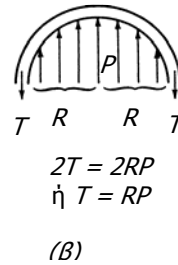
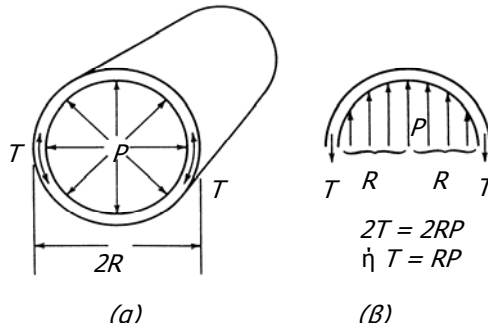
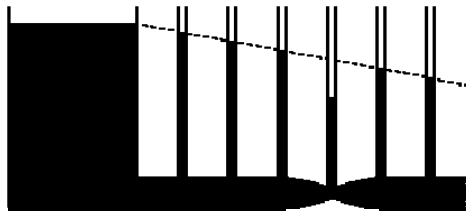


# Μηχανική των Ρευστών



**Σοφία Κόττου**

**Επίκουρη Καθηγήτρια**

**Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής**

**Ιατρική Σχολή Πανεπιστημίου Αθηνών**

**Νοέμβριος 2007**

# Περιεχόμενα

<b>Εκπαιδευτικό Αντικείμενο .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Γενικά .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Πίεση .....</b>	<b>4</b>
2.1 Μέτρηση της πίεσης.....	4
2.2 Πιέσεις στο σώμα.....	6
2.2.1 Οφθαλμός .....	6
2.2.2 Οστά.....	7
2.2.3 Κατάδυση .....	7
2.2.3.1 Η νόσος των δυτών .....	9
2.2.4 Υπερβαρικός θάλαμος .....	10
<b>3. Ροή Ρευστών .....</b>	<b>11</b>
3.1 Νόμος των Ιδανικών Αερίων .....	11
3.2 Αρχή του Pascal .....	11
3.3 Αρχή του Αρχιμήδη.....	11
3.4 Νόμος Laplace.....	11
3.5 Ρευστά σε κίνηση.....	12
3.6 Νόμος της Συνέχειας.....	13
3.7 Νόμος του Bernoulli .....	13
3.8 Αντίσταση στη ροή.....	14
3.9 Εσωτερική τριβή και νόμος του Poiseuille.....	15
3.10 Ρευστά στο ανθρώπινο σώμα.....	17
3.10.1 Αίμα.....	17
3.10.2 Πνεύμονες.....	17
3.10.3 Πεπτική οδός.....	17
3.10.4 Ουροδόχος κύστη .....	18
3.10.5 Εγκέφαλος.....	19
<b>4. Το Καρδιαγγειακό Σύστημα.....</b>	<b>20</b>
4.1 Το κυκλοφορικό σύστημα .....	20
4.2 Ιδιότητες του αίματος .....	21
4.2.1 Τα έμμορφα συστατικά του αίματος .....	22
4.2.2 Μέτρηση των ερυθρών αιμοσφαιρίων .....	23
4.2.3 Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής (γλοιότητα) του αίματος.....	24
4.2.4 Μέτρηση της πίεσης του αίματος.....	27
4.3 Δομή των αγγείων.....	29
4.4 Η πίεση του αίματος .....	30
4.5 Μέτρηση της ροής του αίματος στα αγγεία .....	31
4.6 Πίεση από φυγόκεντρο δύναμη .....	34
4.7 Τριχοειδή και οσμωτική πίεση.....	35
4.7.1 Ροή οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα .....	36
4.8 Ροή και ταχύτητα αίματος .....	37
<b>5. Βιβλιογραφία .....</b>	<b>39</b>

## Εκπαιδευτικό Αντικείμενο

Οι σημειώσεις αυτές αναλύουν την ύλη του κεφαλαίου 5 του 2<sup>ου</sup> τόμου του Χ. Προυκάκη «ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ» και των κεφαλαίων 5 και 8 του βιβλίου του J.R. Cameron «ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ».

Στόχος των σημειώσεων είναι να βοηθήσουν τον αναγνώστη να κατανοήσει την έννοια της πίεσης, με την ποικιλία των μορφών που παρουσιάζεται στις διάφορες εφαρμογές κατά τη λειτουργία του ανθρώπινου σώματος.

Απώτερος στόχος είναι η κατανόηση του πολύπλοκου και πολύ-παραγοντικού θέματος της ροής του αίματος στα αγγεία, με όσο το δυνατόν απλούστερη περιγραφή των νόμων που ισχύουν στην υδροδυναμική και του τρόπου προσαρμογής τους στις ειδικές συνθήκες που επικρατούν στον ανθρώπινο οργανισμό.

### 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  $\rho$  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  $P_a$ ). Συνήθως έχουμε:

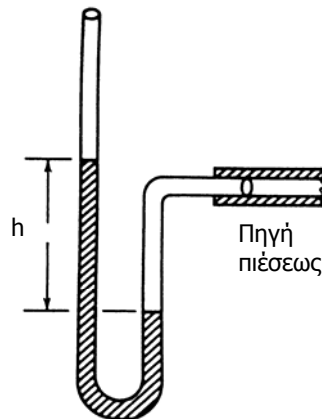
$$P = P_{\text{σχ}} = P_{\text{απ}} - P_a$$

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 (μεταξύ πνεύμονα και θωρακικού τοιχώματος)	-1,3	-10

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.



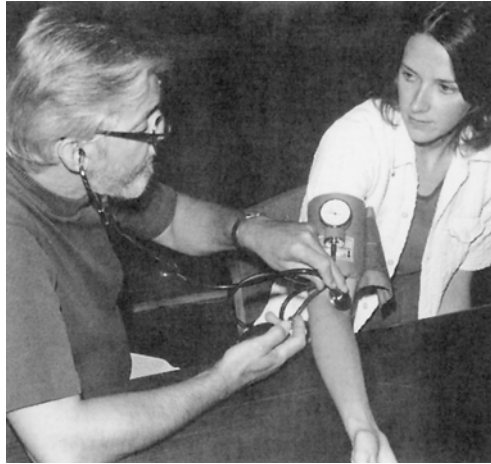
Η βάση του σωλήνα περιέχει ένα υγρό, που στην κατάσταση «ηρεμίας» παρουσιάζει ελεύθερη επιφάνεια ίδιου ύψους στα δυο σκέλη του σωλήνα.

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.

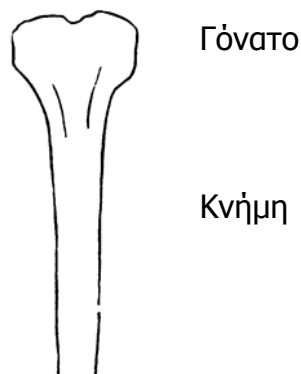
Ο οφθαλμός παράγει συνεχώς υδατοειδές υγρό και η περίσσεια αυτού απομακρύνεται μέσω ειδικού παροχετευτικού συστήματος.

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.

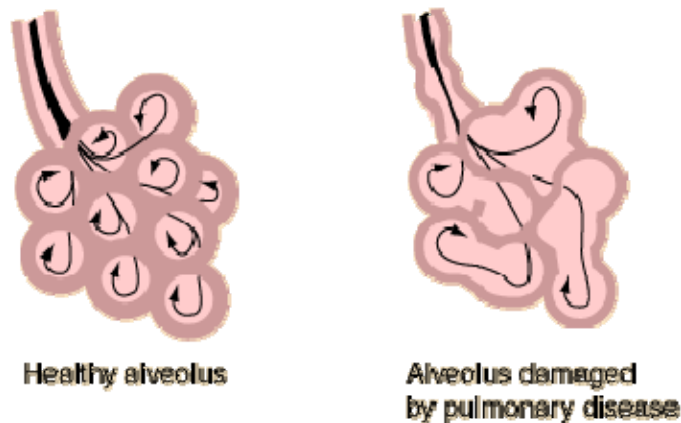
Διαφορά πίεσης της τάξης 17 kPa (120 mmHg) μεταξύ των δύο πλευρών του τυμπάνου, που μπορεί να συμβεί σε βάθος περίπου 1,7 m νερού, μπορεί να προκαλέσει διάρρηξή του.

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 δύτες είναι κρυωμένος, 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 αμφοτέρων 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  $\Delta P$ , π.χ. σε ένα δοχείο (με λεπτό τοίχωμα συγκεκριμένου σχήματος), με την τάση ( $T$ ) (δύναμη ανά μονάδα μήκους) στο τοίχωμα.

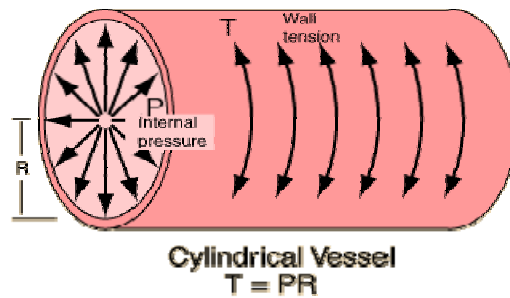
Η πίεση που εξασκεί το αίμα στο τοίχωμα του αιμοφόρου αγγείου είναι μεγαλύτερη κατά  $\Delta P$  από την εξωτερική πίεση στο τοίχωμα.

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 ( $\rho$ ) και από το συντελεστή εσωτερικής τριβής ( $\eta$ ).

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

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 ασυμπιεστά

- (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  $\Pi$  (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:

$$\Pi = S \cdot v$$

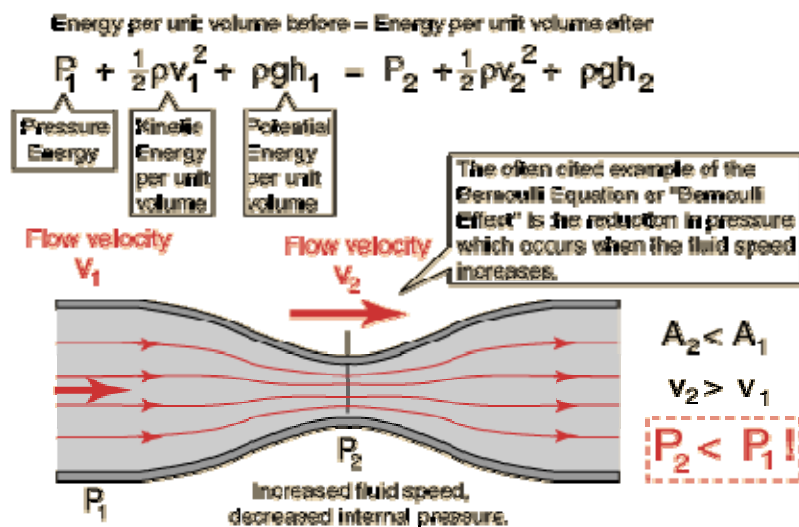
Εφόσον η μάζα διατηρείται (δεν χάνεται, ούτε συμπιέζεται) στην ομαλή ροή θα ισχύει:

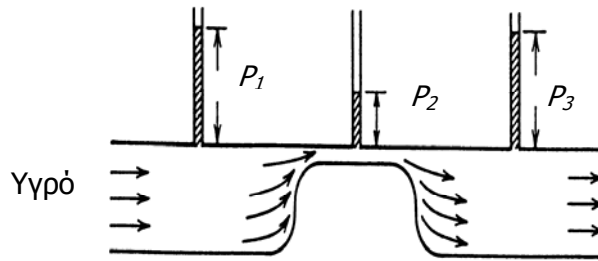
$$\Pi = \text{σταθερό} = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

(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

$\rho$  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 εκφρασθεί 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  $\Delta P$  που απαιτείται για την πρόκληση παροχής  $\Pi$  και ισχύει

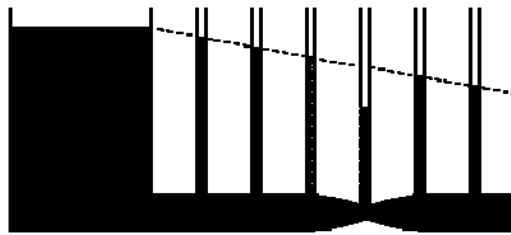
$$R = \Delta P / \Pi, \text{ ενώ υπενθυμίζεται πως } \Pi = \Delta V / \Delta t$$

Η αντίσταση στη ροή είναι εννοιολογικά ανάλογη της ηλεκτρικής αντίστασης, η  $\Delta P$  είναι ανάλογη της διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού και η παροχή  $\Pi$  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.

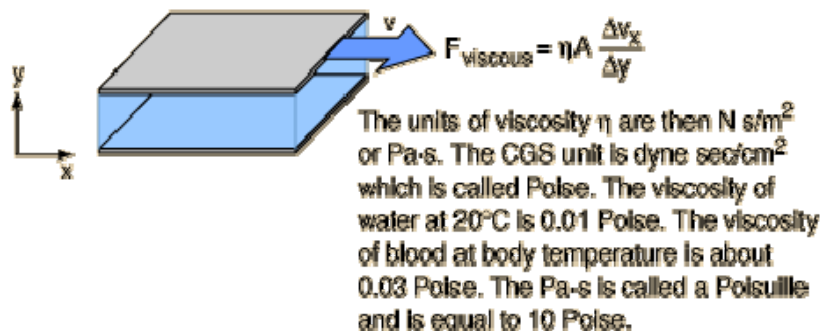
Αυτό ισχύει μόνο για ιδανικά υγρά χωρίς εσωτερική τριβή. Δεν ισχύει για τα πραγματικά υγρά των οποίων η πίεση μειώνεται εξαιτίας της εσωτερικής τριβής.



Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής  $\eta$  ορίζεται από τη σχέση:

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

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  $y$  από το (παράλληλο) τοίχωμα του σωλήνα ή δοχείου ( $x$  και  $y$  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  $\eta$  μετρείται σε  $N \cdot s/m^2$ , δηλαδή  $kg \cdot s/m$  ή  $P_a \cdot s$ .

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  $\Pi$  η παροχή

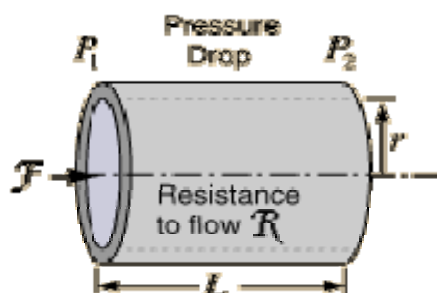
$r$  η ακτίνα του αγγείου – σωλήνα

$l$  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  $0^{\circ}\text{C}$ , αλλά μειώνεται στο  $1,00 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , στους  $20^{\circ}\text{C}$ , επειδή η αύξηση της κινητικής ενέργειας των μορίων τα «απελευθερώνει» από δια-μοριακές δυνάμεις. Ο συντελεστής του πλάσματος είναι  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  στους  $37^{\circ}\text{C}$ , 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**

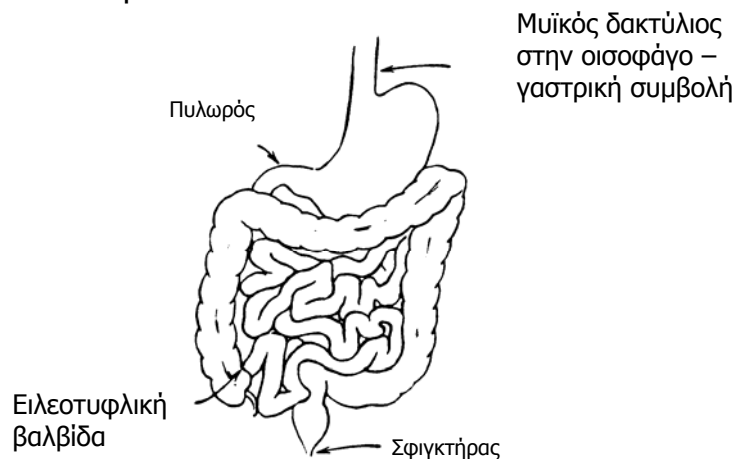
Η πίεση του αίματος στον άνθρωπο κυμαίνεται μεταξύ 1-140 mmHg στα διάφορα αγγεία και η ταχύτητα μεταξύ 0,05 – 50 cm ανά δευτερόλεπτο. Από την καρδιά περνούν περίπου 5 L (λίτρα) ανά λεπτό.

#### **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.



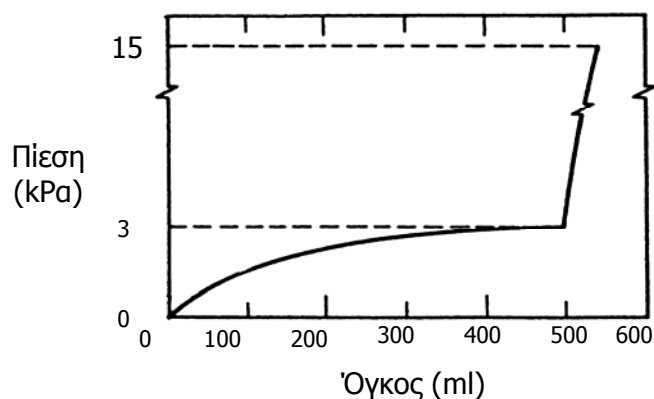
Η κίνηση στην πεπτική οδό υποβοηθείται ή ενεργοποιείται με μυϊκές συσπάσεις. Ευαίσθητοι αισθητήρες και σύστημα ανάδρασης διεγείρουν μια βαθμιαία σύσφιξη του τοιχώματος του εντέρου, ώστε να ωθήσει το περιεχόμενο προς τον έξοδο. Περισταλτική δράση των μυών διευκολύνει και την συχνή ανάμειξη του περιεχομένου.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

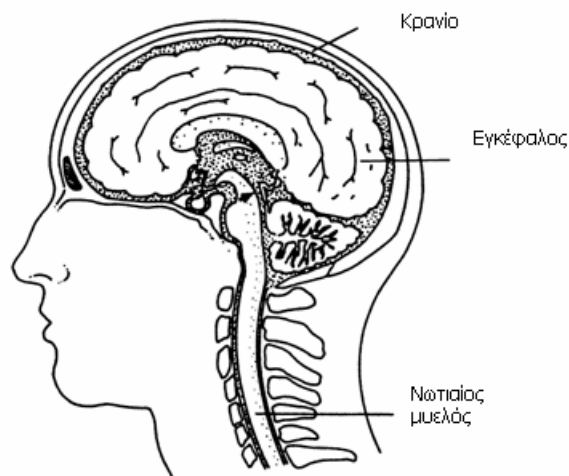


### 3.10.5 Εγκέφαλος

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.

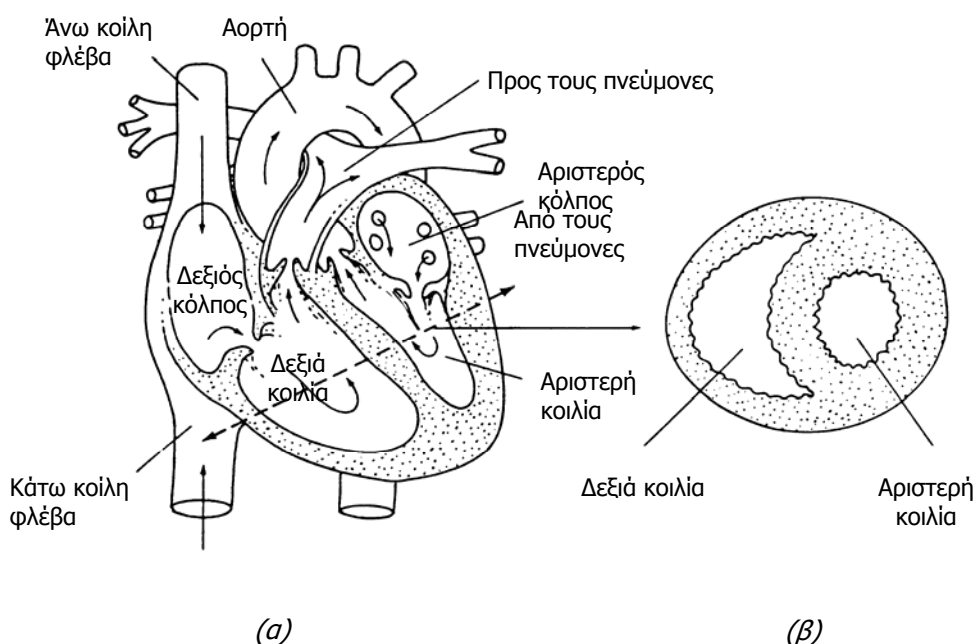
Παρόλα αυτά, αν η βλάβη διαγνωσθεί έγκαιρα, συνήθως διορθώνεται με χειρουργική παράκαμψη (by-pass) για την απελευθέρωση της κυκλοφορίας και την απαγωγή του ΕΝΥ.



## 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

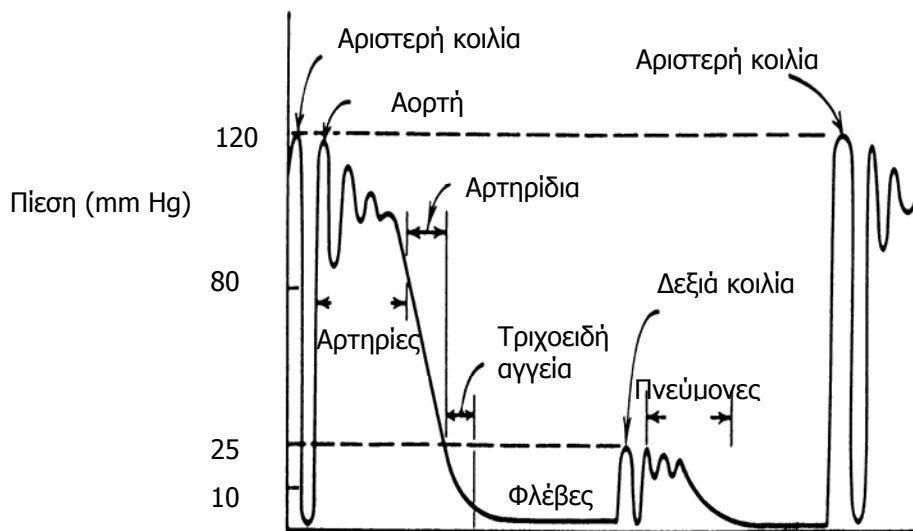
Το αίμα κυλά στα αγγεία που κατανέμονται σε δυο μεγάλα υποσυστήματα:

(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 CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> ↔ CO<sub>2</sub>), 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 αμφίκοιλοι δίσκοι με πολύ λεπτή κεντρική περιοχή και παχύτερη περιφέρεια. Η διάμετρός τους είναι περίπου 7,5  $\mu\text{m}$  και το μέγιστο πάχος τους περίπου 2  $\mu\text{m}$ . 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  $\mu\text{m}$ , ενώ τα αιμοπετάλια είναι πολύ μικρότερα.

Το πλάσμα αποτελείται από 90% νερό (και 10% διαλυμένες ουσίες: ανόργανα ιόντα, πρωτεΐνες, σάκχαρο, αμινοξέα, λίπη, ορμόνες, βιταμίνες,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) 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  $\eta_{\text{αιμ}} = 0,004 - 0,005 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

#### **4.2.1 Τα έμμορφα συστατικά του αίματος**

Μετά από τραυματισμό εκκλύεται 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  $\text{mm}^3$  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  $\text{mm}^3$  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.

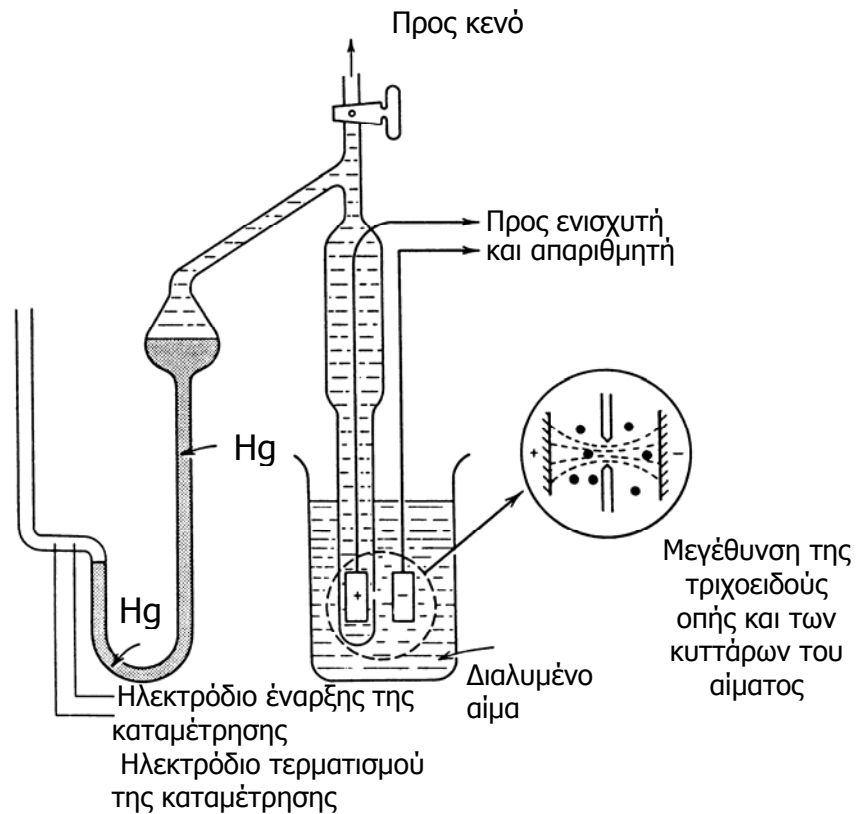
Τα αιμοπετάλια είναι πολύ μικρότερα (με διάμετρο 1-4  $\mu\text{m}$ ), σε αρκετή ποσότητα ( $3 \cdot 10^5$  ανά  $\text{mm}^3$  αίματος) και σχετίζονται με την θρομβωτική λειτουργία του αίματος. Ζουν μόνο 3 μέρες κατά μέσο όρο, δηλαδή κάθε δευτερόλεπτο πεθαίνουν περίπου 5 εκατομμύρια και αντίστοιχα άλλα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

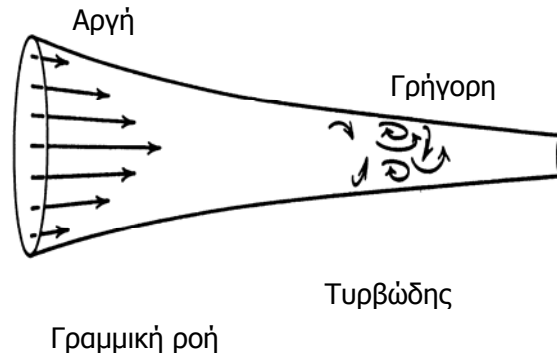


#### 4.2.3 Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής (γλοιότητα) του αίματος

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 ασυμπιεστο 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).





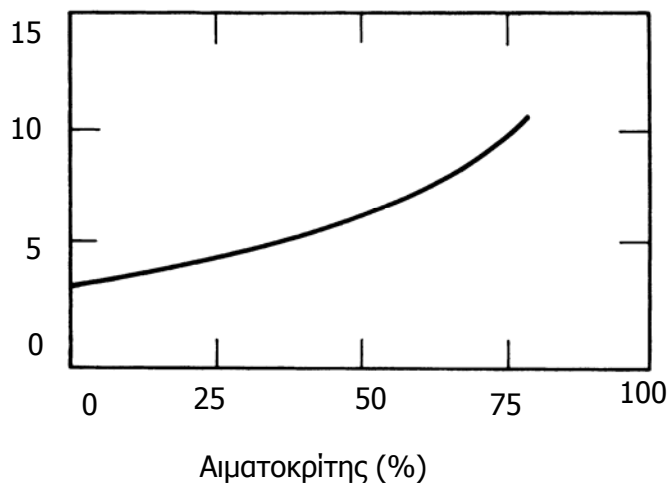
Η διάκριση μεταξύ στρωτής και στροβιλώδους ροής έχει μεγάλη κλινική σημασία. Η στρωτή ροή είναι σιωπηλή, ενώ η στροβιλώδης προκαλεί θόρυβο, τα αποκαλούμενα «φυσήματα», που είναι ήχοι Korotkoff, χρήσιμοι για την παραδοσιακή ακουστική μέθοδο προσδιορισμού της αρτηριακής πίεσης ή για τη διάγνωση στένωσης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

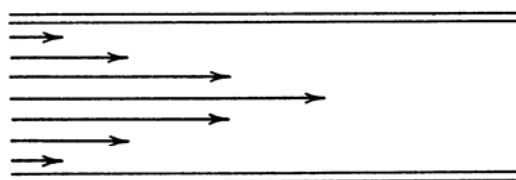
(β) ο αιματοκρίτης (με αιματοκρίτη > 60% τα ερυθροκύτταρα είναι τόσο κοντά το ένα με το άλλο που είναι πιθανό να προσκολλούνται μεταξύ τους),

Συντελεστής γλοιότητας ( $\text{Pa} \cdot \text{s} \times 10^3$ )

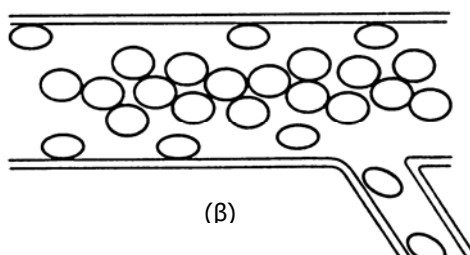


(γ) η ακτίνα του αγγείου (για  $r > 1$  mm η γλοιότητα του αίματος είναι ανεξάρτητη της ακτίνας. Όμως για μικρότερα αγγεία η γλοιότητα ελαττώνεται σημαντικά για τέσσερεις λόγους:

- (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 κυλιεται 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.

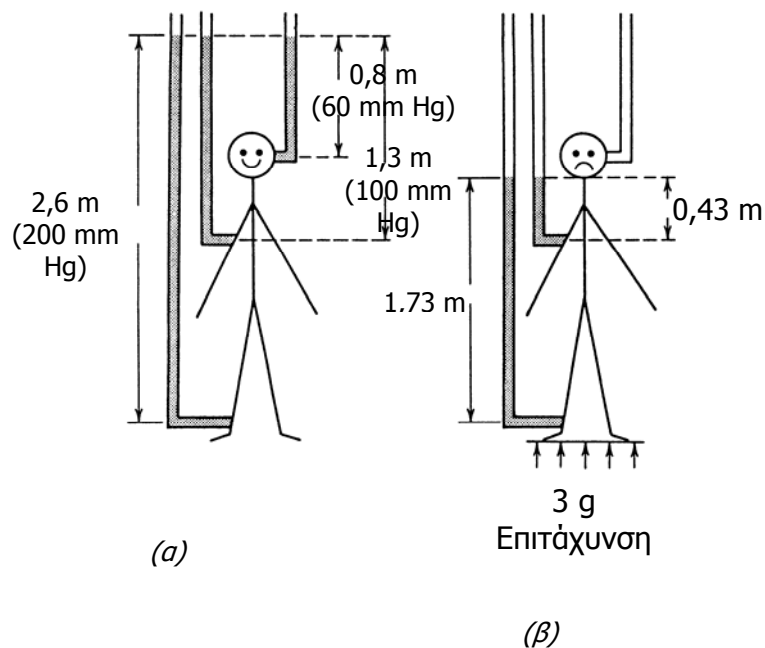
Η πίεση του αεροθαλάμου μετράται με υδραργυρικό ή μηχανικό μανόμετρο. Η ένδειξη της πίεσης, τη στιγμή που αρχίζουν οι ήχοι, αντιστοιχεί στη (μεγάλη) συστολική πίεση. Η ένδειξη της πίεσης, τη στιγμή που σταματούν οι ήχοι, αντιστοιχεί

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 βραχιόνιος 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  $\rho$  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 διατοχωματική 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,

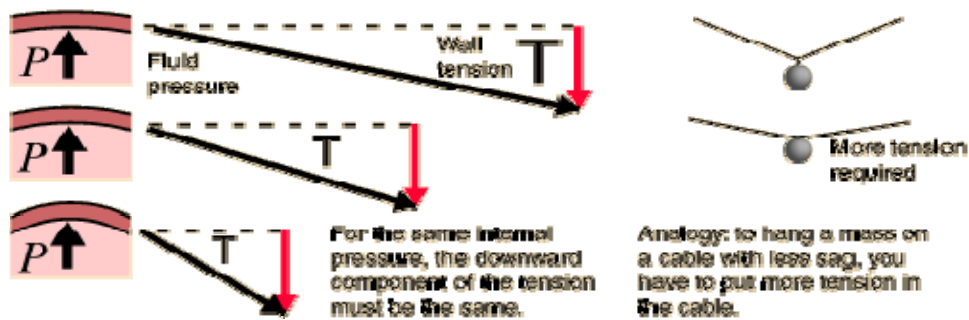
(γ) τα λεία μυϊκά κύτταρα (δεν υπάρχουν στο τοίχωμα των τριχοειδών) που δημιουργούν τάση κυρίως μέσω ενεργητικής συστολής και

(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 ελαστίνη είναι το κύριο συστατικό της αορτής. Στις μικρότερες αρτηρίες υπάρχει ελαστίνη 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	$6 \times 10^{-4}$	0,024
Μικρή φλέβα	15	2	$2 \times 10^{-2}$	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 μονοκατευθυντήριων 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  $\Pi_1$  και στην έξοδο  $\Pi_2$ , σε ήρεμη κατάσταση θα ισχύει  $\Pi_1 = \Pi_2 = \Pi$ . 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 «επιτρέψει» 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:

$$\Pi = \frac{\pi \cdot r^4}{8\eta \cdot L} (P_1 - P_2), \quad \text{όπου } \frac{8\eta \cdot L}{\pi \cdot r^4} = R \text{ η αντίσταση του αγγείου.}$$

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

Ισχύει δε:

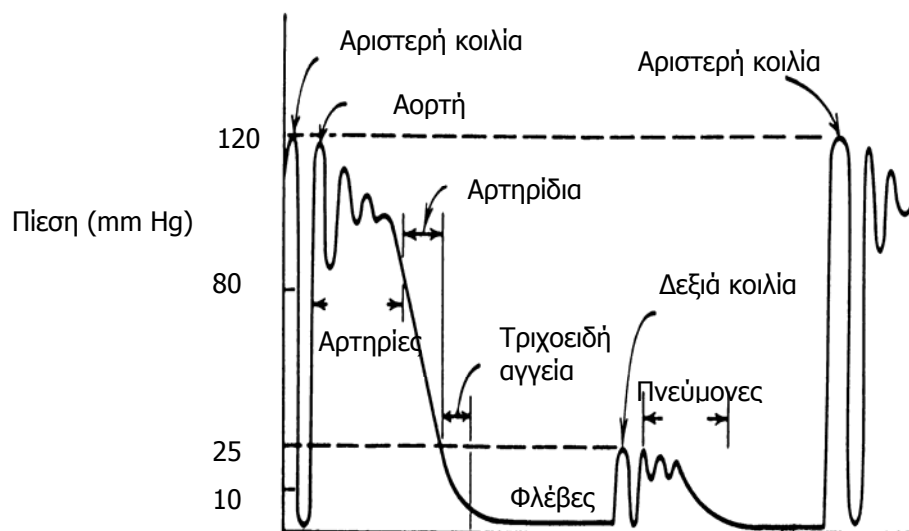
Όγκος  $V = C \cdot P$  όπου  $C$  η ενδοτικότητα (διαφορά όγκου ανά διαφορά πίεσης).

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.

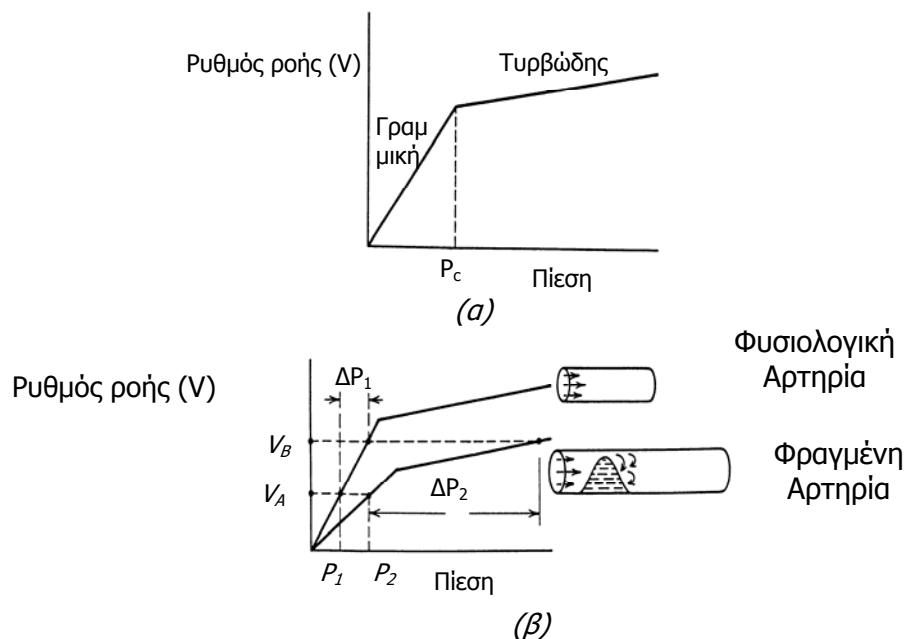


Η αορτή με ακτίνα περίπου 1,25 cm και μήκος περίπου 10 cm δίνει ασήμαντη πτώση πίεσης, ενώ οι μεγάλες αρτηρίες (περίπου 200) με ακτίνα 0,2 cm και μήκος 75 cm δίνουν περίπου ασήμαντη πτώση πίεσης  $\Delta P = 1,4$  mmHg.

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



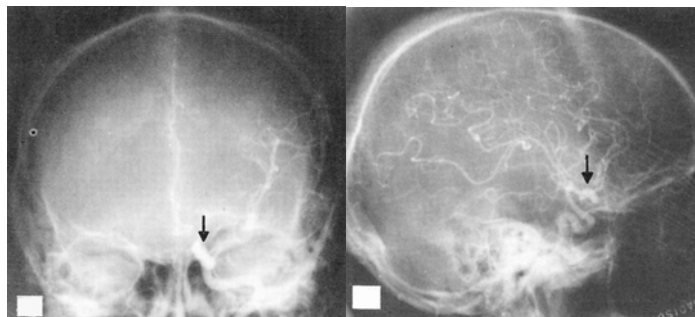
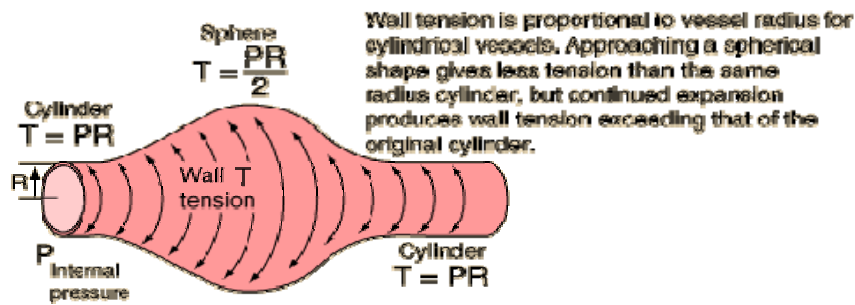
Σε αγγεία με αθηρωματική πλάκα (συσσώρευση και εναπόθεση λιπιδίων και ινώδους συνδετικού ιστού στο τοίχωμά τους) έχουν στενότερο αυλό (μικρότερη ακτίνα), επομένως απαιτούν μεγαλύτερη (διαφορά) πίεσης για να διατηρήσουν σταθερή την παροχή, ειδάλλως η παροχή μειώνεται σε αυτά, όπως συμβαίνει στη στεφανιαία 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  $\Delta P$  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  $180^\circ$ . 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 φυγόκεντρο 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 διατοιχωματική 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.

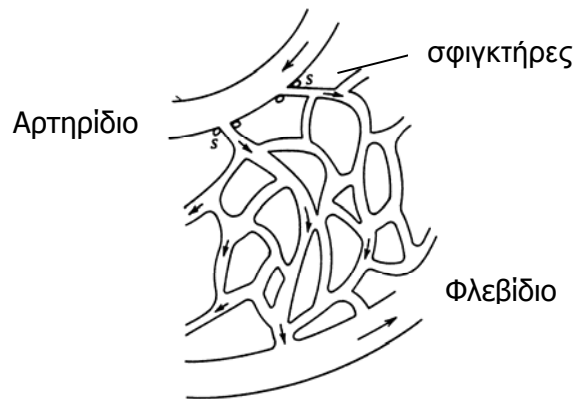
Η δεύτερη πίεση είναι η οσμωτική που η τιμή της είναι ανάλογη της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας στον διαλύτη (moles ανά μονάδα όγκου) και η οποία είναι περίπου σταθερή κατά μήκος του τριχοειδούς και ίση με 25 mmHg προς το εσωτερικό του τριχοειδούς.

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 «διατοιχωματική 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 ( $11-10= 1 \text{ mmHg}$ ) 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  $\mu\text{m}$ , ενώ η διάμετρος των ερυθρών αιμοσφαιρίων είναι 7,5  $\mu\text{m}$ . 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  $O_2 > 60$  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).

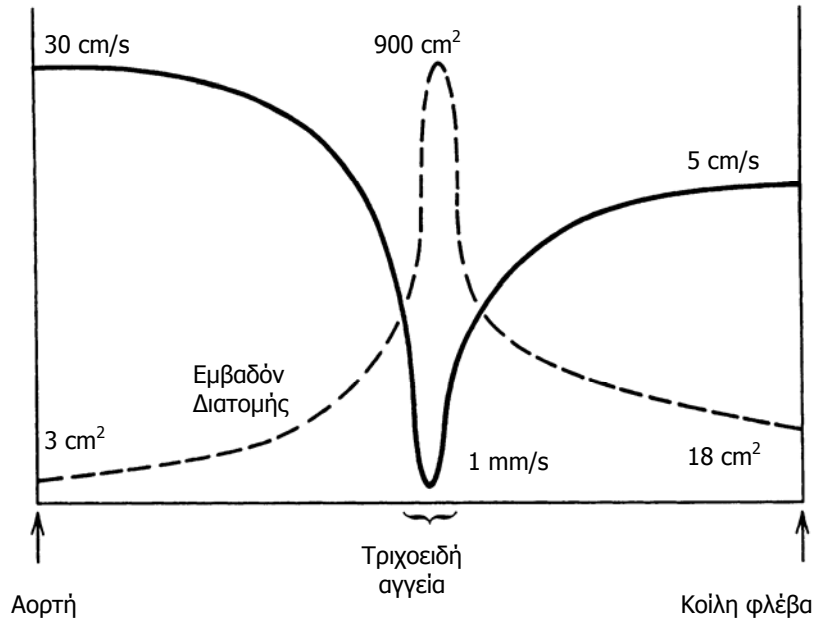
#### **4.8 Ροή και ταχύτητα αίματος**

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

Οι κοίλες φλέβες (2) έχουν διατομή  $18 \text{ cm}^2$  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.