



Ρευστά

Μέρος 2^ο

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

1

Η κίνηση των ρευστών

Η μελέτη της κίνησης των ρευστών άρχισε από τον Γάλλο γιατρό L. M. Poiseuille (1799-1869) ο οποίος μελετούσε την κίνηση του αίματος στο σώμα.

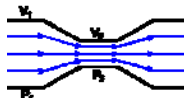
Η κίνηση των ρευστών είναι ιδιαίτερα σημαντική για την χημική μηχανική, τη φυσική, τη βιολογία και την ιατρική.

Θέματα που θα μελετήσουμε:

- Εξίσωση Bernoulli : αρχή λειτουργίας του σωλήνα Ventouri
- Ιξώδες & ιξώδης τριβή
- Νόμος Poiseuille (κίνηση ρευστού με μη-μηδενικό ιξώδες)
- Νόμος Torricelli
- **Εφαρμογές στο ανθρώπινο σώμα:** Κυκλοφορία του αίματος, Δίνες & στροβιλισμοί, Αρτιοσκλήρυνση, Μέτρηση της πίεσης

Η εξίσωση Bernoulli

Η εξίσωση του Bernoulli δίνει την σχέση ανάμεσα στην **ταχύτητα**, την **πίεση** & την **υψομετρική μεταβολή της ροής** ενός ρευστού κατά την κίνηση του.



Η εξίσωση Bernoulli απορρέει από την **αρχή διατήρησης της ενέργειας** και, αν δεν υπάρχουν τριβές, **η συνολική ενέργεια του ρευστού είναι σταθερή ανεξαρτήτως των μεταβολών στην ροή**

Αρχή ή εξίσωση του Bernoulli: σε κάθε σημείο της διαδρομής ενός ρέοντος ρευστού ισχύει η εξίσωση

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{σταθερή}$$

όπου P η πίεση στο ρευστό, h το ύψος, ρ η πυκνότητα και v η ταχύτητα του ρευστού σε κάθε σημείο της διαδρομής του.

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

3

Η εξίσωση Bernoulli

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{σταθερή}$$

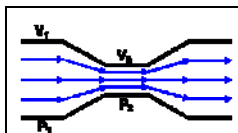
- Ο όρος **P** είναι η **δυναμική ενέργεια ανά μονάδα όγκου του ρευστού λόγω της πίεσης στο ρευστό** (μονάδες dyn/cm² ή erg/cm³)
- ο όρος (**ρgh**) είναι η **δυναμική ενέργεια ανά μονάδα όγκου λόγω της βαρύτητας**
- ο όρος (**ρv²/2**) είναι η **κινητική ενέργεια ανά μονάδα όγκου.**

Υπόθεση: αγνοούνται οι απώλειες λόγω φαινομένων τριβής

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

4

Εφαρμογή της εξ. Bernoulli : θα υπολογίσουμε τη μεταβολή της ταχύτητας και της πίεσης ρευστού κατά την κίνηση του σε σωλήνα με μεταβλητή διάμετρο.



v_1 και v_2 είναι η ταχύτητα του ρευστού στους σωλήνες διαφορετικής διαμέτρου

Ο όγκος του ρευστού που ρέει στην μονάδα του χρόνου σε τυχαίο σημείο του σωλήνα δίνεται από το γινόμενο ($A_i v_i$) όπου v_i η ταχύτητα και A_i η επιφάνεια της διατομής του σωλήνα.

Αν το ρευστό είναι ασυμπίεστο ίσες ποσότητες ρευστού εισέρχονται και εκρέουν από τον σωλήνα. Επομένως ισχύει η εξίσωση της συνέχειας :

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \rightarrow$$

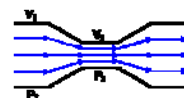
$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 \quad (2)$$

Δεδομένου ότι στο σύστημα μας $A_1 > A_2 \Rightarrow v_2 > v_1$.

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

5

Πόση είναι η διαφορά της πίεσης στα δύο τμήματα του αγωγού?



Εφαρμόζουμε την εξίσωση του Bernoulli στα διαφορετικά τμήματα του αγωγού:

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (3)$$

Υποθέτουμε ότι τα διαφορετικά τμήματα του αγωγού βρίσκονται στο ίδιο ύψος ($h_1 = h_2$) \Rightarrow η (3) απλοποιείται:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad \text{Όμως ισχύει ότι: } v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 \quad (2)$$

$$\Rightarrow \text{με αντικατάσταση της } v_2 \text{ στην (3)} \quad P_2 = P_1 - \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]$$

\Rightarrow στο τμήμα του αγωγού με την μικρότερη διάμετρο η ταχύτητα ροής αυξάνεται ενώ η πίεση μειώνεται.

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

6



Διεύθυνση ροής αερίου



➔ στο τμήμα του αγωγού με την μικρότερη διάμετρο η ταχύτητα ροής αυξάνεται ενώ η πίεση μειώνεται.

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

7

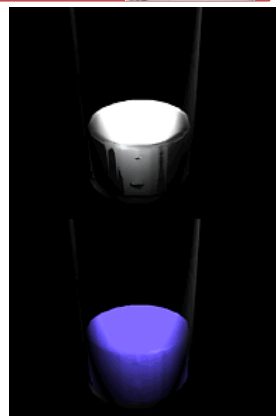
Το ιξώδες και ο νόμος Poiseuille.



Στα πραγματικά ρευστά τα μόρια έλκονται μεταξύ τους και κατά τη σχετική τους κίνηση εμφανίζεται δύναμη τριβής που ονομάζεται ιξώδης τριβή (viscous friction).

Το ιξώδες περιγράφει την αντίσταση του ρευστού στην κίνηση και είναι μέτρο της εσωτερικής τριβής κατά τη σχετική κίνηση των μορίων του ρευστού ή την κίνηση αντικειμένου μέσα στο ρευστό.

Τα υγρά που ρέουν εύκολα (π.χ. νερό) έχουν μικρή τιμή ιξώδους ενώ τα παχύρρευστα (π.χ. μέλι) έχουν μεγάλη τιμή ιξώδους.



Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

8

Η ιξώδης τριβή είναι ανάλογη της ταχύτητας ροής και του ιξώδους του ρευστού και έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της ταχύτητας του ρευστού που κινείται μέσα σε έναν σωλήνα.

Ενδεικτικές τιμές ιξώδους για υγρά		
Ρευστό	Θερμοκρασία (°C)	Ιξώδες (poise)
Νερό	20	0,01
Γλυκερίνη	20	8,3
Υδράργυρος	20	0,0155
Αέρας	20	0,00018
Αίμα	37	0,04

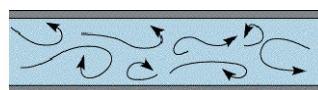
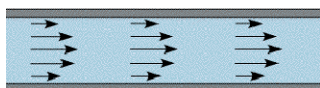
όπου $1 \text{ poise} = \text{gr cm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

9

Στρωτή και τυρβώδης ροή

Όταν η ροή είναι στρωτή (laminar flow) η ταχύτητα παίρνει την μέγιστη τιμή στο κέντρο του σωλήνα ενώ ελαττώνεται σταδιακά από το κέντρο προς τα τοιχώματα όπου μηδενίζεται (τα μήκη των βελών είναι ανάλογα της ταχύτητας)



- Όταν η ταχύτητα του ρευστού υπερβεί μία **κρίσιμη τιμή (u_c)** εμφανίζονται **δίνες** και η ροή ονομάζεται **τυρβώδης**.
- Στην τυρβώδη ροή οι δυνάμεις τριβής είναι μεγαλύτερες από ότι στην στρωτή ροή και η κίνηση του ρευστού μέσα στον σωλήνα γίνεται δυσκολότερη.

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

10

Νόμος του Poiseuille-1

Ο νόμος του Poiseuille περιγράφει τη ροή (Q) ρευστού που έχει μη-μηδενικό ιξώδες και διατυπώνεται ως εξής:

Η ροή ενός ρευστού που έχει εσωτερική τριβή (μη-μηδενικό ιξώδες η) συνοδεύεται από πτώση της πίεσης κατά μήκος του σωλήνα μέσα στον οποίο ρέει.

Σύμφωνα με τον νόμο του **Poiseuille** η ροή Q δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta L} \text{ cm}^3/\text{sec}$$

όπου ($P_1 - P_2$) η διαφορά της πίεσης ανάμεσα στα δύο άκρα του σωλήνα μήκους L και διαμέτρου D.

Η μεταβολή της πίεσης ($P_1 - P_2$) συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σωλήνα (L, R) και του ιξώδους (η) είναι:

$$P_1 - P_2 = \frac{Q 8\eta L}{\pi R^4}$$

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

11

Νόμος του Poiseuille-2

Η δύναμη που απαιτείται για να υπερκεραστεί η δύναμη της τριβής (που επιβραδύνει την ροή του ρευστού) σε σωλήνα διατομής A είναι: $A(P_1 - P_2)$

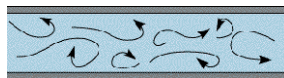
- Η επίδραση της τριβής είναι μικρή όταν η διατομή των σωλήνων είναι μεγάλη και επομένως η πτώση της πίεσης ($P_1 - P_2$) μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.
- Σε αυτή την περίπτωση είναι δυνατή η χρήση της εξίσωσης του Bernoulli.

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{σταθερή}$$

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

12

Τυρβώδης ροή



- Στην τυρβώδη ροή οι δυνάμεις τριβής είναι μεγαλύτερες από ότι στην στρωτή ροή και η κίνηση του ρευστού μέσα στον σωλήνα γίνεται δυσκολότερη.
- Όταν η ταχύτητα του ρευστού υπερβεί μία **κρίσιμη τιμή (v_c)** εμφανίζονται **δίνες** και η ροή ονομάζεται **τυρβώδης**.

Η κρίσιμη ταχύτητα δίνεται από την σχέση

$$v_c = \frac{Re_c \eta}{\rho D}$$

όπου ρ η πυκνότητα, η το ιξώδες, D η διάμετρος και Re αριθμός Reynolds

Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$

Όπου

- ρ η πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3)
- μ το ιξώδες του ρευστού ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)
- v η μέση ταχύτητα αντικειμένου που κινείται μέσα στο ρευστό (m/s)
- L χαρακτηριστική γραμμική διάσταση (m)

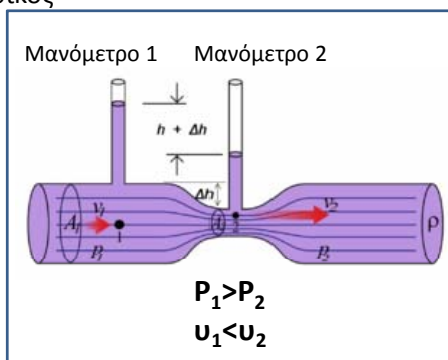
Ο αριθμός Reynolds είναι μία αδιάστατη ποσότητα που παίρνει τιμές σε ευρεία περιοχή τιμών ανάλογα με το εάν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης.

Σωλήνας Venturi



Ο σωλήνας Venturi είναι μία πολύ ακριβής διάταξη **μέτρησης της ταχύτητας ροής ασυμπύεστων ρευστών**. Ο Giovanni Battista Venturi (1746–1822) ήταν Ιταλός Φυσικός

Αρχή λειτουργίας: Το φαινόμενο Venturi συνίσταται στην μείωση της πίεσης ρευστού που ρέει σε σωλήνα που εμφανίζει στένωση και η λειτουργία του στηρίζεται στον νόμο Bernoulli.



Η μέτρηση της ροής στηρίζεται στην μέτρηση της διαφοράς πίεσης ($P_1 - P_2$) ανάμεσα στα τμήματα διαφορετικής διαμέτρου.

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

15

Σύμφωνα με τον νόμο Bernoulli

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{σταθερή}$$

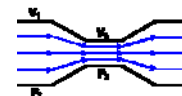
όταν ένα ρευστό ρέει σε σωλήνα μεταβλητής διαμέτρου, στο τμήμα του αγωγού με τη μικρότερη διάμετρο η ταχύτητα ροής αυξάνεται ενώ η πίεση μειώνεται.

Η πτώση της πίεσης και η μεταβολή της ταχύτητας, που υπολογίζεται από τον νόμο Bernoulli και την εξίσωση της συνέχειας, δίνεται από τη σχέση

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2)$$

όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού (υποθέτουμε ότι παραμένει σταθερή) v_1 και v_2 οι ταχύτητες του ρευστού στο φαρδύ και στενό τμήμα του σωλήνα (επομένως $v_1 < v_2$)

Στον σωλήνα Venturi δεν υπάρχουν οξείες γωνίες ή απότομες αλλαγές της διαμέτρου που μπορούν να διαταράξουν την ροή του ρευστού.



Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

16

Σωλήνας Venturi: Μέτρηση της ταχύτητας ροής σε στένωση

Υπολογισμός της ταχύτητας ροής: Εφαρμόζουμε τον νόμο Bernoulli

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{σταθερή}$$

Υποθέτουμε ότι: $h_1 = h_2 \Rightarrow$

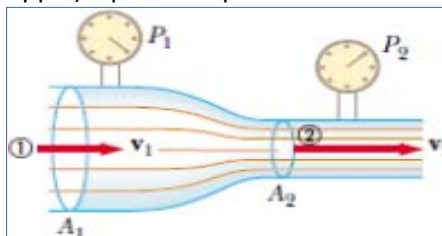
$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Εξίσωση συνέχειας: $A_1 v_1 = A_2 v_2 \Rightarrow v_1 = \frac{A_2}{A_1} v_2$

Αντικαθιστούμε την v_1 στην Bernoulli και λύνουμε ως προς $v_2 \Leftrightarrow$

$$v_2 = A_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$$

\Rightarrow στην στένωση αυξάνεται η ταχύτητα ($v_2 > v_1$) και μειώνεται η πίεση ($P_1 > P_2$) \Rightarrow αυξάνεται το ύψος του ρευστού στον αντίστοιχο σωλήνα.



Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

17

Οι εφαρμογές του σωλήνα Venturi είναι πάρα πολλές. Παραδείγματα χάριν:

- Συσκευές που αναμιγνύουν αέρα με εύφλεκτα αέρια π.χ. σε φούρνους που δουλεύουν με αέριο
- Ψεκαστήρες, π.χ. για αρώματα ή μπογιές για βαφή επιφανειών
- Ακροφύσια (μπέκ) πυροσβεστήρων αφρού
- Καρπυλατέρ αυτοκινήτων
- Συστήματα έγχυσης χλωρίου σε συστήματα χλωρίωσης νερού
- Συστήματα αμμοβολής που αναρροφούν άμμο και την αναμιγνύουν με αέρα
- Σε μάσκες για οξυγονοθεραπεία
- Στο φαινόμενο **Venturi** αποδίδεται το μικροκλίμα σε πόλεις με ουρανοξύστες π.χ. στους Δίδυμους Πύργους στη ΝΥ. Η ένταση του αέρα που ρέει ανάμεσα στα κτίρια ήταν πολύ μεγάλη και ορισμένες φορές οι ριπές του ανέμου ήταν τόσο ισχυρές που οι πεζοί χρησιμοποιούσαν σχοινιά για να μην παρασυρθούν.

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

18

Οι Δίδυμοι πύργοι στη ΝΥ




Ο πύργος Hancock στην Βοστώνη με ύψος 240m.

Η ανάκλαση της Trinity Church στον Hancock

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

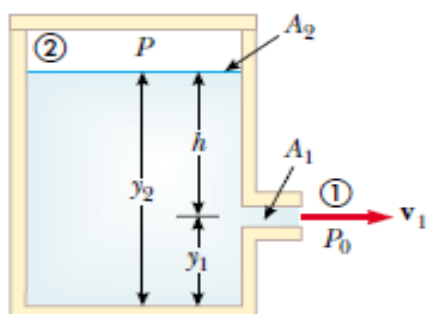
19

Νόμος ή θεώρημα του Torricelli (1608-1647)

Θεώρημα της δυναμικής των ρευστών που δίνει την ταχύτητα εκροής ρευστού (από οπή) συναρτήσει του ύψους του υπερκείμενου ρευστού



Torricelli : Ιταλός φυσικός & μαθηματικός που έγινε γνωστός για την ανακάλυψη του βαρόμετρου.



Το πρόβλημα

Σε κλειστό δοχείο που περιέχει ρευστό πυκνότητας ρ ανοίγουμε μία οπή σε απόσταση y_1 από τον πυθμένα και απόσταση h από την επιφάνεια του ρευστού.

Η οπή είναι ανοιχτή στην ατμόσφαιρα ($P_0=1\text{atm}$) και η διάμετρος της είναι πολύ μικρότερη της διαμέτρου του δοχείου.

Η πίεση επάνω από το ρευστό είναι σταθερή και ίση προς P .

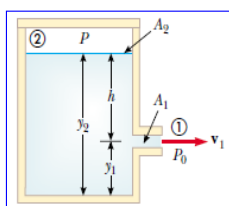
Να υπολογίσετε την ταχύτητα του ρευστού που διαρρέει από την οπή.

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

21

Νόμος ή θεώρημα του Torricelli-2: Υπολογισμός της ταχύτητας διαρροής ρευστού.

Επειδή $A_2 \gg A_1$ υποθέτουμε ότι η επιφάνεια του ρευστού είναι σε ισορροπία.



Εφαρμόζουμε την εξ. Bernoulli στα σημεία 1 & 2:

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P + \rho g y_2$$

$$\text{Όμως } y_2 - y_1 = h \Rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{2(P - P_0)}{\rho} + 2gh}$$

Προσεγγίσεις

1. Όταν $P \gg P_0$ αγνοούμε τον όρο $2gh$ \Rightarrow η ταχύτητα εξόδου του ρευστού εξαρτάται κυρίως από την πίεση P στην επιφάνεια του ρευστού.

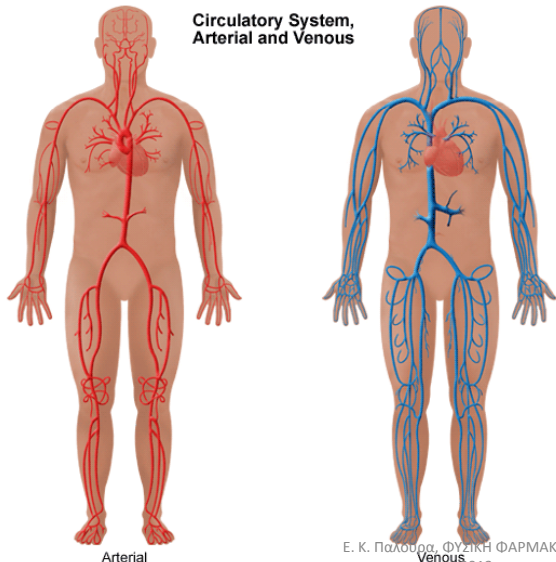
2. **Νόμος του Toricelli:** Αν το δοχείο είναι ανοιχτό στην ατμόσφαιρα $\Rightarrow P=P_0$ και $v = \sqrt{2gh}$

Δηλαδή το ρευστό συμπεριφέρεται σαν μία σταγόνα νερού που πέφτει ελεύθερα από ύψος h .

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

22

Εφαρμογές στο ανθρώπινο σώμα



Circulatory System, Arterial and Venous

- Κυκλοφορία του αίματος
- Δίνες & στροβιλισμοί
- Αρτιοσκλήρυνση
- Μέτρηση της πίεσης

Arterial

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ 2013

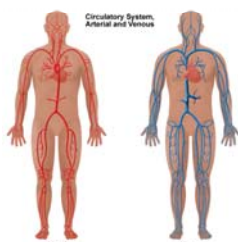
Venous

23

Κυκλοφορία του αίματος

Η κυκλοφορία του αίματος στο σώμα μπορεί να περιγραφεί με σχετική ακρίβεια σαν ένα υδραυλικό σύστημα στο οποίο η καρδιά λειτουργεί ως αντλία ενώ οι φλέβες, οι αρτηρίες και τα τριχοειδή αγγεία είναι οι σωλήνες στους οποίους ρέει το αίμα. Για την περιγραφή χρησιμοποιούνται οι αρχές των απλών ρευστών που κινούνται σε άκαμπτους σωλήνες σταθερής διαμέτρου

Όμως το αίμα είναι ένα πολύπλοκο ρευστό που περιέχει κύτταρα τα οποία περιπλέκουν την ροή, ιδιαίτερα όταν διατομή των αγγείων είναι μικρή.



Επίσης οι φλέβες και οι αρτηρίες έχουν ελαστικά τοιχώματα και επομένως το σχήμα τους αλλάζει ανάλογα με την πίεση (δυνάμεις) που ασκείται από το αίμα.

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ 2013

24

Δίνες/στροβιλισμοί στην ροή του αίματος-1

Στο μεγαλύτερο τμήμα του κυκλοφορικού η ροή του αίματος είναι στρωτή. Μόνο στην **αορτή** είναι δυνατόν η κυκλοφορία να γίνει τυρβώδης εφ' όσον η ταχύτητα του αίματος υπερβεί την **κρίσιμη τιμή**

$$v_c = \frac{\Re \eta}{\rho D}$$

Αν υποθέσουμε ότι $\Re=2000$ και η διάμετρος της αορτής $D=2\text{cm} \Rightarrow$

$$v_c = \frac{2000 \times 0.04}{1.05 \times 2} = 38 \text{ cm/sec}$$

Δίνες/στροβιλισμοί στην ροή του αίματος-2

- Σε κατάσταση **ανάπαυσης** η ταχύτητα του αίματος είναι μικρότερη της κρίσιμης.
- **Αυξανόμενης της φυσικής δραστηριότητας η ροή στην αορτή αυξάνεται και μπορεί να καταστεί τυρβώδης.** Στο υπόλοιπο σώμα παραμένει στρωτή εκτός εάν υπάρχει **στένωση** των αγγείων.
- Η τυρβώδης ροή προκαλεί δονήσεις στους περιβάλλοντες ιστούς και θορύβους οι οποίοι είναι ενδεικτικοί ανωμαλιών στο κυκλοφορικό.
- Οι ήχοι αυτοί ανιχνεύονται με το στηθοσκόπιο.

Αρτηριοσκλήρυνση και ροή του αίματος-1

- **Η αρτηριοσκλήρυνση** (arteriosclerosis) είναι η συνηθέστερη νόσος της καρδιάς. Στις ΗΠΑ κάθε χρόνο πεθαίνουν 200,000 άνθρωποι λόγω της αρτηριοσκλήρυνσης.
- Στην αρτηριοσκλήρυνση η **διάμετρος της αρτηρίας μικραίνει** λόγω της εναπόθεσης στα τοιχώματα της ουσιών που συνιστούν την **πλάκα**.
- Στένωση της αρτηρίας κατά 60-70% θεωρείται σοβαρή ενώ στένωση μεγαλύτερη του 80% θεωρείται κρίσιμη (επικίνδυνη).

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

27

Αρτηριοσκλήρυνση και ροή του αίματος-2

Λόγω της στένωσης της αρτηρίας αυξάνεται η ταχύτητα ροής του αίματος όπως φαίνεται από την εξίσωση του Bernoulli

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{σταθερή} \quad \text{και} \quad v_2 = A_1 v_1 / A_2$$

Παράδειγμα: αν η ακτίνα της αρτηρίας μειωθεί κατά παράγοντα **3** η διάμετρος μικραίνει κατά παράγοντα **9** \Rightarrow η ταχύτητα του αίματος είναι **9** φορές μεγαλύτερη από την κανονική.

Στην περιοχή της στένωσης η κινητική ενέργεια αυξάνει κατά παράγοντα 9^2 δηλ. κατά 81 φορές.

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

28

Αρτηριοσκλήρυνση και ροή του αίματος-3

- Η αύξηση της ταχύτητας ροής του αίματος \Rightarrow μείωση της πίεσης στην περιοχή της στένωσης.
- **Παράδειγμα:** αν η φυσιολογική τιμή της ταχύτητας του αίματος είναι 50 cm/sec, στην περιοχή στένωσης, όπου η διάμετρος μικραίνει κατά παράγοντα 9, η ταχύτητα ανέρχεται σε 450 cm/sec ενώ η πίεση μειώνεται κατά περίπου 80 Torr.
- Λόγω της χαμηλής πίεσης μέσα στην αρτηρία η εξωτερική πίεση μπορεί να την κλείσει και να σταματήσει την ροή του αίματος. **Όταν αυτό συμβεί στην στεφανιαία αρτηρία τότε η λειτουργία της καρδιάς σταματά.**

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

29

Αρτηριοσκλήρυνση και ροή του αίματος-4

Όταν η στένωση υπερβεί το 80% η ροή του αίματος εξελίσσεται σε τυρβώδη \Rightarrow μεγάλη απώλεια ενέργειας και μεγαλύτερη πτώση της πίεσης από ότι υπολογίζεται από την εξίσωση του Bernoulli.

Επίσης η τυρβώδης ροή μπορεί να προκαλέσει καταστροφές στο κυκλοφορικό επειδή μέρος της ροής κατευθύνεται πλέον στα τοιχώματα αντί να είναι παράλληλη προς αυτά.

Το αίμα που προσκρούει στα τοιχώματα μπορεί να αποσπάσει κομμάτια της πλάκας που μπορούν να φράξουν τα στενότερα τμήματα της αρτηρίας.

Αν αυτό συμβεί σε αυχενική αρτηρία (cervical artery) διακόπτεται η ροή του αίματος προς τμήματα του εγκεφάλου προκαλώντας ισχαιμικό εγκεφαλικό επεισόδιο (ischemic stroke).

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

30

Αρτηριοσκλήρυνση και ροή του αίματος-5

- Ένα άλλο πρόβλημα που συνδέεται με την πλάκα είναι η μεταβολή της ελαστικότητας της αρτηρίας και της συχνότητας με την οποία δονείται.
- Η συχνότητα δόνησης μίας φυσιολογικής αρτηρίας είναι 1-2 kHz.
- Η ανάπτυξη της πλάκας \Rightarrow αύξηση της μάζας των τοιχωμάτων της αρτηρίας, μείωση της ελαστικότητας τους και επομένως ελάττωση της συχνότητας δόνησης σε λίγες εκατοντάδες Hz.
- Το φάσμα των συχνοτήτων στις οποίες πάλλεται το αίμα περιέχει συχνότητες της τάξης των 450 Hz.
- Επομένως είναι δυνατόν να εμφανιστούν φαινόμενα συντονισμού του αίματος με την αρτηρία τα οποία μπορούν να εκτοπίσουν κομμάτια της πλάκας ή να προκαλέσουν περαιτέρω καταστροφή στα τοιχώματα της αρτηρίας.

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

31

Μέτρηση της πίεσης του αίματος-1

- Η αρτηριακή πίεση του αίματος είναι ένας σημαντικός δείκτης της κατάστασης της υγείας του ανθρώπου.
- Υψηλή τιμή της πίεσης λόγω στενώσεων στο κυκλοφορικό \rightarrow η καρδιά δουλεύει πιο έντονα και ενδεχομένως κινδυνεύει από το επί πλέον φορτίο.
- Η πίεση του αίματος μετρήθηκε για πρώτη φορά το 1733 από τον αιδεσιμότατο Stephen Hales ο οποίος εισήγαγε έναν μακρύ γυάλινο σωλήνα στην αρτηρία ενός αλόγου.

Σήμερα ο συνήθης τρόπος μέτρησης της πίεσης στηρίζεται στην μέθοδο της αποκοπής της ροής του αίματος με τη βοήθεια ενός περιβραχιόνιου.

Ε. Κ. Παλούρα, ΦΥΣΙΚΗ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΟΥ
2013

32

Μέτρηση της πίεσης του αίματος-2

- Όταν η πίεση που ασκεί το περιβραχιόνιο ξεπεράσει την **συστολική πίεση** τότε η ροή του αίματος σταματά.
- Κατά την αποσυμπίεση, όταν η πίεση που ασκεί το περιβραχιόνιο μειωθεί στην τιμή της **συστολικής**, αρχίζει η ροή του αίματος η οποία όμως λόγω του μερικού περιορισμού της αρτηρίας είναι **τυρβώδης** και συνοδεύεται από χαρακτηριστικό ήχο που γίνεται αντιληπτός στην αρτηρία με στηθοσκόπιο. Η τιμή της πίεσης που αντιστοιχεί στο πρώτο άκουσμα του ήχου είναι η **συστολική πίεση**.
- Όσο συνεχίζει να μειώνεται η πίεση που ασκεί το περιβραχιόνιο η αρτηρία διαστέλλεται στο κανονικό της μέγεθος και ο ήχος σταματά. Η πίεση στην οποία σταματά να ακούγεται ο ήχος είναι η **διαστολική πίεση**.