
Άσκηση 3

Καρδιαγγειακός Προσομοιωτής

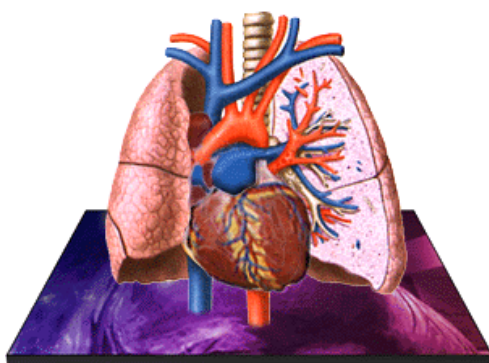
1. Σκοπός

Σκοπός της παρούσας εργαστηριακής άσκησης είναι η μελέτη του καρδιαγγειακού συστήματος μέσω του μη-γραμμικού μαθηματικού μοντέλου PHYSBE (PHYsiological Simulation BEnchmark). Η πειραματική εξάσκηση αποτελείται από τη μελέτη της φυσιολογικής λειτουργίας της καρδιάς, παρατηρώντας την πίεση και τον όγκο αίματος, με τη βοήθεια του μοντέλου PHYSBE. Στη συνέχεια, το μοντέλο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της πίεσης του αίματος σε διαφορετικά σημεία του καρδιαγγειακού συστήματος και τη μέτρηση του έργου της καρδιάς. Στο τελευταίο μέρος της πρακτικής εξάσκησης το μοντέλο τροποποιείται κατάλληλα, ώστε να γίνει προσομοίωση των καταστάσεων της έντονης άσκησης και της πένησης.

2. Εισαγωγή

Το ανθρώπινο καρδιαγγειακό σύστημα αποτελείται από τρία διακριτά υποσυστήματα: την πνευμονική κυκλοφορία, την καρδιακή κυκλοφορία και τέλος τη συστηματική κυκλοφορία. Θα μπορούσαμε να αναφερθούμε σε αυτά ως τους πνεύμονες, την καρδιά και το υπόλοιπο σώμα. Τα τρία αυτά υποσυστήματα δημιουργούν έναν κλειστό βρόχο κυκλοφορίας παρέχοντας αίμα πλούσιο σε οξυγόνο και θρεπτικά συστατικά στους ιστούς και τα όργανα του σώματος και απομακρύνοντας τα άχρηστα προϊόντα του μεταβολισμού από αυτά.

Στο Σχήμα 1 φαίνεται το καρδιαγγειακό σύστημα στην περιοχή της καρδιάς και των πνευμόνων. Πνευμονική κυκλοφορία καλείται η ροή του αίματος από την καρδιά προς τους πνεύμονες και πίσω στην καρδιά. Οι φλέβες οδηγούν το φλεβικό αίμα στον δεξιό κόλπο ο οποίος γεμίζει με το αίμα και στη συνέχεια συστέλλεται ωθώντας το στη δεξιά κοιλία μέσω της τριγλώχινας βαλβίδας. Η δεξιά κοιλία γεμίζει και στη συνέχεια συστέλλεται ωθώντας το αίμα στην πνευμονική αρτηρία η οποία το οδηγεί στους πνεύμονες. Στα τριχοειδή αγγεία των πνευμόνων γίνεται η ανταλλαγή διοξειδίου του άνθρακα και οξυγόνου.



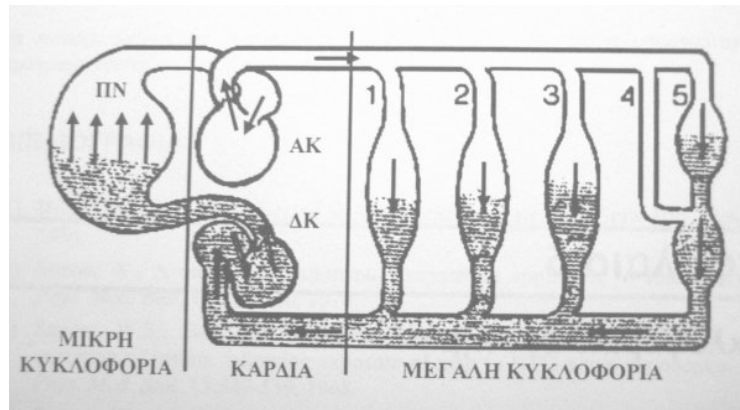
Σχήμα 1: Καρδιαγγειακό σύστημα στην περιοχή των πνευμόνων και της καρδιάς.

Στη συνέχεια, το πλούσιο σε οξυγόνο αίμα εισέρχεται στις πνευμονικές φλέβες και οδηγείται στον αριστερό κόλπο της καρδιάς. Με τη συστολή του αριστερού κόλπου, το αίμα περνάει στην αριστερή κοιλία μέσω της μιτροειδούς βαλβίδας. Τέλος, με τη συστολή της αριστερής κοιλίας το αίμα εξέρχεται στην αορτή, την κύρια αρτηρία που τροφοδοτεί με αίμα το σώμα μας. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το ανθρώπινο καρδιαγγειακό σύστημα είναι ένα δίκτυο μονόδρομης ροής. Οι κολποκοιλιακές βαλβίδες (μιτροειδής και τριγλώχινα) επιτρέπουν τη ροή του αίματος μετά από τους κόλπους προς τις κοιλίες και όχι το αντίστροφο.

Η συστηματική κυκλοφορία παρέχει τα θρεπτικά συστατικά τα οποία χρειάζονται οι ιστοί και τα όργανα του σώματος για να λειτουργήσουν. Εξαιρούνται από τη συστηματική κυκλοφορία η καρδιά και οι πνεύμονες που έχουν το δικό τους κυκλοφορικό σύστημα. Τα αιμοφόρα αγγεία (αρτηρίες, φλέβες και τριχοειδή αγγεία) είναι υπεύθυνα για την παροχή θρεπτικών συστατικών στους ιστούς. Αίμα πλούσιο σε οξυγόνο εισέρχεται στα αγγεία μέσω της κύριας αρτηρίας του σώματος, της αορτής. Οι έντονες συστολές της καρδιάς δημιουργούν ικανές πιέσεις στην αορτή ώστε να τροφοδοτούνται ακόμη και τα ακροτελεύτια αγγεία του σώματος. Το εσωτερικό των αγγείων είναι ιδιαίτερα λείο ώστε να μη δημιουργούνται σημαντικές αντιστάσεις κατά τη ροή του αίματος. Το αίμα εισέρχεται στα τριχοειδή αγγεία των οργάνων όπου το οξυγόνο και τα θρεπτικά συστατικά μεταφέρονται στο υγρό των ιστών και παράλληλα συλλέγονται τα άχρηστα προϊόντα του μεταβολισμού των ιστών. Στη συνέχεια το αίμα εισέρχεται στις φλέβες και οδηγείται προς την καρδιά και από εκεί στους πνεύμονες για να εμπλουτιστεί και πάλι με οξυγόνο. Η συστηματική κυκλοφορία του αίματος περιλαμβάνει διέλευσή του από τους νεφρούς, οι οποίοι απομακρύνουν τα άχρηστα συστατικά που περιέχονται στο αίμα.

Η καρδιακή κυκλοφορία αποτελεί σημαντικό υποσύστημα του καρδιαγγειακού συστήματος και η αποστολή της συνίσταται στην τροφοδοσία των ιστών της καρδιάς με αίμα πλούσιο σε οξυγόνο και θρεπτικά συστατικά, που χρησιμεύουν για την εξασφάλιση της απαραίτητης για τη λειτουργία της καρδιάς ενέργειας.

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το κυκλοφορικό σύστημα αποτελείται από δύο συστήματα αγγείων (συστηματική και καρδιακή κυκλοφορία και πνευμονική κυκλοφορία) με ιδιαίτερη το καθένα αντλία που συνδέονται σε σειρά. Η παροχή στο ένα σύστημα υποχρεωτικά περνάει από το τέλος του στην αρχή του άλλου συστήματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2. Έτσι το αίμα εκτοξευόμενο από την αριστερή κοιλία της καρδιάς (αρχή της μεγάλης κυκλοφορίας) διοχετεύεται στην αορτή και στη συνέχεια με τις αρτηρίες φέρεται στα τριχοειδή σε όλους τους ιστούς του σώματος. Από εκεί με τις φλέβες διοχετεύεται στο δεξιό κόλπο της καρδιάς (τέλος της μεγάλης κυκλοφορίας) και τέλος στα τριχοειδή των πνευμόνων. Από τους πνεύμονες με τις



Σχήμα 2: Σχεδιαγραμματική παράσταση της μεγάλης και της μικρής κυκλοφορίας. ΑΚ= Αριστερή καρδιά, ΔΚ=Δεξιά καρδιά, ΠΝ=Πνεύμονες. Η μεγάλη (συστηματική) κυκλοφορία αποτελείται από μεγάλο αριθμό παρακυκλωμάτων (1, 2, 3, 4, 5, ...). Το (4) παριστά την ηπατική αρτηρία και το (5) την κυκλοφορία κοιλιακών σπλάχνων – ήπατος. Το τμήμα της κυκλοφορίας που περιέχει φλεβικό αίμα υποσημαίνεται με σκιερότητα.

πνευμονικές φλέβες φέρεται στον αριστερό κόλπο (τέλος της μικρής κυκλοφορίας) και επανέρχεται στην αριστερή κοιλία, στην αορτή κ.ο.κ.

Το συνολικό εύρος, καθώς και η ταχύτητα ροής του αίματος στα διάφορα τμήματα της μεγάλης και της μικρής κυκλοφορίας μεταβάλλεται σημαντικά. Έτσι στο επίπεδο των τριχοειδών της μεγάλης κυκλοφορίας η συνολική διατομή είναι 800 φορές μεγαλύτερη από τη διατομή της αορτής στην αρχή της μεγάλης κυκλοφορίας. Πιο πέρα από τα τριχοειδή (φλεβίδια, φλέβες) το συνολικό εύρος ελαττώνεται και κατά την εκβολή των φλεβών στο δεξιό κόλπο η διατομή είναι διπλάσια από αυτή της αορτής. Ανάλογες μεταβολές παρατηρούνται και στην ταχύτητα ροής του αίματος μέσα στα διάφορα αγγεία. Η μέγιστη ταχύτητα ροής παρατηρείται στην αορτή και η ελάχιστη στα τριχοειδή. Η μικρή ταχύτητα ροής στα τριχοειδή είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την επαρκή ανταλλαγή των αναπνευστικών αερίων (O_2 και CO_2) και όλων των άλλων ουσιών μεταξύ του αίματος και του υγρού των ιστών. Πέρα από τα τριχοειδή αυξάνεται και κατά την εκβολή των φλεβών στο δεξιό κόλπο η ταχύτητα αιματικής ροής είναι διπλάσια από αυτή που παρατηρείται στην αορτή.

2.1. Ανάλυση της Λειτουργίας του Καρδιαγγειακού Συστήματος

Κατά την ανάλυση της λειτουργίας του καρδιαγγειακού συστήματος, είναι συχνά χρήσιμο να παριστάνονται οι υδραυλικές ιδιότητες των διαφόρων στοιχείων με ηλεκτρικά ανάλογα. Αυτή η διαδικασία είναι έγκυρη εφόσον υπάρχει ένα προς ένα αντιστοίχιση μεταξύ των υδραυλικών και των ηλεκτρικών ποσοτήτων και εφόσον η μαθηματική συμπεριφορά των υδραυλικών και των ηλεκτρικών στοιχείων είναι η ίδια. Στη συνέχεια θα οριστούν οι υδραυλικές ιδιότητες των διαφόρων στοιχείων του κυκλοφορικού συστήματος. Η αντιστοίχιση υδραυλικών παραμέτρων και παραμέτρων ηλεκτρικών κυκλωμάτων φαίνεται στον Πίνακα 1.

Η υδραυλική αντίσταση R είναι ο λόγος της διαφοράς πίεσης κατά μήκος ενός στοιχείου, προς το ρυθμό ροής του ρευστού(αίματος) διαμέσου του στοιχείου, στη μόνιμη κατάσταση. Για παράδειγμα, η ροή ενός ρευστού διαμέσου ενός άκαμπτου σωλήνα μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση $\Delta P = f \cdot R$, όπου ΔP είναι η διαφορά πίεσης στα δύο άκρα του σωλήνα, f είναι ο ρυθμός ροής του ρευστού διαμέσου του

σωλήνα και R η αντίσταση του σωλήνα. Η αντίσταση R εξαρτάται από το ιξώδες μ του ρευστού, το μήκος l , και την ακτίνα r του σωλήνα, σύμφωνα με τη σχέση,

$$R = \frac{8 \mu l}{\pi r^4}$$

Αν η σχέση ανάμεσα στην πτώση πίεσης και στη ροή δεν είναι γραμμική για ένα δεδομένο στοιχείο, τότε η διαφορική αντίσταση που συσχετίζει μικρές μεταβολές ροής και πίεσης δίνεται από τη σχέση

$$R = \frac{d\Delta P}{df}$$

Η χωρητικότητα ενός στοιχείου είναι ο λόγος του όγκου του ρευστού που περιέχεται σε ένα στοιχείο προς τη διαφορά πίεσης κατά μήκος αυτού του στοιχείου. Για παράδειγμα, έστω μια δεξαμενή διατομής A , που είναι γεμάτη με ρευστό σε ύψος h . Η διαφορά πίεσης ανάμεσα στον πυθμένα της δεξαμενής και στην ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια του ρευστού είναι:

$$\Delta P = \rho g h$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού και g η επιτάχυνση βαρύτητας. Ο όγκος του ρευστού στη δεξαμενή είναι:

$$Q = Ah$$

ενώ η χωρητικότητα της δεξαμενής δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{Q}{\Delta P} = \frac{A}{\rho g}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η σχετική διαφορά πίεσης αφορά στη διαφορά ανάμεσα στο ρευστό του σωλήνα και στην εξωτερική ατμόσφαιρα και όχι στη διαφορά πίεσης μεταξύ των σωλήνων εισόδου και εξόδου του ρευστού, η οποία είναι μηδέν. Όμοια, κατά την ανάλυση της χωρητικότητας των αγγείων στο αγγειακό σύστημα, η σχετική διαφορά πίεσης αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ της ενδοαυλικής πίεσης και της εξωαυλικής (εξωαυλικής) πίεσης.

Πίνακας 1: Αντιστοίχιση υδραυλικών – ηλεκτρικών παραμέτρων.

ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ
Πίεση P	Δυναμικό V
Ροή $f = \dot{Q}$	Ρεύμα I
Όγκος Q	Φορτίο q
Αντίσταση $R = \Delta P / f$	Αντίσταση $R = \Delta V / I$
Χωρητικότητα $C = \Delta Q / \Delta P$	Χωρητικότητα $C = \Delta q / \Delta V$

Αν η σχέση ανάμεσα στην πίεση και στον όγκο ενός συγκεκριμένου στοιχείου δεν είναι γραμμική, η διαφορική χωρητικότητα που συνδέει μικρές μεταβολές του όγκου και της πίεσης δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{dQ}{d\Delta P}$$

Με βάση τις αντιστοιχίες του Πίνακα 1, η μοντελοποίηση του καρδιαγγειακού συστήματος μπορεί να βασιστεί στην επίλυση κατάλληλων διαφορικών εξισώσεων για κάθε υποσύστημα που μελετάμε, αν αυτό θεωρηθεί ως ένα δίκτυο αντιστάσεων και πυκνωτών.

3. PHYsiological Simulation BEnchmark – PHYSBE

3.1. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Το PHYSBE αποτελεί ένα μαθηματικό μοντέλο του καρδιαγγειακού συστήματος. Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου έχουν δημοσιευτεί στο άρθρο του John McLeod με τίτλο “PHYSBE A physiological simulation benchmark” [1]. Αρχικός στόχος του μοντέλου ήταν η προσομοίωση της ροής του οξυγόνου και των θρεπτικών συστατικών στο ανθρώπινο σώμα, καθώς και ο υπολογισμός της κατανομής της θερμότητας στο καρδιαγγειακό σύστημα. Το μοντέλο αποτελεί ένα σημαντικό μη – γραμμικό συνεχές σύστημα. Πολύ αργότερα από τη δημοσίευση του μαθηματικού μοντέλου και με την εμφάνιση σημαντικών πακέτων προσομοίωσης, όπως το Simulink, αναπτύχθηκε αντίστοιχο υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης του καρδιαγγειακού συστήματος, με το οποίο θα ασχοληθούμε στο πλαίσιο αυτής της εργαστηριακής άσκησης.

3.2. Υποσυστήματα του Μοντέλου PHYSBE

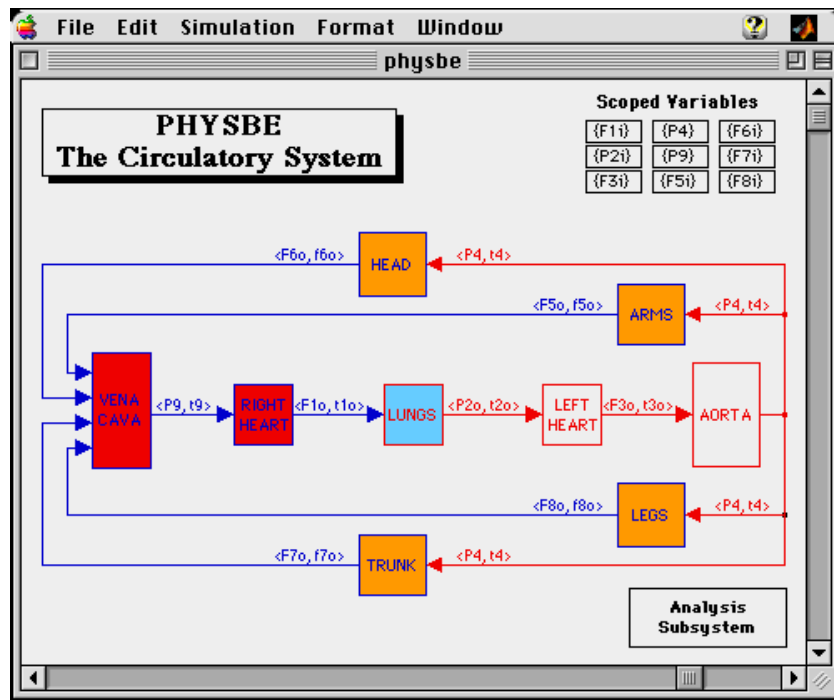
Το μοντέλο χωρίζει το ανθρώπινο καρδιαγγειακό σύστημα σε τρία κύρια υποσυστήματα: τους πνεύμονες και την πνευμονική κυκλοφορία, την καρδιά και την καρδιακή κυκλοφορία και το υπόλοιπο σώμα, δηλαδή τη συστηματική κυκλοφορία. Η καρδιακή κυκλοφορία υποδιαιρείται περαιτέρω σε τέσσερα υποσυστήματα, την αριστερή και τη δεξιά κοιλία, την κοίλη φλέβα και την αορτή. Η συστηματική κυκλοφορία υποδιαιρείται σε τέσσερα υποσυστήματα: το κεφάλι, τον κορμό, τα άνω και τα κάτω άκρα. Η διαγραμματική απεικόνιση του μοντέλου σε Simulink φαίνεται στο Σχήμα 3.

Το σύνολο των εννέα (9) υποσυστημάτων, όπως αυτά παρουσιάζονται στο υπολογιστικό μοντέλο είναι:

1. Πνευμονική κυκλοφορία
 - a. Πνεύμονες – Lungs
2. Καρδιακή κυκλοφορία
 - a. Κοίλη φλέβα -Vena Cava
 - b. Δεξιά καρδιά - Right Heart
 - c. Αριστερή καρδιά - Left Heart
 - d. Αορτή - Aorta
3. Συστηματική κυκλοφορία

- Άνω άκρα - Arms
- Κεφάλι - Head
- Κορμός - Trunk
- Κάτω άκρα - Legs

Εκτός από τα παραπάνω εννέα υποσυστήματα, βασικές οντότητες του μοντέλου PHYSBE αποτελούν: α) το κέντρο διαχείρισης παραμέτρων και β) το κέντρο ανάλυσης δεδομένων.



Σχήμα 3: Το σχεδιάγραμμα του PHYSBE.

3.2.1. Παράμετροι του Μοντέλου

Κάθε υποσύστημα του μοντέλου δέχεται τέσσερις βασικές παραμέτρους εισόδου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Καρδιαγγειακές παράμετροι εισόδου.

Χαρακτηριστικό	Μονάδες	Μεταβλητή
Αντίσταση	mmHg/ml/sec	R
Χωρητικότητα	ml / sec	C
Ενεργή διατομή	cm ²	A
Βάρος	g	W

Κάθε υποσύστημα παρέχει τέσσερις παραμέτρους εξόδου όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Καρδιαγγειακές παράμετροι εξόδου.

Χαρακτηριστικό	Μονάδες	Μεταβλητή
Πίεση	mmHg	P

Ροή	ml/sec	F
Ροή θερμότητας	cal/sec	f
Θερμοκρασία	kelvin	t
Όγκος	ml	V
Ολική θερμότητα	cal	h

3.2.2. Έξοδος του Μοντέλου

Οι ακόλουθες μεταβλητές αποτελούν την έξοδο του μοντέλου: πίεση, ροή αίματος, όγκος αίματος, θερμοκρασία και ροή θερμότητας. Το μοντέλο PHYSBE έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης απεικόνισης οποιασδήποτε παραμέτρου σαν συνάρτηση του χρόνου ή κάποιας άλλης παραμέτρου. Η γραφική απεικόνιση ρυθμίζεται από το κέντρο ανάλυσης δεδομένων με χρήση κατάλληλων εργαλείων όπως GRAPHXY, SCOPE και FLOATING SCOPE (βλ. Πρακτική Εξάσκηση). Σημειώνεται ότι η έξοδος του μοντέλου απεικονίζεται στη μόνιμη κατάσταση στην οποία φτάνει το μοντέλο μετά την πάροδο 10 -15 sec προσομοίωσης.

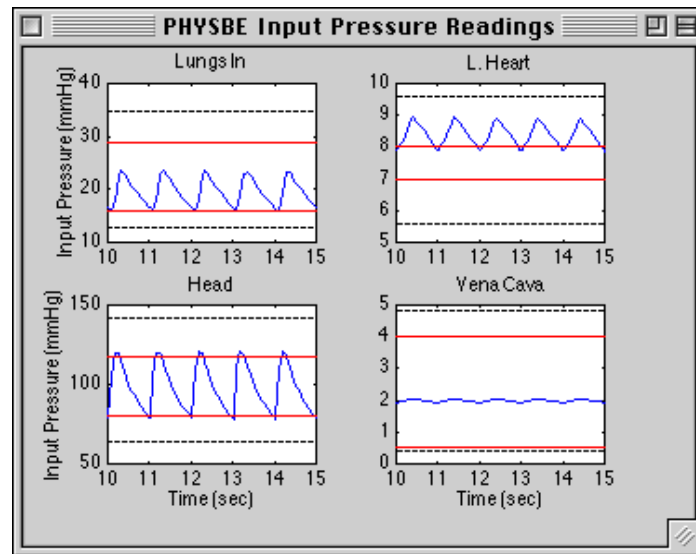
Πίεση Εισόδου

Η πίεση εισόδου αντιστοιχεί στην παράμετρο P_{ni} για κάθε υποσύστημα του μοντέλου. Η πίεση εισόδου κάθε υποσυστήματος ταυτίζεται με την πίεση εξόδου του υποσυστήματος που προηγείται. Στα διαγράμματα του Σχήματος 5 παρουσιάζονται οι πιέσεις εισόδου των πνευμόνων, της αριστερής και δεξιάς καρδιάς καθώς και της κοίλης φλέβας σε μπλε χρώμα. Οι κόκκινες ευθείες αναπαριστούν τις μέγιστες και τις ελάχιστες φυσιολογικές τιμές όπως αυτές έχουν οριστεί από τους δημιουργούς του μοντέλου. Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν μια διαφοροποίηση κατά 20% από το εύρος των φυσιολογικών τιμών που θεωρείται αποδεκτή αν ληφθεί υπόψη η ακρίβεια της προσομοίωσης.

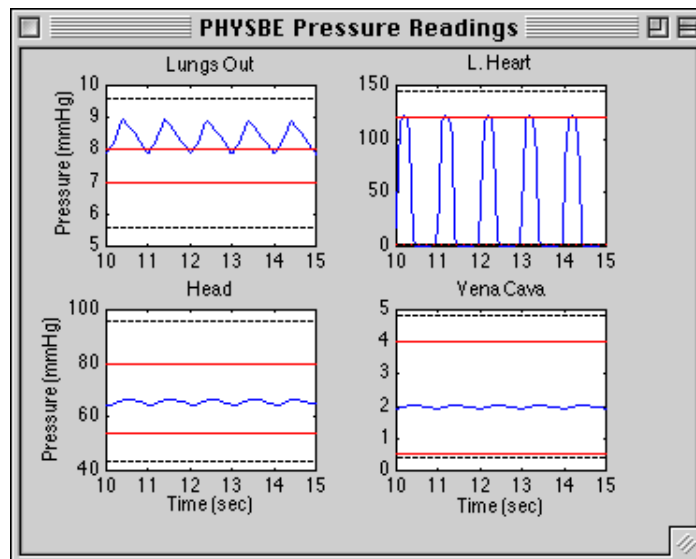
Παρατηρούμε ότι το γράφημα της αριστερής καρδιάς ξεφεύγει από το φυσιολογικό εύρος τιμών. Ωστόσο επειδή πρόκειται μονάχα για μια μετατόπιση του γραφήματος και μάλιστα μέσα στα όρια του αναμενόμενου σφάλματος δεν γίνεται καμία διορθωτική κίνηση.

Εσωτερική Πίεση

Η εσωτερική πίεση συμβολίζεται στο μοντέλο με την παράμετρο P_n για κάθε υποσύστημα n . Για την αορτή και την κοίλη φλέβα, οι οποίες έχουν σχεδόν μηδενική αντίσταση, οι εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις ταυτίζονται. Στο Σχήμα 6, με μπλε απεικονίζονται ο εσωτερικές πιέσεις του καρδιαγγειακού συστήματος, ενώ με τις κόκκινες ευθείες απεικονίζονται τα άνω και κάτω φυσιολογικά όρια. Τέλος με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται τα ανεκτά σφάλματα. Σε αντιστοιχία με τα διαγράμματα πίεσης εισόδου, η εσωτερική πίεση στα υποσυστήματα βρίσκεται εντός φυσιολογικών ορίων με εξαίρεση τους πνεύμονες, το οποίο είναι αναμενόμενο αν ληφθεί υπόψη ότι η εσωτερική πίεση των πνευμόνων ταυτίζεται με την εξωτερική πίεση της αριστερής καρδιάς.



Σχήμα 5: Διαγράμματα πιέσεων εισόδου.



Σχήμα 6: Διαγράμματα εσωτερικών πιέσεων.

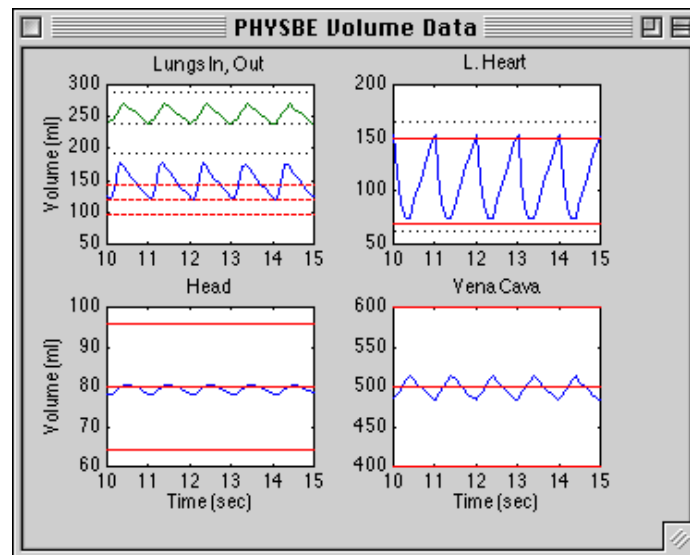
Διαγράμματα Όγκου

Ο όγκος κάθε υποσυστήματος αντιστοιχεί στη μεταβλητή V_n . Για τους πνεύμονες υπάρχουν δύο μεταβλητές όγκου στο μοντέλο, εισόδου και εξόδου, γεγονός που φαίνεται και από τα διαγράμματα του υποσυστήματος των πνευμόνων (βλ. στο εργαστηριακό μέρος της άσκησης). Στα διαγράμματα του Σχήματος 7 φαίνονται επίσης φυσιολογικά και ανεκτά όρια για τις τιμές των μεταβλητών όγκου.

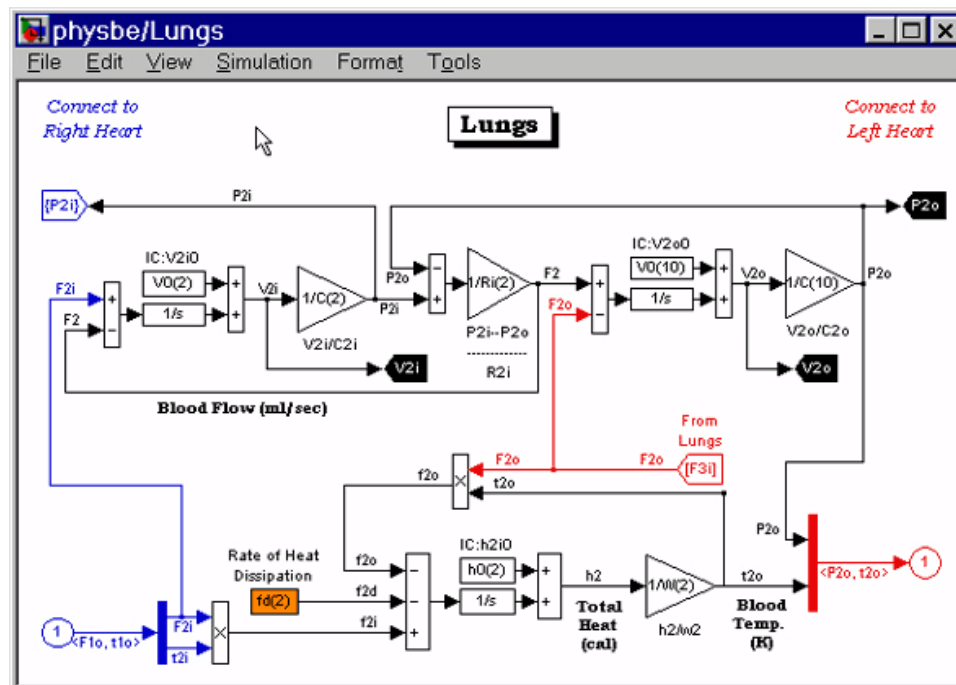
3.2.3. Πνευμονική κυκλοφορία - Οι Πνεύμονες

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται το υποσύστημα που επιλύει τις εξισώσεις για τους πνεύμονες. Η προσομοίωση των πνευμόνων βασίζεται σε ελαφρώς διαφορετικές εξισώσεις από αυτές των άλλων υποσυστημάτων διότι οι μετρήσεις της αρτηριακής και φλεβικής ροής και πίεσης είναι ευκολότερες από τις μετρήσεις αντιστάσεων.

Οι συνδέσεις $P2_o$, $V2_i$ και $V2_o$ οδηγούν κρίσιμη πληροφορία για την πίεση και τον όγκο προς το υποσύστημα ανάλυσης του μοντέλου. Η σύνδεση $P2_i$ αποτελεί έξοδο πίεσης του υποσυστήματος προς τη δεξιά καρδιά. Τέλος, ο μπλε κόμβος 1 αποτελεί σημείο σύνδεσης του υποσυστήματος με τη δεξιά καρδιά ενώ ο κόκκινος κόμβος 1 είναι το σημείο σύνδεσης με την αριστερή καρδιά.



Σχήμα 7: Διαγράμματα όγκων.



Σχήμα 8: Διαγραμματική παράσταση του μοντέλου των πνευμόνων σε Simulink.

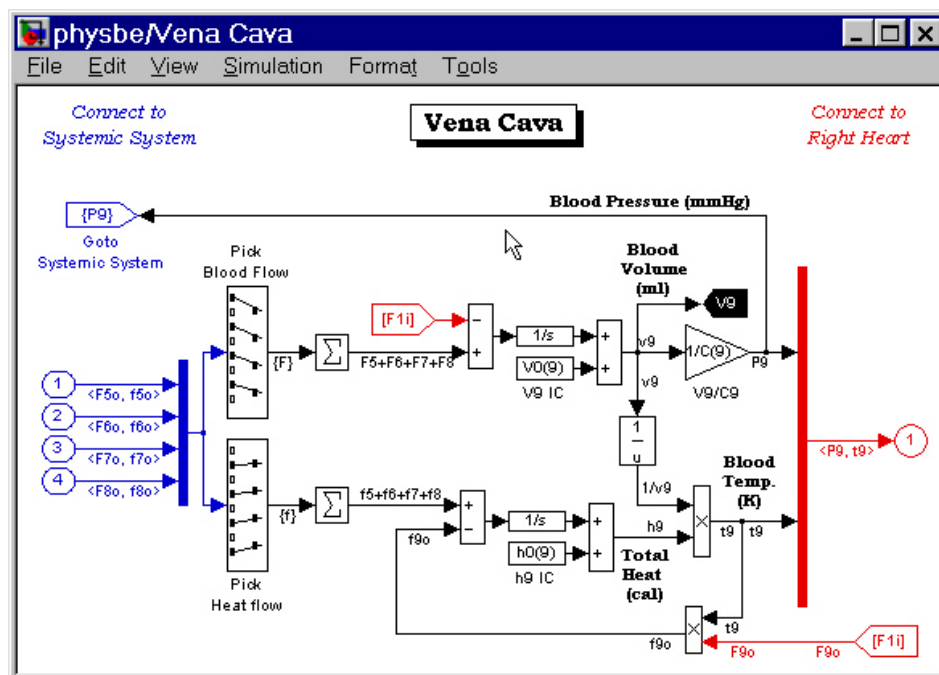
3.2.4. Καρδιακή Κυκλοφορία – Κοίλη Φλέβα

Η διαγραμματική παράσταση του υποσυστήματος που επιλύει τις εξισώσεις για το φλεβικό σύστημα φαίνεται στο Σχήμα 9. Στο υποσύστημα αυτό, η αντίσταση εισόδου θεωρείται ίση με την αντίσταση εξόδου των άνω άκρων, του κορμού, των κάτω άκρων και του κεφαλιού. Η αντίσταση εξόδου θεωρείται ίση με την αντίσταση εισόδου της δεξιάς καρδιάς. Το βάρος του υποσυστήματος θεωρείται ίσο με τον όγκο του αίματος σε αυτό. Τα εργαλεία PICK FLOW λειτουργούν ως φίλτρο πολυπλεγμένων σημάτων επιτρέποντας τη διέλευση μέσω αυτών συγκεκριμένων συνιστωσών του σήματος εισόδου. Το σήμα εισόδου του συστήματος αποτελείται από τις συνιστώσες της ροής αίματος (κανάλια 1, 4, 5 και 7) και της ροής θερμότητας (κανάλια 2, 4, 6 και 8). Τα εργαλεία PICK FLOW αναλαμβάνουν το διαχωρισμό των δύο αυτών ομάδων σημάτων. Η έξοδος του υποσυστήματος οδηγεί τη δεξιά καρδιά.

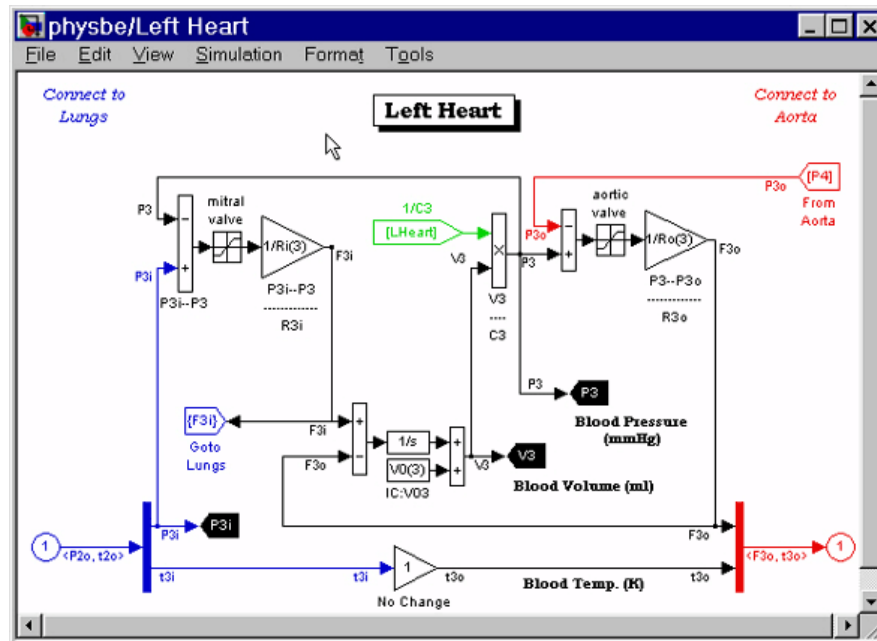
3.2.5. Καρδιακή Κυκλοφορία - Αριστερή και Δεξιά Καρδιά

Οι εξισώσεις που προσομοιώνουν την αριστερή και τη δεξιά καρδιά είναι πανομοιότυπες. Έτσι, τα διαγραμματικά μοντέλα των δύο υποσυστημάτων ταυτίζονται, με τη διαφορά ότι η αριστερή καρδιά δέχεται πληροφορία εισόδου από τους πνεύμονες και δίνει πληροφορία εξόδου στην αορτή, ενώ η δεξιά καρδιά δέχεται είσοδο από την κοίλη φλέβα και δίνει έξοδο στους πνεύμονες. Στο Σχήμα 10 μπορούμε να δούμε το διάγραμμα του υποσυστήματος της αριστερής καρδιάς.

Η φύση του μοντέλου PHYSBE δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στην αριστερή κοιλία παρά στα αποτελέσματα της χαμηλότερης ροής στον αριστερό κόλπο. Η χρήση του νέου στοιχείου ολοκληρωτή του Simulink για την προσομοίωση των βαλβίδων του μοντέλου (μιτροειδούς, αορτικής, τριγλώχινος, πνευμονικής), οι οποίες παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά, παρέχει βελτιωμένη ακρίβεια. Έτσι προσομοιώνεται η διακοπή της ανάστροφης ροής παρά τις διαφορές πίεσεως. Η θερμοκρασία του αίματος θεωρείται σταθερή στην καρδιά καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.



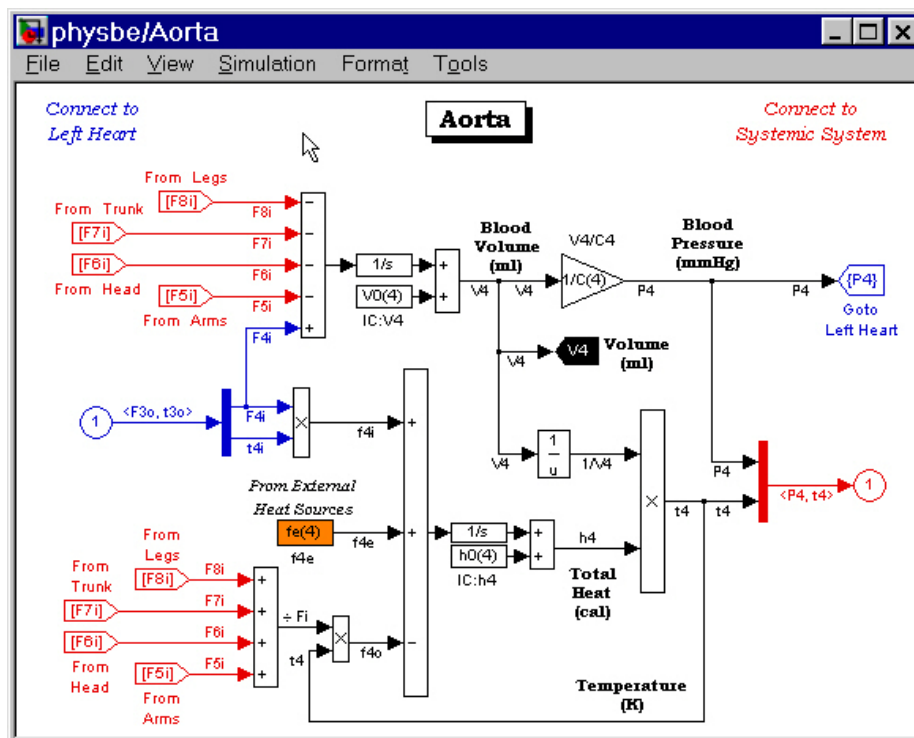
Σχήμα 9: Διαγραμματική παράσταση του μοντέλου της κοίλης φλέβας σε Simulink.



Σχήμα 10: Διαγραμματική παράσταση του μοντέλου της αριστερής καρδιάς σε Simulink.

3.2.6. Καρδιακή Κυκλοφορία - Αορτή

Στο διάγραμμα του Σχήματος 11 αποτυπώνεται το μαθηματικό μοντέλο της αορτής που αποτελεί την κυριότερη αρτηρία του ανθρώπινου σώματος.



Σχήμα 11: Διαγραμματική παράσταση του μοντέλου της αορτής σε Simulink.

Η απεικόνιση εισόδου ταυτίζεται με την αντίσταση εξόδου της δεξιάς κοιλίας. Η αντίσταση εξόδου ταυτίζεται με την αντίσταση των άνω και κάτω άκρων, του κεφαλιού και του κορμού. Το βάρος της αορτής θεωρείται ίσο με τον όγκο του αίματος V που περιέχει. Σημαντική πληροφορία εξόδου για τον όγκο V_4 μπορεί να ληφθεί απευθείας στο κέντρο ανάλυσης δεδομένων.

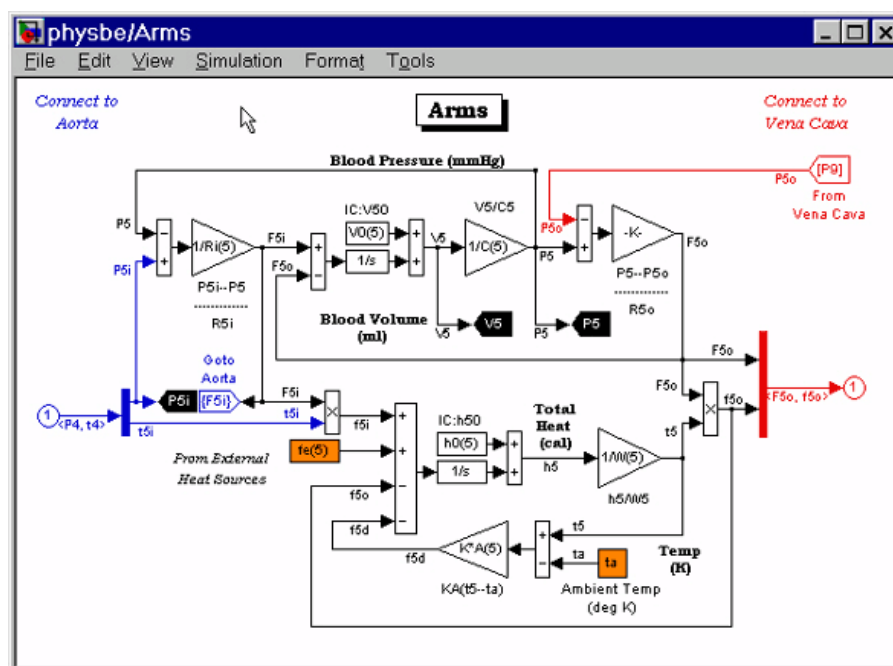
3.2.7. Συστηματική Κυκλοφορία - Άνω Άκρα

Το υπολογιστικό ανάλογο του μαθηματικού μοντέλου που προσομοιώνει την αγγειακή κυκλοφορία των άνω άκρων φαίνεται στο Σχήμα 12. Είναι όμοιο με αυτό των κάτω άκρων.

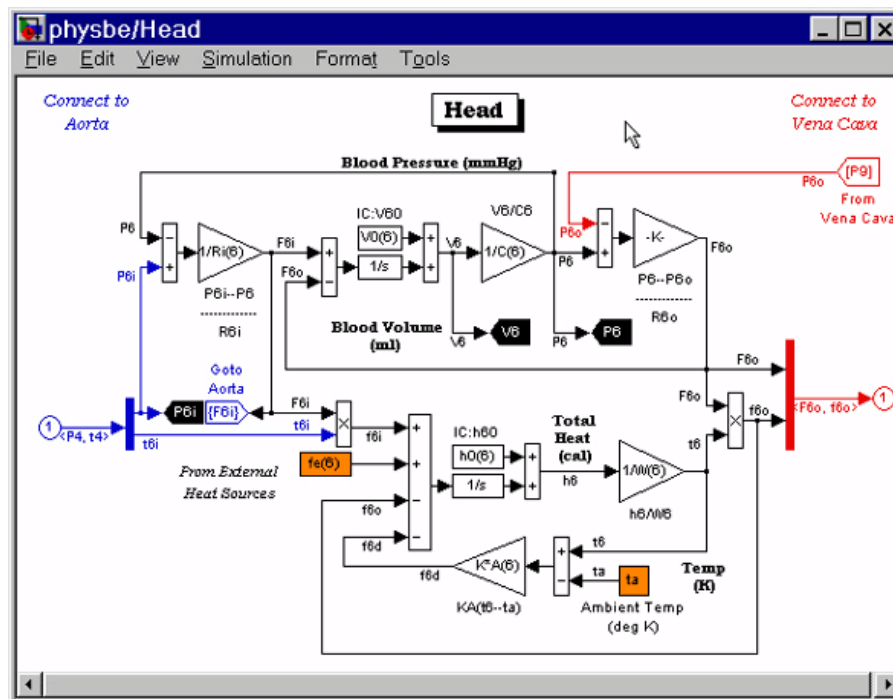
Η λειτουργία του αγγειακού συστήματος των άνω άκρων μπορεί να επηρεαστεί από την παραγωγή θερμότητας από εξωτερικές πηγές κατά τη λειτουργία των μυών. Η κατάσταση αυτή λαμβάνεται υπόψη μέσω της παραμέτρου f_e την οποία μπορεί να ορίσει ο χρήστης. Σημειώνεται ότι στο βασικό μοντέλο $f_e=0$. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος εισάγεται στο μοντέλο με την μεταβλητή t_a και η επίδρασή της είναι ανάλογη της επιφάνειας των άνω άκρων A και μιας θερμικής σταθεράς K . Το σύστημα των άνω άκρων συνδέεται με την αορτή μέσω του μπλε κόμβου 1 και με την κοίλη φλέβα μέσω του κόκκινου κόμβου 1. Οι κόμβοι $P5_i$, $V5$ και $P5_o$ παρέχουν πληροφορία εξόδου απευθείας στο κέντρο ανάλυσης δεδομένων.

3.2.8. Συστηματική Κυκλοφορία - Κεφαλή

Στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται το υποσύστημα που επιλύει τις εξισώσεις για τη ροή του αίματος στο κεφάλι. Η λειτουργία του αγγειακού συστήματος του κεφαλιού μπορεί να επηρεαστεί από εξωτερικές πηγές θερμότητας μέσω της παραμέτρου f_e , αν και για το βασικό μοντέλο αυτές οι πηγές αγνοούνται ($f_e=0$). Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τη



Σχήμα 12: Διαγραμματική παράσταση του μαθηματικού μοντέλου των άνω άκρων σε Simulink.



Σχήμα13: Διαγραμματική παράσταση του μοντέλου της κεφαλής σε Simulink.

θερμοκρασία περιβάλλοντος (μέσω του όρου t_a και η επίδρασή της είναι ανάλογη της επιφάνειας του κεφαλιού A και μιας θερμικής σταθεράς, K . Τα μπλοκ $P6_i$, $V6$ και $P6$ επιτρέπουν τη μετάδοση πληροφορίας προς το κέντρο ανάλυσης δεδομένων. Ο μπλε κόμβος 1 μεταφέρει πληροφορία από την αορτή και ο κόκκινος κόμβος 1 μεταφέρει πληροφορία προς την κοίλη φλέβα.

3.2.9. Συστηματική Κυκλοφορία – Κορμός

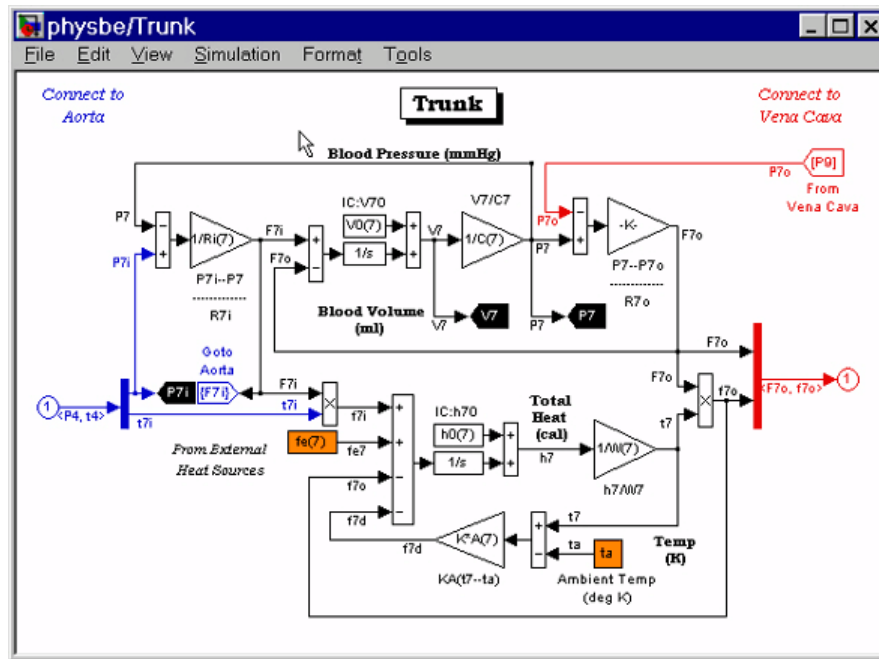
Το μαθηματικό μοντέλο το οποίο εξομοιώνει το κορμό του σώματος παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 14 και είναι σχεδόν ταυτόσημο με αυτά των άνω και κάτω άκρων και του κεφαλιού.

Το αγγειακό σύστημα του κορμού μπορεί να επηρεαστεί από εξωτερικές πηγές θερμότητας όπως είναι οι εργαζόμενοι μύες μέσω της μεταβλητής f_e , ωστόσο στο αρχικό μοντέλο ισχύει $f_e=0$. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος εισάγεται στο μοντέλο μέσω του όρου t_a και οι επιδράσεις της είναι ανάλογες του εμβαδού του κορμού. Στα άκρα της θερμικής παραμέτρου K , η έξοδος του υποσυστήματος συνδέεται με την κοίλη φλέβα μέσω των μεταβλητών $F7_o$ και $t7_o$. Η μεταβλητή $P7_o$ συμβολίζει έξοδο προς την κοίλη φλέβα και οι $(P4, t4)$ αποτελούν εισόδους από την αορτή.

3.2.10. Κέντρο Διαχείρισης Παραμέτρων

Όλες οι τιμές των κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος μπορούν να τροποποιηθούν χρησιμοποιώντας το κέντρο ελέγχου PHYSBE το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 15.

Τα ονόματα των παραμέτρων φαίνονται στην πρώτη γραμμή της διεπιφάνειας ενώ τα υποσυστήματα στα οποία ανήκουν αυτές φαίνονται στην πρώτη στήλη.



Σχήμα 14: Διαγραμματική παράσταση του μαθηματικού μοντέλου του κορμού.

PHYSBE Control Center									
	Ri	Ro	C	W	A	VO	h0	fe	fd
R.Heart	0.003	0.003	75	600	0	150	0	0	0
Lung	0.187	0	5.33	1000	0	120	0	0	0
L.Heart	0.000	0.006	75	600	0	150	0	0	0
Aorta	0	0	1.01	0	0	100	0	0	0
Arms	5.15	10	4.25	7000	3670	280	0	0	0
Head	2.58	5	1.21	4500	1400	80	0	0	0
Trunk	0.67	1.42	34	53000	6000	2250	0	0	0
Legs	2.58	5	11.1	18500	7000	730	0	0	0
V.Cava	0	0	250	0	0	500	0	0	0
Lung2*	0	0	32.5	0	0	240	0	0	0

Σχήμα 15: Το κέντρο διαχείρισης παραμέτρων του PHYSBE.

υποχώρους: Lung και Lung2 που αντιστοιχούν στην αρτηριακή και φλεβική κυκλοφορία των πνευμόνων. Οι χρωματισμένες με μπλε παράμετροι αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για τη λειτουργία του συστήματος και πρέπει να παραμένουν σταθερές. Η μεταβλητή της ροής θερμότητας υποδιαιρείται σε δυο μεταβλητές f_e και f_d που αντιστοιχούν σε θερμότητα από εξωτερικές πηγές και σε ροή θερμότητας στους πνεύμονες. Μια ακόμη κρίσιμη για τη λειτουργία του συστήματος παράμετρος είναι ο καρδιακός ρυθμός που όπως θα δούμε ρυθμίζεται από το κέντρο ανάλυσης δεδομένων.

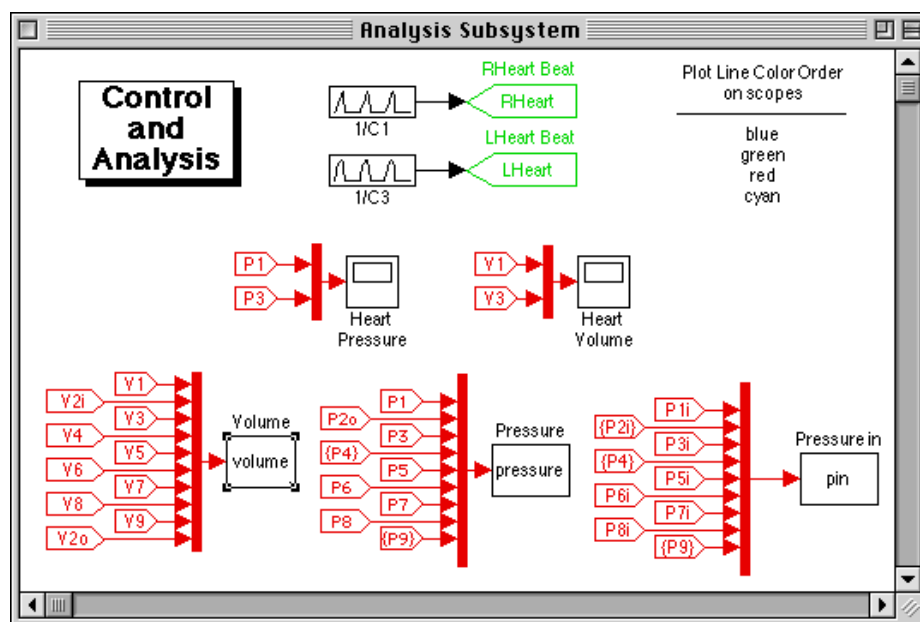
3.2.11. Κέντρο Ανάλυσης Δεδομένων

Από την διεπιφάνεια του υποσυστήματος ανάλυσης δεδομένων, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 16, ο χρήστης έχει πρόσβαση στις κρίσιμότερες παραμέτρους του συστήματος. Παρέχεται έτσι η δυνατότητα μελέτης των τιμών των παραμέτρων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του μοντέλου χρησιμοποιώντας τα εργαλεία απεικόνισης του Simulink, όπως FLOATING SCOPE, SCOPE, GRAPHXY. Στο υποσύστημα αυτό επίσης δημιουργούνται τα σήματα χρονισμού που εξομοιώνουν τους παλμούς της αριστερής και

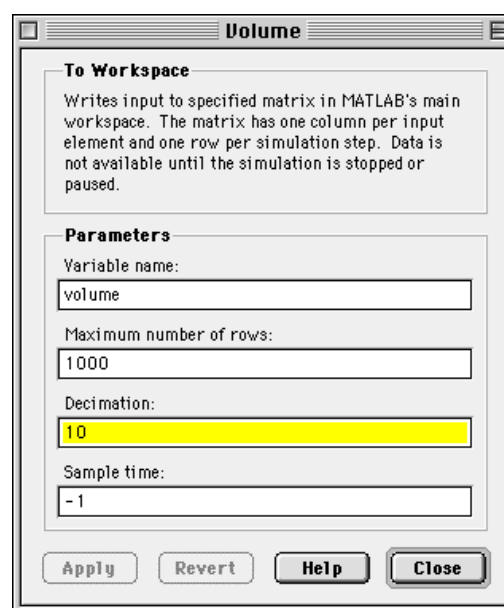
δεξιάς καρδιάς. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, με τη χρήση των τριών εργαλείων TO WORKSPACE, δεδομένα για τον όγκο του αίματος, την εσωτερική πίεση και την πίεση εισόδου αποθηκεύονται σε πίνακες του Matlab για περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται στις μεταβλητές volume, pressure και P_{in} αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι για τον περιορισμό του όγκου των δεδομένων, το εργαλείο TO WORKSPACE εκτελεί δειγματοληψία στα σήματα εξόδου με παραμέτρους που ορίζονται από τη διαδραστική επιφάνεια του Σχήματος 17.

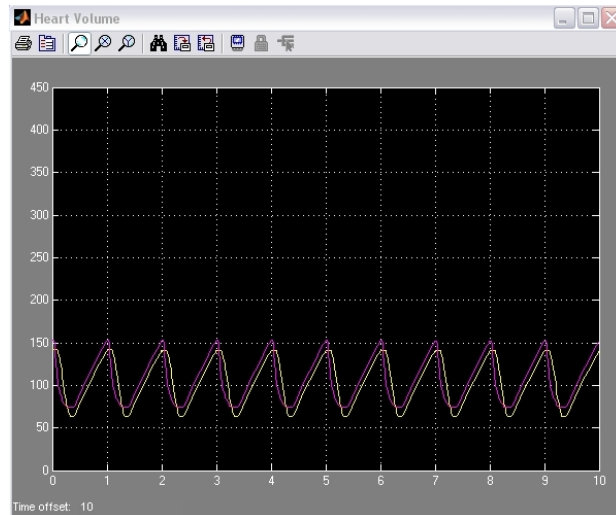
Για την προβολή γραφικών παραστάσεων παραμέτρου σε συνάρτηση με το χρόνο χρησιμοποιούνται τα εργαλεία SCOPE τα οποία παρέχουν ποικίλες δυνατότητες μορφοποίησης της εξόδου τους. Ένα παράδειγμα εξόδου SCOPE φαίνεται στο Σχήμα 18 όπου απεικονίζεται ο καρδιακός όγκος σε συνάρτηση με το χρόνο.



Σχήμα 16: Διαγραμματική παράσταση υποσυστήματος ανάλυσης δεδομένων στο Simulink.



Σχήμα 17: Διεπιφάνεια ορισμού παραμέτρων δειγματοληψίας.



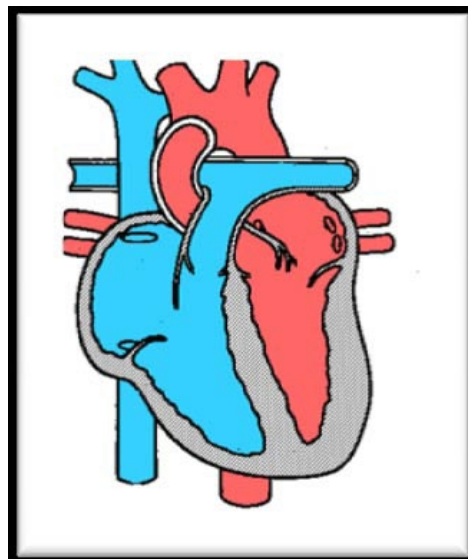
Σχήμα 18: Έξοδος SCOPE για τη μέτρηση του καρδιακού όγκου.

4. Πρακτική Εξάσκηση

4.1. Θεωρία

Ερώτηση 1: Στο διάγραμμα της καρδιάς που φαίνεται στο Σχήμα 19, ονοματίστε την αριστερή και τη δεξιά κοιλία, τον αριστερό και το δεξιό κόλπο, τη μιτροειδή και την πνευμονική βαλβίδα, την αορτή, την άνω κοίλη φλέβα (superior vena cava), την κάτω κοίλη φλέβα (inferior vena cava), την πνευμονική αρτηρία και την πνευμονική φλέβα.

Επίσης, χρησιμοποιώντας βέλη, δείξτε τη φορά του αίματος καθώς περνά μέσα από την καρδιά, επιστρέφοντας με τις κοίλες φλέβες.



Σχήμα 19: Διάγραμμα καρδιάς.

Πριν προχωρήσετε με το μοντέλο, πρέπει να κατανοήσετε τη σχέση που συνδέει την **πίεση**, τη **ροή** και την **αντίσταση** του αίματος. Η ροή του αίματος μεταξύ δύο σημείων, F είναι ίση με το πηλίκο της διαφοράς πίεσης P μεταξύ των δύο σημείων προς την αγγειακή αντίσταση R : $F = (P_1 - P_2) / R$. Η εξίσωση αυτή αποτελεί το υδροδυναμικό ανάλογο του Νόμου του Ohm. Σε αυτό το μοντέλο, η καρδιά διατηρεί την πίεση (P_1) καθώς συστέλλεται και στέλνει το αίμα στην αορτή κάτω από σχετικά μεγάλη πίεση. Η πίεση αυτή μειώνεται καθώς το αίμα ρέει διαμέσου του υπόλοιπου κυκλοφορικού συστήματος γιατί τα αγγεία προβάλλουν αντίσταση (R) προς τη ροή. Η αντίσταση εξαρτάται σημαντικά από τη διατομή των αγγείων: *Όσο πιο μεγάλη είναι η διάμετρος του αγγείου τόσο πιο μικρή είναι η αντίσταση που προβάλλει στη ροή του αίματος.*

Ερώτηση 2: Με βάση την παραπάνω εξίσωση, περιγράψτε τους δύο τρόπους με τους οποίους μπορεί να αυξηθεί η ροή του αίματος σε ένα συγκεκριμένο ιστό/όργανο/σύστημα του σώματος.

4.2. Βασική Εξάσκηση με το Μοντέλο PHYSBE και το Περιβάλλον SIMULINK

Καλείστε να εκτελέσετε τα παρακάτω βήματα:

1. Εισαγωγή στο περιβάλλον MatLab.
2. Άνοιγμα φακέλου ο οποίος περιέχει το Μοντέλο PHYSBE.
3. Πληκτρολόγηση της εντολής `slCharacterEncoding('ISO-8859-1')` για συμβατότητα με τη γραμματοσειρά που έχει επιλεγεί από το μοντέλο PHYSBE.
4. Πληκτρολόγηση στο περιβάλλον εργασίας MatLab της εντολής `physbe` για είσοδο στον εξομοιωτή.

Κατά την είσοδο στον εξομοιωτή, εμφανίζονται 5 παράθυρα.

1. Το κύριο παράθυρο που περιλαμβάνει το μοντέλο PHYSBE (υλοποίηση σε SIMULINK).
2. Το παράθυρο “PHYSBE Control Center” για την τροποποίηση των τιμών των κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος
3. Το παράθυρο “Heart Volume”.
4. Το παράθυρο “Heart Pressure”.
5. Το παράθυρο “Floating Scope”.

Πειραματιστείτε με το μοντέλο PHYSBE για 2 λεπτά: Ανοίξτε τα επί μέρους συστήματα και αναγνωρίστε τις εισόδους και εξόδους τους.

Με διπλό click στο “Analysis Subsystem” μεταφέρεστε στο παράθυρο ανάλυσης δεδομένων του μοντέλου, από το οποίο είναι δυνατή η πρόσβαση στις κρισιμότερες παραμέτρους του συστήματος. Αναγνωρίστε τα `Goto Tags` τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξαγωγή των επιθυμητών σημάτων και παρατηρείστε την ύπαρξη τριών παλμογράφων `Scopes` με ονόματα “Heart Volume”, “Heart Pressure” και “Floating Scope”.

Εκτελέστε το μοντέλο PHYSBE (από τη γραμμή εντολών “Simulation” επιλέγετε “Start”) και παρατηρήστε τις εξόδους του μοντέλου στα παράθυρα “Heart Volume” και “Heart Pressure”. Προσπαθήστε να εξοικειωθείτε με το περιβάλλον αυτών των

παραθύρων καθώς και με τα βασικά εργαλεία Zoom In, Zoom Out και Autoscale (επιλέγεται με δεξί click πάνω στο παράθυρο).

Ερώτηση 1: Παρατηρήστε και σχολιάστε το παράθυρο “Heart Volume” στο τέλος της προσομοίωσης. Αν χρειαστεί εφαρμόστε Autoscale για καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τι απεικονίζεται στο παράθυρο αυτό; Τι μπορεί να συμβεί όταν η δεξιά καρδιά εξωθεί μεγαλύτερο όγκο αίματος από ό,τι η αριστερή καρδιά;

Ερώτηση 2: Παρατηρήστε και σχολιάστε το παράθυρο “Heart Pressure” στο τέλος της προσομοίωσης. Αν χρειαστεί εφαρμόστε Autoscale για καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Συγκρίνετε τις συστολικές πιέσεις της δεξιάς και της αριστερής κοιλίας. Γιατί είναι τόσο διαφορετικές; Πώς η διαφορά πίεσης επηρεάζει το πάχος του τοιχώματος καθεμιάς εκ των κοιλιών;

4.3. Προχωρημένη Εξάσκηση στο Περιβάλλον SIMULINK

Η ροή και η πίεση του αίματος μπορούν να μετρηθούν ή να υπολογιστούν σε διάφορα μέρη του καρδιαγγειακού συστήματος: στους πνεύμονες, την αορτή, διάφορα μέρη του σώματος (κεφαλή, άκρα) και στην ίδια την καρδιά. Αυτό το μέρος της άσκησης, αναφέρεται στην παρουσίαση της διαθέσιμης από το μοντέλο PHYSBE πληροφορίας σε ένα νέο παράθυρο, χρησιμοποιώντας τα εργαλεία που παρέχει το περιβάλλον SIMULINK.

Θα δημιουργήσετε ένα νέο παράθυρο παρατήρησης μεταβλητών (scope) του μοντέλου. Για το σκοπό αυτό καλείστε να εκτελέσετε τα παρακάτω βήματα:

1. Στο παράθυρο “physbe” κάνετε διπλό click στο εικονίδιο “Analysis Subsystem” για να ανοίξετε τη διεπιφάνεια του υποσυστήματος ανάλυσης δεδομένων.
 2. Στο νέο παράθυρο (“Analysis Subsystem”) ανοίγετε το Library Browser της Simulink από τη γραμμή εντολών (View → Library Browser).
 3. Στο παράθυρο με τα εργαλεία της Simulink που ανοίγει, κατευθύνετε στην πρώτη ομάδα εργαλείων (Simulink → Commonly Used Blocks) και επιλέγετε το Scope. Κάνετε “drag ‘n drop” για να τοποθετήσετε το Scope σας εντός του παραθύρου “Analysis Subsystem”.
 4. Κάντε το ίδιο με το (3) αλλά αυτή τη φορά τοποθετήστε έναν πολυπλέκτη MUX δίπλα στο Scope που έχετε δημιουργήσει. Ο πολυπλέκτης έχει ως προεπιλογή δύο εισόδους και μία έξοδο. Ενώστε την έξοδό του με την είσοδο του Scope. Ο αριθμός των εισόδων μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες σας κάνοντας διπλό click πάνω στον πολυπλέκτη. Προς το παρόν, διατηρήστε τον αριθμό των εισόδων σε 2.
 5. Οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου (πίεσης και όγκου αίματος) του μοντέλου μπορούν να προσπελαστούν από τα αντικείμενα From Tags. Μπορείτε να δημιουργήσετε τα αντικείμενα αυτά εξ αρχής (στον Library Browser επιλέγετε Simulink → Signal Routing → From) ή μπορείτε να χρησιμοποιήσετε κάποιο από αυτά που έχουν ήδη δημιουργηθεί (με χρήση copy – paste). Το όνομα του tag (και άρα η μεταβλητή πίεσης/όγκου) που έχει δημιουργηθεί μπορεί να αλλάξει με διπλό click πάνω στο tag. Δημιουργήστε δύο τέτοιες μεταβλητές πίεσης, τις P3 και P4.
 6. Από την κεντρική οθόνη διαχείρισης του μοντέλου εκτελέστε την εφαρμογή (Simulation→Start) και παρατηρήστε το παράθυρο “scope”. Αν θελήσετε να αποθηκεύσετε το νέο μοντέλο, επιλέξτε “Save as” και δώστε ως όνομα το “Physbe1”.
-

Ερώτηση 1: Παρατηρώντας το μοντέλο, βρείτε σε ποιών υποσυστημάτων τις πιέσεις εξόδου αντιστοιχούν οι P3 και P4. Σχολιάστε τις ομοιότητες και τις διαφορές των δύο πιέσεων: Γιατί η πίεση P4 έχει αυτή τη συμπεριφορά;

Επιστρέφοντας στο παράθυρο ανάλυσης υποσυστημάτων, αυξήστε τον αριθμό των εισόδων του πολυπλέκτη σε 3. Ως εισόδους ορίστε τις μεταβλητές P4, P7 και P9.

Ερώτηση 2: Εκτελέσετε πάλι το μοντέλο. Αφού βρείτε σε ποιο υποσύστημα αντιστοιχεί η κάθε πίεση, περιγράψτε και εξηγήστε τι παρατηρείτε ως προς τη μέγιστη τιμή τους. Πώς μπορούν οι βαλβίδες και οι μύες του σώματος να βοηθήσουν στην επιστροφή του αίματος στην καρδιά; Τι παρατηρείτε ως προς την peak-to-peak τιμή των τριών πιέσεων; Εξηγήστε.

Το έργο που εκτελεί η καρδιά ανά παλμό μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια μιας γραφικής παράστασης. Συγκεκριμένα, το έργο των κοιλιών μπορεί να προσεγγιστεί με σχετική ακρίβεια από το εμβαδό της γραφικής παράστασης όγκου – πίεσης του αίματος που είναι μια κλειστή κυκλοειδής γραμμή. Το κοιλιακό έργο ισούται με το γινόμενο του όγκου παλμού και της μέσης αορτικής ή πνευμονικής αρτηριακής πίεσης, ανάλογα με την υπό μελέτη κοιλία. Το εμβαδό με τη σειρά του μπορεί να προσεγγιστεί από το εμβαδό του εγγεγραμμένου ορθογωνίου τετραπλεύρου.

Στο περιβάλλον “Analysis Subsystem” δημιουργήστε ένα νέο αντικείμενο ως εξής:

1. Στον Library Browser επιλέγουμε Simulink → Sinks → XY Graph.
2. Δημιουργήστε ένα αντικείμενο – μεταβλητή εξόδου του μοντέλου, V1 και ένα ακόμη, P1, με τον τρόπο που έχει ήδη περιγραφεί. Ενώστε την μεταβλητή V1 με την πάνω είσοδο και την μεταβλητή P1 με την κάτω είσοδο του αντικειμένου XY Graph.
3. Με διπλό click πάνω στο XY Graph οριοθετήστε την περιοχή απεικόνισης του γραφήματος ως εξής: $[x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}] = [60, 160, 0, 30]$.
4. Από την κεντρική οθόνη διαχείρισης του μοντέλου εκτελέστε την εφαρμογή (Simulation → Start) και παρατηρήστε το παράθυρο “XY Graph”.
5. Εκτελέστε τα βήματα (1) –(4) αυτή τη φορά για την αριστερή κοιλία και με οριοθέτηση της περιοχής απεικόνισης του XY γραφήματος $[x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}] = [60, 160, 0, 140]$. Για διευκόλυνσή σας, δώστε διαφορετικά ονόματα στα δύο XY γραφήματα.

Ερώτηση 3: Περιγράψτε το γράφημα όγκου – πίεσης με τη βοήθεια της φυσιολογικής λειτουργίας της καρδιάς: Ποια σημεία της γραφικής παράστασης αντιστοιχούν σε συστολή, διαστολή, εξώθηση του αίματος από την καρδιά. Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

Ερώτηση 4: Προσεγγίστε το κοιλιακό έργο ως το εμβαδό των δύο γραφημάτων που προκύπτουν. Συγκρίνετε τα δύο έργα μεταξύ τους. Πόσες φορές μεγαλύτερο είναι το ένα του άλλου. Δώστε μια σύντομη εξήγηση.

Ερώτηση 5: Δώστε τουλάχιστον τρεις λόγους για τους οποίους η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογισμού του εμβαδού παρέχει μια μη ασφαλή εκτίμηση του καρδιακού έργου.

4.4. Προσομοίωση Φυσιολογικών Καταστάσεων

Ας θεωρήσουμε ότι μελετούμε το καρδιαγγειακό σύστημα ενός αθλητή κατά την άσκηση. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει έντονη ανάγκη αυξημένης ροής αίματος στους μύς προκειμένου να μεταφερθεί O_2 και να απομακρυνθεί CO_2 . Θα υπολογίσουμε πόσο μπορεί να αυξηθεί η ροή του αίματος προς τους μύς με μεταβολή μόνο του καρδιακού ρυθμού.

Ο καρδιακός ρυθμός στο μοντέλο PHYSBE μπορεί να προσπελαστεί από το παράθυρο “Analysis Subsystem” και είναι διαφορετικός για τις δύο κοιλίες (Heart Beat Right Ventricle και Heart Beat Left Ventricle). Υπάρχουν δύο μεταβλητές (Cl και Cr) στο περιβάλλον εργασίας MatLab οι οποίες περιέχουν τις χρονικές στιγμές των καρδιακών παλμών και άρα καθορίζουν τον καρδιακό ρυθμό.

Για τη μεταβολή του καρδιακού ρυθμού ακολουθήστε τα παρακάτω βήματα:

1. Επειδή θα επέμβετε σε δομικές μεταβλητές του φυσιολογικού μοντέλου, αποθηκεύστε τις αρχικές τιμές των μεταβλητών Cl και Cr σε δύο βοηθητικούς καταχωρητές, Cl_buf και Cr_buf πληκτρολογώντας στην γραμμή εντολών του MatLab τα εξής:

```
>> Cl_buf = Cl;  
>> Cr_buf = Cr;
```
2. Μεταβάλλετε τον καρδιακό ρυθμό των δύο κοιλιών ταυτόχρονα πληκτρολογώντας τα εξής:

```
>> n = 0.5;  
>> Cl = n*Cl;  
>> Cr = n*Cr;
```

Σημείωση: Προκειμένου να διπλασιάσουμε τον καρδιακό ρυθμό, υποδιπλασιάζουμε τους καταχωρητές που δείχνουν τη διάρκεια του καρδιακού παλμού.

Ερώτηση 1: Εκτελέστε το μοντέλο. Πώς μεταβάλλεται η καρδιακή πίεση και ο καρδιακός όγκος; Ποιο αυξάνεται, ποιο μειώνεται και πώς μπορείτε να εξηγήσετε τη μεταξύ τους σχέση; Αν αυξήσετε αυθαίρετα τον καρδιακό ρυθμό, εμφανίζει το μοντέλο κάποιο άνω όριο αιματικού όγκου; Αν ναι, υπό ποια πίεση συμβαίνει αυτό;

Υπόδειξη 1: Λάβετε υπόψη τη φυσιολογία της καρδιάς: Για να εξωθήσει το αίμα στο σώμα, πρέπει πρώτα οι κοιλίες να πληρωθούν με αίμα.

Υπόδειξη 2: Τα συμπεράσματα για το μοντέλο και τις μεταβλητές εξάγονται μόνο όταν αυτό έχει σταθεροποιηθεί στο χρονικό παράθυρο της εξομοίωσης σε κατάσταση S-S (“steady-state”).

Μετά το γεύμα, τα όργανα του πεπτικού συστήματος χρειάζονται επιπλέον αίμα για τη λειτουργία της πέψης. Για να μελετήσετε αυτή τη διαδικασία, θεωρήστε ότι αυξάνεται η ροή του αίματος με τη μεταβολή της αντίστασης του κορμού (trunk) στη ροή του αίματος. Σε όλα τα πειράματα που θα πραγματοποιήσετε στη συνέχεια, αγνοήστε το πρώτο διάστημα της εξομοίωσης – μεταβατική περίοδος- που χρειάζεται το μοντέλο για να φτάσει σε μόνιμη κατάσταση (steady state).

Για την προσομοίωση της διαδικασίας της πέψης, ακολουθήστε τα παρακάτω βήματα:

1. Καταχωρίστε τις αρχικές τιμές Cl_buf και Cr_buf στις μεταβλητές χρονισμού της κοιλιακής σφίξης της αριστερής και της δεξιάς καρδιάς πληκτρολογώντας

```
>> Cr = Cr_buf;  
>> Cl = Cl_buf;
```

και κατόπιν πληκτρολογήστε:

```
>> Cr = 0.4*Cr;
```

```
>> Cl = 0.4*Cl;
```

για να αυξήσετε εκ νέου τον καρδιακό ρυθμό. Με αυτό το ρυθμό παροχής αίματος στο σώμα, προσπαθήστε να απαντήσετε στο ερώτημα που ακολουθεί.

2. Δημιουργήστε ένα νέο Scope στο οποίο θα παρατηρείτε την αιματική ροή εισόδου στο σώμα, F7i.

Ερώτηση 2: Πώς μπορείτε να μεγιστοποιήσετε την αιματική ροή στο σώμα, αν έχετε τη δυνατότητα να μεταβάλετε μόνο την αντίσταση εισόδου (R_i) του κοσμού (trunk); (Προσοχή, μην αποσταθεροποιήσετε το μοντέλο με τη μεταβολή της αντίστασης εισόδου). Ποιά είναι η βέλτιστη τιμή της αντίστασης για να προσομοιωθεί η αύξηση της αιματικής ροής; Ποια είναι τότε η πίεση και ποιος ο αιματικός όγκος; Πώς μεταβάλλονται με την αντίσταση; Με βάση τα μέχρι τώρα αποτελέσματα του τρίτου μέρους της άσκησης, γιατί δεν θα συνιστούσατε φυσική άσκηση αμέσως μετά το γεύμα;

Ερώτηση 3: Αν υποθέσουμε ότι η αρτηριακή πίεση δεν πρέπει να πέσει κάτω από 105 mm Hg για να διατηρείται η αιματική ροή στον εγκέφαλο, ποια θα ήταν η απάντησή σας στην Ερώτηση 2.

Ο εγκέφαλος έχει μερικές πολύ ενδιαφέρουσες φυσιολογικές ιδιότητες που τον διαφοροποιούν από τα όργανα του πεπτικού συστήματος ή τους μυς. Σε αντίθεση με το στομάχι για παράδειγμα, ο εγκέφαλος δεν μπορεί να σταματήσει να λειτουργεί ούτε καν στιγμιαία, π.χ. σε καταστάσεις εντατικής σωματικής άσκησης. Αυτή η ιδιαιτερότητα δημιουργεί μερικά σημαντικά προβλήματα στο καρδιαγγειακό σύστημά μας καθώς ο εγκέφαλος χρειάζεται μια σχεδόν συνεχή παροχή αίματος. Κάτι που δημιουργεί ακόμη περισσότερα προβλήματα είναι το γεγονός ότι ο εγκέφαλός μας είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος σε αλλαγές της πίεσης. Τα αγγεία του εγκεφάλου είναι ευαίσθητα στη χαμηλή πίεση καθώς το κεφάλι μας βρίσκεται συνήθως πιο ψηλά από την καρδιά μας και η αορτική πίεση πρέπει να είναι αρκετά υψηλή προκειμένου να εξωθεί το αίμα αντίθετα από τη φορά της βαρύτητας. Διαφορετικά, θα λυποθυμούσαμε. Ωστόσο, αν η πίεση είναι υπερβολικά υψηλή, περισσότερο αίμα θα εξαγγειώνεται από τα τριχοειδή αγγεία προς το διάμεσο χώρο, κάτι που επίσης δεν θα αρέσει στον εγκέφαλό μας. Δεν είναι τυχαίο ότι ο άνθρωπος μπορεί να περπατά με το κεφάλι προς το πάτωμα και τα πόδια ψηλά για σύντομο χρονικό διάστημα. Επομένως χρειαζόμαστε ένα σύστημα που θα πρέπει να μπορεί να ανακατανέμει γρήγορα τη ροή αίματος μεταξύ των μυών και των οργάνων του πεπτικού συστήματος, ενώ θα παρέχει σχεδόν σταθερή αιματική ροή στον εγκέφαλο, φροντίζοντας παράλληλα να διατηρείται η πίεση εντός στενών φυσιολογικών ορίων.

Ερώτηση 4: Κατά τη διάρκεια έντονης σωματικής άσκησης, πώς μπορεί να μεγιστοποιηθεί η αιματική ροή στους μυς του σώματος με διατήρηση της αρτηριακής πίεσης μεταξύ 105 και 150 mmHg και της αιματικής ροής προς τον εγκέφαλο μεταξύ 12-13 ml/sec; Στην ουσία σας ζητείται να επαναλάβετε την **Ερώτηση 3** αφού θεωρήσετε ότι πρέπει να κρατήσετε ικανοποιημένο τον εγκέφαλο. Δώστε αριθμούς και γραφήματα από τις προσομοιώσεις σας που θα υποστηρίζουν τις απαντήσεις σας.

Υπόδειξη: Επαναφέρετε όλες τις τιμές των αντιστάσεων στις αρχικές τιμές τους και έπειτα προσπαθήστε να βρείτε ένα βέλτιστο συνδυασμό τιμών για τις αντιστάσεις Trunk, Legs, Arms και Head.

Προκειμένου να επιτύχουμε υψηλή ροή, η αρτηριακή πίεση πέφτει αρκετά (έχετε ήδη μελετήσει το λόγο για τον οποίο συμβαίνει αυτό, στην **Ερώτηση 1**). Η χαμηλή πίεση όμως, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα, ιδιαίτερα αν σκεφτούμε τη διοχέτευση αίματος σε όργανα και ιστούς πάνω από το επίπεδο της καρδιάς – για παράδειγμα στον εγκέφαλο.

Ερώτηση 5: Ποιες μεταβολές θα περιμένατε στον όγκο του αίματος στο σώμα σας, αν σας τοποθετούσαν σε δορυφόρο, εκτός του βαρυτικού πεδίου της γης; Εξηγήστε σε μια παράγραφο το σκεπτικό σας.

Ερώτηση 6: Με βάση ό,τι κατανοήσατε στο πλαίσιο της άσκησης, μπορείτε να αναφέρετε μερικούς τρόπους αντιμετώπισης της ορθοστατικής υπότασης συμπεριλαμβανομένων μηχανικών, φαρμακευτικών και άλλων μεθόδων;

Βιβλιογραφία

- [1] McLeod J, *PHYSBE: A physiological simulation benchmark experiment*, *SIMULATION*, 324-329, vol.7, no.6.
- [2] McLeod J, *PHYSBE: A year later*, *SIMULATION*, 37-45, vol.10, no.1.
- [3] Heart Anatomy <https://openstax.org/books/anatomy-and-physiology/pages/19-1-heart-anatomy>
- [4] Korn G, McLeod J, Wait J, *DARE/PHYSBE*, *SIMULATION*, 229-231.
- [5] McLeod J., *Toward uniform documentation--PHYSBE and CSMP*, *SIMULATION*, 215-220, vol.14, no.5.
- [6] Benham R., *An ISL-8 and ISL-15 study of the physiological simulation benchmark experiment*, *SIMULATION*, 152-156.
- [7] [Vesalius Interactive Anatomy](#). Διαδικτυακός τόπος με σκοπό την ενημέρωση της χειρουργικής ιατρικής κοινότητας. © [Lion Reef Software](#), 7831 Woodmont Avenue Bethesda, MD 20814