκρυ (πάχους 7-10 μm), το οποίο τον μαλακώνει, «σβήνει» μικροατέλειες και τον εφοδιάζει με οξυγόνο.

Η ακτίνα καμπυλότητας του κερατοειδή είναι (στην κεντρική περιοχή) περίπου 7,8 mm και διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο κατά $\pm 0,4$ mm.

Το υδατοειδές υγρό γεμίζει το χώρο μεταξύ κερατοειδή και φακού. Περιέχει πλάσμα αίματος με λίγες πρωτεΐνες.

Η ίρις έχει στο κέντρο της ένα άνοιγμα: την κόρη, η διάμετρος της οποίας κυμαίνεται από 1,5 μέχρι 10,0 mm και ελέγχεται από ζεύγος μαλακών μυών: τον σφικτήρα (δακτυλοειδής) (που την περιβάλλει και είναι υπεύθυνος για τον περιορισμό του ανοίγματος) και τον διαστολέα (σαν λεπτός δίσκος) (που είναι υπεύθυνος για τη διάνοιξη της κόρης).

Ο φακός του οφθαλμού στέκεται ακριβώς πίσω από την κόρη και η σύστασή του είναι 66% νερό και 33% πρωτεΐνες. Έχει πάχος περίπου 4 mm και διάμετρο 9 mm. Μεγαλώνει καθόλη τη διάρκεια της ζωής προσθέτοντας νέους φλοιούς, ώστε να έχει τη μορφή «κρεμμυδιού». Σε μεγάλη ηλικία αποκτά κιτρινωπή απόχρωση και χάνει τη διαφάνειά του, δημιουργώντας τον καταρράκτη.

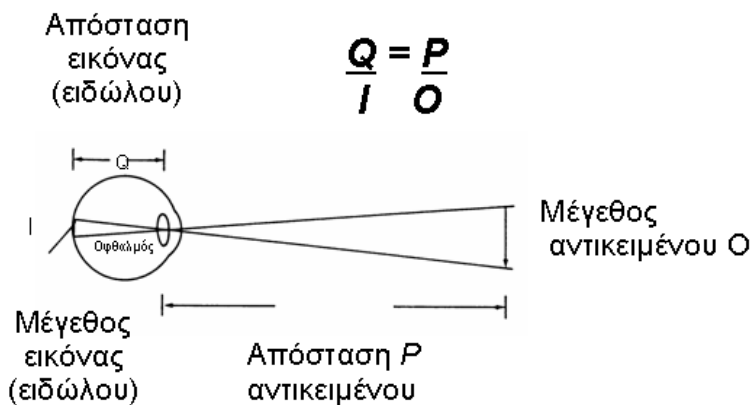


Το υαλοειδές υγρό αποτελείται από 99% νερό και 1% κολλαγόνο και ένα οξύ που του δίνει υφή ζελατινώδη. Καλύπτει τα 5 από τα 7-8 cm³ του όγκου του οφθαλμού.

Το υδατοειδές υγρό παράγεται συνεχώς (1% του όγκου του ανά λεπτό) και αποχετεύεται προς το νωτιαίο μυελό. Ο συνολικός όγκος του υδατοειδούς υγρού καθορίζει την εσωτερική πίεση του οφθαλμού που κυμαίνεται από 10 μέχρι 20 mmHg. Αν π.χ. λόγω τραυματισμού, εμποδιστεί η αποχέτευση του υδατοειδούς υγρού, η εσωτερική πίεση αυξάνει, κατάσταση που μπορεί να οδηγήσει σε γλαύκωμα ή τύφλωση (όταν τα αιμοφόρα αγγεία του αμφιβληστροειδή κλείσουν εξαιτίας της μεγάλης πίεσης), αν δεν υπάρξει άμεση χειρουργική επέμβαση εκτόνωσης.

3. Εστίαση του φωτός

Επηρεάζεται από το δείκτη διάθλασης (και την καμπυλότητα των διαχωριστικών επιφανειών) όλων των υλικών που διαπερνά το φως, από την είσοδό του στον οφθαλμό μέχρι το τέλος της διαδρομής του στον αμφιβληστροειδή.



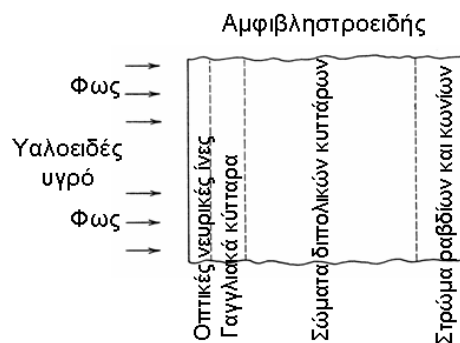
Οι κύριοι υπεύθυνοι όμως για την εστίαση είναι ο κερατοειδής (για τα 2/3) και ο φακός (για το υπόλοιπο 1/3).

Ο κερατοειδής έχει σταθερό σχήμα (και «οπτική συμπεριφορά»), όμως ο φακός προσαρμόζει την καμπυλότητά του ανάλογα με τις απαιτήσεις. Ο δείκτης διάθλασης του κερατοειδή είναι περίπου 1,377, του υδατοειδούς υγρού 1,337 και του φακού εξαρτάται από τις συντεταγμένες: στο κέντρο 1,40 με 1,41, στην περιφέρεια προς τους «πόλους» 1,385 με 1,39 και στην περιφέρεια προς τον «ισημερινό» 1,375. Υπάρχει και μια μεμβράνη-κάψουλα που περικλείει το φακό και έχει δείκτη διάθλασης περίπου 1,36.

Οπτικά στοιχεία οφθαλμού	Δείκτης Διάθλασης
Κερατοειδής	1,34
Υδατοειδές υγρό	1,33
Εξωτερικός φλοιός φακού	1,38
Εσωτερικό φακού	1,41
Υαλοειδές υγρό	1,34

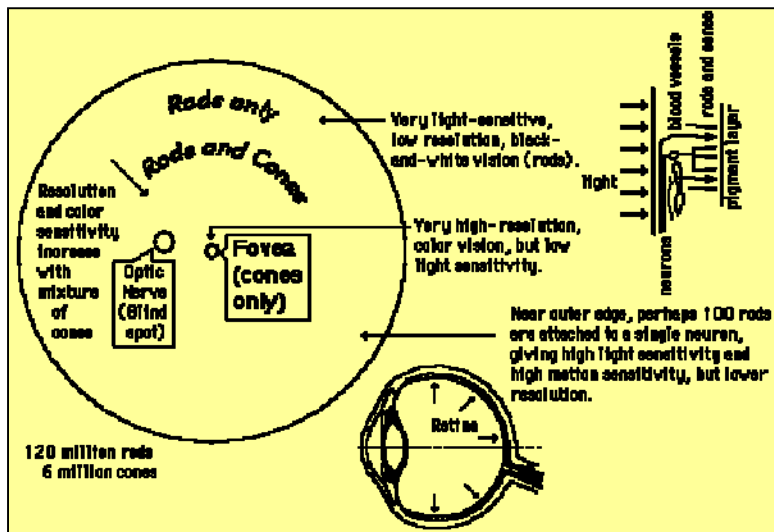
4. Απορρόφηση του φωτός

Περίπου το 50% του ορατού φωτός (400-700 nm) που θα εισέλθει στον οφθαλμό θα φθάσει στον αμφιβληστροειδή άμεσα.

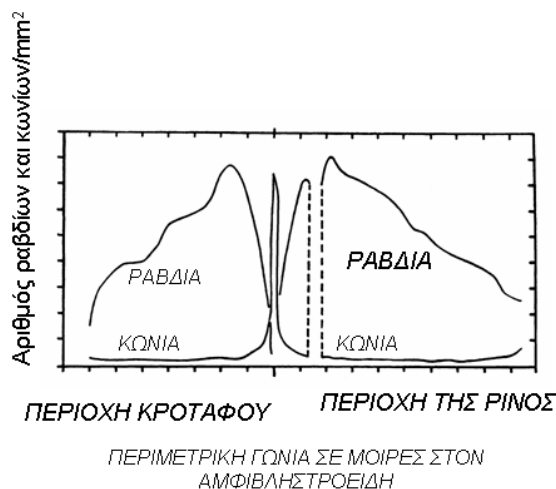


Όμως τα κύτταρα φωτοϋποδοχείς βρίσκονται πίσω από ένα στρώμα με γάγγλια και νευρώνες, το οποίο είναι λεπτότερο στην κεντρική περιοχή του αμφιβληστροειδή, την ωχρά κηλίδα, όπου και η όραση είναι ευκρινέστερη. Κοντά στην ωχρά κηλίδα υπάρχει το τυφλό σημείο χωρίς φωτοϋποδοχείς, καθόσον από αυτό ξεκινά (προς τα πίσω) το οπτικό νεύρο. Το τυφλό σημείο δεν γίνεται αισθητό, επειδή οι δύο οφθαλμοί αλληλοσυμπληρώνονται: όταν ένα φωτεινό αντικείμενο στέλνει ακτίνες φωτός που πέφτει

πάνω στο τυφλό σημείο του ενός οφθαλμού, στέλνει ταυτόχρονα ακτίνα φως και στον δεύτερο οφθαλμό, που (λόγω θέσης και γεωμετρίας) δεν βρίσκει το δικό του τυφλό σημείο.

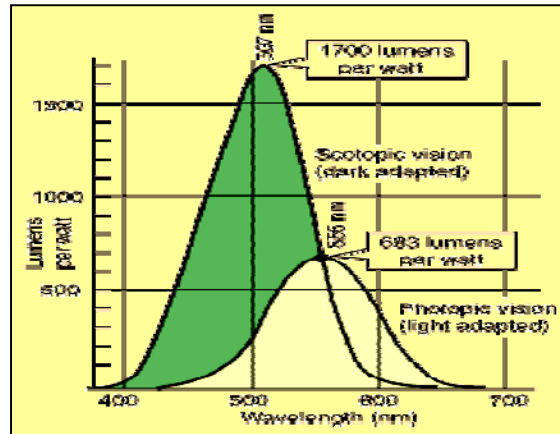


Ο αμφιβληστροειδής περιέχει περίπου 120 εκατομμύρια ραβδία. Τα ραβδία έχουν μεγάλη ευαισθησία, μικρή διακριτική ικανότητα και κυριαρχούν στην περιφερειακή ζώνη του αμφιβληστροειδή. Τα ραβδία απορροφούν έντονα σε μήκος κύματος περίπου 500 nm, αλλά η όραση με μόνο τα ραβδία δίνει αποχρώσεις του γκριζου. Τα ραβδία είναι υπεύθυνα για την όραση όταν επικρατεί λίγο φως και κάθε νευρική ίνα είναι συνδεδεμένη με ομάδα ραβδίων (μπορεί και εκατοντάδες).



Αντίστοιχα ο αμφιβληστροειδής περιέχει περίπου 6,5 εκατομμύρια κωνία, που έχουν μικρή ευαισθησία (1000 φορές μικρότερη από όση τα ραβδία), μεγάλη διακριτική ικανότητα και κυριαρχούν στην κεντρική περιοχή του. Τα κωνία είναι τριών ειδών, το κάθε είδος με τη δική του «θέση ευαισθησίας»: τα κωνία μικρού μήκους κύματος (445 nm, περιοχή κυανού), μέσου μήκους κύματος (535 nm, περιοχή πράσινου)

και μεγάλου μήκους κύματος (570 nm, περιοχή ερυθρού). Τα κωνία είναι υπεύθυνα για την έγχρωμη όραση και την όραση κατά τη διάρκεια της ημέρας (έντονο φως).



Η συνολική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού (ραβδίων και κωνίων) ταιριάζει με το φάσμα του ηλιακού φωτός που διαπερνά τη γήινη ατμόσφαιρα.

Η απορρόφηση του φωτός από τα ραβδία και τα κωνία περιγράφεται με τη βοήθεια της κβαντομηχανικής, η οποία καθορίζει ότι ένα φωτόνιο απορροφάται από τη χρωστική ροδοψίνη, μόνο όταν η ενέργεια του φωτονίου αντιστοιχεί σε διαφορά ενέργειας των διακριτών ενεργειακών επιπέδων του φωτοευαίσθητου μορίου.

Η ροδοψίνη αποτελείται από ένα (χημικό) τμήμα που είναι υπεύθυνο για το χρώμα της και την πρωτεΐνη οψίνη. Το χημικό τμήμα (ένα παράγωγο της βιταμίνης Α) απορροφά φωτόνιο αλλάζοντας τη διάταξή του στο χώρο, ενεργοποιώντας μία σειρά από διαδικασίες διαφορετικές για καθένα από τα ραβδία και τα (τρία) κωνία (βραβείο Nobel Φυσιολογίας – Ιατρικής, 1967).

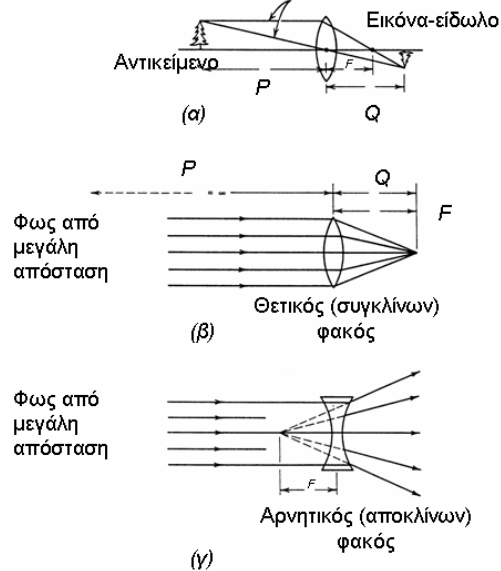
5. Πραγματικό και φανταστικό είδωλο

Ένας αμφίκυρτος (συγκλίνων) φακός δημιουργεί πραγματικό ή φανταστικό είδωλο φωτεινού αντικειμένου ανάλογα με την απόσταση μεταξύ τους. Αν f ή F η εστιακή απόσταση του φακού, d_1 ή P η απόσταση του αντικειμένου από το φακό και d_2 ή Q η απόσταση του ειδώλου από το φακό, θα ισχύει:

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f}$$

Όταν $d_1 > f$, το είδωλο θα είναι πραγματικό (από την άλλη μεριά του φακού και αντεστραμένο).

Ακτίνες φωτός που βοηθούν στον σχηματισμό της εικόνας



Όταν $d_1 < f$, το είδωλο θα είναι φανταστικό (από την ίδια μεριά του φακού και σχηματιζόμενο από προεκτάσεις των πραγματικών ακτίνων).

Όταν $d_1 = f$, το είδωλο θα σχηματιστεί σε άπειρη απόσταση.

Όταν $d_1 = \infty$, το είδωλο θα σχηματιστεί στη εστιακή απόσταση του φακού.

Σε έναν αμφίκυκλο (αποκλίνοντα) φακό ισχύουν τα ίδια, θεωρείται όμως ότι έχει αρνητική εστιακή απόσταση και σχηματίζει, πάντοτε, φανταστικό είδωλο.

Ο λόγος των μεγεθών I (του ειδώλου) προς O (του αντικειμένου) καλείται μεγέθυνση M και ισχύει:

$$M = \frac{I}{O} = \frac{d_2}{d_1}$$

Ο κερατοειδής χιτώνας και ο φακός του οφθαλμού υπακούουν στους παραπάνω «νόμους» και ο ρόλος τους είναι να σχηματίσουν το πραγματικό είδωλο κάθε φωτεινού αντικειμένου του περιβάλλοντος πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα.

Όταν αυτό δεν είναι εφικτό χρησιμοποιούνται διορθωτικοί φακοί (γυαλιά ή φακοί επαφής), συγκλίνοντες (για να φέρουν το είδωλο πιο μπροστά) ή αποκλίνοντες (για να φέρουν το είδωλο πιο πίσω).

Ως ισχύς του φακού θεωρείται το μέγεθος $1/f$ και μετράται σε διοπτρίες ($1 D = 1 \text{ m}^{-1}$).

Με βάση δεδομένα από ένα μαθηματικό μοντέλο του οφθαλμού (σύσταση και δείκτες διαθλάσεως) υπολογίζεται η ισχύς P του οφθαλμού ως:

$$P_{\text{οφθ}} = P_{\text{κερ}} + P_{\text{φακ.}} = 42,24 D + 22,10 D = 64,34 D$$

και η αντίστοιχη εστιακή απόσταση:

$$f_{οφθ} = \frac{n_{οφθ}}{P_{οφθ}} = \frac{1,336}{64,34 D} = 0,0208 \text{ m} = 20,8 \text{ mm}$$

Η απόσταση κερατοειδή - αμφιβληστροειδή είναι 24,20 mm και η απόσταση κερατοειδή – πίσω επιφάνειας φακού είναι 7,6 mm.

Δεχόμενοι πως η $f_{οφθ}$ «ξεκινά» ως μήκος, από τη μέση απόσταση των 7,6 mm, δηλαδή στα 3,8 mm πίσω από τον κερατοειδή, θα έχουμε τις εισερχόμενες ακτίνες να εστιάζονται στα 20,8 + 3,8 = 24,6 mm, δηλαδή πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα.

5.1. Προσαρμογή του οφθαλμού

Ο οφθαλμός μπορεί να προσαρμόζει την εστιακή του απόσταση ανάλογα με την απόσταση του αντικειμένου από τον οφθαλμό.

Οι ίνες του ακτινωτού συνδέσμου συγκρατούν το φακό στη θέση του πίσω από την κόρη της ίριδας. Όταν οι λείες μυϊκές ίνες του ακτινωτού σώματος συστέλλονται, ο ακτινωτός σύνδεσμος χαλαρώνει και η τάση στην κάψα (εύκαμπτο κάλυμμα) του φακού μειώνεται, αφήνοντας κυρτές τις επιφάνειες του φακού (εστίαση κοντινών αντικειμένων). Αντίθετα, όταν ο ακτινωτός μυς βρίσκεται σε ηρεμία (αφηρημένο βλέμμα), ο ακτινωτός σύνδεσμος τεντώνει αυξάνοντας την τάση στην κάψα του φακού και επιπεδώνοντας τις επιφάνειές του (εστίαση μακρινών αντικειμένων).

Το αντικείμενο που βρίσκεται στη μέγιστη δυνατή απόσταση για καθαρή εστίαση στον αμφιβληστροειδή, λέγεται πως βρίσκεται στο «απώτερο σημείο» (θεωρητικά το άπειρο). Το αντικείμενο που βρίσκεται στην ελάχιστη δυνατή απόσταση (περίπου 25 cm) για καθαρό είδωλο, βρίσκεται στο «εγγύτερο σημείο».

Για το απώτερο σημείο ισχύει:

$$\frac{1}{f_{απ}} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{17 \text{ mm}}$$

$$\text{και } P_{απ} = \frac{1}{f_{απ}} = 58,8 D \text{ (με } n_{αέρα} = 1)$$

Για το εγγύτερο σημείο, ισχύει:

$$\frac{1}{f_{εγγ}} = \frac{1}{250 \text{ mm}} + \frac{1}{17 \text{ mm}}$$

$$\text{και } P_{εγγ} = 62,8 D.$$

Δηλαδή η μέγιστη απαιτούμενη προσαρμογή μετράται ως $(62,8 - 58,8) D = 4 D$.

Στην ηλικία των 8 χρόνων η μέση προσαρμογή είναι της τάξης των 14 D. Στην ηλικία των 35 χρόνων, μειώνεται στις 7 D και μετά τα 45 η (φυσική) προσαρμογή δεν είναι πλέον αρκετή, φθάνοντας τις 1,3 D

στην ηλικία των 55 χρόνων. Πρόκειται για την (πάθηση) πρεσβυωπία που αντιμετωπίζεται με τη χρήση βοηθητικών διορθωτικών γυαλιών.

6. Ανιχνευτική ικανότητα του οφθαλμού

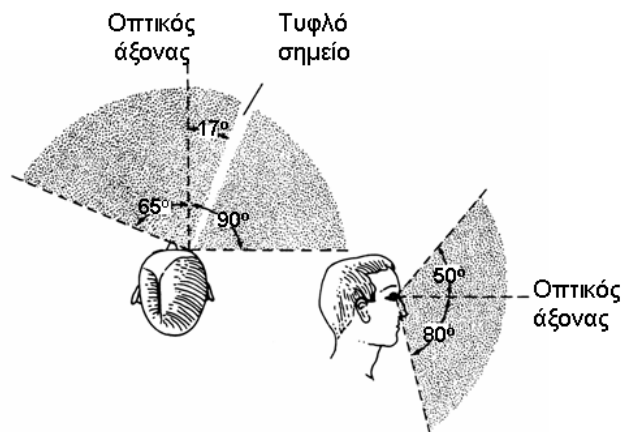
Μόνο το 50% των (εισερχομένων στον οφθαλμό) φωτονίων του ορατού οφθαλμού (400 - 700 nm) φθάνουν μέχρι τον αμφιβληστροειδή χιτώνα και σχηματίζουν είδωλα. Το υπόλοιπο ποσοστό χάνεται από ανακλάσεις στις ενδιάμεσες διαχωριστικές επιφάνειες (κυρίως τις 2 του κερατοειδή – ως λεπτού μηνίσκου – και τις 2 του φακού) και από απορρόφηση (μικρή για το ορατό) ή διάχυση στα υλικά που διαπερνά.

Η διάχυση είναι ο κύριος παράγοντας μείωσης της έντασης του εισερχομένου ορατού φωτός και οφείλεται στην ανομοιογένεια των συστατικών του οφθαλμού, που «μεταφράζεται» σε δεκάδες διαφορετικούς δείκτες διάθλασης.

Επειδή δε, η σκέδαση είναι «τύπου Rayleigh» που (το αποτέλεσμά της) είναι ανάλογος της συχνότητας του φωτός στην τέταρτη δύναμη, το κυανό σκεδάζεται περισσότερο (όπως και στην ερμηνεία του χρώματος του ουρανού) και παρουσιάζει το μεγαλύτερο ποσοστό απώλειας.

7. Διόφθαλμη, στερεοσκοπική όραση

Το πεδίο οπτικής αντίληψης κάθε οφθαλμού έχει ελλειψοειδή μορφή ύψους περίπου 130-150° και πλάτος 150-210°, ενώ το πεδίο από τη συνεργασία των δύο οφθαλμών έχει πιο κυκλική μορφή διαμέτρου περίπου 130°.



Τόσο ευρύ πεδίο με ελάχιστη παραμόρφωση οφείλεται στις καμπύλες επιφάνειες εισόδου του φωτός, αλλά και – κυρίως - του αμφιβληστροειδή όπου σχηματίζεται το είδωλο. Επί πλέον, οι μύες του οφθαλμού μπορούν να περιστρέψουν το οπτικό του πεδίο (τον κύριο άξονα) κατά 90° περίπου.

Ο εγκέφαλος επιτελεί τη «σύντηξη» των δύο ειδώλων (στους 2 οφθαλμούς) κάθε εξωτερικού αντικειμένου και δημιουργείται η τελική εικόνα. Σε αυτή τη σύντηξη συν-εισέρχεται και η αίσθηση του βάθους (τρίτη διάσταση) ως αποτέλεσμα επεξεργασίας των ίδιων δεδομένων, «διαβασμένων»

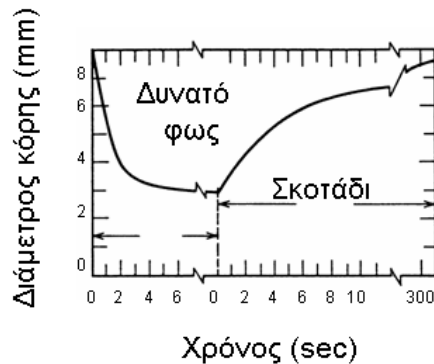
ταυτόχρονα υπό δυο, λίγο διαφορετικών (θέση της κορυφής τους στο χώρο) μεταξύ τους, γωνιών (κάθε γωνία – άποψη, έχει κορυφή τον «δικό» της οφθαλμό).

Αποτέλεσμα της διόφθαλμης όρασης είναι και η αίσθηση πως, όταν κινούμαστε, τα κοντινά αντικείμενα φαίνεται να κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα σε σχέση με τα πιο μακρινά, όπως επίσης και η αίσθηση ότι δύο παράλληλες γραμμές (π.χ. καλώδια ηλεκτρικού ρεύματος ή οι ακμές ενός πολυόροφου κτιρίου) φαίνονται να συγκλίνουν ανάλογα με την απόσταση από τον παρατηρητή.

8. Προσαρμογή στη φωτεινότητα

Επιπλέον από τη σωστή εστίαση, για την καλή όραση απαιτείται και κατάλληλη φωτεινότητα. Ανεξάρτητα από τη λαμπρότητα του αντικειμένου στον αμφιβληστροειδή (φωτοευαίσθητα κύτταρα) πρέπει να φτάσει αρκετό φως για να σχηματιστεί το είδωλο, όχι όμως περισσότερο φως από όσο «αντέχει» ο οφθαλμός. Π.χ. το φωτογραφικό φιλμ έχει ένα συγκεκριμένο εύρος απόκρισης στις προσπίπτουσες φωτεινές ακτίνες: αν οι ακτίνες είναι πολύ μικρής έντασης, το φιλμ δεν τις ανιχνεύει, ενώ αν είναι πολύ μεγάλης έντασης, το φιλμ παθαίνει «κορεσμό», δηλαδή γίνεται όλο άσπρο (μαύρο το αρνητικό του). Στη φωτογραφική μηχανή η προσαρμογή στη φωτεινότητα γίνεται με ρύθμιση του διαφράγματος, ρύθμιση του χρόνου έκθεσης, χρήση του φλας.

Στον οφθαλμό η προσαρμογή στη φωτεινότητα γίνεται με συνειδητό (π.χ. άναμα του φωτός στο δωμάτιο, χρήση γυαλιών ηλίου), ή ασυνείδητο τρόπο (διάμετρος της κόρης, ανανέωση της χρωστικής στα κωνία).



Ο αριθμός των ακτίνων (ή αυστηρότερα των φωτονίων) που εισέρχονται στον οφθαλμό είναι ανάλογος του τετραγώνου της διαμέτρου της κόρης. Δηλαδή κλείσιμο της κόρης από μέγιστης διαμέτρου (8 mm) (εξαρτάται από την ηλικία: 10 mm σε νήπιο 1 χρόνου, 3 mm στον ενήλικα 50 ετών και 1 mm στον υπερήλικα 80 ετών) στην ελάχιστη (2 mm), «μεταφράζεται» σε περιορισμό του εισερχόμενου φωτός κατά 16 φορές και της φωτεινότητας (luminance) κατά 10^6 περίπου.

Τα ραβδία είναι «πρωταγωνιστές» στη νυχτερινή (σκοτοπική) όραση και τα κωνία στο φως της ημέρας (φωτοπική). Ο κύριος παράγοντας της τόσο ευρείας απόκρισης του οφθαλμού σε διαφορετικά επίπεδα φωτεινότητας δεν είναι τόσο η ρύθμιση της διαμέτρου της κόρης, όσο ο συνδυασμός των μηχανισμών της λεύκανσης της ροδοψίνης (ακολουθούμενη από τη διαδικασία αποκατάστασης) και των μεταβολών στη «δικτύωση» των κυττάρων του αμφιβληστροειδή.

Ο εγκέφαλος, ως κεντρικός ρυθμιστής, φέρνει όλους τους μηχανισμούς σε επικοινωνία, ώστε να συνεργάζονται για βέλτιστο αποτέλεσμα.

9. Όρια Οπτικής Οξύτητας

Ορισμένοι βασικοί παράγοντες θέτουν όριο στην οπτική οξύτητα, ακόμη και σε αυτούς που έχουν την καλύτερη όραση.

Κάτω από άριστες συνθήκες η οπτική οξύτητα περιορίζεται από (α) το φαινόμενο της περίθλασης και (β) από το γεγονός ότι ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται αφενός από τη σύσταση του υλικού, αφετέρου από το μήκος κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας.

Το φαινόμενο της περίθλασης κάνει αισθητή την παρουσία του όταν η διάμετρος της κόρης του οφθαλμού γίνει μικρότερη από 3 mm περίπου. Σε μεγαλύτερη διάμετρο της κόρης η οπτική οξύτητα περιορίζεται μόνο από τη «συμπεριφορά» του δείκτη διάθλασης (σφαιρική και χρωματική εκτροπή).

Σε κάθε περίπτωση, περιοριστικός παράγοντας είναι οι μη αμελητέες διαστάσεις των φωτοευαίσθητων κυττάρων του αμφιβληστροειδή, όπως συμβαίνει και στην ψηφιακή καταγραφή με τα μη αμελητέων διαστάσεων pixels - δομικά στοιχεία της εικόνας. Επιπλέον περιοριστικός παράγοντας είναι και το γεγονός πως οι «έξοδοι» πολλών γειτονικών κυττάρων του αμφιβληστροειδή συνδέονται με έναν κοινό νευρώνα του οπτικού νεύρου.

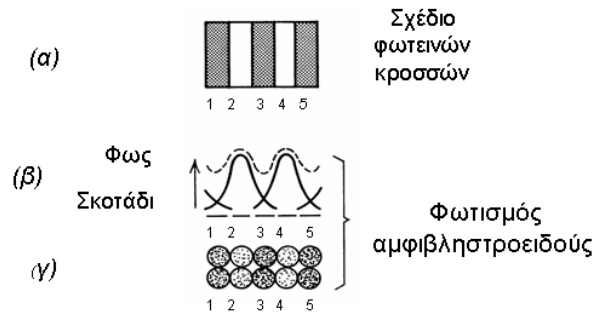
9.1. Περίθλαση και διαστάσεις των φωτούποδοχέων

Είναι γνωστό από την κυματική ότι όταν ένα κύμα, μήκους κύματος λ , προσπέσει σε άνοιγμα (πετάσματος) πλάτους D , θα εξακολουθήσει την πορεία του σκεδαζόμενο μέσα σε μια στερεά γωνία που έχει κορυφή το κεντρικό σημείο του ανοίγματος.

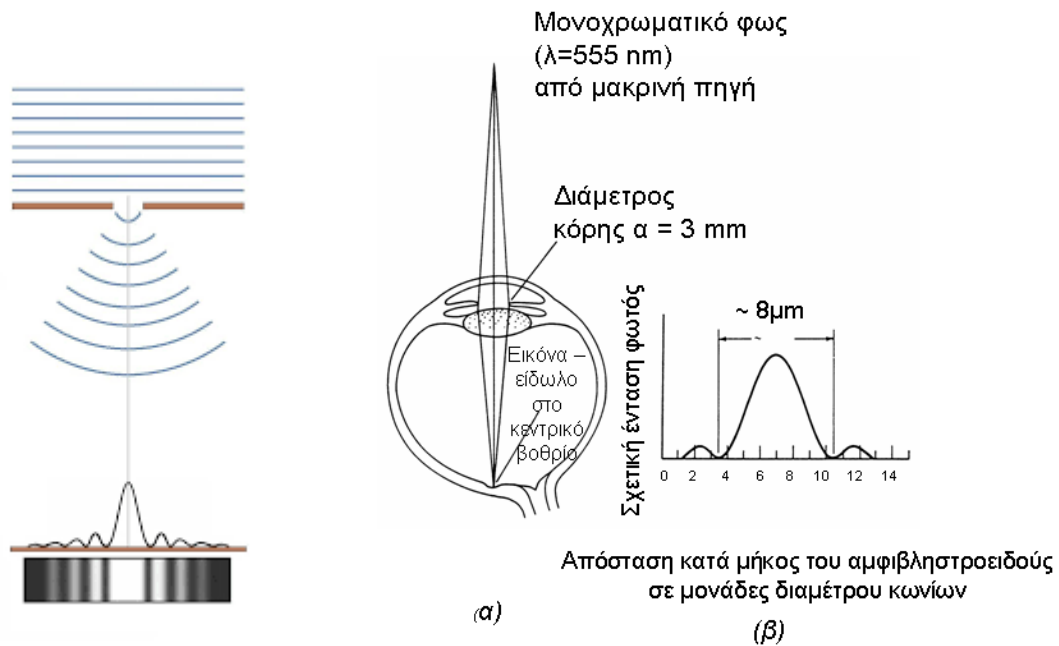
Το μέγεθος της στερεάς γωνίας είναι αντιστρόφως ανάλογο του D .

Αν το κύμα είναι φωτεινή ακτινοβολία και αν τοποθετηθεί μία οθόνη σε κάποια απόσταση μετά το άνοιγμα, θα σχηματισθεί πάνω στην οθόνη ένα ημιτονοειδές σχέδιο της έντασης του φωτός, με βαθμιαία ελάττωση του μέγιστου από το κέντρο προς την περιφέρεια.

Αν το άνοιγμα είναι σχισμή, το σχέδιο στην οθόνη θα είναι παράλληλες ευθείες - ζώνες, εναλλάξ φωτεινές - σκοτεινές, με τις φωτεινές βαθμιαία πιο αχνές όσο μεγαλώνει η απόστασή τους από την κεντρική (συμμετρικά από τις δύο πλευρές της).



Αν το άνοιγμα είναι οπή (όπως η κόρη του οφθαλμού), το σχέδιο θα είναι ομόκεντροι κύκλοι – κυκλικές ζώνες, εναλλάξ φωτεινές – σκοτεινές.



Με διάμετρο κόρης 3 mm, η διάμετρος του κεντρικού φωτεινού δίσκου (από σημειακή φωτεινή πηγή) θα είναι 8 μm (αντιπροσωπευτικό $\lambda = 555 \text{ nm}$). Η μέση διάμετρος των κωνίων είναι περίπου 1,5 μm , επομένως ο φωτεινός δίσκος (είδωλο της σημειακής πηγής) θα καλύπτει πολλά κωνία. Για να διακρίνει ο (υγιής) οφθαλμός δύο σημειακές πηγές ως ξεχωριστές, θα πρέπει να απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον 25 δεύτερα της μοίρας, δηλαδή 1,5 με 2,0 mm σε απόσταση 10 m από τον οφθαλμό.

Αυτά ισχύουν μόνο για το κεντρικό οπτικό πεδίο ανοίγματος 1° , που αντιστοιχεί στο κεντρικό βοθρίο του αμφιβληστροειδή, όπου η όραση επιτελείται με τη μεγαλύτερη ευαισθησία. Οπτικό πεδίο 1° σημαίνει εύρος 20 cm στην απόσταση των 10 m. Γύρω από το κεντρικό βοθρίο η οπτική οξύτητα μειώνεται από 5 έως 10 φορές, όσο η όραση γίνεται «περιφερικότερη», για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι

ότι οι φωτοϋποδοχείς εκτός βοθρίου είναι καλυμμένοι από στρώμα άλλων κυττάρων και ο δεύτερος λόγος είναι ότι περισσότεροι φωτοϋποδοχείς είναι συνδεδεμένοι στην ίδια ίνα του οπτικού νεύρου.

Αν η πηγή έχει αρκετή ένταση (για παράδειγμα ένα φωτεινό αστέρι), το επόμενο φωτεινό δακτυλίδι της περίθλασης μπορεί να δραστηριοποιήσει περισσότερα κωνία. Φωτεινές σημειακές πηγές μεγάλης έντασης θα φανούν μεγαλύτερες από ασθενέστερες σημειακές πηγές. Οι πρώτοι αστρονόμοι δεν γνώριζαν αυτό το φαινόμενο όταν προσδιόριζαν το μέγεθος των αστεριών. Στην αστρονομία, ο όρος «μέγεθος» έχει πλέον αντικατασταθεί με τον όρο «ένταση».

9.2. Σφαιρική και χρωματική εκτροπή

Είναι εμφανείς κυρίως στο φακό του οφθαλμού, όπως και στους φακούς γενικότερα.

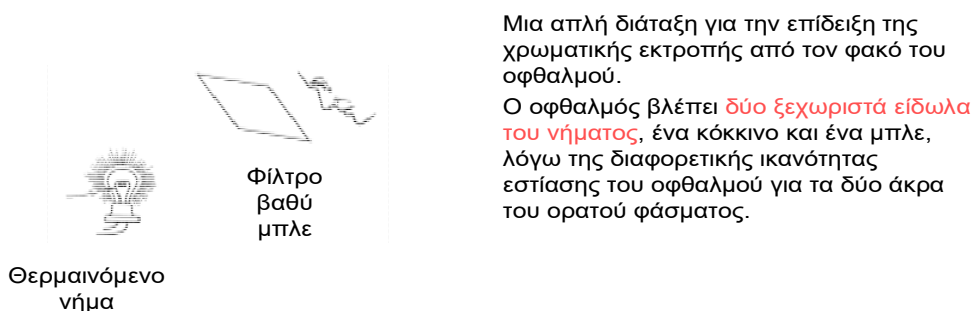
Η σφαιρική εκτροπή οφείλεται στη γεωμετρία του φακού, με αποτέλεσμα οι «κεντρικές» φωτεινές ακτίνες (γύρω από τον οπτικό άξονα) να εστιάζονται σε πιο μακρινό σημείο σε σχέση με τις «περιφερικότερες» ακτίνες. Επίσης, ακτίνες προσπίπτουσες στον οφθαλμό υπό κλίση (ως προς τον κύριο άξονα) εστιάζονται σε διαφορετική απόσταση από την αντίστοιχη των παράλληλων με τον άξονα ακτίνων.

Η σφαιρική εκτροπή περιορίζεται με μικρότερη διάμετρο της κόρης, η οποία όμως, όπως προαναφέρθηκε, όταν ξεπεράσει το όριο των 3 mm οδηγεί σε μείωση της οπτικής οξύτητας λόγω περίθλασης.

Η καλύτερη οπτική οξύτητα για έναν εμμετρικό οφθαλμό παρατηρείται όταν η κόρη έχει διάμετρο μεταξύ 3 και 4 mm (το φυσιολογικό της μέγεθος σε συνθήκες καλού φωτισμού).

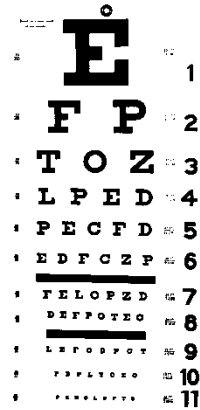
Τα μακρινά αντικείμενα εστιάζονται στον αμφιβληστροειδή με μικρότερη σφαιρική εκτροπή, εφόσον «απασχολούν» την κεντρικότερη περιοχή του φακού.

Η χρωματική εκτροπή οφείλεται στην εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας. Τα μικρότερα μήκη κύματος (κυανό) εστιάζονται σε μικρότερη απόσταση σε σχέση με τα μεγαλύτερα (ερυθρό), παρουσιάζοντας μία διαφορά ως 2 D (διοπτρίες) στην οπτική ισχύ του φακού του οφθαλμού. Το αποτέλεσμα είναι να φαίνεται καθαρό (εστιασμένο) ένα αντικείμενο με κυανή απόχρωση, την ίδια στιγμή που σε ερυθρή απόχρωση φαίνεται θολό (μη εστιασμένο).

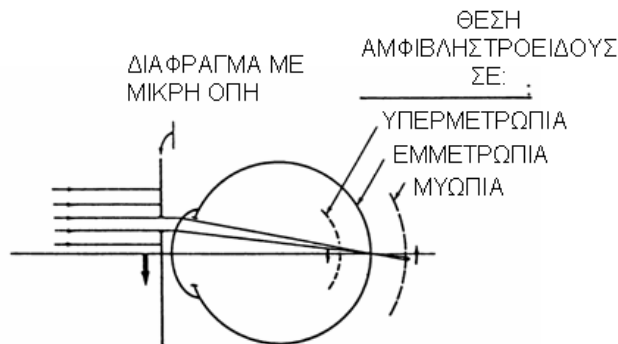


10. Η ελαττωματική όραση

Η οπτική οξύτητα ελέγχεται με ειδικό πίνακα (χάρτης Snellen) τοποθετημένο σε απόσταση 6 m υπό καλό φωτισμό (τουλάχιστον 500 lux) που περιέχει μαύρους χαρακτήρες (ανάκλαση 4%) σε άσπρο υπόβαθρο (ανάκλαση 84%). Οξύτητα 6/6 έχει κάθε οφθαλμός που μπορεί να διακρίνει μέχρι την όγδοη γραμμή.



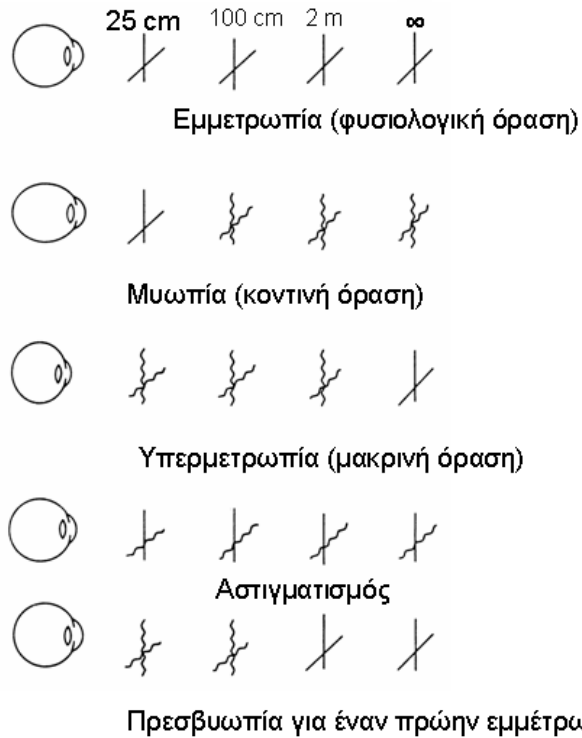
Ανάλογος έλεγχος γίνεται με τον πίνακα Jaeger (σε απόσταση φυσιολογικής ανάγνωσης) για όσους δεν βλέπουν καλά τα κοντινά αντικείμενα.



Όσοι έχουν όραση με οξύτητα 1 (συνήθως αναφέρεται ως οξύτητα 10) ή κοντά στο 1 (δηλαδή να χρειάζονται διόρθωση μικρότερη της 0.5 ή 1.0 D) λέγονται εμμέτρως.

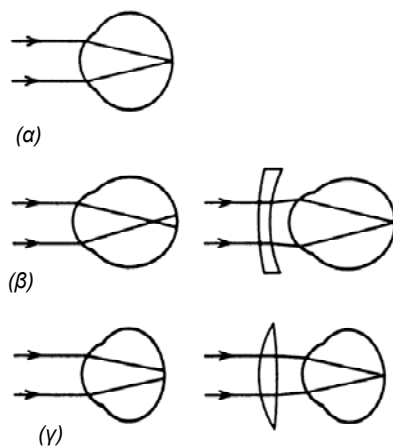
Σε αυτούς το απώτερο σημείο είναι στο άπειρο και το εγγύτερο στα 25 cm, με ικανότητα προσαρμογής τουλάχιστον 4 D.

Οι υπόλοιποι είναι αμέτρως και χρειάζονται διορθωτικούς φακούς για να βλέπουν καθαρά.



Μύωπες είναι όσοι δεν βλέπουν καθαρά τα μακρινά αντικείμενα, τα οποία εστιάζονται πριν τον (και όχι πάνω στον) αμφιβληστροειδή. Η όρασή τους βελτιώνεται με την παρεμβολή αρνητικού φακού. Αν η ικανότητα προσαρμογής του μυωπικού οφθαλμού είναι τουλάχιστον 4 D, ο μύωπας θα βλέπει καθαρά, με τα ίδια γυαλιά και τα κοντινά αντικείμενα (που τα βλέπει και χωρίς διορθωτικό φακό).

Μυωπικός είναι ο οφθαλμός που είτε είναι πιο επιμήκης από το φυσιολογικό (η πιο συχνή αιτία), είτε έχει κερατοειδή με μεγαλύτερη του φυσιολογικού καμπυλότητα.



Χαρακτηριστικά εστίασης του οφθαλμού.

(α) Ο φυσιολογικός ή εμμετρωπικός οφθαλμός εστιάζει την εικόνα στον αμφιβληστροειδή.

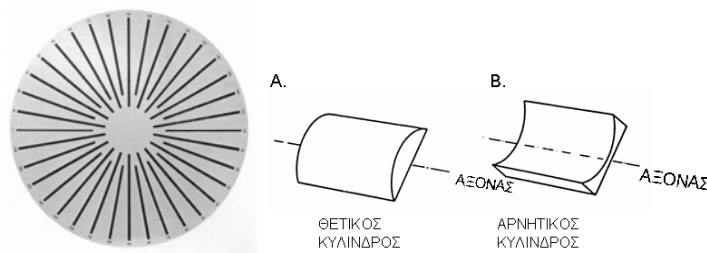
(β) Ο μυωπικός οφθαλμός εστιάζει την εικόνα μπροστά από τον αμφιβληστροειδή. Το πρόβλημα διορθώνεται με αρνητικό φακό.

(γ) Ο υπερμετρωπικός οφθαλμός εστιάζει την εικόνα πίσω από τον αμφιβληστροειδή. Το πρόβλημα διορθώνεται με θετικό φακό.

Υπερμέτρωπες είναι όσοι δεν βλέπουν καθαρά τα κοντινά αντικείμενα, τα οποία θα εστιάζονται μετά (πίσω από) τον αμφιβληστροειδή. Η όρασή τους βελτιώνεται με την παρεμβολή θετικού φακού. Αν η ικανότητα προσαρμογής του υπερμέτρωπα είναι τουλάχιστον 4 D, ο οφθαλμός του θα βλέπει με τα ίδια γυαλιά και τα μακρινά αντικείμενα (που τα βλέπει και χωρίς διορθωτικό φακό).

Υπερμετρωπικός είναι ο οφθαλμός που είτε είναι λιγότερο επιμήκης από το φυσιολογικό (η πιο συχνή αιτία), είτε έχει κερατοειδή με μικρότερη του φυσιολογικού καμπυλότητα (πιο πεπλατυσμένος - επίπεδος).

Ο οφθαλμός με αστιγματισμό εστιάζει διαφορετικά στο κατακόρυφο σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Ο αστιγματισμός είναι αποτέλεσμα περιστροφικής ασυμμετρίας κυρίως της καμπυλότητας του κερατοειδή. Αστιγματισμός μπορεί να συμβεί και από τραύμα, χειρουργική επέμβαση ή κάποια πάθηση. Ο απλός αστιγματισμός διορθώνεται με σφαιρο-κυλινδρικό φακό.



Η έλλειψη φωτο-χρωστικής σε ένα από τα τρία είδη κωνίων (φωτοευαίσθητα κύτταρα μαζί με τα ραβδία) οδηγεί στην αχρωματοψία που συναντάται στο 10% του ανδρικού και 1% του γυναικείου πληθυσμού.

Η αχρωματοψία συνήθως αφορά τα μικρά ή μεσαία ή μεγάλα μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας. Σπανιότερα καλύπτει μεγαλύτερες περιοχές ή και όλα τα χρώματα (πλήρης αχρωματοψία, διάκριση μόνο αποχρώσεων του γκριζου).

11. Διορθωτικοί φακοί

Μπορεί να είναι τα κοινά γυαλιά, οι μαλακοί φακοί επαφής ή οι σκληροί (αλλά διαπερατοί από τον αέρα) φακοί επαφής και η χρήση τους έχει στόχο τη διόρθωση της όρασης, δηλαδή το απώτερο σημείο να βρίσκεται στο άπειρο (εστιακή απόσταση περίπου 17,0 mm) και το εγγύτερο στα 25 cm (εστιακή απόσταση περίπου 15,9 mm).

Οι γυάλινοι φακοί των κοινών γυαλιών έχουν συνήθως υλικό με δείκτη διάθλασης 1,523, αλλά χρησιμοποιείται και υλικό με δ.δ. > 1,70 για τις περιπτώσεις που απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς (θα απαιτούσε μεγάλο πάχος και βάρος του φακού).

Στα κοινά γυαλιά, για λόγους ασφαλείας (σπάσιμο) και βάρους, χρησιμοποιούνται συχνά πλαστικοί φακοί, π.χ. με δ.δ. 1,498 ή 1,586 (ο δεύτερος είναι μαλακός, αλλά προκαλεί χρωματική εκτροπή).

Οι μαλακοί και εύκαμπτοι φακοί επαφής προσαρμόζονται στο σχήμα του κερατοειδή, ενώ οι σκληροί έχουν το δικό τους σχήμα - καμπυλότητα.

Η εσωτερική επιφάνεια των μαλακών φακών γίνεται ένα σώμα με την εξωτερική επιφάνεια του κερατοειδή, με αποτέλεσμα το αρχικό σχήμα του κερατοειδή και το πάχος του προστιθέμενου φακού να καθορίζουν τη νέα ακτίνα καμπυλότητας και συνεπώς τη διορθωμένη εστιακή απόσταση.

Ο οφθαλμός ανέχεται μαλακούς φακούς επαφής διαμέτρου 13,0 ως 14,5 mm, δηλαδή μεγαλύτερους από τον κερατοειδή, για πιο σωστή τοποθέτηση και μεγαλύτερη ευστάθεια.

Το πάχος στην κεντρική περιοχή του μαλακού φακού αρχίζει από 0,03 mm, τόσο λεπτό ώστε είναι διαπερατό από το οξυγόνο που είναι απαραίτητο να τροφοδοτεί τον κερατοειδή.

Ο σκληρός φακός επαφής είναι πιο δυσάρεστος στον οφθαλμό, αλλά απαραίτητος σε ορισμένες περιπτώσεις με ανομοιογένειες, όπως και ο υψηλού βαθμού αστιγματισμός. Ο σκληρός φακός δεν είναι διαπερατός από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Ο κερατοειδής οξυγονώνεται μέσω της λεπτού στρώματος δακρύων που παρεισφύει καθώς ο φακός επαφής κινείται ελαφρά με το ανοιγόκλειμα του βλέφαρου.

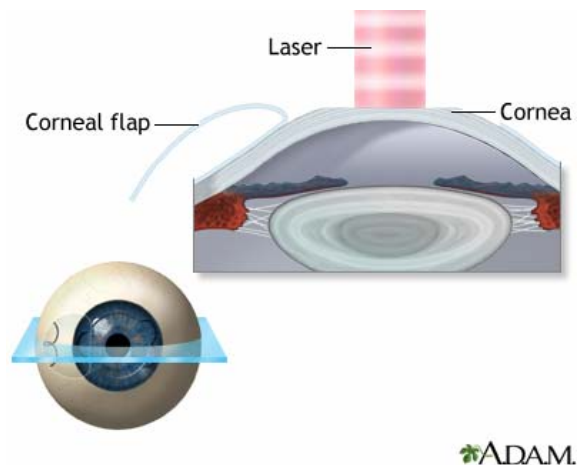
Συνιστάται η συχνή διακοπή της χρήσης του σκληρού φακού επαφής και η ξεκούραση του οφθαλμού, επειδή η οξυγόνωση δεν είναι εύκολη και ο κερατοειδής ερεθίζεται. Οι νέας σύνθεσης σκληροί φακοί επαφής, που αφήνουν το οξυγόνο να τους διαπεράσει, μπορούν να φορεθούν 10 με 12 ώρες, επειδή επιτρέπουν βελτιωμένη οξυγόνωση του κερατοειδή ως και 10 φορές.

Οι φακοί επαφής συγκρατούνται στη θέση τους (ενάντια στη δύναμη βαρύτητας) κυρίως με δυνάμεις επιφανειακής τάσης μεταξύ του φακού και του λεπτού στρώματος δακρύων στην επιφάνεια του οφθαλμού. Οι φακοί επαφής επίσης δεν γλιστρούν εύκολα από την κεντρική τους θέση, επειδή αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής.

12. Μόνιμη διόρθωση

Μόνιμη διόρθωση της οπτικής ισχύος μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεταβολή της ακτίνας καμπυλότητας της επιφάνειας του κερατοειδή. Υπάρχουν δύο τρόποι: ο πρώτος είναι με νυστέρι με το οποίο γίνονται τέσσερις ή οκτώ ακτινωτές σχισμές (ακτινωτή κερατοτομία) για την επιπέδωση του κερατοειδή και τη διόρθωση μυωπίας.

Ο δεύτερος είναι με excimer Laser που σμιλεύει τον κερατοειδή είτε απευθείας, είτε αφού πρώτα ανασηκωθεί ο λεπτός εξωτερικός φλοιός του κερατοειδή. Με το Laser μπορεί να «φαγωθεί» (με εξάτμιση) η κορυφή του κερατοειδή για διόρθωση μυωπίας ή «σκάβεται» περιφερειακά για αύξηση της καμπυλότητας και διόρθωση της υπερμετρωπίας.



13. Είδη οπτικής δυσλειτουργίας

Αναφέρθηκε ήδη το πρόβλημα της κακής εστίασης. Υπάρχουν βέβαια και άλλα προβλήματα στη λειτουργία του οφθαλμού, όπως (α) η ατελής διέλευση της φωτεινής ακτινοβολίας μέσα από τα «συστατικά» του, (β) βλάβη στον αμφιβληστροειδή και (γ) βλάβη στο οπτικό νεύρο.

(α) Κάποια ουλή στον κερατοειδή (από χτύπημα ή ασθένεια) ή θόλωση στο φακό από καταρράκτη αυξάνουν τη σκέδαση και απορρόφηση του εισερχόμενου φωτός και μειώνουν την ποιότητα της τελικής εικόνας.

Λύση, για την περίπτωση του κερατοειδή, αποτελεί η μεταμόσχευση και για την περίπτωση του καταρράκτη η αφαίρεση το φακού και η αντικατάστασή του με πλαστικό.

(β) Υπάρχουν τέσσερις κύριες κατηγορίες βλάβης στον αμφιβληστροειδή:

(i) από διαβητική αμφιβληστροειδίτιδα

κατά την οποία τα τριχοειδή αγγεία του αμφιβληστροειδή πολλαπλασιάζονται και παρουσιάζουν διαρροές προς το υαλοειδές υγρό, μειώνοντας τη διαφάνειά του. Επαναλαμβανόμενες επεμβάσεις με Laser Ar θέτουν υπό έλεγχο το πρόβλημα «καίγοντας τα περιττά τριχοειδή».

(ii) εκφύλιση ωχράς κηλίδας

Η κεντρική περιοχή του αμφιβληστροειδή, με διάμετρο περίπου 5 mm, λέγεται ωχρά κηλίδα και περιέχει το κεντρικό βοθρίο με τη βέλτιστη διακριτική ικανότητα. Η εκφύλιση της ωχράς κηλίδας συμβαίνει συχνά στις μεγάλες ηλικίες. Πρόκειται για ατροφία των κωνίων και δημιουργία νέων τριχοειδών, όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Αντιμετωπίζεται επίσης με Laser.

(iii) αποκόλληση του αμφιβληστροειδή

συμβαίνει κάτω από ορισμένες συνθήκες. Το αποκολλημένο μέρος του χιτώνα χάνει την επαφή του με το επιθήλιο και τις χρωστικές και ή δυσλειτουργεί ή δεν λειτουργεί καθόλου. Επιπλέον έχει τάση επέκτασης. Επέμβαση με κατάλληλο Laser δημιουργεί συγκολλήσεις στη βάση της αποκολλημένης περιοχής και σταθεροποιεί την κατάσταση.

(iv) από μελαγχρωστική αμφιβληστροειδίτιδα

Είναι κληρονομική ασθένεια που προσβάλλει κατ'αρχήν τα ραβδία (νυχτερινή όραση) και σε δεύτερο στάδιο τα κωνία, οδηγώντας σε τύφλωση.

(γ) Βλάβη στο οπτικό νεύρο μπορεί να συμβεί με την αύξηση της πίεσης του υδατοειδούς υγρού. Τα αιμοφόρα αγγεία που τρέφουν τον αμφιβληστροειδή και η βάση του οπτικού νεύρου πιέζονται επικίνδυνα και οδηγούν σε εκφυλισμό του νεύρου, δηλαδή τύφλωση. Ο συντελεστής του κινδύνου αυξάνεται εκθετικά με την εσωτερική πίεση στον οφθαλμό.

Πρόβλημα προκαλείται και από την ένταση του εισερχόμενου φωτός που μπορεί να επηρεάσει προσωρινά ή μόνιμα την όραση. Η φωτοκερατίτιδα είναι επώδυνη, αλλά συνήθως προσωρινή φλεγμονή του κερατοειδή και προκαλείται από υπεριώδες φως. Είναι γνωστή ως ασθένεια του ηλεκτροσυγκολλητή και ασθένεια του χιονιού.

Καταρράκτης επίσης προκαλείται από χρόνια έκθεση του φακού στο υπεριώδες.

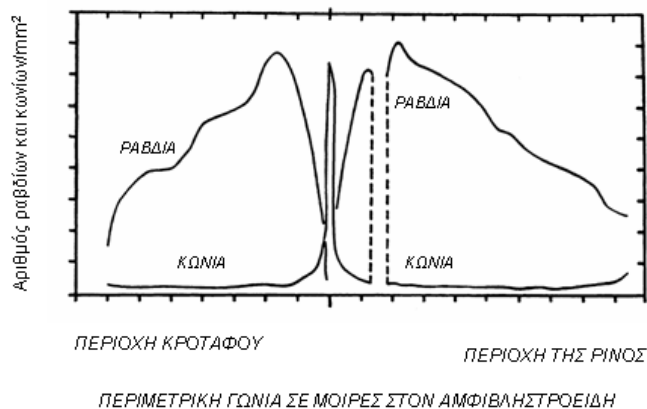
Αν προσπέσουν ηλιακές ακτίνες ή ακτίνες Laser απευθείας στον αμφιβληστροειδή, έστω και για μικρό χρονικό διάστημα, θα προκαλέσουν φωτο-αμφιβληστροειδίτιδα και θερμικά τραύματα (ανάλογα με το μήκος κύματος: 400-500 nm για τη φλεγμονή, 400 με 1400 nm για τα τραύματα). Laser στο εγγύς υπέρυθρο (800-3000 nm) μπορεί να καταστρέψει το φακό.

Εργάτες επεξεργασίας γυαλιού και ατσαλιού είχαν πρόβλημα στα μάτια εξαιτίας της παρατεταμένης έκθεσής τους σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μήκους κύματος 1300 nm ως 1 mm και μεγάλης έντασης.

14. Οπτική αντίληψη

Την οπτική αντίληψη επηρεάζουν πολλοί παράγοντες:

(α) Η κατανομή των κωνίων και ραβδίων στην επιφάνεια του αμφιβληστροειδή (πυκνότερα το κωνία στο κέντρο και πυκνότερα τα ραβδία στην περιφέρεια), όπως και ο τρόπος σύνδεσής τους με τις ίνες του οπτικού νεύρου.

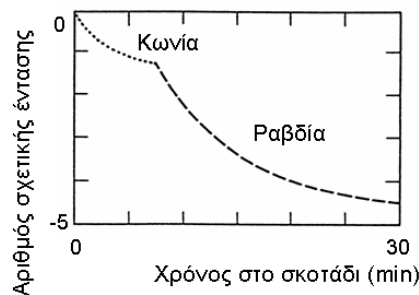


(β) Η φωτεινότητα του σχηματιζόμενου ειδώλου δεν είναι απλά ανάλογη της έντασης του εισερχόμενου φωτός, αλλά εξαρτάται από το φωτισμό του αντικειμένου σε συνδυασμό με την ανακλαστικότητά του,

ανά μήκος κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας, όπως επίσης και από τον συντελεστή απορρόφησης του φωτοϋποδοχέα.

(γ) Το χρώμα του σχηματιζόμενου ειδώλου εξαρτάται από την ευαισθησία των φωτοϋποδοχέων, η οποία είναι συνάρτηση του μήκους κύματος και διαφορετική των ραβδίων από την αντίστοιχη των κωνίων. Τα ραβδία είναι πιο ευαίσθητα (ανταποκρίνονται σε χαμηλότερο «σήμα») κυρίως για τα μήκη κύματος 400-550 nm. Τα κωνία έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία (συγκριτικά) στη ζώνη 550 έως 700 nm και παρουσιάζουν το μέγιστο της απόλυτης ευαισθησίας τους στα 550 nm περίπου.

(δ) Η προσαρμογή στο σκοτάδι είναι ταχύτερη για τα κωνία (στα πρώτα 10 λεπτά), αλλά παρουσιάζουν ψηλό κατώφλι ανίχνευσης. Τα ραβδία προσαρμόζονται με αργό ρυθμό, χρειάζονται 30 λεπτά, αλλά παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερο κατώφλι φωτισμού για να ανιχνεύσουν κάποιο αντικείμενο.



Ο χρόνος προσαρμογής στο σκοτάδι καθορίζεται από το ρυθμό αναγέννησης της ροδοψίνης και αλλαγής της «καλωδίωσης» των κυττάρων με το οπτικό νεύρο.

(ε) Ο χρόνος απόκρισης των φωτοϋποδοχέων είναι η παράμετρος που σχετίζεται με το χαμηλότερο ρυθμό «αναβοσβήσιματος» μίας φωτεινής πηγής που γίνεται αντιληπτός ως συνεχής εκπομπή. 60 «κύκλοι» ανά δευτερόλεπτο (60 Hz) είναι μια γενικά παραδεκτή τιμή, που «καλύπτει» ακόμη και φως μεγάλης έντασης. Στο κεντρικό βοθρίο ισχύει η τιμή των 50 Hz, αλλά μειώνεται ακόμη και στα 10 Hz στα περιφερειακά κύτταρα.

15. Βιβλιογραφία

1. Hobbie RK. Intermediate Physics for Medicine and Biology, 3rd ed. (Springer – Verlag, NY) 1997
2. Ruch TC and Patton HD eds. Physiology and Biophysics, 19th ed. (WB Saunders Company, Philadelphia) 1965
3. Cameron JR, Skofronick JG, Grant RM. Φυσική του Ανθρώπινου Σώματος (Παρισιάνος ΑΕ, Αθήνα) 1999
4. Herman IP. Physics of the Human Body (Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg) 2007