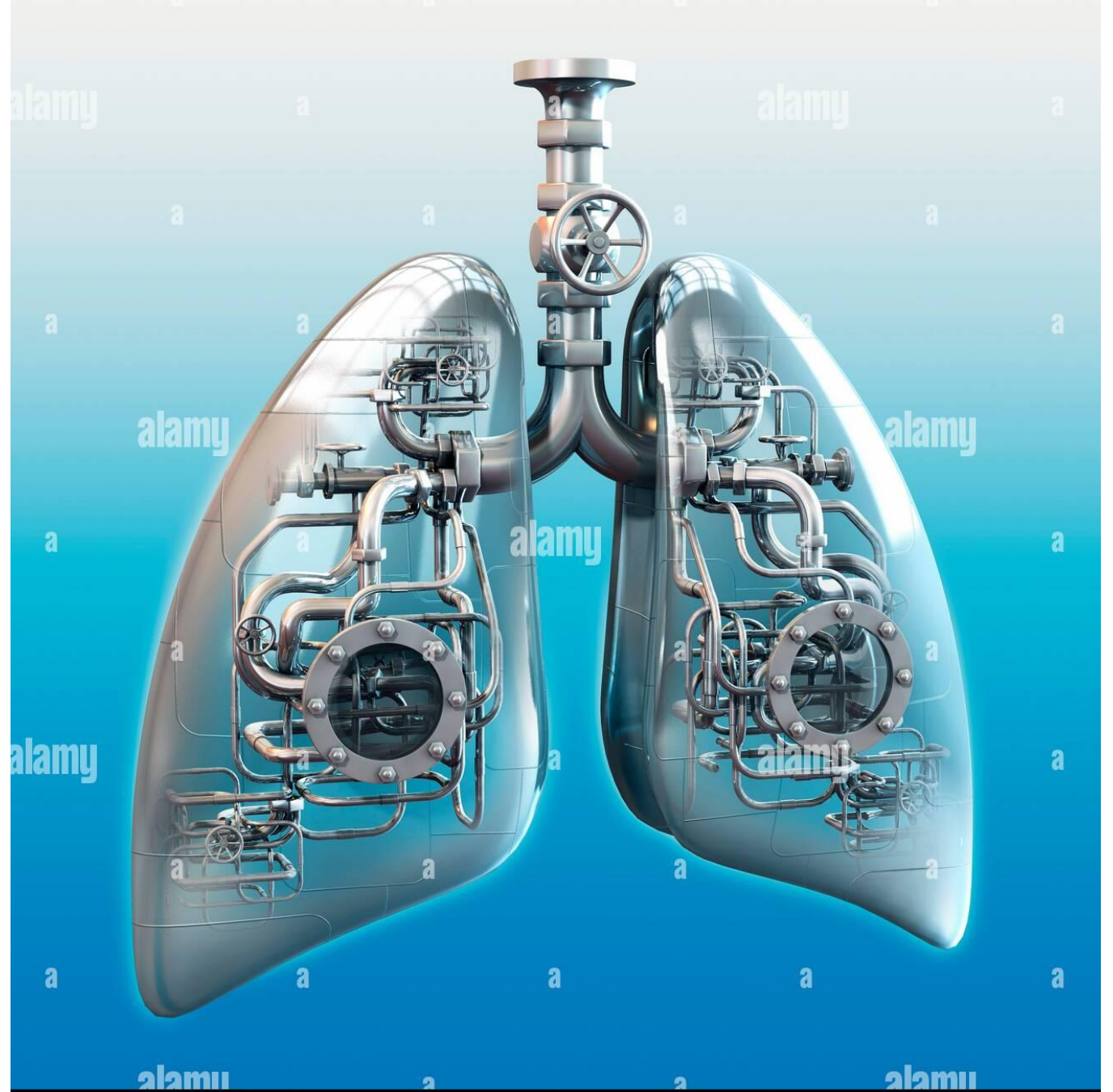


Τεχνητός
Πνεύμονας

Artificial
Lung



Ανατομία κυκλοφοριακού συστήματος

Circulatory system anatomy

nasal cavity

oral cavity

Epiglottis

vocal chords

Trachea

right lung
upper lobe

middle lobe
lower lobe

ρινική κοιλότητα

+ στοματική κοιλότητα

επιγλωττίδα

φωνητική χορδή

+ τραχεία

+ δεξιός πνεύμονας

άνω λοβός

μέσος λοβός

κάτω λοβός

περικάρδιο

Pharynx

larynx

esophagus

left lung

αριστερός πνεύμονας

άνω λοβός

upper lobe

pulmonary artery

heart

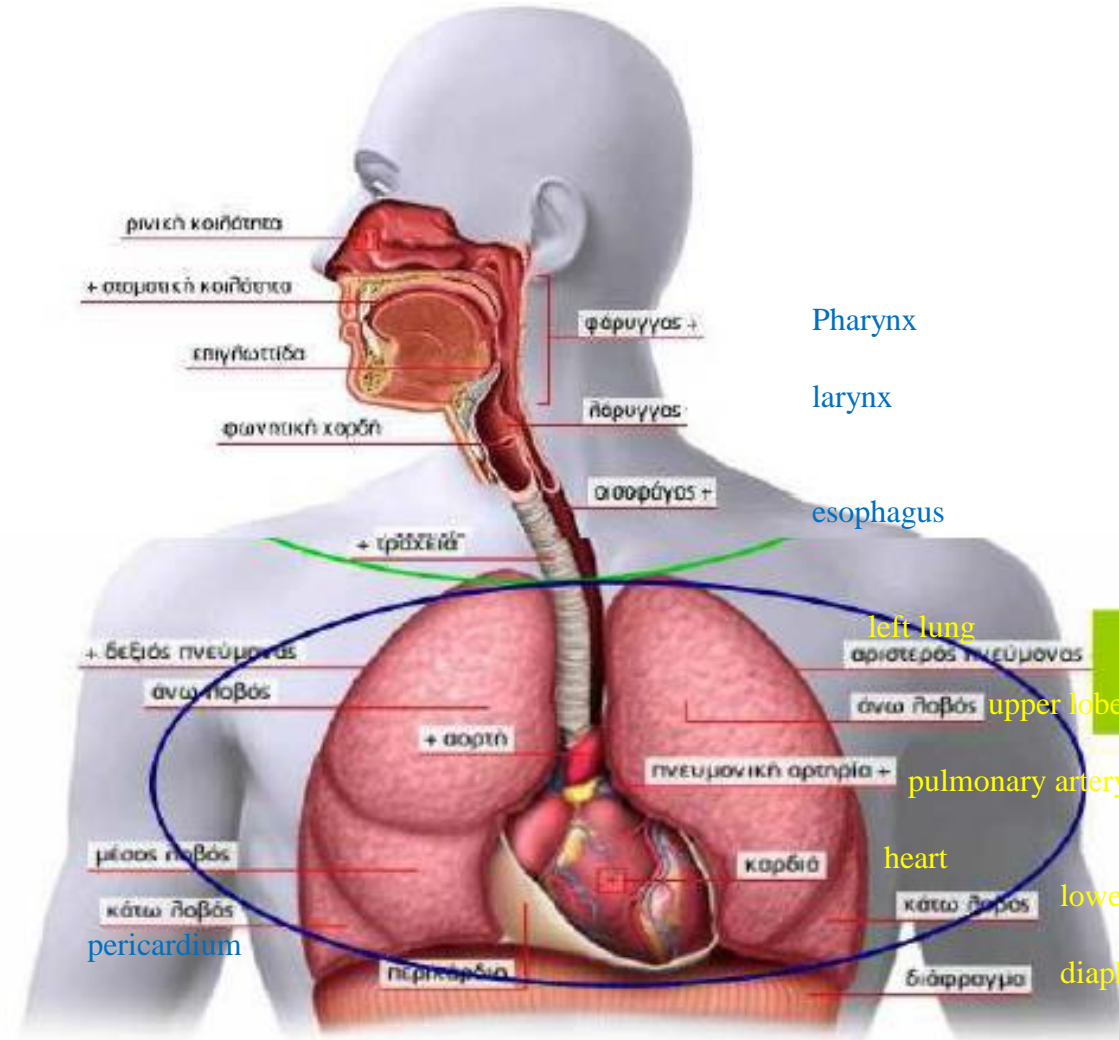
κάτω λοβός

lower lobe

diaphragm

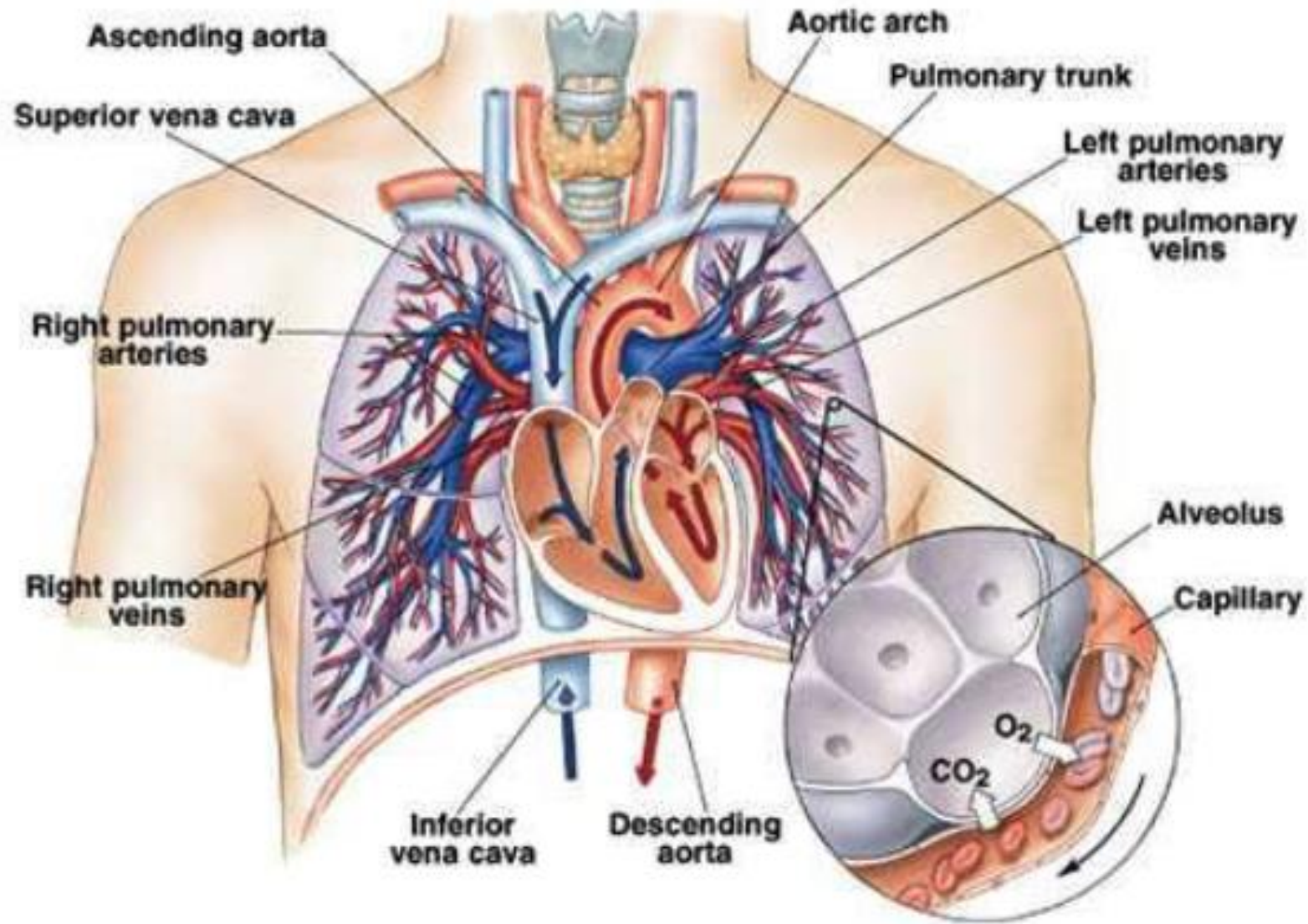
Κατώτερο
Αναπνευστικό

Lower respiratory

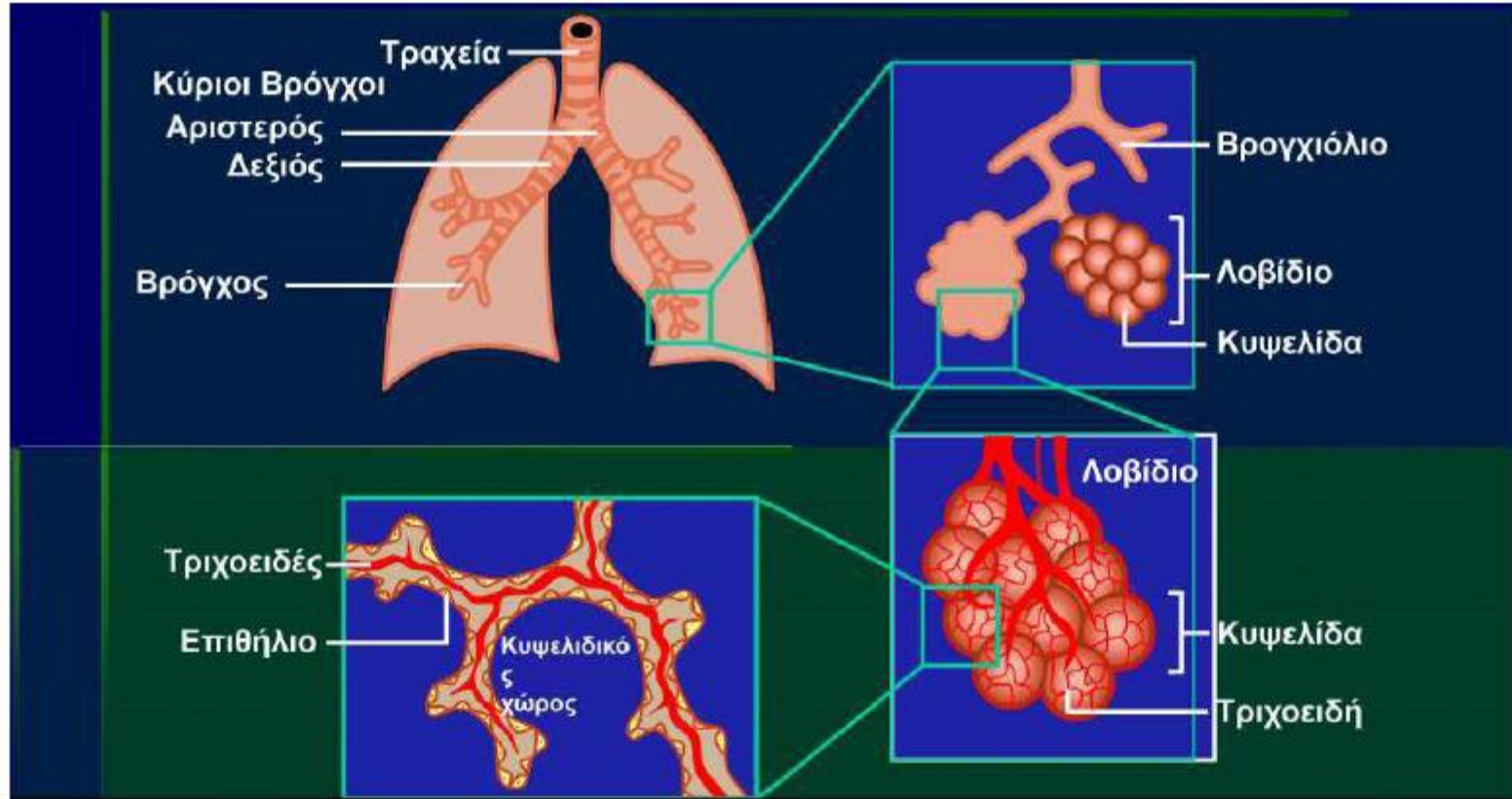


Ο δεξιός πνεύμονας περιέχει 3 λοβούς,
ενώ ο αριστερός 2 λόγω της καρδιάς

The right lung contains 3 lobes,
while the left 2 because of the heart



trachea
main bronchi



Brochiol

Lobe

alveolus

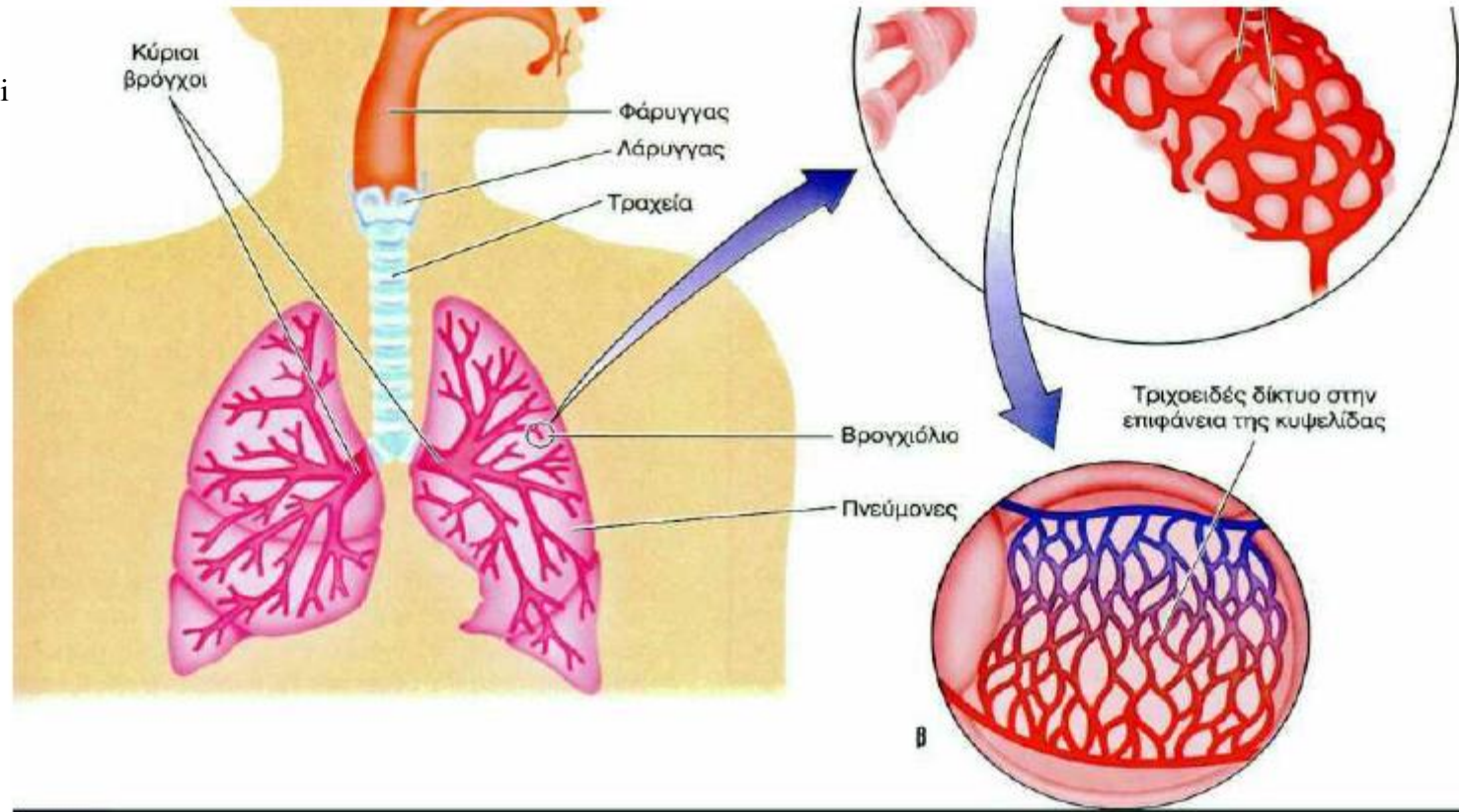
Capillary
epithelium

Alveolus

capillaries

alveolar
space

main
bronchi



capillary net on
alveolar surface

Characteristics of the lungs

- People have an average of 480 million alveoli in their lungs, located at the end of bronchial tubes.
- The alveoli cover a surface of more than 1,399 feet (ft) or 130 square meters (m²).
- Your lungs take in about 1.5 gallons (gl) or 6 liters (L) of air per minute.
- Each alveolus (singular of alveoli) is about 200 micrometers (μm) or 0.007 centimeters (cm) in diameter.

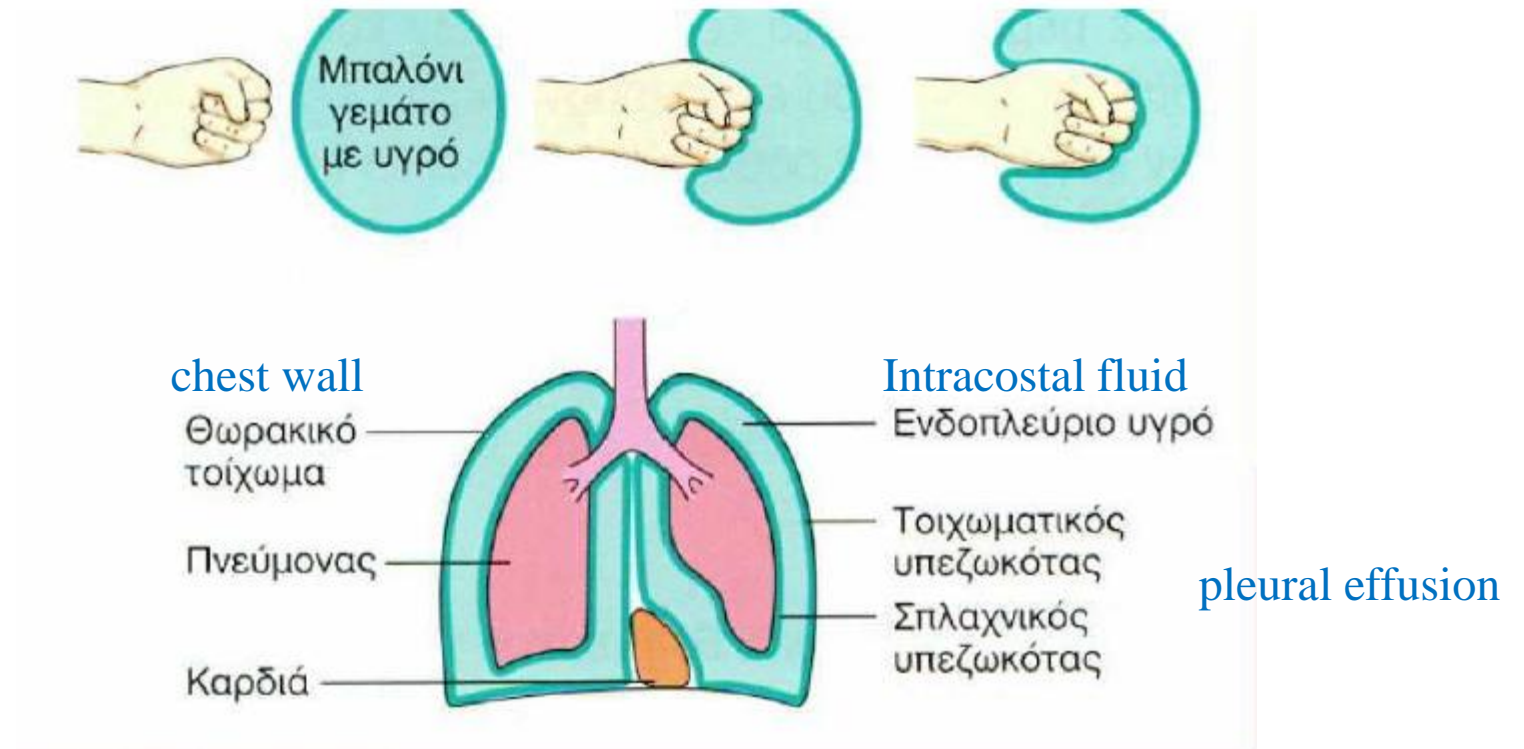
Χαρακτηριστικά των πνευμόνων

- Οι άνθρωποι έχουν κατά μέσο όρο 480 εκατομμύρια κυψελίδες στους πνεύμονές τους, που βρίσκονται στο τέλος των βρογχικών σωλήνων.
- Οι κυψελίδες καλύπτουν μια επιφάνεια μεγαλύτερη από 1.399 πόδια (ft) ή 130 τετραγωνικά μέτρα (m²).
- Οι πνεύμονές σας λαμβάνουν περίπου 1,5 γαλόνια (gl) ή 6 λίτρα (L) αέρα ανά λεπτό.
- Κάθε κυψελίδα (μοναδική των κυψελίδων) έχει διάμετρο περίπου 200 μικρόμετρα (μm) ή 0,007 εκατοστά (cm).

Το ενδοπλεύριο υγρό έχει την συμπεριφορά ενός μπαλονιού
Όταν πιέζεται από την γροθιά μας. Προστατεύει το σύστημα Πνεύμονες-καρδιά από χτυπήματα, κραδασμούς, ταλαντώσεις κ.λπ. Σε περίπτωση ρήξης δημιουργείται πλευρίτιδα, πνευμονία και άλλοι νόσοι

Intracostal fluid behaves like a balloon

When pressed by our fist. It protects the system Lungs-heart from shocks, vibrations, oscillations, etc. In case of rupture, pleurisy, pneumonia and other diseases are created



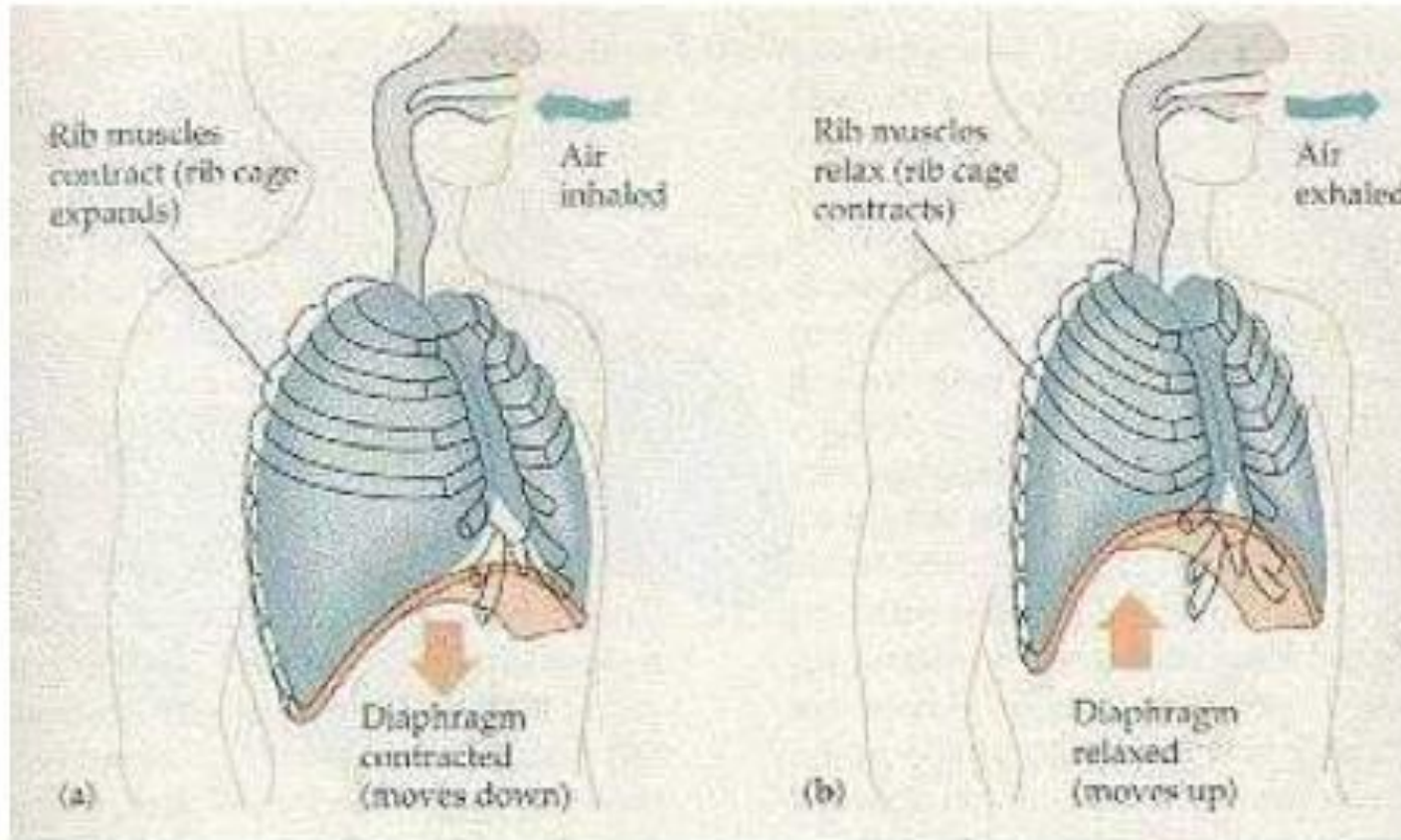
Κυτταρική Αναπνοή: Κατανάλωση οξυγόνου και παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα στα μιτοχόνδρια των κυττάρων

Πνευμονική Αναπνοή: Ανταλλαγή αερίων ($O_2 - CO_2$) μεταξύ ολόκληρου του οργανισμού και του περιβάλλοντος

Cellular Respiration: Consumption of oxygen and production of carbon dioxide in the mitochondria of cells

Pulmonary Respiration Exchange: of gases ($O_2 - CO_2$) between the whole organism and the environment

O_2 is taken from the nose (clean and warm), while CO_2 from the veins



Το O_2 λαμβάνεται από την μύτη (καθαρό και ζεστό), ενώ το CO_2 από τις φλέβες

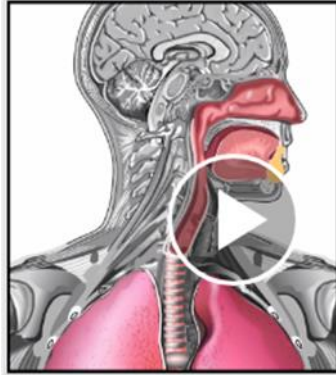
Ανταλλαγή φυσικού αερίου



ΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ

- Ο αέρας εισέρχεται στο σώμα μέσω του στόματος ή της μύτης και μετακινείται γρήγορα στον **φάρυγγα ή το λαιμό**. Από εκεί, περνά από τον **λάρυγγα, ή φωνητικό κουτί**, και εισέρχεται στην **τραχεία**.
- Η τραχεία είναι ένας ισχυρός σωλήνας που περιέχει δακτυλίους χόνδρου που την εμποδίζουν να καταρρεύσει.
- Μέσα στους πνεύμονες, η τραχεία διακλαδίζεται σε αριστερό και δεξιό βρόγχο. Αυτά χωρίζονται περαιτέρω σε μικρότερους και μικρότερους κλάδους που ονομάζονται **βρογχιόλια**.
- Τα μικρότερα βρογχιόλια καταλήγουν σε μικροσκοπικούς αερόσακους. Αυτά ονομάζονται **κυψελίδες**. Φουσκώνουν όταν ένα άτομο εισπνέει και ξεφουσκώνουν όταν ένα άτομο εκπνέει. Κατά την ανταλλαγή αερίων, το οξυγόνο μετακινείται από τους πνεύμονες στην κυκλοφορία του αίματος. Την ίδια στιγμή το διοξείδιο του άνθρακα περνά από το αίμα στους πνεύμονες. Αυτό συμβαίνει στους πνεύμονες μεταξύ των κυψελίδων και ενός δικτύου μικροσκοπικών αιμοφόρων αγγείων που ονομάζονται **τριχοειδή**, τα οποία βρίσκονται στα τοιχώματα των κυψελίδων.
- Εδώ βλέπετε τα ερυθρά αιμοσφαίρια να ταξιδεύουν μέσα από τα τριχοειδή αγγεία. Τα τοιχώματα των κυψελίδων μοιράζονται μια μεμβράνη με τα τριχοειδή αγγεία. Τόσο κοντά είναι.
- Αυτό επιτρέπει στο οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα να διαχέονται ή να κινούνται ελεύθερα μεταξύ του αναπνευστικού συστήματος και της κυκλοφορίας του αίματος.
- Τα μόρια οξυγόνου προσκολλώνται στα ερυθρά αιμοσφαίρια, τα οποία ταξιδεύουν πίσω στην καρδιά. Ταυτόχρονα, τα μόρια διοξειδίου του άνθρακα στις κυψελίδες εκτοξεύονται από το σώμα την επόμενη φορά που ένα άτομο εκπνέει.
- Η ανταλλαγή αερίων επιτρέπει στο σώμα να αναπληρώσει το οξυγόνο και να αποβάλει το διοξείδιο του άνθρακα. Το να κάνεις και τα δύο είναι απαραίτητο για την επιβίωση.

Gas exchange



Overview

- Air enters the body through the mouth or nose and quickly moves to the **pharynx, or throat**. From there, it passes through the **larynx, or voice box**, and enters the **trachea**.
- The trachea is a strong tube that contains rings of cartilage that prevent it from collapsing.
- Within the lungs, the trachea branches into a left and right bronchus. These further divide into smaller and smaller branches called **bronchioles**.
- The smallest bronchioles end in tiny air sacs. These are called **alveoli**. They inflate when a person inhales and deflate when a person exhales.
- During gas exchange oxygen moves from the lungs to the bloodstream. At the same time carbon dioxide passes from the blood to the lungs. This happens in the lungs between the alveoli and a network of tiny blood vessels called **capillaries**, which are located in the walls of the alveoli.
- Here you see red blood cells traveling through the capillaries. The walls of the alveoli share a membrane with the capillaries. That's how close they are.
- This lets oxygen and carbon dioxide diffuse, or move freely, between the respiratory system and the bloodstream.
- Oxygen molecules attach to red blood cells, which travel back to the heart. At the same time, the carbon dioxide molecules in the alveoli are blown out of the body the next time a person exhales.
- Gas exchange allows the body to replenish the oxygen and eliminate the carbon dioxide. Doing both is necessary for survival.

Ανταλλαγή αερίων

Gas Exchange

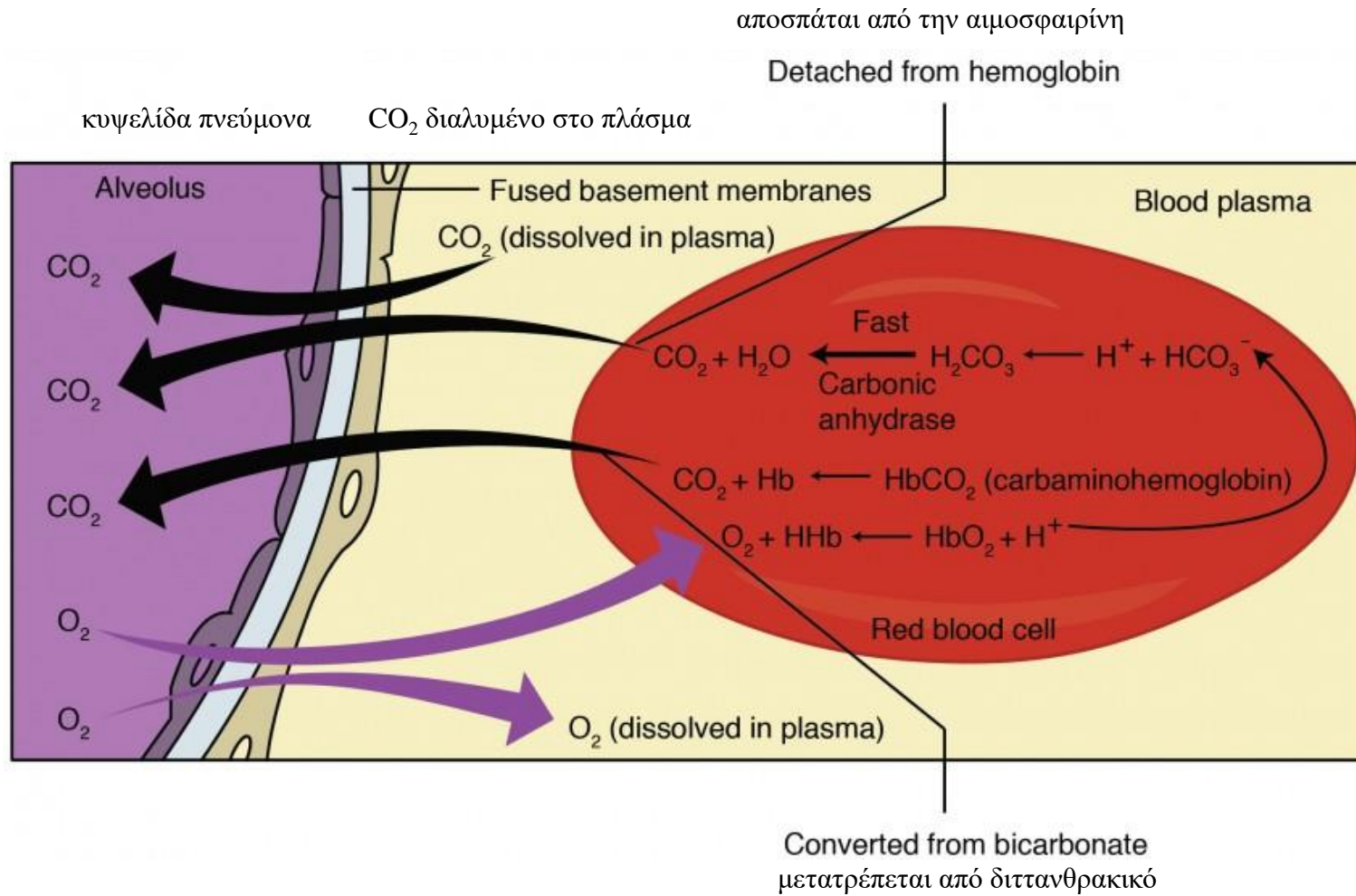
Gas exchange occurs at two sites in the body: **in the lungs**, where oxygen is picked up and carbon dioxide is released at the respiratory membrane, and **at the tissues**, where oxygen is released and carbon dioxide is picked up. **External respiration** is the exchange of gases with the external environment, and occurs in the alveoli of the lungs. **Internal respiration** is the exchange of gases with the internal environment, and occurs in the tissues. The actual exchange of gases occurs due to simple diffusion. Energy is not required to move oxygen or carbon dioxide across membranes. Instead, these gases follow pressure gradients that allow them to diffuse. The anatomy of the lung maximizes the diffusion of gases: The respiratory membrane is highly permeable to gases; the respiratory and blood capillary membranes are very thin; and there is a large surface area throughout the lungs.

Η ανταλλαγή αερίων λαμβάνει χώρα σε δύο σημεία του σώματος: **στους πνεύμονες**, όπου συλλέγεται οξυγόνο και απελευθερώνεται διοξείδιο του άνθρακα στην αναπνευστική μεμβράνη, και **στους ιστούς**, όπου απελευθερώνεται οξυγόνο και λαμβάνεται διοξείδιο του άνθρακα.

Η **εξωτερική αναπνοή** είναι η ανταλλαγή αερίων με το εξωτερικό περιβάλλον, και συμβαίνει στις κυψελίδες των πνευμόνων. Η **εσωτερική αναπνοή** είναι η ανταλλαγή αερίων με το εσωτερικό περιβάλλον και συμβαίνει στους ιστούς. Η πραγματική ανταλλαγή αερίων συμβαίνει λόγω της απλής διάχυσης. Δεν απαιτείται ενέργεια για τη μετακίνηση του οξυγόνου ή του διοξειδίου του άνθρακα στις μεμβράνες. Αντίθετα, αυτά τα αέρια ακολουθούν βαθμίδες πίεσης που τους επιτρέπουν να διαχέονται. Η ανατομία του πνεύμονα μεγιστοποιεί τη διάχυση των αερίων: Η αναπνευστική μεμβράνη είναι εξαιρετικά διαπερατή στα αέρια. οι μεμβράνες του αναπνευστικού και των τριχοειδών αίματος είναι πολύ λεπτές. και υπάρχει μεγάλη επιφάνεια σε όλους τους πνεύμονες.

External Respiration

The pulmonary artery carries deoxygenated blood into the lungs from the heart, where it branches and eventually becomes the capillary network composed of pulmonary capillaries. These pulmonary capillaries create the respiratory membrane with the alveoli. External respiration occurs as a function of partial pressure differences in oxygen and carbon dioxide between the alveoli and the blood in the pulmonary capillaries.



In external respiration, oxygen diffuses across the respiratory membrane from the alveolus to the capillary, whereas carbon dioxide diffuses out of the capillary into the alveolus.

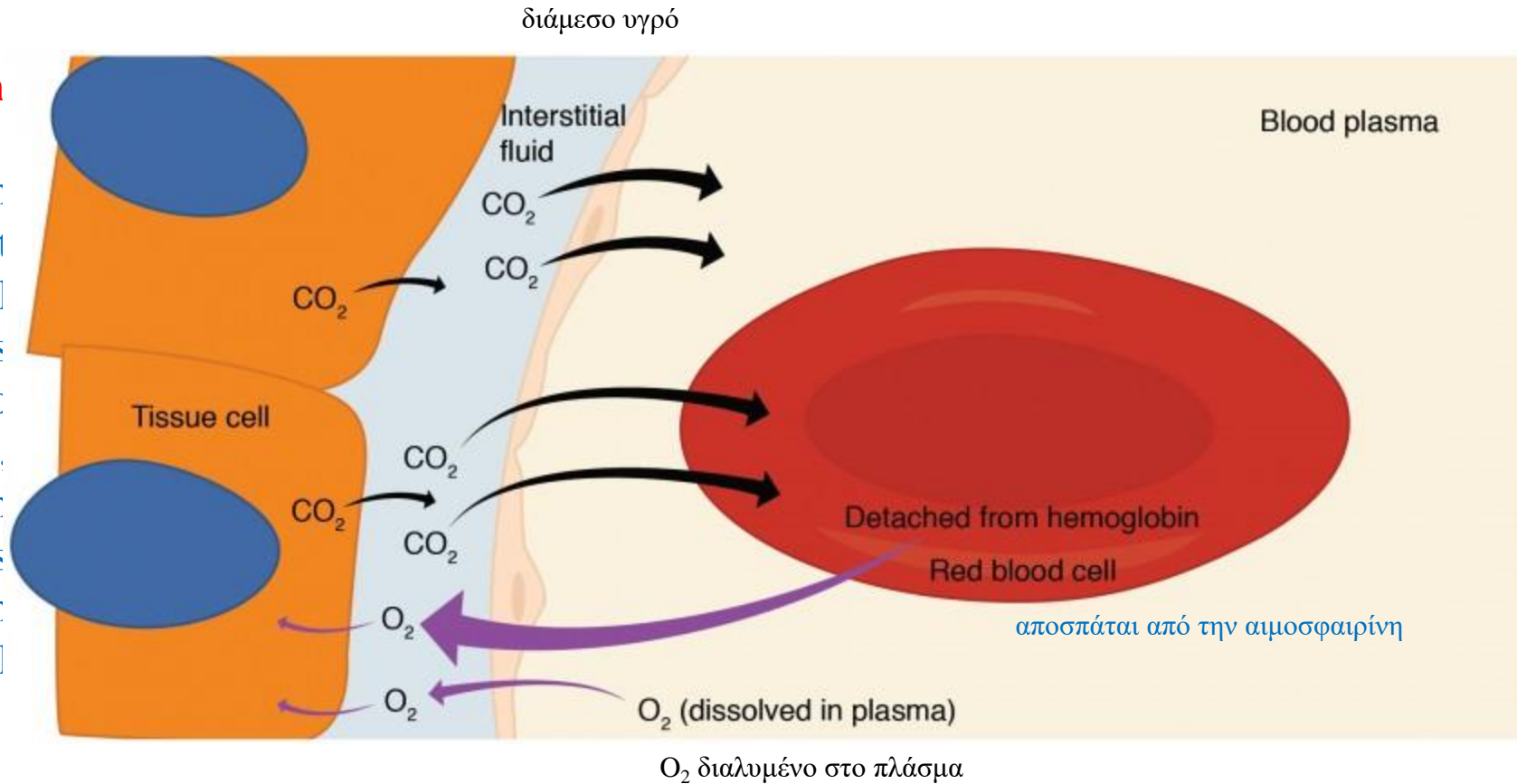
Στην εξωτερική αναπνοή, το οξυγόνο διαχέεται κατά μήκος της αναπνευστικής μεμβράνης από την κυψελίδα προς το τριχοειδές, ενώ το διοξείδιο του άνθρακα διαχέεται έξω από το τριχοειδές στην κυψελίδα.

Εξωτερική αναπνοή

Η πνευμονική αρτηρία μεταφέρει αποξυγеноμένο αίμα στους πνεύμονες από την καρδιά, όπου διακλαδίζεται και τελικά γίνεται το τριχοειδές δίκτυο που αποτελείται από πνευμονικά τριχοειδή αγγεία. Αυτά τα πνευμονικά τριχοειδή δημιουργούν την αναπνευστική μεμβράνη με τις κυψελίδες. Η εξωτερική αναπνοή συμβαίνει ως συνάρτηση των διαφορών μερικής πίεσης στο οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα μεταξύ των κυψελίδων και του αίματος στα πνευμονικά τριχοειδή αγγεία.

Internal Respiration

Internal respiration is gas exchange that occurs at the level of body tissues (Figure). Similar to external respiration, internal respiration also occurs as simple diffusion due to a partial pressure gradient.



Εσωτερική αναπνοή

Η εσωτερική αναπνοή είναι η ανταλλαγή αερίων που συμβαίνει στο επίπεδο των ιστών του σώματος (Εικόνα). Παρόμοια με την εξωτερική αναπνοή, η εσωτερική αναπνοή εμφανίζεται επίσης ως απλή διάχυση λόγω μερικής κλίσης πίεσης.

Oxygen diffuses out of the capillary and into cells, whereas carbon dioxide diffuses out of cells and into the capillary.

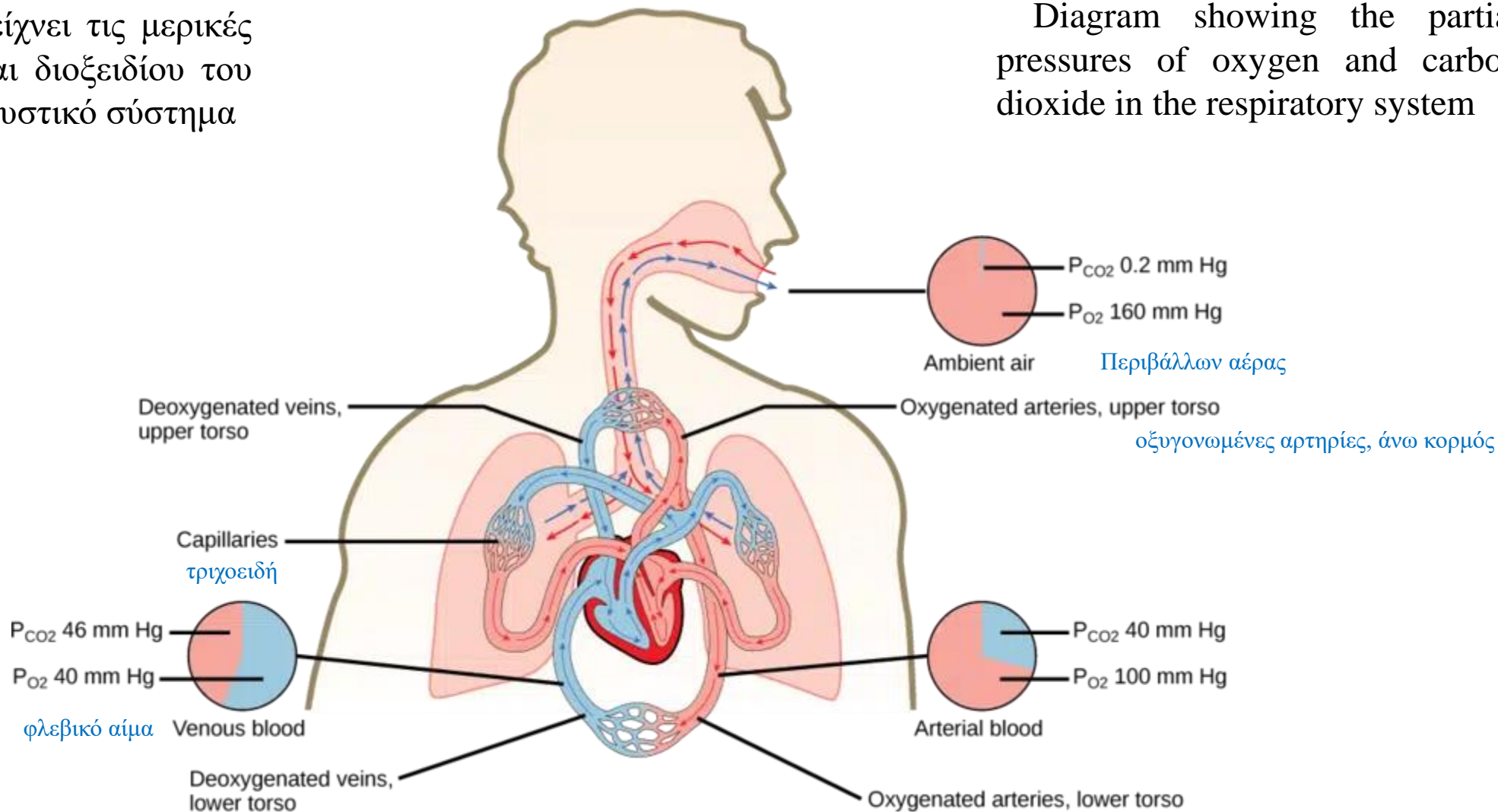
Το οξυγόνο διαχέεται έξω από το τριχοειδές και στα κύτταρα, ενώ το διοξείδιο του άνθρακα διαχέεται έξω από τα κύτταρα και μέσα στο τριχοειδές.

Διάχυση Οξυγόνου

Διάγραμμα που δείχνει τις μερικές πιέσεις οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα στο αναπνευστικό σύστημα

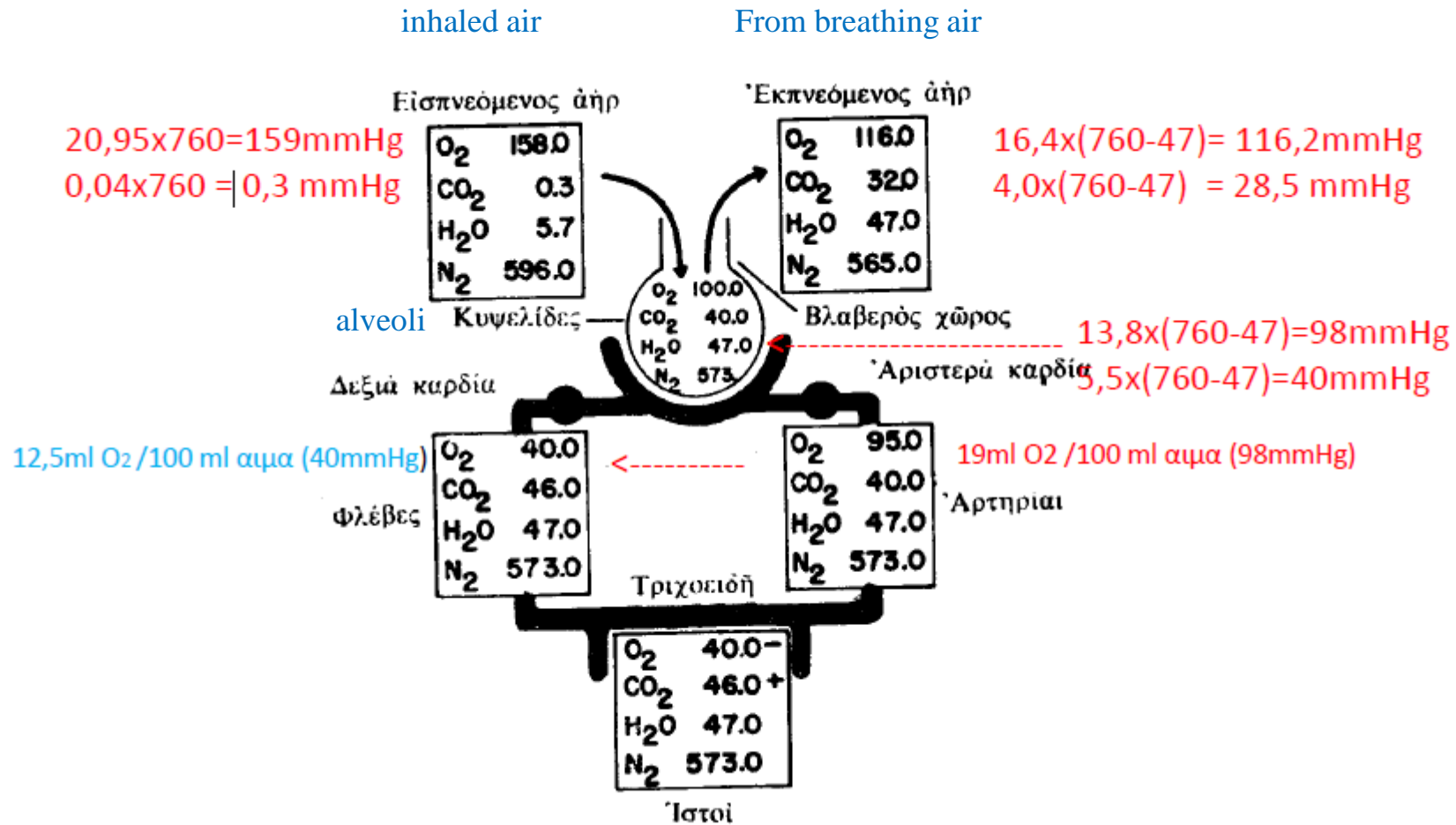
Diffusion of Oxygen

Diagram showing the partial pressures of oxygen and carbon dioxide in the respiratory system



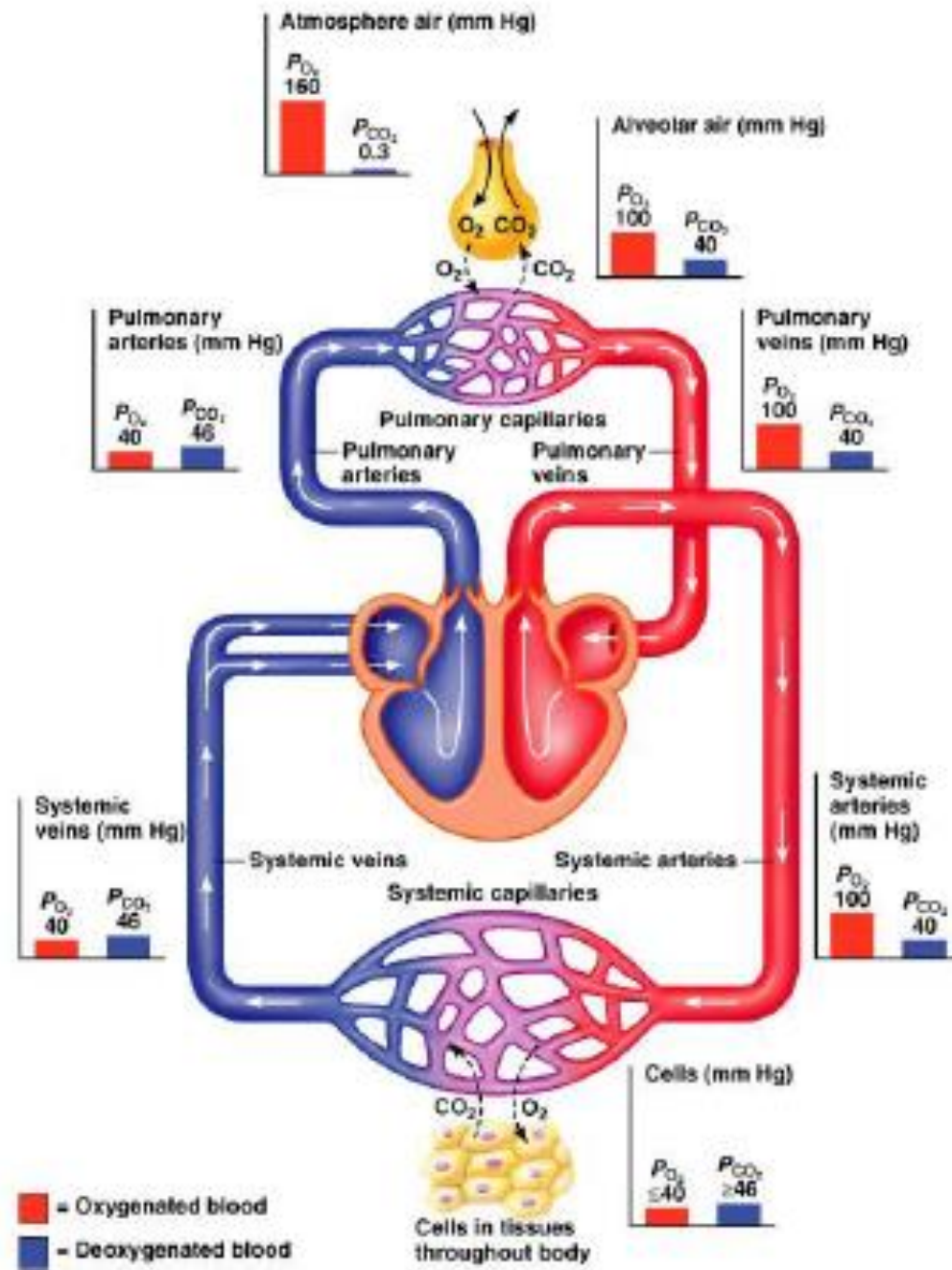
Μερικές πιέσεις αερίων
(στην θάλασσα)

Some gas pressures
(at sea)



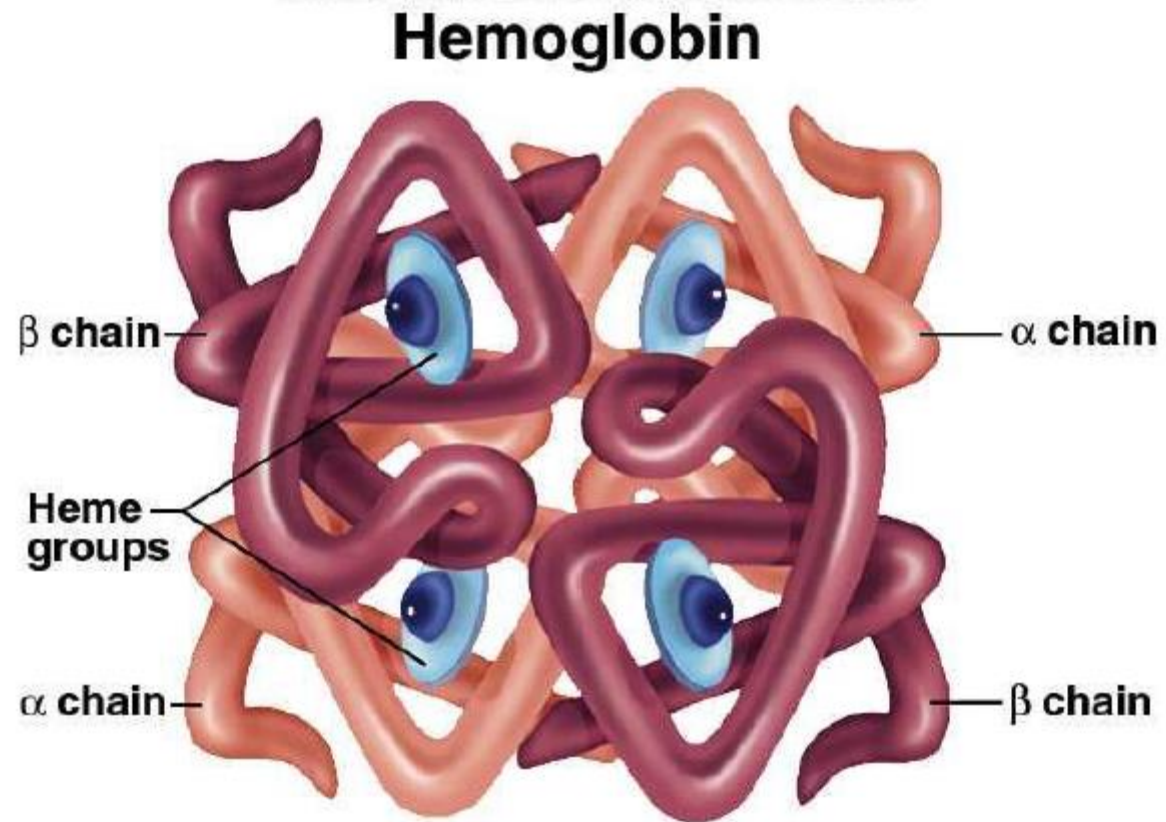
Μερικές πιέσεις αερίων

Some gas pressures



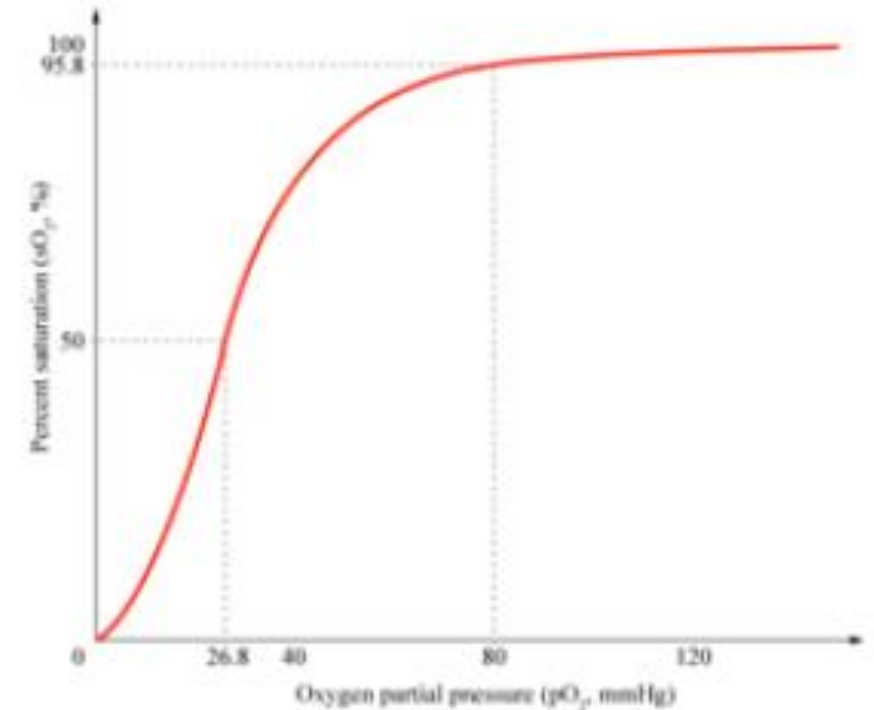
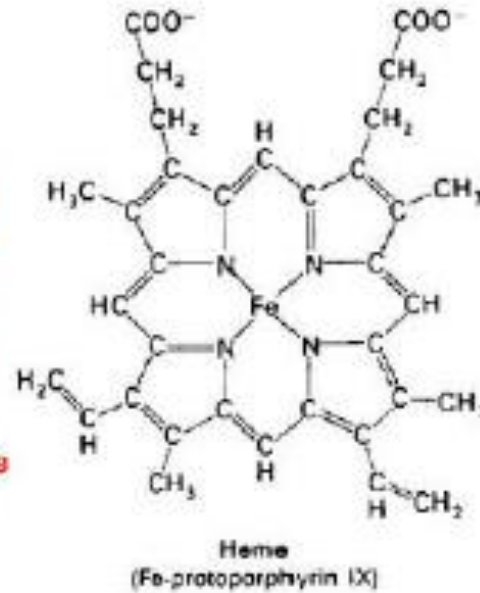
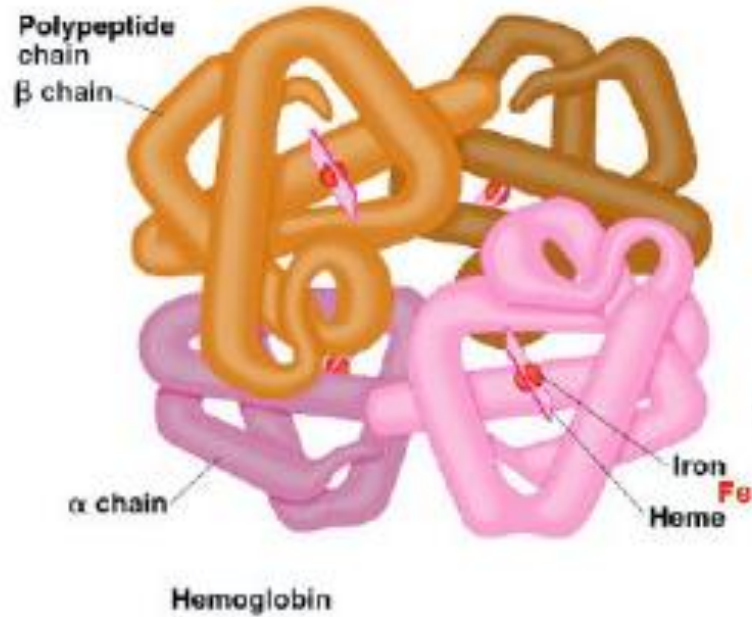
Το μόριο της αιμοσφαιρίνης, Hb

The hemoglobin molecule, Hb



Το μόριο της αιμοσφαιρίνης- Δέσμευση 4 μορίων O₂

The hemoglobin molecule - Binding of 4 O₂ molecules

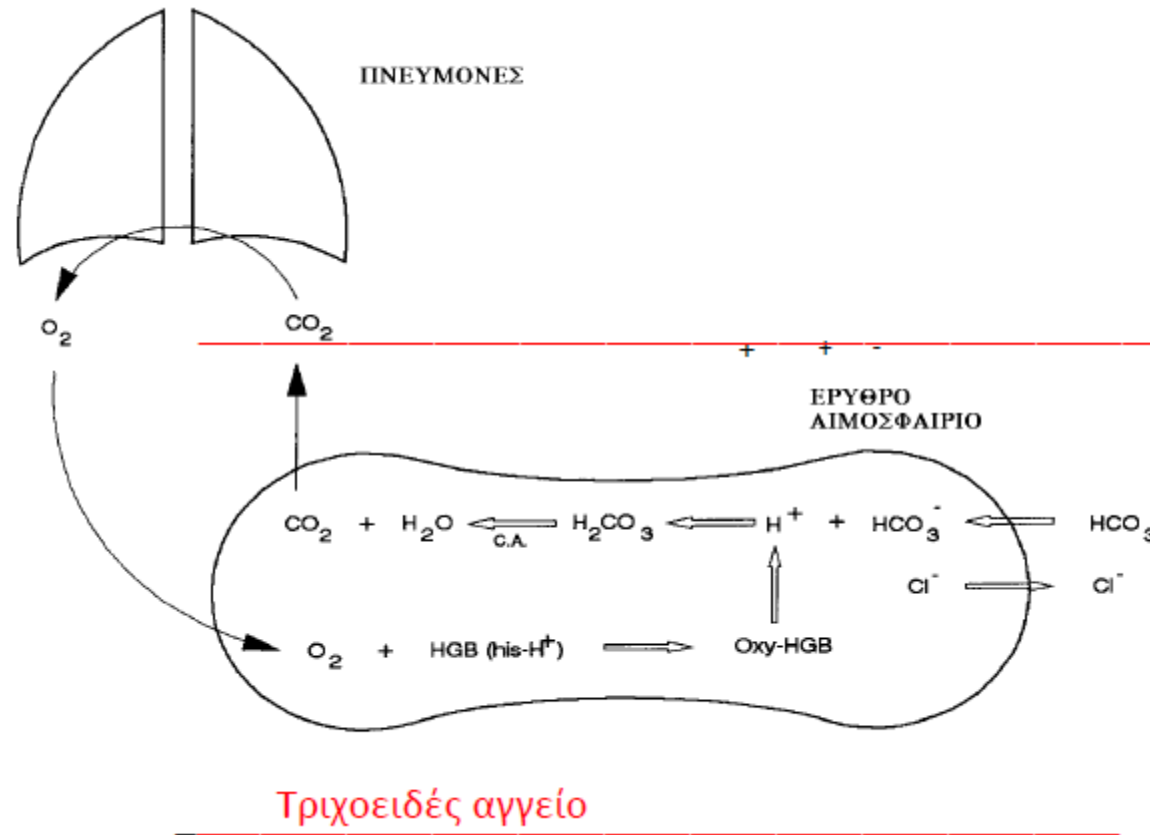


1 ερυθρό φέρει 250 εκατ. μόρια Hb και άρα 1 δις μόρια O₂
MB (Hb) = 68800, ή 1Mol Hb = 68.800 gr
Γραμμομοριακός Όγκος 4Mol O₂ = 89600ml
1gr Hb μεταφέρει 1,32ml O₂
C Hb = 15.6gr/100ml αίματος X 1,32ml O₂/grHb = 20,5ml O₂
/100ml αίματος

1 red blood cell contains 250 million Hb molecules and therefore 1 billion O₂ molecules
MB (Hb) = 68800, or 1Mol Hb = 68,800 gr
Molar Volume 4Mol O₂ = 89600ml
1gr of Hb carries 1.32ml of O₂
C Hb = 15.6gr/100ml blood X 1.32ml O₂/gr Hb = 20.5ml O₂
/100ml blood

Χημικές αντιδράσεις στο αίμα

Chemical reactions in the blood



HGB = Υδρογονωμένη αιμοσφαιρίνη

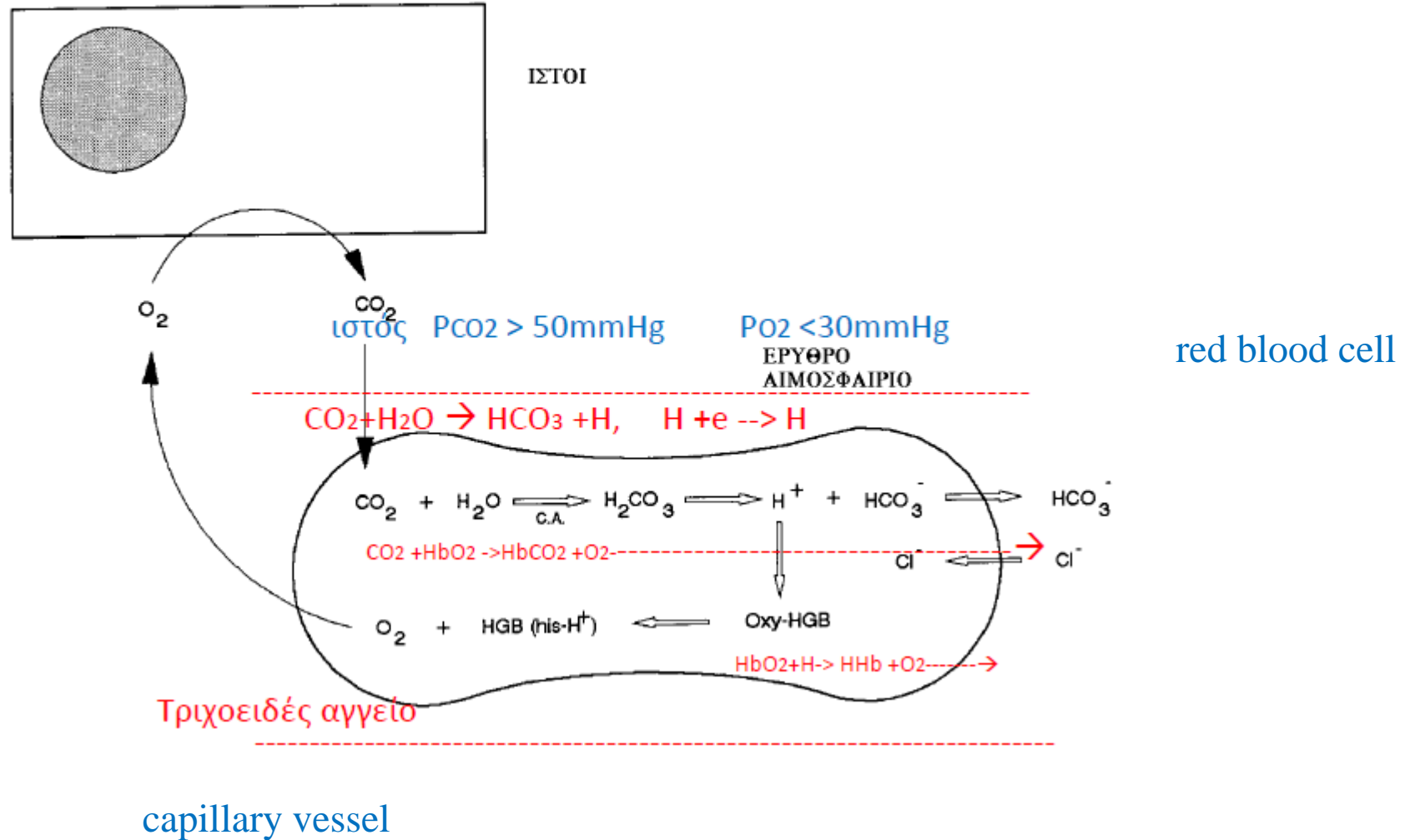
Oxy-HGB = Οξυγονωμένη αιμοσφαιρίνη

Hydrogenated hemoglobin

Oxygenated hemoglobin

Χημικές αντιδράσεις στο αίμα

Chemical reactions in the blood



Ανασκόπηση

Η συμπεριφορά των αερίων μπορεί να εξηγηθεί από τις αρχές του νόμου του Dalton και του νόμου του Henry, που και οι δύο περιγράφουν πτυχές της ανταλλαγής αερίων. Ο νόμος του Dalton λέει ότι κάθε συγκεκριμένο αέριο σε ένα μείγμα αερίων ασκεί δύναμη (τη μερική του πίεση) ανεξάρτητα από τα άλλα αέρια του μείγματος. Ο νόμος του Henry δηλώνει ότι η ποσότητα ενός συγκεκριμένου αερίου που διαλύεται σε ένα υγρό είναι συνάρτηση της μερικής πίεσης του. Όσο μεγαλύτερη είναι η μερική πίεση ενός αερίου, τόσο περισσότερο από αυτό το αέριο θα διαλυθεί σε ένα υγρό, καθώς το αέριο κινείται προς την ισορροπία. Τα μόρια αερίου κινούνται προς τα κάτω σε μια βαθμίδα πίεσης. Με άλλα λόγια, το αέριο μετακινείται από μια περιοχή υψηλής πίεσης σε μια περιοχή χαμηλής πίεσης. Η μερική πίεση του οξυγόνου είναι υψηλή στις κυψελίδες και χαμηλή στο αίμα των πνευμονικών τριχοειδών αγγείων. Ως αποτέλεσμα, το οξυγόνο διαχέεται στην αναπνευστική μεμβράνη από τις κυψελίδες στο αίμα. Αντίθετα, η μερική πίεση του διοξειδίου του άνθρακα είναι υψηλή στα πνευμονικά τριχοειδή αγγεία και χαμηλή στις κυψελίδες. Επομένως, το διοξείδιο του άνθρακα διαχέεται στην αναπνευστική μεμβράνη από το αίμα στις κυψελίδες. Η ποσότητα οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα που διαχέεται στην αναπνευστική μεμβράνη είναι παρόμοια.

Ο **αερισμός** είναι η διαδικασία που μετακινεί τον αέρα μέσα και έξω από τις κυψελίδες και η **αιμάτωση** επηρεάζει τη ροή του αίματος στα τριχοειδή αγγεία. Και τα δύο είναι σημαντικά στην ανταλλαγή αερίων, καθώς ο αερισμός πρέπει να είναι επαρκής για να δημιουργήσει υψηλή μερική πίεση οξυγόνου στις κυψελίδες. Εάν ο αερισμός είναι ανεπαρκής και η μερική πίεση του οξυγόνου πέφτει στον κυψελιδικό αέρα, το τριχοειδές συστέλλεται και η ροή του αίματος ανακατευθύνεται στις κυψελίδες με επαρκή αερισμό. Η εξωτερική αναπνοή αναφέρεται στην ανταλλαγή αερίων που συμβαίνει στις κυψελίδες, ενώ η εσωτερική αναπνοή αναφέρεται στην ανταλλαγή αερίων που συμβαίνει στον ιστό. Και οι δύο οδηγούνται από μερικές διαφορές πίεσης.

Review

The behavior of gases can be explained by the principles of Dalton's law and Henry's law, both of which describe aspects of gas exchange. Dalton's law states that each specific gas in a mixture of gases exerts force (its partial pressure) independently of the other gases in the mixture. Henry's law states that the amount of a specific gas that dissolves in a liquid is a function of its partial pressure. The greater the partial pressure of a gas, the more of that gas will dissolve in a liquid, as the gas moves toward equilibrium. Gas molecules move down a pressure gradient; in other words, gas moves from a region of high pressure to a region of low pressure. The partial pressure of oxygen is high in the alveoli and low in the blood of the pulmonary capillaries. As a result, oxygen diffuses across the respiratory membrane from the alveoli into the blood. In contrast, the partial pressure of carbon dioxide is high in the pulmonary capillaries and low in the alveoli. Therefore, carbon dioxide diffuses across the respiratory membrane from the blood into the alveoli. The amount of oxygen and carbon dioxide that diffuses across the respiratory membrane is similar.

Ventilation is the process that moves air into and out of the alveoli, and **perfusion** affects the flow of blood in the capillaries. Both are important in gas exchange, as ventilation must be sufficient to create a high partial pressure of oxygen in the alveoli. If ventilation is insufficient and the partial pressure of oxygen drops in the alveolar air, the capillary is constricted and blood flow is redirected to alveoli with sufficient ventilation. External respiration refers to gas exchange that occurs in the alveoli, whereas internal respiration refers to gas exchange that occurs in the tissue. Both are driven by partial pressure differences.

Glossary

- **Dalton's law**: statement of the principle that a specific gas type in a mixture exerts its own pressure, as if that specific gas type was not part of a mixture of gases
- **external respiration**: gas exchange that occurs in the alveoli
- **Henry's law**: statement of the principle that the concentration of gas in a liquid is directly proportional to the solubility and partial pressure of that gas
- **internal respiration**: gas exchange that occurs at the level of body tissues
- **partial pressure**: force exerted by each gas in a mixture of gases
- **total pressure**: sum of all the partial pressures of a gaseous mixture
- **ventilation**: movement of air into and out of the lungs; consists of inspiration and expiration

Γλωσσάριο

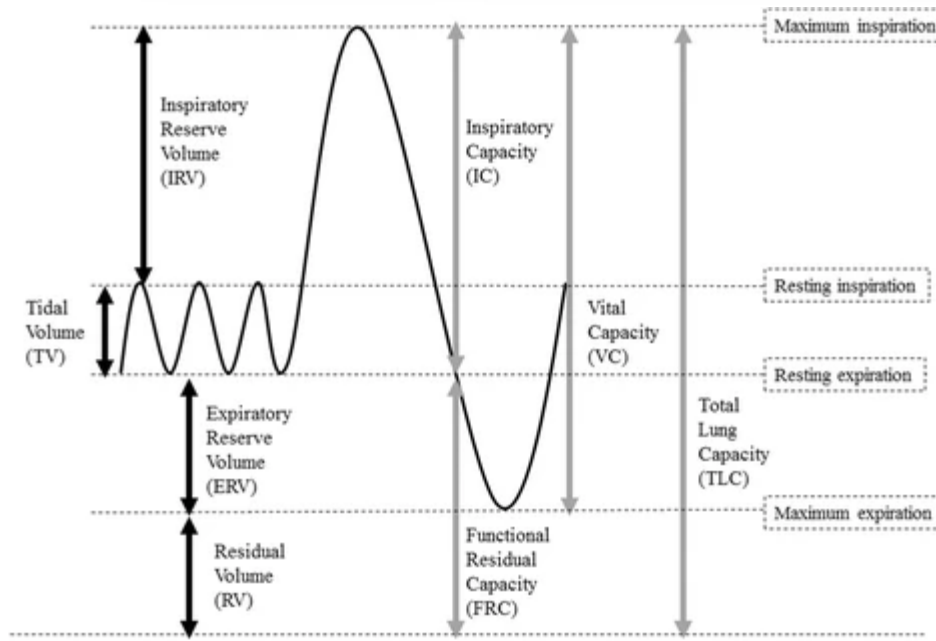
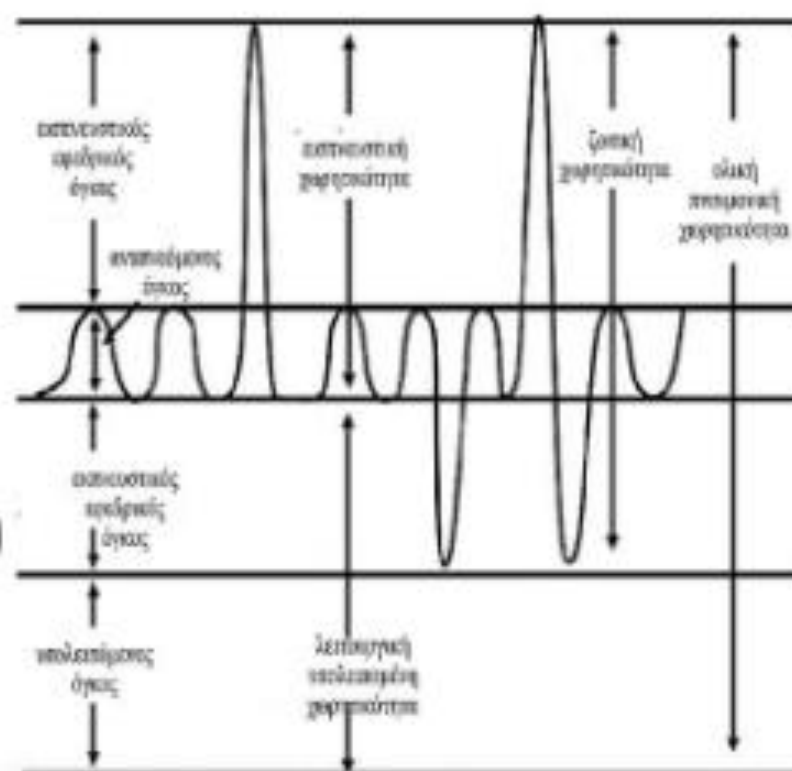
- **Νόμος του Dalton**: δήλωση της αρχής ότι ένας συγκεκριμένος τύπος αερίου σε ένα μείγμα ασκεί τη δική του πίεση, σαν να μην ήταν μέρος ενός μείγματος αερίων
- **εξωτερική αναπνοή**: ανταλλαγή αερίων που συμβαίνει στις κυψελίδες
- **Νόμος του Henry**: δήλωση της αρχής ότι η συγκέντρωση του αερίου σε ένα υγρό είναι ευθέως ανάλογη με τη διαλυτότητα και τη μερική πίεση αυτού του αερίου
- **εσωτερική αναπνοή**: ανταλλαγή αερίων που συμβαίνει στο επίπεδο των ιστών του σώματος
- **μερική πίεση**: δύναμη που ασκείται από κάθε αέριο σε μείγμα αερίων
- **ολική πίεση**: άθροισμα όλων των μερικών πιέσεων ενός αερίου μείγματος
- **αερισμός**: κίνηση του αέρα μέσα και έξω από τους πνεύμονες. αποτελείται από εισπνοή και εκπνοή

Χωρητικότητα των πνευμόνων

Εάν ένα άτομο εισπνεύσει μέχρι την ολική πνευμονική χωρητικότητα και εκπνεύσει έπειτα όσο το δυνατόν πιο βίαια και όσο περισσότερο αέρα μπορεί, ο βίαια εκπνεόμενος όγκος κατά την διάρκεια του πρώτου δευτερολέπτου της εκπνοής (FEV1) και η βίαιη ζωτική χωρητικότητα (FVC), μπορούν να καθοριστούν

Ο λόγος FEV1/FVC παρέχει πληροφορίες για την αντίσταση του αέρα. Κανονικά, περίπου 80% της FVC θα εξέλθει κατά την διάρκεια του πρώτου δευτερολέπτου. Αν η αντίσταση αυξάνεται, το ποσοστό που εκπνέεται κατά την διάρκεια του πρώτου δευτερολέπτου θα μειωθεί.

- Εισπνευστική χωρητικότητα(IC)
- Λειτουργική υπολειπόμενη χωρητικότητα(FRC)
- Ζωτική χωρητικότητα(VC)
- Ολική χωρητικότητα πνευμόνων (TLC)



Lung capacity

If a person inhales to total lung capacity and then exhales as forcefully and as much air as possible, the forcefully expiratory volume during the first second of exhalation (FEV1) and the forced vital capacity (FVC) can be determined. The FEV1/FVC ratio provides

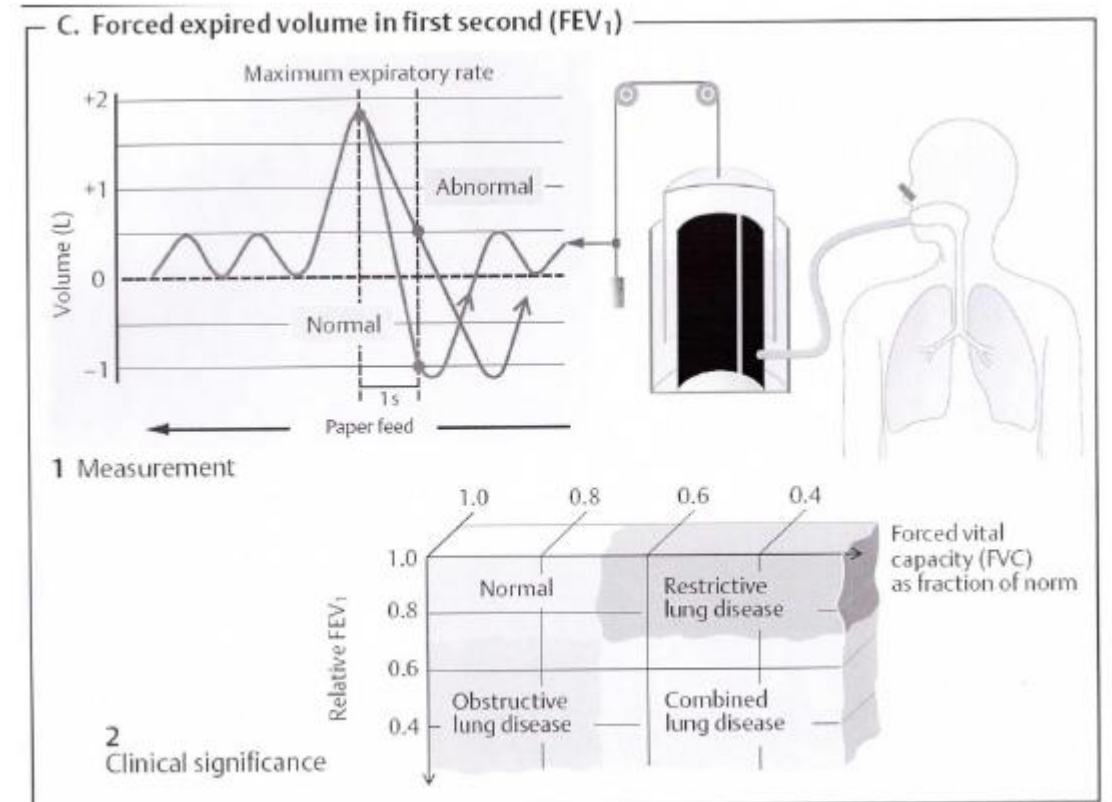
Information on air resistance. Normally, about 80% of FVC will be output during the first second. If the resistance increases, the percentage exhaled during the first second will decrease.

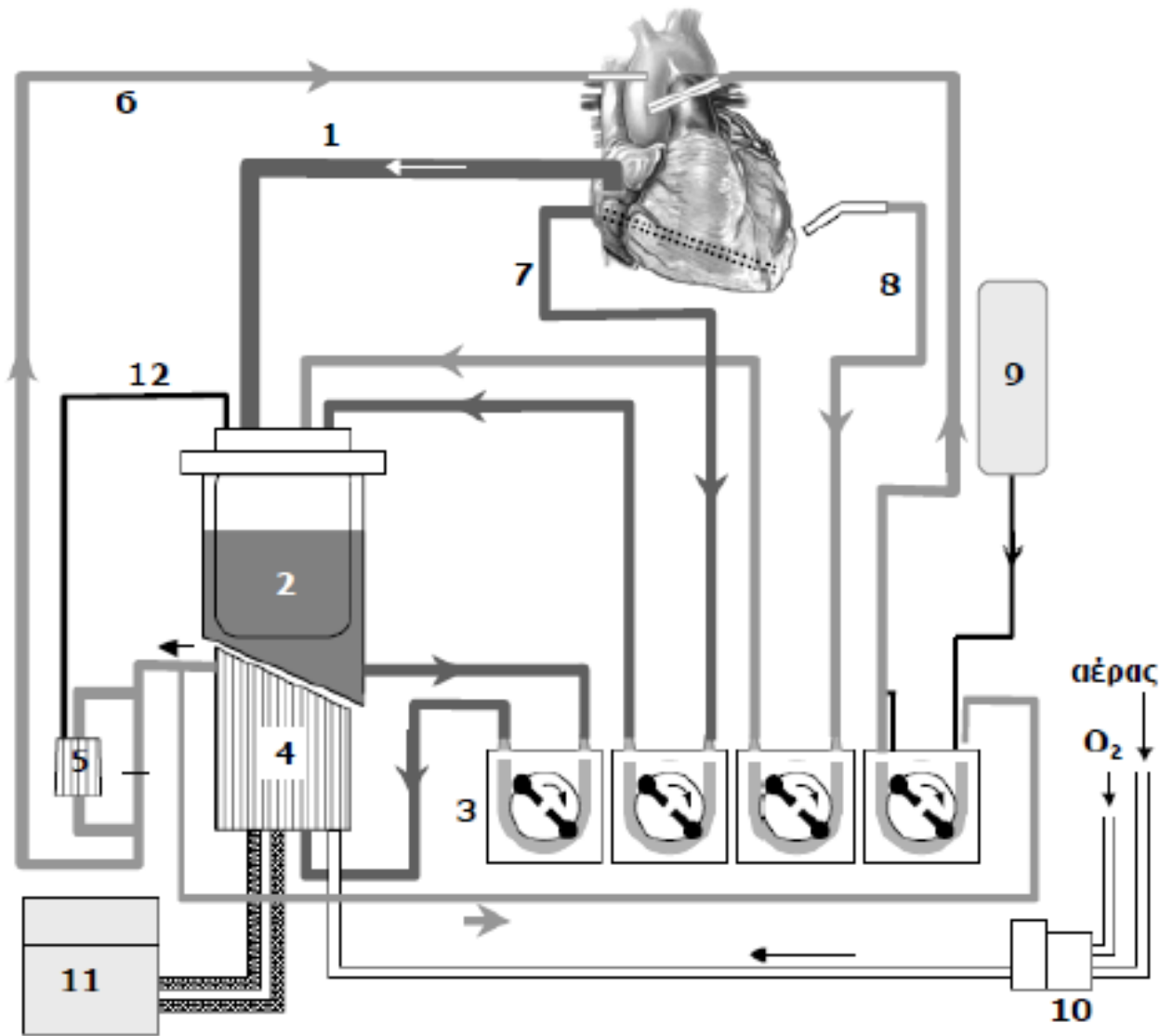
σπιρόμετρο

spirometer

Το σπιρόμετρο μετράει πόσο αέρα μπορείτε να εισπνεύσετε και να εκπνεύσετε και πόσο γρήγορα μπορεί να γίνει αυτό.

The spirometer measures how much air you can inhale and exhale, and how quickly this can be done.





1. Φλεβική γραμμή	7. Γραμμή Vent
2. Φλεβική αιματοδεξαμενή	8. Αναρρόφηση
3. Αντλίες	9. Σάκος καρδιοπληγίας
4. Οξυγονωτής	10. Ροόμετρο/μίκτης αερίων
5. Αρτηριακό φίλτρο	11. Μηχανή ψύξης/θέρμανσης
6. Αρτηριακή γραμμή	12. Γραμμή εσωτερικής κυκλοφορίας

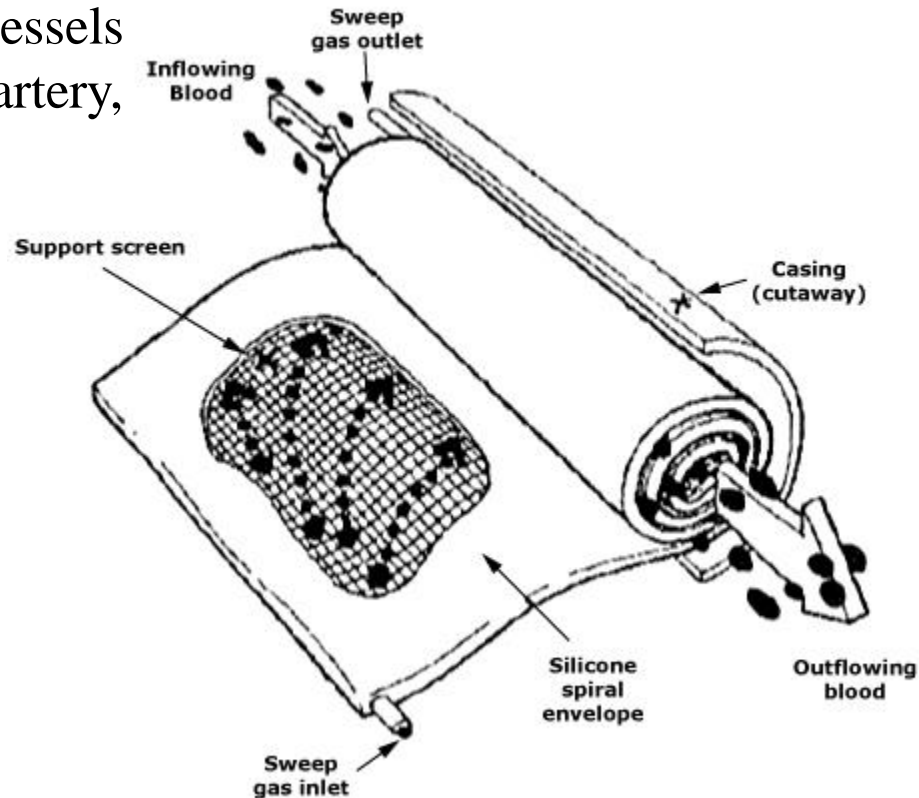
- 1. Venous line
- 2. Venous blood reservoir
- 3. Pumps
- 4. Oxygenator
- 5. Arterial filter
- 6. Arterial line
- 7. Vent line
- 8. Suction
- 9. Cardioplegia bag
- 10. Flow meter/ gas mixer
- 11. Cooling/heating machine
- 12. Internal traffic line

Oxygenator

An oxygenator is a medical device that is capable of exchanging oxygen and carbon dioxide in the blood of human patients during surgical procedures that may necessitate the interruption or cessation of blood flow in the body, a critical organ or great blood vessel. These organs can be the heart, lungs or liver, while the great vessels can be the aorta, pulmonary artery, pulmonary veins or vena cava.

Οξυγονωτής

Ο οξυγονωτής είναι μια ιατρική συσκευή που είναι ικανή να ανταλλάσσει οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα στο αίμα ανθρώπων ασθενών κατά τη διάρκεια χειρουργικών επεμβάσεων που μπορεί να απαιτήσουν τη διακοπή ή τη διακοπή της ροής του αίματος στο σώμα, σε ένα κρίσιμο όργανο ή μεγάλο αιμοφόρο αγγείο. Αυτά τα όργανα μπορεί να είναι η καρδιά, οι πνεύμονες ή το συκώτι, ενώ τα μεγάλα αγγεία μπορεί να είναι η αορτή, η πνευμονική αρτηρία, οι πνευμονικές φλέβες ή η κοίλη φλέβα.



Usage

One component of the heart-lung machine is the oxygenator. The oxygenator component serves as the lung, and is designed to expose the blood to oxygen and remove carbon dioxide. It is disposable and contains about 2–4 m² of a membrane permeable to gas but impermeable to blood, in the form of hollow fibers. Blood flows on the outside of the hollow fibers, while oxygen flows in the opposite direction on the inside of the fibers. As the blood passes through the oxygenator, the blood comes into intimate contact with the fine surfaces of the device itself. Gas containing oxygen and medical air is delivered to the interface between the blood and the device, permitting the blood cells to absorb oxygen molecules directly.

Χρήση

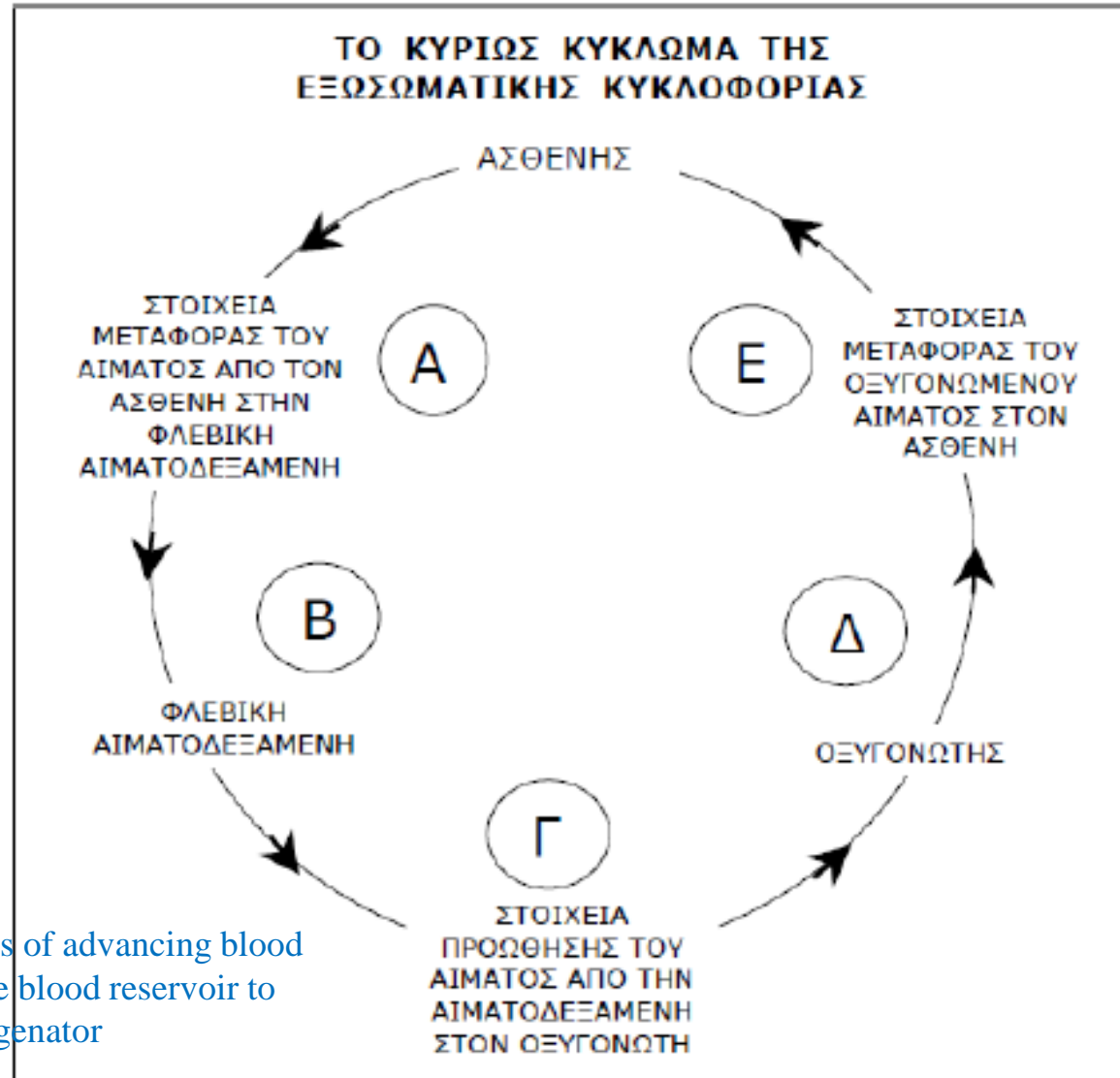
Ένα εξάρτημα της μηχανής καρδιάς-πνεύμονα είναι ο οξυγονωτής. Το συστατικό οξυγονωτή χρησιμεύει ως πνεύμονας και έχει σχεδιαστεί για να εκθέτει το αίμα σε οξυγόνο και να απομακρύνει το διοξείδιο του άνθρακα. Είναι μιας χρήσης και περιέχει περίπου 2–4 m² μεμβράνης διαπερατής από αέρια αλλά αδιαπέραστη από το αίμα, με τη μορφή κοίλων ινών. Το αίμα ρέει στο εξωτερικό των κοίλων ινών, ενώ το οξυγόνο ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση στο εσωτερικό των ινών. Καθώς το αίμα περνά μέσα από τον οξυγονωτή, το αίμα έρχεται σε στενή επαφή με τις λεπτές επιφάνειες της ίδιας της συσκευής. Αέριο που περιέχει οξυγόνο και ιατρικό αέρα παρέχεται στη διεπιφάνεια μεταξύ του αίματος και της συσκευής, επιτρέποντας στα κύτταρα του αίματος να απορροφούν απευθείας μόρια οξυγόνου.

Αναπνευστικό Σύστημα – Τεχνητοί Οξυγονωτές

evidence of transfer of blood from the patient to the venous reservoir

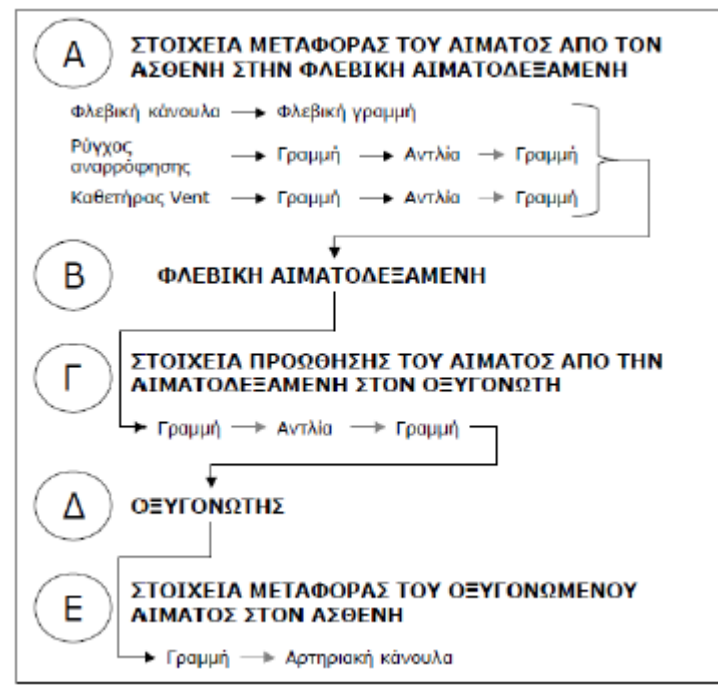
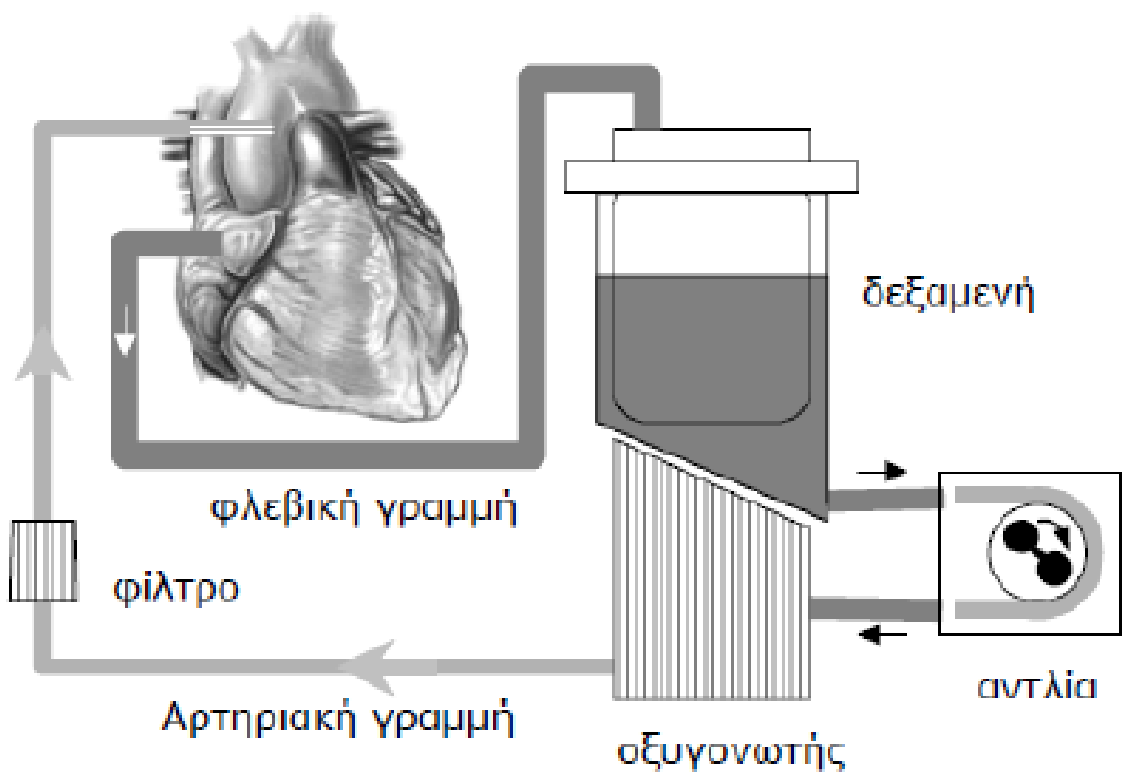
venous reservoir

elements of advancing blood from the blood reservoir to the oxygenator



evidence of transport of oxygenated blood to the patient

oxygenator



$$(Z.X.) = (M.O.E.) + (\Pi.O.) + (M.O.Eκ.),$$

$$(O.X.) = (M.O.E.) + (\Pi.O.) + (M.O.Eκ.) + (Y.O.)$$

$$500ml * 16 \text{ αναπν./min} = 8lt$$

M.O.E. = Μέγιστος Όγκος Εισπνοής

Maximum Inspiratory Volume

Π.Ο. = Παλιρροιακός Όγκος
(όγκος αέρα σε απλή ανάπαυση)

Air volume at simple rest

M.O.Eκ. = Μέγιστος Όγκος Εκπνοής

Maximum Expiratory Volume

Y.O. = Υπόλοιπο Οξυγόνο

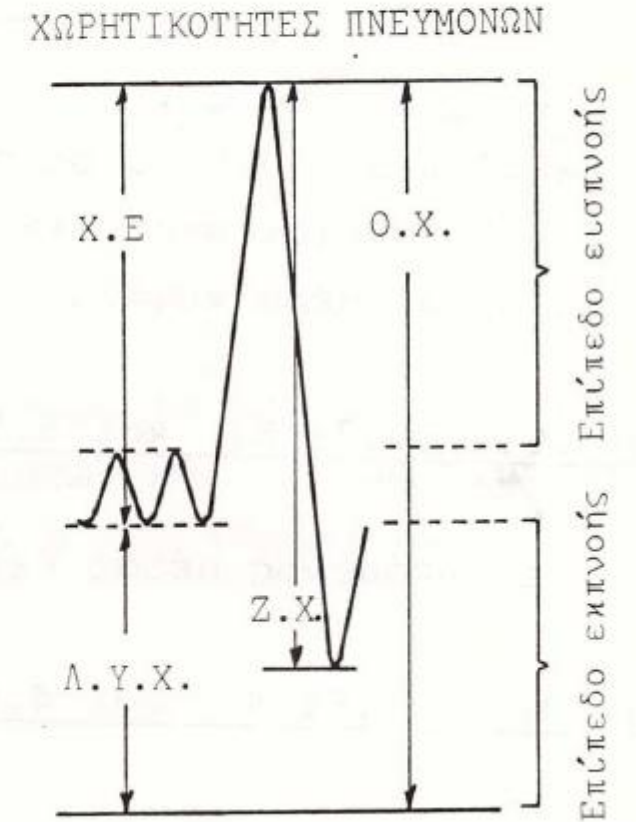
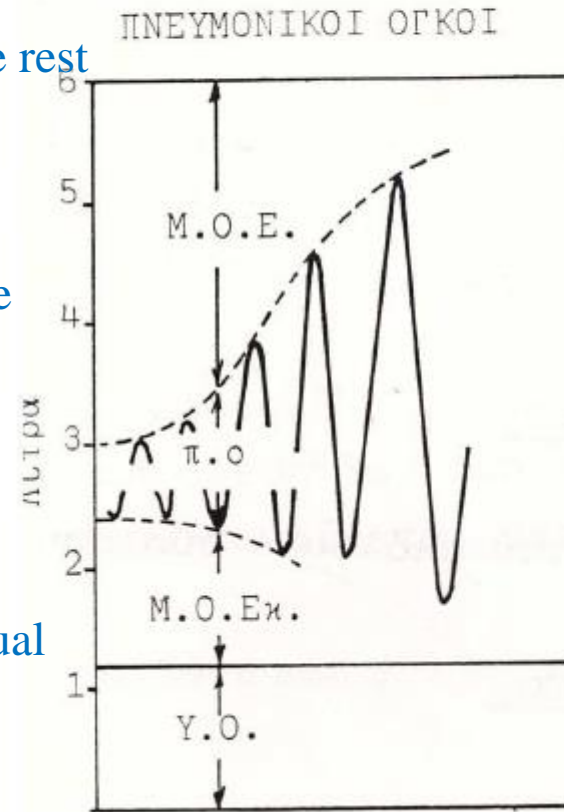
Residual oxygen

X.E. = Χωρητικότητα Εισπνοής

Inhalation Capacity

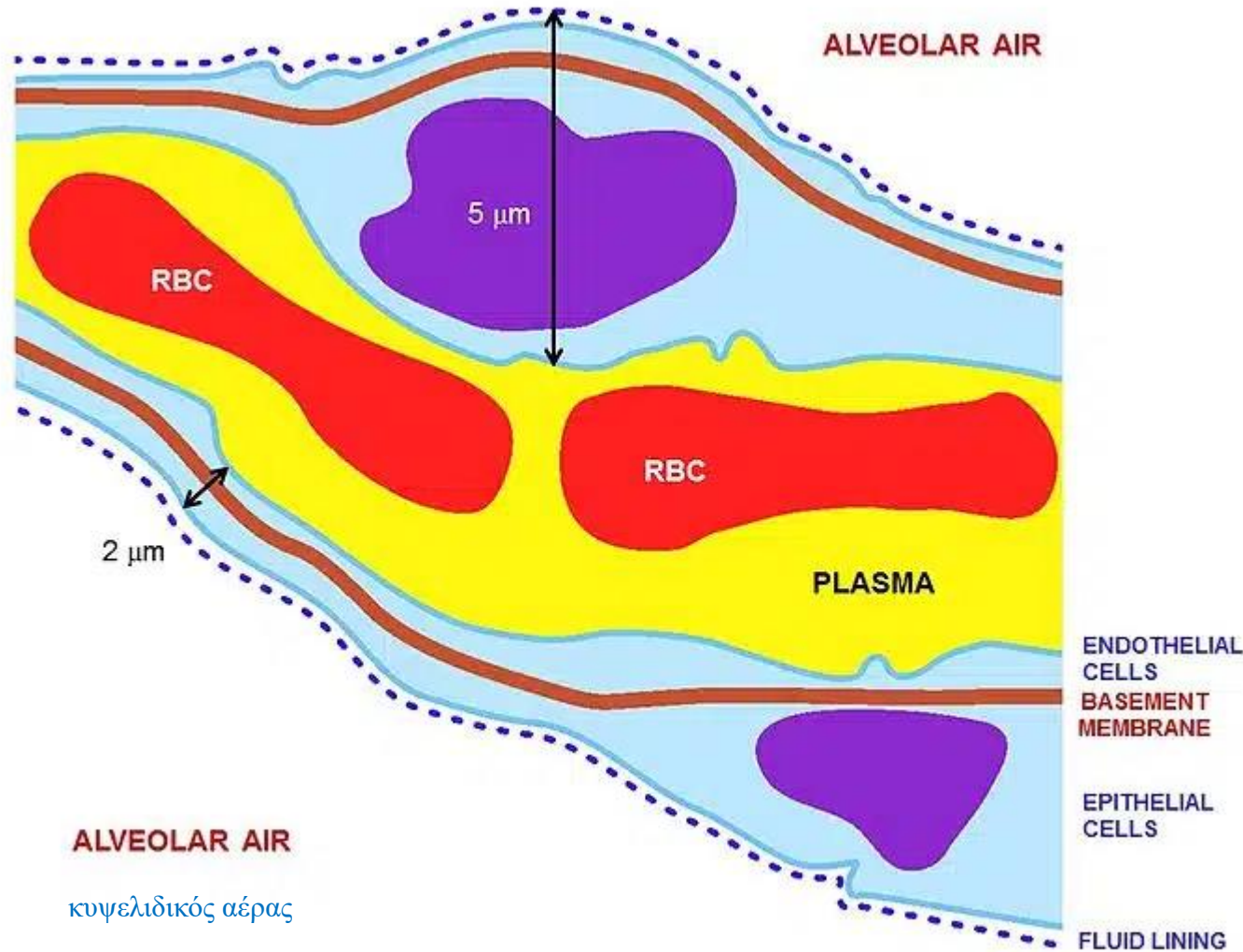
Λ.Υ.Χ. = Λειτουργική Υπολειπόμενη Χωρητικότητα
(δεν αλλάζω τελείως τα πνευμόνια)

Functional Residual Capacity



Διάχυση διοξειδίου του άνθρακα CO₂

Διάγραμμα που δείχνει τα στρώματα που αποτελούν το φράγμα διάχυσης στους πνεύμονες



Diffusion of Carbon Dioxide

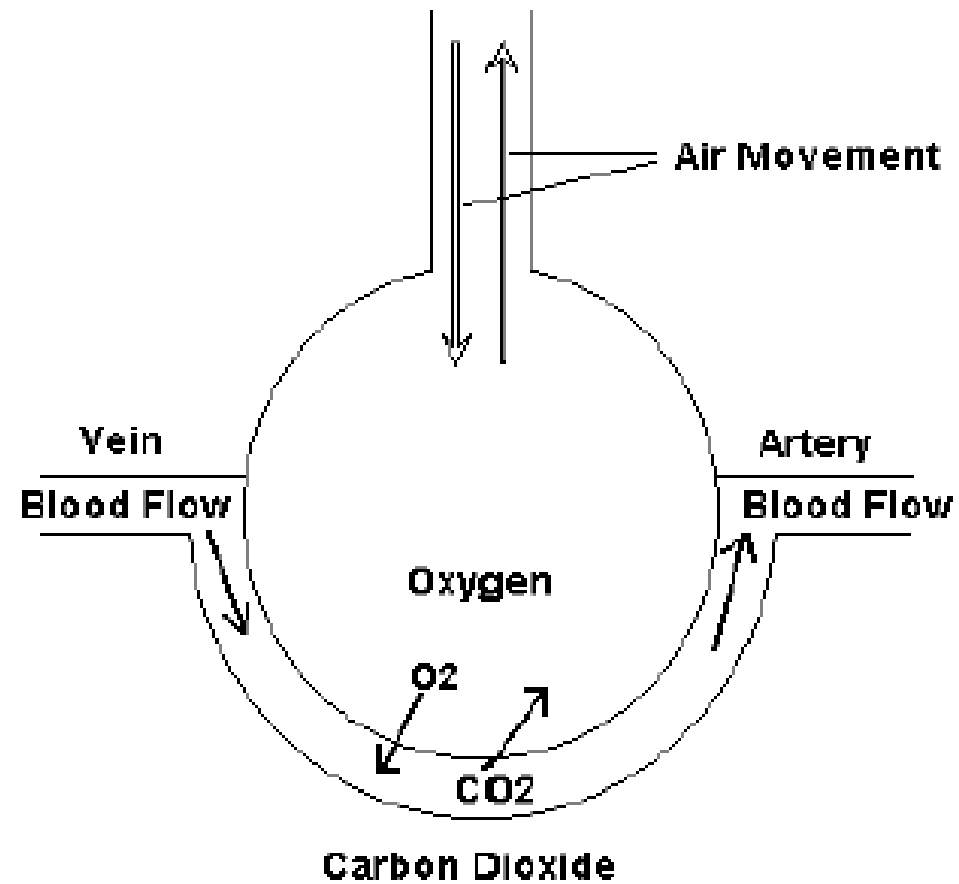
Diagram showing the layers making up the diffusion barrier in the lungs

- ENDOTHELIAL CELLS ΕΝΔΟΘΗΛΙΑΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ
- BASEMENT MEMBRANE ΥΠΟΓΕΙΑ ΜΕΜΒΡΑΝΗ
- EPITHELIAL CELLS ΕΠΙΘΗΛΙΑ ΚΥΤΤΑΡΑ
- FLUID LINING

ALVEOLAR AIR
κυψελιδικός αέρας

Ανταλλαγή αερίων στη κυψελίδα

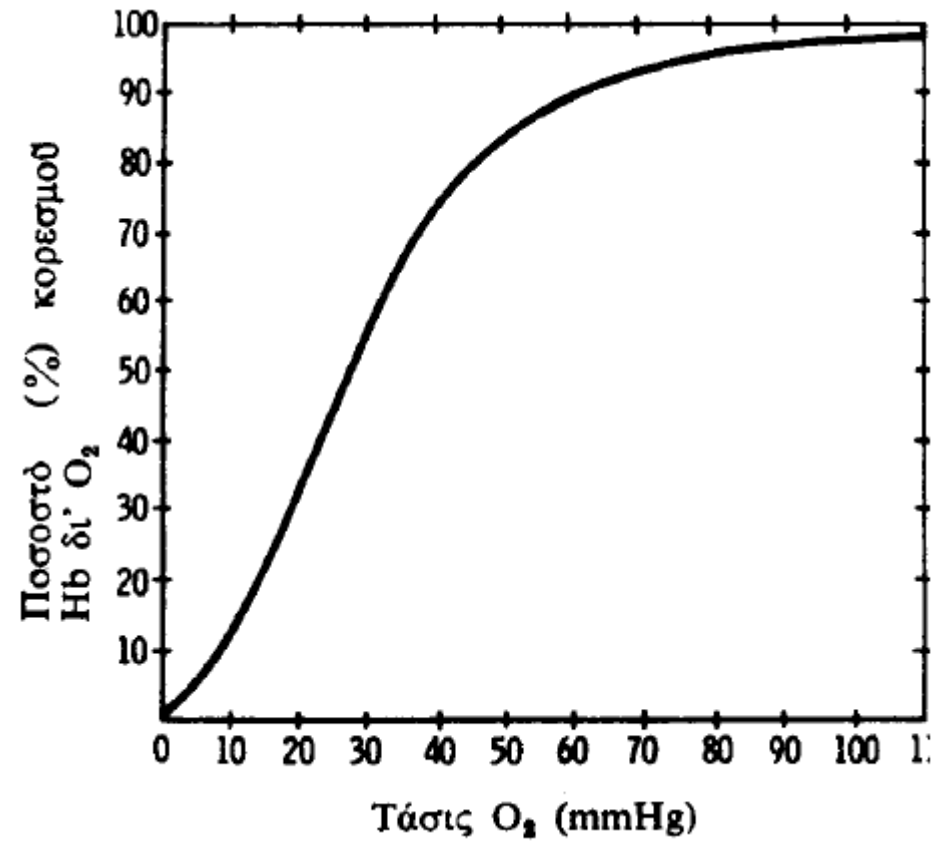
Gas exchange in alveolus



Gas Exchange at the Alveolar Level

ανταλλαγή αερίων σε κυψελιδικό επίπεδο

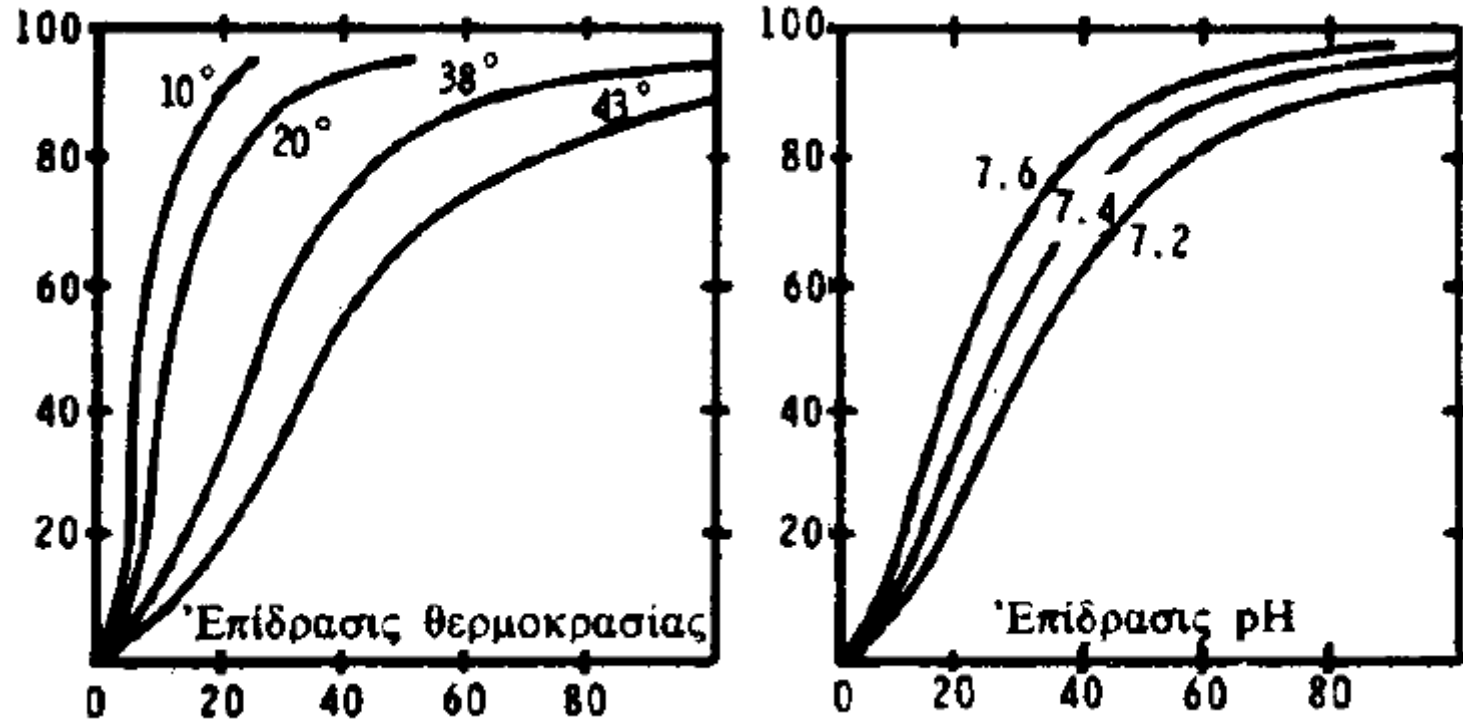
Κορεσμός Hb (Αιμοσφαιρίνης)



Hb (Hemoglobin) Saturation

Κορεσμός Hb (Αιμοσφαιρίνης)

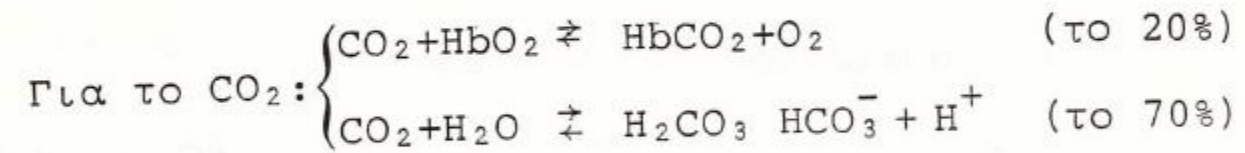
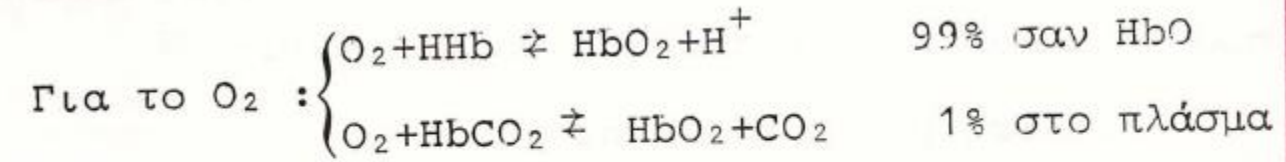
Hb (Hemoglobin) Saturation



Χημικές αντιδράσεις στο αίμα

Chemical reactions in the blood

Στο ερυθρό αιμοσφαίριο:



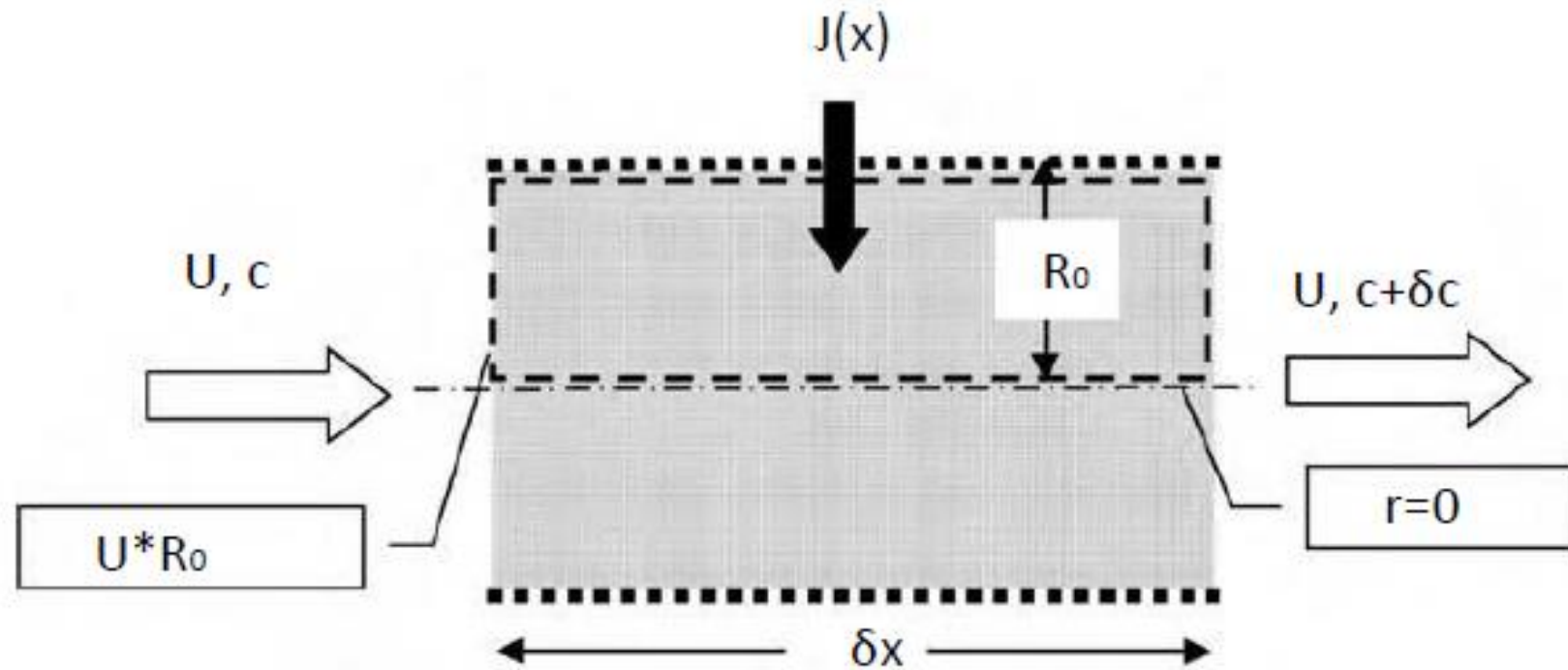
Στο πλάσμα:



$$c(x)Q_{\text{blood}} + J(x)\delta x = [c(x) + \delta c] Q_{\text{blood}} \quad [\text{Mol/m}^2(\text{m}^2/\text{sec}) + (\text{mol/sec m})\text{m} = \text{mol/sec}]$$

$$J(x) = Q_{\text{blood}} \frac{dc}{dx} = R_0 U \frac{dc}{dx} \quad (1) \quad J(x) = D/\Delta y * [c_{\text{alv}} - c(x)] \quad (2) \quad \Delta y = \text{πάχος τοιχώματος}$$

Νόμος Henry, $c(x) = \beta_x P_x$, $\beta =$ συντελ. διαλυτότητας solubility coefficient



$$(1)=(2) \quad R_0 U \frac{dP(x)}{dx} = D/\Delta y * [P_{\text{alv}} - P(x)]$$

$$\hat{P} = \frac{P(x) - P_{in}}{P_{alv} - P_{in}} \Rightarrow \hat{P}(P_{alv} - P_{in}) = P(x) - P_{in} \Rightarrow$$

$$P(x) = \hat{P}P_{alv} - \hat{P}P_{in} + P_{in} \Rightarrow$$

$$P(x) = \hat{P}P_{alv} + P_{in}(1 - \hat{P}) \quad (1)$$

$$P(x) = \hat{P}(P_{alv} - P_{in}) + P_{in} \rightarrow dP(x) = d\hat{P}(P_{alv} - P_{in}) + \emptyset \quad (2)$$

$$\overset{(2)}{RoU} dP(x)/dx = \overset{(1)}{D/\Delta y} * [P_{alv} - P(x)]$$

$$RoU \frac{d\hat{P}(P_{alv} - P_{in})}{dx} = \frac{D}{\Delta y} \left[P_{alv} - \hat{P}P_{alv} - P_{in}(1 - \hat{P}) \right] \Rightarrow$$

$$RoU \frac{d\hat{P}(P_{alv} - P_{in})}{dx} = \frac{D}{\Delta y} \left[P_{alv}(1 - \hat{P}) - P_{in}(1 - \hat{P}) \right] \Rightarrow$$

$$RoU \frac{d\hat{P}(P_{alv} - P_{in})}{dx} = \frac{D}{\Delta y} \left[(1 - \hat{P})(P_{alv} - P_{in}) \right] \Rightarrow$$

$$RoU \frac{d\hat{P}}{dx} = \frac{D}{\Delta y} (1 - \hat{P}) \Rightarrow$$

$$RoU \frac{d\hat{P}}{dx} + \frac{D}{\Delta y} (\hat{P} - 1) = 0$$

Λύση:

$$\hat{P} = 1 - e^{\frac{-x}{L_{char}}}$$

The solution of equation is:

με

$$L_{char} = \frac{URo\Delta y}{D}$$

Where:

Normalized blood gas partial pressure, p , in the alveolar model as a function of dimensionless axial position, x/L_{char}

x/L_{char}	\hat{p}
1	0.63
2	0.86
3	0.95
5	0.993
10	0.99996

Ομαλοποιημένη μερική πίεση αερίου αίματος, p , στο κυψελιδικό μοντέλο ως συνάρτηση της αδιάστατης αξονικής θέσης, x/L_{char}

$$R_o = 4\mu m = 4 * 10^{-4} cm$$

$$U = 0.1 cm / sec$$

$$D = 2.10 * 10^{-5} cm^2 / sec$$

$$\Delta y = 0.6\mu m = 6 * 10^{-5} cm$$

$$L_{char} = 2.4\mu m$$

Principles of Oxygenator Function: Gas Exchange, Heat Transfer, and Operation

Despite the diversity in designs through the years, they all contain **three essential components**: **a mechanism to circulate the blood, a method of gas exchange for oxygen and carbon dioxide, and some mechanism for temperature control.**

We will now focus on the two subsequent elements: **gas exchange and heat transfer.** And while it is referred to as the “oxygenator,” we must recognize that it is responsible for the movement of both oxygen in, as well as carbon dioxide out. A basic review of the principles of physics, and then we will apply those principles to the devices used specifically in extracorporeal support, including cardiopulmonary bypass (CPB) and extracorporeal membrane oxygenation (ECMO).

Αρχές λειτουργίας οξυγονωτή: Ανταλλαγή αερίων, μεταφορά θερμότητας και λειτουργία

Κατά την ανάπτυξη μιας μηχανής καρδιάς-πνεύμονα, υπήρξε μια τεράστια εξέλιξη συσκευών και μηχανημάτων για καρδιακή υποστήριξη. Ωστόσο, παρά την ποικιλομορφία **στα σχέδια** με το πέρασμα των χρόνων, όλα **περιέχουν τρία βασικά συστατικά**: έναν **μηχανισμό για την κυκλοφορία του αίματος**, μια **μέθοδο ανταλλαγής αερίων για οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα** και κάποιο **μηχανισμό για τον έλεγχο της θερμοκρασίας.**

Θα επικεντρωθούμε στα δύο επόμενα στοιχεία: **ανταλλαγή αερίων και μεταφορά θερμότητας.** Και ενώ αναφέρεται ως «οξυγονωτής», πρέπει να αναγνωρίσουμε ότι είναι υπεύθυνος για την κίνηση τόσο του οξυγόνου προς τα μέσα όσο και του διοξειδίου του άνθρακα προς τα έξω.

Μια βασική ανασκόπηση των αρχών της φυσικής και στη συνέχεια μια εφαρμογή αυτών στις αρχές και στις συσκευές που χρησιμοποιούνται ειδικά στην εξωσωματική υποστήριξη, συμπεριλαμβανομένης της καρδιοπνευμονικής παράκαμψης (CPB) και της εξωσωματικής οξυγόνωσης μεμβράνης (ECMO).

PHYSICS OF GAS EXCHANGE

The movement of gas molecules of oxygen (O₂) and carbon dioxide (CO₂) between air and blood across a biologic or synthetic barrier is controlled by several specific laws of physics. We will first review the principles of those laws and then discuss their direct application to the natural process in the human lung, as well as our attempt to imitate the natural process with various devices and techniques.

Dalton's Law (John Dalton, 1801):

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + \dots$$

The total pressure of a mixture of gases is equal to the sum of the partial pressures of all the individual gases in that volume. At sea level this must equal 760 mm Hg.

ΦΥΣΙΚΗ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

Η κίνηση των μορίων αερίου οξυγόνου (O₂) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) μεταξύ αέρα και αίματος μέσω ενός βιολογικού ή συνθετικού φραγμού ελέγχεται από αρκετούς ειδικούς νόμους της φυσικής. Θα εξετάσουμε πρώτα τις αρχές αυτών των νόμων και στη συνέχεια θα συζητήσουμε την άμεση εφαρμογή τους στη φυσική διαδικασία στον ανθρώπινο πνεύμονα, καθώς και την προσπάθειά μας να μιμηθούμε τη φυσική διαδικασία με διάφορες συσκευές και τεχνικές.

Νόμος του Ντάλτον (John Dalton, 1801):

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + \dots$$

Η συνολική πίεση ενός μείγματος αερίων είναι ίση με το άθροισμα των μερικών πιέσεων όλων των μεμονωμένων αερίων σε αυτόν τον όγκο. Στο επίπεδο της θάλασσας αυτό πρέπει να ισούται με 760 mm Hg.

Fick's First Law of Diffusion (Adolf Fick, 1855):

$$J = -D \left(\frac{d\phi}{dx} \right)$$

In this mathematical formula, J represents the diffusion flux or amount of substance (e.g., O_2) moved per unit area, per unit time.

D , the diffusion coefficient, is a constant for the particular barrier, based on its composition, and so forth. It is also referred to as the “diffusivity,” and the preceding negative sign simply makes the flux J positive when the movement is down the concentration gradient.

The substance concentration is represented by ϕ and the length by x .

Ο πρώτος νόμος της διάχυσης του Fick (Adolf Fick, 1855):

$$J = -D \left(\frac{d\phi}{dx} \right)$$

Σε αυτόν τον μαθηματικό τύπο, το J αντιπροσωπεύει τη ροή διάχυσης ή την ποσότητα της ουσίας (π.χ. O_2) που μετακινείται ανά μονάδα επιφάνειας, ανά μονάδα χρόνου.

D , ο συντελεστής διάχυσης, είναι μια σταθερά για το συγκεκριμένο φράγμα, με βάση τη σύνθεσή του, και ούτω καθεξής. Αναφέρεται επίσης ως «διάχυση» και το προηγούμενο αρνητικό πρόσημο απλώς κάνει τη ροή J θετική όταν η κίνηση είναι κάτω από τη βαθμίδα συγκέντρωσης.

Η συγκέντρωση της ουσίας αντιπροσωπεύεται από ϕ και το μήκος με x

Graham's Law (Thomas Graham, 1848):

$$r \propto 1/\sqrt{mw}$$

The diffusion rate of a gas is inversely proportional to the square root of its molecular weight.

Henry's Law (William Henry, 1803):

$$p = k_H c$$

The amount of gas that can dissolve in a volume of liquid is directly proportional to the partial pressure of the gas in that liquid. Mathematically, where p is the partial pressure of a particular gas, c is the concentration of the dissolved gas, and k_H is a constant for a particular gas in a particular solution; for example, k_H for O_2 dissolved in water at 298 K is 769.2 L atm/mol.

Ο νόμος του Γκράχαμ (Thomas Graham, 1848):

$$r \propto 1/\sqrt{mw}$$

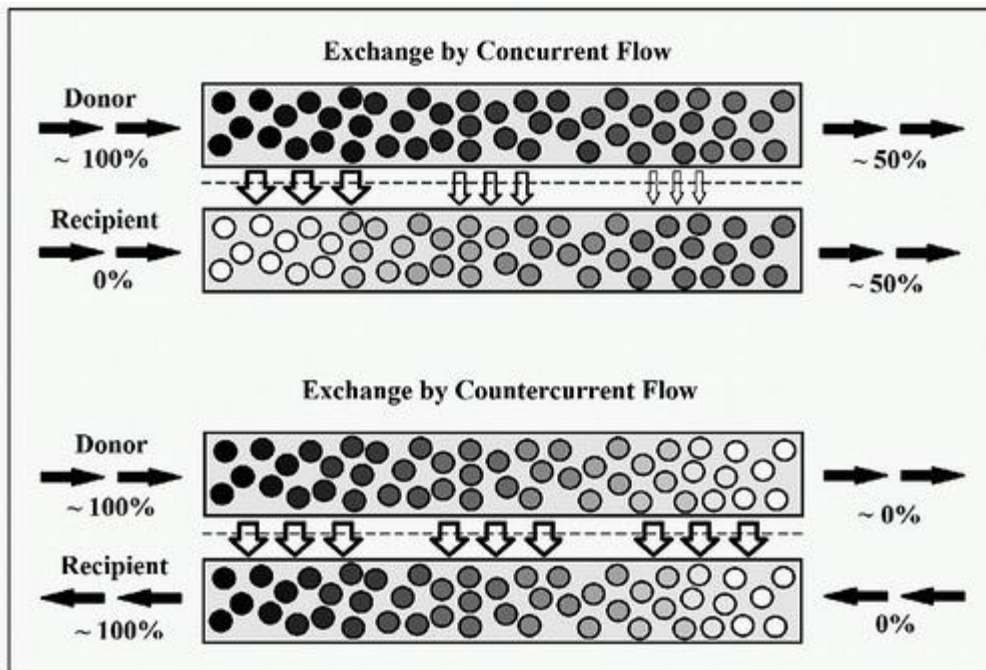
Ο ρυθμός διάχυσης ενός αερίου είναι αντιστρόφως ανάλογος με την τετραγωνική ρίζα του μοριακού του βάρους.

Νόμος του Χένρι (William Henry, 1803):

$$p = k_H c$$

Η ποσότητα αερίου που μπορεί να διαλυθεί σε έναν όγκο υγρού είναι ευθέως ανάλογη με τη μερική πίεση του αερίου σε αυτό το υγρό. Μαθηματικά, όπου p είναι η μερική πίεση ενός συγκεκριμένου αερίου, c είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου αερίου και k_H είναι μια σταθερά για ένα συγκεκριμένο αέριο σε ένα συγκεκριμένο διάλυμα. Για παράδειγμα, το k_H για O_2 διαλυμένο σε νερό στους 298 K είναι 769,2 L atm/mol.

Αρχή της Ανταλλαγής Αντιρροής



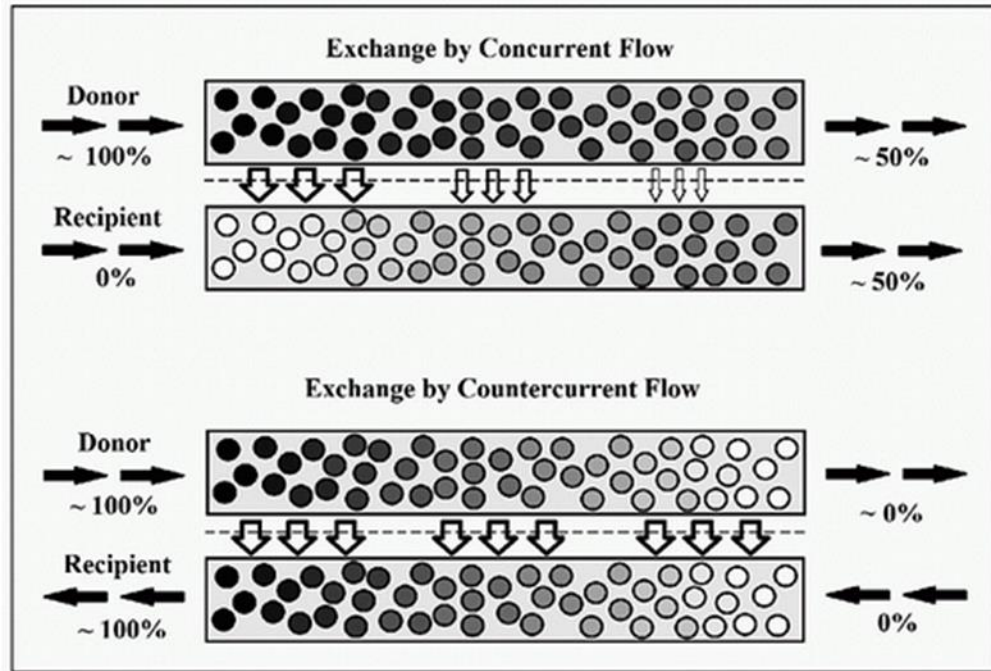
Με ίδια φορά έναντι αντίθετης ροής. Αυξημένη μεταφορά συμβαίνει λόγω της κίνησης κατά μήκος ολόκληρου του συστήματος με αντίθετη ροή, αντί της μέγιστης ισορροπίας 50:50 που μπορεί να επιτευχθεί με ταυτόχρονη ροή.

Λαμβάνοντας υπόψη δύο παράλληλους σωλήνες γεμάτους με ρευστό ή αέριο που χωρίζονται από μια μεμβράνη με κάποιο βαθμό διαπερατότητας σε συστατικά αυτού του ρευστού ή αερίου, η ανταλλαγή μορίων ή σωματιδίων κατά μήκος του φραγμού είναι πιο αποτελεσματική εάν οι κινήσεις των υγρών είναι αντίθετες στην κατεύθυνση. Σε ένα θεωρητικό παράδειγμα με ένα εύκολα διαχύσιμο αέριο G που θέλουμε να μετακινηθούμε από το ένα σύστημα στο άλλο μέσω διάχυσης, θα υποθέσουμε ότι η συγκέντρωση του G σε αυτό που θα αναφέρουμε ως σύστημα «δότης» είναι 100% και ότι εκεί είναι μηδενική ποσότητα G στην πλευρά «παραλήπτη» του συστήματος (Εικ.). Εάν τα δύο συστήματα κινούνται παράλληλα (ταυτόχρονα), τότε στην είσοδο οι συγκεντρώσεις είναι 100% και 0%. Καθώς τα δύο συστήματα προχωρούν, υπάρχει συνεχής διάχυση του G κατά μήκος του φραγμού με μείωση της συγκέντρωσης του G στην πλευρά του δότη και αύξηση της συγκέντρωσης στην πλευρά του δέκτη.

Σταδιακά οι συγκεντρώσεις αλλάζουν σε 90%:10%, 80%:20% και ούτω καθεξής μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία στο 50%:50%. Η συνεχής κίνηση κατά μήκος του πρόσθετου μήκους του σωλήνα δεν παρέχει καμία πρόσθετη ανταλλαγή G στο σύστημα αποδέκτη και το τελικό αποτέλεσμα στη θέση εξόδου παραμένει 50%. Αν τώρα αντιστρέψουμε την κατεύθυνση ενός από τα συστήματα έτσι ώστε τα συστήματα δότη και δέκτη να ρέουν σε αντίθετες κατευθύνσεις (αντίρροπο), η κίνηση του G μπορεί να συμβεί σε όλο το μήκος του συστήματος, επειδή η κλίση που οδηγεί τη διάχυση μπορεί να διατηρηθεί. Εάν υπάρχει επαρκές μήκος στα συστήματα, η συγκέντρωση του G μπορεί δυνητικά να φτάσει το 100% στη θέση εξόδου του, ακριβώς δίπλα στην πλευρά εισόδου του συστήματος δότη όπου η συγκέντρωση είναι επίσης 100%. Έτσι η ισορροπία επιτυγχάνεται στο 100% αντί στο 50%.

Principle of Countercurrent Exchange

Given two parallel tubes filled with fluid or gas separated by a membrane with some degree of permeability to components of that fluid or gas, the exchange of molecules or particles across the barrier is more efficient if the movements of the liquids are opposite in direction. In a theoretical example with a readily diffusible gas G that we want to move from one system to another through diffusion, we will assume that the concentration of G in what we will refer to as the “donor” system is 100%, and that there is zero amount of G in the “recipient” side of the system (Fig.). If the two systems are moving in parallel (concurrent), then at the entrance the concentrations are 100% and 0%. As the two systems move along, there is continued diffusion of G across the barrier with reduction of the concentration of G on the donor side, and increase in the concentration on the recipient side.



Concurrent versus countercurrent flow. Increased transfer occurs due to movement along the entire system with countercurrent flow, rather than the maximum 50:50 equilibrium achievable with concurrent flow.

Gradually the concentrations change to 90%:10%, 80%:20%, and so on until equilibrium is reached at 50%:50%. Continued movement along the additional length of the tube does not provide any additional exchange of G into the recipient system, and the end result at the exit site remains 50%. If we now reverse the direction of one of the systems so that the donor and recipient systems are flowing in opposite directions (countercurrent), the movement of G can occur throughout the entire length of the system, because the gradient driving the diffusion can be maintained. If there is sufficient length to the systems, the concentration of G can potentially reach 100% at its exit site, immediately adjacent to the inlet side of the donor system where the concentration is also 100%. Thus the equilibrium is reached at 100% rather than 50%.

OXYGENATORS FOR EXTRACORPOREAL SUPPORT

Basic Oxygenator Design

The development of the ideal device for gas exchange has been built upon a series of compromises between the advantages and disadvantages of available surface area, resistance to flow, size, priming volume, diffusion capability, plasma leakage, and biocompatibility.

- Direct Contact Oxygenators (Bubble, Screen, Rotating Disc, Drum)
- Membrane Oxygenators
- Microporous Oxygenators
- “Plasma-Tight” Hollow Fiber Oxygenators

ΟΞΥΓΟΝΩΤΕΣ ΓΙΑ ΕΞΩΣΩΜΑΤΙΚΗ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Βασικός σχεδιασμός οξυγονωτή

Η ανάπτυξη της ιδανικής συσκευής για την ανταλλαγή αερίων έχει βασιστεί σε μια σειρά συμβιβασμών μεταξύ των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της διαθέσιμης επιφάνειας, της αντίστασης στη ροή, του μεγέθους, του όγκου εκκίνησης, της ικανότητας διάχυσης, της διαρροής πλάσματος και της βιοσυμβατότητας.

- Οξυγονωτές άμεσης επαφής (φουσαλίδα, οθόνη, περιστρεφόμενος δίσκος, τύμπανο)
- Οξυγονωτές μεμβράνης
- Μικροπορώδεις Οξυγονωτές
- Οξυγονωτές κοίλων ινών «Πλάσμα-Σφιχτά».

The artificial lung is an oxygenator device a little bigger than a matchbox with two catheters that are inserted into the body through the veins of the leg. In this way the oxygenator "interferes" in the blood circulation helping to oxygenate it, which the lungs are unable to do.

Ο τεχνητός πνεύμονας είναι μια συσκευή- οξυγονωτής σε μέγεθος λίγο μεγαλύτερο από ένα κουτί σπίρτα με δύο καθετήρες οι οποίοι εισάγονται στο σώμα από τα αγγεία του ποδιού. Με τον τρόπο αυτό ο οξυγονωτής «παρεμβάλλεται» στην κυκλοφορία του αίματος βοηθώντας στην οξυγόνωσή του, κάτι που αδυνατούν να κάνουν οι πνεύμονες.



Φτιάχτηκε
τεχνητός
πνεύμονας που
μεταφέρεται
στην πλάτη

Τεχνητός Φορητός Πνεύμονας

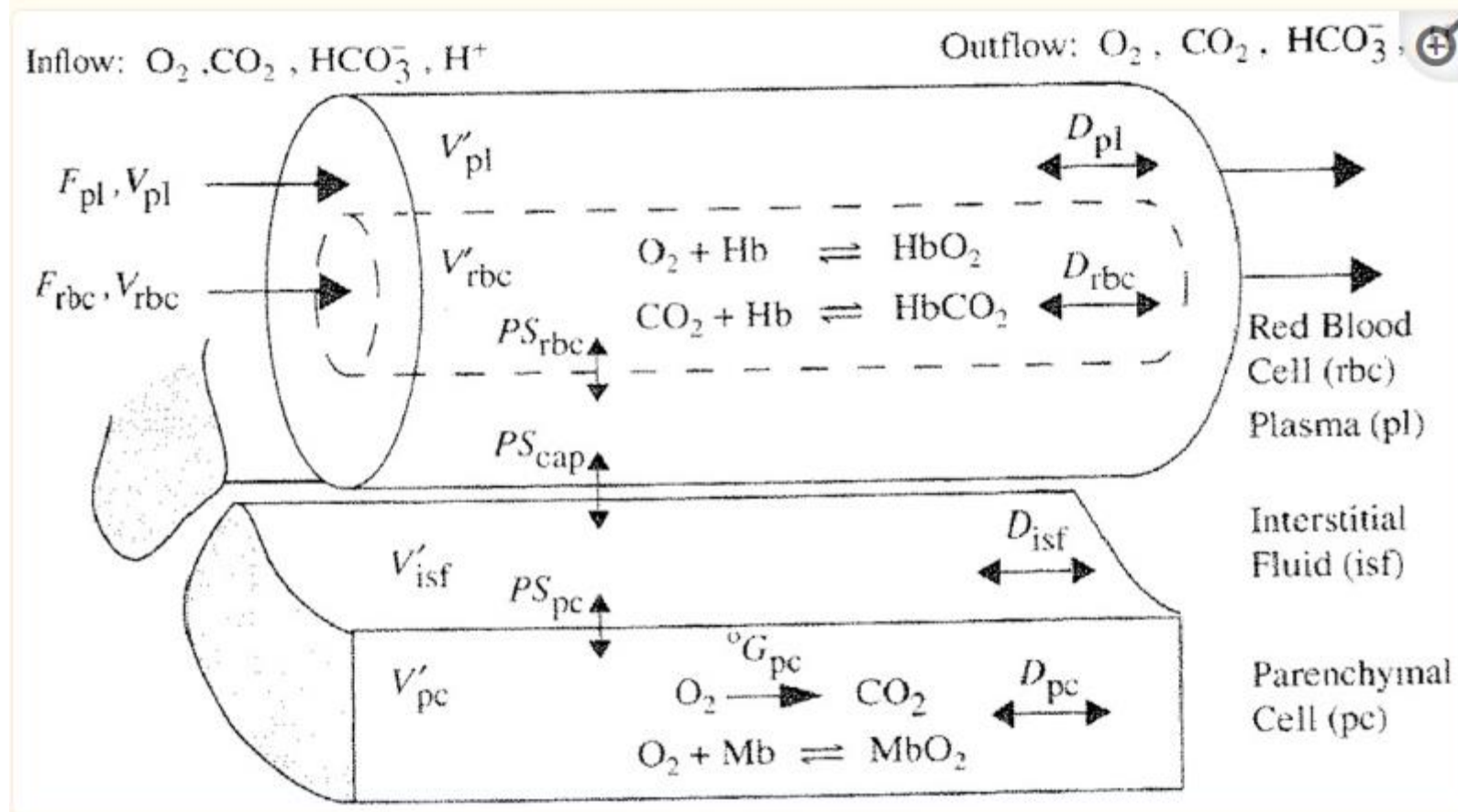


Artificial Portable Lung

Appendix

Modeling Oxygen and Carbon Dioxide Transport and Exchange Using a Closed Loop Circulatory System

Μοντελοποίηση μεταφοράς και ανταλλαγής οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα με χρήση κυκλοφορικού συστήματος κλειστού βρόχου



Blood-tissue exchange unit showing red blood cell, plasma, interstitial fluid, and parenchymal cell regions, convection of RBC and plasma, solute transport between regions, the PSs, axial diffusion, binding, and buffering within regions. Bicarbonate buffering occurs in all regions. Each region is axially-distributed and radially well-mixed.

Μονάδα ανταλλαγής ιστού αίματος που δείχνει περιοχές ερυθρών αιμοσφαιρίων, πλάσματος, διάμεσου υγρού και παρεγγυματικών κυττάρων, μεταφορά RBC και πλάσματος, μεταφορά διαλυμένης ουσίας μεταξύ περιοχών, PSs, αξονική διάχυση, δέσμευση και ρυθμιστικό διάλυμα εντός των περιοχών. Ρυθμιστικό διάλυμα διττανθρακικών εμφανίζεται σε όλες τις περιοχές. Κάθε περιοχή είναι αξονικά κατανομημένη και ακτινικά καλά αναμεμιγμένη.

Βιβλιογραφία

Bibliography

- <https://medlineplus.gov/ency/anatomyvideos/000059.htm> video
- <https://courses.lumenlearning.com/suny-ap2/chapter/gas-exchange/> text
- <https://teachmephysiology.com/respiratory-system/gas-exchange/gas-exchange/>
- <https://www.google.com/search?client=firefox-b-e&q=oxygen+carbon+dioxide+exchange#fpstate=ive&vld=cid:330ba4fd,vid:WzrN6sJ1ig,st:0> (video)
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3377501/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=8CGo30KbajU>
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5683297/>
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5613602/>
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Oxygenator>
- <https://thoracickey.com/principles-of-oxygenator-function-gas-exchange-heat-transfer-and-operation/>