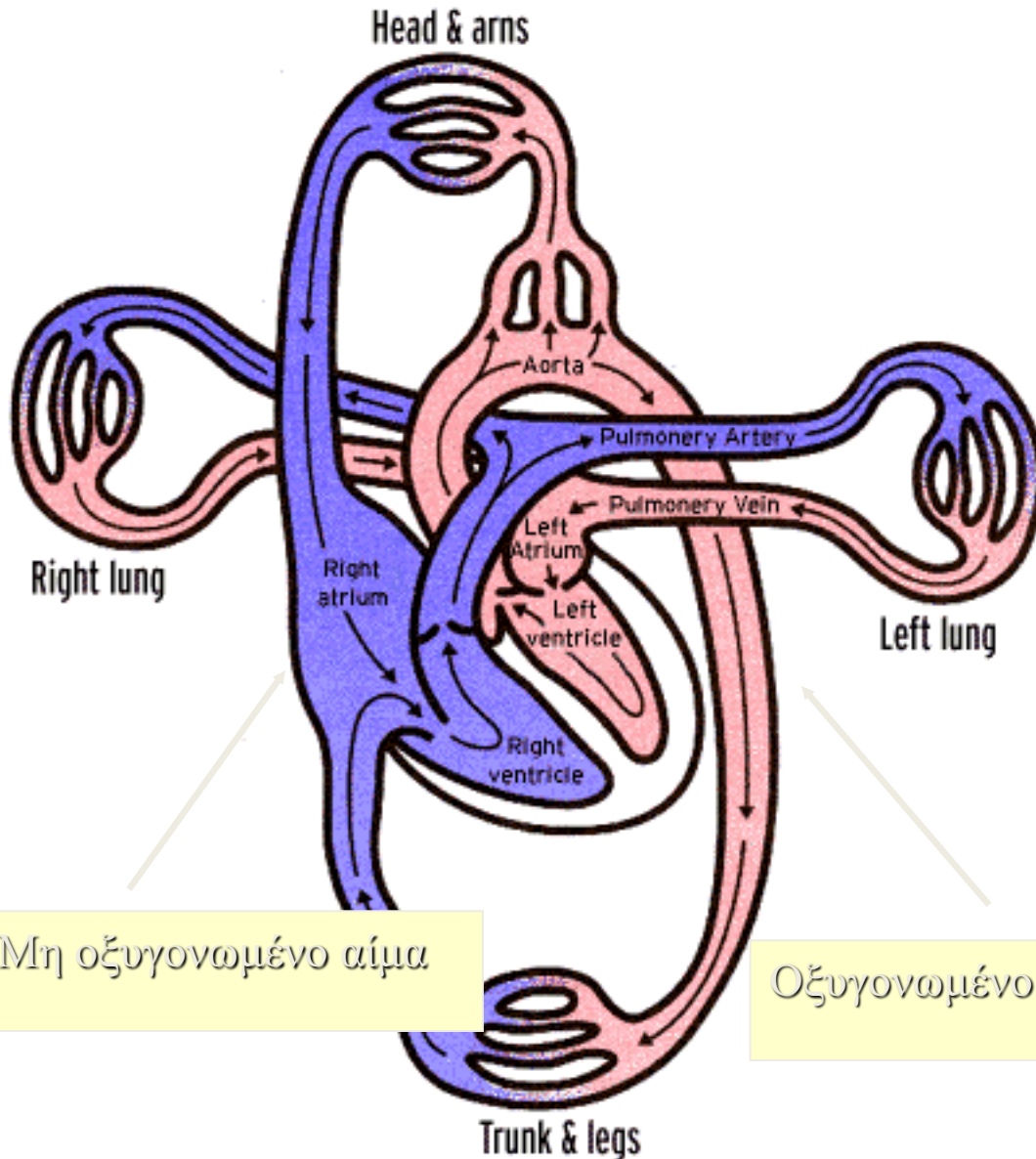




Φυσιολογία της καρδιακής λειτουργίας

Στέφανος Αδάμης

Το Κυκλοφορικό Σύστημα



Η καρδιά αποτελείται από δύο ξεχωριστές αντλίες :

1. Η δεξιά καρδιά διοχετεύει το αίμα μέσα από τους πνεύμονες

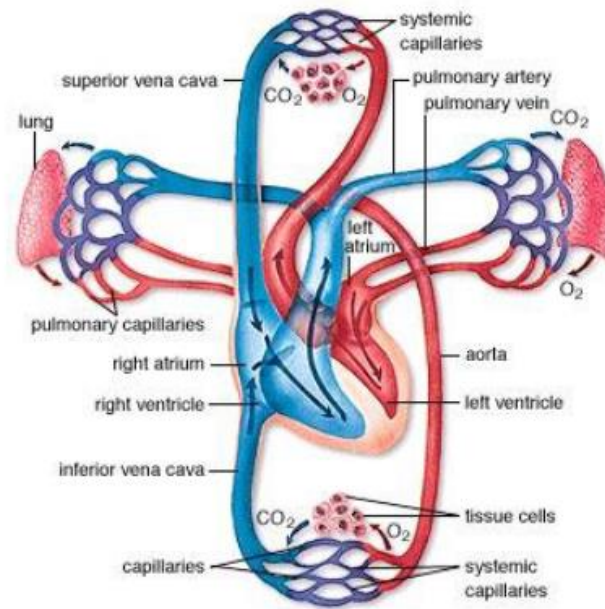
2. Η αριστερή καρδιά διοχετεύει το αίμα μέσα από τα περιφερειακά όργανα του σώματος

Μη οξυγονωμένο αίμα

Οξυγονωμένο αίμα

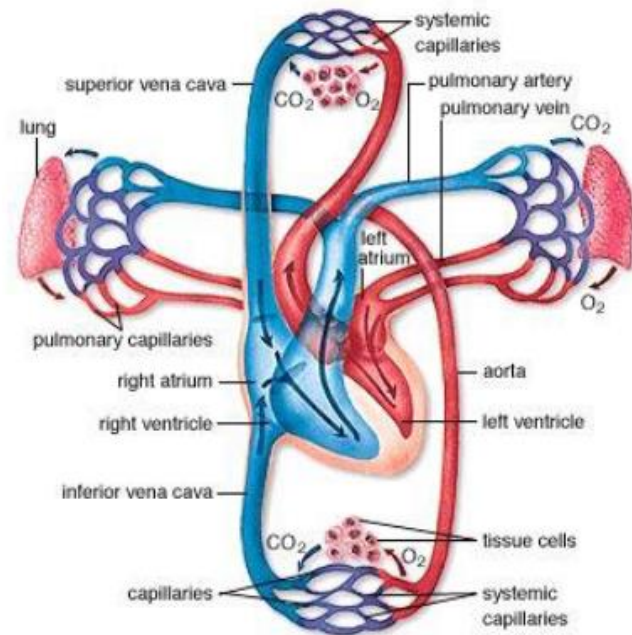
Συστημική κυκλοφορία - Systemic circulation

- Σκοπός: Η μεταφορά του αίματος από την καρδιά στα διάφορα όργανα.
- Το αίμα ξεκινάει από την αριστερή κοιλία και, μέσω της αορτής, μεταφέρεται στο σώμα.
- Έτσι, μεταφέρεται στα όργανα οξυγόνο και θρεπτικά συστατικά και απομακρύνονται άχρηστα προϊόντα και διοξείδιο του άνθρακα.
- Το αίμα επιστρέφει στην δεξιά κοιλία μέσω των φλεβών.



Πνευμονική κυκλοφορία - Pulmonary circulation

- Σκοπός: Η αποβολή του CO_2 από το αίμα και η αντικατάστασή του από O_2 .
- Ξεκινάει από τη δεξιά κοιλία και κατευθύνεται προς τους πνεύμονες.
- Το διοξείδιο του άνθρακα αποβάλλεται από το αίμα και αντικαθίσταται από οξυγόνο.
- Το εμπλουτισμένο με οξυγόνο αίμα οδηγείται στον αριστερό κόλπο και από εκεί στην αριστερή κοιλία.



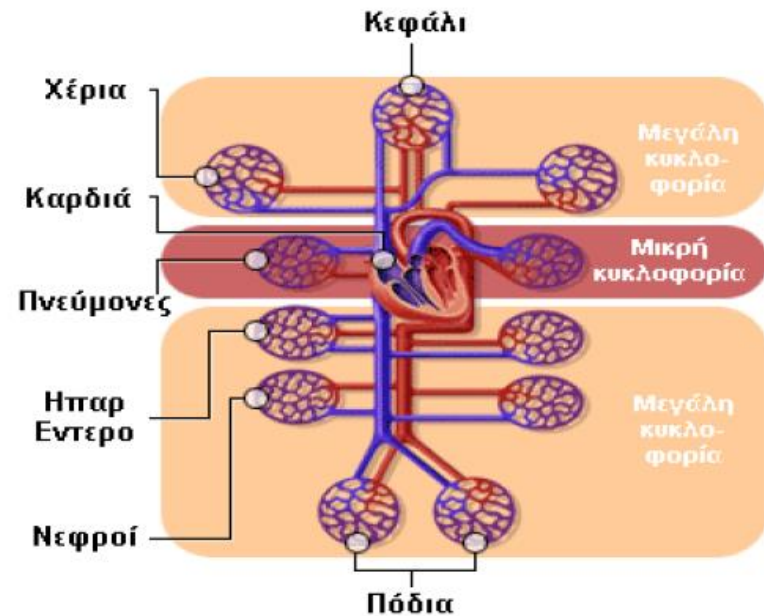
Η κυκλοφορία του αίματος

Μεγάλη κυκλοφορία:

- Αριστερή κοιλία - > Τριχοειδή - > Άνω και κάτω κοίλες φλέβες - > Δεξιός κόλπος.

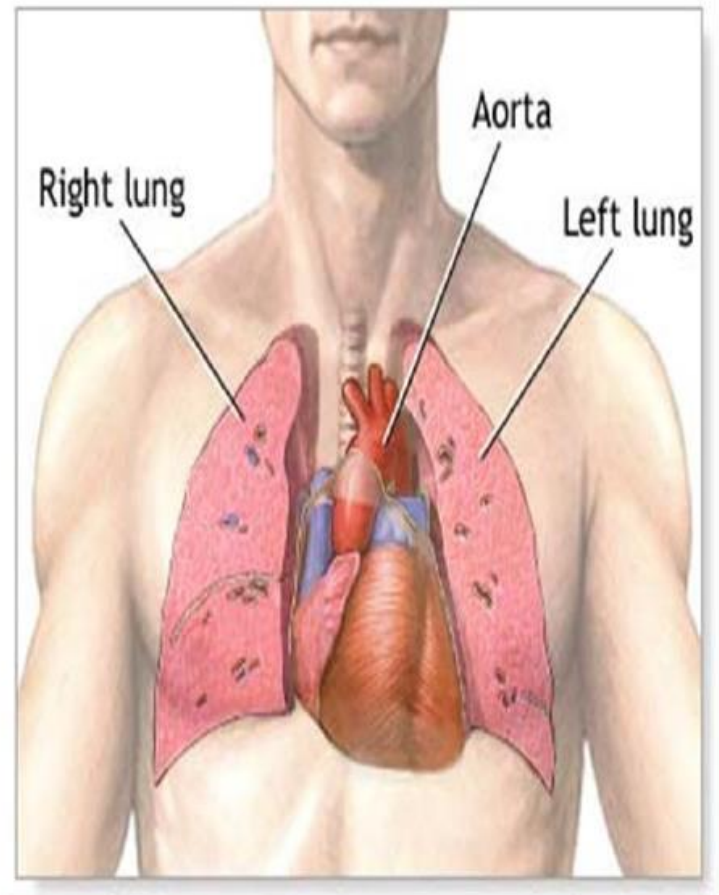
Μικρή κυκλοφορία:

- Δεξιά κοιλία->Πνευμονική αρτηρία-> Πνεύμονες - > Πνευμονικές φλέβες - > Αριστερός κόλπος.



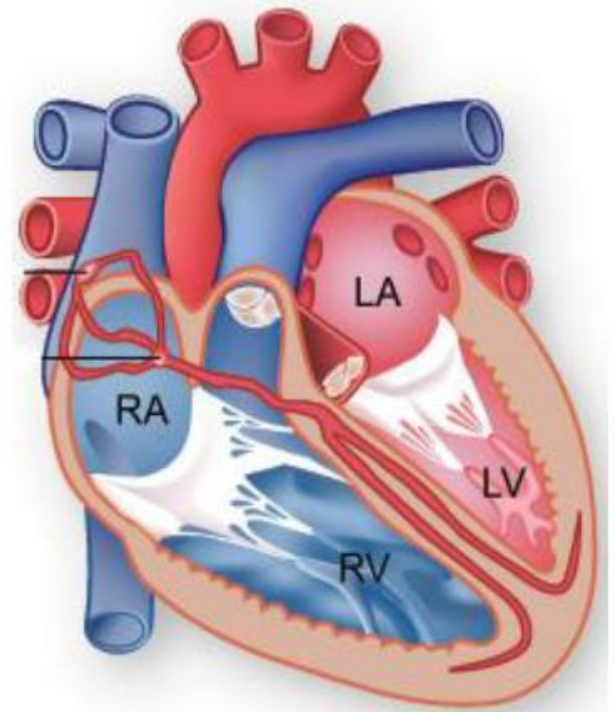
Η καρδιά (2/2)

- Μυώδες όργανο που συστέλλεται ρυθμικά λειτουργώντας σας αντλία.
- Η μέση συχνότητα που χτυπά η καρδιά είναι **72 σφύξεις ανά λεπτό**.
- Σε κατάσταση ηρεμίας, η καρδιά διακινεί περίπου **5 λίτρα αίμα το λεπτό**. Κατά τη διάρκεια της άσκησης, η ποσότητα αυτή μπορεί να αυξηθεί έως και 25 λίτρα το λεπτό.



Η φυσιολογία της καρδιάς (2/4)

- Η καθεμία από τις δύο καρδιές αποτελεί αντλία με δύο θαλάμους, δηλαδή **έναν κόλπο και μία κοιλία**, που συστέλλονται περιοδικά.
- Ο **κόλπος (atrium)** λειτουργεί ως ελαφρά **υποβοηθητική αντλία** για την προώθηση του αίματος προς την κοιλία.
- Η **κοιλία (ventricle)** προσφέρει την **κύρια δύναμη** για την προώθηση του αίματος μέσα από την **πνευμονική ή περιφερική κυκλοφορία**.

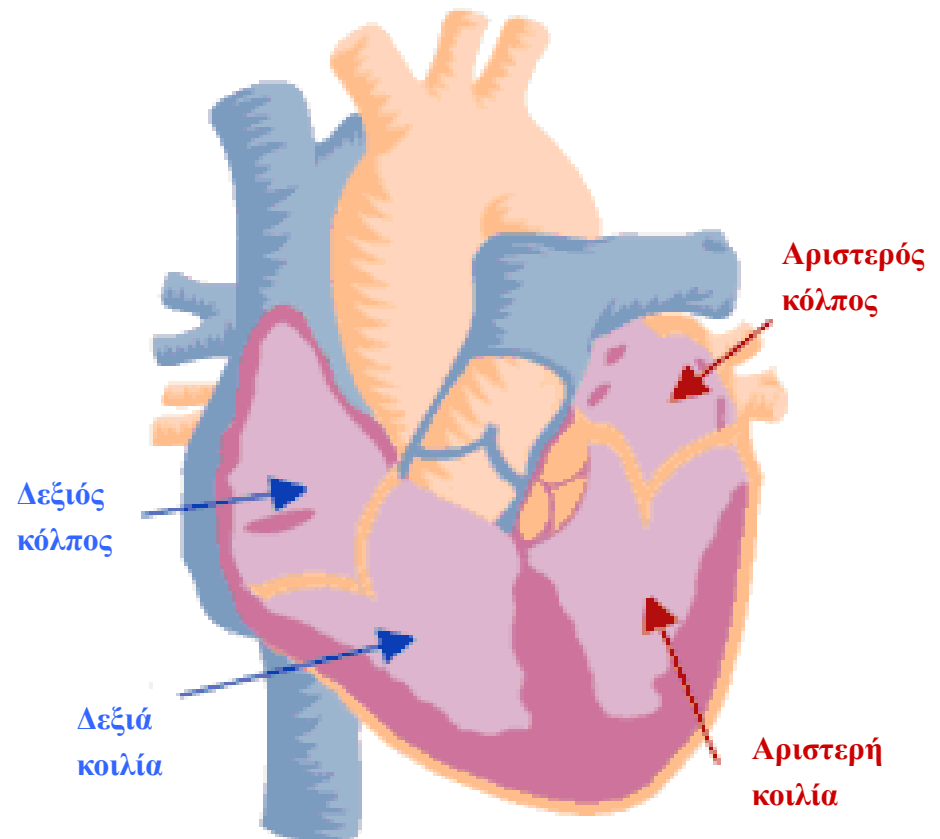


Δομή της καρδιάς

Κάθε μία από τις αντλίες αποτελείται από έναν κόλπο και μία κοιλία που συστέλλονται περιοδικά.

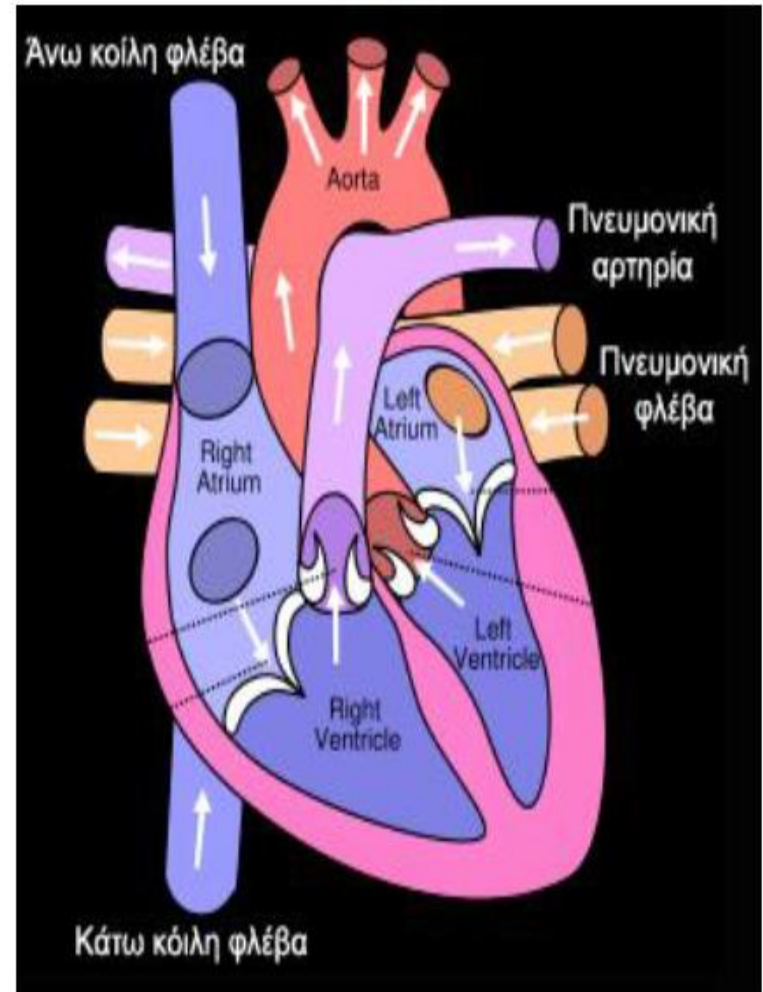
- Οι κόλποι συστέλλονται πριν από τις κοιλίες και προωθούν το αίμα σε αυτές πριν την ισχυρή κοιλιακή συστολή.
- Οι κόλποι ενεργούν σαν **προαντλίες** για την πλήρωση των κοιλιών.
- Οι κοιλίες ενεργούν σαν **κύριες αντλίες** που προωθούν το αίμα στα αγγεία.

Μυοκάρδιο κοιλιών: πιο μεγάλο λόγω υψηλότερων πιέσεων.



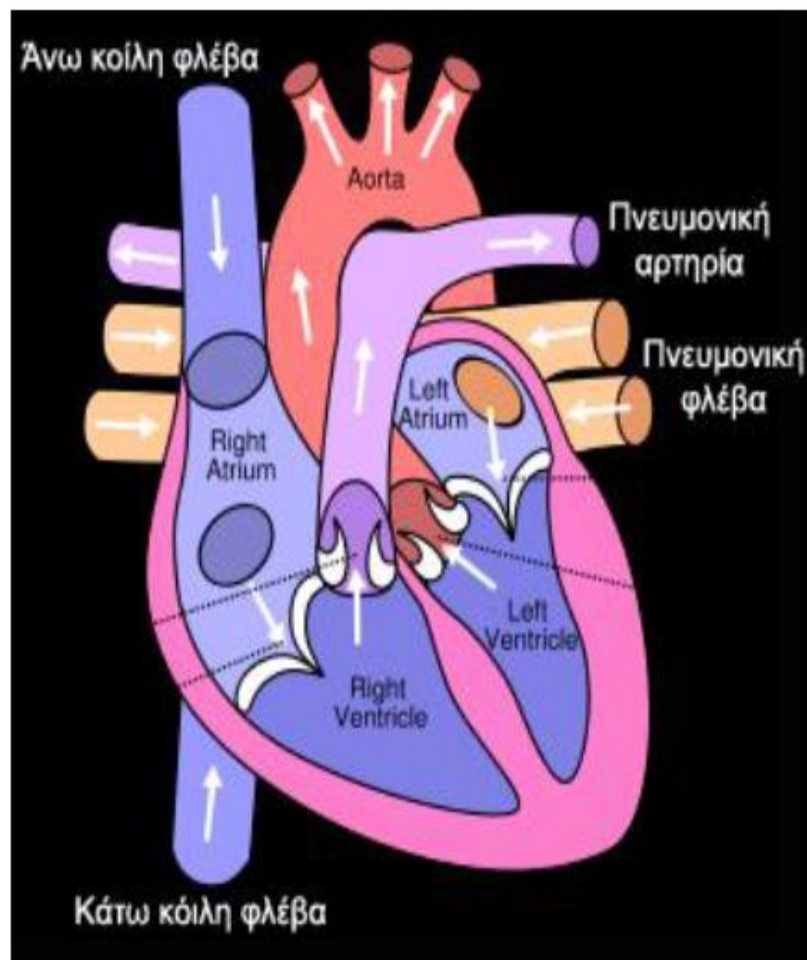
Η φυσιολογία της καρδιάς (3/4)

- Ο δεξιός κόλπος δέχεται αίμα από:
 - **Άνω κοίλη φλέβα**
(εμπλουτισμένο σε CO₂ επιστρέφοντας από τα χέρια, το κεφάλι και τον κορμό).
 - **Κάτω κοίλη φλέβα**
(εμπλουτισμένο σε CO₂ επιστρέφοντας από τα πόδια, την κοιλιά και τη λεκάνη).
- Ο δεξιός κόλπος μεταφέρει το αίμα στη δεξιά κοιλία.



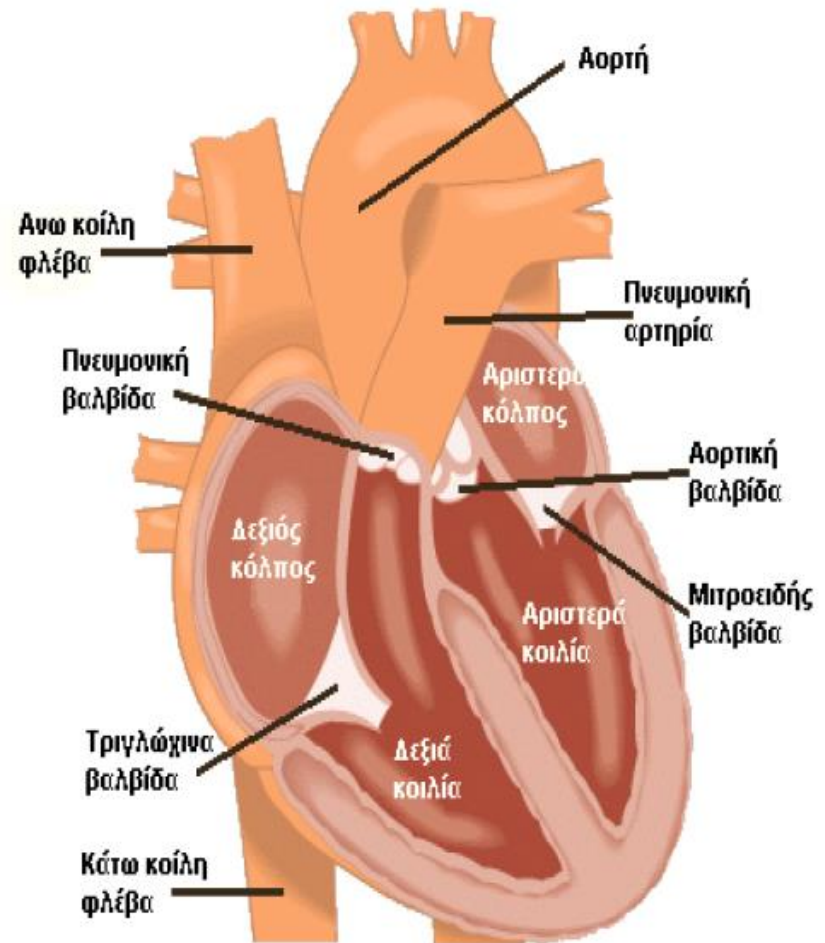
Η φυσιολογία της καρδιάς (4/4)

- Ο αριστερός κόλπος δέχεται αίμα από τις πνευμονικές φλέβες (εμπλουτισμένο σε οξυγόνο).
- Ο αριστερός κόλπος μεταφέρει το αίμα στην αριστερή κοιλία .



Οι καρδιακές κοιλότητες

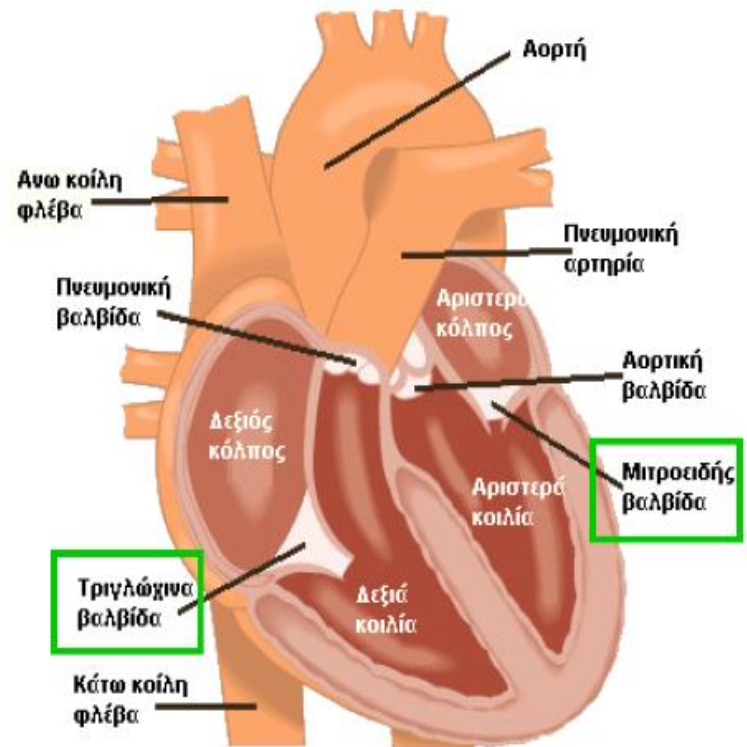
- **Δεξιός κόλπος:** Ο δεξιός κόλπος δέχεται μη οξυγονωμένο αίμα από την **άνω και κάτω κοίλη φλέβα**.
- **Δεξιά κοιλία:** Η δεξιά κοιλία εξωθεί αίμα στην πνευμονική κυκλοφορία μέσω των **πνευμονικών αρτηριών**.
- **Αριστερός κόλπος:** Ο αριστερός κόλπος δέχεται οξυγονωμένο αίμα από τις **πνευμονικές φλέβες**.
- **Αριστερή κοιλία:** Η αριστερή κοιλία εξωθεί αίμα στη συστηματική κυκλοφορία μέσω της **αορτής**.



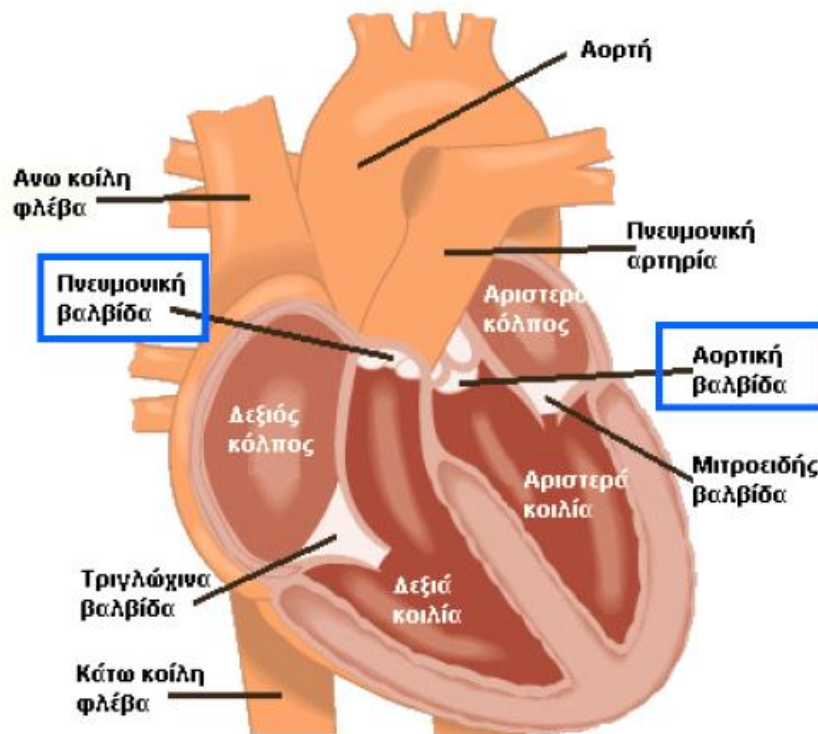
Οι ενδοκαρδιακές βαλβίδες (1/2)

Κολποκοιλιακές βαλβίδες: Αποτρέπουν την προς τα πίσω διαφυγή του αίματος από τις κοιλίες προς τους κόλπους όταν συστέλλονται η δεξιά και η αριστερή κοιλία.

- **Μιτροειδής βαλβίδα (διγλώχινα):** Η μιτροειδής βαλβίδα παρεμβάλλεται μεταξύ του αριστερού κόλπου και της αριστερής κοιλίας.
- **Τριγλώχινα βαλβίδα:** Η τριγλώχινα βαλβίδα παρεμβάλλεται μεταξύ του δεξιού κόλπου και της δεξιάς κοιλίας. Είναι η μεγαλύτερη βαλβίδα του σώματος.



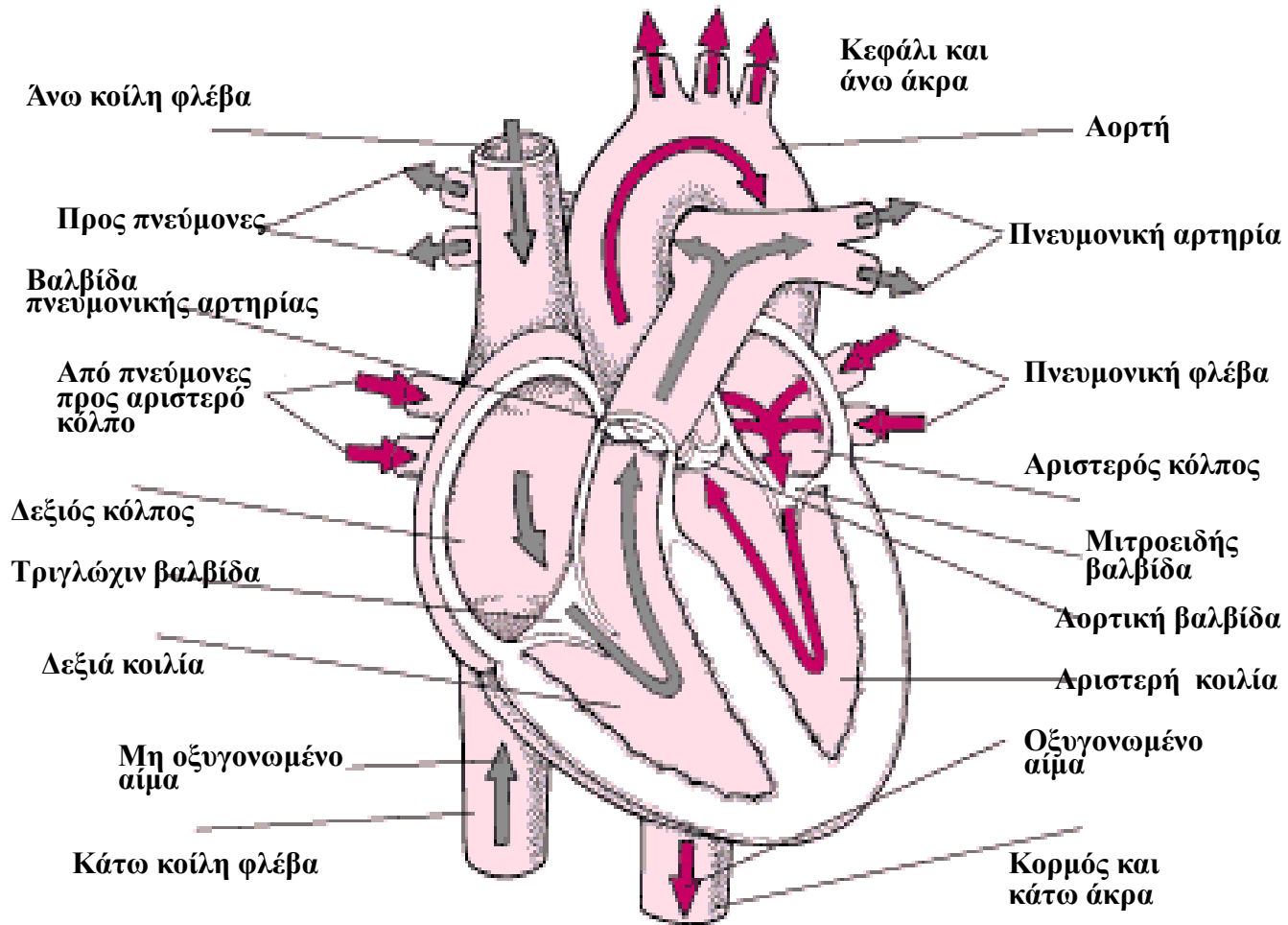
Οι ενδοκαρδιακές βαλβίδες (2/2)



Μηνοειδείς βαλβίδες: Αποτρέπουν την προς τα πίσω διαφυγή του αίματος από την αορτή προς την αριστερή κοιλία και από την πνευμονική αρτηρία προς τη δεξιά κοιλία κατά τη διαστολή.

- **Αορτική βαλβίδα:** Η αορτική βαλβίδα παρεμβάλλεται μεταξύ της αριστερής κοιλίας και της αορτής.
- **Πνευμονική βαλβίδα:** Η πνευμονική βαλβίδα παρεμβάλλεται μεταξύ της πνευμονικής αρτηρίας και της δεξιάς κοιλίας.

Λειτουργία της καρδιάς



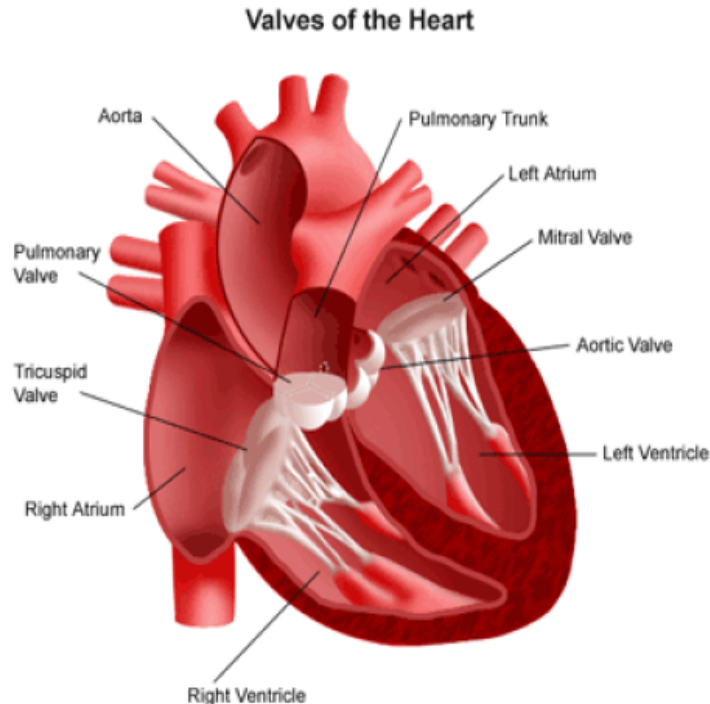
Η λειτουργία της καρδιάς

- Ο δεξιός κόλπος λαμβάνει το αίμα που έχει κυκλοφορήσει στο περιφερικό σύστημα για τη μεταφορά οξυγόνου και θρεπτικών συστατικών.
- Ο αριστερός κόλπος λαμβάνει νέο οξυγονωμένο αίμα από τους πνεύμονες.
- Όταν οι κόλποι συστέλλονται, ωθούν το αίμα μέσω των βαλβίδων στις κοιλίες.
- Κατά τη συστολή της δεξιάς κοιλίας το αίμα ωθείται στους πνεύμονες.
- Κατά τη συστολή της αριστερής κοιλίας το αίμα ωθείται στο περιφερικό σύστημα.

Η λειτουργία της καρδιάς

- Δημιουργεί την πίεση του αίματος (κατά τη συστολή και διαστολή).
- Διαχωρίζει το αίμα προς της πνευμονική και συστηματική κυκλοφορία.
- Διασφαλίζει τη ροή προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση (λειτουργία βαλβίδων).
- Ρυθμίζει την παροχή αίματος στο σώμα:
 - Αλλαγές στην ταχύτητα και πίεση συστολής καθορίζει τη ροή του αίματος σε καταστάσεις αυξημένων αναγκών.

Η λειτουργία των καρδιακών βαλβίδων (1/2)



Pulmonary valve: Πνευμονική βαλβίδα

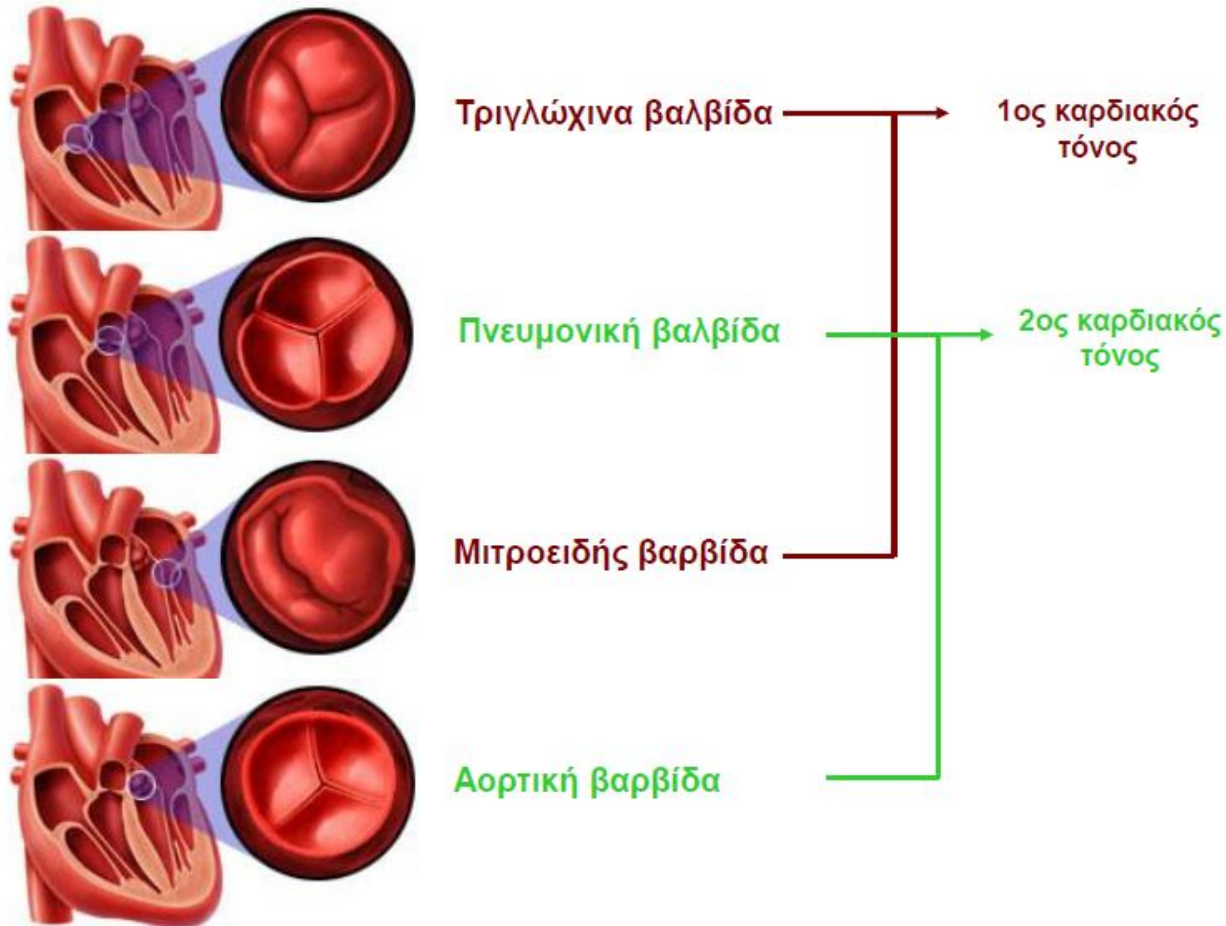
Tricuspid valve: Τριγλώχινα βαλβίδα

Aortic valve: Αορτική βαλβίδα

Mitral valve: Μιτροειδής βαλβίδα

- **Κατά τη συστολή των κοιλιών:** αυξάνει η πίεση στις κοιλίες και εξωθείται το αίμα προς τα μεγάλα αγγεία (αορτή, πνευμονική αρτηρία). Η μιτροειδής και η τριγλώχινα βαλβίδα, κλείνουν, η δε αορτική και η πνευμονική βαλβίδα ανοίγουν.
- **Κατά τη διαστολή της καρδιάς:** ελαττώνεται η πίεση στις κοιλίες και το αίμα εισρέει από τους κόλπους στις κοιλίες. Η μιτροειδής και η τριγλώχινα βαλβίδα ανοίγουν, η δε αορτική και η πνευμονική βαλβίδα κλείνουν.

Η λειτουργία των καρδιακών βαλβίδων (2/2)



Καρδιακός παλμός (ή καρδιακός κύκλος) (1/2)

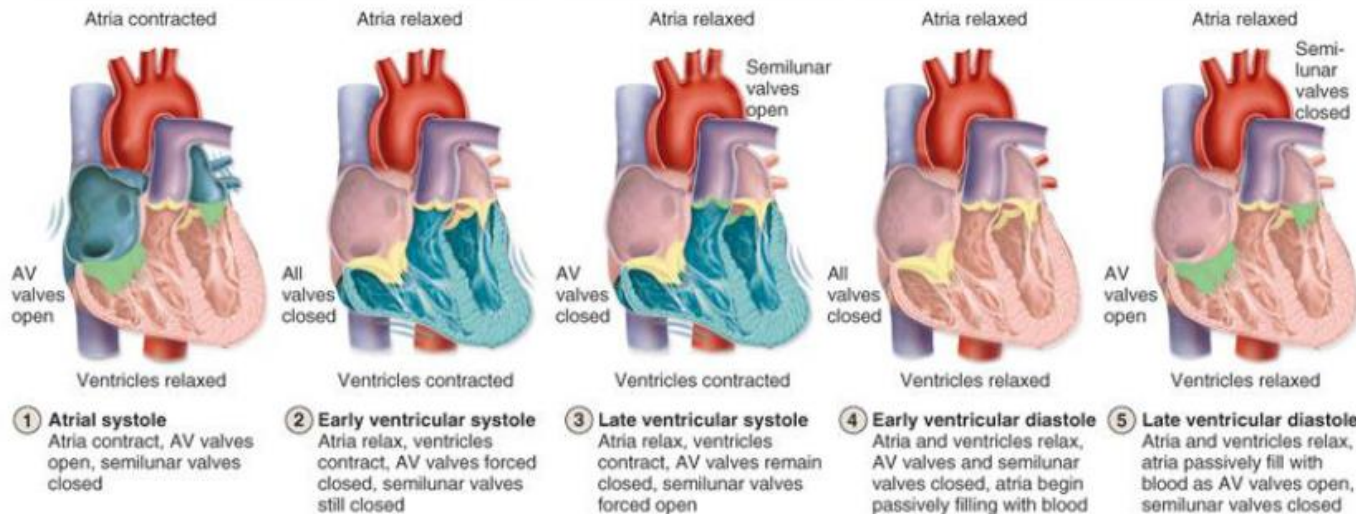
Σε κάθε καρδιακό παλμό περιλαμβάνονται τρεις φάσεις:

- **Συστολή των κόλπων:** Το αίμα **φέρεται** στις κοιλίες.
 - **Συστολή των κοιλιών:** Το αίμα **πηγαίνει** από τη δεξιά κοιλία προς την πνευμονική αρτηρία και από την αριστερή κοιλία στην αορτή.
 - **Διαστολή ή παύλα** (ηρεμία των κόλπων και των κοιλιών): Ηρεμούν (αναπαύονται) και οι κόλποι και οι κοιλίες και η καρδιά γεμίζει πάλι από αίμα.
- Η χρονική περίοδος από το τέλος μίας συστολής της καρδιάς μέχρι το τέλος της επόμενης συστολής.
 - Αρχίζει με την αυτόματη γένεση ενός δυναμικού ενεργείας στον φλεβόκομβο.
 - Το δυναμικό ενεργείας επεκτείνεται στους κόλπους και από εκεί στις κοιλίες.

Καρδιακός παλμός (ή καρδιακός κύκλος) (2/2)

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Phase	Atrial systole	Early ventricular systole	Late ventricular systole	Early ventricular diastole	Late ventricular diastole
Atria	Contract	Relax		Relax	
Ventricles	Relax	Contract		Relax	
AV valves	Open	Closed		Open	
Semilunar valves	Closed	Open		Closed	



Atria: Καρδιακός κόλπος
Ventricle: Καρδιακή κοιλία

Atrioventricular (AV) valves: Κολποκοιλιακές βαλβίδες
Semilunar valves: Μηνοειδείς βαλβίδες

Περίοδος συστολής και διαστολής

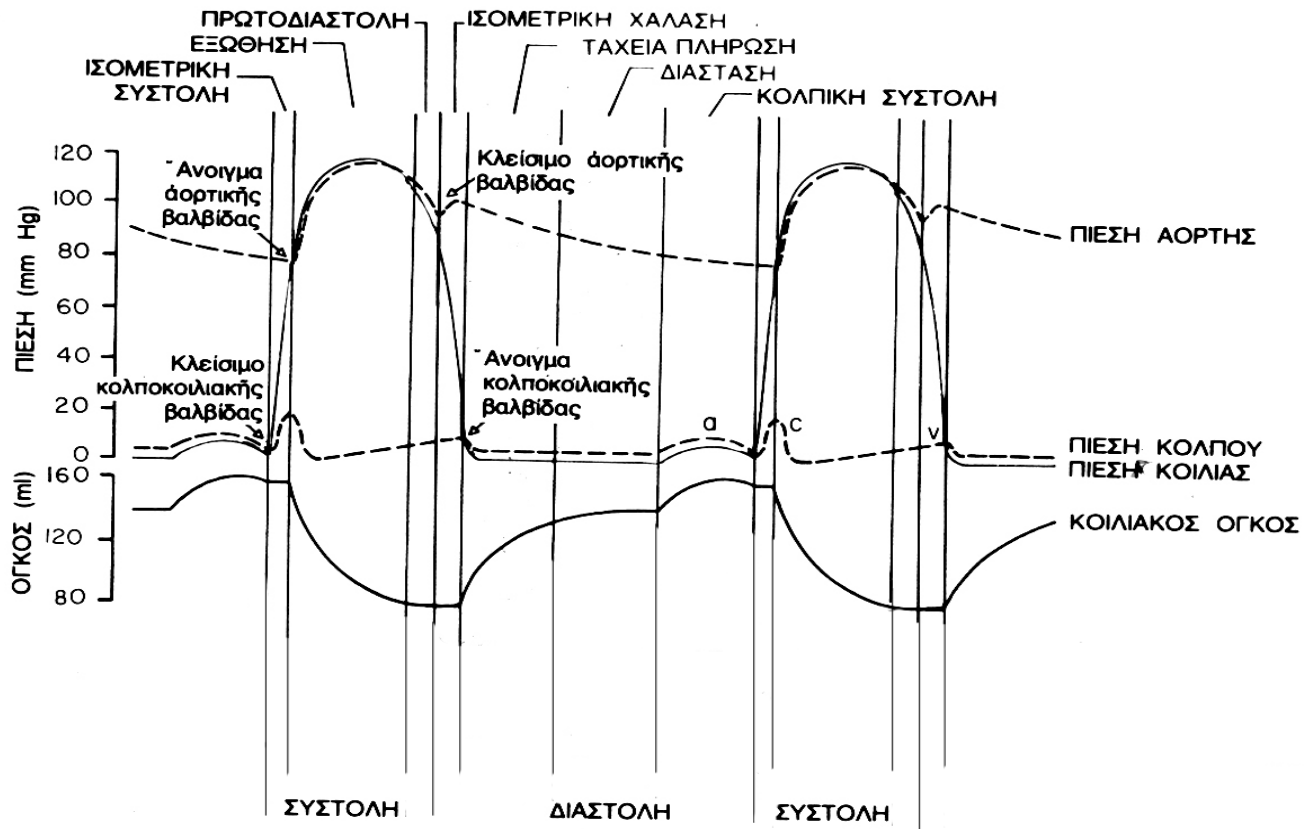
Σε κάθε καρδιακό παλμό περιλαμβάνονται τρεις φάσεις:

- **Συστολή των κόλπων:** Το αίμα **φέρεται** στις κοιλίες.
- **Συστολή των κοιλιών:** Το αίμα **ωθείται στις αρτηρίες**.
 - Η αριστερή κοιλία ωθεί το αίμα στην αορτή.
 - Η δεξιά κοιλία ωθεί το αίμα στην πνευμονική αρτηρία.
- **Διαστολή ή παύλα** (ηρεμία των κόλπων και των κοιλιών): Ηρεμούν (αναπαύονται) και οι κόλποι και οι κοιλίες και η καρδιά γεμίζει πάλι από αίμα.

Καρδιακός παλμός (Καρδιακός κύκλος)

- Η χρονική περίοδος από το τέλος μιας συστολής της καρδιάς μέχρι το τέλος της επόμενης συστολής.
- Αρχίζει με την αυτόματη γένεση ενός δυναμικού ενέργειας στο φλεβόκομβο.
- Το δυναμικό ενέργειας επεκτείνεται στους κόλπους και από εκεί στις κοιλίες.
- Παρατηρείται καθυστέρηση αγωγής από τους κόλπους στις κοιλίες κατά $1/10$ sec.
- Έτσι, οι κόλποι συστέλλονται πριν από τις κοιλίες – οι κόλποι λειτουργούν ως αντλίες για τις κοιλίες.

Ο καρδιακός παλμός



Τα φαινόμενα του καρδιακού κύκλου, με τις μεταβολές της πίεσης στην αορτή, τον αριστερό κόλπο και την αριστερή κοιλία καθώς και τις μεταβολές του όγκου των κοιλιών

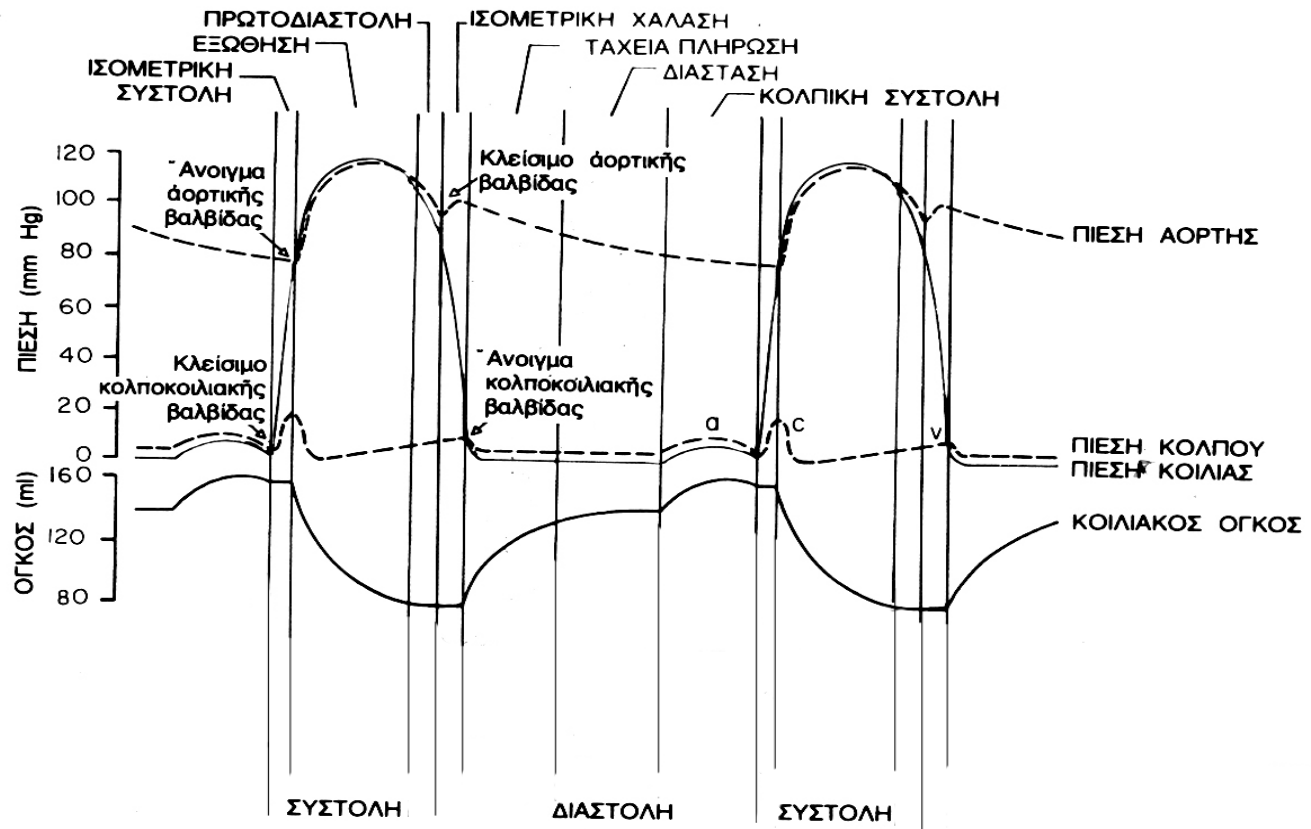
Η αντλητική λειτουργία της καρδιάς

- Ρυθμική συστολή και διαστολή τμημάτων της καρδιάς - αλληλοδιαδέχονται η μία την άλλη
- Αιματική ροή: αποτέλεσμα έκθλιψης του αίματος από τις κοιλίες κατά τη συστολή \Rightarrow περιοδική λειτουργία
- Μετά την έκθλιψη αίματος \Rightarrow νέο γέμισμα της καρδιάς
- Κατά ώσεις προώθηση αίματος \Rightarrow δημιουργία μερικών περιοδικών φαινομένων που διαδίδονται κατά μήκος των αγγείων του κυκλοφορικού συστήματος

Η αντλητική λειτουργία των κόλπων

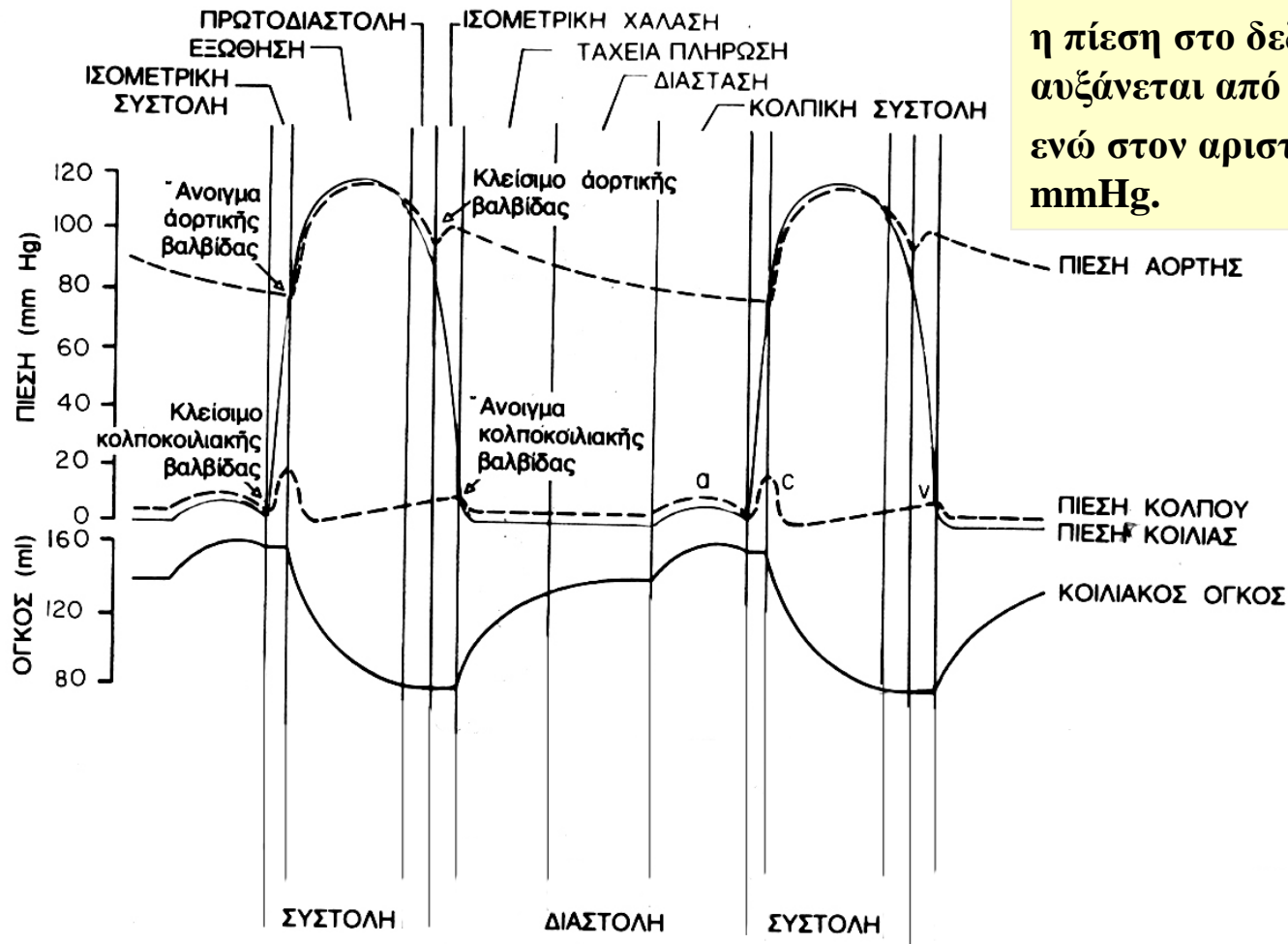
- Το αίμα ρέει από τις μεγάλες φλέβες προς τους κόλπους - από αυτό το 75% διοχετεύεται κατευθείαν στις κοιλίες (πριν ακόμα συσταλούν οι κόλποι) - στη συνέχεια με τη συστολή των κόλπων προκαλείται μία συμπληρωματική πλήρωση των κοιλιών κατά 25%.
- Η καρδιά μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί κανονικά ακόμα και χωρίς αυτό το επιπρόσθετο 25% της αποτελεσματικότητας, γιατί διαθέτει την ικανότητα για άντληση αίματος σε ποσοστό 300-400% περισσότερο από αυτό που χρειάζεται το σώμα.

Η αντλητική λειτουργία της καρδιάς

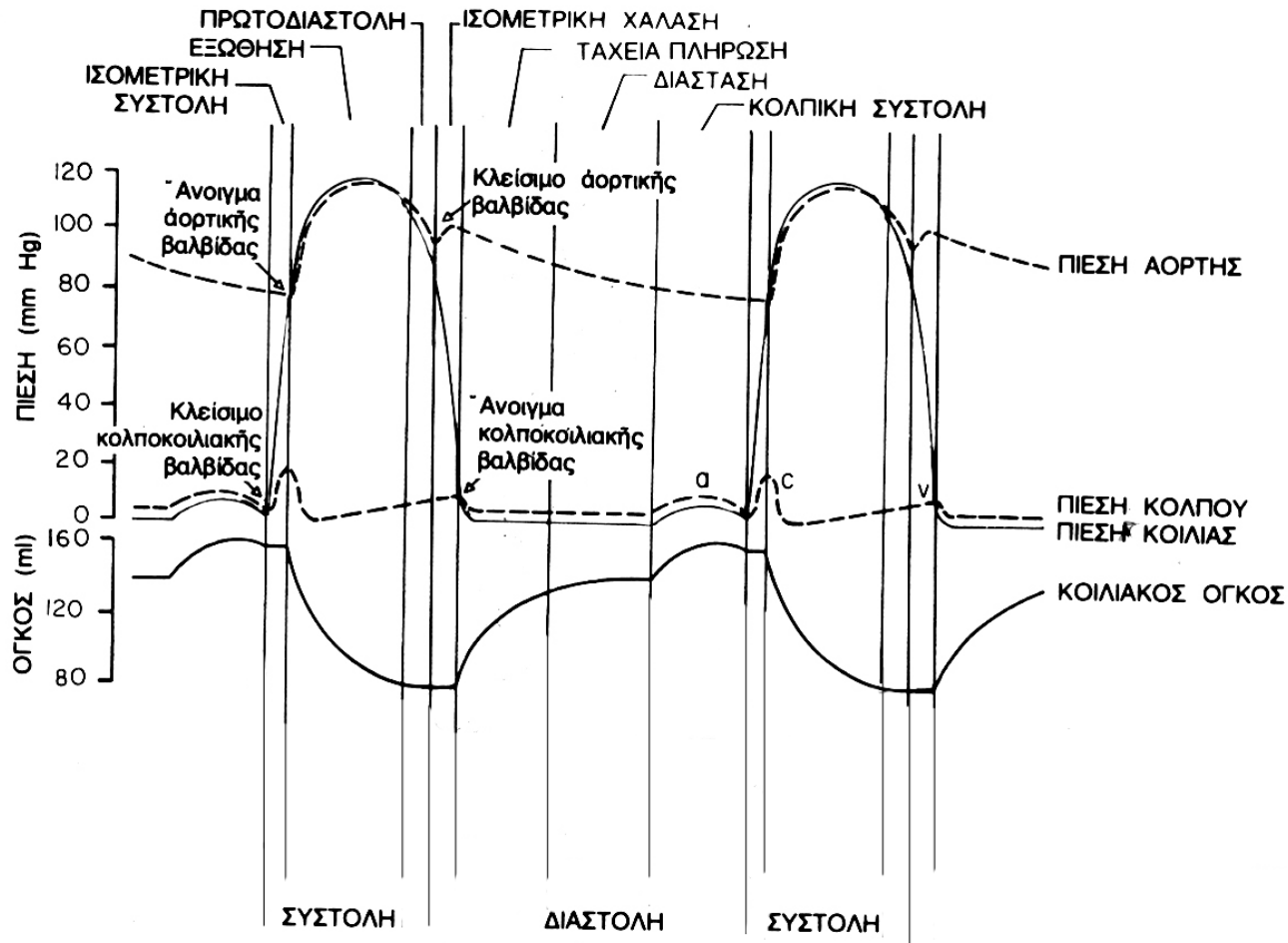


Οι μεταβολές της ενδοκοιλιακής πίεσης – κύμα a

Το κύμα a προκαλείται από τη συστολή των κόλπων - η πίεση στο δεξιό κόλλπο αυξάνεται από 4-6 mmHg, ενώ στον αριστερό από 7-8 mmHg.



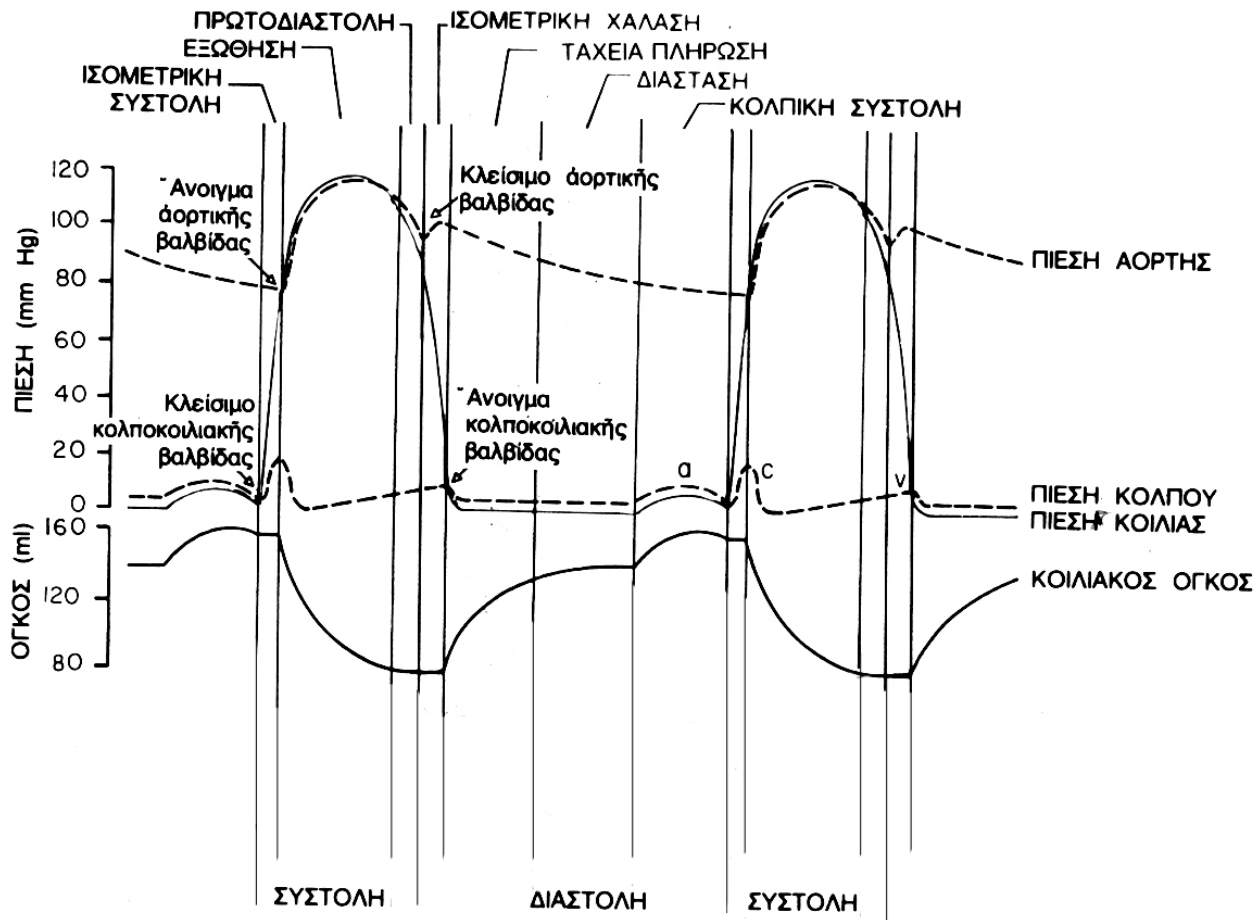
Οι μεταβολές της ενδοκοιλιακής πίεσης – κύμα c



Το κύμα c εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της κοιλιακής συστολής και προκαλείται κυρίως από:

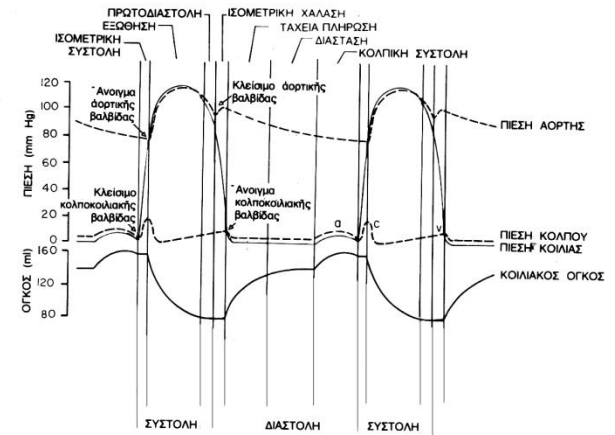
- 1) την κύρτωση των κοιλιοκοιλιακών βαλβίδων προς τους κόλπους, εξαιτίας της αυξανόμενης πίεσης στις κοιλίες,
- 2) ελαφρά παλινδρόμηση αίματος προς τους κόλπους κατά την έναρξη της κοιλιακής συστολής

Οι μεταβολές της ενδοκοιλιακής πίεσης – κύμα ν



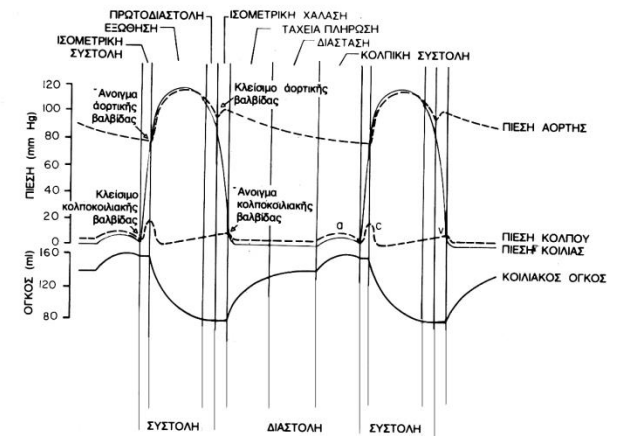
Το κύμα ν εμφανίζεται προς το τέλος της κοιλιακής συστολής και οφείλεται στη βραδεία είσοδο αίματος μέσα στους κόλπους κατά τη διάρκεια συστολής των κοιλιών και ενώ οι κολποκοιλιακές βαλβίδες είναι κλειστές.

Η αντλητική λειτουργία των κοιλιών



- **Ταχεία Πλήρωση των Κοιλιών:** Μετά το τέλος της συστολής των κοιλιών, οι χαμηλές (διαστολικές) πιέσεις στις κοιλίες και οι σχετικά υψηλές πιέσεις στους κόλπους από την άθροιση ποσού αίματος προκαλούν την άμεση διάνοιξη των κολποκοιλιακών βαλβίδων και ο όγκος των κοιλιών αυξάνεται γρήγορα. Ο χρόνος ταχείας πλήρωσης καταλαμβάνει το 1/3 της διάρκειας της διαστολής.
- **Διάταση:** Κατά το δεύτερο 1/3, το μικρό ποσό αίματος που εξακολουθεί να διοχετεύεται από τις φλέβες προς τους κόλπους ρέει κατευθείαν προς τις κοιλίες.
- **Κολπική συστολή:** Στο τελευταίο 1/3, οι κόλποι συστέλλονται και προσδίδουν μία επιπλέον ώθηση στην εισροή αίματος προς τις κοιλίες (25%).

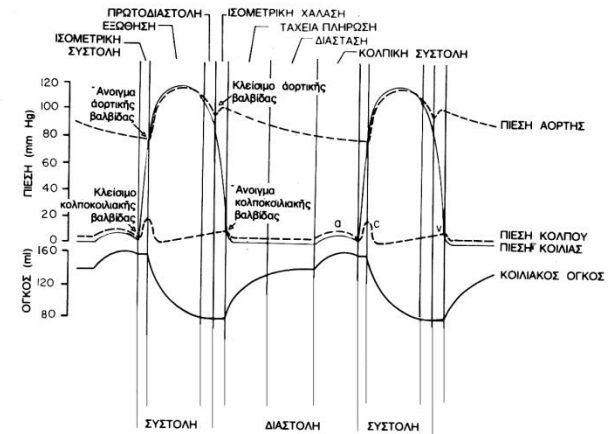
Η εκκένωση των κοιλιών κατά τη συστολή



- **Χρόνος Ισομετρικής Συστολής:** Επιτελείται συστολή των κοιλιών χωρίς όμως να προκαλείται εκκένωση των κοιλιών (αφού οι βαλβίδες είναι κλειστές).

Αμέσως μετά την έναρξη της συστολής των κοιλιών, η ενδοκοιλιακή πίεση υφίσταται απότομη άνοδο, με αποτέλεσμα τη σύγκλιση των κολποκοιλιακών βαλβίδων και ένας επιπρόσθετος χρόνος 0,02-0,03 sec απαιτείται για να αναπτυχθεί στις κοιλίες πίεση αρκετή να υπερνικήσει τις πιέσεις της αορτής και πνευμονικής αρτηρίας και να προκληθεί διάνοιξη των μηνοειδών βαλβίδων (αορτικής και πνευμονικής).

Χρόνος διοχέτευσης



Χρόνος Διοχέτευσης: Όταν η πίεση μέσα στην αριστερή κοιλία αυξάνεται πάνω από τα 80 mmHg και στη δεξιά κοιλία πάνω από τα 8 mmHg (εξισώνεται δηλαδή με την πίεση που επικρατεί στις αρτηρίες), διανοίγονται οι μηννοειδείς βαλβίδες και το αίμα εξωθείται από τις κοιλίες προς τις αρτηρίες.

1) Χρόνος Ταχείας Διοχέτευσης:

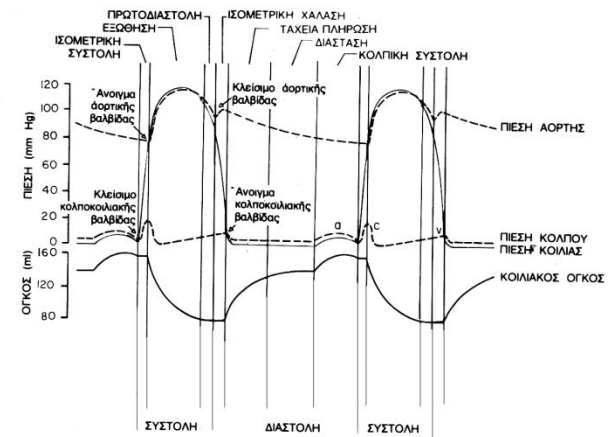
Το 70% από αυτό διοχετεύεται κατά τη διάρκεια του πρώτου 1/3 του χρόνου διοχέτευσης.

2) Χρόνος Βραδείας Διοχέτευσης:

Το άλλο 30% διοχετεύεται τα υπόλοιπα 2/3 του χρόνου διοχέτευσης.

Πρωτοδιαστολική περίοδος: ροή μικρής ποσότητας αίματος από κοιλίες στις μεγάλες αρτηρίες

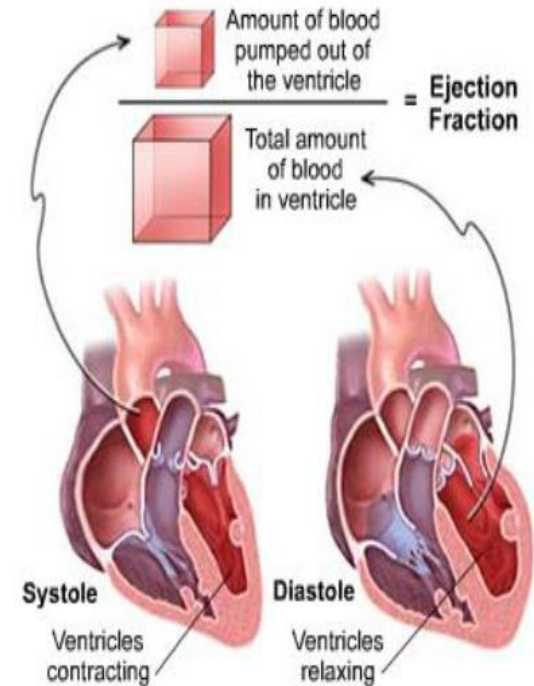
Χρόνος ισομετρικής χάλασης



- **Χρόνος Ισομετρικής Χάλασης:** Στο τέλος της συστολής, η χάλαση των κοιλιών αρχίζει απότομα, με αποτέλεσμα την ταχεία υποχώρηση των ενδοκοιλιακών πιέσεων. Οι αυξημένες πιέσεις μέσα στις διατεταμένες μεγάλες αρτηρίες προκαλούν απότομη παλινδρόμηση αίματος προς τις κοιλίες, γεγονός που προκαλεί το απότομο κλείσιμο των βαλβίδων της αορτής και της πνευμονικής αρτηρίας. Για το επόμενο χρονικό διάστημα των 0,03-0,06 sec, η χάλαση του μυοκαρδίου των κοιλιών συνεχίζεται, και οι ενδοκοιλιακές πιέσεις ελαττώνονται με ταχύτατο ρυθμό, προς τα πολύ χαμηλά διαστολικά τους επίπεδα. Αμέσως μετά, ανοίγουν οι κοιλιοκοιλιακές βαλβίδες και αρχίζει ο επόμενος κύκλος της αντλητικής λειτουργίας των κοιλιών.

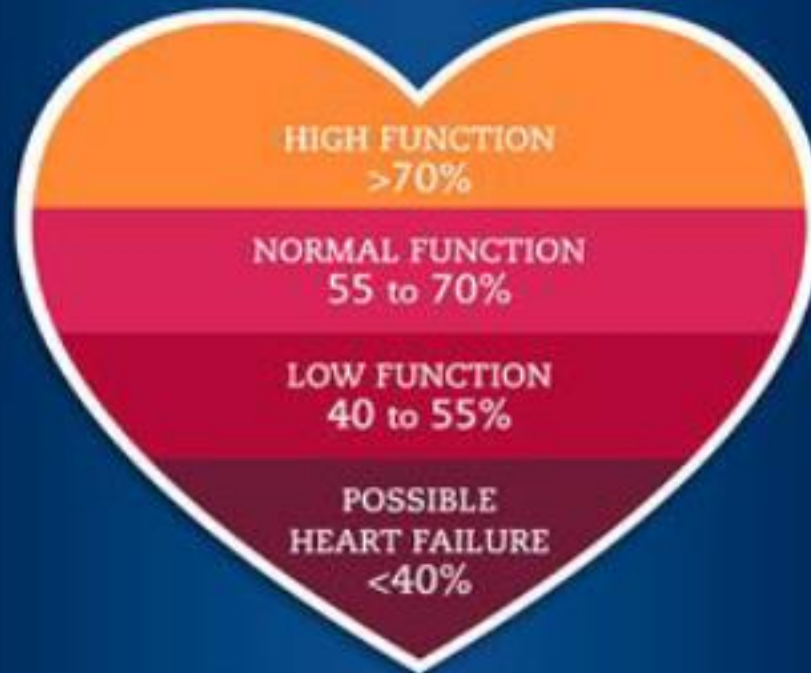
- Κατά τη διάρκεια της διαστολής, η πλήρωση των κοιλιών αυξάνει φυσιολογικά τον όγκο της κάθε κοιλίας κατά 110 - 120 ml. Ο όγκος αυτός είναι γνωστός ως **τελοδιαστολικός όγκος**.
- Στη συνέχεια, κατά την εκκένωση των κοιλιών, ο όγκος της κάθε κοιλίας ελαττώνεται κατά 70 ml περίπου. Ο όγκος αυτός καλείται **καρδιακός όγκος παλμού (stroke volume)**.
- Ο υπόλοιπος όγκος κάθε κοιλίας, που είναι 40 - 50 ml περίπου, λέγεται **τελοσυστολικός όγκος**.
- Το ποσοστό του τελοδιαστολικού όγκου που διοχετεύεται από κάθε κοιλία στη σύστοιχη αρτηρία, λέγεται **κλάσμα ή ποσοστό εξωθήσης** (ή διοχέτευσης) και συνήθως είναι περίπου 60 %.
- Έτσι έχουμε ότι:

$$\text{Κλασμα εξωθησης (ΚΕ)\%} = \frac{\text{όγκος παλμού}}{\text{τελοδιαστολικός όγκος}} \cdot 100\% .$$

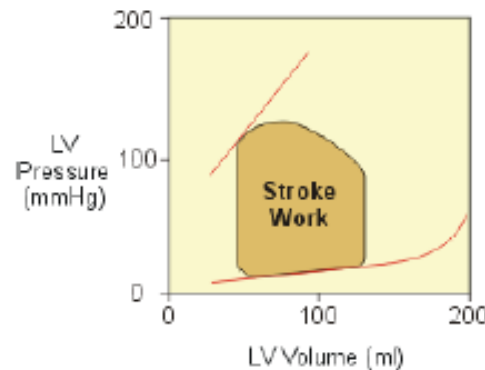


EJECTION FRACTION

What the Numbers Mean



- Το **μηχανικό έργο ανά καρδιακό παλμό (stroke work)** είναι το ποσό της ενέργειας το οποίο η καρδιά μετατρέπει σε μηχανικό έργο σε κάθε καρδιακό παλμό, κατά την άντληση του αίματος προς τις αρτηρίες.

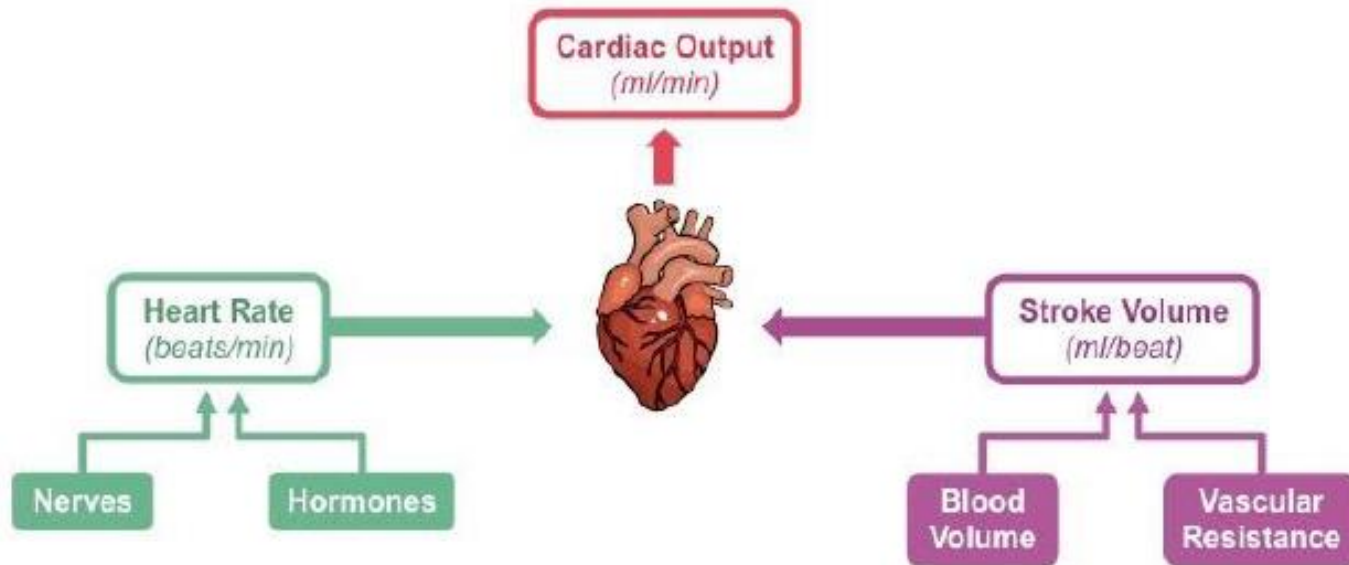


- Το **μηχανικό έργο ανά λεπτό (cardiac minute work)** είναι το ολικό ποσό της ενέργειας που μετατρέπεται σε μηχανικό έργο μέσα σε ένα λεπτό και που ισούται με το μηχανικό έργο ανά καρδιακό παλμό επί τη συχνότητα της καρδιακής λειτουργίας.
- Δηλαδή ισχύει: $W_{\min} = W_{\text{pulse}} \times \text{BPM}$

- Η καρδιακή παροχή (**cardiac output**) ορίζεται ως η ποσότητα του αίματος που εξωθείται από την καρδιά κατά την διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος, διηρημένου ως προς το διάστημα αυτό.
- Δηλαδή ισχύει:

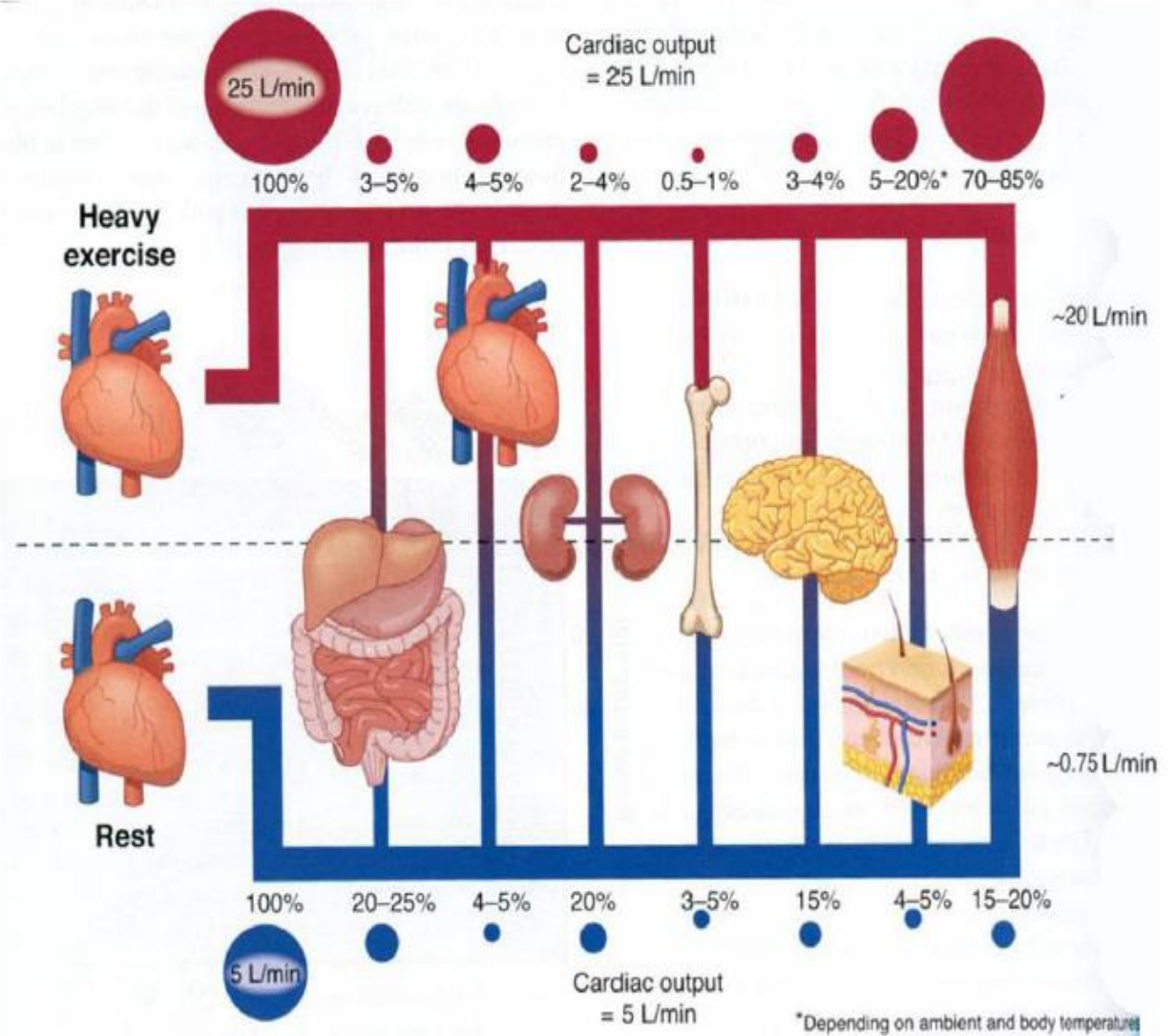
$$\text{Καρδιακή Παροχή (ΚΠ)} = \text{Όγκος Παλμού (ΟΠ)} \times \text{BPM}$$

(ml/min) (ml/pulse) (pulse/min)



Η Καρδιά

Καρδιακή
Παροχή στα
διάφορα όργανα



- Κατά τη μυϊκή συστολή, το μεγαλύτερο μέρος της χημικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα, πολύ δε μικρότερο μέρος μετατρέπεται σε μηχανικό έργο. Ο λόγος του μηχανικού έργου προς τη δαπάνη χημικής ενέργειας ονομάζεται **απόδοση της καρδιακής συστολής ή καρδιακή απόδοση**.
- Δηλαδή ισχύει:

$$a \% = \frac{\text{μηχανικό έργο ανά καρδ. παλμό}}{\text{συνολική κατανάλωση οξυγόνου ανά καρδ. παλμό}} \cdot 100 \%$$

- Η μέγιστη απόδοση της φυσιολογικής καρδιάς είναι **20% έως 25%**. Σε καρδιακή ανεπάρκεια, η απόδοση μπορεί να είναι μόνο 5% έως 10%.

- Κατά την ηρεμία του ατόμου η καρδιά προωθεί 4-6 λίτρα αίματος ανά λεπτό.
- Κατά τη διάρκεια βραχείας μυϊκής δραστηριότητας είναι δυνατόν να απαιτείται αύξηση της παροχής 4-7 φορές.
- Σε μια μέρα η καρδιά αντλεί συνολικά 7.500 λίτρα αίματος.
- Μέσα σε 75 χρόνια, η καρδιά:
αντλεί περίπου **207 εκατομμύρια λίτρα αίμα**
και χτυπάει **3 δισεκατομμύρια φορές !**



Καρδιακός όγκος παλμού

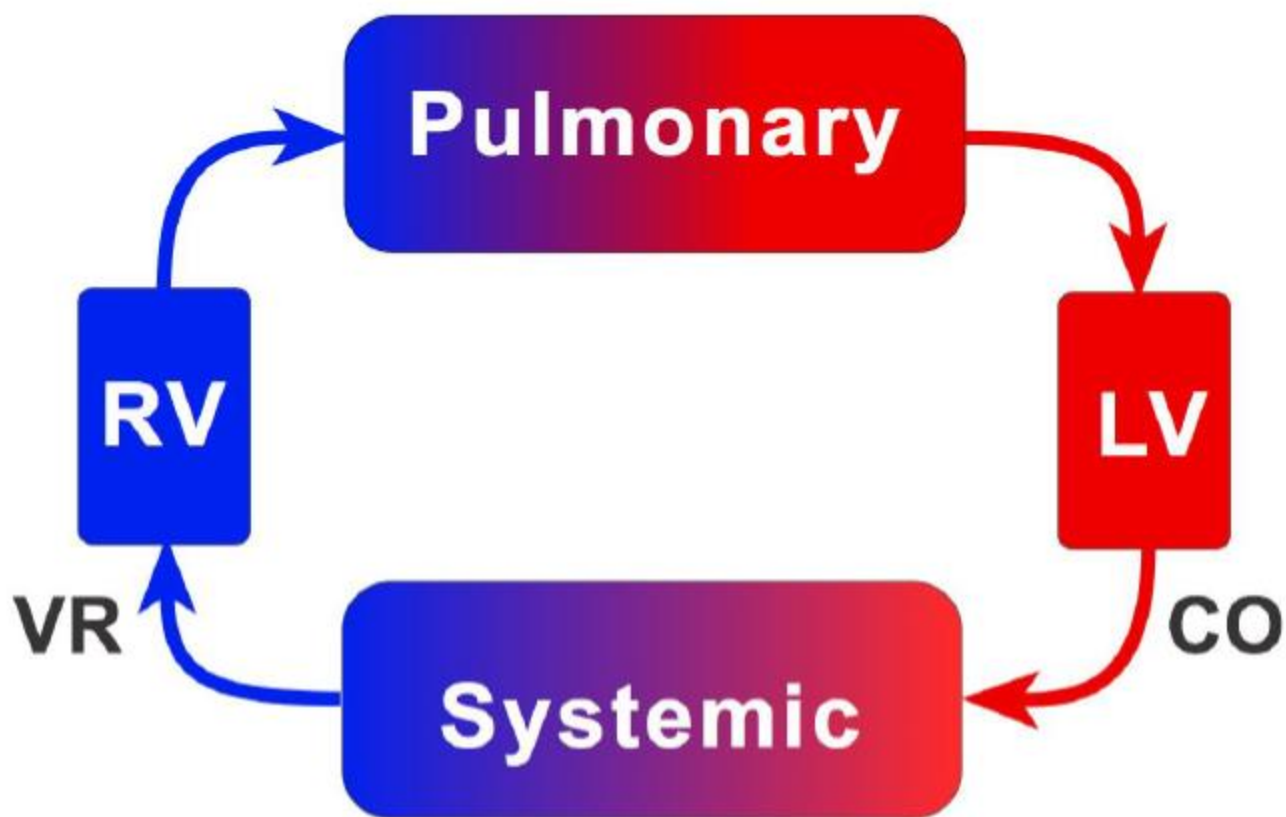
Η ποσότητα αίματος που εξωθείται από την κάθε κοιλία σε κάθε καρδιακή συστολή:

~ 70ml σε κάθε συστολή

Μπορεί

- να ελαττωθεί και μέχρι λίγα ml/παλμό
- να αυξηθεί ως:
 - τα 140ml/παλμό σε φυσιολογικές καρδιές
 - > 200ml/παλμό σε άτομα με μεγάλη καρδιά (π.χ. σε μερικούς αθλητές)

- Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την ποσότητα του αίματος που προωθεί η καρδιά ανά min είναι ο ρυθμός με τον οποίο το αίμα εισρέει στην καρδιά από τις φλέβες, δηλαδή η **φλεβική επάνοδος**.



Αντλητική λειτουργία της καρδιάς

Ενδογενής ρύθμιση

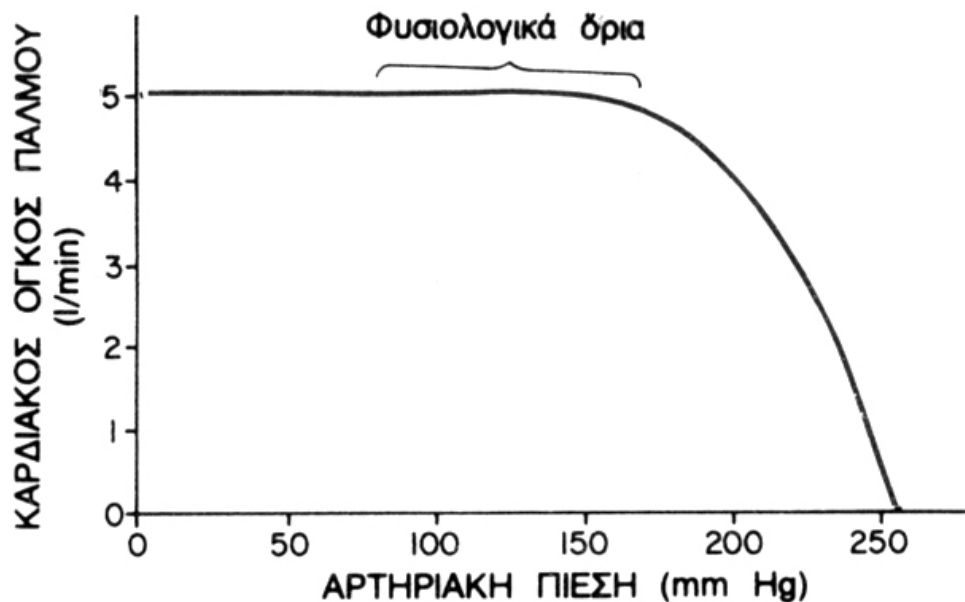
- Το ποσό του αίματος που αντλείται από την καρδιά ανά min καθορίζεται από το ρυθμό με τον οποίο το αίμα εισρέει στο δεξιό κόλπο από τις φλέβες δηλ. η **φλεβική επάνοδος**.
- Η ενδογενής ικανότητα της καρδιάς να προσαρμόζεται προς τα μεταβαλλόμενα φορτία του επανερχόμενου αίματος λέγεται **Νόμος της Καρδιάς των Frank-Starling**.
- Σύμφωνα με το νόμο αυτό, όσο μεγαλύτερη είναι η πλήρωση της καρδιάς κατά τη διαστολή της τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ποσότητα του αίματος η οποία προωθείται προς την αορτή ή αλλιώς
«Μέσα σε φυσιολογικά όρια, η καρδιά αντλεί όλο το αίμα που επανέρχεται σε αυτήν, μη επιτρέποντας την υπερβολική στάση αίματος στις φλέβες»

Μηχανισμός του νόμου του Frank-Starling

Κύριος μηχανισμός προσαρμογής της καρδιάς στη μεταβαλλόμενη εισροή αίματος:

- Όταν ο καρδιακός μυς διαταθεί πέρα από το κανονικό, συστέλλεται με μεγαλύτερη ένταση προωθώντας αυτόματα το πλεονάζον αίμα στις αρτηρίες.
- Ικανότητα του μυός, να συστέλλεται ισχυρότερα όταν διατείνεται: χαρακτηριστικό όλων των γραμμωτών μυών - όχι μόνο του καρδιακού

Αδυναμία της αύξησης της αρτηριακής πίεσης να μεταβάλλει τον όγκο παλμού



Σταθερότητα του όγκου παλμού της καρδιάς ακόμα και σε μεγάλες μεταβολές της αρτηριακής πίεσης. Μόνο όταν η αρτηριακή πίεση ξεπεράσει τα φυσιολογικά όρια λειτουργίας, ο φόρτος πίεσης κάνει την καρδιά να αρχίσει να ανεπαρκεί.

Ανεξάρτητα από την αρτηριακή πίεση, ο σπουδαιότερος παράγοντας που καθορίζει την ποσότητα αίματος που προωθείται από την καρδιά είναι η πίεση στον δεξιό κόλπο, που δημιουργείται από την επάνοδο του αίματος στην καρδιά.

Η επίδραση της καρδιακής συχνότητας στην αντλητική λειτουργία της καρδιάς

- Όσο περισσότερες συστολές επιτελεί η καρδιά ανά min τόσο περισσότερο αίμα αντλεί. Το φαινόμενο αυτό έχει σημαντικούς περιορισμούς:
- Όταν η συχνότητα καρδιακής λειτουργίας ξεπεράσει ένα κρίσιμο επίπεδο,
 - 1) η ένταση της συστολής της καρδιάς ελαττώνεται και
 - 2) ο χρόνος της διαστολής ελαττώνεται τόσο πολύ, ώστε δεν επαρκεί για τη ροή αίματος με ικανοποιητικό ρυθμό από τους κόλπους προς τις κοιλίες.
- Για τους λόγους αυτούς: Όταν η συχνότητα της καρδιακής λειτουργίας αυξάνεται τεχνητά (π.χ. με ηλεκτρικά ερεθίσματα), η καρδιά εμφανίζει την κορυφαία ικανότητά της για άντληση μεγάλων ποσών αίματος μεταξύ των 100 και 150 συστολών/min

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην καρδιά

- Η υψηλή θερμοκρασία -πυρετός- προκαλεί μεγάλη αύξηση της συχνότητας της καρδιακής λειτουργίας μέχρι το διπλάσιο (λόγω αύξησης διαπερατότητας κυτταρικής μεμβράνης \Rightarrow επιτάχυνση διαδικασίας αυτοδιέγερσης).
- Η ελαττωμένη θερμοκρασία προκαλεί μείωση της συχνότητας της καρδιακής λειτουργίας μέχρι και σε λίγες μόνο συστολές το λεπτό.
- Η συσταλτική δύναμη της καρδιάς υφίσταται πρόσκαιρη ενίσχυση από μία μέτρια αύξηση της θερμοκρασίας, η παρατεταμένη όμως αύξησή της επιφέρει εξάντληση της καρδιάς.

Ρυθμική διέγερση της καρδιας

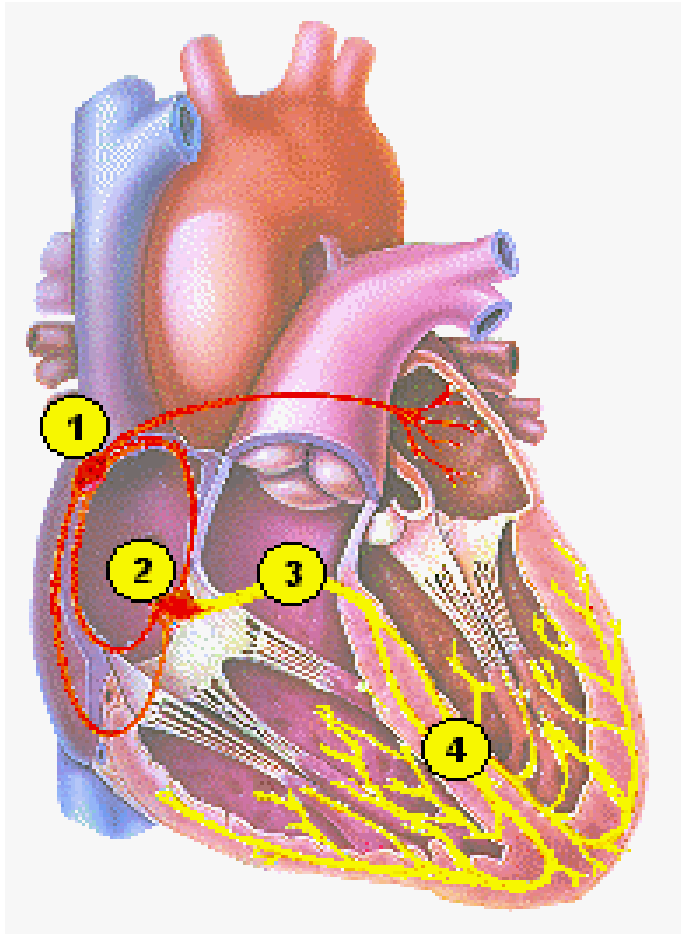
ΑΥΤΟΡΡΥΘΜΙΑ ΚΑΡΔΙΑΣ

- Η καρδιά διαθέτει ένα ιδιαίτερο σύστημα: **1)** για την **παραγωγή** ρυθμικών ώσεων με τις οποίες προκαλείται η ρυθμική συστολή του μυοκαρδίου και **2)** για την **αγωγή** αυτών των ώσεων ταχύτατα σε ολόκληρη την καρδιά.
- Καρδιακές αρρυθμίες: οφείλονται σε διαταραχές του ειδικού συστήματος παραγωγής και αγωγής του ερεθίσματος

Το ειδικό σύστημα παραγωγής και αγωγής της διέγερσης από το οποίο ελέγχονται οι συστολές της καρδιάς

- 1. Ο φλεβόκομβος (S-A)** μέσα στον οποίο παράγονται τα φυσιολογικά ρυθμικά αυτοδιεγερτικά ερεθίσματα.
- 2. Οι διακομβικές οδοί** μέσα από τις οποίες άγεται το ερέθισμα από το φλεβόκομβο προς τον κολποκοιλιακό κόμβο.
- 3. Ο κολποκοιλιακός κόμβος (A-V)** μέσα στον οποίο το ερέθισμα που προέρχεται από τους κόλπους καθυστερείται πριν περάσει στις κοιλίες.
- 4. Το κολποκοιλιακό δεμάτιο** που άγει τη διέγερση από τους κόλπους προς τις κοιλίες.
- 5. Το αριστερό και το δεξί σκέλος του δεματίου** (ίνες Purkinje) με τα οποία η διέγερση άγεται προς όλα τα σημεία των κοιλιών.

Στοιχεία της παραγωγής και αγωγής της διέγερσης της καρδιάς



- ① Φλεβόκομβος (S-A node)
- ② Κολποκοιλιακός Κόμβος (A-V)
- ③ Κολποκοιλιακό Δεμάτιο
- ④ Αριστερό και Δεξί Σκέλος του Κολποκοιλιακού Δεματίου



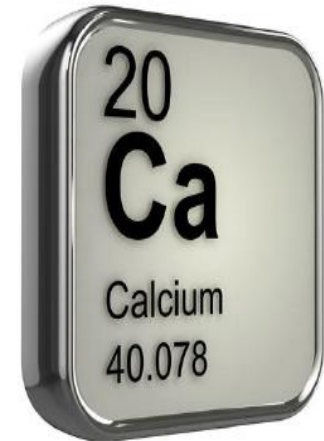
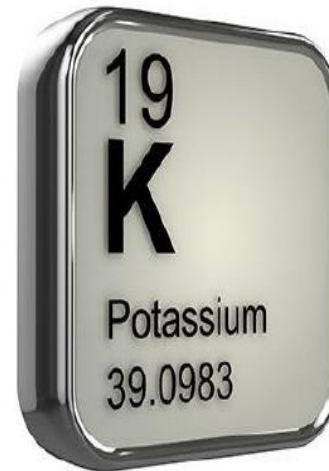
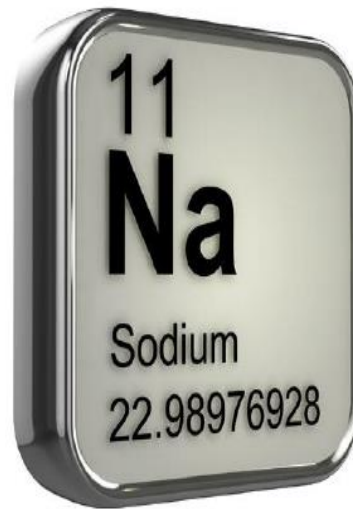
Το σύστημα παραγωγής και αγωγής του ερεθίσματος

Εκπόλωση μυοκαρδιακών κυττάρων

- Κατά τη **φάση ηρεμίας** οι καρδιακές ίνες είναι πολωμένες. Στο εσωτερικό της κυτταρικής τους μεμβράνης είναι **αρνητικά φορτισμένες**.
- Το εσωτερικό των καρδιακών μυϊκών ινών που είναι αρνητικά φορτισμένο φορτίζεται **θετικά** κατά τη **διέγερση** προς συστολή.
- Η ηλεκτρική διέγερση των καρδιακών μυϊκών ινών ονομάζεται **εκπόλωση** και αποτέλεσμα αυτής είναι η **συστολή** των καρδιακών μυϊκών ινών.
- Η εκπόλωση μπορεί να περιγραφεί ως **κύμα θετικών φορτίων** που κατακλύζουν τις μυοκαρδιακές ίνες.
- Η ηλεκτρική δραστηριότητα που προκύπτει από την **κίνηση των ιόντων** διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης καλείται **δυναμικό ενέργειας**.

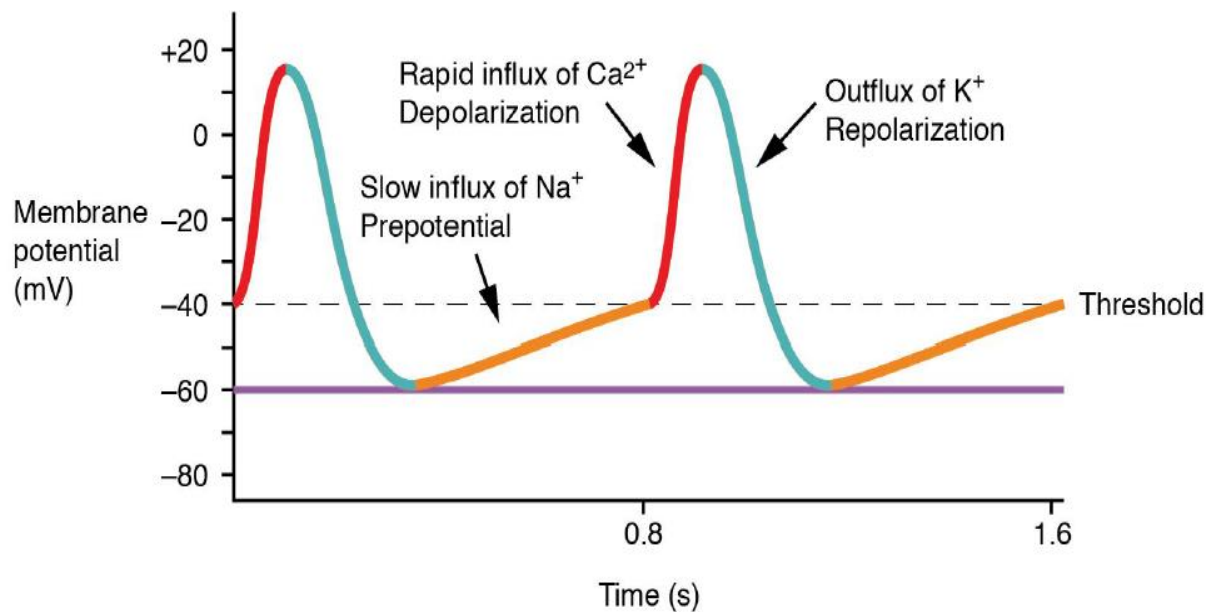
Το σύστημα
παραγωγής
και
αγωγής του
ερεθίσματος

Βασικά χημικά
στοιχεία για την
καρδιακή
λειτουργία



Το σύστημα παραγωγής και αγωγής του ερεθίσματος

Δυναμικό
ενέργειας
κυττάρου
φλεβόκομβου

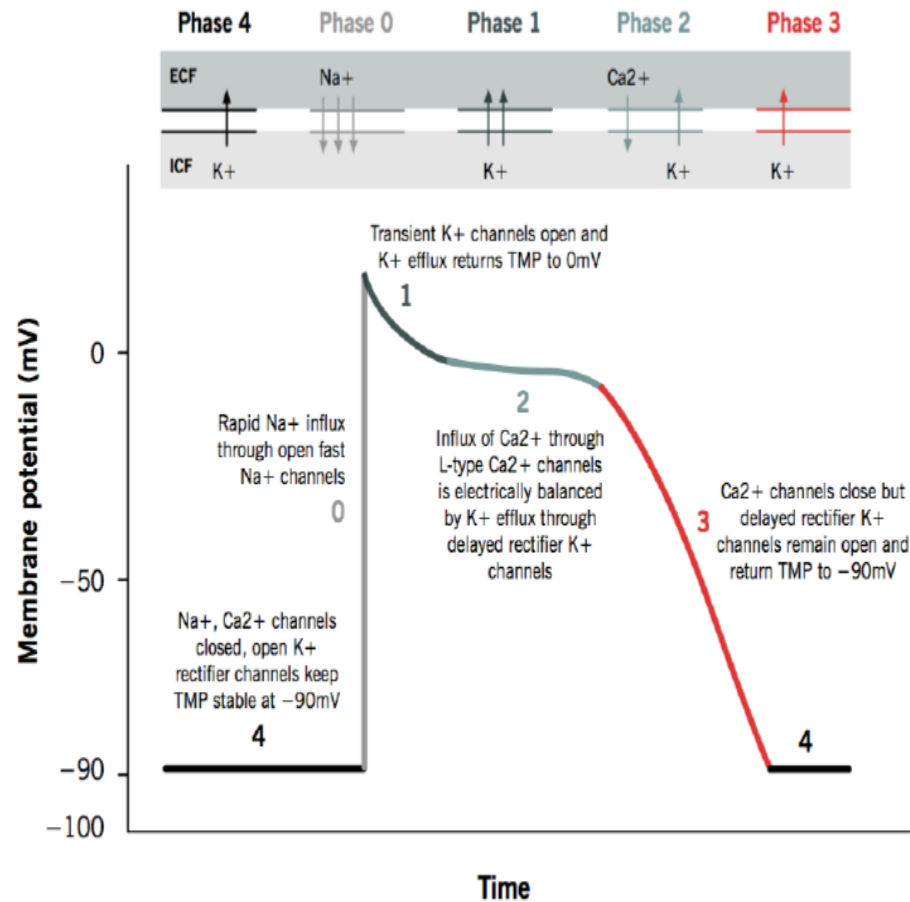


Το σύστημα παραγωγής και αγωγής του ερεθίσματος

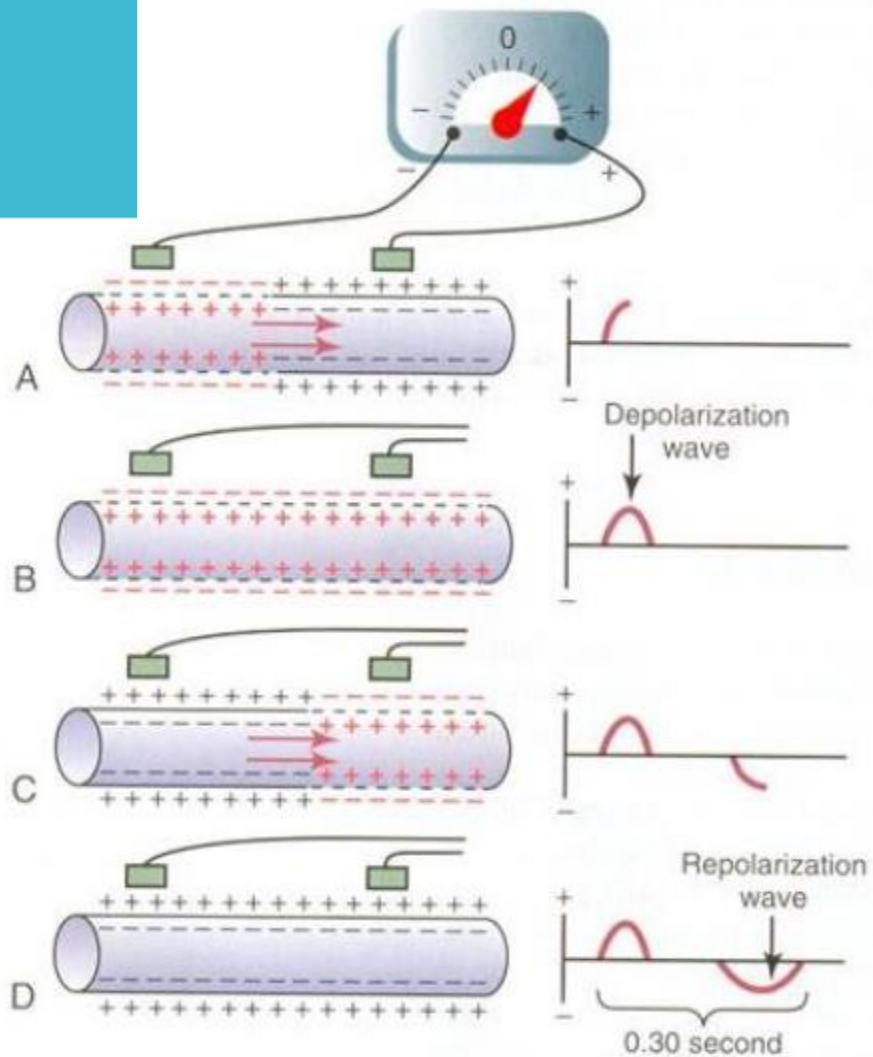
Δυναμικό ενέργειας μυοκαρδιακού κυττάρου κοιλιών

Action potential of cardiac muscles

Grigoriy Ikonnikov and Eric Wong



Εκπόλωση και Επαναπόλωση



Ο κολποκοιλιακός κόμβος και η καθυστέρηση της αγωγής της διέγερσης I

- Η καθυστέρηση της μετάδοσης της διέγερσης από τους κόλπους στις κοιλίες, που γίνεται για να προλάβουν να αδειάσουν οι κόλποι το περιεχόμενό τους στις κοιλίες πριν από την έναρξη της συστολής των κοιλιών, οφείλεται στον κολποκοιλιακό κόμβο και τις σχετικές ίνες αγωγής (μεταβατικές ίνες).
- Η διέγερση, μετά τη διαδρομή της μέσα από τη διακομβική οδό, φτάνει στον κολποκοιλιακό κόμβο περίπου 0,03 sec μετά από τη γένεσή της από το φλεβόκομβο.

Ο κολποκοιλιακός κόμβος και η καθυστέρηση της αγωγής της διέγερσης II

- Ακολουθεί μια περαιτέρω καθυστέρηση 0,09 sec μέσα στον ίδιο τον κολποκοιλιακό κόμβο, πριν η διέγερση να εισέλθει μέσα στο κολποκοιλιακό δεμάτιο. Μια τελευταία καθυστέρηση 0,04 sec παρατηρείται κυρίως μέσα στο κολποκοιλιακό δεμάτιο, που αποτελείται από πολλαπλές μικρές δεσμίδες, οι οποίες διέρχονται μέσα από τον ινώδη συνδετικό ιστό που διαχωρίζει τους κόλπους από τις κοιλίες.
- Η ολική καθυστέρηση στα συστήματα του κολποκοιλιακού κόμβου και του κολποκοιλιακού δεματίου είναι περίπου 0.13 sec.

Αίτια βραδύτητας αγωγής διέγερσης

Η καθυστέρηση της αγωγής της διέγερσης στις μεταβατικές ίνες καθώς και στις ίνες του κολποκοιλιακού κόμβου και στις ίνες του κολποκοιλιακού δεματίου οφείλεται στα:

- Σημαντικά μικρότερο μέγεθος, σε σύγκριση με τις φυσιολογικές μυϊκές ίνες του μυοκαρδίου των κόλπων
- Χαμηλά δυναμικά ηρεμίας της μεμβράνης, σε σύγκριση με τα φυσιολογικά δυναμικά ηρεμίας των άλλων μυϊκών ινών του μυοκαρδίου
- Μεγάλη αντίσταση στην αγωγή διέγερσης από ίνα σε ίνα λόγω μικρού αριθμού χασματικών συνδέσεων

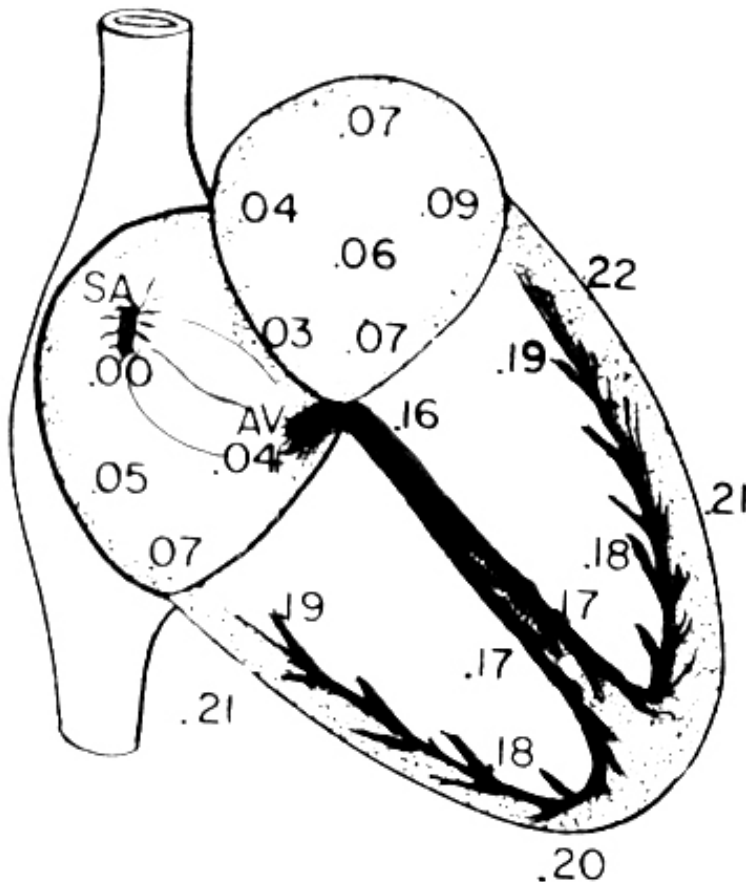
Αγωγή διέγερσης μέσα από το Σύστημα Purkinje

- Το κολποκοιλιακό δεμάτιο **ΔΕΝ** επιτρέπει την παλίνδρομη μετάδοση των δυναμικών ενέργειας με κατεύθυνση από τις κοιλίες προς τους κόλπους.
- Οι ίνες Purkinje έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά από τις ίνες του κολποκοιλιακού δεματίου:
 - είναι μεγάλες
 - έχουν ταχύτητα αγωγής 1,5 - 4 m/sec,
δηλ. 6 φορές > από ίνες του μυοκαρδίου,
150 φορές > από μεταβατικές ίνες
- Η μεταβίβαση της διέγερσης σε ολόκληρη την επιφάνεια του ενδοκαρδίου των κοιλιών μέσω των ινών Purkinje είναι σχεδόν **άμεση**.

Αγωγή διέγερσης μέσα στο μυοκάρδιο των κοιλιών

- Η αγωγή διέγερσης από την επιφάνεια του ενδοκαρδίου ως την επικαρδιακή επιφάνεια των κοιλιών είναι βραδεία και απαιτεί 0,03 sec, δηλαδή ίσο χρονικό διάστημα με εκείνο που απαιτείται για την αγωγή μέσα από ολόκληρο το σύστημα Purkinje.
- Σε φυσιολογική καρδιά:
 t_{total} (από αρχή συστήματος Purkinje ως τελευταίες μυοκαρδιακές ίνες) $\sim 0,06\text{sec}$

Αγωγή της διέγερσης της καρδιάς



Μετάδοση του ερεθίσματος μέσα στην καρδιά, με το χρόνο εμφάνισής του (σε κλάσματα του δευτερολέπτου) σε διάφορα σημεία της (SA: φλεβόκομβος).

- Η διέγερση εξαπλώνεται με μέτρια ταχύτητα στους κόλπους.
- Καθυστερεί > 0.1 sec στην περιοχή του κολποκοιλιακού κόμβου πριν εμφανιστεί στο κολποκοιλιακό δεμάτιο.
- Αφού μπει στο δεμάτιο, εξαπλώνεται γρήγορα με τις ίνες Purkinje σε ολόκληρη την ενδοκαρδιακή επιφάνεια των κοιλιών
- Το ερέθισμα εξαπλώνεται με μικρή ταχύτητα από το κοιλιακό μυοκάρδιο στις επικαρδιακές επιφάνειες.

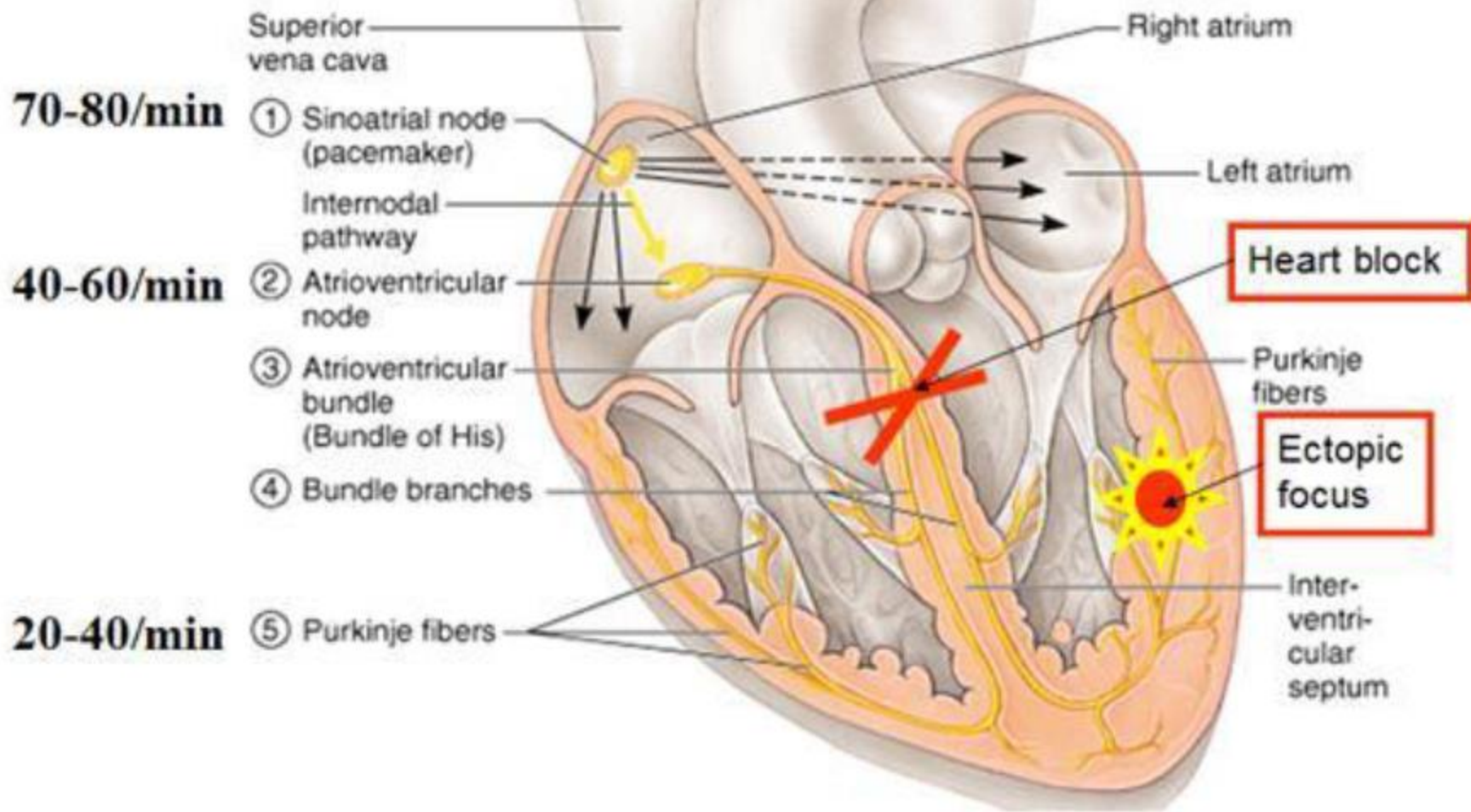
Ο Φλεβόκομβος ως φυσιολογικός βηματοδότης της καρδιάς

- Φυσιολογικός ρυθμός αυτόματης ρυθμικής διέγερσης του φλεβόκομβου 70-80 φορές ανά min.
- Οι ίνες του κολποκοιλιακού κόμβου αυτοδιεγείρονται με ενδογενή ρυθμό 40-60 φορές ανά min.
- Οι ίνες Purkinje αυτοδιεγείρονται με ρυθμό 15-40 φορές ανά min.
- Ο φλεβόκομβος ελέγχει την καρδιακή λειτουργία όσον αφορά τη συχνότητα
- συχνότητα της ρυθμικής του διέγερσης > συχνότητα αυτοδιέγερσης οποιουδήποτε άλλου τμήματος

Παθολογικοί Βηματοδότες - Ο Ετερότοπος Βηματοδότης

- Ο βηματοδότης μετακινείται από το φλεβόκομβο προς τον κολποκοιλιακό κόμβο ή τις διεγέρσιμες ίνες Purkinje ή σπάνια σε ένα σημείο στο μυοκάρδιο των κόλπων ή των κοιλιών.
Ετερότοπος Βηματοδότης: προκαλεί ανωμαλίες όσον αφορά την αλληλουχία της συστολής των διαφόρων τμημάτων της καρδιάς.
- **Κολποκοιλιακός αποκλεισμός** - αποκλεισμός της αγωγής της διέγερσης στον κολποκοιλιακό κόμβο ή στο κολποκοιλιακό δεμάτιο - μετά 5-30 sec το σύστημα των ινών Purkinje αναλαμβάνει - οι κοιλίες δεν αντλούν τώρα αίμα - λιποθυμία μετά 4-5 sec - Σύνδρομο **Stroke-Adams**.

Approximately 1% of cardiac muscle cells are autorhythmic rather than contractile



Ρόλος Συστήματος Purkinje για Σύγχρονη Συστολή του Μυοκαρδίου των Κοιλιών

- Η πρώτη ίνα του μυοκαρδίου των κοιλιών διεγείρεται μόνο 0,06 sec πριν τη διέγερση της τελευταίας ίνας του μυοκαρδίου.
- **Η συστολή των τμημάτων του μυοκαρδίου και των δύο κοιλιών προκαλείται σχεδόν συγχρόνως.**
- Αποτελεσματική άντληση αίματος από τις κοιλότητες των δύο κοιλιών - **Μέγιστο Ολικό Αντλητικό Αποτέλεσμα**
- Σε ορισμένες μορφές καρδιακής ανεπάρκειας, παρατηρείται μια βραδεία επέκταση της διέγερσης, με αποτέλεσμα την ελάττωση της αντλητικής απόδοσης των κοιλιών, μέχρι και 30%.