



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΤΙΚΗΣ(BIOSIM)

3η Εργαστηριακή Αναφορά στο μάθημα
**“ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ”** του 9ου Εξαμήνου

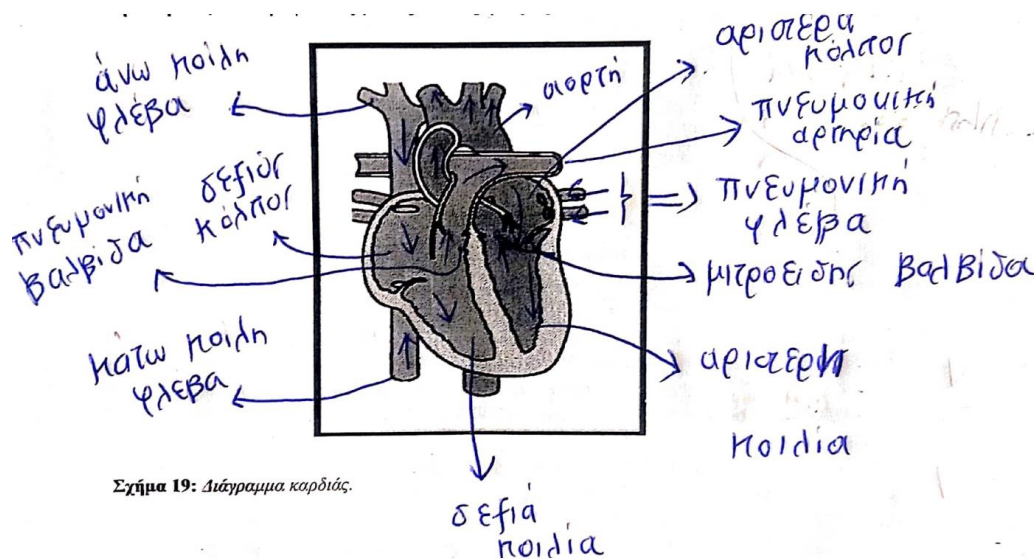
του Εμμανουήλ Αναστάσιου Σερλή, Α.Μ. 03118125

4 Πρακτική Εξάσκηση

4.1 Θεωρία

Ερώτηση 1:

Στο κάτωθι screenshot του σχήματος 19 αναγράφονται οι επιμέρους περιοχές, οι βαλβίδες καθώς και οι ροές αίματος της καρδιάς



Ερώτηση 2:

Η ροή του αίματος μεταξύ 2 σημείων δίνεται από το υδροδυναμικό ανάλογο του νόμου του Ohm ως εξής:

$$F = \frac{P_1 - P_2}{R} (1)$$

, όπου F: η ροή αίματος

P1, P2: η πίεση στα σημεία 1 και 2 αντίστοιχα

R: η αντίσταση

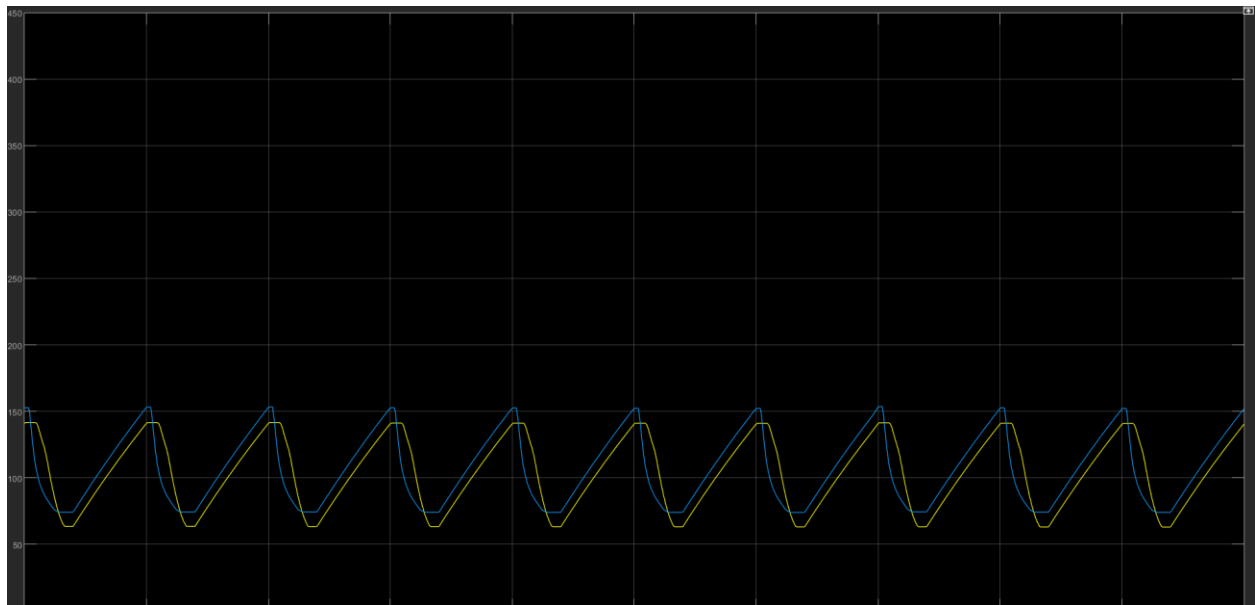
2 πιθανοί τρόποι αύξησης της ροής αίματος είναι οι εξής:

- **Μέσω μείωσης της αντίστασης R** , κάτι που θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω αύξησης της διαμέτρου του εκάστοτε αγγείου (πχ μέσω φαρμακευτικής αγωγής ή εγχείρησης bypass για την παράκαμψη της στενής περιοχής της αρτηρίας)
- **Μέσω μείωσης της πίεσης $P2$** , κάτι που θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω κατάλληλης φαρμακευτικής αγωγής ή της χρήσης ενός βηματοδότη. Σημειώνεται ότι η πίεση $P1$ διατηρείται σταθερή από την καρδιά καθώς συστέλλεται.

4.2 Βασική Εξάσκηση με το Μοντέλο PHYSBE και το Περιβάλλον SIMULINK

Ερώτηση 1:

Παρακάτω ακολουθεί το αποτέλεσμα της προσομοίωσης που αφορά τον όγκο της καρδιάς, όπου με μπλε απεικονίζεται ο όγκος της αριστερής καρδιάς και με κίτρινο ο όγκος της δεξιάς.

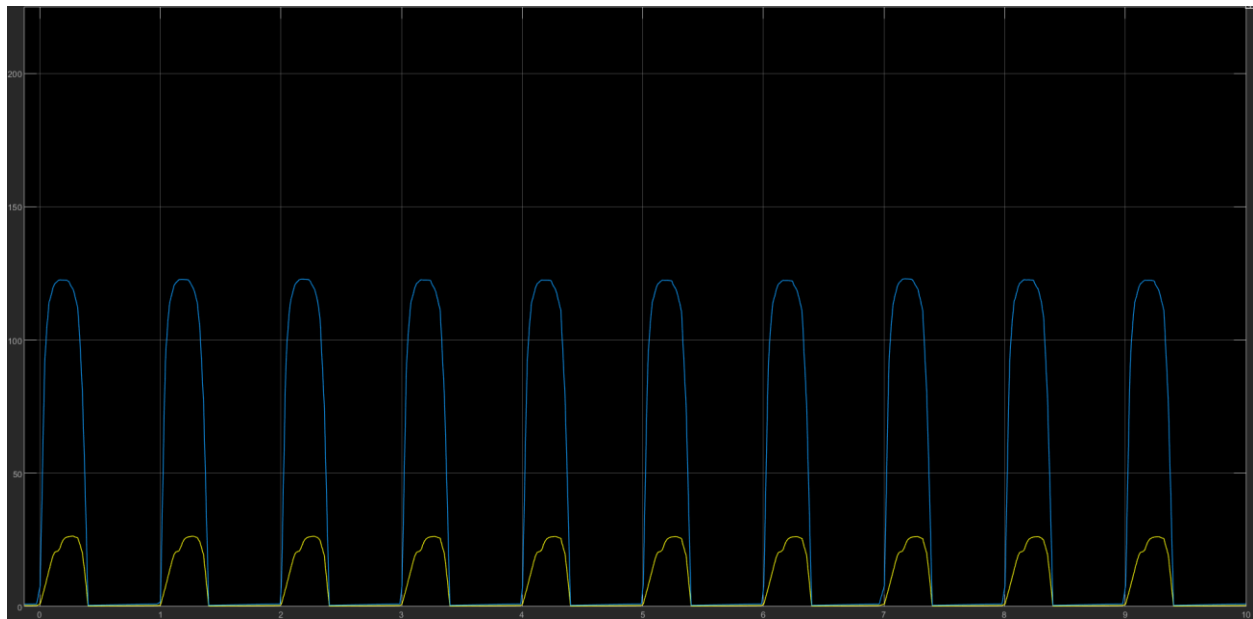


Παρατηρούμε ότι οι 2 όγκοι έχουν πρακτικά ισοδύναμες τιμές για τα διαφορετικά χρονικά διαστήματα της προσομοίωσης (με ένα σταθερό offset πρόσθετου όγκου στην αριστερή καρδιά). Σε περίπτωση που η δεξιά καρδιά εξωθεί μεγαλύτερο όγκο αίματος από ό,τι η αριστερή (π.χ. σε

περίπτωση δυσλειτουργίας της τριγλώχινας βαλβίδας), τότε θα παρατηρηθεί συσσώρευση αίματος στην αριστερή κοιλία και αύξηση του αίματος που απαιτείται για εξώθηση προς την αορτή και το υπόλοιπο σώμα. Έτσι, η πίεση στην αριστερή καρδιά θα αυξηθεί, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μυοκαρδίες ή/και καρδιακή ανεπάρκεια.

Ερώτηση 2:

Παρακάτω ακολουθεί το αποτέλεσμα της προσομοίωσης που αφορά την πίεση της καρδιάς, όπου με μπλε απεικονίζεται ο όγκος της αριστερής καρδιάς και με κίτρινο όγκος της δεξιάς.



Παρατηρούμε ότι η πίεση στην αριστερή καρδιά είναι-κατά μέσο όρο-πολύ υψηλότερη από αυτήν που ασκείται στην δεξιά, μιας και από την αριστερή κοιλία εξωθείται μέσω συστολής της αίμα πλούσιο σε οξυγόνο προς την αορτή και το υπόλοιπο σώμα. Από την άλλη, η δεξιά κοιλία καλείται να μεταβιβάσει αίμα προς τα τριχοειδή αγγεία των πνευμόνων που βρίσκονται πολύ πιο κοντά στην καρδιά.

Μιας και έχουμε $\Delta P_{αριστερα} > \Delta P_{δεξια}$ και $F_{αριστερα} \sim F_{δεξια}$ πρέπει από την σχέση (1) να ισχύει

$R_{αριστερα} > R_{δεξια}$, δηλαδή μικρότερη διάμετρο αγγείων στην αριστερή καρδιά σε σχέση με την δεξιά και εν τέλει πολύ **μεγαλύτερο πάχος τοιχωμάτων στην αριστερή καρδιά**. Αυτό μπορεί να επαληθευτεί και από την αναλυτική εξίσωση αντίστασης-ακτίνας τοιχώματος:

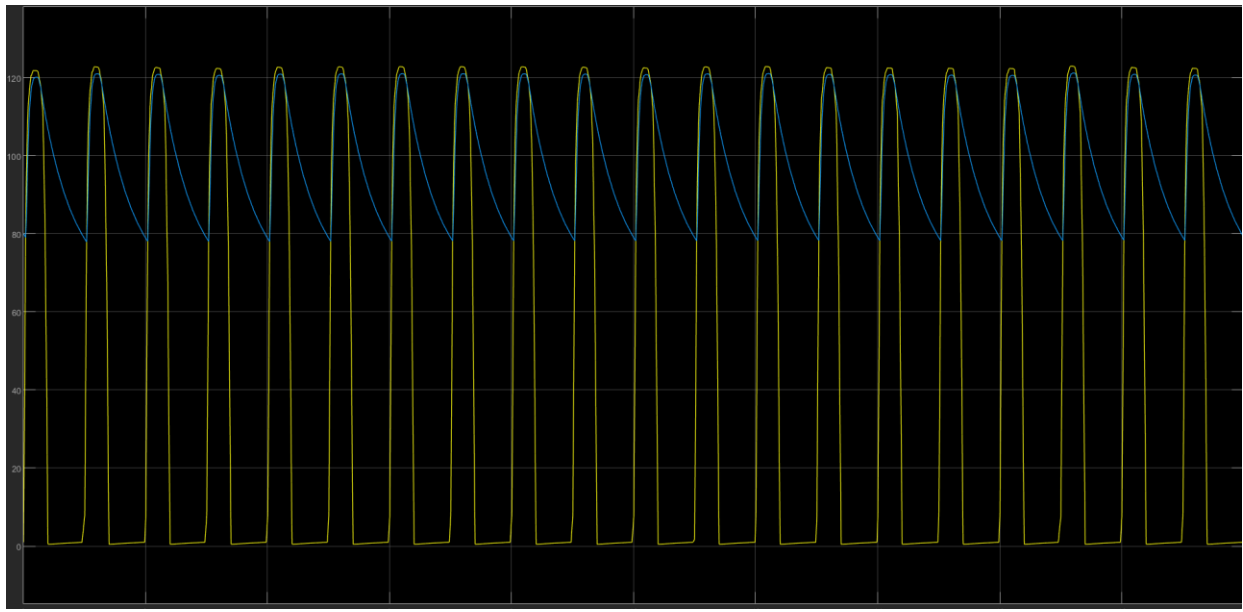
$$R = \frac{8\mu l}{\pi r^4}$$

,όπου αναδεικνύεται η αντίστροφη σχέση μεταξύ ακτίνας τοιχωμάτων και αντίστασης.

4.3 Προχωρημένη Εξάσκηση στο περιβάλλον SIMULINK

Ερώτηση 1:

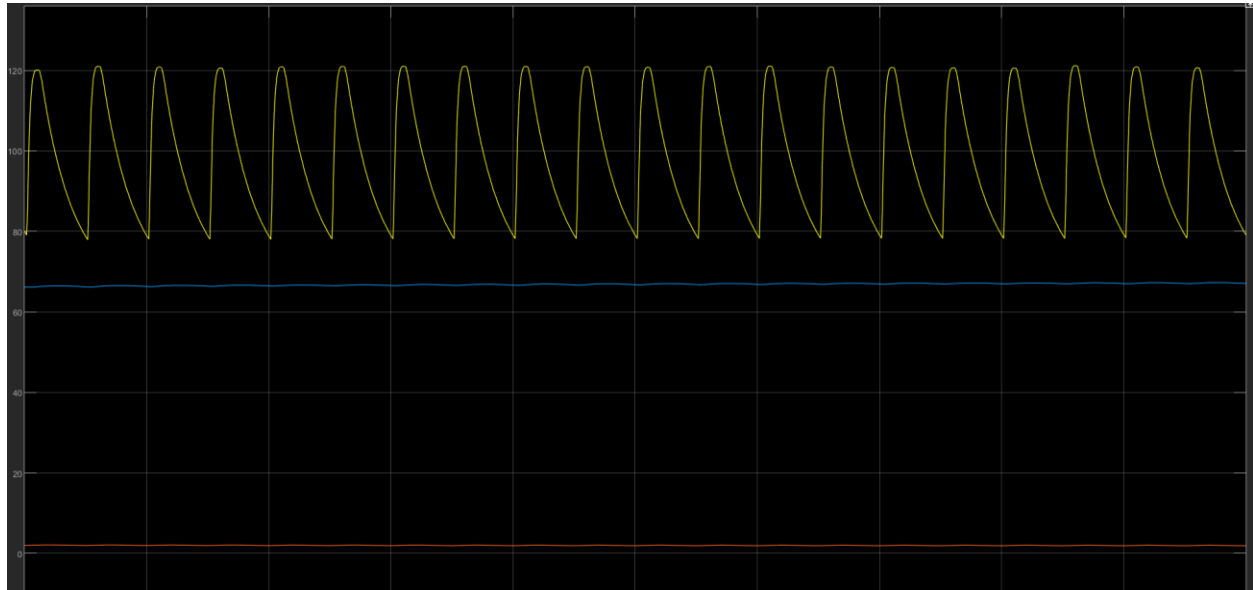
Αφού ακολουθήθηκαν τα βήματα του οδηγού, παρακάτω ακολουθεί το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Με κίτρινο απεικονίζεται η πίεση της αριστερής κοιλίας (P3) ενώ με μπλε η πίεση στην αορτή, πρώτου το αίμα μοιραστεί στα επιμέρους όργανα του σώματος.



Παρατηρούμε ότι ενώ οι μέγιστες τιμές των 2 πιέσεων είναι πρακτικά ίσες, η πίεση στην αριστερή καρδιά λαμβάνει μηδενικές τιμές, πριν αυξηθεί εκ νέου. Η εν λόγω μείωση στην πίεση της αριστερής κοιλίας αντιστοιχεί στην διαστολή της στην οποία έχει ήδη «σταλεί» μέσω συστολής αίμα προς την αορτή, και έτσι η αορτική βαλβίδα κλείνει προσωρινά, μέχρις ότου εισέλθει στην κοιλία νέος όγκος οξυγονομένου αίματος από την πνευμονική φλέβα. Από την άλλη, η αορτική πίεση πρέπει να διατηρείται σε σχετικά υψηλές τιμές και να έχει μικρές διακυμάνσεις, ώστε να εξασφαλίζει την ομαλή ροή του αίματος προς τα επιμέρους υποσυστήματα του οργανισμού.

Ερώτηση 2:

Με παρόμοιο τρόπο με προηγουμένως, εξήχθησαν οι γραφικές παραστάσεις των πιέσεων P4,P7 και P9:



, όπου: P4 (κίτρινο) -> Αορτική πίεση

P7 (μπλε) -> Πίεση κορμού

P9 (κόκκινο) -> Πίεση κάτω κοίλης φλέβας (vena cava)

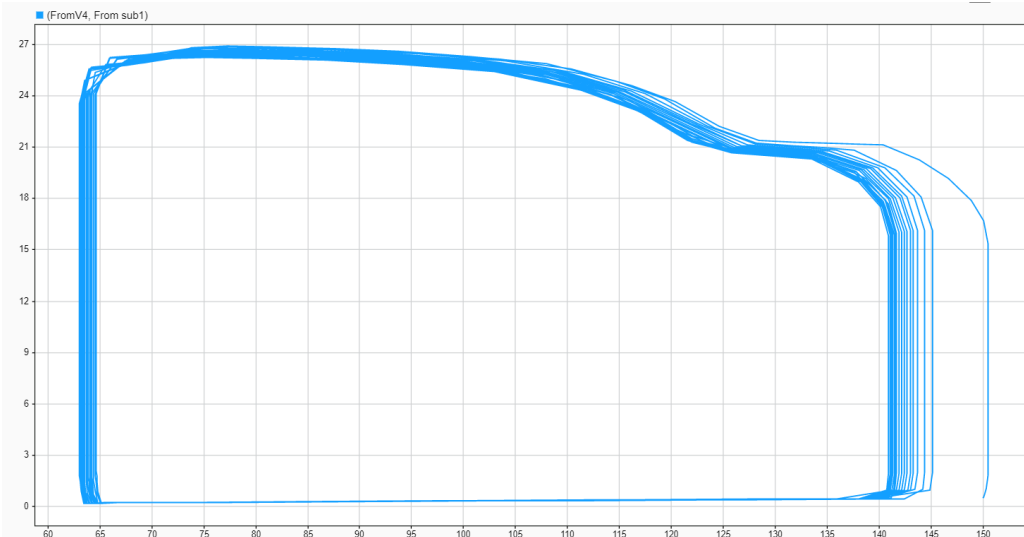
Παρατηρούμε ότι-όσον αφορά την μέγιστη τιμή-αυτή λαμβάνεται από την πίεση P4, λόγω του γεγονότος ότι η αορτή μεταβιβάζει το αίμα από την καρδιά στα υπόλοιπα όργανα και τους ιστούς του οργανισμού. Στην συνέχεια, ακολουθεί η πίεση κορμού P7, που βρίσκεται περίπου στο μέσο της αιματικής ροής. Τέλος, η πίεση στην κάτω κοίλη φλέβα είναι πρακτικά μηδενική, μιας και σε αυτό το σημείο το αίμα πρέπει να περάσει μονάχα προς τον δεξιό κόλπο και την δεξιά κοιλία μέσω της μονόδρομης ροής του αίματος από και προς την καρδιά κάτι που εξασφαλίζεται από τις βαλβίδες που αποτρέπουν την αντίστροφη πορεία της ροής του αίματος(υπενθυμίζεται ότι η μεταβίβαση προς τους πνεύμονες γίνεται μέσω συστολής της δεξιάς κοιλίας στην οποία θα παρατηρηθεί αυξημένη πίεση).

Όσον αφορά τις peak-to-peak τιμές των εν λόγω πιέσεων, μόνο η αορτική πίεση παρουσιάζει σχετικά μικρές διακυμάνσεις-ταλαντώσεις λόγω της άμεσης εξάρτησης της από την συστολή της αριστερής κοιλίας. Από την άλλη, στον κορμό και στην κάτω κοίλη φλέβα, παρατηρούνται

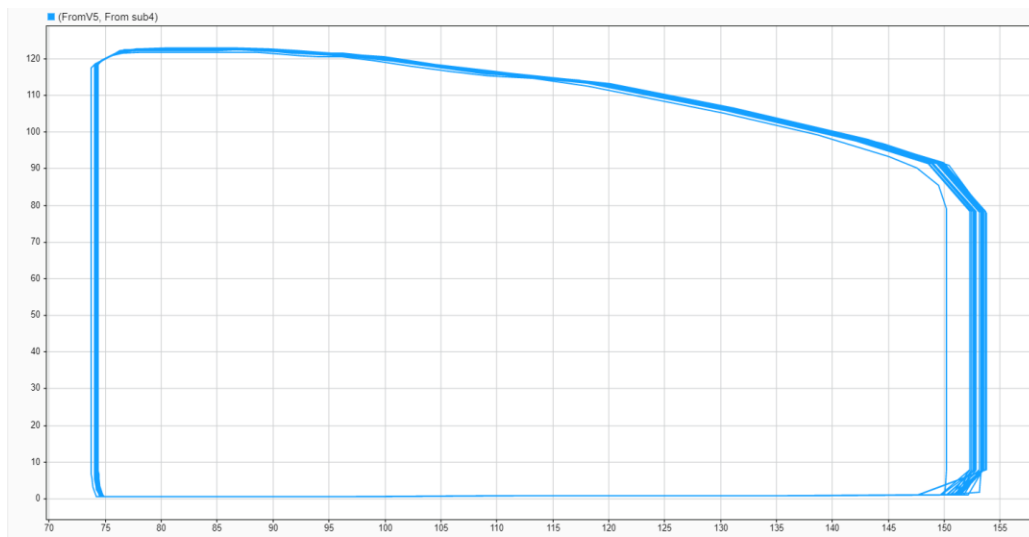
πρακτικά σταθερές τιμές πίεσης καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης, μιας και η αντίσταση που συναντούν κατά την μεταβίβαση του αίματος είναι αισθητά χαμηλότερη (σε σύγκριση με την αντίσταση που «βλέπει» η αορτή), με αποτέλεσμα την ανάγκη για μικρότερη και μη-μεταβαλλόμενη πίεση ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ροή αίματος.

Ερώτηση 3:

Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα όγκου-πίεσης πρώτα για την δεξιά κοιλία και μετά για την αριστερή κοιλία:



Διάγραμμα όγκου-πίεσης για την δεξιά κοιλία



Διάγραμμα όγκου-πίεσης για την αριστερή κοιλία

Όσον αφορά την αντιστοίχιση των επιμέρους τμημάτων της γραφικής παράστασης με την λειτουργία της καρδιάς, έχουμε

- **Κάτω οριζόντια ευθεία:** Παρατηρείται αύξηση όγκου και πρακτικά μηδενική πίεση, γεγονός που αντιστοιχεί στην φάση όπου αίμα πλούσιο σε διοξείδιο του άνθρακα εισέρχεται στην δεξιά καρδιά
- **Δεξιά κάθετη ευθεία:** Παρατηρείται σταθερά υψηλός όγκος και αύξηση της πίεσης, που αντιστοιχεί στην συστολή των κοιλιών για την εξώθηση του αίματος προς τους πνεύμονες (δεξιά κοιλία) και προς την αορτή (αριστερή κοιλία).
- **Πάνω οριζόντια ευθεία:** Παρατηρείται σταθερά υψηλή πίεση και διαρκής μείωση του όγκου που αντιστοιχεί στην «έξοδο» του αίματος από τις κοιλίες προς τους πνεύμονες (δεξιά κοιλία) και την αορτή (αριστερή κοιλία)
- **Αριστερή κάθετη ευθεία:** Παρατηρείται σταθερά χαμηλός όγκος και μείωση της πίεσης, που αντιστοιχεί στην διαστολή των κοιλιών πρωτού δεχθούν νέο αίμα

Ερώτηση 4:

Για καθεμία από τις 2 γραφικές παίρνουμε τις εξής τιμές εμβαδών-θεωρώντας τα σχήματα ορθογώνια παραλληλόγραμμα- που αντιστοιχούν στα ζητούμενα κοιλιακά έργα:

- Για την δεξιά κοιλία: $E_{\delta} \sim 27 * 142 = 3834 a. u.$
- Για την αριστερή κοιλία: $E_{\alpha} \sim 120 * 142 = 17040 a. u$

Έτσι, προκύπτει λόγος εμβαδών ίσος με $\lambda = \frac{E_{\alpha}}{E_{\delta}} \approx 4.4$, αποτέλεσμα εύλογο, αν αναλογισθούμε ότι η αριστερή κοιλία καλείται να μεταβιβάσει αίμα προς όλο το σώμα, ενώ η δεξιά κοιλία μόνο προς τους πνεύμονες.

Ερώτηση 5:

3 πιθανοί λόγοι για τους οποίους ο άνωθι υπολογισμός του έργου των κοιλιών μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα είναι:

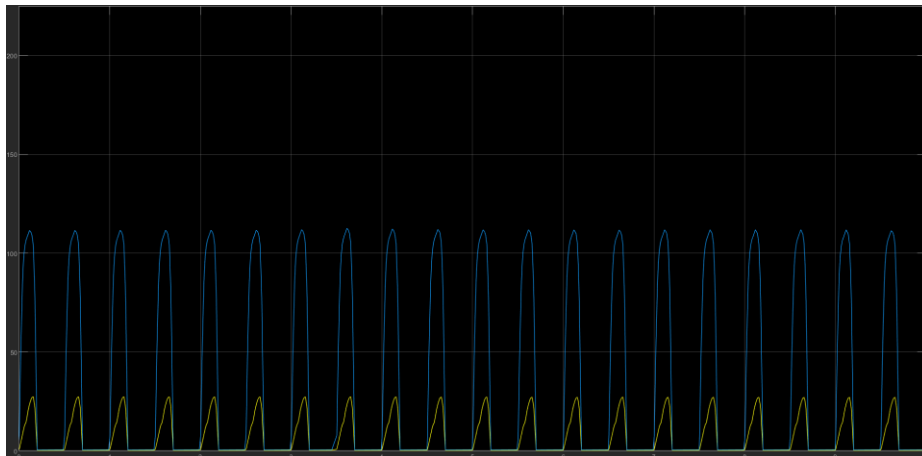
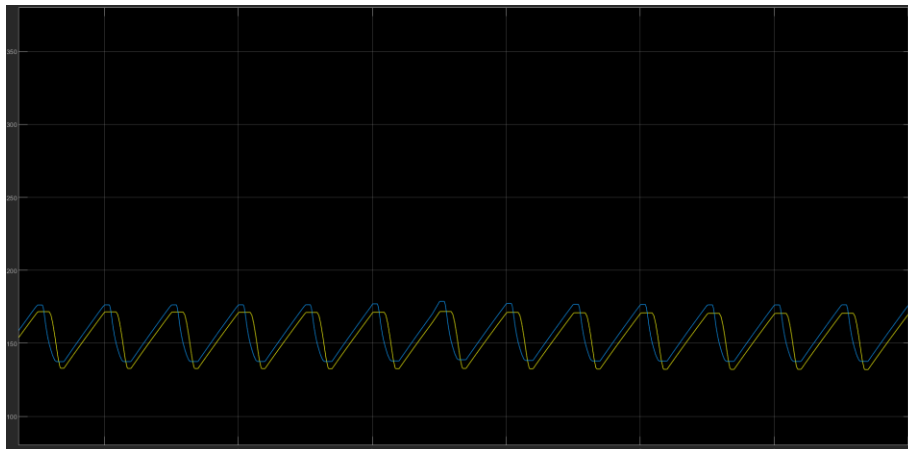
- Το γεγονός ότι οι γραφικές δεν αποτελούν ιδανικά παραλληλόγραμμα όπως θεωρήθηκαν στο ερώτημα 4, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια εγγενής απόκλιση από τις πραγματικές τιμές έργου για κάθε κοιλία.

- Η εξάρτηση μόνο από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, χωρίς την χρήση εξατομικευμένων δεδομένων.
- Τα όρια P-V σε κάθε επιμέρους γραφική που σχηματίζεται δεν μένουν σταθερά, με απόρροια την ανάγκη περαιτέρω επεξεργασίας των εμβαδών που προκύπτουν σε κάθε κύκλο λειτουργίας της καρδιάς (π.χ. λήψη μέσου όρου εμβαδών)

4.4 Προσομοίωση Φυσιολογικών Καταστάσεων

Ερώτηση 1:

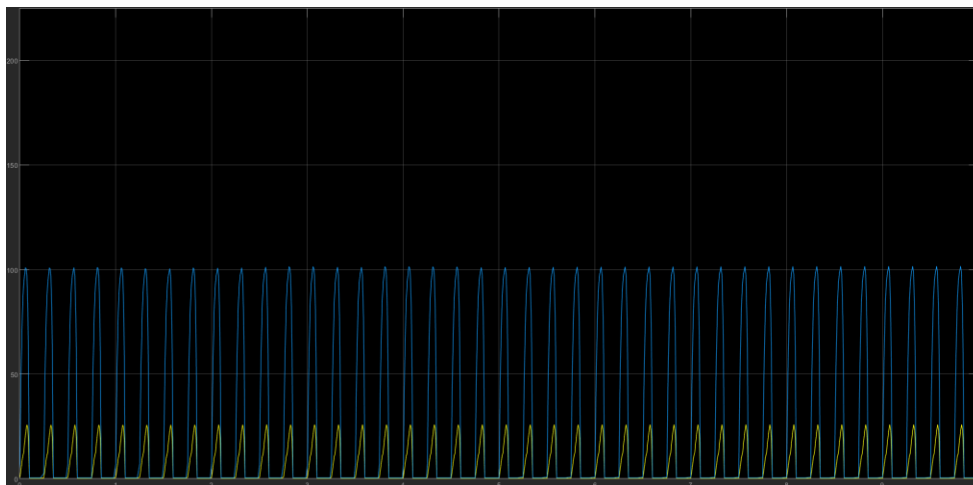
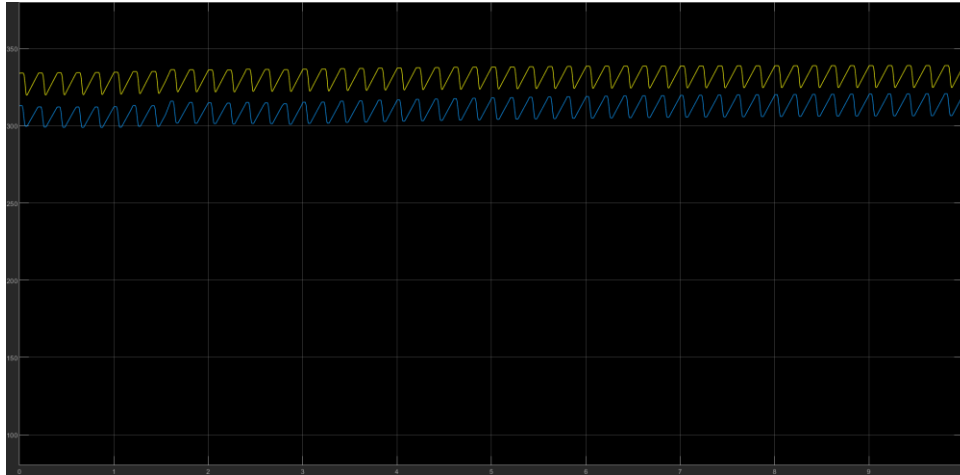
Διπλασιάσαμε τις τιμές καρδιακού ρυθμού στην δεξιά και την αριστερή κοιλία και λάβαμε τα κάτωθι αποτελέσματα όγκου και πίεσης αντίστοιχα:



Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυξημένης καρδιακής λειτουργίας αυξάνεται ο όγκος που παρέχεται στην καρδιά (με μετάβαση της peak τιμής από τα 150 στα 200 ml) ενώ μειώνεται η peak-to-peak τιμή (από $\Delta V = 150 - 70 = 80$ ml στα $\Delta V = 170 - 140 = 30$ ml) αφού οι κοιλίες δεν προλαβαίνουν να γεμίσουν με αίμα. Από την άλλη, η πίεση μένει σταθερή όσον αφορά την peak

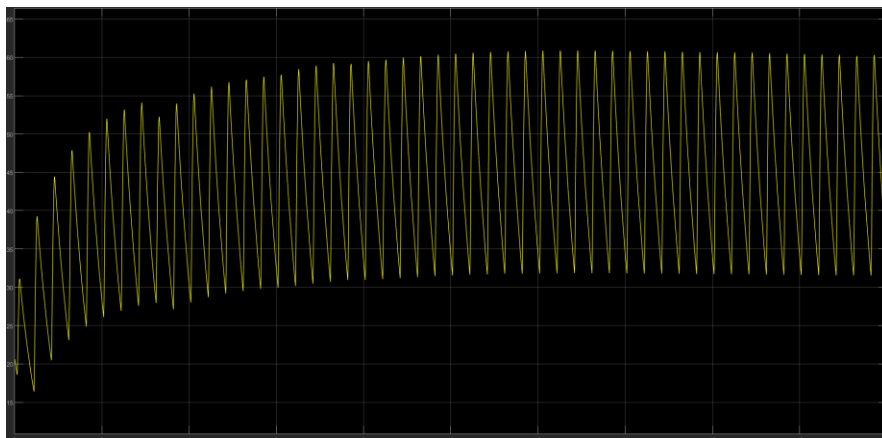
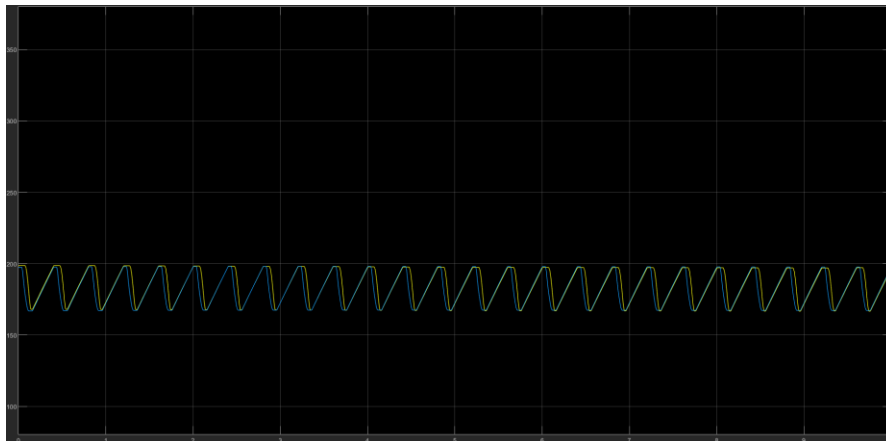
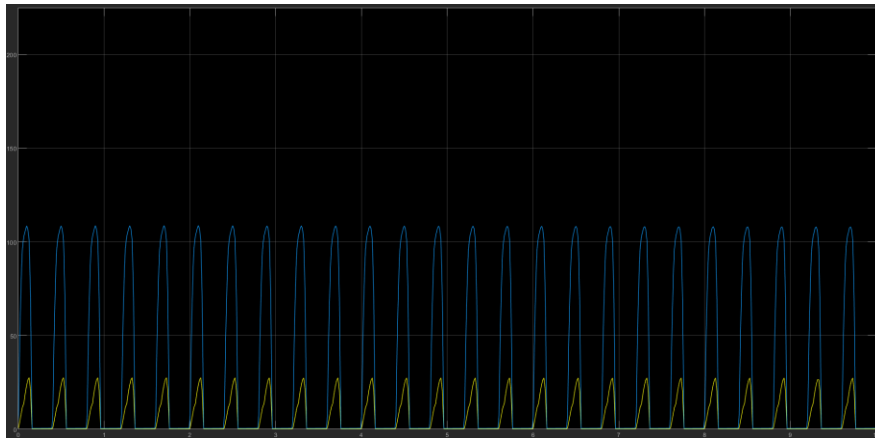
τιμή της, αλλά μειώνεται πολύ το διάστημα διατήρησής της (δηλαδή η περίοδος της κυματομορφής), αποτέλεσμα εύλογο λόγω της αυξημένης συχνότητας παροχής.

Στην συνέχεια, αποφασίστηκε η arbitrary αύξηση της καρδιακής παροχής, μειώνοντας την παράμετρο n από 0.5 στο 0.25 και στην συνέχεια στο 0.2. Όσον αφορά τον καρδιακό όγκο και στις 2 περιπτώσεις λάβαμε max όγκο στα 330 ml με την πίεση να πέφτει κάτω από τα 100rpm, όπως φαίνεται και στις κάτωθι εικόνες.

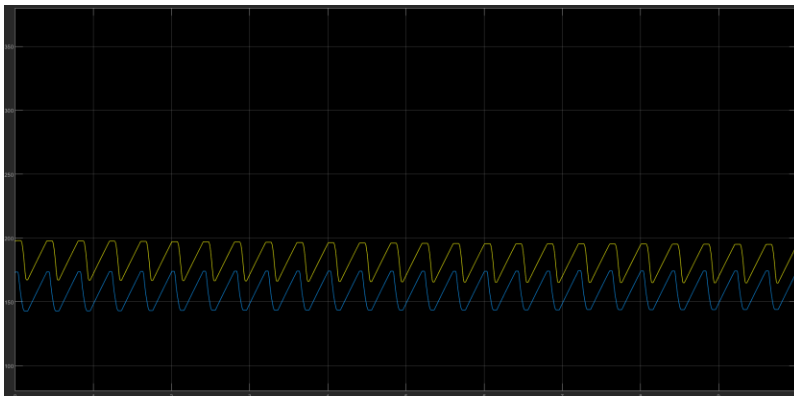
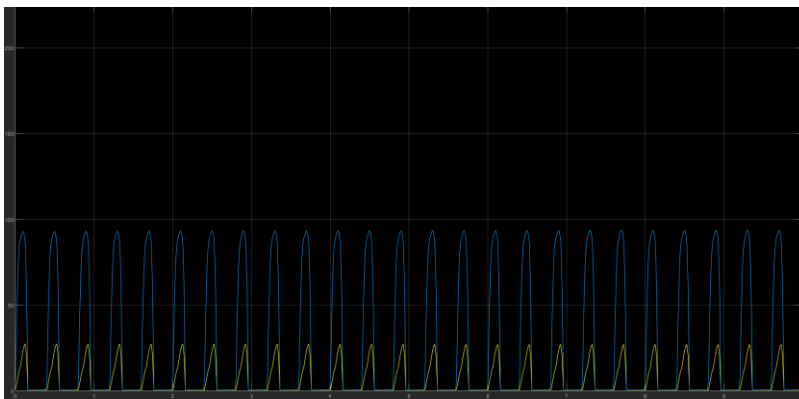
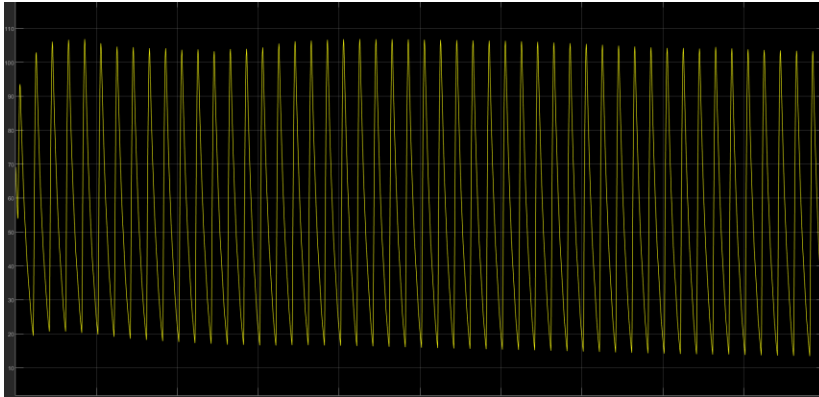


Ερώτηση 2:

Αρχικά, παρατίθενται αποτελέσματα πίεσης, όγκου και αιματικής ροής για $n=0.4$ (χωρίς μεταβολή της R_i)



Αύξηση της αιματικής ροής μπορεί να επέλθει μέσω μείωσης της αντίστασης του κορμού που αντιστοιχεί στην αντίσταση εισόδου R_i λόγω της σχέσης (1). Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μείωση αντίστασης $R_{truck} = R_i(7)$ μέχρι και την τιμή των 0.2Ω , με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να φαίνονται παρακάτω:

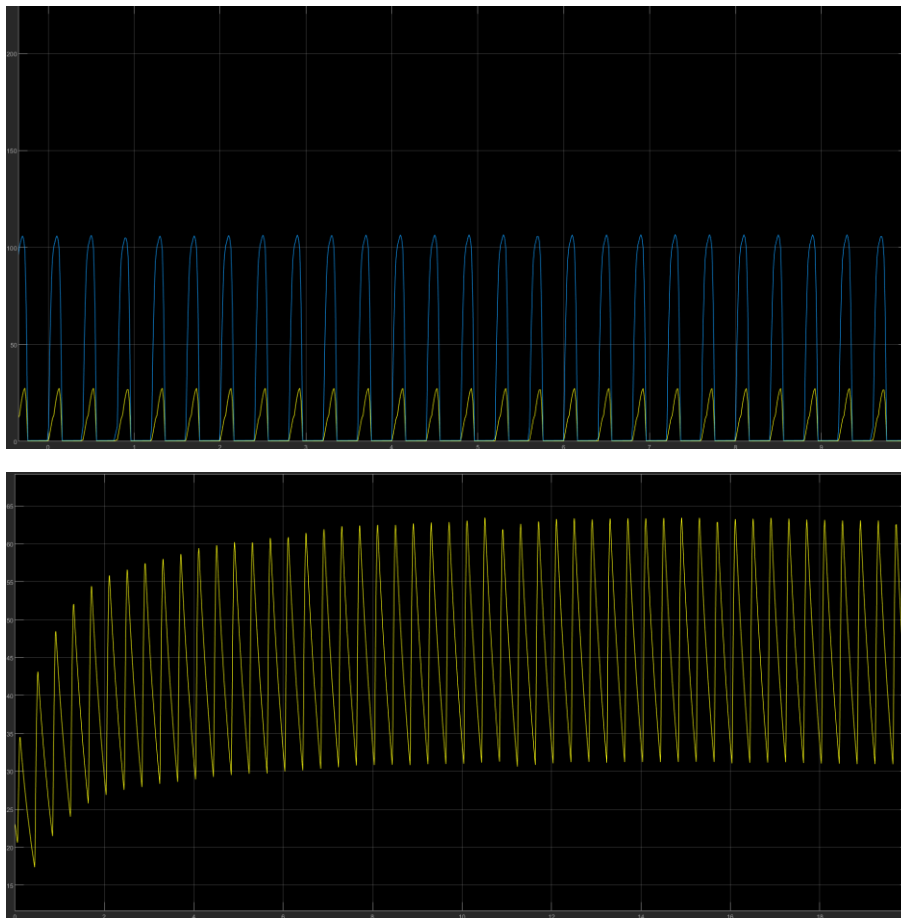


Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση μείωσης της αντίστασης κορμού αρχικά αυξάνεται η αιματική ροή από την μέγιστη τιμή των 60 rpm σε αυτή των 105 rpm. Ωστόσο, παρατηρούμε επίσης πως αποκλίνουν αισθητά οι τιμές όγκου στην αριστερή και την δεξιά καρδιά, κάτι που συνεπάγεται ότι δεν προλαβαίνουν οι κοιλίες στην αριστερή καρδιά να λάβουν τον πλήρη όγκο αίματος που εισέρχεται στην δεξιά καρδιά, πρώτου συσταλούν (λόγω της αυξημένης συχνότητας λειτουργίας). Τέλος, η peak τιμή της πίεσης μειώνεται κάτω από τα 100 mmHg για την αριστερή κοιλία.

Με βάση τα παραπάνω, η φυσική άσκηση αμέσως μετά το γεύμα δεν συνίσταται, καθώς θα οδηγήσει σε αυξημένες ανάγκες του στομάχου και των μυών σε αίμα, οδηγώντας σε πιθανή αύξηση της πίεσης πάνω από τα φυσιολογικά επίπεδα και κατ'επέκταση overload της αριστερής κοιλίας και της αορτής.

Ερώτηση 3:

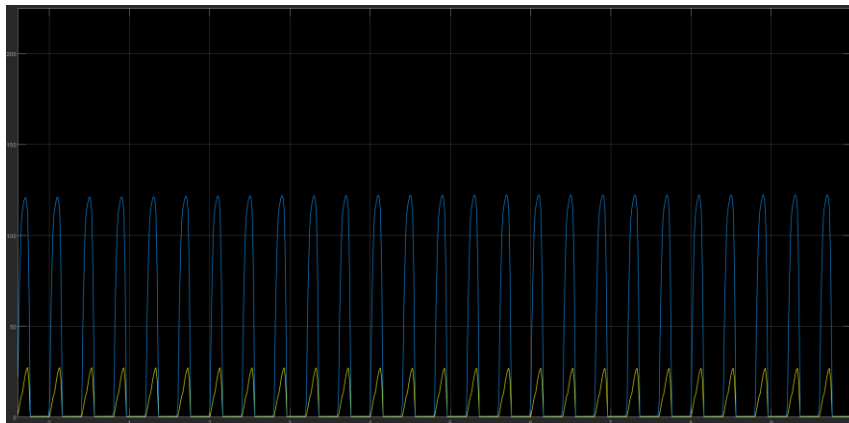
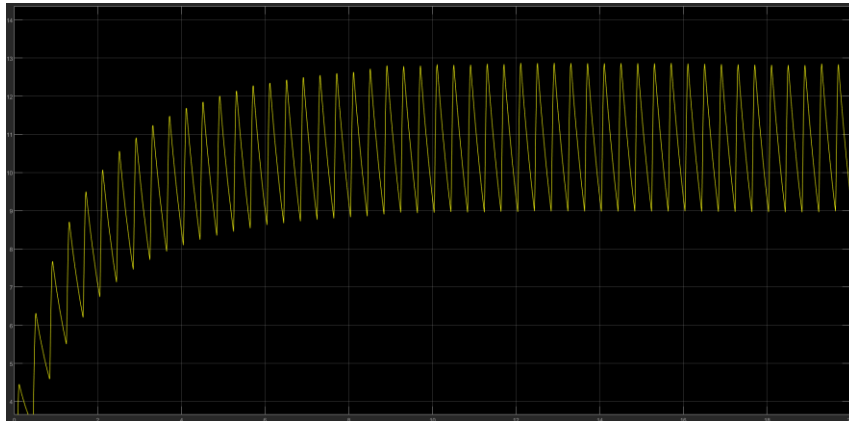
Εφόσον παρατηρήθηκε μείωση στην πίεση στο ερώτημα 2, καλούμαστε να αυξήσουμε εκ νέου την αντίσταση κορμού Ri7 ώστε να λάβουμε τιμή > 105 mmHg. Το εν λόγω αποτέλεσμα μπορεί να αποδοθεί για 0.6Ω , με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να αναγράφονται παρακάτω.



Παρατηρούμε ότι η αύξηση της αντίστασης επέφερε από την μία αύξηση της πίεσης στα επιθυμητά επίπεδα, αλλά από την άλλη μείωση της αιματικής ροής. Έτσι, παρατηρούμε ένα trade-off μεταξύ των 2 μεγεθών, όταν ο μόνος μεταβλητός παράγοντας είναι η αντίσταση Ri7, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να βρεθεί τιμή της αντίστασης που θα συνδυάζει υψηλές τιμές πίεσης και αιματικής ροής.

Ερώτηση 4:

Έπειτα από πειραματισμό με τις παραμέτρους των αντιστάσεων κορμού, κεφαλιού και άκρων οι ζητούμενες τιμές αρτηριακής πίεσης και αιματικής ροής προς τον εγκέφαλο φαίνονται παρακάτω έπειτα από προσομοίωση:



,ενώ ο πίνακας αντιστάσεων για την αναγραφόμενη προσομοίωση είναι ο εξής:

Αντίσταση	Τιμή πριν (Ω)	Τιμή μετά (Ω)
$R_{arms} = Ri5$	5.15	3
$R_{head} = Ri6$	2.58	5
$R_{trunk} = Ri7$	0.67	1
$R_{legs} = Ri8$	2.56	6

Ερώτηση 5:

Στην περίπτωση μετάβασης μας εκτός βαρυτικού πεδίου της γης, αναμένεται μείωση της πίεσης στο σώμα, εξαιτίας της μειωμένης βαρυτικής δύναμης που ασκείται στο σώμα (λόγω μείωσης του g). Αυτό φαίνεται από τον ορισμό της πίεσης, ως:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{mg'}{A}, \text{ με } g' < 9.8m/s^2$$

Αυτό θα οδηγήσει τον οργανισμό σε μείωση του μέσου όγκου που παρέχεται στους ιστούς ώστε να διατηρήσει σχετικά σταθερή αιματική ροή (λόγω της σχέσης (1)). Ως απόρροια, το αίμα θα στέλνεται με μειωμένη πίεση και σε μικρότερες ποσότητες, κάτι που θα μπορούσε να βλάψει ιδιαίτερα τα άκρα του οργανισμού. Έτσι, συνίσταται η τακτική άσκηση ώστε να μην ατροφήσουν οι μυς των άκρων.

Ερώτηση 6:

Ως ορθοστατική υπόταση ορίζεται η πάθηση που χαρακτηρίζεται από μείωση της αρτηριακής πίεσης, όταν το άτομο βρίσκεται σε όρθια στάση. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας ανεπαρκούς αιμάτωσης του εγκεφάλου. Συχνά συμπτώματα της πάθησης είναι η ζάλη και η λιποθυμία γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα επικίνδυνη για τραυματισμούς.

Ορισμένοι τρόποι αντιμετώπισης της ορθοστατικής υπότασης είναι:

- Χορήγηση φαρμάκων όπως η φθοριοκορτιζόνη
- Αποφυγή αφυδάτωσης & λογική αύξηση της λήψης άλατος (για αύξηση της αρτηριακής πίεσης)
- Χρήση βηματοδότη (σε περίπτωση δυσλειτουργίας του φλεβόκομβου)
- Χρήση ειδικών καλτσών συμπίεσης που βελτιώνουν την κυκλοφορία του αίματος στον οργανισμό.