

# מעבדה במכשור

## הנדסה ביורפואית

מגישים :

נדב אמיתי

יובל כסיף

סול אמארה

תאריך :

30.03.2022

תאריך :

17.11.2021

## תוכן עניינים:

1	מעבדה במכשור הנדסה ביורפואית	
4	1 תקציר	
5	2 ניסויים	
5	2.1 ניסוי 1 : הכרת המערכת, מדידת קבועי המערכת והפעלת המשאבה הרציפה	
5	2.1.1 היפותזה :	
5	2.1.2 מתודולוגיה :	
5	2.1.3 תוצאות :	
5	2.1.4 מסקנות :	
6	2.2 ניסוי 2 : חישוב התנגדות הצינורות	
6	2.2.1 היפותזה :	
6	2.2.2 מתודולוגיה :	
6	2.2.3 תוצאות :	
8	2.2.4 מסקנות :	
9	2.3 ניסוי 3 : הענות מיכל ההיענות	
9	2.3.1 היפותזה :	
9	2.3.2 מתודולוגיה :	
9	2.3.3 תוצאות :	
12	2.3.4 מסקנות :	
13	2.4 ניסוי 4 : הדמיית אירוע פיזיולוגי	
13	2.4.1 היפותזה :	
13	2.4.2 מתודולוגיה :	
13	2.4.3 תוצאות :	
14	2.4.4 מסקנות	

15	ניסוי 5 : אימות המודל לזרימה פועמת.....	2.5
15	היפותזה :	2.5.1
15	מתודולוגיה :	2.5.2
15	תוצאות :	2.5.3
18	מסקנות :	2.5.4
20	סימיולינק :	3
25	מסקנות כלליות.....	4
26	מקורות.....	5
27	נספחים.....	6

## **1 תקציר:**

בניסוי זה הכרנו את תכונות הזורם בשני סוגי זרימה שונים- רציפה ופועמת. בנוסף לכך, הכרנו את מודל Windkessel בעזרתו ניתן לייצר שקול חשמלי לזרימה פועמת ולבדוק את מאפייניה. חשיבות מעבדה זו היא בכך שהכרת ערכים כמו ספיקה, לחץ התנגדות והיענות חשובה לאפיון נכון של תכונות הזורם בגוף. דוגמה לכך היא במקרים של חסימת עורקים העלולה להוביל לקריעה של העורק בשל אי התאמה של כלי הדם ללחץ גבוה מידי. בעזרת הכישורים שלמדנו במעבדה זו נוכל לחשב ולמדל מערכות ביולוגיות ולצפות שינויים בזרימת הדם.

בניסוי הראשון הכרנו את מאפייני המערכת ומדדנו את הקוטר והאורך של הצינורות. בניסוי השני חישבנו את התנגדות הצינורות בשתי דרכים שונות. הראשונה על ידי הערכים שמדדנו בניסוי הראשון, והשנייה על ידי הספיקה והפרש הלחצים. בניסוי השלישי שינינו את מהירות המשאבה ומדדנו את הנפח של האוויר והמים ובעזרת התוצאות חישבנו את היענות המיכל ובדקנו את קיום חוק בویل. בניסוי הרביעי ביצענו הדמיה של אירוע פזיולוגי בו ישנה חסימה של אחד העורקים ובדקנו איך חסימה זו משפיעה על הלחץ בצינור. בניסוי החמישי מדדנו את הלחץ בשתי נקודות שונות בצינור וחישבנו בעזרתו את הנפח הסוף דיאסטולי.

## 2 ניסויים:

### 2.1 ניסוי 1: הכרת המערכת, מדידת קבועי המערכת והפעלת המשאבה הרציפה

#### 2.1.1 היפותזה:

במעבדה זו נבצע ניסויים באמצעות מערכת זרימה במחזור סגור המכילה משאבות (פועמת ורציפה), 2 צינורות, מדדי לחץ וספיקה, מאגר הזנה ומיכל ניקוז. בניסוי זה נכין את המערכת לניסויים הבאים על ידי בדיקת הצינורות (כלומר שאין סתימות), איפוס מדי הלחץ ומדידת מאפייני הצינור. זה ניסוי טכני בלבד ולכן לא ניתן לצפות תוצאות מדעיות כלשהן.

#### 2.1.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** משאבה רציפה, משאבה פועמת, 5 מדי לחץ, 2 מלחצים, 2 צינורות בקטרים שונים, תא היענות, מיכל איסוף, מאגר מים, דוגם אנלוגי לדיגיטלי ומחשב.

**מהלך הניסוי:** בניסוי זה הכרנו את חלקי המערכת ובדקנו את תקינותם. לאחר מכן מדדנו את אורכי הצינורות וקוטרם.

#### 2.1.3 תוצאות:

התוצאות שהתקבלו מהמדידות מוצגות בטבלאות הבאות:

טבלה א': מאפייני הצינורות		
קוטר [mm]	אורך [mm]	
10	930	צינור 2-4
8	1020	צינור 3-5

#### 2.1.4 מסקנות:

בניסוי זה הכרנו את מאפייני המערכת ומדדנו את הקוטר והאורך של הצינורות.

## 2.2 ניסוי 2: חישוב התנגדות הצינורות:

### 2.2.1 היפותזה:

נחשב את התנגדויות הצינורות בשני אופנים, בעזרת ספיקה ובעזרת מדדים פיזיים, נצפה כי ככל שקוטר הצינור גדול יותר ואורך הצינור קצר יותר, נקבל התנגדות נמוכה יותר בשני המקרים, שכן ככל שקוטר הצינור גדול יותר כך הספיקה גדולה יותר וכך ההתנגדות קטנה.

### 2.2.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** משאבה רציפה, משאבה פועמת, 5 מדי לחץ, 2 מלחצים, 2 צינורות בקטרים שונים, תא היענות, מיכל איסוף, מאגר מים, דוגם אנלוגי לדיגיטלי ומחשב.

**מהלך הניסוי:** ראשית, קיבלנו את נתוני המערכת: אורכי הצינורות, וקוטרם. איפסנו את מדי הלחץ, פתחנו את כלל הברזים והפעלנו את המשאבה הרציפה. לאחר מכן ביצענו 6 מדידות, כאשר בכל פעם שינינו את הרמה של המשאבה הרציפה, כשבכול פעם מדדנו את הזמן שלוקח למלא ליטר אחד במיכל האיסוף. תוך כדי המדידה דגמנו את הלחץ עם הדוגם.

### 2.2.3 תוצאות:

טבלה ב' – תוצאות המדידה בשני הצינורות		
מספר מדידה	עוצמת המשאבה (בסקלה שבין 0-10)	זמן למילוי ליטר נוזל [sec].
1	0	94.56
2	2	48.00
3	5	34.73
4	6	29.48
5	8	26.33
6	10	22.38

בטבלה ב' מוצגות תוצאות הניסוי עבור שני הצינורות יחד, כעת נרצה להבין מהי הספיקה בכל אחד מהצינורות בנפרד. כמו כן אנו יודעים כי הספיקה הכוללת הינה סכום הספיקות של כל צינור בנפרד, את  $Q_{tot}$  נחשב באופן הבא: (לדוג' עבור מדידה 1)

$$Q_{tot} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1}{94.56} \left[ \frac{L}{sec} \right] = 1.057 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{m^3}{sec} \right]$$

נניח כי המהירות בשני הצינורות שווה וקבועה בזמן, נסמנה  $v$ .

מ-KCL נוכל להגיד כי הספיקה הינה סכום הספיקות של כל צינור בנפרד. לכן:

$$(*) Q_{tot} = Q_{35} + Q_{24} = v \cdot A_{35} + v \cdot A_{24}$$

מכאן נוציא את יחס הספיקות (המהירות מצטמצמת) :

$$\frac{Q_{35}}{Q_{24}} = \frac{A_{35}}{A_{24}}$$

לכן נחלק את (\*) ב- $Q_{24}$  ונציב את היחס שקיבלנו :

$$\frac{Q_{tot}}{Q_{24}} = \frac{A_{35}}{A_{24}} + 1 \rightarrow Q_{24} = Q_{tot} \cdot \frac{1}{\frac{A_{35}}{A_{24}} + 1} ; \quad Q_{35} = Q_{tot} - Q_{24}$$

כעת יש בידנו את כל הנוסחאות לחישוב כל הנתונים, נציב במטלב ונקבל :

טבלה ג' – תוצאות המדידה בשני הצינורות בנפרד			
מספר מדידה	עוצמת המשאבה (בסקלה שבין 0-10)	$Q_{35} \left[ \frac{m^3}{sec} \right]$	$Q_{24} \left[ \frac{m^3}{sec} \right]$
1	0	$4.9 \cdot 10^{-6}$	$5.6 \cdot 10^{-6}$
2	2	$9.7 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$
3	5	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$
4	6	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-5}$
5	8	$1.8 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$
6	10	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$2.4 \cdot 10^{-5}$

תשובה לשאלה ב1' :

כעת ניגש לחישוב התנגדויות הצינור באמצעות הספיקה לפי הנוסחה  $R = \frac{\Delta P}{Q}$ .

טבלה ד' – התנגדויות הצינורות כתלות במספר המדידה		
מספר מדידה	$R_{24} \left[ \frac{mV \cdot sec}{m^3} \right]$	$R_{35} \left[ \frac{mV \cdot sec}{m^3} \right]$
1	310.1	726.9
2	157.4	369.0
3	113.9	266.9
4	$1.1 \cdot 10^3$	226.6
5	$1.9 \cdot 10^3$	877.1
6	$2.3 \cdot 10^3$	$1.9 \cdot 10^3$
ממוצע	980.23	727.75

#### תשובה לשאלה 1א':

בהתאם לזרימת פואסיי, נחשב את התנגדות הצינורות באמצעות הנוסחה:  $\bar{R} = \frac{8\mu L}{\pi R^4}$ .

$$[1] \mu = 0.89 [cP] = 8.9 \cdot 10^{-4} [Pa \cdot s]$$

עבור צינור 2-4 :

$$\bar{R} = \frac{8\mu L}{\pi R^4} = \frac{8 \cdot 8.9 \cdot 10^{-4} \cdot 930 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (5 \cdot 10^{-3})^4} = 33.7 \cdot 10^5 \left[ \frac{Pa \cdot s}{m^3} \right]$$

עבור צינור 3-5 :

$$\bar{R} = \frac{8\mu L}{\pi R^4} = \frac{8 \cdot 8.9 \cdot 10^{-4} \cdot 1020 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (4 \cdot 10^{-3})^4} = 90.3 \cdot 10^5 \left[ \frac{Pa \cdot s}{m^3} \right]$$

#### **2.2.4 מסקנות:**

בניסוי זה רצינו למדוד את התנגדות הצינורות באמצעות שתי דרכים, האחת באמצעות נוסחה הנוגעת למימדי הצינור, והשנייה הנוגעת לספיקה והפרש הלחצים. לצערנו במהלך הניסוי קיבלנו את הלחץ ביחידות של מיליוולט ולא היה לנו את הכלים להמיר אותם ליחידות של פסקל ובכך להשוות בין השיטות השונות. מעבר לכך נציין כי הגיוני שההתנגדות האמיתית קרובה יותר לערך ההתנגדות שיצא בעזרת ממדי הצינור מכיוון שיש פחות מקום לטעויות. נרצה להתייחס לעובדה שההתנגדות שחושבה בעזרת הספיקה לא יצאה קבועה (כמצופה). אנו משערים כי הנוסחה איתה חישבנו את התנגדות הצינור תקפה כאשר מתקיימים תנאים מסויים, לדוגמא זרימה תמידית בצינור ללא פיצולים. כתוצאה מכך היחס בין התנגדות, ספיקה והפרש לחצים משתנה, ואינו לינארי יותר, ולכן לא קיבלנו את אותה התנגדות לכל צינור כפי שהיינו מצפים בכל מדידה.



## 2.3 ניסוי 3: הענות מיכל ההיענות:

### 2.3.1 היפותזה:

בניסוי זה נמצא את מידת היענות של מיכל ההיענות על ידי מציאת נפח האוויר במיכל, את נפח האוויר נחשב ע"י נוסחה שפתחנו בדוח המכין בעזרת חוק בویل:

$$\frac{V_2 - V_1}{\frac{k}{V_2} - \frac{k}{V_1}} \quad or \quad \frac{\frac{k}{P_2} - \frac{k}{P_1}}{P_2 - P_1}$$

נצפה שקבוע ההיענות יצא בקרוב קבוע, שכן האוויר בקירוב גז אידיאלי והטמפרטורה בקירוב קבועה.

### 2.3.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** משאבה רציפה, משאבה פועמת, 5 מדי לחץ, 2 מלחצים, 2 צינורות בקטרים שונים, תא היענות, מיכל איסוף, מאגר מים, דוגם אנלוגי לדיגיטלי ומחשב.

**מהלך הניסוי:** בניסוי ביצענו 6 מדידות שונות, בהן מדדנו את נפח האוויר בתא ההיענות ואת הלחץ בו, את הלחץ בתא ההיענות מדדנו בעזרת הדוגם ואת הנפח חישבנו מתוך גובה המים. חזרנו על ניסוי זה עבור 6 מצבים שונים ע"י וויסות משתנה של הברזים.

### 2.3.3 תוצאות:

טבלה ה' – מדידות גבהי המים ורדיוסי המיכלים		
גובה במ"מ	מיכל	גליל פנימי
300	260	
31.5	25	

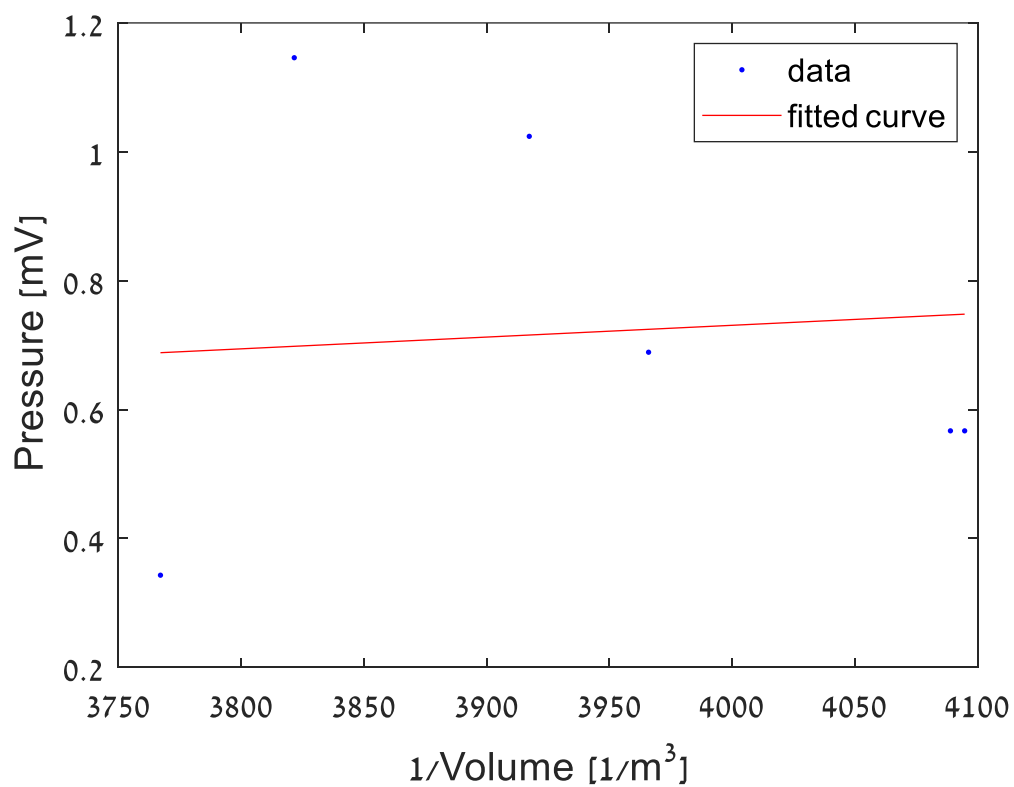
טבלה ו' – מדידת גובה המים אחרי פתיחת הברזים				
עוצמה	מספר מדידה	גובה המים לפני במ"מ	גובה המים אחרי במ"מ	
10	1	128.47	146.82	שניהם פתוחים
	2		156.4	אחד פתוח
8	3		141.28	שניהם פתוחים
	4		149.53	אחד סגור
	5		156.1	השני סגור
6	6		138	שניהם פתוחים

## תשובה לשאלה 2.א:

ביצענו מכפלה של סדרת PV וקיבלנו:

טבלה ז'- קבועי חוק בויל
קבוע חוק בויל
$\text{mV}/\text{m}^3$
0.00026
0.00014
0.0003
0.00017
0.00013
0.0001

בנוסף נוציא גרף המתאר התאמה לינארית של הערכים:



איור 1 - גרף המתאר ציות לחוק בויל כאשר השיפוע מראה את C

General model:

$$\text{val}(x) = a \cdot x$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.0001827 \quad (0.0001002, 0.0002652)$$

איור 2 - התאמה ליניארית של חוק בול

בגרף זה ניתן לראות את ההתאמה הליניארית בין הלחץ ולאחד חלקי הנפח. בנוסף באיור בו רואים את ההתאמה הליניארית ניתן לייצא את הנוסחה עבור חוק בול:

$$PV = 0.0002 \rightarrow C = 0.0002[mV \cdot m^3]$$

### תשובה לשאלה 2.ב:

בכדי לחשב את מידת ההיענות של מיכל ההיענות נשתמש בנוסחה מההיפותזה, אשר אותה פיתחנו בדוח המכין, נשתמש בנוסחה עם הנפח כי הלחץ ההתחלתי אינו נמדד:

$$\frac{V_2 - V_1}{\frac{k}{V_2} - \frac{k}{V_1}}$$

קל להבין כי הפרש הנפחים תלוי בהפרש הגבהים של המים (המינוס מגיע מהעובדה שמדברים על נפח האוויר ולא המים) ולכן:

$$\Delta V = -(H - h) \cdot \pi(R_{\text{container}}^2 - r_{\text{rod}}^2)$$

לאחר שימוש במטלב נקבל:

טבלה ח' – תוצאות חישוב ההיענות		
היענות הכלי $mV/m^3$	מספר מדידה	עוצמה
0.11	1	10
0.12	2	
0.10	3	8
0.11	4	
0.12	5	
0.10	6	6

ממוצע ההיענות הינו  $0.11mV/m^3$

#### **2.3.4 מסקנות:**

בניסוי זה ניסינו למדוד את ציות המיכל לחוק בויל אשר אומר כי מכפלת הלחץ כנגד הנפח הינה קבועה, זאת עשינו ע"י התאמה לינארית של הערכים ככה שהתאמה חייבת לעבור בראשית. המספר שקיבלנו עבור ההתאמה הלינארית אכן קרוב למספרים אותם קיבלנו בדרך החישובית, אך אין אנחנו יכולים לדעת את משמעות הדבר שכן יחידות התוצאה אינן מוכרות לנו ולא מצאנו דרך לבצע המרה בין מתח ללחץ. בעיה זו חזרה בשלב השני של הניסוי בו בדקנו את ערך היענות המיכל ולכן לא יכלנו לבצע שום הערכה לתוצאה.

## 2.4 ניסוי 4: הדמיית אירוע פיזיולוגי

### 2.4.1 היפותזה:

בניסוי זה נדמה אירוע פיזיולוגי של היצרות בכלי הדם ונבחן את השפעתו. כאשר תהיה היצרות בכלי הדם הקוטר יקטן ולכן נצפה שההתנגדות תעלה על פי הנוסחה:  $\bar{R} = \frac{8\mu L}{\pi R^4}$  וכתוצאה מכך ומהנוסחה:  $\bar{R} = \frac{\Delta P}{Q}$ , נצפה לעלייה בלחץ.

### 2.4.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** משאבה רציפה, משאבה פועמת, 5 מדי לחץ, 2 מלחצים, 2 צינורות בקטרים שונים, תא היענות, מיכל איסוף, מאגר מים, דוגם אנלוגי לדיגיטלי ומחשב.

**מהלך הניסוי:** הפעלנו את המשאבה הרציפה ומדדנו את הלחץ בתא ההיענות ובנקודות 3 ו 5 של הצינור. לאחר מכן סובבנו את המלחץ, קיבלנו היצרות בצינור ומדדנו שוב את הלחצים.

### 2.4.3 תוצאות:

התוצאות שהתקבלו מהמידות מוצגות בטבלה הבאה:

טבלה ט' – מדידות הלחץ לפני ואחרי החסימה		
מספר מד לחץ	לחץ לפני החסימה [mmHg]	לחץ אחרי החסימה [mmHg]
C	98.60	101.00
3	64.04	66.10
5	53.63	53.30

בטבלה זו ניתן לראות את תוצאות מדי הלחץ לפני ואחרי סיבוב המלחץ. ניתן לראות כי במד לחץ C (תא ההיענות) ובמד לחץ 3 ישנה עליה בלחץ לאחר הסיבוב ואילו במד לחץ 5 ישנה ירידה בלחץ.

נחשב את השינוי:

עבור מד לחץ C:  $2.4 [mmHg]$ , עבור מד לחץ 3:  $2.06 [mmHg]$ , עבור מד לחץ 5:  $-0.33 [mmHg]$ .

#### 2.4.4 מסקנות

##### תשובה לשאלה 3:

בניסוי זה בדקנו את השפעת ההיצרות על הלחץ בצינורות. קיבלנו כי במדי הלחץ שלפני החסימה ישנה עליה בלחץ הנובעת מההיצרות, כיוון שבקוטר נמוך יותר פחות נוזל יעבור, ולכן נוצר לחץ גבוה יותר בצינור. תוצאה זו מתיישבת עם הנוסחאות שראינו:  $\bar{R} = \frac{8\mu L}{\pi R^4} = \frac{\Delta P}{Q}$  כיוון שירידה ברדיוס מגדילה את ההתנגדות וכתוצאה מכך את הלחץ. לעומת זאת, עבור מד לחץ 5 קיבלנו ירידה בלחץ הנובעת מכך שפחות נוזל עובר בצינור ולכן הלחץ של הנוזל לאחר ההיצרות נמוך יותר. ניסוי זה מדמה חסימת כלי דם בגוף היכולה לנבוע ממחלות מסוימות כמו טרשת עורקים. כפי שראינו בניסוי זה, היצרות זו (או במקרים חמורים חסימה מלאה), מעלה את הלחץ בכלי הדם ומהווה סכנה לאדם מפני שזרימת הדם לאחר ההיצרות נמוכה יותר (יש פחות הזנה וחילוף חומרים באזורים אלו) ובנוסף ישנה סכנה של קריעת כלי הדם כתוצאה מהלחץ הגבוה באזור ההיצרות.

## 2.5 ניסוי 5: אימות המודל לזרימה פועמת

### 2.5.1 היפותזה:

בניסוי זה נדמה את פעילות הלב באמצעות המשאבה הפועמת ובאמצעות שינוי מאפייני המשאבה נמדוד את נפח הפעימה ונחשב את הנפח הסוף סיסטולי והסוף דיאסטולי מתוך ערכי הלחץ שנמדדו. נצפה לקבל שנפח הפעימה שחישבנו יהיה זהה לנפח הפעימה שמדדנו בניסוי. כמו כן, מתוך הנוסחה עבור נפח פעימה נצפה כי הנפח הסוף דיאסטולי יהיה גדול מנפח הפעימה.

### 2.5.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** משאבה רציפה, משאבה פועמת, 5 מדי לחץ, 2 מלחצים, 2 צינורות בקטרים שונים, תא היענות, מיכל איסוף, מאגר מים, דוגם אנלוגי לדיגיטלי ומחשב.

**מהלך הניסוי:** כיוונו את הזרימה לענף 3-5, הפעלנו את המשאבה הפועמת עבור מאפיינים שונים של תדר פעימה, יחס בין זמן הסיסטולה וזמן הדיאסטולה ונפח הפעימה ומדדנו את זמן המילוי של ליטר במיכל. לאחר מכן הפעלנו את הדוגם ושמרנו את הקבצים.

### 2.5.3 תוצאות:

התוצאות שהתקבלו מהמדידות מוצגות בטבלה הבאה:

טבלה י'-המדידות שביצענו בניסוי				
תדר הפעימות של הזרימה RPM	היחס בין משך הסיסטולה למשך הדיאסטולה	נפח פעימה	זמן מילוי ליטר במיכל [s]	
1	80	35/65	25	44.14
2	80	35/65	20	54.98
3	140	35/65	20	25.29
4	80	25/75	20	49.06
5	200	25/75	25	23.00

### תשובה לשאלה 4:

נחשב את נפח הפעימה מהמדידות:

$$\text{מדידה 1: בדקה אחת המיכל התמלא בקצב של } 1.359 \frac{[L]}{[min]} = \frac{1}{44.14} \frac{[L]}{[s]} \cdot 60 \frac{[s]}{[min]}$$

$$\text{כלומר עבור 80 פעימות בדקה נקבל: } 16.99 [ml] = \frac{1.359}{80} \cdot 1000$$

$$\text{מדידה 2: בדקה אחת המיכל התמלא בקצב של } 1.0913 \frac{[L]}{[min]} = \frac{1}{54.98} \frac{[L]}{[s]} \cdot 60 \frac{[s]}{[min]}$$

$$\frac{1.0913}{80} \cdot 1000 = 13.64 [ml] \text{ : כלומר עבור 80 פעימות בדקה נקבל :}$$

$$\frac{1}{25.29} \frac{[L]}{[s]} \cdot 60 \frac{[s]}{[min]} = 2.372 \frac{[L]}{[min]} \text{ של בדקה אחת המיכל התמלא בקצב של}$$

$$\frac{2.372}{140} \cdot 1000 = 16.95 [ml] \text{ : כלומר עבור 140 פעימות בדקה נקבל :}$$

$$\frac{1}{49.06} \frac{[L]}{[s]} \cdot 60 \frac{[s]}{[min]} = 1.2223 \frac{[L]}{[min]} \text{ של בדקה אחת המיכל התמלא בקצב של}$$

$$\frac{1.2223}{80} \cdot 1000 = 15.29 [ml] \text{ : כלומר עבור 80 פעימות בדקה נקבל :}$$

$$\frac{1}{23.00} \frac{[L]}{[s]} \cdot 60 \frac{[s]}{[min]} = 2.6087 \frac{[L]}{[min]} \text{ של בדקה אחת המיכל התמלא בקצב של}$$

$$\frac{2.6087}{200} \cdot 1000 = 13.04 [ml] \text{ : כלומר עבור 200 פעימות בדקה נקבל :}$$

נציג את הערכים :

טבלה כ'- נפח פעימה על פי מדידה וחישוב			
מספר מדידה	נפח פעימה- לפי מדידה [ml]	נפח פעימה- לפי חישוב [ml]	שגיאה יחסית
1	25	16.99	$\frac{25 - 16.99}{25} \cdot 100\% = 32.04\%$
2	20	13.64	$\frac{20 - 13.64}{20} \cdot 100\% = 31.8\%$
3	20	16.95	$\frac{20 - 16.95}{20} \cdot 100\% = 15.25\%$
4	20	15.29	$\frac{20 - 15.29}{20} \cdot 100\% = 23.55\%$
5	25	13.04	$\frac{25 - 13.04}{25} \cdot 100\% = 47\%$

מטבלה זו ניתן לראות כי אין התאמה בין הערכים וישנו פער משמעותי בין הערך שמדדנו בניסוי לבין הערך שחישבנו מהמדידות. נסיק כי שגיאה זו נובעת כתוצאה מכך שהסקלה של המדידה



בניסוי הייתה לא מדויקת והיה קושי להבחין בערכים הנכונים. כמו כן, הזמנים נמדדו בעזרת סטופר ולכן ישנו מקום רב לשגיאת אנוש.

#### תשובה לשאלה ב'4:

מתוך הערכים ששמרנו, נבחר ערכי מינימום במדי הלחץ עבור כל אחת מהפעילות ונציג אותם בטבלה הבאה. כמו כן, נשים לב כי הניסוי בוצע עבור צינור 3-5, אך ישנם ערכים גם לצינור 2-4. מתוך הטבלה ניתן לראות כי הערכים בשני מדי הלחץ של צינור 2-4 כמעט זהים, הפרש של  $0.002 \text{ mV}$ . נסיק כי קיים הפרש קטן שאינו אפס כיוון שיש אוויר בתוך הצינור אך בשל ההפרש הקטן נסיק כי אין זרימה בצינור כמצופה.

נחשב את משך זמן הדיאסטולה באמצעות הנתונים שמדדנו באמצעות הנוסחה הבאה

$$\Delta t_{diastole} = \frac{60}{BPM} \cdot \frac{x_2}{x_1 + x_2} \cdot \frac{x_1}{x_2}$$

$$BPM = 80, \frac{x_1}{x_2} = \frac{35}{65} \rightarrow \Delta t_{diastole} = \frac{60}{80} \cdot \frac{65}{65 + 35} = 0.4875 \text{ sec}$$

$$BPM = 140, \frac{x_1}{x_2} = \frac{35}{65} \rightarrow \Delta t_{diastole} = \frac{60}{140} \cdot \frac{65}{65 + 35} = 0.2786 \text{ sec}$$

$$BPM = 80, \frac{x_1}{x_2} = \frac{25}{75} \rightarrow \Delta t_{diastole} = \frac{60}{80} \cdot \frac{75}{75 + 25} = 0.5625 \text{ sec}$$

$$BPM = 200, \frac{x_1}{x_2} = \frac{25}{75} \rightarrow \Delta t_{diastole} = \frac{60}{200} \cdot \frac{75}{75 + 25} = 0.225 \text{ sec}$$

כמו כן, נשתמש בהתנגדות שמצאנו בניסוי 2:  $727.75 \left[ \frac{\text{mV} \cdot \text{sec}}{\text{m}^3} \right]$

טבלה ל' - חישוב נפח סוף דיאסטולי			
מספר מדידה	$P_{min,3} [\text{mV}]$	$P_{min,5} [\text{mV}]$	$V_d = \frac{P_{min,3} - P_{min,5}}{R} \cdot \Delta t_{diastole}$
1	0.320	0.266	$V_d = \frac{0.320 - 0.266}{727.75} \cdot 0.4875$ $= 3.62 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3]$ $= 36.2 [\text{ml}]$
2	0.207	0.174	$V_d = \frac{0.207 - 0.174}{727.75} \cdot 0.4875 =$ $= 2.21 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3]$ $= 22.1 [\text{ml}]$
3	0.901	0.754	$V_d = \frac{0.901 - 0.754}{727.75} \cdot 0.2786 =$ $= 5.63 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3]$ $= 56.3 [\text{ml}]$

$V_d = \frac{0.238 - 0.215}{727.75} \cdot 0.5625 =$ $= 1.78 \cdot 10^{-5} [m^3]$ $= 17.8 [ml]$	0.238	0.215	4
$V_d = \frac{1.145 - 0.907}{727.75} \cdot 0.225 =$ $= 7.36 \cdot 10^{-5} [m^3]$ $= 73.6 [ml]$	1.145	0.907	5

#### תשובה לשאלה ג'4:

ראינו בדוח המכין שנפח פעימה שווה להפרש בין נפח סוף דיאסטולי (EDV) לנפח סוף סיסטולי (ESV):  $SV = EDV - ESV$ . בעזרת נוסחה זו נחשב את הנפח סוף סיסטולי.

טבלה מ'- חישוב נפח סוף סיסטולי			
מספר מדידה	נפח פעימה [mL]	נפח סוף דיאסטולי [mL]	$ESV = EDV - SV$ [ml]
1	16.99	36.2	19.21
2	13.64	22.1	8.46
3	16.95	56.3	39.35
4	15.29	17.8	2.51
5	13.04	73.6	60.56

#### 2.5.4 מסקנות:

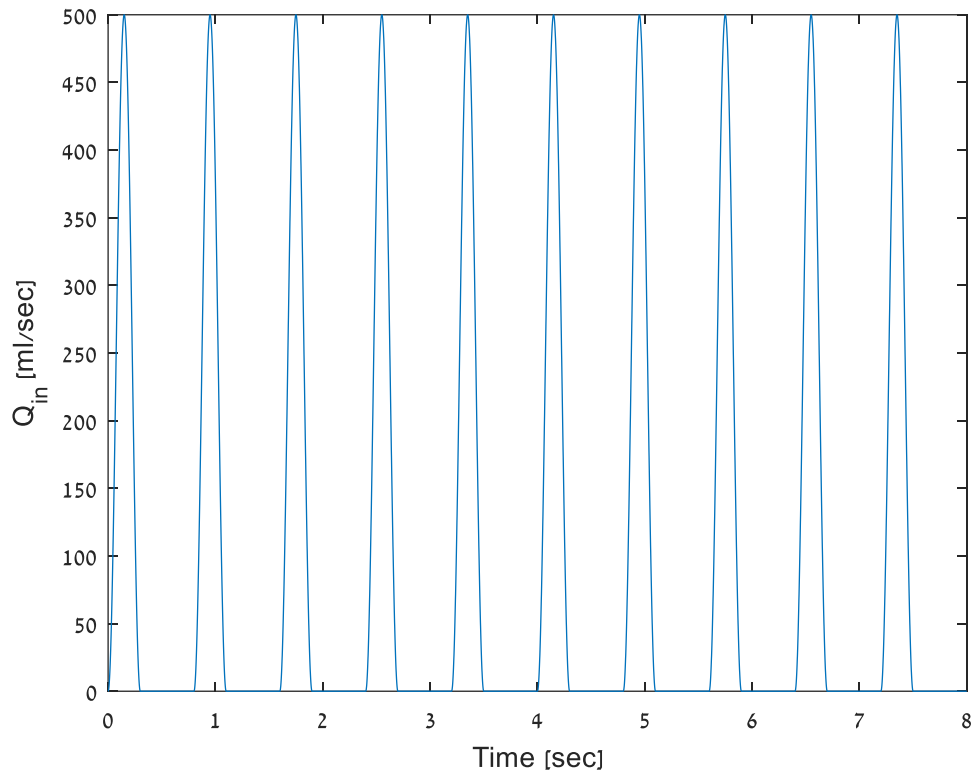
בניסוי זה עשינו הדמיה של פעולת הלב, וחישבנו את הנפח סוף דיאסטולי וסיסטולי. ראינו כמצופה שנפח הסוף דיאסטולי גדול מנפח פעימה ומנפח הסוף סיסטולי כיוון שזה הנפח המקסימלי שנמצא בחדרים. כמו כן, נפח פעימה הינו הנפח המוזרם מהלב אל חלקי הגוף והוא ההפרש בין הנפח המקסימלי למינימאלי כלומר בין דיאסטולי לסיסטולי. בעזרת הנחה זו יכלנו לחשב את הנפח הסוף סיסטולי.

מהשוואה בין מדידות 1,2 ביניהן שינינו רק את הנפח פעימה ניתן לראות כי בהתאם זמן מילוי לליטר גדל כמצופה. כמו כן, הנפח סוף סיסטולי ודיאסטולי ירדו כתוצאה ישירה מירידת הנפח פעימה.

מהשוואה בין מדידות 2,3 ביניהן שינינו רק את תדר הפעימות כלומר קצב הלב ניתן לראות כי נפח

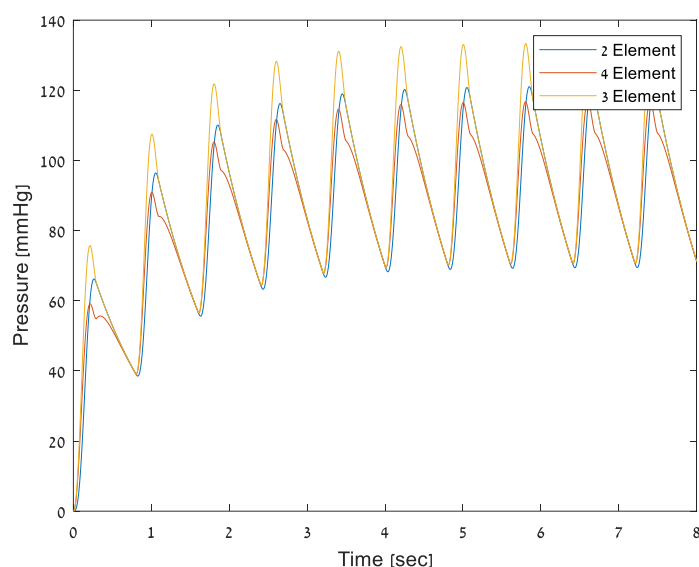
הפעימה, נפח סוף דיאסטולי, ונפח סוף סיסטולי עלו. כלומר היינו רוצים להסיק מכך כי כאשר קצב הלב גדל יותר דם מוזרם לחלקי הגוף פר זמן אך המדידות בוצעו כך שנפח הפעימה היה מוגדר כקבוע ביניהם וזה מצב שאיננו אפשרי באופן מעשי בגוף ולכן לא ניתן להסיק באופן חד משמעי מסקנה זו. עם זאת, ניתן לראות ממצב זה כי כמצופה זמן המילוי לליטר קטן כלומר גם כאשר נפח הפעימה קבוע ייקח פחות זמן למלא נפח מסוים כאשר קצב הפעימות גבוה יותר.

1. תחילה נציג את אות הכניסה שייצרנו כפי שהופיע במאמר המצורף:



איור 3- כניסה למערכת כנגד זמן

באיור (3) ניתן לראות את הכניסה שייצרנו במטלב אשר אותה נשלח למודל שייצרנו בסימוליןק. כמו כן הכניסה זהה לכניסה שהוצגה במאמר.



איור 43 - גרף לחץ כנגד זמן, כתלות בסוג המודל

באיור (4) ניתן לראות את עקומת הלחץ כנגד זמן של מודל הווינדקאסל עבור 2, 3 ו-4 רכיבים. עקומות הלחץ דומות מאוד הן בצורתן והן בערכים. כמו כן ערכי הנגדים והקבלים שהזנו הינם:

$$R = 1 ; C = 1 ; r = 0.05 ; L = 0.005$$

נזכיר כי זה הלחץ כאשר הכניסה הינה הכניסה המוצגת באיור משאלה 1.

3. יצרנו בסימולציה מודל של 3 ו-4 רכיבים, כאשר בכל פעם הכנסנו סט שונה של נגדים, קבלים וסלילים כפי שמתואר במאמר המצורף. לאחר מכן בחנו מהו ערך ה- $rms$  של ההפרש בין האות שהתקבל לבין האות של מודל הווינדקאסל מסדר 2, כאשר ערך הקבל והנגד הינם 3 אוהם ופאראד בהתאמה. נציג את הנתונים בטבלה:

טבלה נ' - שגיאות ה- $rms$ כתלות בבחירת פרמטרי הרכיבים			
מודל מסדר 4	ערכי הרכיבים	מודל מסדר 3	ערכי הרכיבים
39.6	$R = 1$ $C = 1$ $r = 0.05$ $L = 0.005$	39.8	$R = 1$ $C = 1$ $r = 0.05$
50.4	$R = 0.79$ $C = 1.22$ $r = 0.056$ $L = 0.0051$	48.5	$R = 0.79$ $C = 1.75$ $r = 0.033$
62.4	$R = 0.63$ $C = 2.53$	67.4	$R = 0.63$ $C = 5.16$

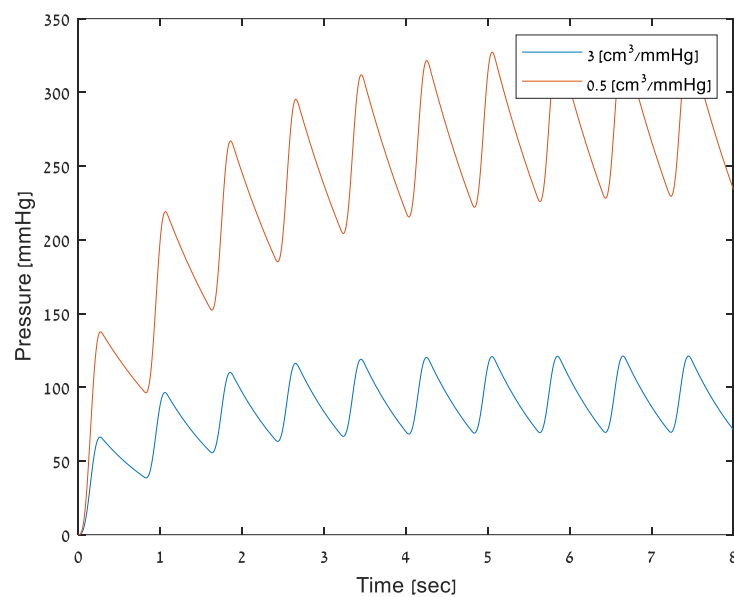
	$r = 0.045$ $L = 0.0054$		$r = 0.03$
--	-----------------------------	--	------------

כאשר היחידות הינן:

$$R \left[ \frac{\text{mmHg} \cdot \text{sec}}{\text{cm}^3} \right] ; \quad C \left[ \frac{\text{cm}^3}{\text{mmHg}} \right] ; \quad L \left[ \frac{\text{mmHg} \cdot \text{sec}^2}{\text{cm}^3} \right]$$

נשים לב מהטבלה לעיל כי סט הערכים שממוזער את ה-rms הינו סט 1.

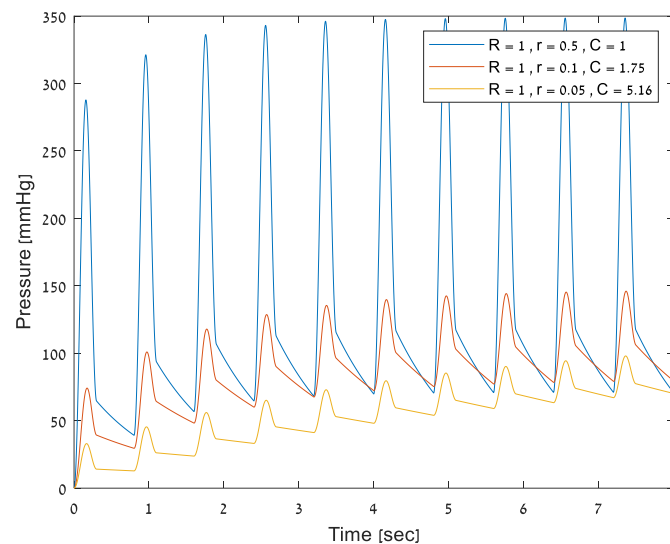
.4



איור 54 - לחץ כנגד זמן עבור ערכי קבל של 0.5 ו-3

באיור (5) ניתן לראות כי כאשר אנו מורידים את ערכי הקיבול אנו מקבלים אמפליטודה גדולה יותר, הן בתנודתיות והן בגובה האות. נזכור כי  $C = \frac{\Delta V}{\Delta P}$  ולכן, כאשר הקיבול קטן יותר, הפרש הלחצים גדול יותר. בנוסף, קבל מראה על תכונת האלסטיות, וכאשר אנו מורידים את רמת האלסטיות, מקבלים כלי דם קשיח יותר כך ש  $\Delta V$  יורד גם כן.

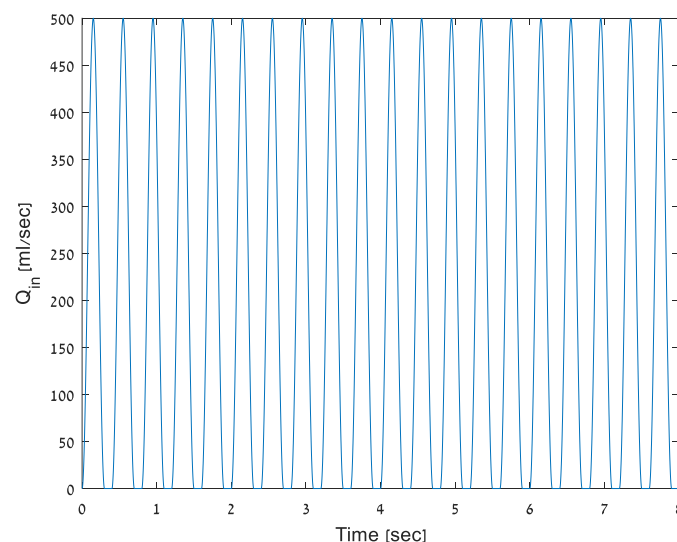
5. הסתיידות העורקים הינה תופעה בה מצטברים מולקולות שונות על פני העורקים, כך שהדבר גורם להקטנת נפח העורק (הקטנת הקוטר) והקטנת האלסטיות. כמו כן אנו יודעים כי התנגדות הינה ביחס הפוך לקוטר הצינור, ולכן בשביל המידול נרצה להגדיל את התנגדות של  $r$  המייצגת את זרימת הדם בעורק. בנוסף מכיוון שהעורק נעשה קשיח יותר, נרצה להקטין את הקיבול. נציג את התוצאות בסימולציות:



איור 65 - לחץ כנגד זמן כתלות בפרמטרי הרכיבים

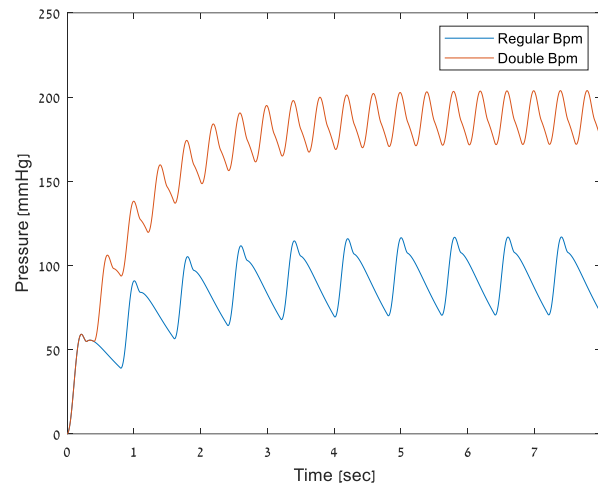
ניתן לראות באיור (6) כי אכן ככל שמקטינים את ההתנגדות ומגדילים את הקיבול, מקבלים כי הלחץ נשמר הן נמוך יותר והן יציב יותר. כמו כן, ניתן לראות בעקום הכחול (ערך התנגדות גדול ביותר וערך קיבול קטן ביותר) כי העורק נתון להפרש לחצים גדול, מה שמביא למצב בעייתי עקב החשש לסתימה מוחלטת בפגיעה בעורק.

6. בכדי למדל את הגברת קצב הלב, יש לדעתנו להגביר את תדירות הפולסים של הכניסה, שכן כל פולס של זרם מדמה פעימת לב אחת. נציג את הכניסה:



איור 76 - הכניסה החדשה, בעלת קצב פעימות כפול

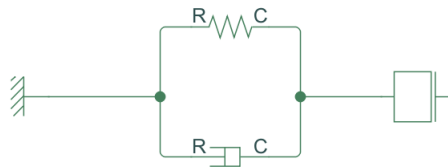
נציג את התוצאות עבור מודל מסדר 4, ונשווה בין שתי הכניסות השונות :



איור 87 - לחץ כנגד זמן עבור שתי הכניסות השונות.

באיור (8) ניתן לראות כי כאשר העלנו את קצב פעימות הלב פי 2, קיבלנו כי הלחץ בעורק מתייצב על ערך לחץ גבוה יותר, ובעל הפרש לחצים נמוך יותר. הלחץ גדול מכיוון שזורם יותר דם בתוך זמן קצר יותר, אך לעומת זאת הפרש הלחצים קטן יותר מכיוון שכלי הדם לא מספיק לעבור הרפיה מלאה עד שנכנס שוב דם לעורק, ולכן הלחץ לא מספיק לרדת כמו שהוא יורד בקצב פעימות רגיל.

7. נציג את המודל שבנינו בסימולינך :



איור 89 - מודל מכאני לאבי העורקים

בחרנו להשתמש בקפיץ, משכך ומסה. כמו כן, הקפיץ מייצג את האלסטיות של אבי העורקים. בנוסף המשכך מתאר את איבוד האנרגיה בעת זרימת הדם בעורק, למשל בעת הסתיידות עורקים נגדיל את ערך המשכך. בנוסף נמדל את היענות אבי העורקים למסה (המקבילה לקבל).



במעבדה זה הכרנו את תכונות זרימת נוזלים בדגש על הקבלה לדם ולפתולוגיות שונות. ראינו כיצד ניתן לבצע מודל של מערכת פיזיולוגית בעזרת מודל וינדקסל. בנוסף למדנו לחשב את ההתנגדות של הצינורות (כלי הדם), מידת ההתאמה שלהם לעמידה בשינוי לחצים ונפחים שונים ובדקנו את קיומו של חוק בویل. כמו כן, ראינו כי בפתולוגיות הגורמות להצרת כלי הדם ישנה עליה בלחץ באזור החסימה העלולה להוביל מחוסר התאמת כלי הדם לקריעה של העורק. ראינו כי באזור שלאחר החסימה הלחץ יורד ולכן פחות דם עובר וישנה פגיעה באספקת הדם וחילוף החומרים בחלקי הגוף השונים. בנוסף לכך, בדקנו את השפעת שינוי מאפייני פעימות הלב על אספקת הדם אל הגוף. ראינו כי כאשר נפח הפעימה גדל יותר נוזל מוזרם ולכן הזמן מילוי לליטר קטן וכאשר קצב הפעימות גדל אך הנפח נשאר קבוע זמן המילוי לליטר קטן מצב המדמה את פעולת הלב בזמני מאמץ בהם יש צורך באספקת דם מהירה יותר ולכן יש העלאה בקצב הלב ובנוסף לכך העלאה בלחץ הדם (ראינו בעזרת מודל הסימיולינק).

- [1] A. Ghazouani and J. M'halla, "Simple computing of the viscosity of water-dioxane mixtures, according to a fluctuating SPC/E-I<sub>h</sub> interstitial model," *J. Comput. Chem.*, vol. 38, no. 22, pp. 1952–1965, Aug. 2017, doi: 10.1002/jcc.24841.

```

%% Exp2
Data0 = readtable('Exp1Lv10');
Data2 = readtable('Exp1Lv12');
Data5 = readtable('Exp1Lv15');
Data6 = readtable('Exp1Lv16');
Data8 = readtable('Exp1Lv18');
Data10 = readtable('Exp1Lv110');
Delta0_P35 = [Data0.RightBranchFirst_close_-
Data0.RightBranchSecond_close_];
Delta0_P24 = [Data0.LeftBranchFirst_far_-
Data0.LeftBranchSecond_far_];
Delta2_P35 = [Data2.RightBranchFirst_close_-
Data2.RightBranchSecond_close_];
Delta2_P24 = [Data2.LeftBranchFirst_far_-
Data2.LeftBranchSecond_far_];
Delta5_P35 = [Data5.RightBranchFirst_close_-
Data5.RightBranchSecond_close_];
Delta5_P24 = [Data5.LeftBranchFirst_far_-
Data5.LeftBranchSecond_far_];
Delta6_P35 = [Data6.RightBranchFirst_close_-
Data6.RightBranchSecond_close_];
Delta6_P24 = [Data6.LeftBranchFirst_far_-
Data6.LeftBranchSecond_far_];
Delta8_P35 = [Data8.RightBranchFirst_close_-
Data8.RightBranchSecond_close_];
Delta8_P24 = [Data8.LeftBranchFirst_far_-
Data8.LeftBranchSecond_far_];
Delta10_P35 = [Data10.RightBranchFirst_close_-
Data10.RightBranchSecond_close_];
Delta10_P24 = [Data10.LeftBranchFirst_far_-
Data10.LeftBranchSecond_far_];

A24 = pi*(5e-3)^2;
A35 = pi*(4e-3)^2;
Qtot = [94.56 48.00 34.73 29.48 26.33 22.38];
Qtot = 1e-3./Qtot; % m^3/sec
Q24 = Qtot/(A35/A24 + 1);
Q35 = Qtot - Q24;
R024 = Delta0_P24(1) / Q24(1);
R035 = Delta0_P35(1) / Q35(1);
R224 = Delta2_P24(1) / Q24(2);
R235 = Delta2_P35(1) / Q35(2);
R524 = Delta5_P24(1) / Q24(3);
R535 = Delta5_P35(1) / Q35(3);
R624 = Delta6_P24(1) / Q24(4);
R635 = Delta6_P35(1) / Q35(4);
R824 = Delta8_P24(1) / Q24(5);
R835 = Delta8_P35(1) / Q35(5);
R1024 = Delta10_P24(1) / Q24(6);
R1035 = Delta10_P35(1) / Q35(6);
R24 = [R024 R224 R524 R624 R824 R1024];
R35 = [R035 R235 R535 R635 R835 R1035];

```

```

%% Simulink Q1
Ts = 0.3; T = 0.8;
I0 = 500;
Time = 0 : 0.001 : T;
Cur_Fnc = I0*(sin(pi*Time/Ts)).^2;
Current = zeros(1,length(Time));
Current(Time*1000 >= 0 & Time*1000 <= Ts*1000) =
Cur_Fnc(Time*1000 >= 0 & Time*1000 <= Ts*1000);
Current =
[Current';Current(2:end)';Current(2:end)';Current(2:end)'];...
    Current(2:end)';Current(2:end)';Current(2:end)';...
    Current(2:end)';Current(2:end)';Current(2:end)'];
Time = 0 : 0.001 : 10*T;
Var.time = Time';
Var.signals.values = Current;
plot(Time,Current);
xlabel 'Time [sec]'; ylabel 'Q_{in} [ml/sec]'

%% Q2
R2 = 1; R3 = 1; R4 = 1;
C2 = 1; C3 = 1; C4 = 1;
r3 = 0.05; r4 = 0.05;
L4 = 0.005;
OutputQ2 = sim('Exp2_Simulink.slx',Time);
figure
subplot(311)
plot(OutputQ2.simout2);
xlabel 'Time [sec]'; ylabel 'Pressure [mmHg]'; title '2
Elements';
subplot(312);
plot(OutputQ2.simout1);
xlabel 'Time [sec]'; ylabel 'Pressure [mmHg]'; title '4
Elements';
subplot(313)
plot(OutputQ2.simout3);
xlabel 'Time [sec]'; ylabel 'Pressure [mmHg]'; title '3
Elements';
figure; plot(OutputQ2.simout2); hold on ;
plot(OutputQ2.simout1); plot(OutputQ2.simout3);
legend('2 Element','4 Element','3 Element')
xlabel 'Time [sec]'; ylabel 'Pressure [mmHg]';

%% Q3
R2 = 3; C2 = 3;
OutputQ3 = sim('Exp2_Simulink.slx',Time);
Pres3 =
[OutputQ2.simout3.Data,OutputQ2.simout.Data,OutputQ2.simout4.D
ata];
Pres4 =
[OutputQ2.simout1.Data,OutputQ2.simout5.Data,OutputQ2.simout6.
Data];
Best_Sim3 = zeros(3,1);
Best_Sim4 = zeros(3,1);
for i = 1:3
    Best_Sim3(i) = rms(OutputQ3.simout2.Data - Pres3(:,i));
    Best_Sim4(i) = rms(OutputQ3.simout2.Data - Pres4(:,i));

```

```

end

%% Q4
figure
plot(OutputQ2.simout2)
hold on
plot(OutputQ2.simout7)
legend('3 [cm^3/mmHg]', '0.5 [cm^3/mmHg]');
xlabel 'Time [sec]'; ylabel 'Pressure [mmHg]';

%% Q5
R3 = 1; C3 = 1; r3 = 0.5;
OutputQ5a = sim('Exp2_Simulink.slx', Time);
R3 = 1; C3 = 1.75; r3 = 0.1;
OutputQ5b = sim('Exp2_Simulink.slx', Time);
R3 = 1; C3 = 5.16; r3 = 0.05;
OutputQ5c = sim('Exp2_Simulink.slx', Time);
figure
plot(OutputQ5a.simout3);
hold on ; plot(OutputQ5b.simout3); plot(OutputQ5c.simout3);
legend('R = 1 , r = 0.5 , C = 1', 'R = 1 , r = 0.1 , C = 1.75', 'R = 1 , r = 0.05 , C = 5.16')
xlabel 'Time [sec]'; ylabel 'Pressure [mmHg]';

%% Q6
Ts = 0.3; T = 0.8;
I0 = 500;
Time = 0 : 0.001 : T;
Cur_Fnc = I0*(sin(pi*Time/Ts)).^2;
Current = zeros(1, ceil(length(Time)/2));
Current(Time*1000 >= 0 & Time*1000 <= Ts*1000) =
Cur_Fnc(Time*1000 >= 0 & Time*1000 <= Ts*1000);
Current =
[Current'; Current(2:end)'; Current(2:end)'; Current(2:end)'];
Current =
[Current; Current(2:end); Current(2:end); Current(2:end)];
Time = 0 : 0.001 : 10*T;
figure
plot(Time, Current)
xlabel 'Time [sec]'; ylabel 'Q_{in} [ml/sec]';
Var.signals.values = Current;
OutputQ6 = sim('Exp2_Simulink.slx', Time);
plot(Time, OutputQ2.simout1.Data); hold on
plot(Time, OutputQ6.simout1.Data);
xlabel 'Time [sec]'; ylabel 'Pressure [mmHg]';
legend('Regular Bpm' , 'Double Bpm');

set(0, 'defaultAxesFontSize', 14);

%%
files = [{'Exp2Lv110_8Close_10Open'}...
        {'Exp2Lv110_2Open'}, ...
        {'Exp2Lv18_8Open_10Close'}, ...
        {'Exp2Lv18_8Close_10Open'}, ...
        {'Exp2Lv110_2Open'}, ...
        {'Exp2Lv16_2Open'}]];

```

```

Press = zeros(1,6);
for index = 1:6
table = readtable(files{index});
Press(index) = table.Main_Compliance(1) ;
end
H_cont = 300e-3; R_cont = 31.5e-3;
h_rod = 260e-3; r_rod = 25e-3;
V_cont = pi*R_cont^2*H_cont;
V_rod = pi*r_rod^2*h_rod;
A_water = pi*(R_cont^2-r_rod^2);

H_water_end = [146.82 , 156.4 , 141.28 , 149.53 , 156.1 ,
138]*1e-3;
H_total_cont = H_cont - H_water_end;
H_total_rod = h_rod - H_water_end;

V_rod_cont = A_water * H_total_rod;
V_end_cont = (H_total_cont-H_total_rod)*pi*R_cont^2;
V_total = V_rod_cont + V_end_cont;

PV = Press.*V_total;

ft = fittype('a*x','independent','x','dependent','y');
fitting = fit(1./V_total',Press',ft);
plot(fitting,1./V_total,Press);
xlabel '1/Volume [1/m^3]'; ylabel 'Pressure [mV]'
%% Comp
k = 0.0002;
diffH = H_water_end - 128.47e-3;
DiffV = A_water * diffH;

C = - DiffV./(k*(1./H_water_end - 1/(128.47e-3)));
mean(C)
%ex5:
data_1=readtable('Heart_run{1}');
min(data_1.RightBranchFirst_close_)
min(data_1.RightBranchSecond_close_)

data_2=readtable('Heart_run{2}');
min(data_2.RightBranchFirst_close_)
min(data_2.RightBranchSecond_close_)

data_3=readtable('Heart_run{3}');
min(data_3.RightBranchFirst_close_)
min(data_3.RightBranchSecond_close_)

data_4=readtable('Heart_run{4}');
min(data_4.RightBranchFirst_close_)
min(data_4.RightBranchSecond_close_)

data_5=readtable('Heart_run{5}');
min(data_5.RightBranchFirst_close_)
min(data_5.RightBranchSecond_close_)

```