

# ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

## ⇒ ΒΙΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

μελετά την κινηματική και δυναμική των ρευστών (υγρών και αερίων) των ζώντων οργανισμών

Ισχύουν οι Νόμοι της Κλασσικής Μηχανικής:

- Αρχή Διατήρησης της μάζας
- Αρχή Διατήρησης της ενέργειας
- Δυναμικοί νόμοι του Newton

Εφαρμογή - Πολυπλοκότερη (ευκινησία των μορίων, συνεκτικότητα, συμπιεστότητα)

## ⇒ ΑΙΜΟΡΡΕΟΛΟΓΙΑ



## Αναδρομή:

- στις Βασικές Ιδιότητες των Ρευστών
- στο Κυκλοφορικό Σύστημα

Μελέτη της Σύστασης του αίματος -

Ανάλυση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών αυτού



# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

A.

Μέσα Ασυνεχή

μικρές αποστάσεις μεταξύ των μορίων

Μέσα Συνεχή

Ισότροπα

μελέτη κινηματικής και δυναμικής συμπεριφοράς

**Συνεχή:**

- σε κάθε στοιχείο όγκου διατηρούνται οι ίδιες φυσικές ιδιότητες
- η μεταβολή ενός μεγέθους που χαρακτηρίζει την κατάσταση του ρευστού είναι συνεχής συνάρτηση της θέσης και του χρόνου

**Ισότροπα:**

Οι εκδηλώσεις των φυσικών ιδιοτήτων του ρευστού μέσα στο στοιχείο μάζας δεν εξαρτώνται από τον προσανατολισμό τους



# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

## Β. ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑ

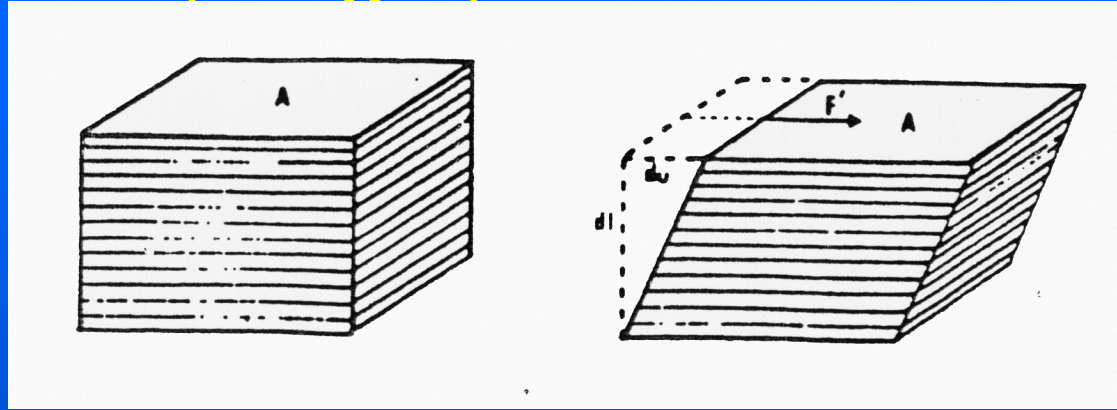
Μεταβολή της Πίεσης  $\longrightarrow$  Μεταβολή της Πυκνότητας  
(γενικά τα υγρά - αίμα είναι πρακτικά συμπίεστα  $\rho = const.$  )

## Γ. ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ - ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΤΡΙΒΗ (ΙΞΩΔΕΣ)

Από φαινομενολογική σκοπιά η εκδήλωση της ύπαρξης της ιδιότητας αυτής μοιάζει με την εμφάνιση της τριβής στην επιφάνεια επαφής 2 στερεών σωμάτων που κινούνται μεταξύ τους



## Γ. ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ (συνέχεια)



- Ο Νεύτων διατύπωσε τον ομώνυμο νόμο σχετικά με τη συμπεριφορά των υγρών όταν αυτά μετατοπίζονται υπό την επίδραση διατμητικής δύναμης/τάσης

**ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ:**

$$F = \tau = \frac{F'}{A} \text{ (dyn / cm}^2\text{)}$$

Ο λόγος της τάσης που πρέπει να εφαρμοστεί στο επίπεδο της επιφάνειας A προκειμένου να προκαλέσουμε τη μετακίνησή της, προς την επιφάνεια αυτή A. Βασική μονάδα είναι το Pascal ( $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2=10\text{dyn/cm}^2$ )



# Νόμος του Νεύτωνα (ισχύει για ορισμένα ρευστά):

$$\tau = \eta \gamma$$

όπου

$\eta$ : συντελεστής αναλογίας -

συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας ή

ιξώδες του ρευστού

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (\text{dyn sec/cm}^2, \text{ poise})$$

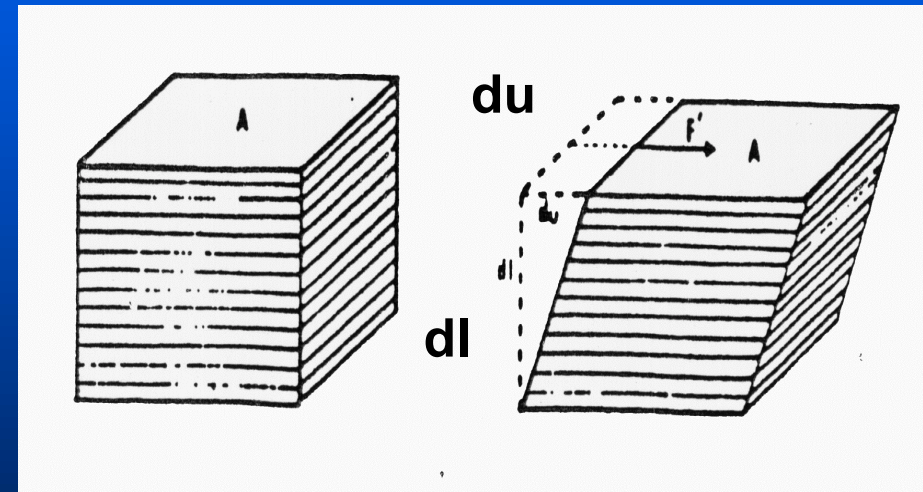
και

$\gamma$ : ταχύτητα παραμόρφωσης -  $\gamma = \frac{du}{dl} (\text{sec}^{-1})$

λόγος της μεταβολής της ταχύτητας,  $du$ ,

του επιπέδου στο οποίο εφαρμόζεται η διατμητική τάση σε σχέση με το ακίνητο

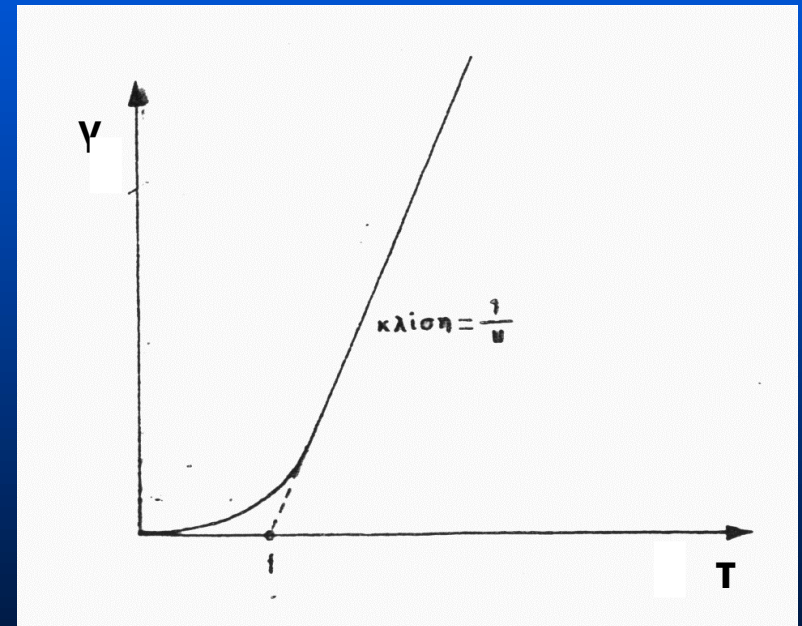
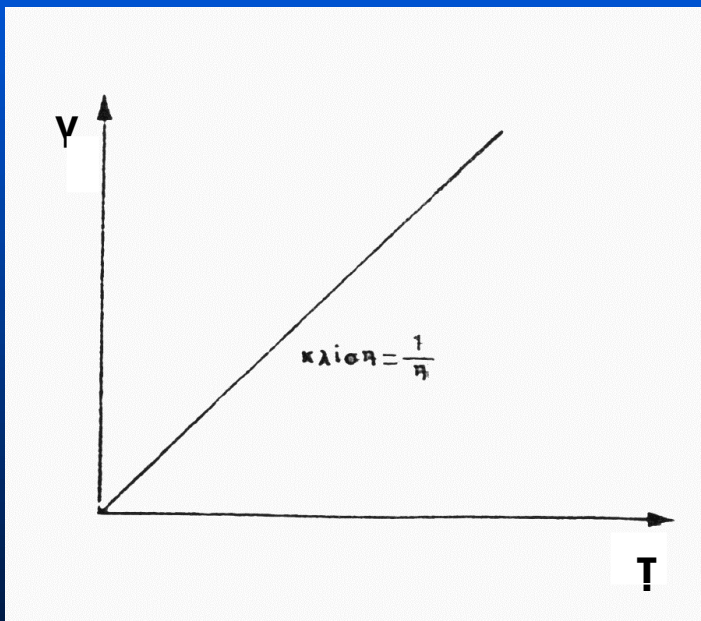
επίπεδο που είναι σε απόσταση  $l$  από αυτό προς τη μεταβολή  $dl$



- **ΣΧΕΤΙΚΟ ΙΞΩΔΕΣ:**  $\eta_{\sigma x} = \frac{\eta}{\eta_0}$

όπου  $\eta_0$ : ιξώδες αναφοράς,

Στην αιμοδυναμική περίπτωση, αν  $\eta$  είναι το ιξώδες του αίματος,  $\eta_0$  είναι το ιξώδες του πλάσματος ή του ρυθμιστικού διαλύματος



**Νευτώνεια συμπεριφορά ρευστού**

**Μη νευτώνεια συμπεριφορά ρευστού**



• Ρευστότητα είναι το αντίστροφο του ιξώδους:  $\phi = \frac{1}{\eta}$

• Κινηματική συνεκτικότητα:  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

Το ιξώδες εξαρτάται:

- στα ασυμπίεστα νευτώνεια ρευστά από τη Θερμοκρασία  $T$
- στα συμπίεστα και από την πίεση





## Ροή των Ρευστών μπορεί να ταξινομηθεί με διάφορους τρόπους:

- Σταθερή, μη σταθερή ροή
- Μιας, δύο ή τριών διαστάσεων
- Ομοιόμορφη, ανομοιόμορφη
- Στρωτή, τυρβώδης
- Στροβιλή, αστρόβιλη



### Σταθερή Ροή:

Οι διάφορες παράμετροι της ροής (παροχή, ταχύτητα, πίεση, κ.λπ.) σε κάποιο σημείο παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της ροής

### Μονοδιάστατη ροή:

Η ροή γίνεται σε μία κατεύθυνση και οι παράμετροι μπορούν να μεταβάλλονται μόνο ως προς αυτή την κατεύθυνση

### Ομοιόμορφη ροή:

Η μέση ταχύτητα ροής όσο και το εμβαδόν της κάθετης στη ροή τομής του ρευστού παραμένουν σταθερά

### Στρωτή ροή (Τυρβώδης):

Τα γειτονικά στρώματα του ρευστού κινούνται με την ίδια ταχύτητα και οι τροχιές των σωματιδίων του υγρού δεν διασταυρώνονται ή τέμνονται. Στρωτή ροή συνήθως εμφανίζεται σε χαμηλές (υψηλές) ταχύτητες ροής και σε ρευστά με σχετικά μεγάλο (χαμηλό) ιξώδες

### Στροβιλή ροή:

Υπάρχουν περιοχές του πεδίου που το στοιχείο του ρευστού παρουσιάζει στροφορμή ως προς ένα σημείο



# ΑΡΙΘΜΟΣ REYNOLDS

Κριτήριο καθορισμού του είδους της ροής: στρωτή / τυρβώδης

Ο αδιάστατος αυτός αριθμός ορίζεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{\rho Du}{\eta} = \frac{Du}{\nu}$$

και εκφράζει στην πραγματικότητα το λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις που οφείλονται στο ιξώδες

όπου

$\rho$ : η πυκνότητα του ρευστού

$D$ : η διάμετρος του σωλήνα

$u$ : η ταχύτητα του ρευστού

$\eta$ : το ιξώδες του ρευστού

$\nu$ : η κινηματική συνεκτικότητα



## Σύμφωνα με τον αριθμό Reynolds

- Στρωτή Ροή :  $Re < 2000$
- Τυρβώδης Ροή :  $Re > 4000$

Για  $2000 < Re < 4000$  παρατηρούνται μεταβατικά φαινόμενα και ο τύπος της ροής είναι απρόβλεπτος.



Είτε η ροή είναι στρωτή είτε τυρβώδης, παρουσιάζονται **τριβές** οι οποίες δημιουργούν **απώλειες ενέργειας** που δίνονται από τη σχέση:

$$h_f = \frac{fLu^2}{2Dg}$$

όπου

**$h_f$** : απώλειες λόγω τριβής

**$f$** : συντελεστής τριβής, αδιάστατο μέγεθος

**$L$** : μήκος του αγωγού

**$D$** : διάμετρος του αγωγού

**$u$** : ταχύτητα του ρευστού

**$g$** : επιτάχυνση της βαρύτητας



## ΣΤΡΩΤΗ ΡΟΗ:

Ο συντελεστής  $f$  εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f = \frac{64}{\text{Re}}$$

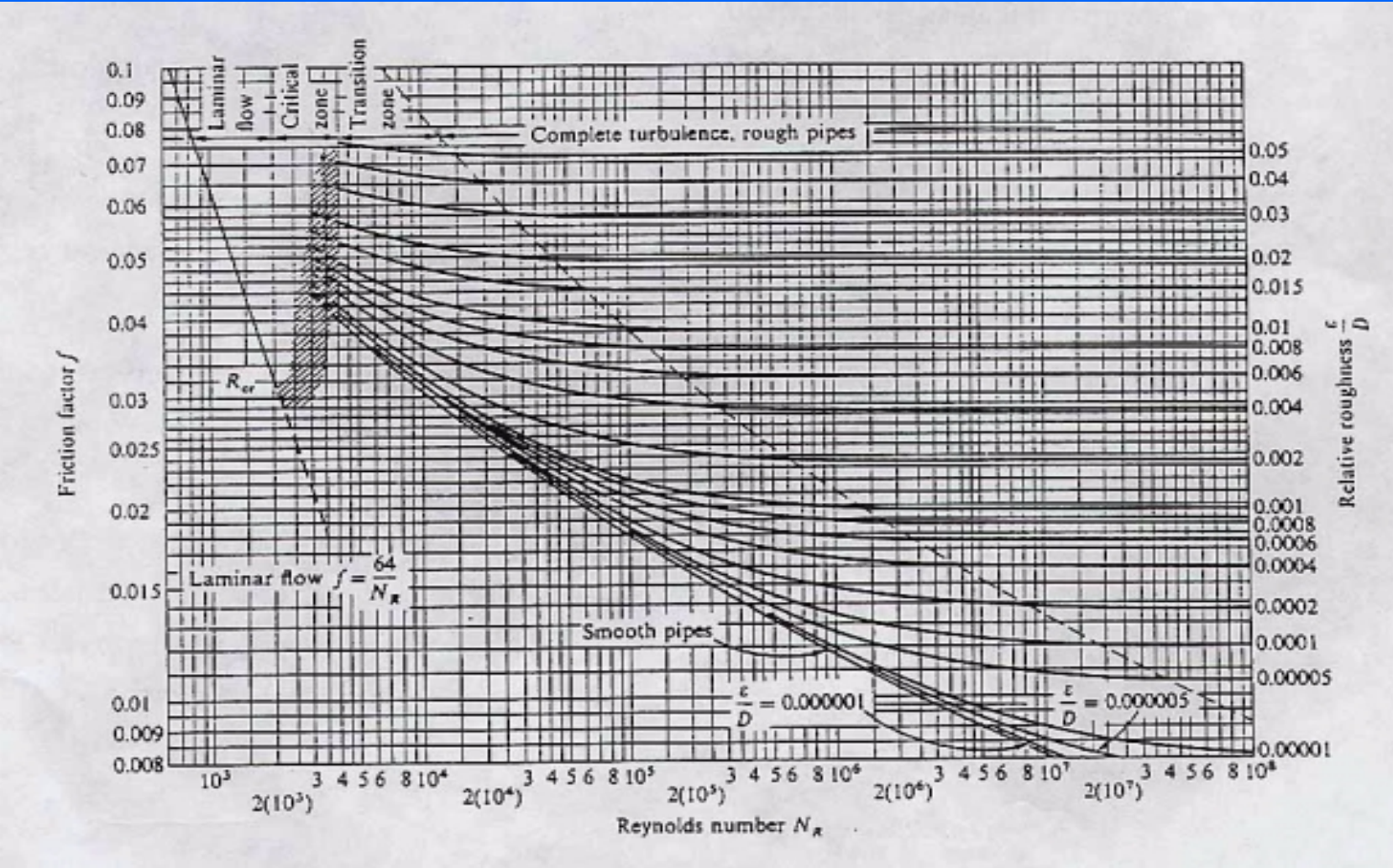
## ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΡΟΗ:

Ο συντελεστής  $f$  εξαρτάται από:

- τον αριθμό Reynolds και
- τη σχετική τραχύτητα του αγωγού που ορίζεται σαν το λόγο της μέσης τραχύτητας του τοιχώματος του αγωγού  $\epsilon$  προς τη διάμετρο  $D$ .

Η τραχύτητα του τοιχώματος εξαρτάται από το υλικό και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται





Αριθμός Reynolds



# ΑΙΜΟΡΡΕΟΛΟΓΙΑ

- Η Επιστήμη που έχει σαν γνωστικό αντικείμενο τη μελέτη από ΜΗΧΑΝΙΚΗ / ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ άποψη των Βιολογικών Ρευστών

Κύρια έμφαση δίνεται:

- στο **ΑΙΜΑ** καθώς και
- στους **ΙΣΤΟΥΣ** (από Μηχανική/Στατική Αποψη)

που περιέχουν τα βιολογικά αυτά ρευστά (π.χ. αγγεία)

- Σχέση Περιέχοντος / Περιεχομένου
- Σχέση Διατμητικών Τάσεων / Παραμόρφωσης
- Πολυδιάστατη / Πολυεπιστημονική





# ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

- ΠΡΩΤΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΑΡΧΑΙΟΙ ΕΛΛΗΝΕΣ

- ΙΠΠΟΚΡΑΤΗΣ:

Η συνολική κατάσταση της υγείας εξαρτάται από την ισορροπία τεσσάρων ρευστών τα οποία αποτελούν το "ΖΩΤΙΚΟ ΡΕΥΣΤΟ"

- ΓΑΛΛΑΙΟΣ (131 π.χ.)

- ΕΡΟΣΤΑΤΗΣ (280 π.χ.):

Παρατήρησαν ότι υπάρχει παλμική ροή αίματος και ότι αυτή είναι αποτέλεσμα του φαινομένου της διάδοσης ενός κύματος



# ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

- ΛΕΟΝΑΡΝΤΟ ΝΤΑ ΒΙΝΤΣΙ:

- \* Παλμική αιματική ροή
- \* Ελαστικότητα αγγείων

- HARVEY:

Φυσικό μοντέλο ροής αίματος

- EULER (1775):

Περιγράφει το 1<sup>ο</sup> μαθηματικό ολοκληρωμένο μοντέλο, θεωρώντας την κυκλοφορία του αίματος σαν ισοδύναμη με αυτή ενός ασυμπίεστου υγρού μέσα σ'ελαστικό σωλήνα



# ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

- YOUNG (1808):

Χρησιμοποίησε τον παρακάτω τύπο για να εκφράσει την ταχύτητα της κυματικής διάδοσης κατά την αιματική ροή:

$$c = \left[ \frac{h * E}{2 * a * \rho} \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ όπου}$$

h: πάχος των αγγείων

E: συντελεστής Young

a: ακτίνα του σωλήνα

ρ: πυκνότητα

\* Εκτίμησε ότι η αντίσταση του αίματος κατά τη ροή είναι 4 φορές > H<sub>2</sub>O. Σημερινές τιμές: 3.5 φορές.



# ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

- POISEUILLE (1840):

$$Q = \frac{\pi}{8 * \eta} * \frac{\Delta P}{L} * r^4, \text{ \textbf{όπου}}$$

**Q:** παροχή / ροή

**ΔP:** διαφορά πίεσης

**η:** ιξώδες

**L:** μήκος σωλήνα

**r:** ακτίνα

**1929:** Εισάγεται ο όρος **"ΗΛΕΚΤΡΟΡΡΕΟΛΟΓΙΑ"**

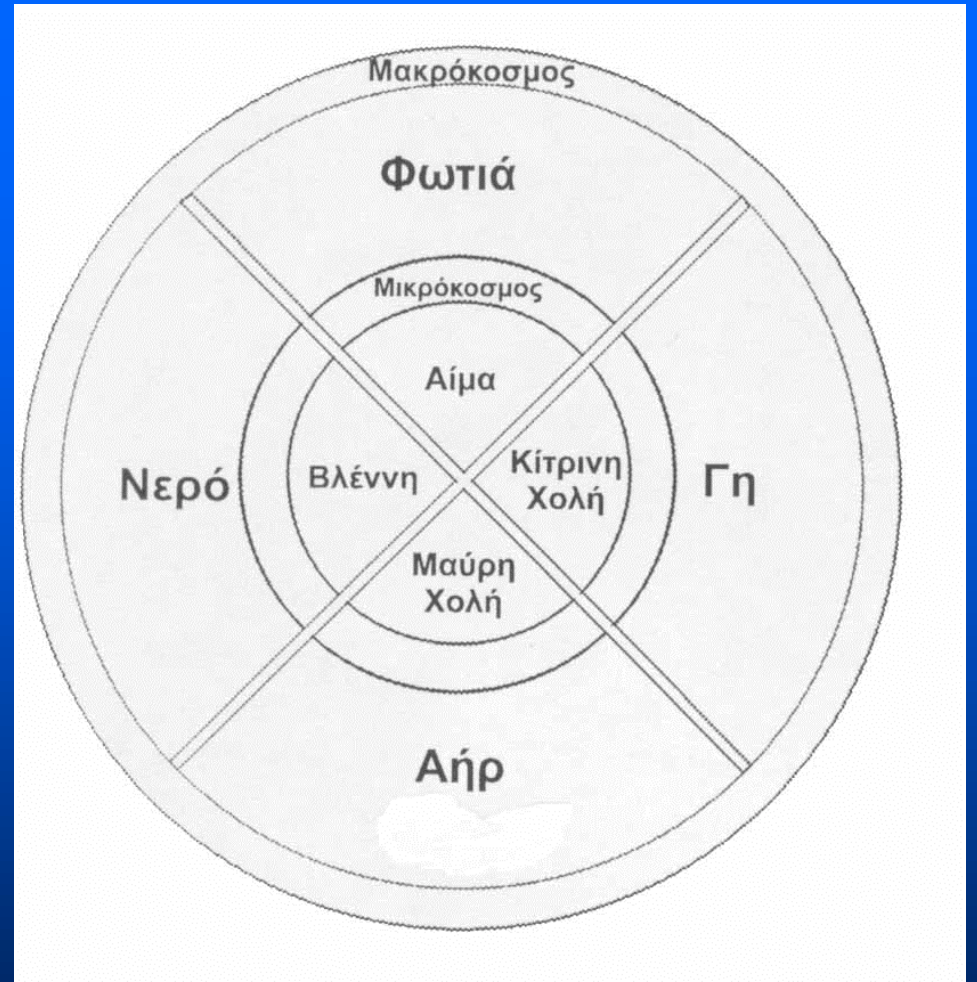
**1961:** Ο Corley εισάγει τον όρο **"ΒΙΟΡΡΕΟΛΟΓΙΑ"**

**\* Εφαρμογή στα βιολογικά συστήματα**





Παλμική κίνηση του αίματος κατά το Λεονάρδο Ντα Βίντσι



Ισορροπία τεσσάρων ρευστών σαν κριτήριο υγείας κατά τον Ιπποκράτη



## ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ:

⇒ Το όλο δομημένο σύστημα της κυκλοφορίας έχει σαν βασικό σκοπό:

\* να μεταφέρει

- το οξυγόνο,
- τις βιταμίνες,
- τις ορμόνες,
- τις θρεπτικές ουσίες (σάκχαρο, λιπαρά και άλλα οργανικά οξέα, αμινοξέα) καθώς και
- τη θερμική ενέργεια

σε κάθε ζωντανό κύτταρο του οργανισμού

\* να παραλαμβάνει τα διάφορα προϊόντα του μεταβολισμού του κυττάρου ( $\text{CO}_2$ , οξέα,  $\text{H}_2\text{O}$ ) και να τα αποβάλλει

⇒ Η ποσότητα της κυκλοφορίας οφείλει να είναι ανάλογη των ιδιαίτερων και μεμονωμένων αναγκών του κάθε κυττάρου χωριστά



## ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ:

- Τροφοδοσία των κυττάρων
- Θερμική ισορροπία

## ΑΝΑΓΚΕΣ ΤΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΙΣΤΩΝ ΣΕ O<sub>2</sub>

(Κατανάλωση σε O<sub>2</sub> εκφρασμένη σε [ml O<sub>2</sub>/ gr ] / h)

Υψηλή Δραστηριότητα		Μέση Δραστηριότητα		Χαμηλή Δραστηριότητα	
Νεφροί	2.2	Σπλήνας	0.8	Λίπη	0.2
Ήπαρ	2.0	Καρδιακός μυς	0.7	Δέρμα	0.2
Εγκέφαλος	1.3	Σκελετικός "	0.5	Οστά	0.03
		Πνευμονικός "	0.4	Αίμα	0.006



⇒ Το Κυκλοφορικό Σύστημα των αρτηριών και των φλεβών (όπως οι πλείστοι βιολογικοί ιστοί) έχουν μια δομή **ΜΟΡΦΟΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗ (FRACTAL)**

⇒ Μια Fractal δομή χαρακτηρίζεται (κατ' αντιδιαστολή προς τα ευκλείδεια γεωμετρικά σχήματα) από **αναλλοίωτες ιδιότητες** σε αλλαγή κλίμακας και από **κλασματικούς βαθμούς ελευθερίας**

⇒ Επίσης, κάθε **χαοτικό σύστημα**, στη βάση της τοπολογίας ενός χαοτικού ελκύστου, έχει **Fractal δομή**. Σημειώνουμε ότι τα μη διατηρητικά χαοτικά συστήματα αποτελούν μοντέλα βιολογικών επεξεργαστών πληροφορίας, καθ' όσον μάλιστα σε κάθε βιολογικό σήμα ή μνήμη έχουμε συνύπαρξη θορύβου και τάξης





**Η χαοτική δομή εξασφαλίζει σ'έναν ιστό τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:**

⇒ Σε πολύ μικρούς όγκους εμπεριέχονται τεράστιες επιφάνειες (π.χ. ο βρογχοπνευμονικός ιστός του ανθρώπου, ο οποίος έχει όγκο περίπου 0.124 lt, αλλά αν η επιφάνειά του απλωθεί σε μία στρώση πάχους μιας κυτταρικής “διαμέτρου” καταλαμβάνει την έκταση περίπου ενός γηπέδου τέννις)

⇒ Σε ένα σύνηθες στερεό ή επιφάνεια (ευκλείδεια) ο “Βαθμός Διαχυτότητας” μιας ουσίας υπό την επίδραση τυχαίων διακυμάνσεων (θορύβου) είναι ανάλογος του  $t$ . Σε Fractal δομές ο Βαθμός Διαχυτότητας αυξάνει ταχύτερα, σαν δύναμη του  $t^{\nu}$  ( $\nu > 1$ ). Ετσι, π.χ. στο κυκλοφορικό, η Fractal δομή επιτρέπει ταχύτερη και αποτελεσματικότερη μίξη αερίων - υγρών (υπέρ-διάχυση).



⇒ Μια **Fractal** δομή είναι δυνατόν να κατασκευαστεί σε μικρό χρόνο από έναν απλό αλγόριθμο, ο οποίος αυτοεπαναλαμβάνεται σε πολλές κλίμακες ταυτόχρονα χωρίς ουσιώδεις αλλαγές. Ετσι, ο γεννητικός αλγόριθμος για την κατασκευή ενός βιολογικού ιστού χρειάζεται πολύ μικρότερο χρόνο από αυτόν που απαιτεί η κατασκευή ενός “συμπαγούς” ευκλείδειου ιστού (εάν η γυναικεία μήτρα π.χ. δεν είχε επιφάνεια Fractal θα ζύγιζε περίπου 500 kg, με χρόνο κυήσεως της τάξης 100/δων ετών)



# ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΑΓΓΕΙΩΝ

Αγγεία	Διάμετρος (cm)	Μήκος (cm)	Πάχος Τοιχώματος (cm)	Σύσταση (%)			
				Ενδοθήλιο	Ελαστικός Ιστός	Μαλακός Ιστός	Ινώδης Ιστός
Αορτή	2.5	50	0.2	5	40	25	30
Αρτηρία	0.4	50	0.1	5	35	40	20
Αρτηριόλιο	0.005	1	0.2	5	25	45	25
Προτριχοειδικός Σφικτήρας	0.0035	0.02	0.003	15	15	50	20
Τριχοειδές	0.0008	0.1	0.0001	100	0	0	0
Φλεβίδιο	0.0020	0.2	0.0002	25	0	0	0
Φλέβα	0.5	25	0.05	5	40	30	25
Κοίλη φλέβα	3.0	50	0.15	5	25	35	35



# ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΙΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΞΑΣΚΟΥΜΕΝΕΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΓΓΕΙΩΝ

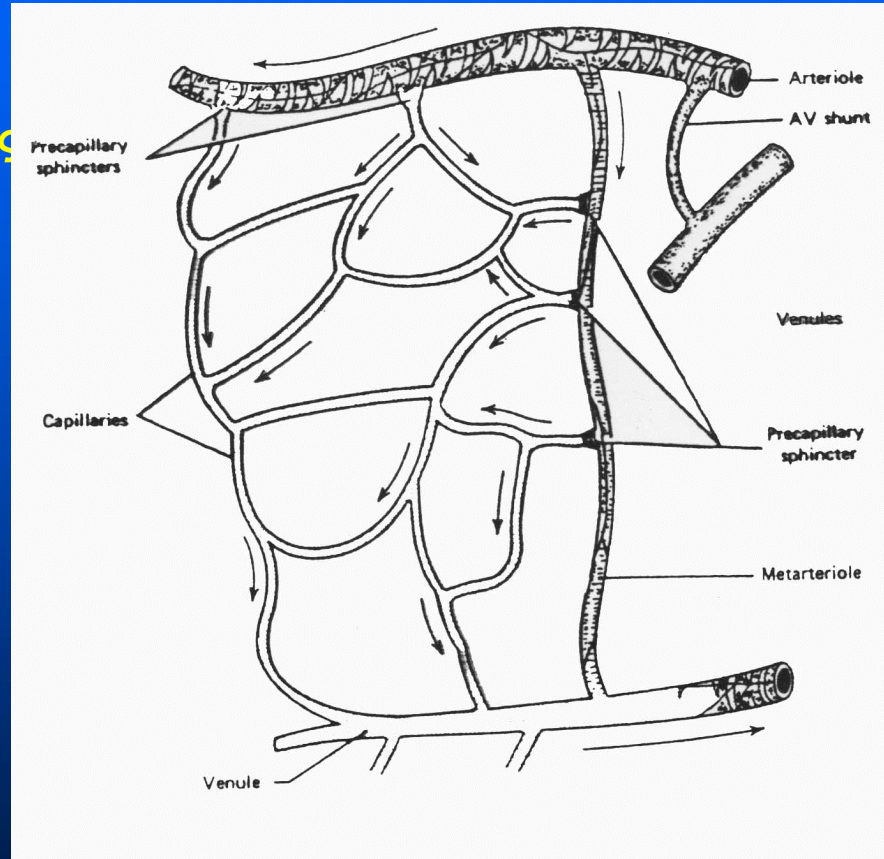
Αγγεία	Διάμετρος (cm)	Μέση Ταχύτητα (cm)	Διατμητικές Τάσεις (sec <sup>-1</sup> )
Αορτή	2.5	40	155
Αρτηρία	0.4	45	900
Αρτηριόλιο	0.005	5	8000
Τριχοειδές	0.0008	0.1	1000
Φλεβίδιο	0.0020	0.2	800
Φλέβα	0.5	10	160
Κοίλη φλέβα	3.0	38	100



# ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΙΚΡΟΚΥΚΛΟΦΟΡΙΚΟΥ

Προτριχοειδείς Σφιγκτήρες

Τριχοειδή

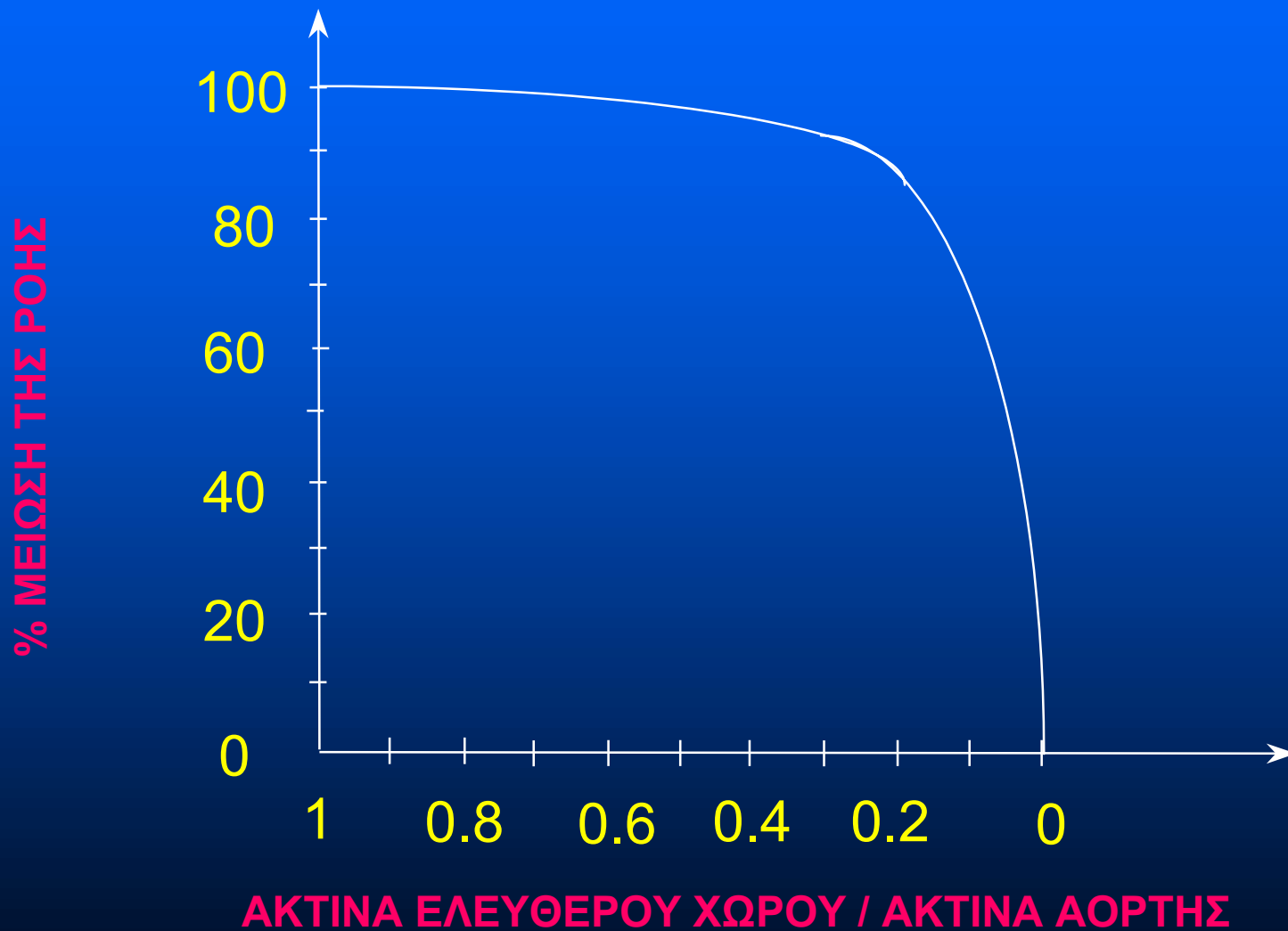


Αρτηρίδια

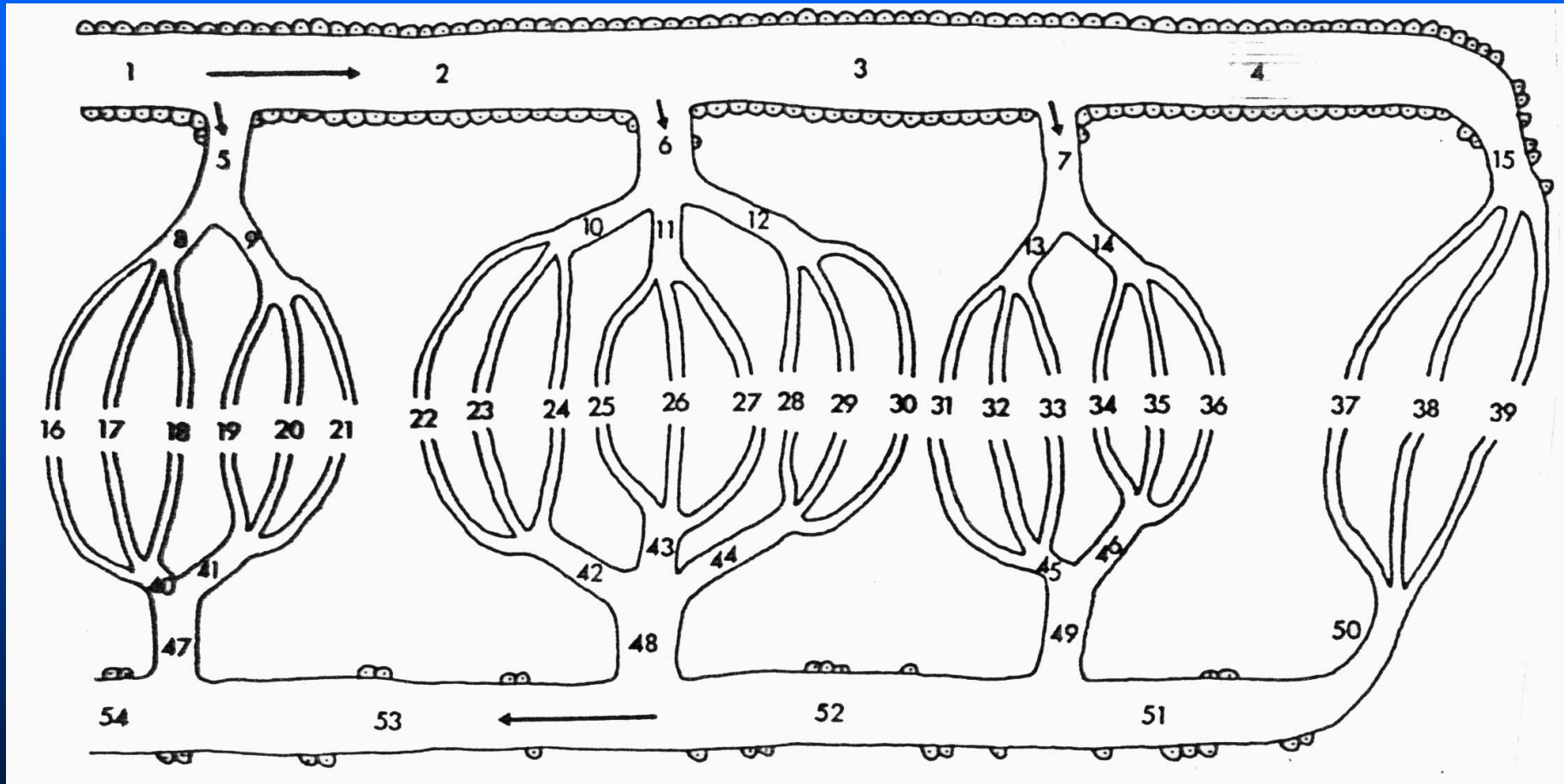
Φλεβίδια



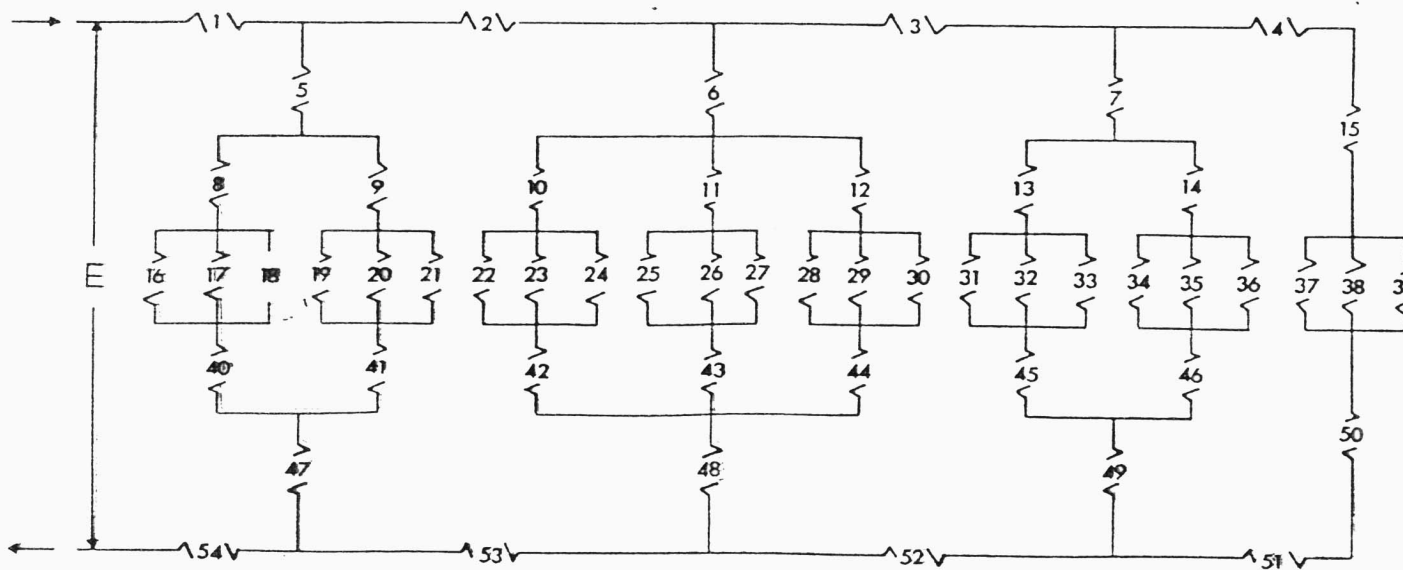
# ΜΕΙΩΣΗ ΑΙΜΑΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗ ΣΤΕΝΩΣΗ ΑΟΡΤΗΣ



# ΧΩΡΟΤΑΞΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ



# ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ



$$I_9 = I_{41}$$

$$I_{40} = I_8$$

$$I_8 = I_{16} + I_{17} + I_{18}$$

$$I_{16}R_{16} = I_{17}R_{17} = I_{18}R_{18}$$

$$I_{19}R_{19} = I_{21}R_{21} = I_{22}R_{22}$$

$$I_{47} + I_{53} = I_{54}$$

$$I_{40} + I_{41} = I_{47}$$

$$I_{47} = I_5$$

$$I_1 = I_5 + I_2$$

$$I_5 = I_8 + I_9$$

$$I_1R_1 + I_5R_5 + I_8R_8 + I_{16}R_{16} + I_{40}R_{40} + I_{47}R_{47} = E - I_{54}R_{54}$$

$$I_1R_1 + I_5R_5 + I_{19}R_{19} + I_{41}R_{41} + I_{47}R_{47} = E - I_{54}R_{54}$$

$$I_9 = I_{19} + I_{20} + I_{21}$$





- Το ισοδύναμο ηλεκτρικό ανάλογο κύκλωμα μας οδηγεί στις πιο κάτω εξισώσεις, με την παραδοχή επίσης της ισοδυναμίας νόμου **OHM** και **POISEUILLE**:

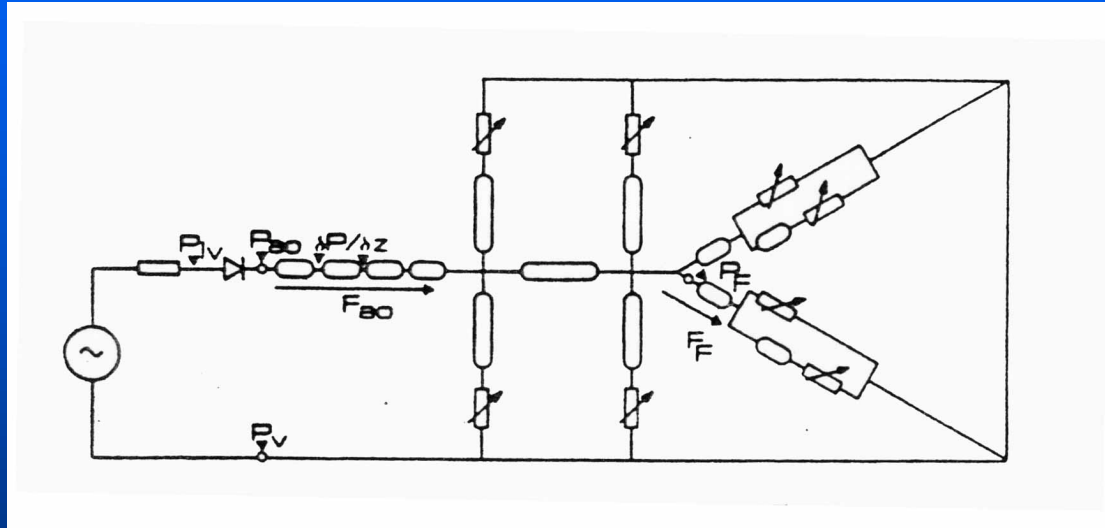
$$Q = \frac{\pi * \Delta P}{8 * \eta * L} * R^4 = \frac{E}{R'} = I, \quad \text{όπου}$$

- Ροή, Q, ανάλογη του ρεύματος, I
- $\Delta P$  ανάλογη της τάσης E
- Αντίσταση ροής (Μηχανική / Υδραυλική) ανάλογη της Ηλεκτρικής Αντίστασης R



# ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΡΤΗΡΙΑΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ / ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

## ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΡΔΙΑΣ - ΑΡΤΗΡΙΩΝ



: Καρδιά, ανάλογο γεννήτριας + εσωτερική αντίσταση



: Δίοδος, ανάλογη της καρδιακής βαλβίδας



: Ρυθμιζόμενη αντίσταση (για την παλμική κίνηση των τοιχωμάτων των αρτηριών) και αντίσταση - Τμήματα αρτηριών



- Η σύνθετη αρτηριακή αντίσταση  $Z$  καθορίζεται σαν:

$$\left[ \frac{P_{ao} - P_V}{F_{ao}} \right] , \text{ \textbf{ΌΠΟΥ}}$$

$P_{ao}$  : Αορτική πίεση

$P_V$  : Φλεβική πίεση

$F_{ao}$  : Αορτική ροή

- Συνήθως η αρτηριακή πίεση  $>$  φλεβική πίεση



- Κατά τον άξονα  $z$  η σύνθετη αντίσταση  $Z_z$  είναι:

$$Z_z = \frac{\left( \frac{\delta P}{\delta Z} \right)}{F_{ao}}$$

- Λαμβάνοντας υπ' όψη την κυματική φύση τόσο του  $\Delta P$ , όσο και της ροής  $F$ :

$$\Delta P = |\Delta P| \exp j(\omega t + \phi_1)$$

$$F = |F| \exp j(\omega t + \phi_2)$$

$$|Z(\omega)| = \frac{|\Delta P|}{|F|}$$

$$\phi_z = \phi_1 - \phi_2$$

$\omega$ : γωνιακή ταχύτητα

$\phi$ : φάση της κυματοσυνάρτησης  $\Delta P$ ,  $F$

- Περιοχή φάσης:  $0 \rightarrow +90^\circ$ ,  $0 \rightarrow -90^\circ$



- Προσέγγιση μέσω της Ανάλυσης Fourier  
Είναι δυνατή διότι τα βιοσήματα στην αιμοδυναμική είναι επαναληπτά και δεν περιέχουν ασυνεχείς περιοχές

$$F(t) = F_o + A_1 \cos \omega t + A_2 \cos \omega t + \dots + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin \omega t + \dots$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos n\omega t dt \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin n\omega t dt \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

**F(t): βιολογική συνάρτηση**

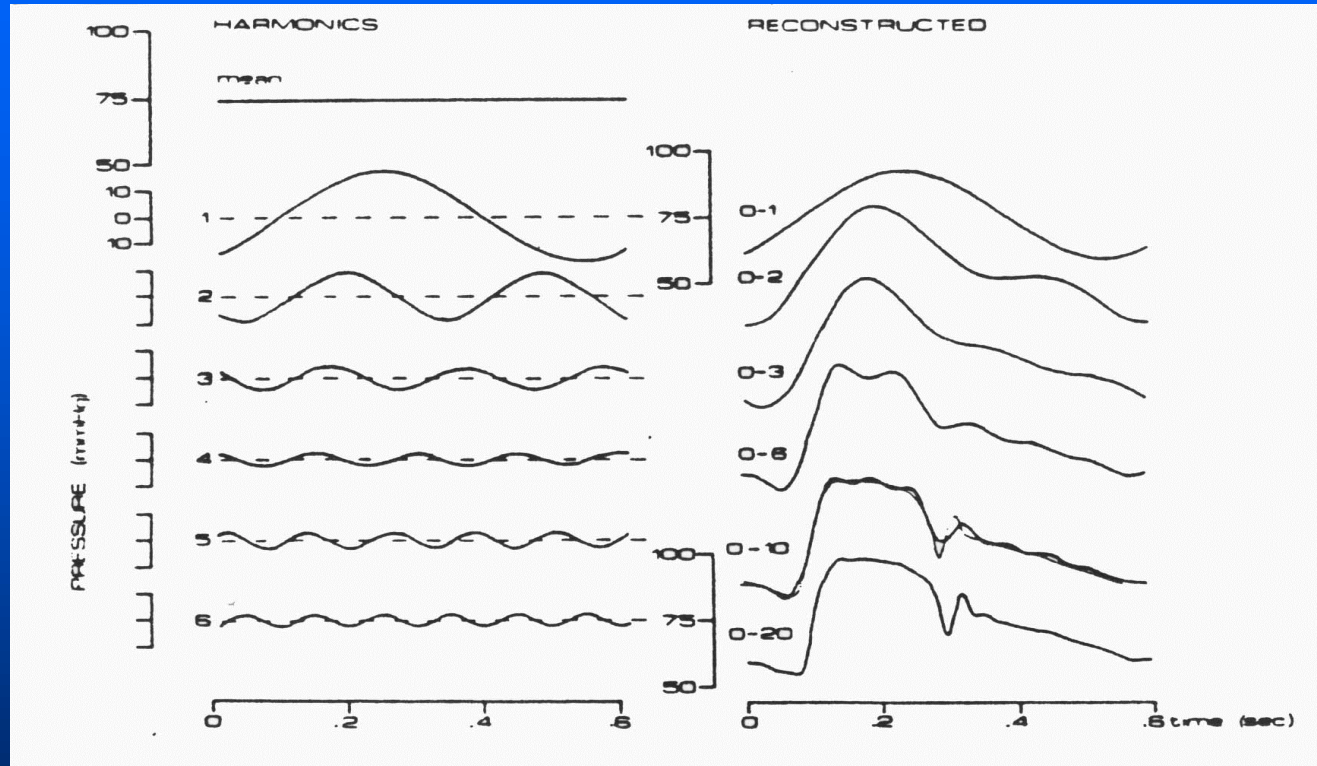
**F<sub>o</sub>: μέση τιμή,**

**A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, ..., B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, ...: σταθερές της κατά Fourier Ανάλυσης**

**περίοδος T - ανάλογη ενός πλήρη καρδιακού παλμού**



# ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΤΑ FOURIER ΕΝΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΟΡΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ



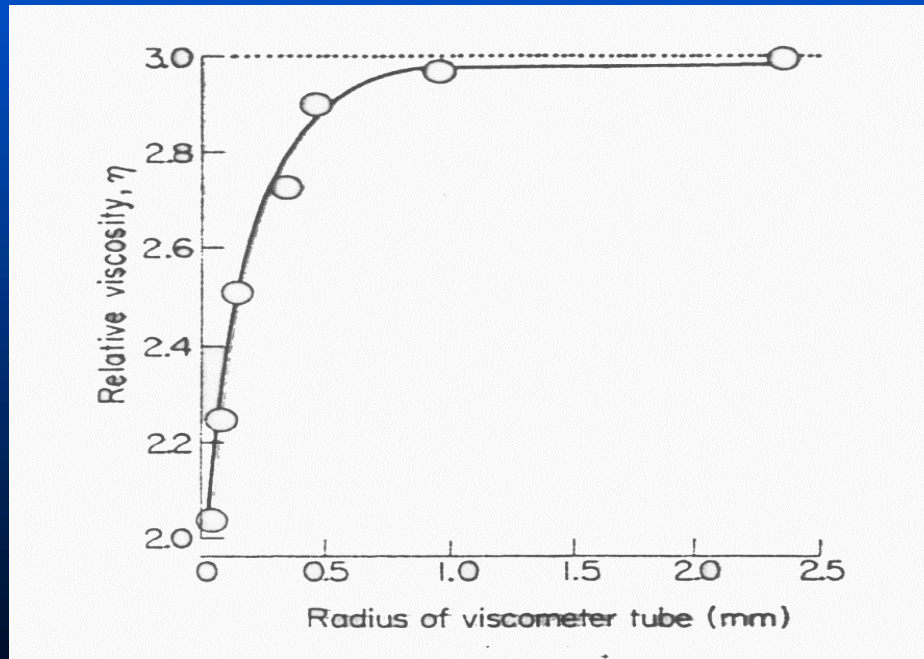
- **Αριστερά:** Βλέπουμε τη μέση τιμή του σήματος και τις 6 πρώτες αρμονικές
- **Δεξιά:** Βλέπουμε το τελικό σήμα που παίρνουμε από τις προστιθέμενες αρμονικές
- Από 10 αρμονικές και πάνω η προσέγγιση του αρχικού πραγματικού σήματος είναι ικανοποιητική
- Οι 20 αρμονικές είναι ικανές για ένα ακριβή προσδιορισμό του αρχικού σήματος



# ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΣΩΛΗΝΑ (ΑΓΓΕΙΟΥ) ΣΤΟ ΙΞΩΔΕΣ ΤΟΥ ΑΙΜΑΤΟΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ FAHRAEUS - LINDQUIST

- Για το κυκλοφορικό έχουμε ότι το σχετικό αιματικό ιξώδες μεταβάλλεται με τη διάμετρο των αγγείων.
- Μείωση της διαμέτρου συνεπάγεται μείωση του ιξώδους και αύξηση του αιματοκρίτη.

Σχετικό ιξώδες



$\eta$  ↓ εάν διάμετρος ↓

ΠΑΡΑΔΟΞΟ ?

Διάμετρος



- Μείωση της διαμέτρου συνεπάγεται μείωση του ιξώδους

$\eta \downarrow$  εάν διάμετρος  $\downarrow$

ΠΑΡΑΔΟΞΟ ?

Εξήγηση :

1. Μεταβολή του αιματοκρίτη σε σωλήνα μικρής διαμέτρου
2. Τάση των ερυθρών αιμοσφαιρίων του αίματος να μεταναστεύουν στο κέντρο του σωλήνα





# ΙΞΩΔΕΣ ΤΟΥ ΑΙΜΑΤΟΣ

## Σύνθεση του αίματος:

- Πυκνό εναιώρημα κυττάρων εντός πλάσματος
- Συνολικός όγκος: 5 λίτρα
- Εμφορφα συστατικά του αίματος:

ΕΡΥΘΡΑ ΚΥΤΤΑΡΑ	$5 \cdot 10^6$ κύτταρα /mm <sup>3</sup>
ΛΕΥΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ	$6 \cdot 10^3$ ”
ΑΙΜΟΠΕΤΑΛΙΑ	$3 \cdot 10^5$ ”

**Σημείωση:** Σε φυσιολογικές συνθήκες οι ρεολογικές ιδιότητες του αίματος κυβερνώνται από αυτές των ερυθρών λόγω της αριθμητικής υπεροχής αυτών έναντι των άλλων κυττάρων



## Γεωμετρικές διαστάσεις του ερυθρού αιμοσφαιρίου:

Διάμετρος	$7.82 \pm 0.62 \mu\text{m}$
Μεγάλο Πάχος	$2.58 \pm 0.24 \mu\text{m}$
Μικρό Πάχος	$0.81 \pm 0.35 \mu\text{m}$
Επιφάνεια	$135.00 \pm 16.00 \mu\text{m}^2$
Όγκος	$96.00 \pm 14.00 \mu\text{m}^3$

## ΚΥΡΙΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

- ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ (π.χ. Αναλυτές)
- ΟΠΤΙΚΕΣ (Μικροσκόπιο, ηλεκτρονικό ή σάρωσης)

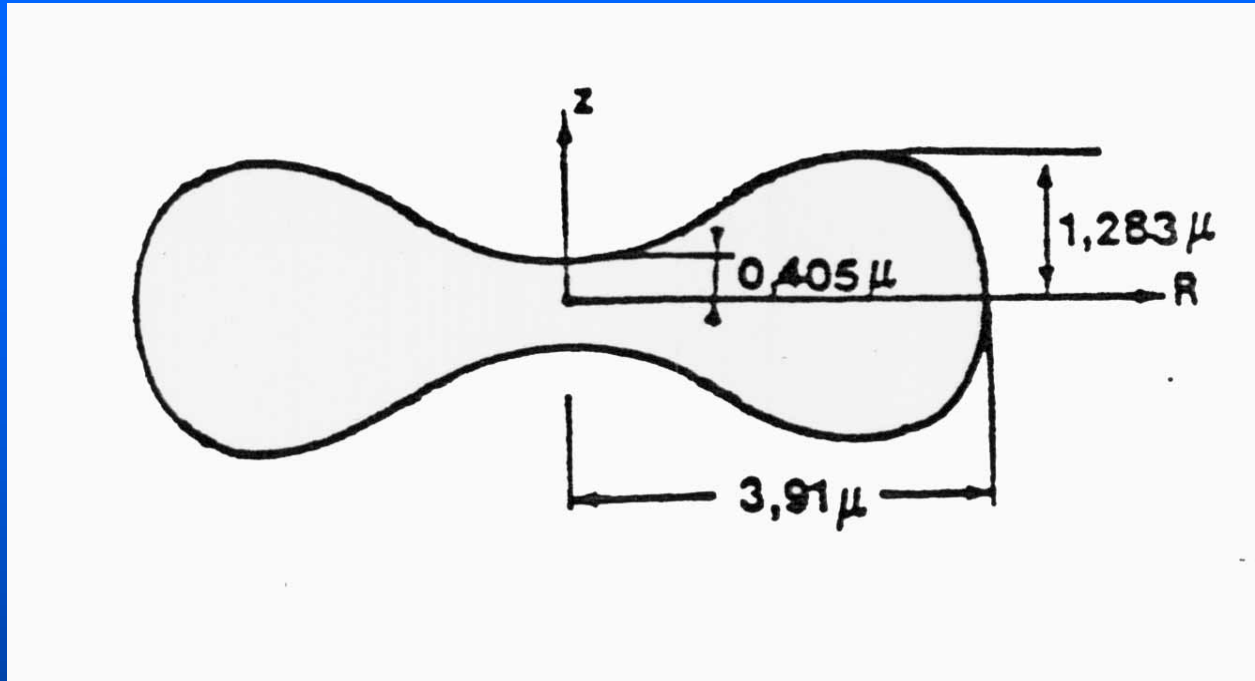


## ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΕΡΥΘΡΟΥ ΑΙΜΟΣΦΑΙΡΙΟΥ



**Μορφή ερυθρού αιμοσφαιρίου σε ηρεμία εντός ισοτονικού διαλύματος,  
300 mosm.l<sup>-1</sup> (η μορφή προσεγγίζει τον αμφίκωιλο δίσκο)**





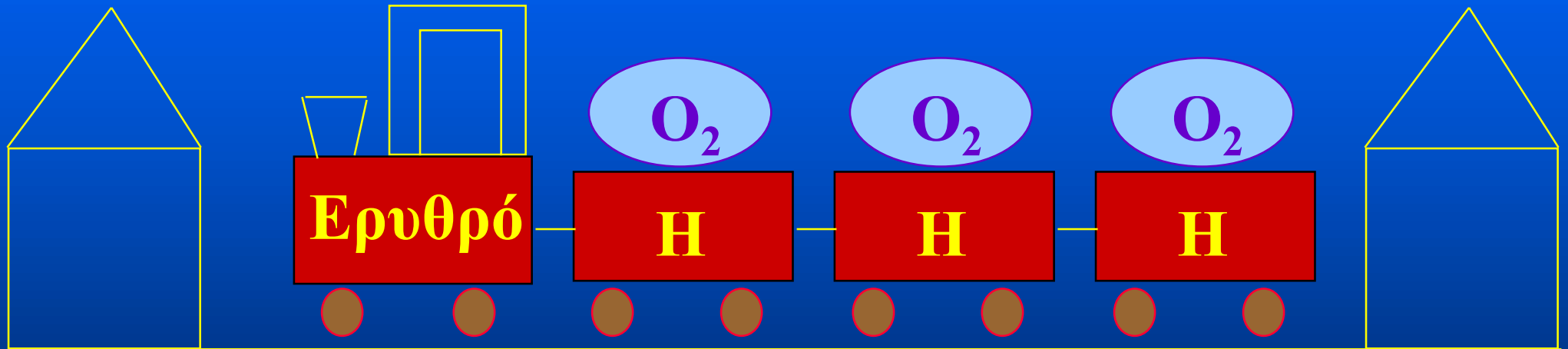
- Η μορφολογία του ερυθροκυττάρου είναι τέτοια ώστε η επιφάνεια του να είναι η μέγιστη ως προς τον όγκο του. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατόν η επιφάνεια να είναι μεγαλύτερη απ' ότι θα ήταν εάν το ερυθροκύτταρο ήταν σφαιρικό.



# ΜΙΚΡΟΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

Τριχοειδή Αγγεία

Πνεύμονες



Η: Αιμοσφαιρίνη



- Μαθηματικά η μορφολογία του κυττάρου καθορίζεται από ένα **Δείκτη Σφαιρικότητας (IS: Index of Sphericity)** του αιμοσφαιρίου, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$IS = 4.84 * \frac{V^{\frac{2}{3}}}{S} \quad , (*) \quad \text{Όπου}$$

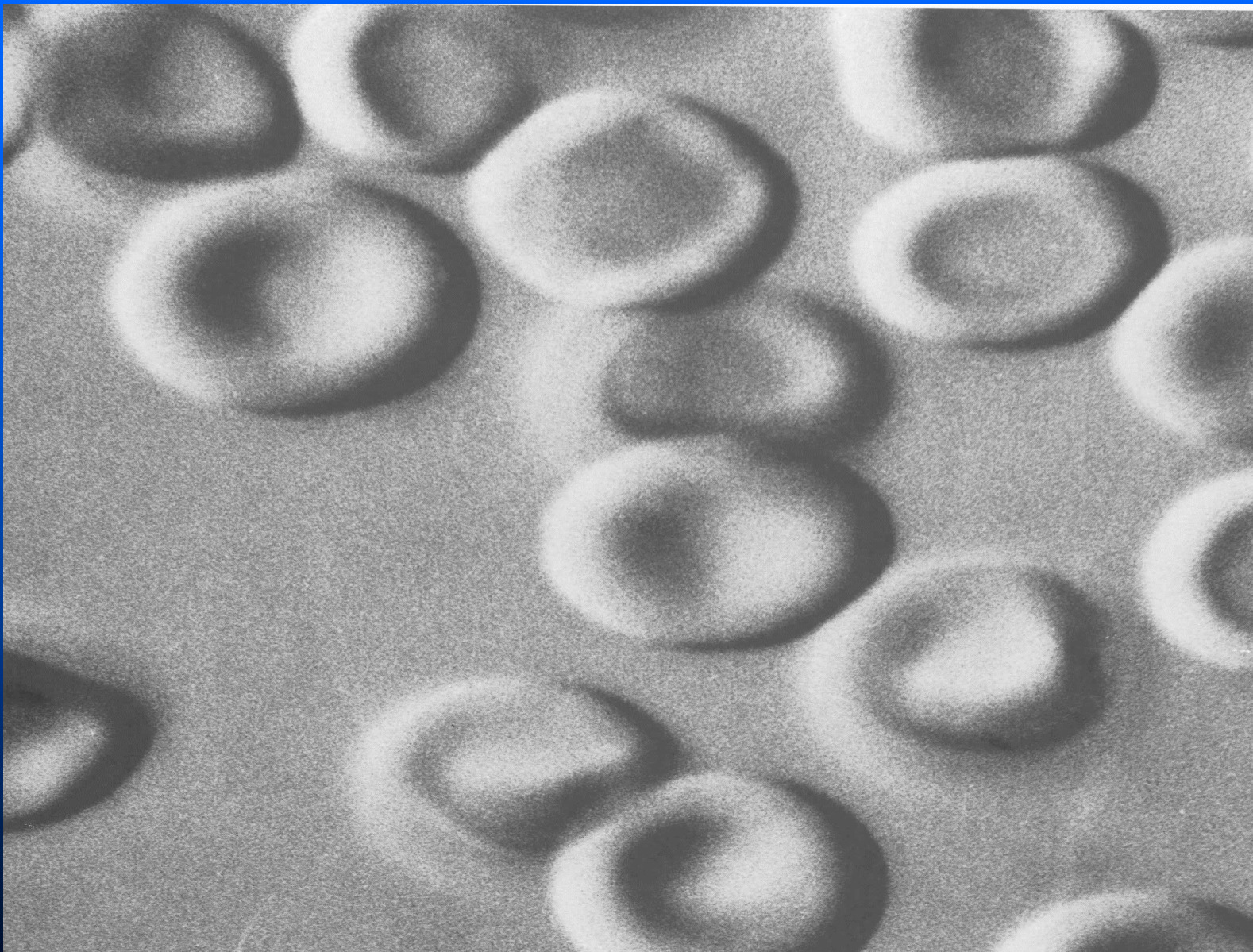
V: όγκος, S: επιφάνεια

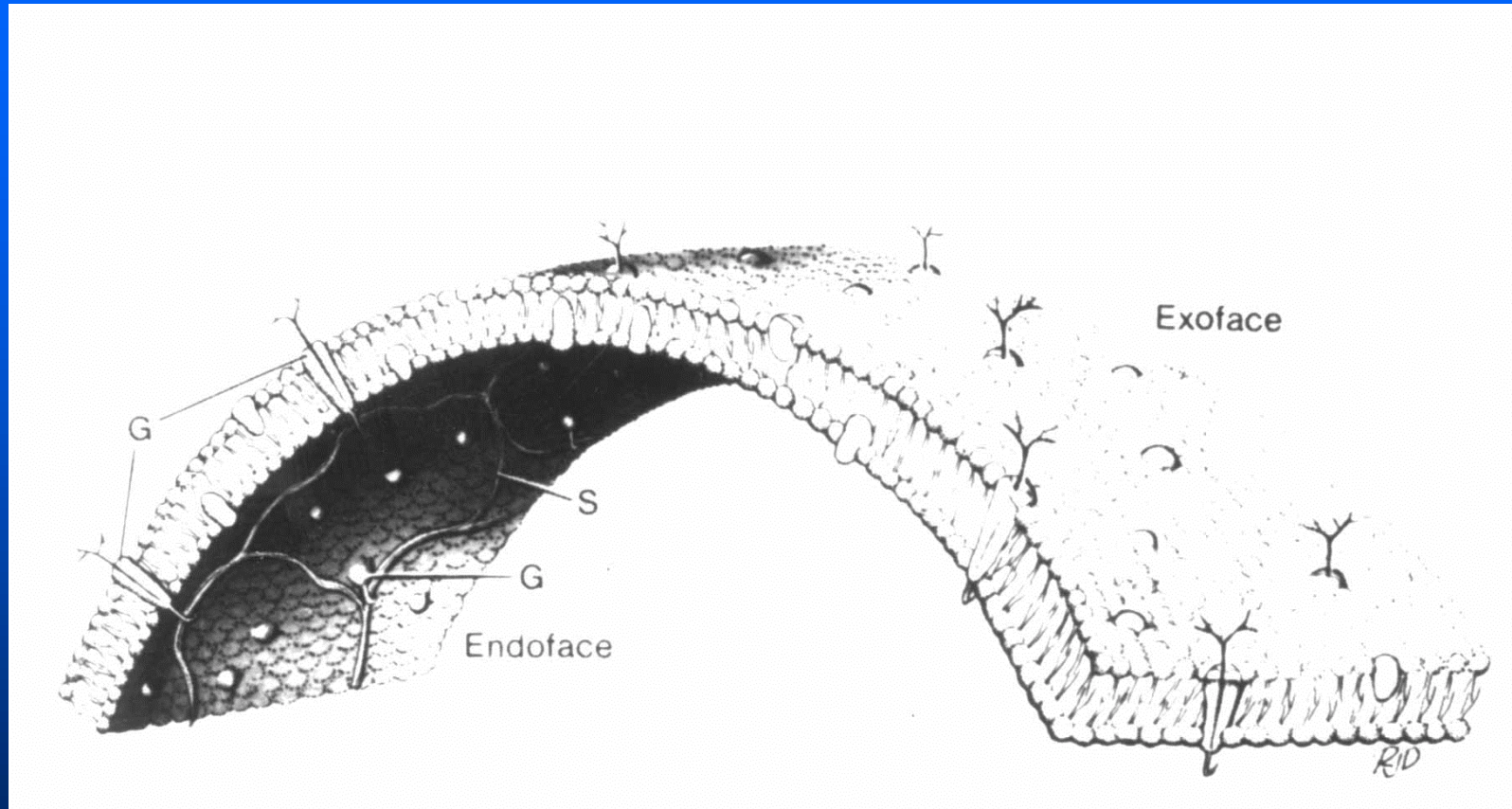
(\*) Burton (1966)

## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΣΦΑΙΡΙΚΟΤΗΤΑΣ

- Αδιάστατος
- **IS=1**, όταν το κύτταρο είναι σφαιρικό και **IS=0.7**, όταν το κύτταρο είναι δισκοειδούς μορφής.
- IS: αντιστρόφως ανάλογος του λόγου επιφάνειας / όγκο



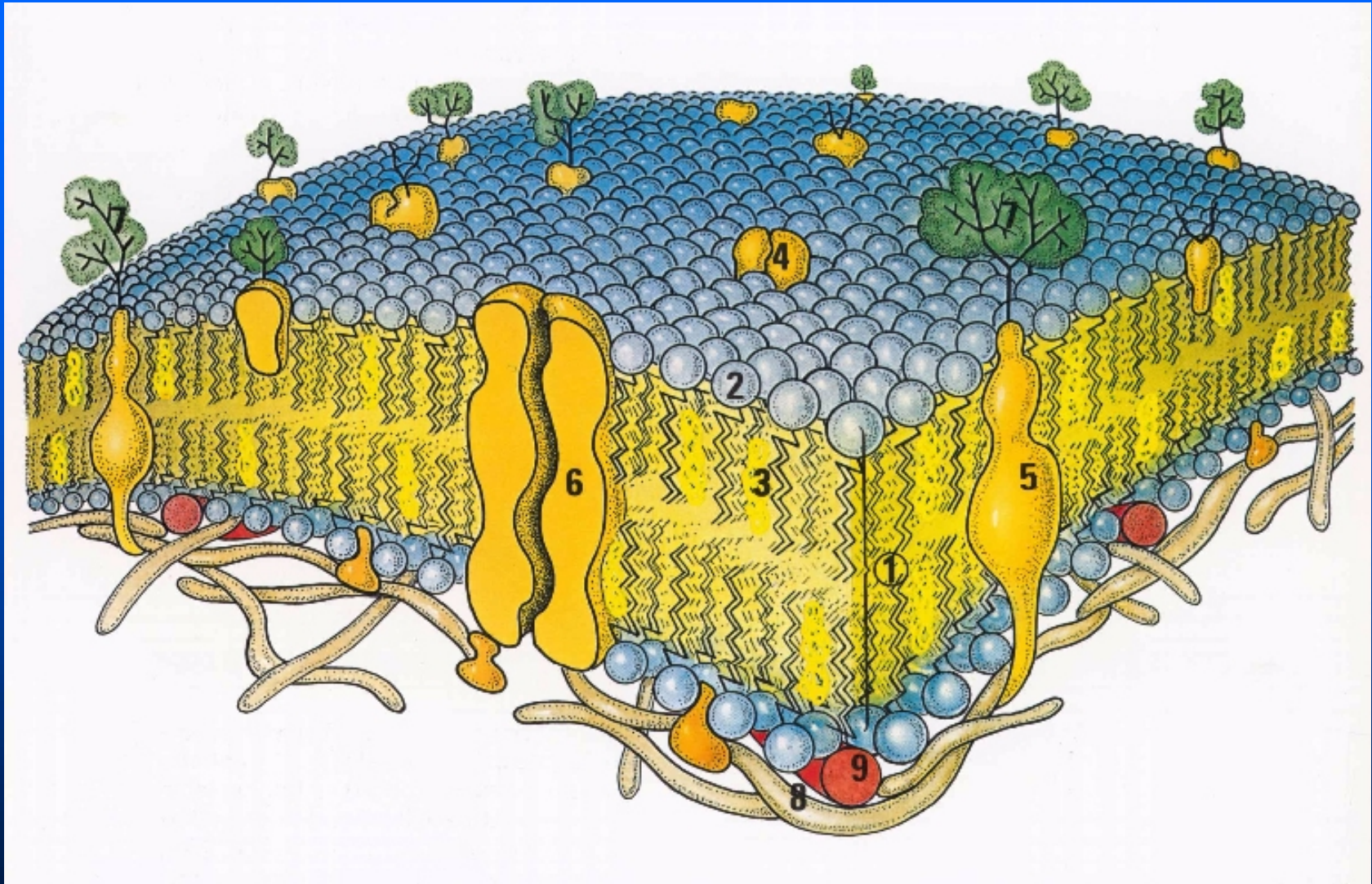




## Σχηματική παράσταση ερυθροκυτταρικής μεμβράνης



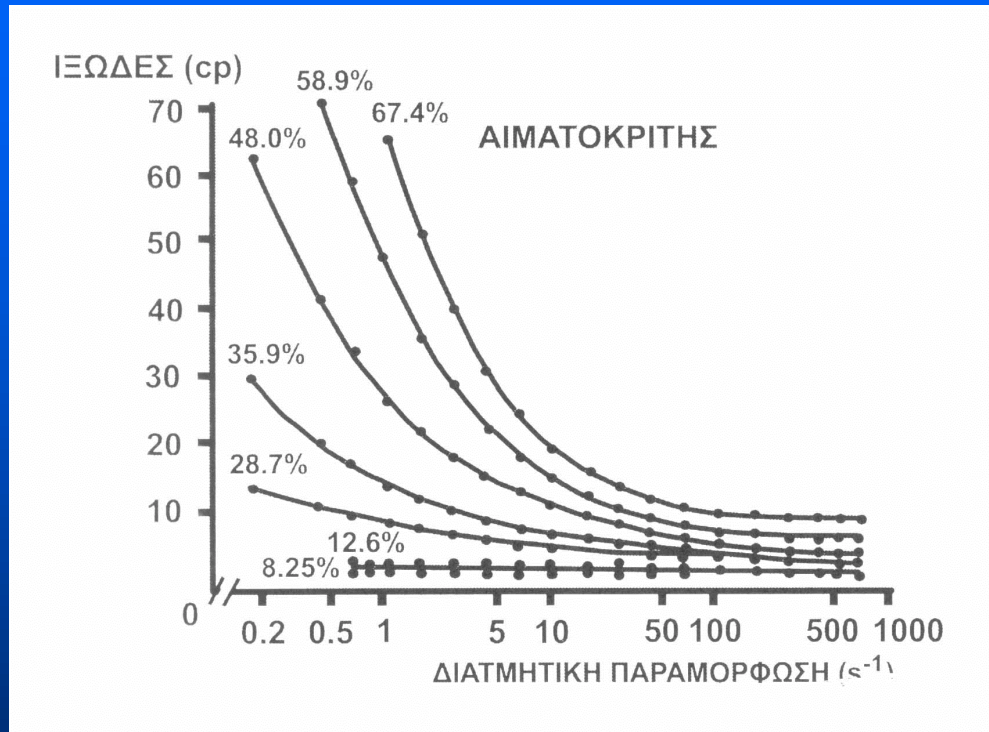




## Σχηματική παρουσίαση της ερυθροκυτταρικής μεμβράνης



# ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΟΥΝ ΤΟ ΑΙΜΑΤΙΚΟ ΙΞΩΔΕΣ



Το ιξώδες του αίματος σε *croise* σε σχέση με την ταχύτητα παραμόρφωσης σε  $s^{-1}$ , για διαφορετικές τιμές αιματοκρίτη ( $H_t$ ) (θερμοκρασία  $25^\circ$ ).

• Το αίμα σε αντίθεση με τα άλλα ρευστά και κυρίως τα βιολογικά έχει μια **ΜΗ ΝΕΥΤΩΝΕΙΑ** συμπεριφορά, δηλαδή το ιξώδες του εξαρτάται από την ταχύτητα παραμόρφωσης (διατμητική).

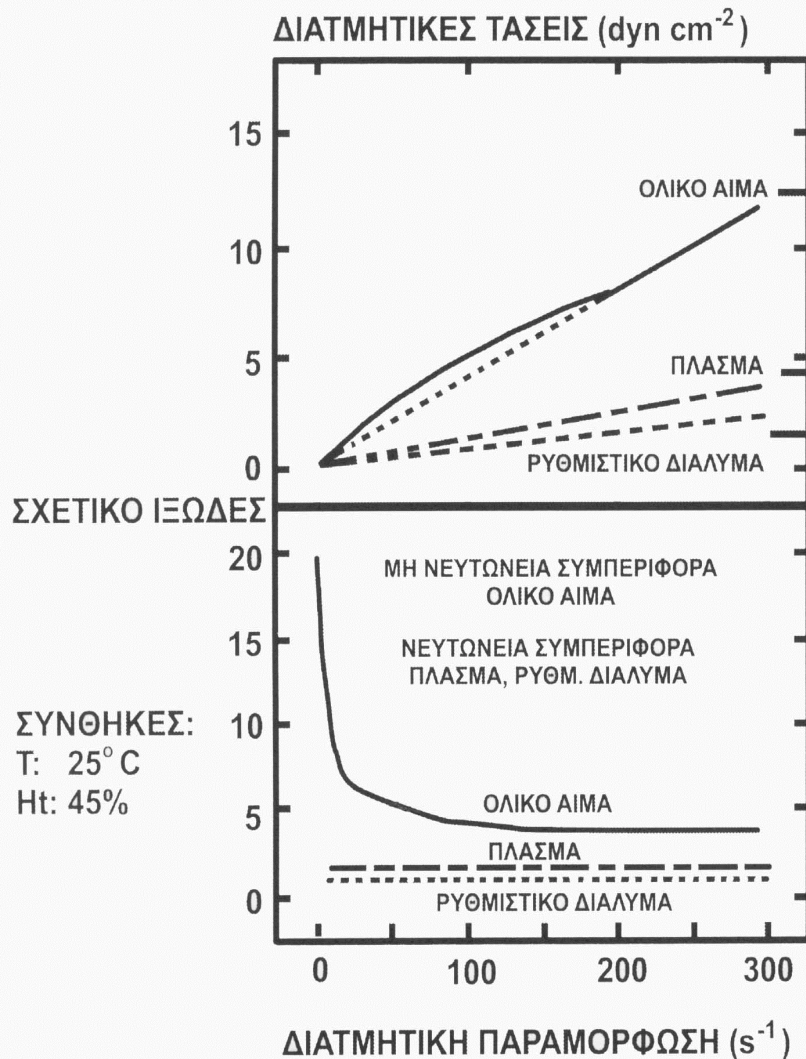


- **Σχετικό ιξώδες:**

1. αίματος
2. πλάσματος
3. χρησιμοποιούμενων ρυθμιστικών διαλυμάτων σε σχέση με την ταχύτητα παραμόρφωσης (διατμητική)

- **Εξασκούμενες διατμητικές τάσεις σαν συνάρτηση των ταχυτήτων παραμόρφωσης**

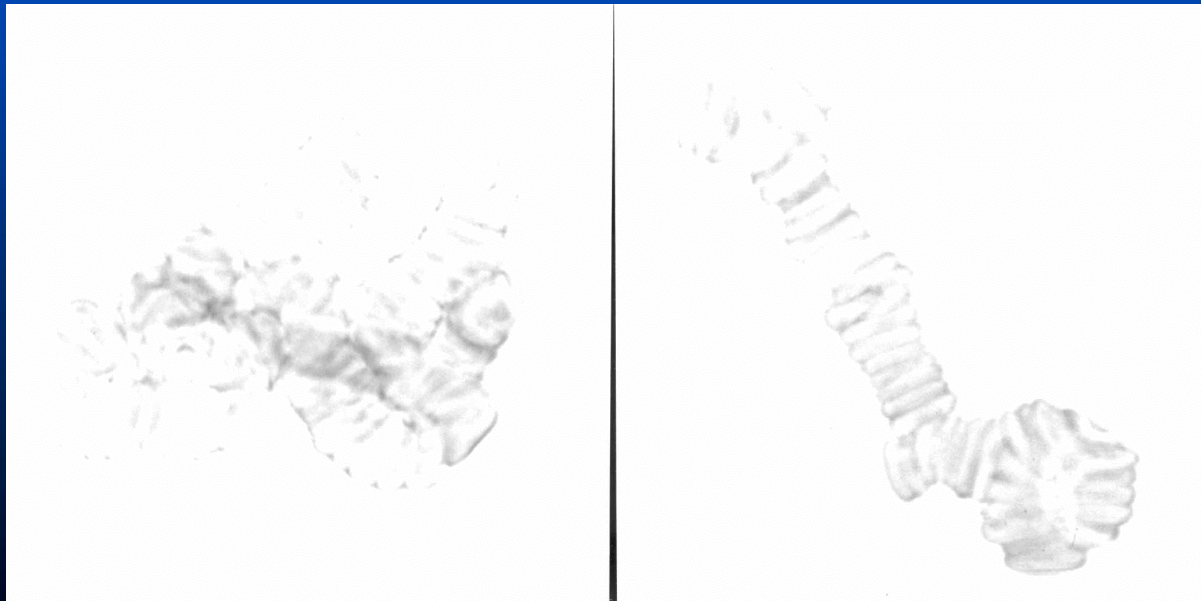
- **Σχετικό ιξώδες είναι η αντίστοιχη τιμή του ιξώδους διαιρουμένης με αυτή του νερού**

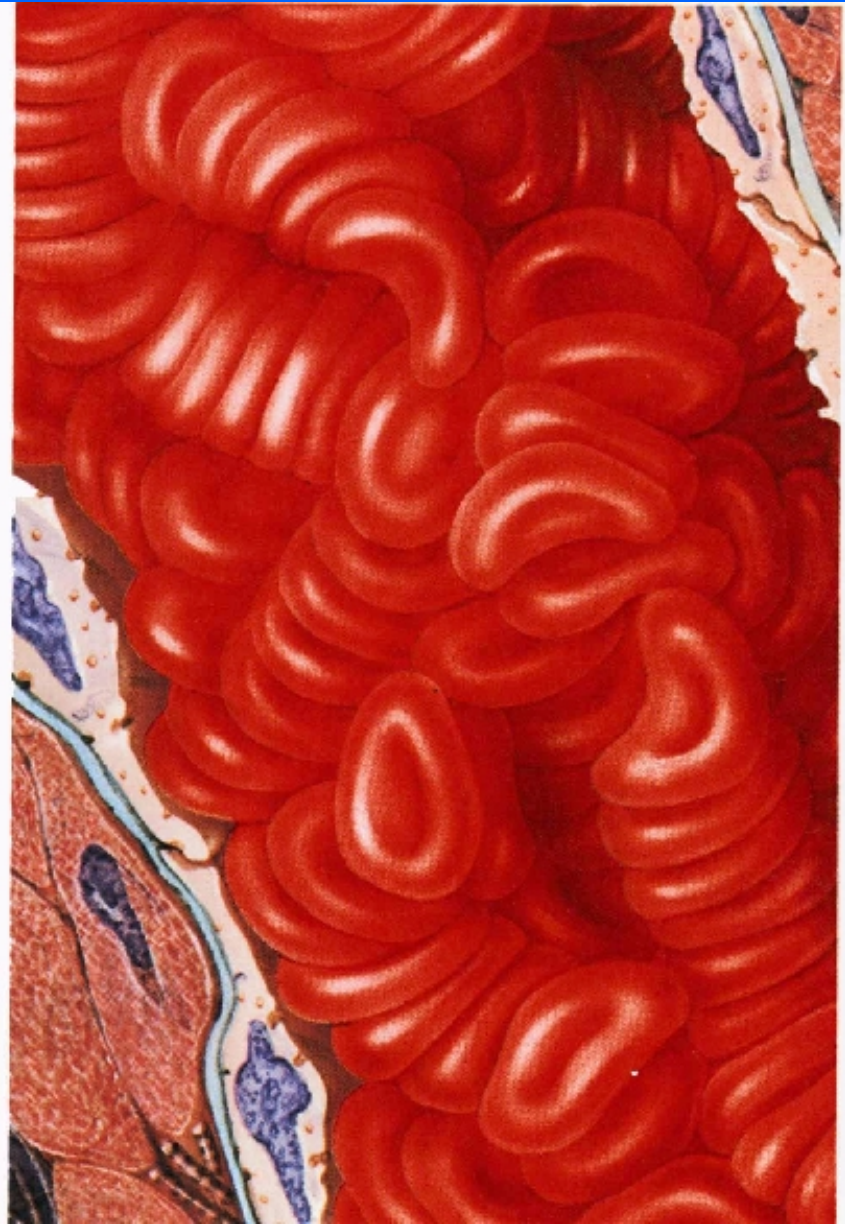


- Ο γενικότερος χαρακτήρας από ρεολογική άποψη του αίματος εξηγείται όσον αφορά τη συμπεριφορά του από τη δομή του.

1. Σε κατάσταση ηρεμίας τα ερυθρά είναι οργανωμένα μέσα στο πλάσμα, σε ένα τρισδιάστατο δίκτυο “νομισματοειδών στοιβάδων” - *rouleaux*.

2. Η οργάνωση αυτή εξαρτάται από τις πρωτεΐνες του πλάσματος και κυρίως το *ινωδογόνο*, το οποίο επηρεάζει τη συγκόλληση των κυττάρων.





- Κάτω από την επίδραση χαμηλών διατμητικών τάσεων, άρα χαμηλών ταχυτήτων παραμόρφωσης τα ερυθρά παραμένουν λίγο ή περισσότερο συγκολλημένα μεταξύ τους.
- Αυξανόμενης της τιμής των διατμητικών τάσεων τα ερυθρά αποσυγκολλούνται, αποτέλεσμα που οδηγεί σε μείωση του αιματικού ιξώδους.
- Πάνω από ταχύτητα παραμόρφωσης  $100 \text{ s}^{-1}$  έχουμε τα ερυθρά ένα προς ένα (μεμονωμένα), από ένα όριο και μετά, όπου τα ερυθρά βρίσκονται κάτω από την επίδραση υψηλών διατμητικών τάσεων, υφίστανται τη μέγιστη δυνατή παραμόρφωσή τους, το ιξώδες του αίματος γίνεται ανεξάρτητο των διατμητικών τάσεων δηλαδή αποκτά νευτώνεια συμπεριφορά.



## ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΟΥΝ ΤΟ ΑΙΜΑΤΙΚΟ ΙΞΩΔΕΣ

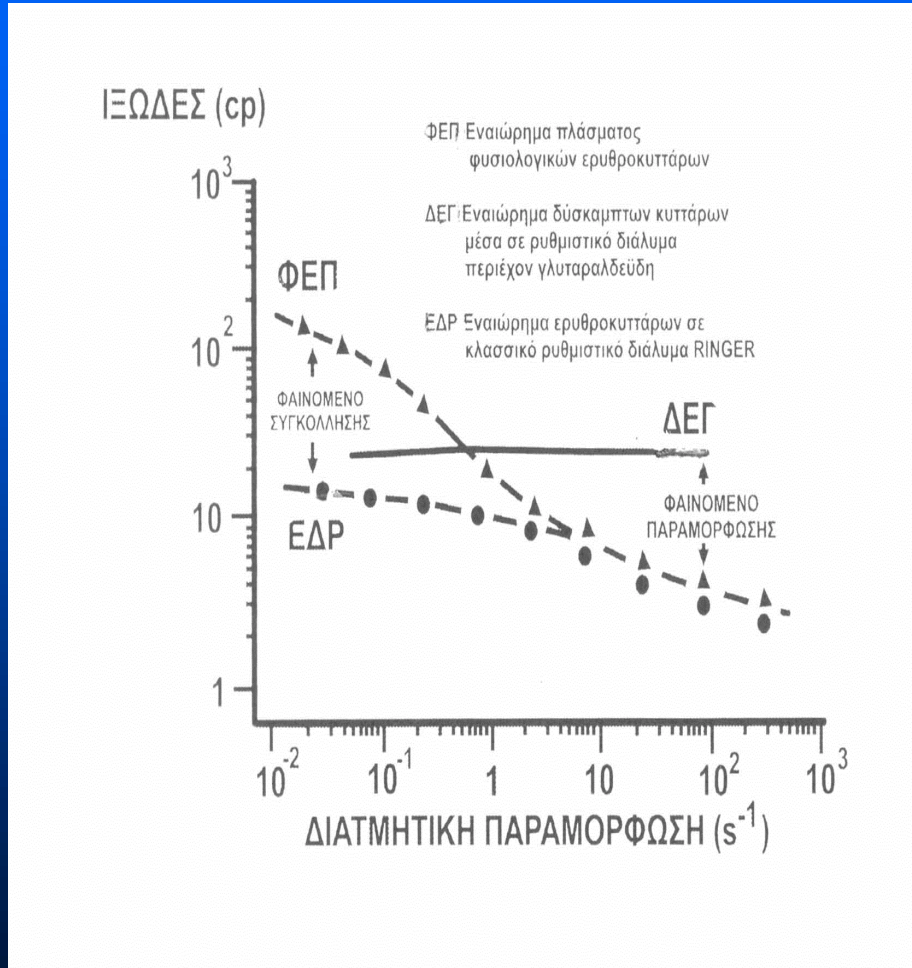
Κάτω από συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας (\*) το αιματικό ιξώδες εξαρτάται από τους παρακάτω τέσσερεις παράγοντες:

- Ιξώδες του πλάσματος
- Αιματοκρίτης (Συγκέντρωση σε ερυθρά)
- Συγκόλληση ερυθρών
- Παραμορφωσιμότητα ερυθρών

(\*) Το αιματικό ιξώδες εξαρτάται από τη θερμοκρασία (γενικότερα το ιξώδες σαν φυσική έννοια είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας)



# ΣΥΓΚΟΛΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΡΥΘΡΟΚΥΤΤΑΡΩΝ



- Μεταβολή του ιξώδους του αίματος ως προς την ταχύτητα παραμόρφωσης.
- Εναιώρημα ερυθρών σε RINGER έχει σαν αποτέλεσμα τη μη συγκόλληση των ερυθρών [ΕΔΡ].
- Εναιώρημα ερυθρών σε γλουταραλδεΐδη έχει σαν αποτέλεσμα τη σκλήρυνση τους [ΔΕΓ].
- [ΦΕΠ], ερυθρά στο πλάσμα.



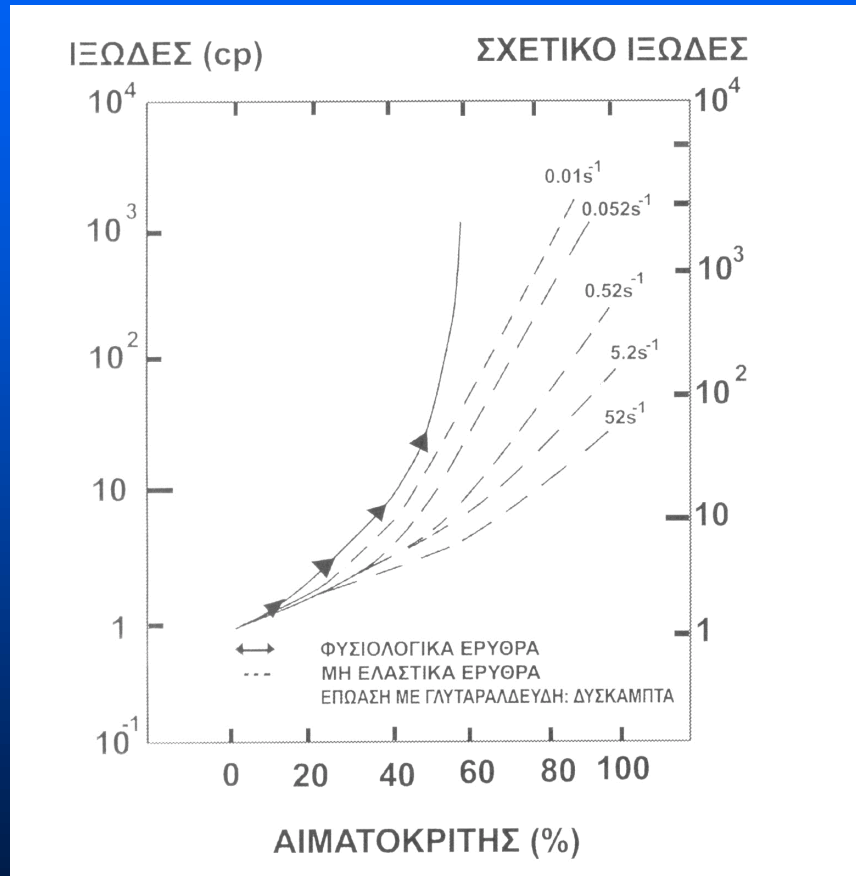


## ΙΞΩΔΕΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

- Το πλασματικό ιξώδες έχει **νευτώνεια συμπεριφορά** (σταθερό για σταθερή θερμοκρασία και πίεση).
- Έχει τιμή 1.8 cP και αυτή η **αυξημένη του τιμή** σε σχέση με το H<sub>2</sub>O οφείλεται στην υψηλή του **περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες** (70g/l).
- Υπενθυμίζουμε ότι έως 55°C το **πλασματικό ιξώδες μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας**. Από αυτή τη θερμοκρασία και άνω έχουμε **απότομη αύξηση του ιξώδους** που οφείλεται στη **συγκόλληση των πρωτεϊνών μεταξύ τους**.



# ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΙΜΑΤΟΚΡΙΤΗ



⇒ φυσιολογικά ερυθρά

⇒ ερυθρά μη ελαστικά μετά από επώαση με γλουταραλδεύδη

⇒ δύσκαμπτα



## ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΡΥΘΡΩΝ

Οι παράγοντες που καθορίζουν την τάση των ερυθρών να σχηματίζουν μεταξύ τους “rouleaux”, νομισματοειδείς στοιβάδες είναι οι παρακάτω:

### ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

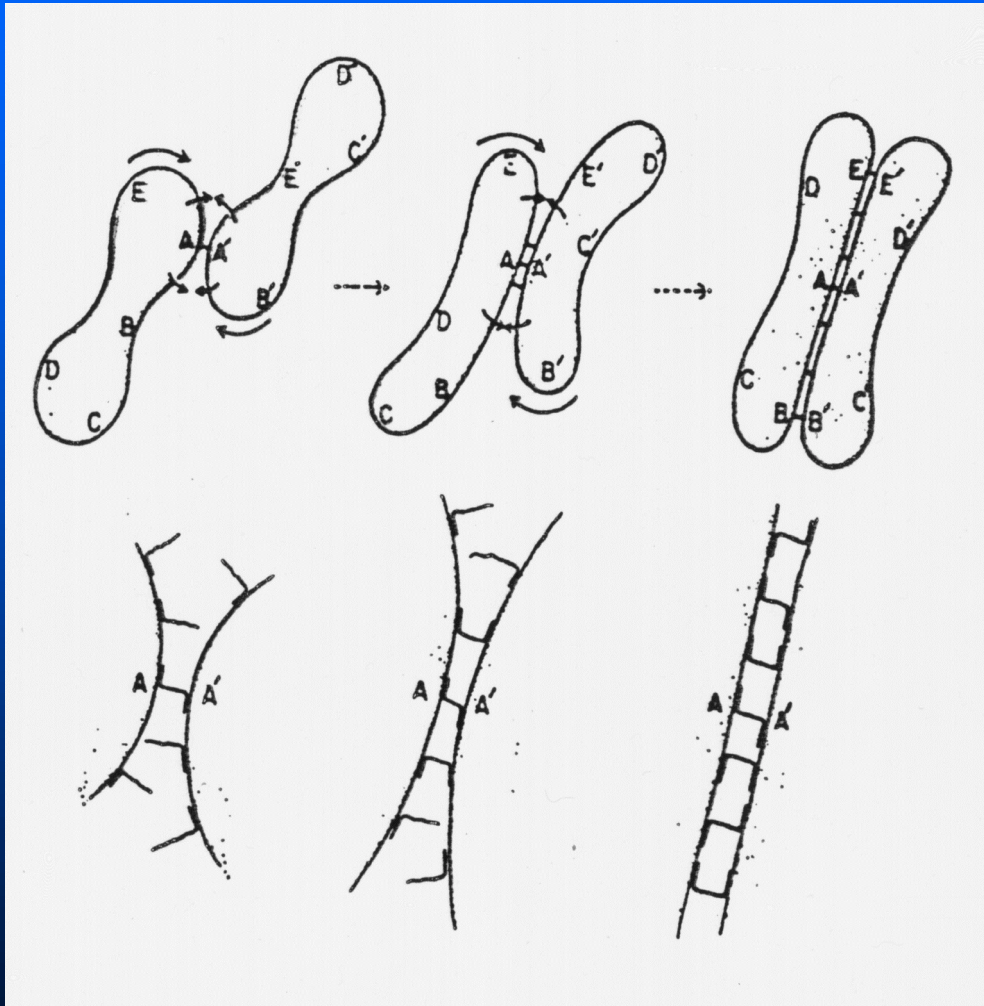
- Εξασκούμενες διατμητικές τάσεις,
- Γεωμετρία αγγείων,
- Αιματοκρίτης, Ιξώδες του πλάσματος ή του ρυθμ. διαλύματος,
- Μακρομοριακές ενώσεις του πλάσματος,
- Ιοντική ισχύς του ρυθμιστικού διαλύματος.

### ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

- Ελαστικότητα των ερυθρών
- Ηλεκτρικό φορτίο ερυθρών,
- Απορρόφηση μακρομορίων από την κυτταρική μεμβράνη



# ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΡΥΘΡΩΝ



Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη διαδικασία σχηματισμού των rouleaux (από αριστερά προς τα δεξιά).

Διακρίνεται ακόμη, ο τρόπος ένωσης των μακρομορίων, καθώς και η σημασία της ελαστικότητας της μεμβράνης στο σχηματισμό των “rouleaux” (περιστροφή της κυκλικής μεμβράνης γύρω από τον εαυτό της για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ένωση μέσω μακρομοριακής γέφυρας).



# ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΡΥΘΡΟΚΥΤΤΑΡΩΝ

## ΟΡΙΣΜΟΣ:

Ικανότητα του ερυθρού αιμοσφαιρίου να παραμορφώνεται όταν υφίσταται την επίδραση της συνεκτικής ροής και υπόκειται στην εξάσκηση τάσεων (καθόλη τη διάρκεια της ζωής του (120 ημέρες)).

Οι εξασκούμενες αυτές τάσεις είναι:

- \* Διατμητικές ή
- \* Κάθετες επί του κυττάρου
- Ο ορισμός αυτός είναι ικανοποιητικός από άποψη “φυσιολογίας”, αλλά δεν έχει “φυσικό νόημα”.



- Οι **διατμητικές τάσεις** οφείλονται στις ταχύτητες παραμόρφωσης που αναπτύσσονται κατά την αιματική ροή μέσα στα αγγεία,
- Οι **κάθετες τάσεις** που είναι εσωτερικές ή εξωτερικές πιέσεις, οφείλονται σε φυσικοχημικά φαινόμενα (π.χ. όταν έχουμε αλλαγή της ωσμωτικής πίεσης).
- Οι **βασικοί παράγοντες** που καθορίζουν την παραμορφωσιμότητα του ερυθρού έχουν σχέση με τη δομή και τη γεωμετρία του κυττάρου.

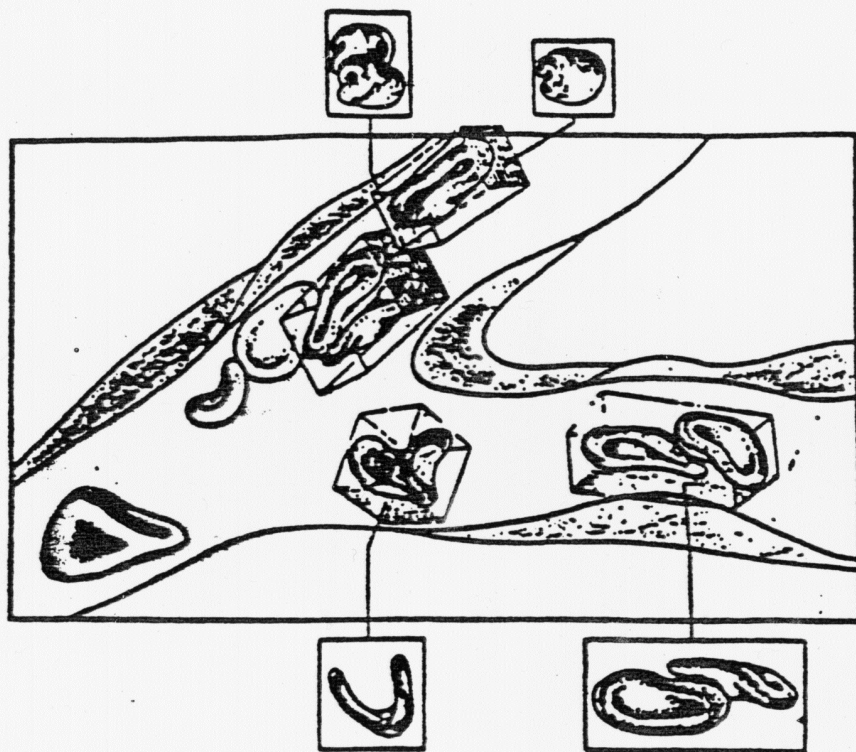


# ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΤΗΣ ΕΡΥΘΡΟΚΥΤΤΑΡΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

- **ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ**  
Σχέση με τη λιποπρωτεϊνική συστασή της
- **ΙΞΩΔΕΣ ΤΗΣ ΑΙΜΟΣΦΑΙΡΙΝΗΣ**  
Ακολουθεί βασικά νευτώνεια συμπεριφορά, εκτός παθολογικών περιπτώσεων, όπως  $H_BSS$ ,  $H_BAS$ , κ.λ.π..
- **ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΕΡΥΘΡΟΚΥΤΤΑΡΟΥ**



## ΦΟΡΜΕΣ ΚΑΙ ΜΟΡΦΕΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΤΑ ΕΡΥΘΡΟΚΥΤΤΑΡΑ ΣΤΑ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΑΓΓΕΙΑ



- Τα κύτταρα διατηρούν σταθερή την επιφάνειά τους στις φυσιολογικές συνθήκες παραμόρφωσής τους
- Σε κύρια βάση επανακτούν πάντα την αρχική τους μορφή - “ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΜΝΗΜΗ”





# Τεχνικές μέτρησης των ηλεκτρομηχανικών ιδιοτήτων των κυττάρων



- Η Μέτρηση και προσομοίωση της ελαστικής συμπεριφοράς του κυττάρου σε επίπεδο κυκλοφορίας - μικροκυκλοφορίας είναι σημαντική (αναιμίες, διαβήτης, καρδιαγγειακές παθήσεις)
- Την τελευταία δεκαετία έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές προκειμένου να μετρηθούν οι ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες των έμμορφων συστατικών του αίματος
- Οι μετρήσεις γίνονται είτε με έμμεσο τρόπο (μέτρηση ιξώδους εναιωρήματος, φυγοκέντρηση) είτε με άμεσο (τεχνικές διήθησης ή αναρρόφησης κυττάρων σε μικροπροχοΐδα-μικροπιπέττα)

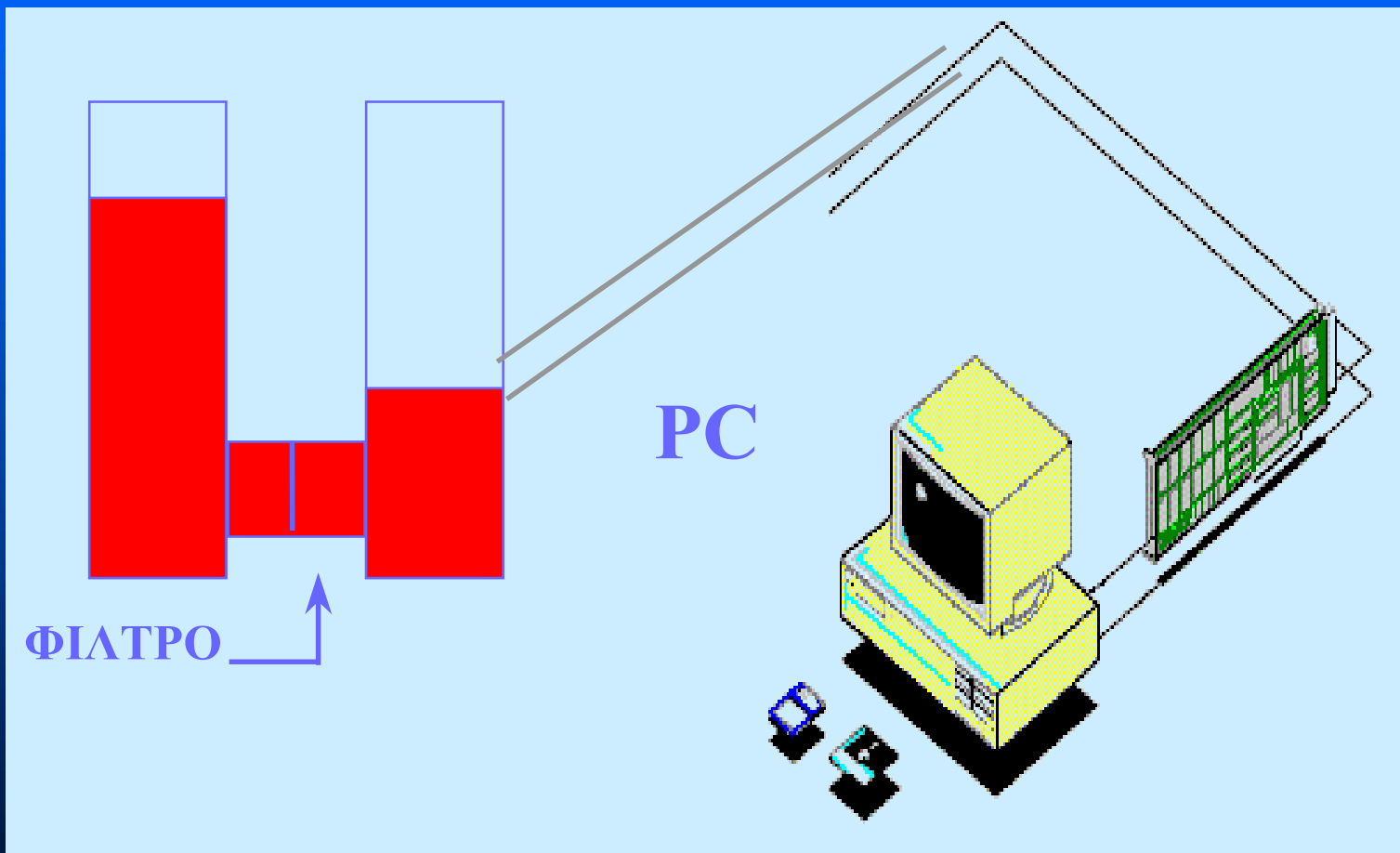


## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

- Μέτρηση επί εναιωρήματος κυττάρων  
Ιξωδομετρία  
Φυγοκεντρικές μέθοδοι  
Εκτακυτταρομετρία
- Τεχνικές μικροπιπέττας
- Τεχνικές διήθησης  
Διήθηση υπό σταθερή ροή  
Διήθηση υπό σταθερή πίεση  
Μέτρηση της αρχικής ροής διήθησης  
Μέτρηση του χρόνου διέλευσης μεμονωμένων  
ερυθροκυττάρων



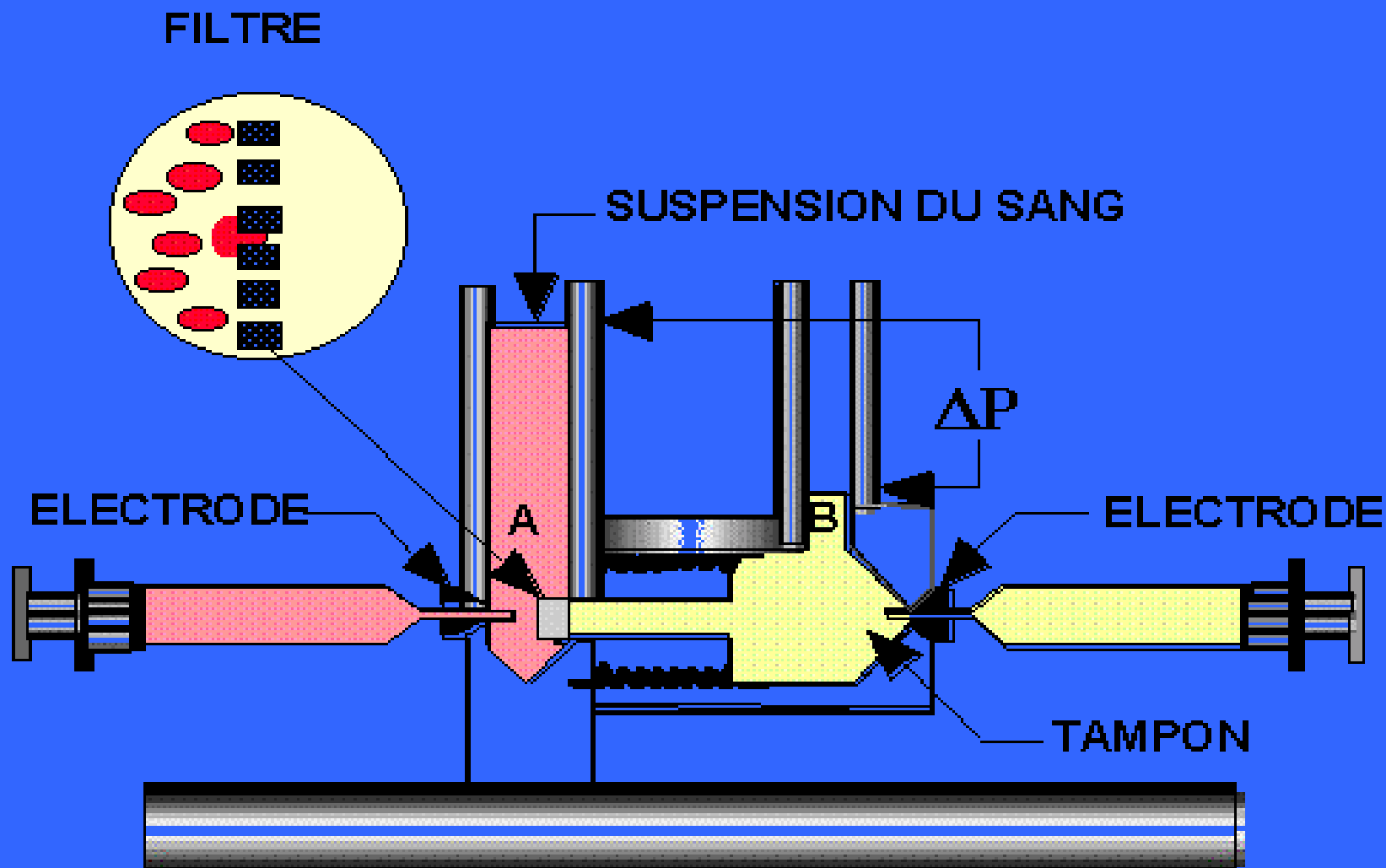
# ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΕΡΥΘΡΩΝ (CTTA)

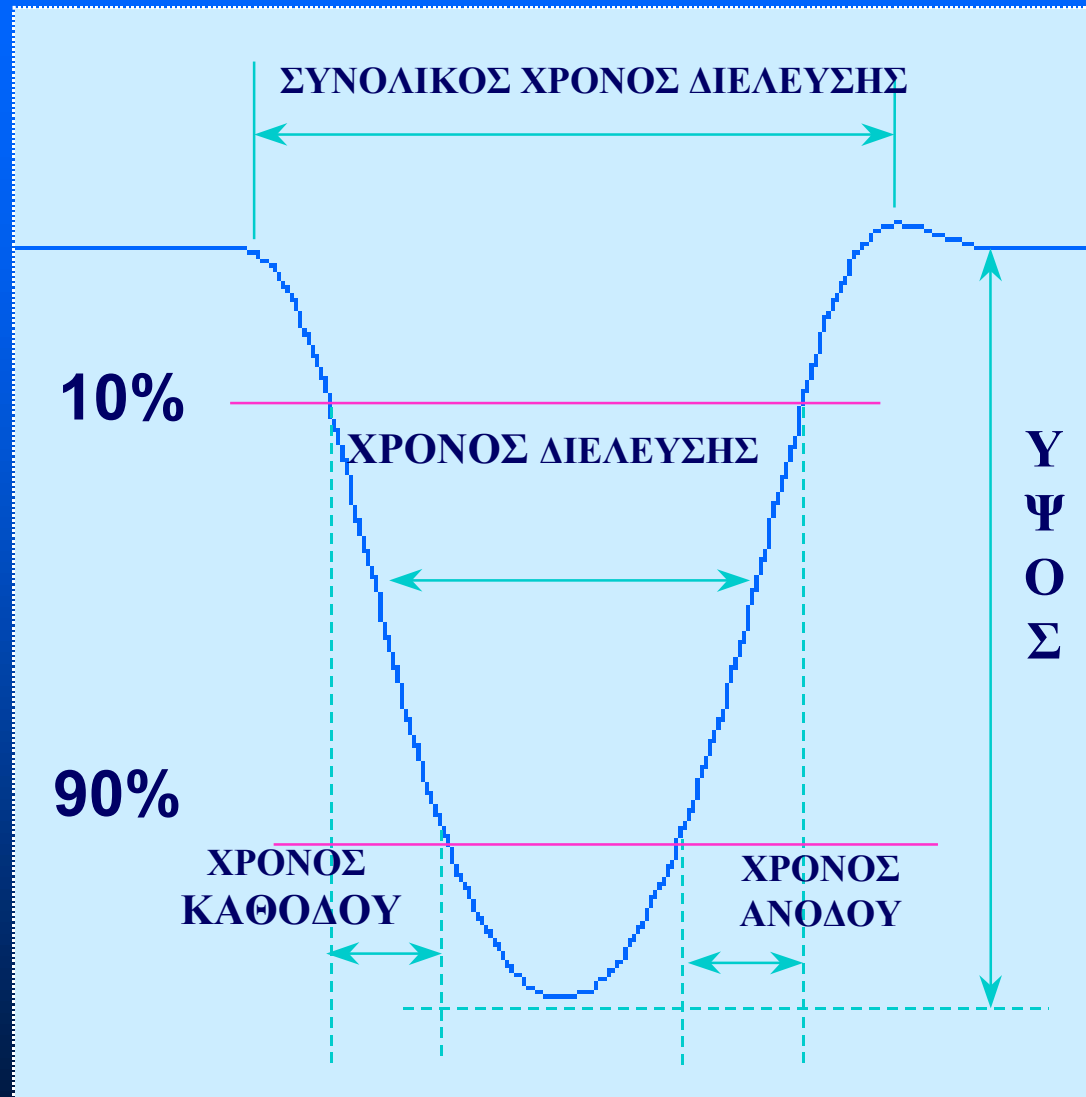


AT-MIO-16E-2

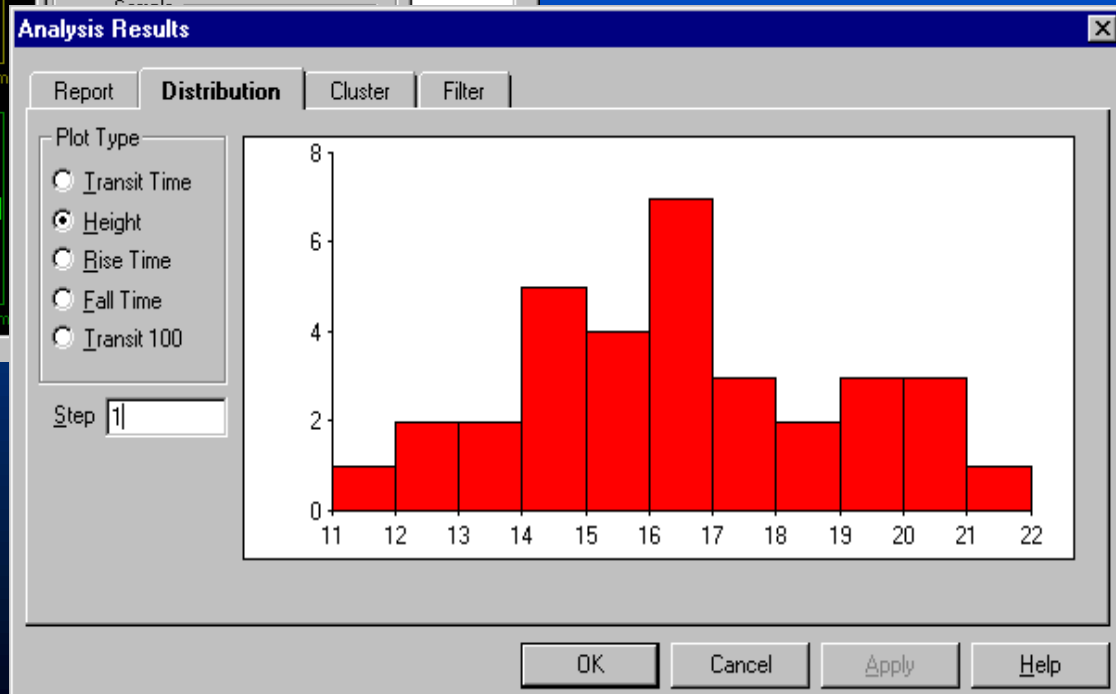
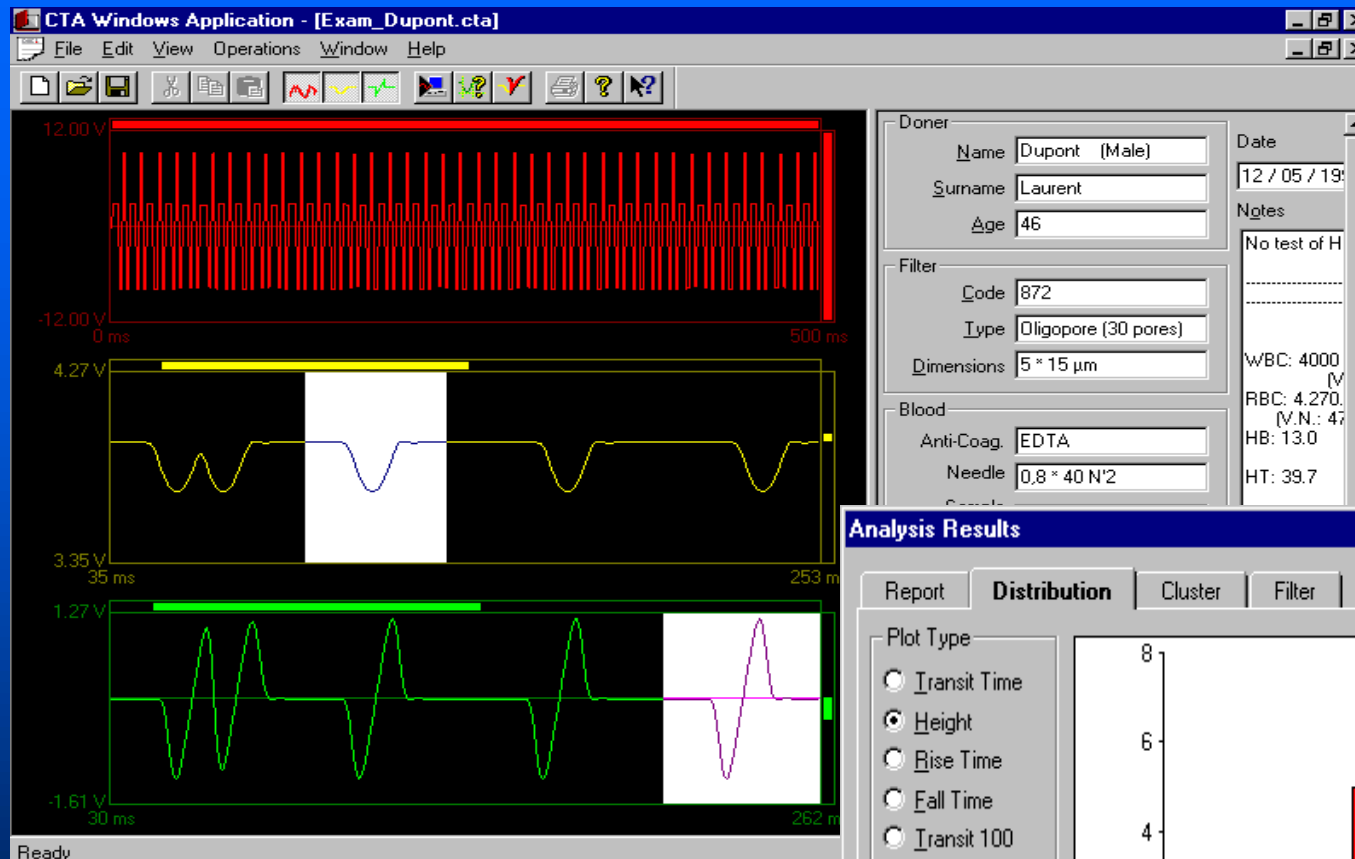


# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ

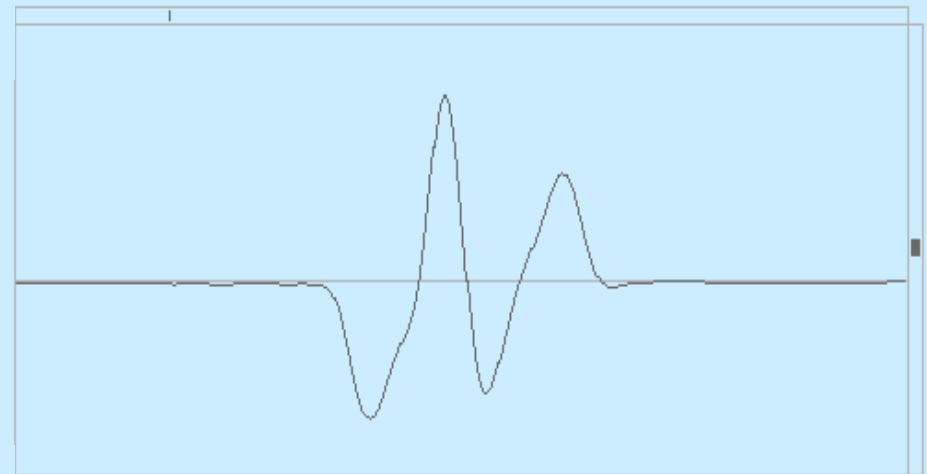
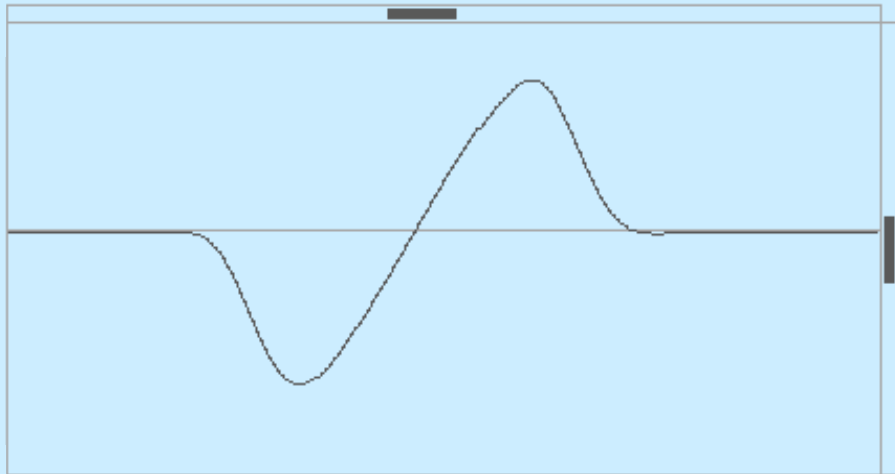
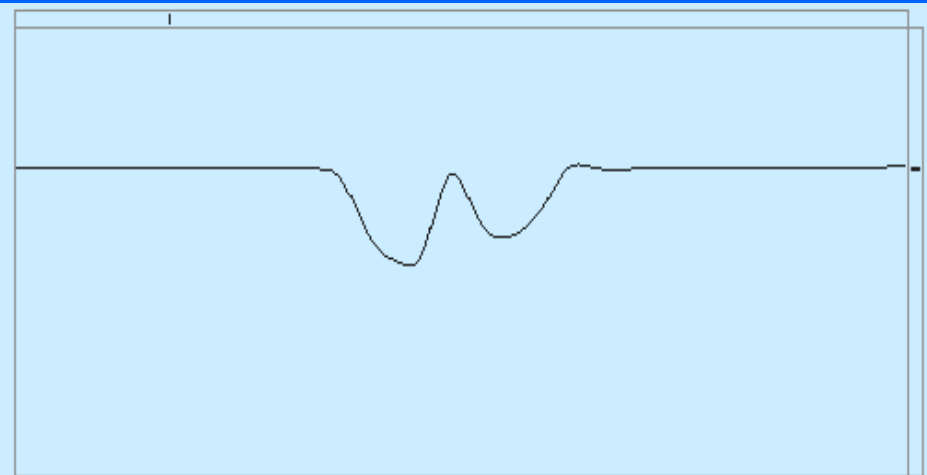
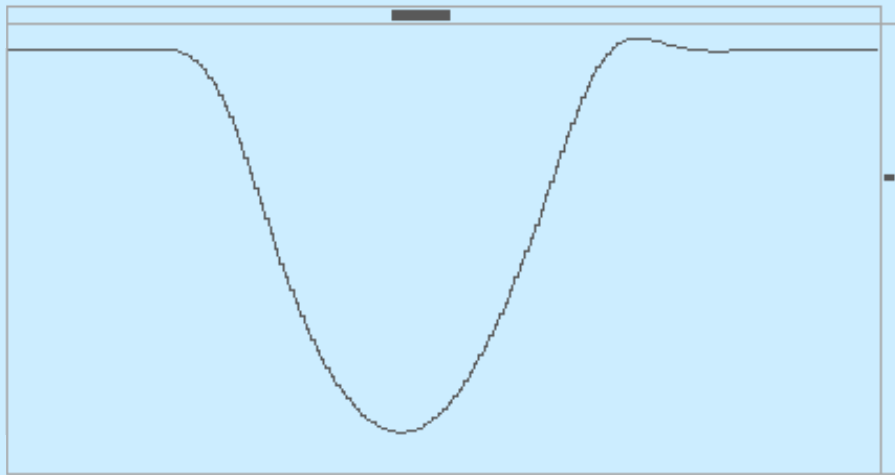




# USER INTERFACE



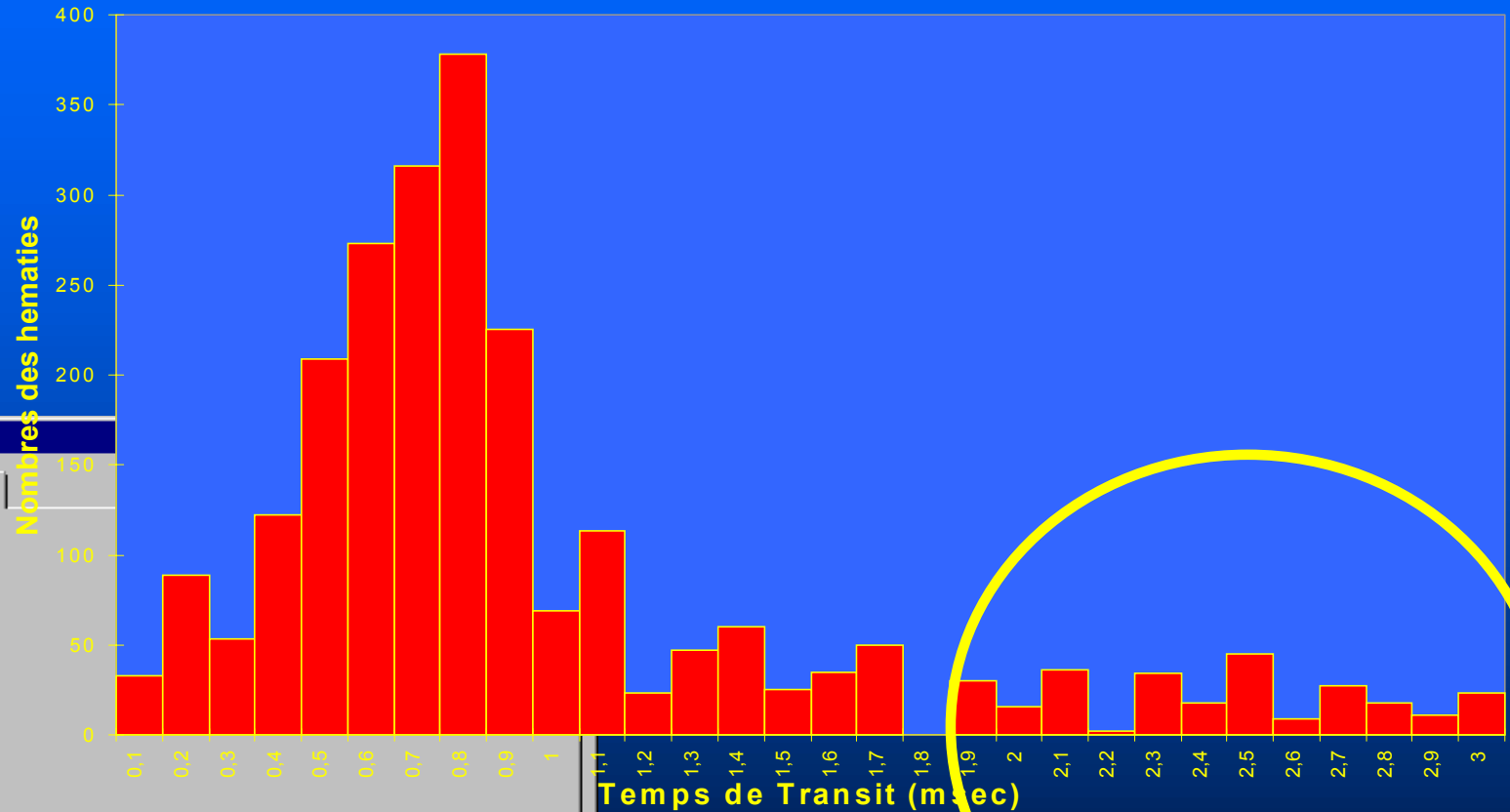
# ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΙΨΗ ΠΑΛΜΩΝ





# ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΥΠΟΠΛΗΘΥΣΜΩΝ

N=2512, <t>=0.9 msec, P=4cm H<sub>2</sub>O



**Analysis Results**

Report | Distribution | Cluster | **Filter**

Filter Enabled On	Min %	Max %
<input checked="" type="checkbox"/> Transit Time	20	100.
<input type="checkbox"/> Height	0	100.
<input checked="" type="checkbox"/> Rise Time	30.	100.
<input type="checkbox"/> Fall Time	0.	100.
<input type="checkbox"/> Transit 100	0.	100.

OK Cancel Apply Help

