

# הנדסה ביו רפואית

## מעבדה מכשור

מגישים:

יובל כסיף  
נדב אמיתי  
סול אמארה

תאריך:

25.04.2022

## תוכן עניינים:

1	תקציר:	4
2	ניסויים:	5
2.1	ניסוי 1 : עקומת מעוות ויסקואלסטיות	5
2.1.1	היפותזה :	5
2.1.2	מתודולוגיה :	5
2.1.3	תוצאות :	5
2.1.4	מסקנות :	7
2.2	ניסוי 2 : תופעת ההיסטרזיס בגומי	9
2.2.1	היפותזה :	9
2.2.2	מתודולוגיה :	9
2.2.3	תוצאות :	9
2.2.4	מסקנות :	11
2.3	ניסוי 3 התניית מוקדמת של החומר :	12
2.3.1	היפותזה :	12
2.3.2	מתודולוגיה :	12
2.3.3	תוצאות :	12
2.3.4	מסקנות :	14
2.4	ניסוי 4 : זחילה	15
2.4.1	היפותזה :	15
2.4.2	מתודולוגיה :	15
2.4.3	תוצאות :	15
2.4.4	מסקנות :	18
2.5	ניסוי 5 : תפוגת מאמצים	19
2.5.1	היפותזה :	19

19.....	מתודולוגיה:	2.5.2	
19.....	תוצאות:	2.5.3	
22.....	מסקנות:	2.5.4	
23.....	סימולניק		3
27.....	מסקנות כלליות		4
28.....	מקורות		5
29.....	נספחים		6

## **1 תקציר:**

במעבדה זו לראשונה נפגשו עם מכונת מתיחה והשתמשנו בפונקציות השונות שבה כדי להבין מאפיינים של רצועת גומי. חשיבות מעבדה זו היא בכך שהבנת המבנה של החומר מבחינת עקומת מאמץ מעוות תאפשר לנו בתור מהנדסים לבנות מודלים המאפשרים לדמות את הרקמות הביולוגיות.

בניסוי הראשון מתחנו שתי רצועות גומי שונות (לבנה ושחורה) ובדקנו את עקומת המאמץ מעוות של כל אחת מהן עד קריעה ובמידה ולא נקרעה ביצענו חור כדי להקטין את שטח החתך וכך הגדלנו את המאמץ. בניסוי השני בחנו את עקומת ההיסטרזיס של רצועת הגומי הלבנה בגרף מאמץ מעוות בעזרת מתיחת הגומי ושחרורו. בניסוי השלישי בדקנו כיצד הכנה מוקדמת של החומר משפיעה על הניסוי, מתחנו את הגומי ב-75% מאורך הדגימה ב-6 מחזורים ובחנו את עקומת ההיסטרזיס עבור ערכים אלו, לאחר מכן ביצענו את אותו הניסוי עבור מתיחה של 125% מאורך הדגימה לשלושה מחזורים. בניסוי 4 בדקנו את תופעת הזחילה, כלומר הפעלנו מאמץ קבוע ובחנו את עקומות מאמץ כנגד זמן ומעוות כנגד זמן. בניסוי החמישי והאחרון בחנו את תופעת תפוגת מאמצים ע"י דרישת מעוות קבוע ובכך קיבלנו מאמץ דועך לאפס. כמו כן, בעת ביצוע האנליזה של המידע מחקנו חלק מהדאטה שאספנו כיוון שהמכשיר מבצע מתיחה נוספת לאחר סיום הניסוי על מנת להגיע לנקודת האפס המוגדרת לו. בחלק מהניסויים נדרשנו למחוק גם מההתחלה כיוון שהכנסנו את הגומי לא מתוח. תופעות אלה לא רלוונטיות לניסוי ואינן צריכות להשפיע על התוצאות.

## 2 ניסויים:

### 2.1 ניסוי 1: עקומת מעוות ויסקואלסטיות

#### 2.1.1 היפותזה:

בניסוי זה נבצע מתיחה על שתי רצועות גומי שונות (לבנה ושחורה) ונוציא גרף מאמץ כנגד מעוות. נצפה כי נקבל עקומת מאמץ מעוות המחולקת לחלק אלסטי בו הקשר בין מאמץ למעוות יהיה לינארי, וחלק פלסטי בו לא יתקיים קשר לינארי בניהם. כמו כן, מאחר ומדובר ברצועות גומי העשויות מחומרים שונים, נצפה כי לכל גומי יהיה מאמץ כניעה שונה, וחוזק מתיחה שונה.

#### 2.1.2 מתודולוגיה:

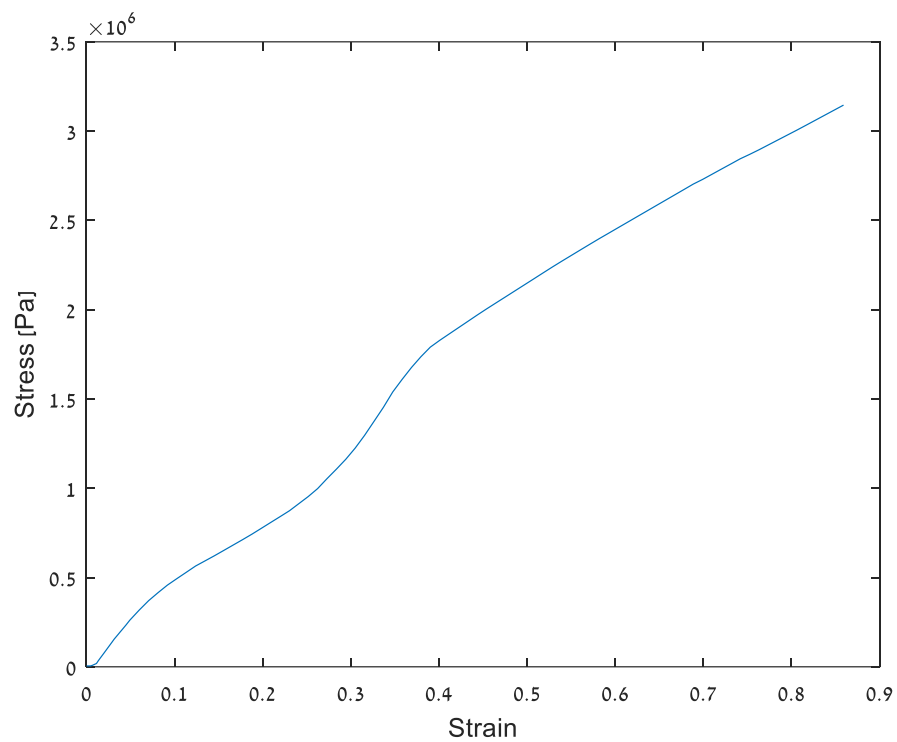
**מכשור וציוד:** שתי רצועות גומי, שחורה ולבנה, מכונת מתיחה, קליבר למדידת הדגמים, מחשב בעל תוכנת NEXYGEN plus.

**מהלך הניסוי:** ראשית, מדדנו בעזרת הקליבר את מימדי רצועות הגומי (אורך, רוחב, עובי), לאחר מכן הכנסנו את הרצועה הלבנה למכונת המתיחה, נכנסנו לתוכנת ה-NEXYGEN plus ובחרנו בתכנית "Pull to Break". הרצועה לא נקרעה, ולכן חזרנו על הניסוי כאשר ביצענו חור קטן במרכז הרצועה. הרצנו את התוכנה עד שנקרעה רצועת הגומי. לאחר מכן חזרנו על הניסוי עם הרצועה השחורה.

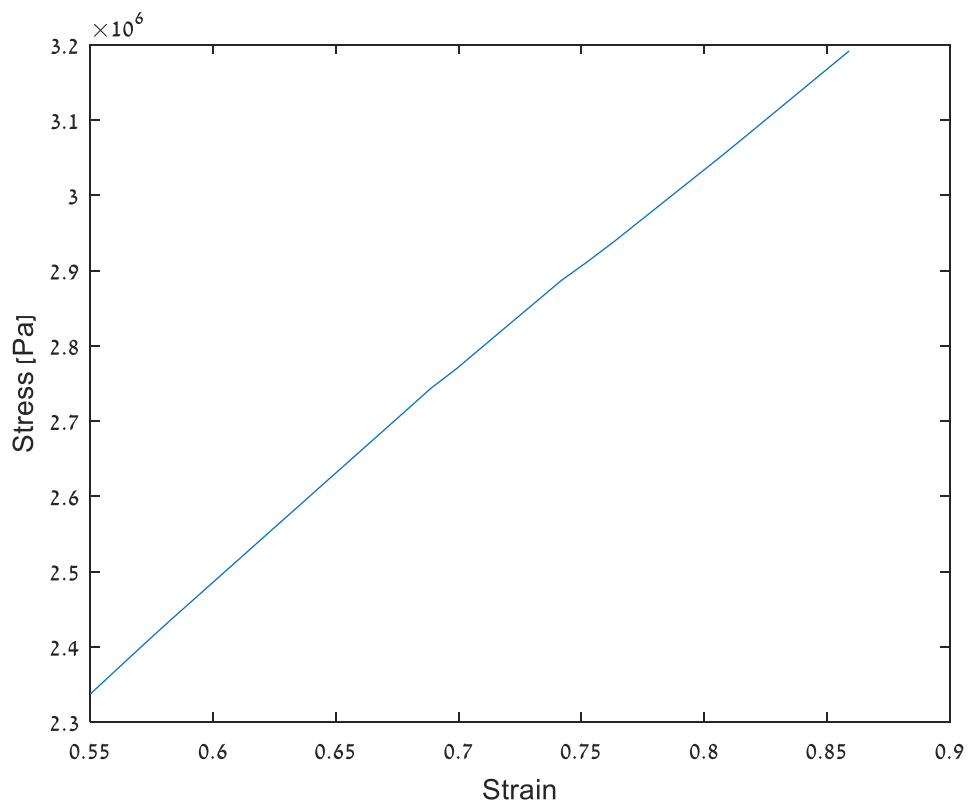
#### 2.1.3 תוצאות:

התוצאות שהתקבלו מהמדידות מוצגות בטבלה הבאה

טבלה א' – מימדי רצועות הגומי טרם הניסוי.		
רצועת גומי שחורה	רצועת גומי לבנה	
80.43	80	אורך [mm]
9.96	9.66	רוחב [mm]
2.12	2.07	עובי [mm]

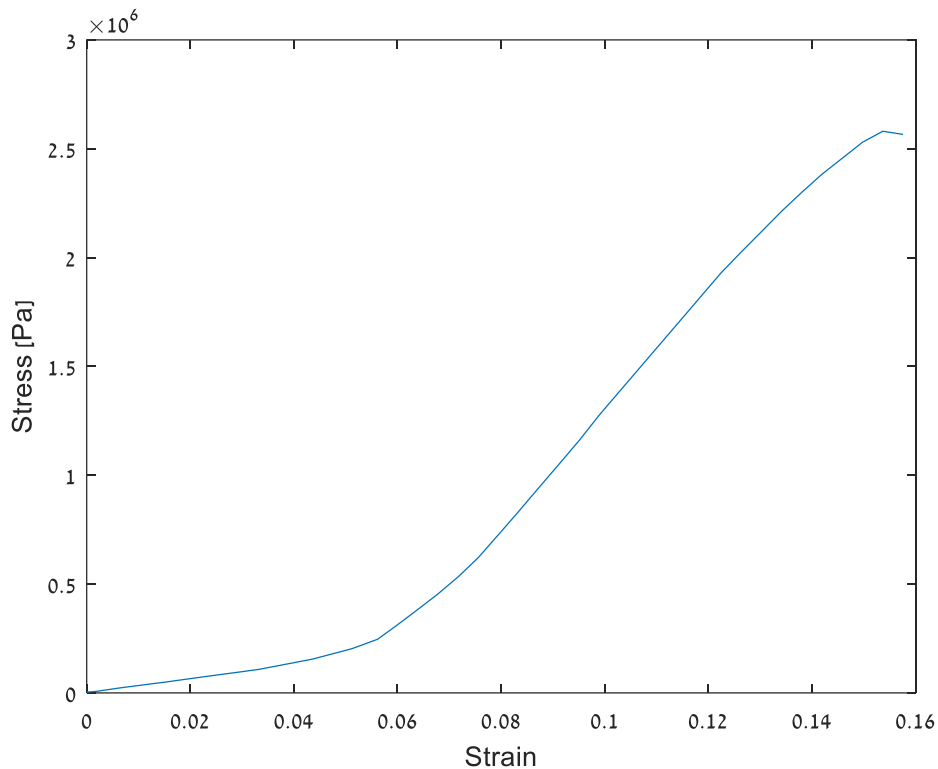


איור 1 - גרף מעוות מאמץ של הגומי הלבן



איור 2 - עקומת מאמץ מעוות של הגומי הלבן חתוכה

נקודת המקסימום של המאמץ היא  $3191.805 [kPa]$



איור 3 - עקומת מאמץ מעוות של הגומי השחור

נקודת המקסימום של המאמץ היא  $2565.9 [kPa]$

באיורים 1,2 ניתן לראות את עקומות מאמץ-מעוות של רצועות הגומי השחור והלבן. ניתן לראות, כי רק אחרי מעוות של בקירוב 0.4, התחלנו לקבל את הקשר הליניארי בין מעוות למאמץ כפי שהיינו מצפים מחומר אלסטי כמו הגומי הלבן. נסביר זאת בכך שהנחנו את הגומי הלבן כאשר הוא מקופל ולא מתוח כלל. באיור 2 ניתן לראות את אותו הגרף כאשר חתכנו את החלק בו הגומי לא היה מתוח. בגרף זה אכן מתקיים קשר ליניארי בין מעוות למאמץ. נשים לב כי איור 3 מתאים לעקומת מאמץ מעוות של חומר לא אלסטי.

#### 2.1.4 מסקנות:

##### תשובה לשאלה ב':

הרצועה נקרעה לאחר יצירת החור, אך לא לפני (תקף הן לרצועה הלבנה והן לשחורה). במידה והרצועות היו נקרעות בשני המקרים, ברור כי עבור רצועה עם חור נצטרך להפעיל פחות כוח בכדי לקרוע אותה. זאת מכיוון שאנו מקטינים את שטח הפנים ובכך עבור אותו הכוח נפעיל מאמץ גדול יותר על הרצועה.

### תשובה לשאלה ג':

הניסוי שלעיל מלמד אותנו על תהליך פציעה של רקמה, שכאשר רקמה נפגמת חלקית, אך לא נקרעת לגמרי (לדוגמא חור ברקמה), סבירות הרקמה להיקרע גדול יותר עבור אותו הכוח שפועל על הרקמה.

### תשובה לשאלה ד':

לאחר ביצוע הניסויים, היינו משתמשים בגומי הלבן כרקמה, ובגומי השחור כגיד. כמו כן, ניתן לראות באיורים 2,3 כי הגומי הלבן בעל תכונות אלסטיות (מתאים יותר לרקמה) בעוד שהגומי השחור לא אלסטי כלל (מתאים יותר לגיד). בהתאם לכך ועל סמך התכונות של רקמה וגיד אצל בעלי חיים, זו ההתאמה שנבצעה.

לסיכום, בניסוי זה ראינו את עקומות מאמץ מעוות של גומי לבן ושחור בעל מאפיינים שונים. מעקומות 1,2 ניתן לראות כמצופה כי הגומי הלבן בעל תכונות אלסטיות. למרות זאת, היינו מצפים שלאחר החלק הלינארי הגומי יתחיל להתעוות בהדרגה ולקבל "צוואר" כלומר שטח הפנים קטן וכתוצאה מכך העקומה צריכה לרדת. עם זאת, לא קיבלנו חלק זה בגרף. נסיק כי החור שעשינו בגומי פגע במהימנות הניסוי.



## 2.2 ניסוי 2: תופעת ההיסטרזיס בגומי

### 2.2.1 היפותזה:

בניסוי זה נפעיל כוח מתיחה על רצועת גומי (לבנה) ולאחר מכן נשחרר את הרצועה המתוחה בקצב זהה ונוציא גרף מאמץ כנגד מעוות. נצפה שיהיה איבוד אנרגיה אותו ניתן לחשב באמצעות השטח שנמצא בין עקומת המתיחה והשחרור.

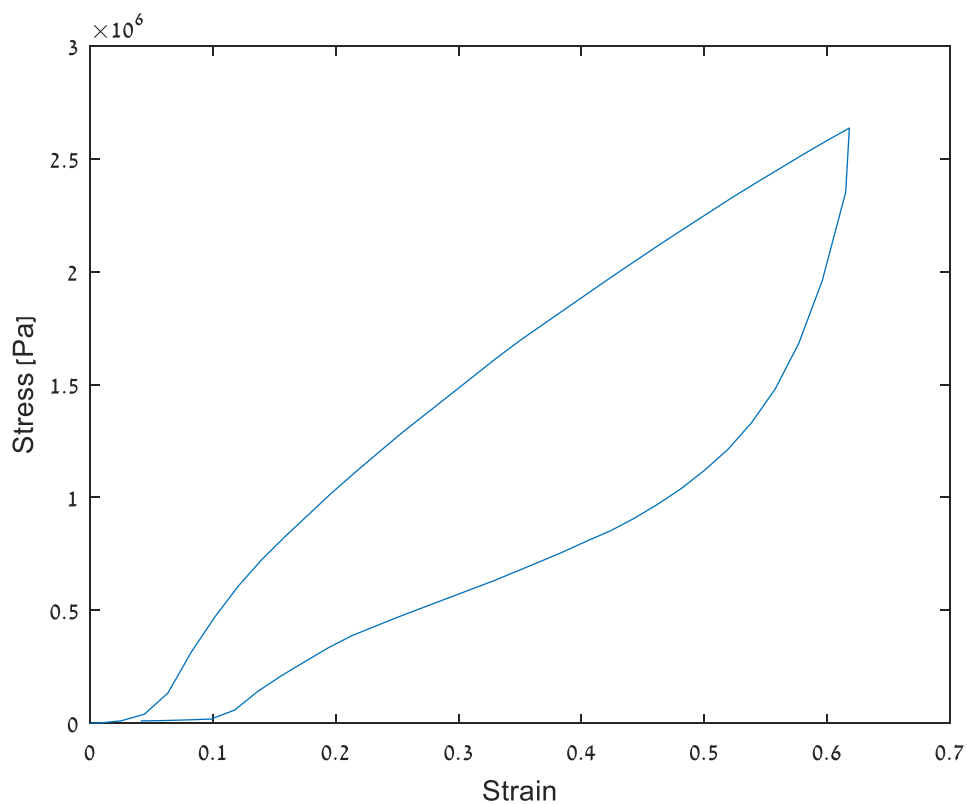
### 2.2.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** רצועת גומי לבנה, מכונת מתיחה, קליבר למדידת הדגמים, מחשב בעל תוכנת NEXYGEN plus.

**מהלך הניסוי:** הכנסנו את הרצועות למכונת המתיחה, נכנסנו לתוכנת ה-NEXYGEN plus ובחרנו בתכנית "Cyclic". בתוכנה הגדרנו את הניסוי לעצור אחרי סיבוב אחד, את המתיחה להיות 100% מאורך הדגימה ואת הבסיס להיות "Tension". שמרנו את הנתונים בקובץ טקסט.

### 2.2.3 תוצאות:

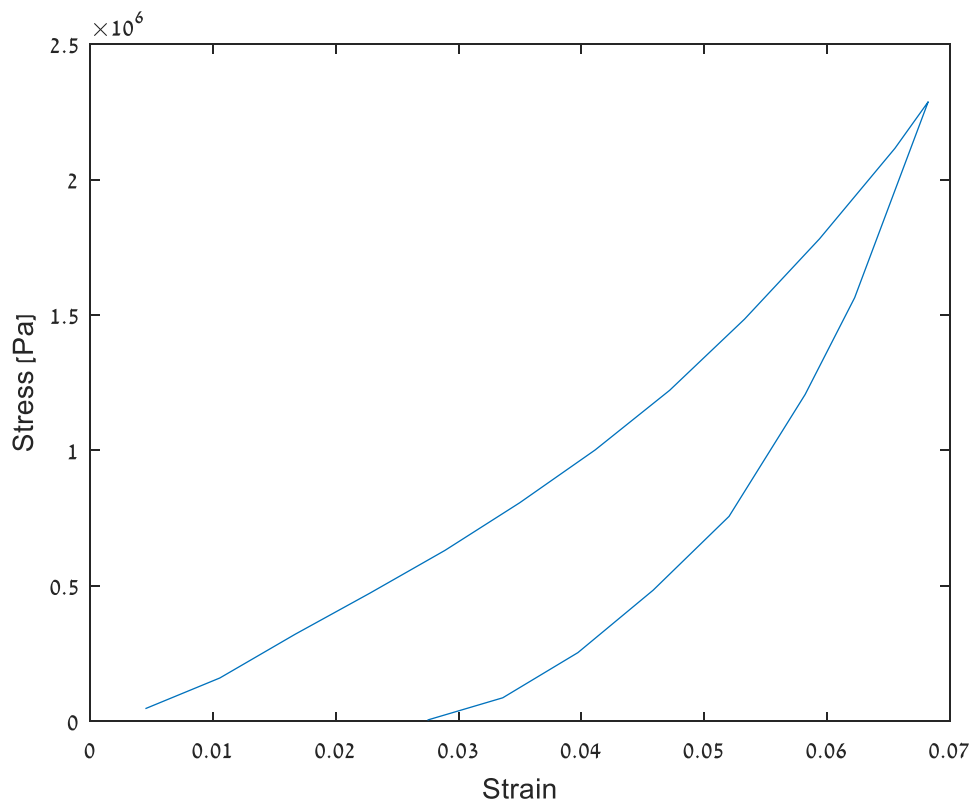
התוצאות שהתקבלו מהמדידות מוצגות בגרף הבא:



איור 4 - עקומת מאמץ כנגד מעוות

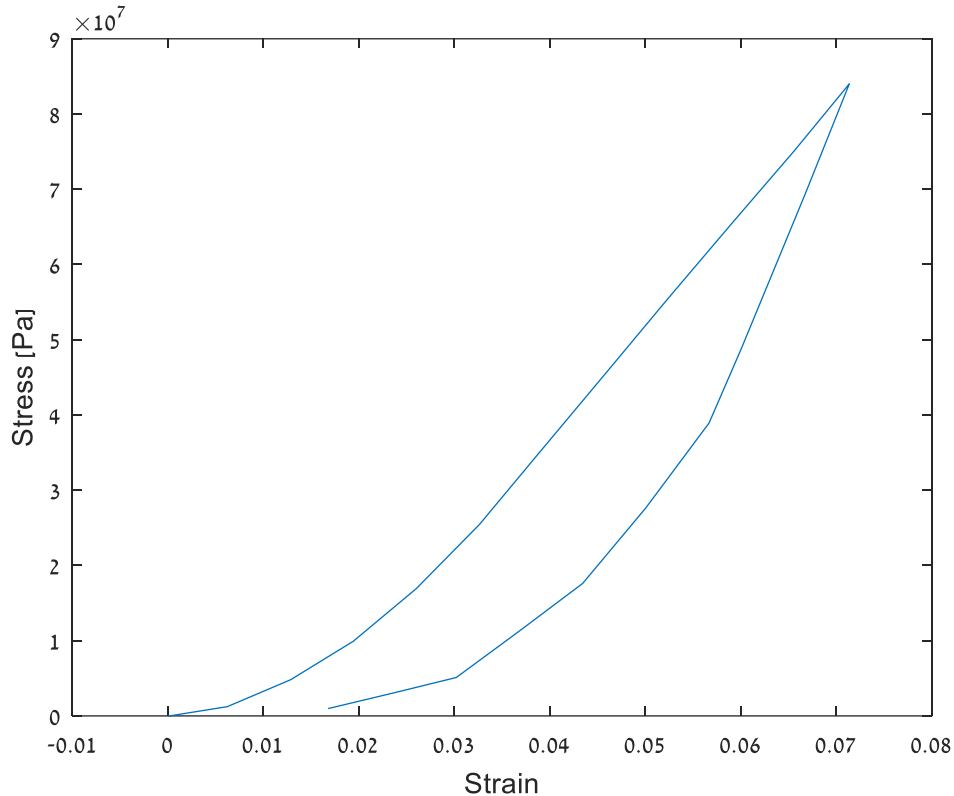
השטח הכלוא בין הגרפים הוא  $466.23 \left[ \frac{kJ}{m^3} \right]$

מאיור 3 ניתן לראות את עקומת מאמץ-מעוות של ניסוי זה. ניתן לראות כי בעת שחרור המאמץ בקצב הזהה להפעלתו קיבלנו עקומה שונה שאיננה חוזרת על עצמה, כלומר היה איבוד של אנרגיה השווה ל- $466.23 \left[ \frac{kJ}{m^3} \right]$ .



איור 5 - היסטריזיס של סקין

השטח הכלוא בין הגרפים הוא  $29.5 \left[ \frac{kJ}{m^3} \right]$



איור 6- היסטריזיס של גיד

השטח הכלוא בין הגרפים הוא  $955.3 \left[ \frac{kJ}{m^3} \right]$

#### 2.2.4 מסקנות:

##### תשובה לשאלה 1:

בניסוי זה בדקנו את תופעת ההיסטריזיס על רצועת גומי לבנה. מאיורים 4-6 ניתן לראות כי קיבלנו עקומת מאמץ-מעוות המתארת את תופעת ההיסטריזיס כמצופה כלומר קיבלנו כי יש איבוד של אנרגיה בעת הפעלת ושחרור מאמץ על רצועת הגומי בקצב זהה. בעת ביצוע הניסוי המכשיר ביצע מתיחה נוספת לאחר מכן ולכן את ערכים אלה מחקנו מהגרף. כמו כן, ניתן לראות כי עבור עור קיבלנו את השטח הנמוך ביותר כלומר האיבוד אנרגיה הכי נמוך ועבור גיד קיבלנו את האיבוד אנרגיה הגבוהה ביותר. ניתן להסיק מכך כי העור הכי גמיש מבין החומרים שבדקנו ולכן בעת שחרור המתיחה החזרה של המתח מתונה יותר ופחות אנרגיה מתבזבזת. כמו כן, ההנחות כי החומרים בלתי דחיסים ואיזותרופים עוזרות לחישוב השטח ובאמצעותו מציאת המאמץ. מבלתי דחיסות ניתן להסיק כי הנפח קבוע ומאיוטרופיות כי הוא אחיד ומכך ניתן להסיק כי המאמץ מופעל על השטח באופן שווה.

## 2.3 ניסוי 3 התניית מוקדמת של החומר:

### 2.3.1 היפותזה:

בניסוי זה נבדוק כיצד התניה מוקדמת של החומר משפיעה על הניסוי, כלומר נמתח את הגומי לפני הניסוי ולאחר מכן בניסוי נבדוק האם המאמץ והמעוות השתנו. אנו משערים כי מתיחה מוקדמת של גומי מחלישה את הקשרים הבין מולקולרים של החומר ומכינה את החומר לעומס הבא שנפעיל עליו, בכך בפעם הבאה שנפעיל מאמץ זהה על החומר נקבל מעוות גדול יותר.

### 2.3.2 מתודולוגיה:

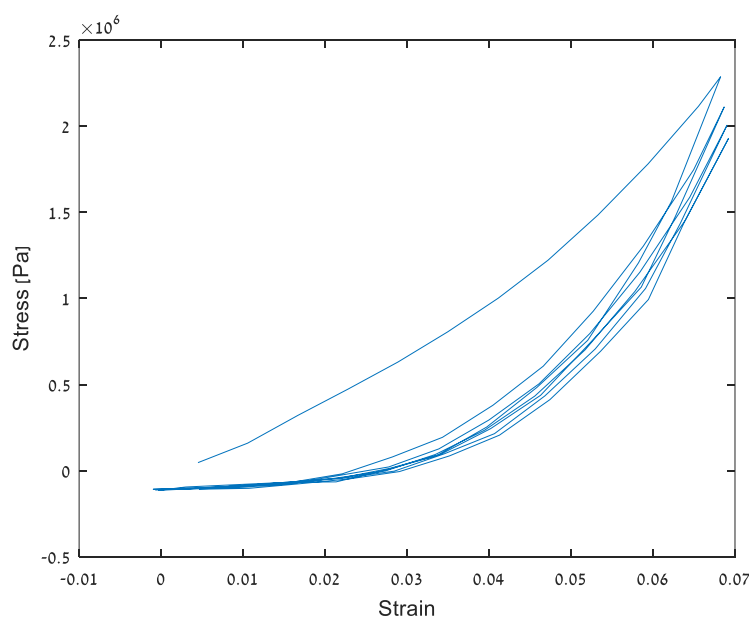
**מכשור וציוד:** שתי רצועות גומי, שחורה ולבנה, מכונת מתיחה, קליבר למדידת הדגמים, מחשב בעל תוכנת NEXYGEN plus.

**מהלך הניסוי:** בעזרת הקליבר מדדנו את ממדי רצועות הגומי (אורך, רוחב, עובי), לאחר מכן הכנסנו את הרצועה הלבנה למכונת המתיחה, נכנסנו לתוכנת ה-NEXYGEN plus ובחרנו בפרוטוקול "Cyclic". סימנו 6 במספר המחזורים וסימנו את הגבול העליון של המתיחה להיות 75% מאורכה של הדגימה. basic קבענו את סוג הניסוי להיות "Tension" ושינינו את מהירות ההרצה ל  $100 \text{ mm/min}$ . הרצנו את הניסוי, שמרנו והרצנו שוב את הניסוי עבור שלושה מחזורים.

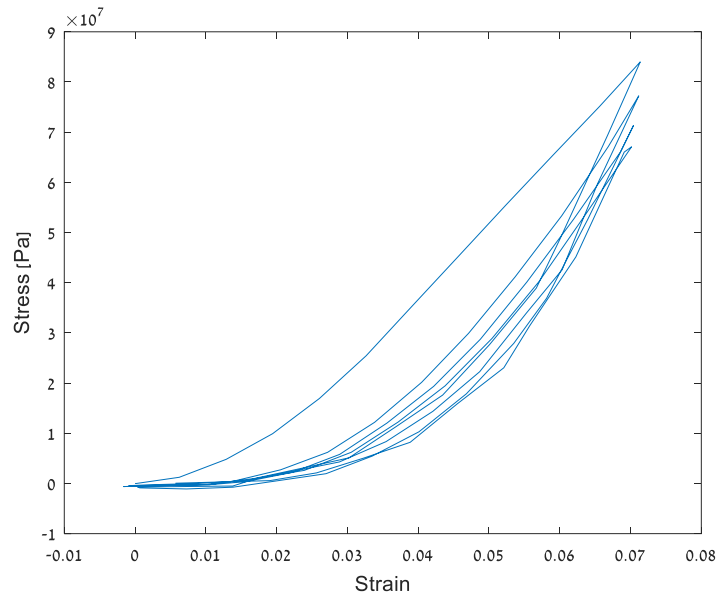
### 2.3.3 תוצאות:

את תוצאות המדידה של הגומי ניתן לראות בטבלה א' תחת רצועת גומי לבנה.

### תשובה לשאלה 4:

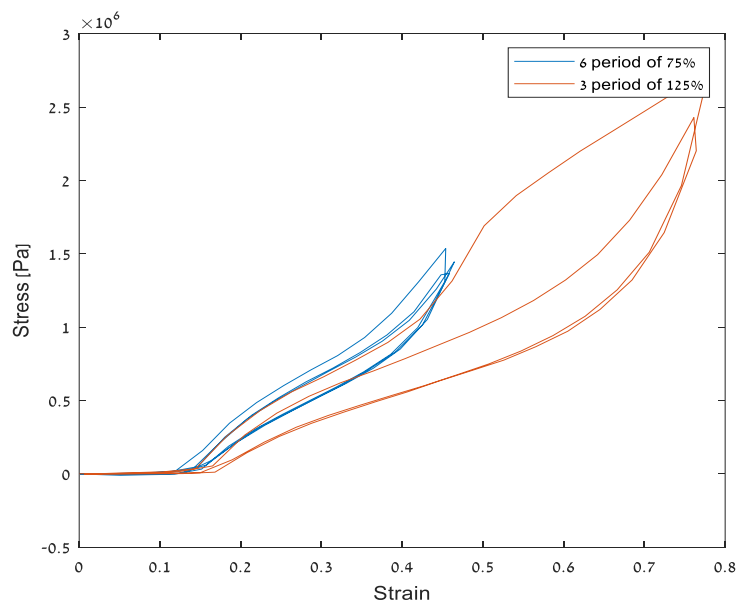


איור 7 - גרף מאמץ מעוות של התניה מוקדמת עבור עור של 7%



איור 8 - גרף מאמץ מעוות של התניה מוקדמת עבור גיד של 7%

איורים 7,8 מתארים ניסוי התניה מוקדמת של גיד ועור, בהם ניתן לראות את עקומת מאמץ מעוות של הגיד והעור. במבט ראשון נראה כי השטח הכלוא בגרף הגיד קטן יותר מהשטח הכלוא בעקומת העור, אך יש לשים לב לטווח הערכים, ולכן ניתן לראות בבירור כי השטח הכלוא בגרף העור קטן מהשטח הכלוא בגרף הגיד.



איור 9 – עקומת מאמץ כנגד מעוות מתיחת הגומי עם התניה מוקדמת

#### תשובה לשאלה 5:

באיורים 7,8 ניתן לראות בבירור כי עקומת ההיסטריז של המחזור הראשון כוללת שטח רב יותר באופן משמעותי משאר המחזורים. בנוסף ניתן לשים לב להבדל בין סדרי הגודל של הגרפים, גרף 7 אשר מראה מתיחה עד 75% מהערך ההתחלתי, המאמץ מגיע עד  $16000 [pa]$  בעוד שבגרף 8 אשר מראה מתיחה של עד 125% מהערך ההתחלתי, ניתן לראות כי המאמץ מגיע עד יותר מ- $25000 [pa]$ .

#### 2.3.4 מסקנות:

בניסוי זה בדקנו כיצד הכנה מוקדמת של החומר משפיעה על גרף מאמץ מעוות עבור ניסוי מתיחת החומר, כלומר מתחנו את החומר מספר פעמים ובדקנו כיצד עקומת ההיסטריז משתנה. ניתן לראות בבירור כי עקומת ההיסטריז של המחזור הראשון בגרפים 7,8 כולאת שטח רב יותר באופן משמעותי משאר המחזורים, מכאן ניתן להסיק כי במחזור הראשון יותר קשרים בין מולקולרים נחלשים ולכן מאבדים יותר אנרגיה המתאפיינת בשטח הכלוא בעקומה הסגורה כפי שנאמר בניסוי 2. לאחר המחזור הראשון ניתן לראות כי שאר המחזורים אינם שונים ואף מתאחדים דבר המצביע על כך שעשינו הכנה מוקדמת של החומר (Preconditioning) ובנוסף מתיחה אחת מספיקה כדי לעשות הכנה מוקדמת של החומר. דבר נוסף שעולה מהגרפים הוא שככל שהעמסה גדולה יותר המאמץ גדול יותר מה שעולה בקנה אחד עם הנוסחה למאמץ:  $\sigma = F/A$ .

#### המשך שאלה 4:

כפי שנאמר בניסוי הקודם, השטח הכלוא בגרף היא כמות האנרגיה הנפחית המשתחררת בתהליך ההתניה המוקדמת. מכך שהשטח בגרף העור קטן מהשטח בגרף הגיד נוכל לומר כי עור רקמה אלסטית יותר מגיד. בנוסף גם בגרפים אלו, בדומה לגרף הגומי, ניתן לראות כי לאחר המתיחה הראשונה שאר המחזורים מתאחדים, ולכן גם כאן ניתן לומר כי מתיחה אחת מספיקה כדי לעשות הכנה מוקדמת של החומר.

## 2.4 ניסוי 4: זחילה

### 2.4.1 היפותזה:

בניסוי זה נפעיל כוח מתיחה על רצועת גומי (לבנה) כאשר המאמץ קבוע. בדומה לשאלה 3.5 בדוח המכין, נצפה לקבל עליה אקספוננציאלית במעוות כתלות בזמן.

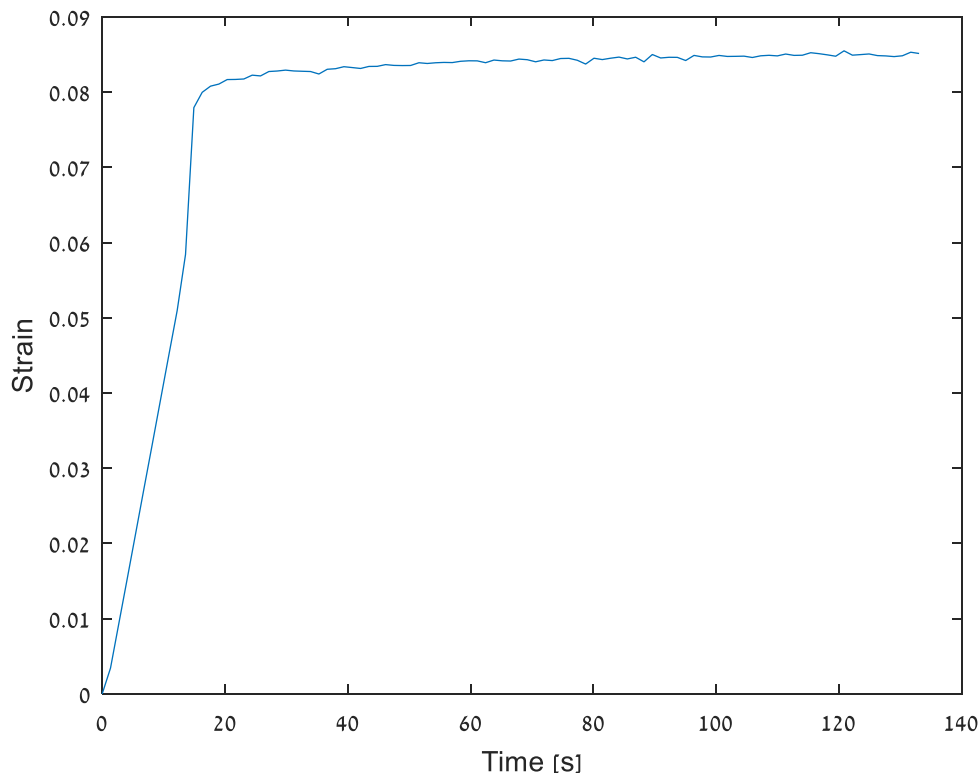
### 2.4.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** רצועת גומי לבנה, מכונת מתיחה, קליבר למדידת הדגמים, מחשב בעל תוכנת NEXYGEN plus.

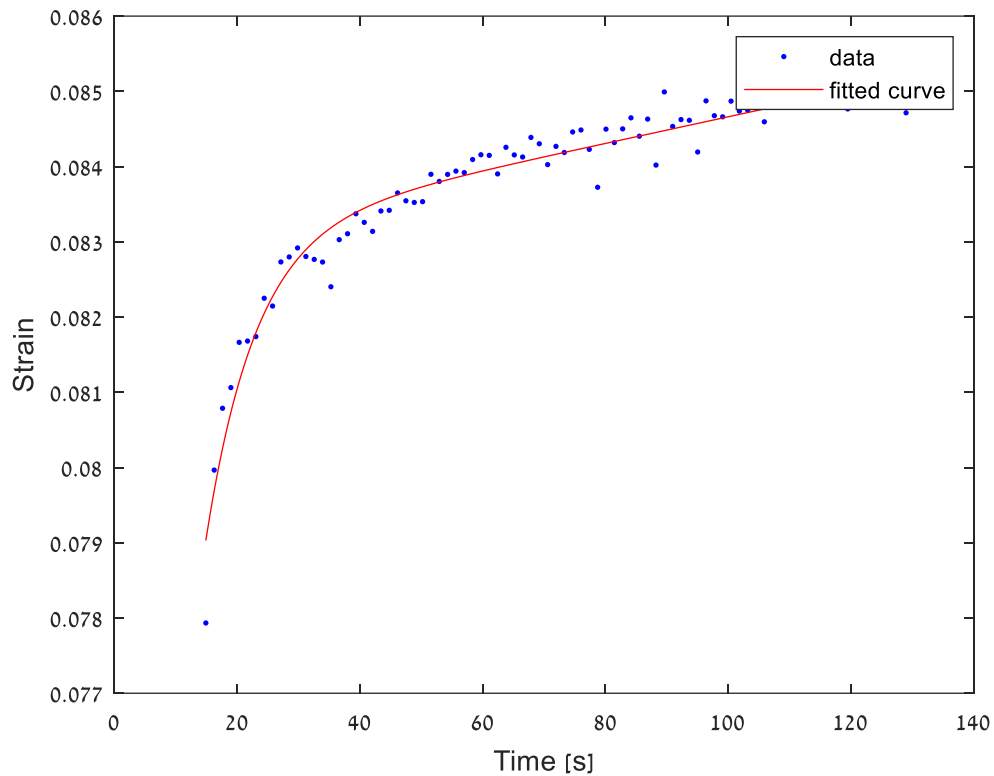
**מהלך הניסוי:** הכנסנו את הרצועות למכונת המתיחה, נכנסנו לתוכנת ה-NEXYGEN plus ובחרנו בתכנית "Creeping". כמו כן, הגדרנו את זמן ההעמסה להיות 2 דקות ואת כוח ההעמסה המקסימלי ל-9N. שמרנו את הנתונים בקובץ טקסט.

### 2.4.3 תוצאות:

התוצאות שהתקבלו מהמדידות מוצגות בגרף הבא:



איור 10 - שינוי המעוות כתלות בזמן



איור 11- שינוי המעוות כתלות בזמן על פי התאמה למודל SLS

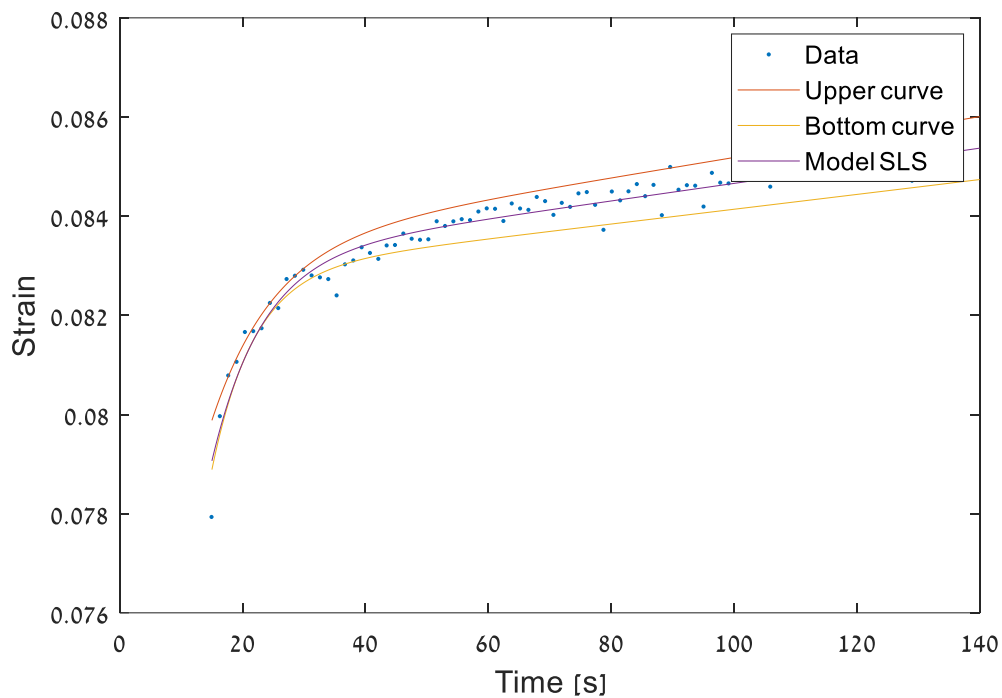
Data	
General model Exp2:	
$ans(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
a =	0.08291 (0.08266, 0.08316)
b =	0.000209 (0.0001774, 0.0002405)
c =	-0.02598 (-0.03615, -0.0158)
d =	-0.123 (-0.1469, -0.09901)

איור 12- ערכי ההתאמה שקיבלנו

נוציא גרף המתאר הנתונים, התאמת מודל SLS ואת רווח בד סמך של 95%, ע"י שימוש בנתונים

שקיבלנו מהתאמה אותם ניתן לראות באיור לעיל.





איור 13 - גרף הנתונים, מודל SLS ורווח בר סמך עליון ותחתון

באיור זה ניתן לראות את נתוני הניסוי, את התאמת מודל SLS לניסוי ואת רווח בר סמך המתאים לנתונים שבניסוי. רווח בר סמך המתואר באיור זה הוא בהתאמה של 95%. נשתמש בפתרון של תופעת הזחילה מהדוח המכין ונמצא את הקבועים:

$$(1) \quad \varepsilon(t) = \frac{\sigma}{k_2} \cdot \left( 1 - \frac{k_1}{k_1 + k_2} \exp\left(-\frac{k_1 k_2}{\eta(k_1 + k_2)} \cdot t\right) \right)$$

את הקבוע  $b$  מקרבנו לאפס נזניח ונאמר כי הוא  $b=0$ . ולכן נקבל את הפתרון לנוסחת הזחילה:

$$(2) \quad \varepsilon(t) = 0.083 - 0.026 \exp\{-0.123t\}$$

לאחר מעבר על התוצאות שהתקבלו בניסוי:

$$\sigma_0 = 4.66 \cdot 10^5 [Pa]$$

ולכן מהשוואה בין משוואת 1 ו 2 נוכל למצוא את הקבועים:

$$k_2 = \frac{\sigma_0}{0.083} = 5.62 \cdot 10^6 \left[ \frac{N}{m} \right]$$

$$-\frac{\sigma k_1}{k_2(k_1 + k_2)} = -0.026$$

$$k_1 = \frac{0.026 k_2^2}{\sigma - 0.026 k_2} = 2.56 \cdot 10^6 \left[ \frac{N}{m} \right]$$

$$-\frac{k_1 k_2}{\eta(k_1 + k_2)} = -0.123$$

$$\eta = \frac{k_1 k_2}{0.123(k_1 + k_2)} = 1.375 \cdot 10^7 \left[ \frac{N}{m} \right]$$

#### 2.4.4 מסקנות:

בניסוי זה בדקנו את תופעת הזחילה באמצעות הפעלת כוח מתיחה על רצועת גומי (לבנה) כאשר המאמץ קבוע. מאיור 11 קיבלנו עקומה אקספוננציאלית עולה בזמן כפי שקיבלנו בדוח המכין מהחישוב התאורטי שמהווה פתרון למשוואה הדיפרנציאלית המתארת את מודל ה-SLS:

$$\frac{k_2}{\eta} \cdot \varepsilon + \left(1 + \frac{k_2}{k_1}\right) \cdot \dot{\varepsilon} = \frac{1}{\eta} \cdot \sigma + \frac{1}{k_1} \cdot \dot{\sigma}$$

$$\frac{k_2}{\eta} \cdot \varepsilon + \left(1 + \frac{k_2}{k_1}\right) \cdot \dot{\varepsilon} = \frac{1}{\eta} \cdot \sigma$$

כמו כן, מההתאמה למודל זה קיבלנו את הפרמטרים הבאים:  $0.083e^{0.00021t} - 0.026e^{-0.123t}$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{k_2} \cdot \left(1 - \frac{k_1}{k_1 + k_2} \exp\left(-\frac{k_1 k'_2}{\eta(k_1 + k_2)} \cdot t\right)\right):$$

## 2.5 ניסוי 5: תפוגת מאמצים

### 2.5.1 היפותזה:

בניסוי זה נפעיל כוח מתיחה על רצועת גומי (לבנה) כאשר המעוות קבוע. בדומה לשאלה 3.6 בדוח המכין, נצפה לקבל ירידה אקספוננציאלית במאמץ כתלות בזמן.

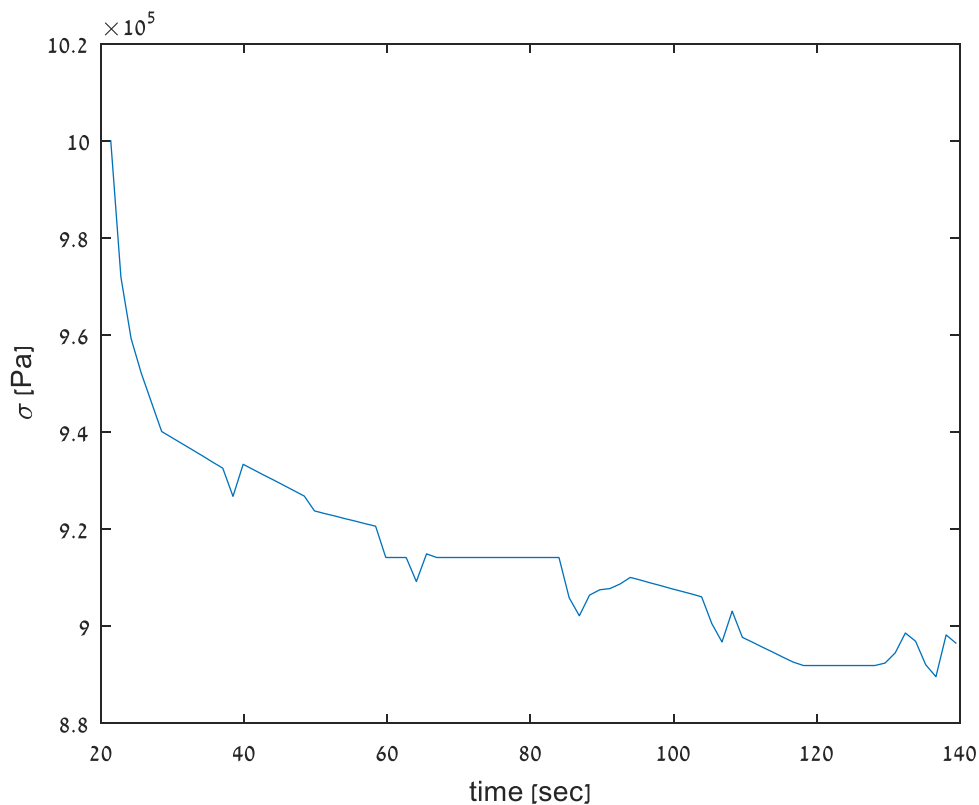
### 2.5.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** רצועת גומי לבנה, מכונת מתיחה, קליבר למדידת הדגמים, מחשב בעל תוכנת NEXYGEN plus.

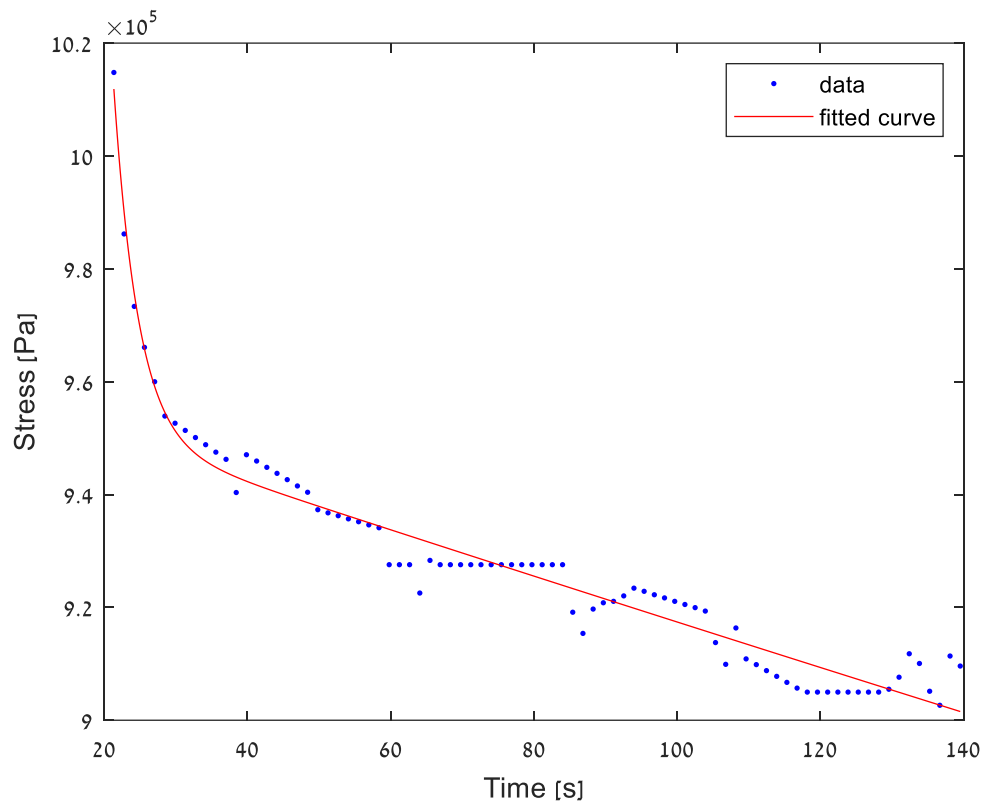
**מהלך הניסוי:** הכנסנו את הרצועות למכונת המתיחה, נכנסנו לתוכנת ה-NEXYGEN plus ובחרנו בתוכנית "Stress Relaxation". כמו כן, הגדרנו את זמן ההעמסה להיות 2 דקות ואת ההתארכות המקסימלית ל-10 mm. שמרנו את הנתונים בקובץ טקסט.

### 2.5.3 תוצאות:

התוצאות שהתקבלו מהמדידות מוצגות בגרפים הבאים:



איור 14- שינוי המאמץ כתלות בזמן



איור 15 - שינוי המאמץ כתלות בזמן

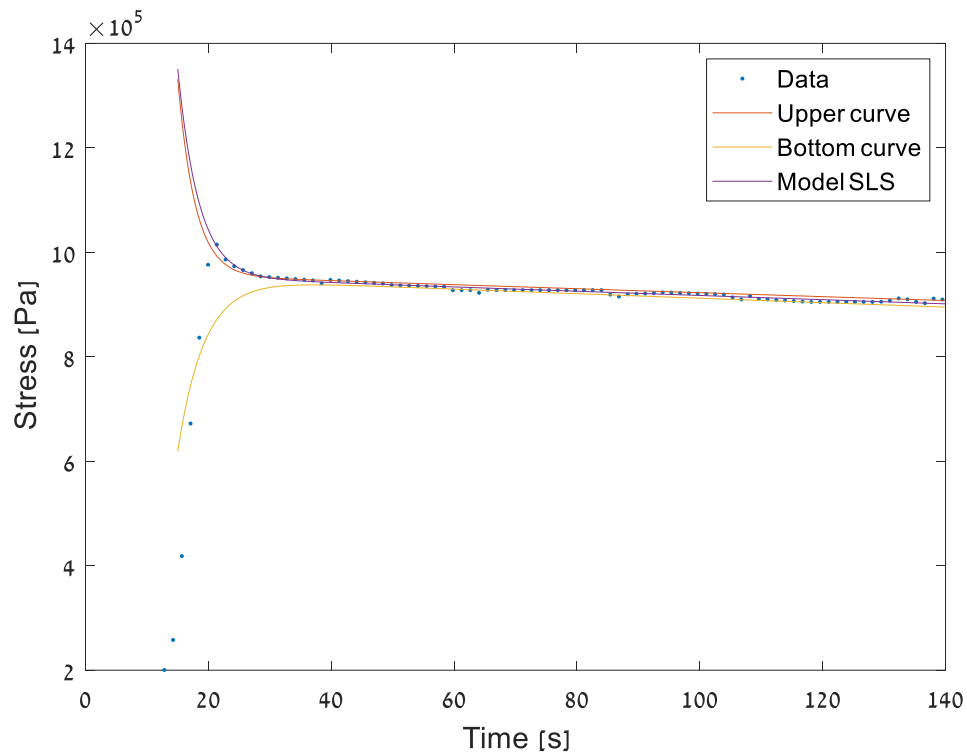
**Data**

General model Exp2:  
 $ans(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$   
 Coefficients (with 95% confidence bounds):  
 $a = 3.21e+07$  (-1.075e+07, 7.494e+07)  
 $b = -0.2926$  (-0.353, -0.2322)  
 $c = 9.588e+05$  (9.562e+05, 9.614e+05)  
 $d = -0.0004414$  (-0.0004714, -0.0004115)

איור 16 - ערכי ההתאמה שקיבלנו

נוציא גרף המתאר הנתונים, התאמת מודל SLS ואת רווח בד סמך של 95%, ע"י שימוש בנתונים

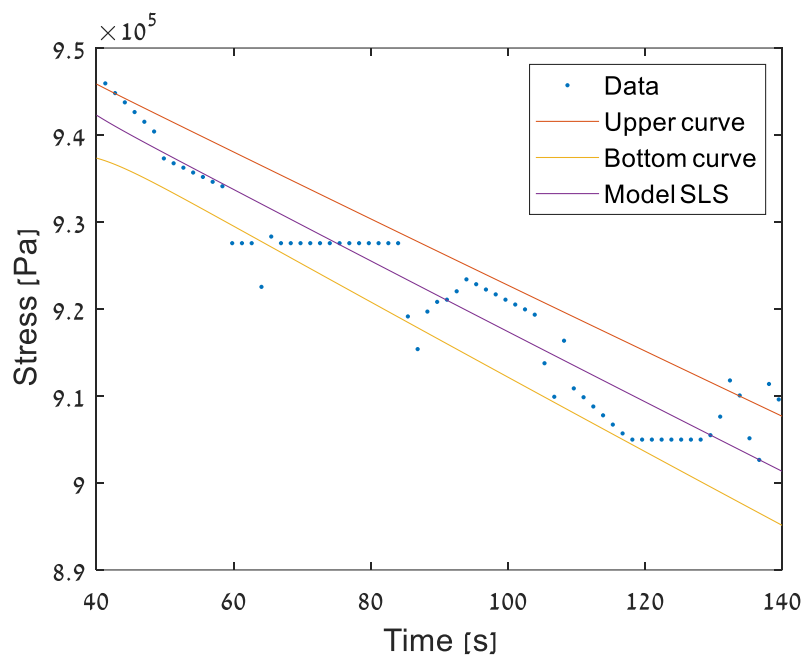
שקיבלנו מהתאמה אותם ניתן לראות באיור לעיל.



איור 17- גרף הנתונים, מודל SLS ורווח בר סמך עליון ותחתון

באיור זה ניתן לראות את נתוני הניסוי, את התאמת מודל SLS לניסוי ואת רווח בר סמך

המתאים לנתוני שניסוי. רווח בר סמך במתואר באיור זה הוא בהתאמה של 95%.



איור 18 –תקריב של איור 12

פתרון לתפוגת מאמצים מהדוח המכין :

$$(3) \quad \sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot \left( k_2 + k_1 \cdot e^{-k_1 \frac{t}{\eta}} \right)$$

גם כאן נזניח את הקבוע d. ולכן נקבל את המשוואה הבאה :

$$(4) \quad \sigma(t) = 9.588 \cdot 10^5 + 3.21 \cdot 10^7 \text{Exp}\{-0.29t\}$$

נחשב את הקבועים לפי המשוואות הבאות היוצאות מהשוואה בין 3 ו 4 :

$$k_2 = \frac{9.588 \cdot 10^5}{\varepsilon_0}$$

$$k_2 = \frac{3.21 \cdot 10^7}{\varepsilon_0}$$

$$\eta = \frac{k_1}{0.29}$$

#### 2.5.4 מסקנות:

בניסוי זה בדקנו את תופעת תפוגת מאמצים באמצעות הפעלת כוח מתיחה על רצועת גומי (לבנה) כאשר המעוות קבוע. כמו כן, מאויר 10 קיבלנו עקומה אקספוננציאלית יורדת בזמן כפי שקיבלנו בדוח המכין מהחישוב התאורטי שמהווה פתרון למשוואה הדיפרנציאלית המתארת את מודל הSLS :

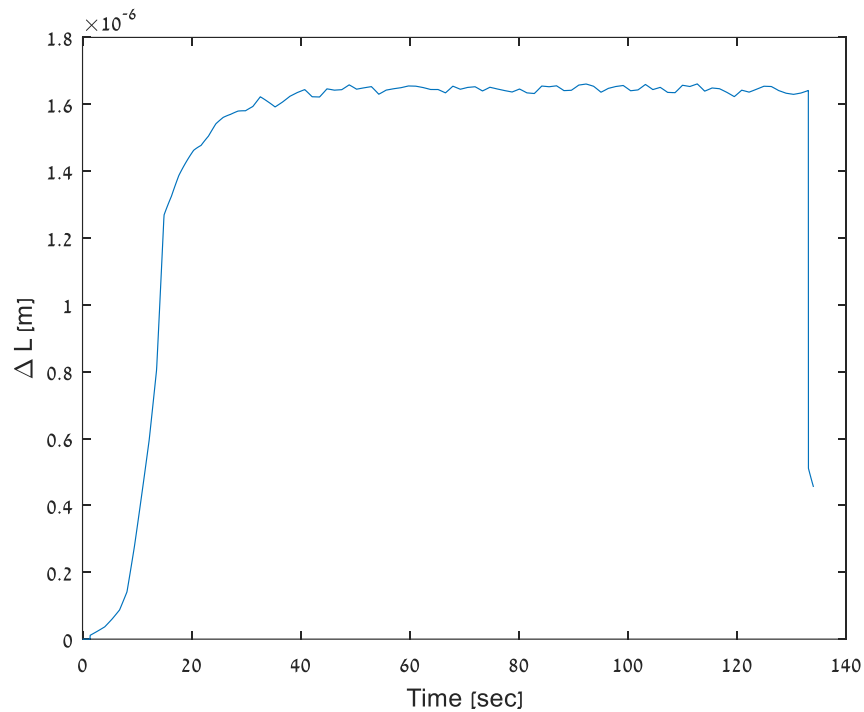
$$\frac{\dot{\sigma}}{k_1} + \frac{\sigma}{\eta} = \frac{k_2}{\eta} \cdot \varepsilon, \text{ כלומר } \dot{\varepsilon} = 0, \text{ כאשר מציבים } \frac{k_2}{\eta} \cdot \varepsilon + \left(1 + \frac{k_2}{k_1}\right) \cdot \dot{\varepsilon} = \frac{1}{\eta} \cdot \sigma + \frac{1}{k_1} \cdot \dot{\sigma}$$

כמו כן, מההתאמה למודל זה קיבלנו את הפרמטרים הבאים :

:  $3.21 \cdot 10^7 e^{-0.29t} + 9.588 \cdot 10^5 e^{-0.0004t}$  התואם לפתרון התאורטי שקיבלנו בדוח המכין :

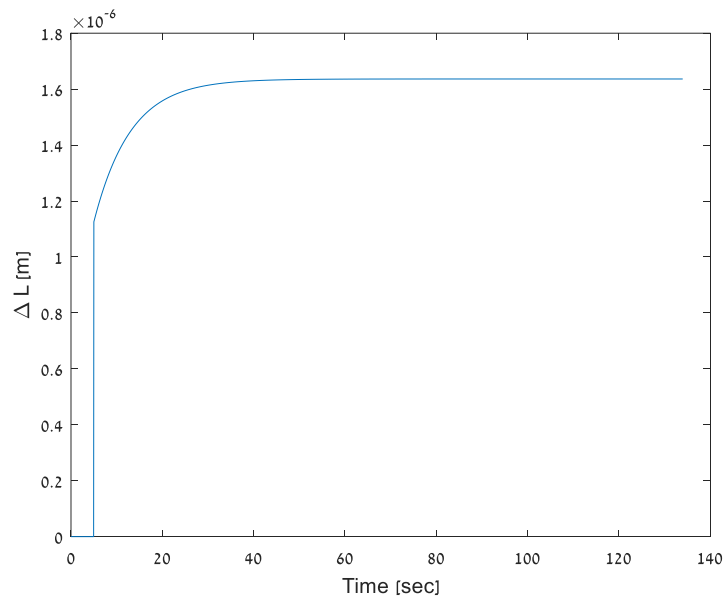
$$\sigma(t) = \varepsilon \cdot \left( k_2 + k_1 \exp\left(-\frac{k_1}{\eta} \cdot t\right) \right)$$

את גרף התארכות המודל כנגד הזמן אשר קיבלנו באמצעות בניית המודל בסימולניק:



איור 19 - גרף התארכות כנגד זמן מהסימולניק

עתה נציג את גרף התארכות המודל, כאשר אות הכניסה הינו אות קבוע מהסימולניק ולא נתונים שהתקבלו בניסוי.

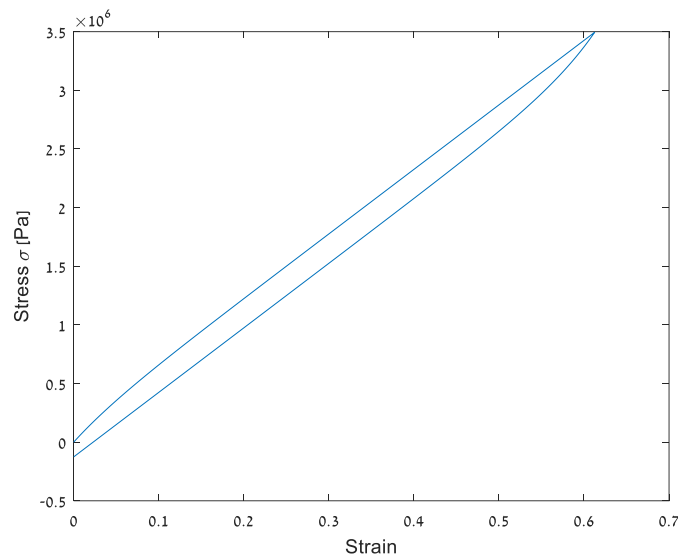


איור 20 - גרף התארכות המודל כתלות בכניסה קבועה בסימולניק

נשים לב כי קיבלנו גרפים דומים בצורתם ובקנה המידה, אך הגרף שהתקבל מכניסת תוצאות הניסוי הינו רועש לעומת הגרף שהתקבל עבור כניסה תאורטית של מאמץ קבוע. נציין כי בשני המקרים קיבלנו גרף המתאר את תופעת הזחילה אותה למדנו בדו"ח המכין.

### התמרות לפלס:

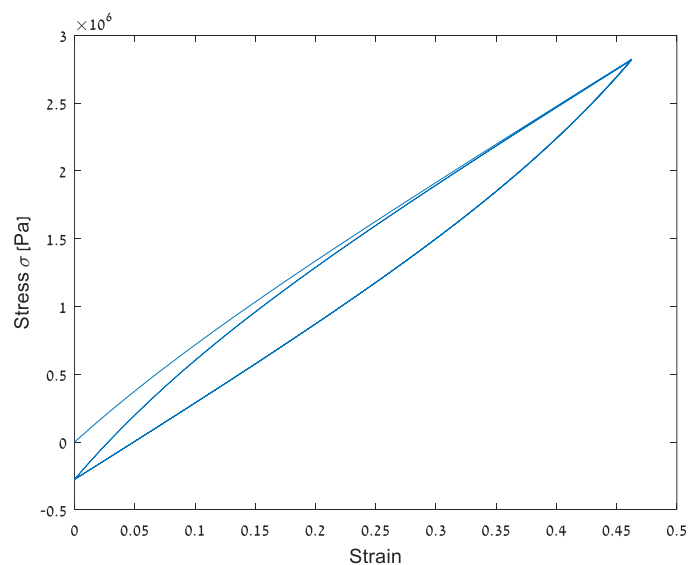
1. הכנסנו אות משולש בזמן כניסה לפונקציית התמסורת שבנינו בסימולינק.



איור 21 - עקומת מאמץ מעוות לכניסת משולש בודד בזמן

נשים לי כי הגרף שקיבלנו דומה מאוד לגרף אשר התקבל בניסוי עצמו. ההבדל היחיד שניתן להבחין בו הוא המרחק בין העקומות. נסביר מרחק זה בכך שההתארכות שהוכנסה אל מודל הסימולינק הינה כניסה אידאלית מושלמת, לעומת ההתארכות בניסוי שהייתה רק בקירוב במשולש בזמן.

2.

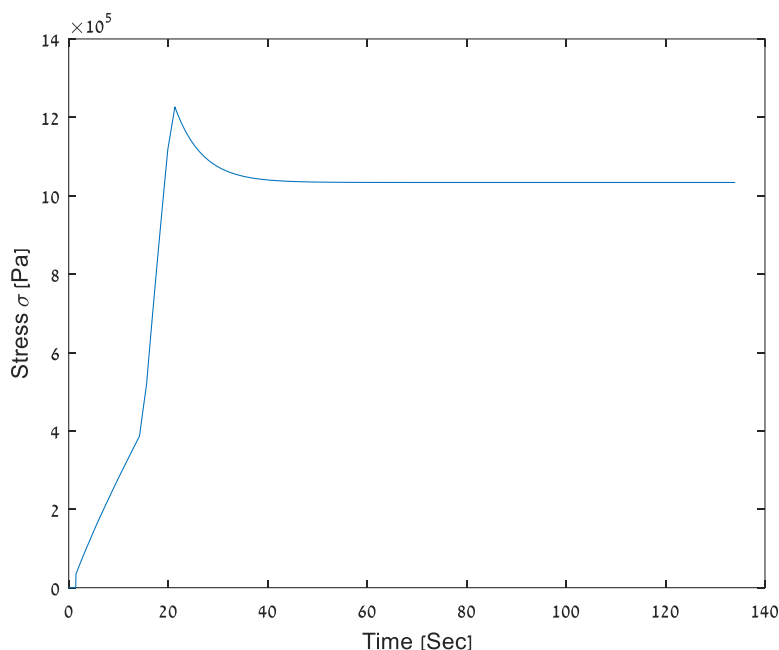


איור 22 - גרף מאמץ מעוות עבור כניסת 3 משולשים בזמן



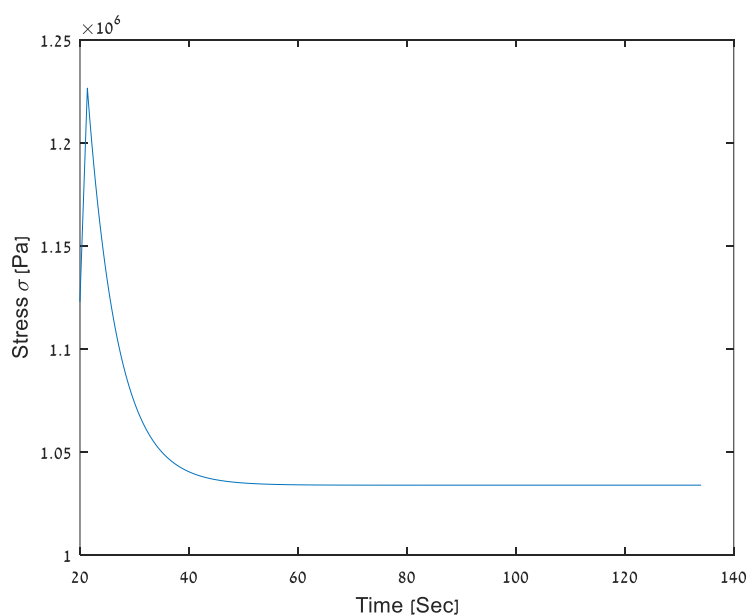
נשים לב כי גם כאן קיבלנו גרף דומה מאוד לגרף אשר קיבלנו בניסוי ההתניה המוקדמת. שכן, הכניסה שהכנסנו לפונקציית התמסורת הינה 3 משולשים בזמן כפי שהיה בניסוי התניה מוקדמת. כמו כן, מכיוון ששאלה 1 יצאה דומה לתוצאות הניסוי, הדבר אומר כי פונקציית התמסורת אשר כתבנו נכונה, וכל שנשאר לעשות הוא רק להכניס את הכניסה המתאימה. במקרה של שאלה זו, שלושה משולשים בגובה מקסימלי של 37 מ"מ. נציין שוב כי ההבדלים הקטנים הקיימים בין הגרפים נובעים מחוסר האידיאליות של הכניסה בעת ביצוע הניסוי.

3. סעיף א':



איור 23 - גרף מאמץ כתלות בזמן מנתוני הניסוי

ניתן לראות את גרף המאמץ כתלות בזמן. נציין כי תחילה הגומי לא היה מתוח ולכן יש עיוות בתחילת הניסוי. עתה נציג גרף המתאר את המאמץ כתלות בזמן אשר מתחיל מנקודת המתיחה של הגומי.

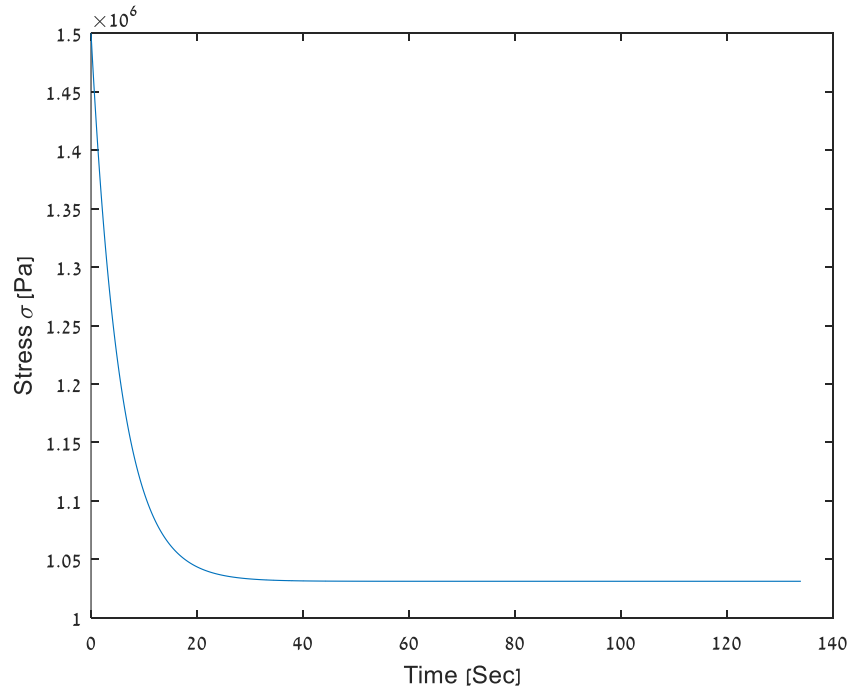


איור 24 - מאמץ כנגד זמן עבור ניסוי תפוגת מאמצים, מתוקן

נשים לב כי לאחר קטימת הזמנים הלא רלוונטים, קיבלנו גרף התואם לגרף המתאר מאמץ כנגד זמן לתפוגת מאמצים.

סעיף ב' :

נציג את הגרף שמתקבל עבור כניסת מדרגה בסימולינק.



איור 25 - מאמץ כנגד זמן עבור כניסת מדרגה

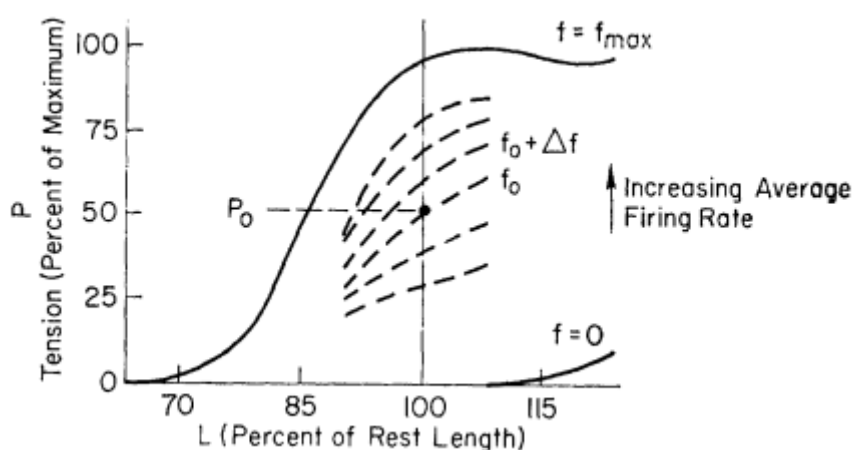
ניתן לראות כי הגרפים עבור כניסת מדרגה ועבור הכניסה המקורית מנתוני הניסוי דומים בצורתם, דומים בערך ההתכנסות, אך שונים בערך ההתחלתי. ככל הנראה השוני נובע מחוסר האידיאליות של מערכת הניסוי המקורי.

לסיכום, נוכל להסיק משאלות הסימולינק כי מודל ה-SLS אכן מתאר נכונה את החומר הויסקואלסטי, ובנוסף קבועי הקפיצים והמשככים שמצאנו בשאלה 3 התאימו והביאו לתוצאות קרובות לתוצאות הניסוי במעבדה. מטרת הסימולינק הייתה לאמת את התוצאות בעזרת מידול, להערכתנו תוצאות הניסוי אכן אומתו בעזרתו.

תשובה לשאלה 2:

כפי שראינו בדוח המכין, קולגן מעניק לרקמה את החוזק שלה ואלסטין את האלסטיות. באמצעות מודל ה-SLS ניתן למדל את הימצאותו של חלבון הקולגן באמצעות משכך ואת חלבון האלסטין באמצעות קפיץ. על ידי שילוב בטור ובמקביל של מספר רכיבים מסוגים אלה ניתן לקבל ביטוי להופעת כמויות שונות של הסיבים.

תשובה לשאלה 6:



איור 26 - Isometric tension-length curve [1]

ניתן לראות מאיור זה כי העקומה עבור שריר דומה לעקומת מאמץ מעוות של הגומי הלבן. שריר הינו סוג של רקמה וכפי שהסברנו בניסוי 1 הגומי הלבן הוא אלסטי ולכן מתאים לרקמה. כמו כן, ניתן לראות כי העקומה עבור שריר משתנה כתלות בתדירות ירי הנוירונים. מהגרף נסיק כי עבור  $f_0$  (בקירוב), נקבל עקומה המתואמת לעקומה של הגומי שקיבלנו בניסוי זה.

- [1] D. T. McRuer, R. E. Magdaleno, and G. P. Moore, "A Neuromuscular Actuation System Model," *IEEE Trans. Man-Mach. Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 61–71, Sep. 1968, doi: 10.1109/TMMS.1968.300039.

## 6 נספחים

טבלה ב' - תוצאות ניסוי 1, גומי לבן

Machine Extension (mm)	Load (N)	Time (s)
		0
0.020166	0.095367	0.511423
0.19697	0.095367	1.02285
0.37766	0.095367	1.53427
0.55726	0.16835	2.04569
0.73519	0.27006	2.55711
0.91592	0.37177	3.06854
1.0919	0.69603	3.57996
1.2696	0.99509	4.09138
1.451	1.2941	4.60281
1.6304	1.5932	5.11423
1.8094	1.8938	5.62565
1.9878	2.1955	6.13707
2.1682	2.4972	6.6485
2.3475	2.7989	7.15992
2.5246	3.1006	7.67134
2.7043	3.3659	8.18277
2.8845	3.6297	8.69419
3.0605	3.8936	9.20561
3.2428	4.1575	9.71703
3.42	4.4213	10.2285
3.5985	4.6852	10.7399
3.9385	5.2154	11.2513
4.7973	6.3542	11.7627
5.6479	7.4042	12.2741
6.5002	8.2975	12.7856
7.3516	9.145	13.297
8.2038	9.8661	13.8084
9.058	10.574	14.3198
9.9083	11.283	14.8313
10.762	11.855	15.3427
11.615	12.43	15.8541
12.468	13.03	16.3655
13.318	13.631	16.877
14.17	14.232	17.3884
15.024	14.851	17.8998
15.878	15.505	18.4112
16.728	16.16	18.9226
17.58	16.815	19.4341

18.433	17.475	19.9455
19.286	18.271	20.4569
20.138	19.067	20.9683
20.989	19.956	21.4798
21.843	21.073	21.9912
22.694	22.132	22.5026
23.547	23.242	23.014
24.399	24.49	23.5254
25.252	25.918	24.0369
26.103	27.479	24.5483
26.958	29.053	25.0597
27.808	30.781	25.5711
28.66	32.189	26.0826
29.514	33.528	26.594
30.365	34.725	27.1054
31.218	35.798	27.6168
32.07	36.556	28.1283
32.921	37.265	28.6397
33.775	37.975	29.1511
34.628	38.684	29.6625
35.481	39.394	30.1739
36.333	40.084	30.6854
37.183	40.753	31.1968
38.037	41.422	31.7082
38.891	42.091	32.2196
39.743	42.761	32.7311
40.596	43.432	33.2425
41.446	44.103	33.7539
42.301	44.774	34.2653
43.152	45.42	34.7768
44.003	46.056	35.2882
44.855	46.692	35.7996
45.71	47.328	36.311
46.561	47.952	36.8224
47.414	48.562	37.3339
48.265	49.172	37.8453
49.118	49.782	38.3567
49.969	50.392	38.8681
50.825	51.003	39.3796
51.675	51.613	39.891
52.53	52.223	40.4024
53.382	52.833	40.9138
54.235	53.443	41.4252
55.084	54.054	41.9367
55.937	54.58	42.4481
56.789	55.157	42.9595
57.641	55.735	43.4709

58.497	56.312	43.9824
59.349	56.889	44.4938
60.2	57.381	45.0052
61.052	57.899	45.5166
61.904	58.444	46.0281
62.756	58.99	46.5395
63.609	59.536	47.0509
64.463	60.081	47.5623
65.315	60.642	48.0737
66.168	61.206	48.5852
67.018	61.77	49.0966
67.87	62.335	49.608
68.724	62.899	50.1194
69.577		50.6309

**טבלה ג'- ניסוי 1, גומי שחור**

Machine Extension (mm)	Load (N)	Time (s)
		0
	0.022696	0.188546
3.76E-05	0.04563	0.377091
7.65E-05	0.068563	0.565637
0.021721	0.091497	0.754182
0.090628	0.11443	0.942728
0.15838	0.15593	1.13127
0.22193	0.21642	1.31982
0.28697	0.27692	1.50836
0.35565	0.33741	1.69691
0.41967	0.3979	1.88546
0.48741	0.4584	2.074
0.5517	0.51504	2.26255
0.61772	0.568	2.45109
0.68409	0.62097	2.63964
0.75096	0.67394	2.82818
0.81724	0.7269	3.01673
0.88355	0.77987	3.20528
0.94556	0.83283	3.39382
1.013	0.8858	3.58237
1.0803	0.93877	3.77091
1.1468	0.99173	3.95946
1.2134	1.0447	4.148
1.2781	1.0977	4.33655
1.3424	1.154	4.52509
1.407	1.2112	4.71364

1.4743	1.2684	4.90219
1.5416	1.3256	5.09073
1.6081	1.3828	5.27928
1.6741	1.4401	5.46782
1.7401	1.4973	5.65637
1.8061	1.5545	5.84491
1.8719	1.6105	6.03346
1.9377	1.6655	6.22201
2.0035	1.7204	6.41055
2.0693	1.7754	6.5991
2.1346	1.8303	6.78764
2.2012	1.8853	6.97619
2.2678	1.9402	7.16473
2.3346	1.9952	7.35328
2.4014	2.0501	7.54182
2.4674	2.1051	7.73037
2.5275	2.16	7.91892
2.5954	2.215	8.10746
2.6626	2.2699	8.29601
2.7287	2.3482	8.48455
2.7948	2.4272	8.6731
2.8609	2.5063	8.86164
2.9286	2.5853	9.05019
2.9969	2.6643	9.23874
3.0579	2.7433	9.42728
3.1259	2.8224	9.61583
3.194	2.9014	9.80437
3.2568	2.9804	9.99292
3.3227	3.0594	10.1815
3.3886	3.1385	10.37
3.4545	3.2175	10.5586
3.5204	3.3014	10.7471
3.5851	3.4108	10.9356
3.6534	3.5201	11.1242
3.7195	3.6295	11.3127
3.7856	3.7388	11.5013
3.8517	3.8482	11.6898
3.9178	3.9576	11.8784
3.9839	4.0669	12.0669
4.0482	4.1763	12.2555
4.1159	4.2857	12.444
4.1828	4.4351	12.6326
4.2494	4.5881	12.8211
4.3154	4.741	13.0096
4.3813	4.8939	13.1982
4.4473	5.0469	13.3867
4.5157	5.1998	13.5753



4.8128	6.5454	13.7638
5.1336	8.0596	13.9524
5.4483	9.5737	14.1409
5.7629	11.233	14.3295
6.0773	13.105	14.518
6.3904	15.33	14.7066
6.7035	17.578	14.8951
7.0171	19.883	15.0836
7.334	22.189	15.2722
7.6478	24.494	15.4607
7.9619	26.976	15.6493
8.2761	29.267	15.8378
8.5903	31.558	16.0264
8.9046	33.848	16.2149
9.2188	36.139	16.4035
9.5329	38.43	16.592
9.8462	40.721	16.7806
10.16	42.752	16.9691
10.476	44.739	17.1577
10.79	46.725	17.3462
11.104	48.565	17.5347
11.418	50.321	17.7233
11.733	51.871	17.9118
12.047	53.42	18.1004
12.361	54.483	18.2889
12.675	54.179	18.4775
12.993		18.666

## טבלה ד' - תוצאות ניסוי 2

Extension (mm)	Load (N)	Time (s)
		0
0.46599	0	0.918659
1.995	0.19612	1.83732
3.5284	0.77783	2.75598
5.0613	2.6257	3.67464
6.5903	6.2094	4.5933
8.1217	9.2698	5.51196
9.6522	11.974	6.43061
11.183	14.284	7.34927
12.715	16.315	8.26793
14.246	18.234	9.18659
15.776	20.153	10.1053
17.307	21.948	11.0239
18.839	23.692	11.9426

20.369	25.415	12.8612
21.902	27.032	13.7799
23.431	28.65	14.6985
24.964	30.273	15.6172
26.494	31.9	16.5359
28.024	33.43	17.4545
29.557	34.863	18.3732
31.087	36.284	19.2918
32.619	37.706	20.2105
34.148	39.123	21.1292
35.682	40.504	22.0478
37.214	41.886	22.9665
38.744	43.223	23.8851
40.276	44.549	24.8038
41.804	45.874	25.7225
43.334	47.137	26.6411
44.868	48.374	27.5598
46.397	49.611	28.4784
47.932	50.806	29.3971
49.464	51.96	30.3158
49.226	46.365	31.2344
47.694	38.623	32.1531
46.162	33.139	33.0717
44.63	29.173	33.9904
43.091	26.236	34.9091
41.561	23.92	35.8277
40.03	22.082	36.7464
38.497	20.47	37.665
36.965	19.104	38.5837
35.435	17.879	39.5023
33.903	16.797	40.421
32.371	15.909	41.3397
30.841	14.971	42.2583
29.31	14.105	43.177
27.78	13.255	44.0956
26.249	12.412	45.0143
24.717	11.633	45.933
23.186	10.855	46.8516
21.655	10.077	47.7703
20.123	9.2981	48.6889
18.593	8.4755	49.6076
17.065	7.6452	50.5263
15.53	6.5935	51.4449
14	5.381	52.3636
12.467	4.147	53.2822
10.94	2.7931	54.2009
9.4066	1.1405	55.1196

7.8746	0.35971	56.0382
6.3461	0.2868	56.9569
4.8136	0.22903	57.8755
3.2838	0.19742	58.7942
1.7501	0.30653	59.7129
0.21973	0.2893	60.6315
1.0933	0.33917	61.5502
2.6236	0.40485	62.4688
4.1539	0.47053	63.3875
5.6864	0.53622	64.3061
7.2158	0.63004	65.2248
8.7486	1.4903	66.1435
10.28	3.8758	67.0621
11.809	5.9909	67.9808
13.342	7.7435	68.8994
14.871	9.2029	69.8181
16.404	10.54	70.7368
17.935	11.615	71.6554
19.465	12.688	72.5741
20.997	13.72	73.4927
22.528	14.686	74.4114
24.059	15.596	75.3301
25.59	16.538	76.2487
27.121	17.48	77.1674
28.652	18.423	78.086
30.183	19.467	79.0047
31.715	20.557	79.9234
33.246	21.712	80.842
34.777	22.977	81.7607
36.306	24.368	82.6793
37.84	25.901	83.598
39.371	27.782	84.5167
40.9	29.707	85.4353
42.432	32.035	86.354
43.962	34.907	87.2726
45.493	38.2	88.1913
47.024	41.834	89.1099
48.556	45.861	90.0286
50.059		90.9473

**טבלה ה'- תוצאות ניסוי 3, 75%**

Time (s)	Load (N)	Extension (mm)
0		
1.60631	0	1.5093

3.21261	0	4.1856
4.81892	0.10522	6.8665
6.42523	0.37801	9.5411
8.03154	3.1237	12.22
9.63784	6.8069	14.896
11.2442	9.567	17.572
12.8505	11.843	20.248
14.4568	13.937	22.927
16.0631	15.881	25.603
17.6694	18.312	28.28
19.2757	21.574	30.959
20.882	25.807	33.635
22.4883	30.277	36.314
24.0946	25.829	36.223
25.7009	19.643	33.546
27.3072	16.052	30.862
28.9135	13.696	28.185
30.5198	11.681	25.509
32.1261	9.8393	22.832
33.7325	7.9979	20.156
35.3388	6.0343	17.477
36.9451	3.7042	14.799
38.5514	0.62928	12.123
40.1577	-0.06429	9.4461
41.764	-0.12489	6.7705
43.3703	-0.20366	4.0922
44.9766	-0.08494	1.4126
46.5829	-0.04348	1.0464
48.1892	0.047012	3.7211
49.7955	0.1375	6.4011
51.4018	0.29688	9.0771
53.0081	0.96698	11.753
54.6144	4.9253	14.429
56.2208	7.8906	17.11
57.8271	10.239	19.785
59.4334	12.347	22.463
61.0397	14.206	25.14
62.646	16.278	27.818
64.2523	18.657	30.493
65.8586	21.768	33.169
67.4649	26.74	35.848
69.0712	26.919	36.692
70.6775	19.984	34.01
72.2838	16.371	31.329
73.8901	13.966	28.651
75.4964	11.87	25.97
77.1027	10.029	23.296

78.7091	8.1886	20.617
80.3154	6.2963	17.94
81.9217	3.9337	15.264
83.528	1.179	12.586
85.1343	0.083665	9.911
86.7406	-0.03249	7.2295
88.3469	-0.05571	4.5568
89.9532	-0.07892	1.8822
91.5595	-0.09203	0.58433
93.1658	-0.01904	3.2605
94.7721	0.053945	5.9358
96.3784	0.12693	8.6145
97.9847	0.69608	11.291
99.591	4.2114	13.968
101.197	7.36	16.645
102.804	9.7355	19.323
104.41	11.759	21.998
106.016	13.747	24.677
107.623	15.655	27.353
109.229	17.821	30.031
110.835	20.624	32.707
112.442	24.819	35.383
114.048	28.478	37.168
115.654	20.733	34.489
117.26	16.761	31.812
118.867	14.174	29.134
120.473	12.151	26.455
122.079	10.333	23.773
123.686	8.467	21.103
125.292	6.5419	18.419
126.898	4.3294	15.747
128.505	1.7704	13.066
130.111	0.07666	10.393
131.717	-0.03095	7.7146
133.323	-0.05327	5.0376
134.93	-0.07558	2.3598
136.536	-0.09239	0.095075
138.142	-0.03536	2.7782
139.749	0.021681	5.4581
141.355	0.078717	8.1363
142.961	0.29196	10.813
144.568	3.5579	13.49
146.174	6.9088	16.166
147.78	9.2407	18.844
149.387	11.379	21.521
150.993	13.288	24.199
152.599	15.023	26.876

154.205	17.15	29.551
155.812	19.814	32.229
157.418	23.447	34.905
159.024		37.557

**טבלה ו'- תוצאות ניסוי 3, 125%**

Time (s)	Load (N)	Extension (mm)
0		
1.90698	0.022907	1.9812
3.81396	0.14469	5.1587
5.72094	0.27484	8.3364
7.62792	0.68563	11.517
9.5349	5.1601	14.694
11.4419	8.4484	17.873
13.3489	11.007	21.051
15.2558	13.04	24.23
17.1628	15.285	27.406
19.0698	17.656	30.585
20.9768	20.777	33.764
22.8838	25.904	36.942
24.7907	33.319	40.119
26.6977	37.376	43.299
28.6047	40.433	46.479
30.5117	43.367	49.655
32.4187	46.032	52.836
34.3256	48.706	56.013
36.2326	51.398	59.194
38.1396	54.064	62.372
40.0466	38.733	59.667
41.9536	29.784	56.487
43.8605	24.719	53.304
45.7675	21.166	50.126
47.6745	18.575	46.947
49.5815	16.492	43.766
51.4885	14.761	40.588
53.3954	13.292	37.41
55.3024	11.861	34.232
57.2094	10.563	31.054
59.1164	9.2349	27.875
61.0234	7.8514	24.699
62.9303	6.2661	21.519
64.8373	4.2575	18.341
66.7443	1.8864	15.163
68.6513	0.13723	11.983

70.5583	0.10571	8.8053
72.4652	0.07419	5.634
74.3722	0.04267	2.4494
76.2792	-0.07668	0.51148
78.1862	-0.0158	3.687
80.0932	0.045088	6.865
82.0001	0.32693	10.045
83.9071	1.059	13.222
85.8141	5.2005	16.399
87.7211	8.1525	19.579
89.6281	10.413	22.758
91.535	12.248	25.934
93.442	13.798	29.113
95.349	15.475	32.291
97.256	17.236	35.471
99.163	18.997	38.65
101.07	20.976	41.825
102.977	23.275	45.007
104.884	26.036	48.183
106.791	29.445	51.361
108.698	34.081	54.538
110.605	40.177	57.721
112.512	47.868	60.899
114.419	43.398	61.14
116.326	32.402	57.959
118.233	26.036	54.775
120.14	22.078	51.6
122.047	19.162	48.416
123.954	17.076	45.24
125.861	15.271	42.066
127.768	13.867	38.883
129.675	12.488	35.701
131.582	11.007	32.524
133.489	9.6711	29.345
135.396	8.2645	26.167
137.303	6.7731	22.992
139.21	5.017	19.81
141.117	2.8492	16.637
143.023	0.22153	13.453
144.93	0.029481	10.283
146.837	2.64E-05	7.0997
148.744	1.43E-05	3.9258
150.651	2.14E-06	0.73986
152.558	0.16912	2.2174
154.465	0.25611	5.3967
156.372	0.34309	8.5755
158.279	0.54795	11.753

160.186	3.1635	14.93
162.093	6.6903	18.109
164	9.1484	21.286
165.907	11.059	24.464
167.814	12.68	27.645
169.721	14.235	30.821
171.628	15.793	34.001
173.535	17.388	37.177
175.442	19.17	40.356
177.349	21.083	43.534
179.256	23.44	46.713
181.163	26.198	49.895
183.07	29.712	53.071
184.977	34.64	56.249
186.884	41.421	59.431
188.791	49.483	

#### **טבלה ז'- תוצאות ניסוי 4**

Machine Extension (mm)	Load (N)	Time (s)
		0
0.2748	0.089538	1.35774
0.74944	0.1792	2.71548
1.2221	0.2707	4.07321
1.6987	0.43759	5.43095
2.1767	0.62305	6.78869
2.6499	1.0095	8.14643
3.1279	2.0013	9.50416
3.604	3.107	10.8619
4.0776	4.2045	12.2196
4.6734	5.6231	13.5774
6.2347	8.9301	14.9351
6.3973	8.9368	16.2929
6.463	9.0542	17.6506
6.485	9.0571	19.0083
6.5331	9.06	20.3661
6.5345	8.95	21.7238
6.5392	8.9836	23.0815
6.58	9.1129	24.4393
6.5717	9.1225	25.797
6.6186	9.0752	27.1548
6.6239	9.0537	28.5125
6.6335	8.9805	29.8702
6.6244	9.0173	31.228



6.6213	9.1845	32.5857
6.6185	9.0171	33.9434
6.5922	8.8553	35.3012
6.6423	8.9464	36.6589
6.6486	9.0554	38.0167
6.6698	9.1148	39.3744
6.6607	9.156	40.7321
6.6511	8.9655	42.0899
6.6728	8.9508	43.4476
6.6735	9.1319	44.8053
6.692	9.0845	46.1631
6.6836	9.084	47.5208
6.6819	9.186	48.8786
6.6827	9.0714	50.2363
6.7118	9.0978	51.594
6.7042	9.1197	52.9518
6.7117	8.9376	54.3095
6.7152	9.0389	55.6672
6.7136	9.0687	57.025
6.7275	9.0906	58.3827
6.7326	9.1262	59.7405
6.7319	9.1157	61.0982
6.7122	9.0793	62.4559
6.7405	9.0341	63.8137
6.7324	9.0358	65.1714
6.7302	8.9601	66.5291
6.751	9.1203	67.8869
6.7443	9.0444	69.2446
6.7221	9.0872	70.6024
6.7415	9.1005	71.9601
6.735	9.0008	73.3178
6.7568	9.0902	74.6756
6.7589	9.048	76.0333
6.7383	9.0117	77.391
6.698	8.9821	78.7488
6.7598	9.0554	80.1065
6.7455	8.9654	81.4643
6.7601	8.9554	82.822
6.7718	9.1323	84.1797
6.7523	9.1093	85.5375
6.7705	9.126	86.8952
6.7216	9.0104	88.2529
6.7994	9.0212	89.6107
6.7627	9.143	90.9684
6.77	9.1618	92.3262
6.7692	9.1038	93.6839
6.7355	8.9643	95.0416

6.7899	9.0613	96.3994
6.7741	9.1039	97.7571
6.7729	9.1247	99.1148
6.7896	9.0001	100.473
6.779	9.0248	101.83
6.78	9.1528	103.188
6.7821	9.0286	104.546
6.7676	9.0827	105.904
6.7856	8.9655	107.261
6.7909	8.9655	108.619
6.7847	9.1418	109.977
6.8044	9.1072	111.334
6.7901	9.164	112.692
6.7918	8.99	114.05
6.8184	9.069	115.408
6.8085	9.0517	116.765
6.7958	8.9684	118.123
6.7813	8.8759	119.481
6.8387	9.0359	120.839
6.7925	8.9897	122.196
6.7987	9.0588	123.554
6.8054	9.1255	124.912
6.7878	9.1127	126.27
6.7845	9.0142	127.627
6.7772	8.9557	128.985
6.7859	8.9354	130.343
6.8239	8.9724	131.701
6.8104	9.0333	133.058
6.8174		134.416

#### טבלה ח' - תוצאות ניסוי 5

Machine Extension (mm)	Load (N)	Time (s)
		0
0.33604	0.065964	1.42366
0.83408	0.13202	2.84732
1.327	0.20393	4.27098
1.834	0.32316	5.69464
2.3291	0.44238	7.1183
2.8293	0.80306	8.54196
3.3309	1.5404	9.96562
3.8273	2.7537	11.3893
4.3236	3.9493	12.8129
4.8207	5.0824	14.2366

6.3298	8.2449	15.6603
8.7081	13.247	17.0839
11.081	16.487	18.5076
13.456	19.238	19.9312
15.034	19.998	21.3549
15.034	19.434	22.7786
15.037	19.181	24.2022
15.037	19.038	25.6259
15.037	18.918	27.0495
15.037	18.798	28.4732
15.037	18.773	29.8969
15.037	18.748	31.3205
15.037	18.723	32.7442
15.037	18.698	34.1679
15.037	18.672	35.5915
15.037	18.647	37.0152
15.037	18.531	38.4388
15.037	18.663	39.8625
15.037	18.641	41.2862
15.037	18.619	42.7098
15.037	18.598	44.1335
15.037	18.576	45.5571
15.037	18.554	46.9808
15.037	18.532	48.4045
15.037	18.471	49.8281
15.037	18.46	51.2518
15.037	18.45	52.6754
15.037	18.439	54.0991
15.037	18.429	55.5228
15.037	18.418	56.9464
15.037	18.408	58.3701
15.037	18.279	59.7937
15.037	18.279	61.2174
15.037	18.279	62.6411
15.037	18.18	64.0647
15.037	18.294	65.4884
15.037	18.279	66.912
15.037	18.279	68.3357
15.037	18.279	69.7594
15.037	18.279	71.183
15.037	18.279	72.6067
15.037	18.279	74.0303
15.037	18.279	75.454
15.037	18.279	76.8777
15.037	18.279	78.3013
15.037	18.279	79.725
15.037	18.279	81.1486

15.037	18.279	82.5723
15.037	18.279	83.996
15.037	18.113	85.4196
15.037	18.039	86.8433
15.037	18.124	88.2669
15.037	18.146	89.6906
15.037	18.151	91.1143
15.037	18.17	92.5379
15.037	18.197	93.9616
15.037	18.186	95.3852
15.037	18.174	96.8089
15.037	18.163	98.2326
15.037	18.151	99.6562
15.037	18.14	101.08
15.037	18.129	102.504
15.037	18.117	103.927
15.037	18.007	105.351
15.037	17.931	106.775
15.037	18.058	108.198
15.037	17.95	109.622
15.037	17.93	111.046
15.037	17.909	112.469
15.037	17.889	113.893
15.037	17.868	115.316
15.037	17.848	116.74
15.037	17.834	118.164
15.037	17.834	119.587
15.037	17.834	121.011
15.037	17.834	122.435
15.037	17.834	123.858
15.037	17.834	125.282
15.037	17.834	126.706
15.037	17.834	128.129
15.037	17.844	129.553
15.037	17.886	130.977
15.037	17.968	132.4
15.037	17.934	133.824
15.037	17.837	135.248
15.037	17.788	136.671
15.037	17.96	138.095
15.037	17.925	139.519
15.037		140.942

טבלה ט' - תוצאות עבור עור

Extension (mm)	Extension Before Compensation (mm)	Load (N)	Time (s)
-0.0223	4.6742	-0.2365	0.2343
0.007003	4.7035	-0.15919	0.4687
0.007086	4.7036	-0.08188	0.703
0.28801	4.9846	0.4711	0.9373
0.67586	5.3724	1.6202	1.172
1.0684	5.7649	3.259	1.406
1.4574	6.1539	4.7969	1.64
1.8494	6.546	6.4019	1.875
2.2385	6.9351	8.1846	2.109
2.6322	7.3287	10.166	2.343
3.0205	7.717	12.401	2.578
3.4109	8.1075	15.069	2.812
3.8014	8.4979	18.076	3.046
4.1947	8.8912	21.47	3.281
4.3679	9.0645	23.212	3.515
3.9847	8.6812	15.871	3.749
3.7266	8.4231	12.245	3.984
3.3299	8.0264	7.6759	4.218
2.9342	7.6307	4.9086	4.452
2.5423	7.2389	2.5709	4.687
2.1505	6.847	0.87775	4.921
1.7583	6.4549	0.043728	5.155
1.366	6.0626	-0.66255	5.389
0.97416	5.6707	-0.69138	5.624
0.58372	5.2803	-0.82808	5.858
0.19269	4.8892	-0.96477	6.092
-0.01933	4.6772	-1.1625	6.327
0.36898	5.0655	-1.0197	6.561
0.63033	5.3269	-0.87682	6.795
1.0219	5.7184	-0.68111	7.03
1.4134	6.11	-0.19057	7.264
1.805	6.5015	0.80488	7.498
2.1965	6.8931	1.9628	7.733
2.5899	7.2864	3.8504	7.967
2.9831	7.6796	6.1541	8.201
3.3736	8.0701	9.3975	8.436
3.7641	8.4607	13.229	8.67
4.1573	8.8539	17.731	8.904
4.3959	9.0924	21.432	9.139
4.0153	8.7119	14.992	9.373
3.7486	8.4452	10.816	9.607

3.3525	8.0491	7.558	9.842
2.9623	7.6589	4.4368	10.08
2.5719	7.2684	2.4722	10.31
2.1808	6.8774	0.95907	10.54
1.7877	6.4842	0.13807	10.78
1.3999	6.0964	-0.44233	11.01
1.01	5.7065	-0.66585	11.25
0.61917	5.3157	-0.88938	11.48
0.22695	4.9235	-1.0645	11.72
-0.04447	4.6521	-1.1284	11.95
0.34108	5.0376	-1.0613	12.18
0.60529	5.3018	-0.99411	12.42
0.99605	5.6926	-0.79327	12.65
1.3868	6.0834	-0.28751	12.89
1.7776	6.4741	0.21826	13.12
2.1684	6.8649	1.2821	13.36
2.5591	7.2557	2.9842	13.59
2.9499	7.6464	5.1131	13.83
3.3468	8.0433	8.0783	14.06
3.7374	8.434	11.694	14.29
4.1271	8.8236	16.114	14.53
4.4176	9.1142	20.352	14.76
4.0529	8.7495	14.565	15
3.7816	8.4782	10.734	15.23
3.3886	8.0851	7.1686	15.47
2.9955	7.6921	4.402	15.7
2.6025	7.299	2.1788	15.93
2.2103	6.9069	0.99025	16.17
1.8198	6.5164	-0.03084	16.4
1.4293	6.1258	-0.43826	16.64
1.0393	5.7359	-0.68195	16.87
0.64974	5.3463	-0.92565	17.11
0.25671	4.9533	-1.043	17.34
-0.06157	4.635	-1.0965	17.57
0.30897	5.0055	-1.0071	17.81
0.5735	5.27	-0.90775	18.04
0.96502	5.6616	-0.80837	18.28
1.3565	6.0531	-0.44804	18.51
1.7481	6.4446	-0.02424	18.75
2.1396	6.8361	0.94727	18.98
2.526	7.2225	2.3857	19.21
2.9169	7.6135	4.3922	19.45
3.309	8.0056	7.1118	19.68
3.6977	8.3943	10.551	19.92
4.0917	8.7883	14.748	20.15
4.4295	9.1261	19.579	20.39
4.0865	8.783	14.677	20.62

3.8041	8.5007	10.083	20.85
3.4308	8.1273	7.0353	21.09
3.0351	7.7316	4.1835	21.32
2.6417	7.3383	2.0914	21.56
2.251	6.9476	0.86786	21.79
1.8604	6.5569	-0.05537	22.03
1.4697	6.1662	-0.48632	22.26
1.0741	5.7706	-0.77856	22.5
0.68457	5.3811	-1.0429	22.73
0.29546	4.992	-1.0969	22.96

**טבלה י'- תוצאות עבור גיד**

Extension (mm)	Extension Before Compensation (mm)	Load (N)	Time (s)
-0.00393	0	0	0.1591
-0.00195	0.001982	0	0.3181
-7.9E-05	0.003852	0	0.4772
-3.4E-05	0.003897	0	0.6362
0.007542	0.011473	0	0.7953
0.25092	0.25485	0.44274	0.9544
0.51757	0.5215	1.7313	1.113
0.78115	0.78508	3.57	1.272
1.0471	1.051	6.0967	1.432
1.3123	1.3162	9.1593	1.591
1.5785	1.5825	12.79	1.75
1.8439	1.8478	16.395	1.909
2.1073	2.1112	19.987	2.068
2.3758	2.3797	23.58	2.227
2.6391	2.643	27.059	2.386
2.8692	2.8732	30.241	2.545
2.683	2.6869	24.956	2.704
2.4148	2.4188	17.577	2.863
2.2789	2.2828	14.014	3.022
2.0129	2.0168	9.9551	3.181
1.7469	1.7508	6.3394	3.34
1.4809	1.4848	4.0641	3.499
1.2149	1.2188	1.8378	3.658
0.94891	0.95284	1.0944	3.817
0.6755	0.67943	0.35105	3.977
0.41023	0.41416	-0.06621	4.136
0.14497	0.1489	-0.14434	4.295
-0.06482	-0.06089	-0.22248	4.454

0.15424	0.15818	-0.16083	4.613
0.42528	0.42921	-0.08028	4.772
0.55967	0.5636	0.16589	4.931
0.82659	0.83052	0.97949	5.09
1.0935	1.0974	2.2337	5.249
1.3604	1.3644	4.3858	5.408
1.6274	1.6313	7.2526	5.567
1.8939	1.8979	10.768	5.726
2.1586	2.1625	14.819	5.885
2.4232	2.4271	19.203	6.044
2.6879	2.6918	24.17	6.203
2.8607	2.8647	27.805	6.362
2.626	2.6299	21.478	6.522
2.4253	2.4292	15.327	6.681
2.2227	2.2267	12.224	6.84
1.9571	1.961	8.0144	6.999
1.6915	1.6954	5.1753	7.158
1.4258	1.4298	3.0036	7.317
1.1602	1.1641	1.5424	7.476
0.89455	0.89848	0.86762	7.635
0.62221	0.62615	0.19288	7.794
0.35632	0.36025	0.000657	7.953
0.090969	0.0949	-0.09167	8.112
-0.03538	-0.03145	-0.15712	8.271
0.22383	0.22776	-0.12333	8.43
0.42097	0.4249	-0.08953	8.589
0.62516	0.62909	0.12511	8.748
0.89363	0.89756	0.79465	8.907
1.1621	1.166	2.0867	9.066
1.4306	1.4345	4.3328	9.226
1.6958	1.6997	6.9654	9.385
1.9607	1.9646	10.339	9.544
2.2256	2.2296	14.457	9.703
2.4906	2.4945	18.953	9.862
2.7555	2.7594	23.758	10.02
2.8309	2.8348	25.682	10.18
2.5699	2.5738	18.916	10.34
2.337	2.3409	13.28	10.5
2.1509	2.1548	10.051	10.66
1.8816	1.8855	6.4312	10.82
1.6123	1.6162	3.7057	10.98
1.3469	1.3509	1.962	11.13
1.0844	1.0883	0.70067	11.29
0.82122	0.82515	0.21648	11.45
0.55647	0.5604	-0.26771	11.61
0.29172	0.29565	-0.39397	11.77
0.026966	0.030896	-0.31775	11.93



0.014446	0.018377	-0.25388	12.09
0.28967	0.29361	-0.21889	12.25
0.55496	0.55889	-0.18391	12.41
0.69463	0.69856	0.38085	12.57
0.96116	0.96509	0.93807	12.72
1.2277	1.2316	2.2354	12.88
1.4942	1.4982	4.4061	13.04
1.7608	1.7647	7.0012	13.2
2.0273	2.0312	10.404	13.36
2.2938	2.2978	14.476	13.52
2.5574	2.5614	19.278	13.68
2.8198	2.8237	24.149	13.84
2.7782	2.7822	23.772	14
2.5034	2.5073	16.25	14.16
2.2405	2.2445	11.297	14.32
2.0942	2.0981	8.2973	14.47
1.8284	1.8323	5.6963	14.63
1.5626	1.5665	2.9532	14.79
1.2968	1.3007	1.8134	14.95
1.031	1.0349	0.75943	15.11
0.76488	0.76881	0.2033	15.27
0.49725	0.50118	0.11051	15.43
0.22964	0.23357	0.017721	15.59

## 6.1 Contents

- Creep Confi\_Bounds
- Stress Relaxation Confi\_Bounds

```
%Exp 1
White_Data = readtable('WRP2B.xlsx');
Black_Data = readtable('BRP2B.xlsx');

A_White = 9.66*2.07*10^-6; % white rubber surface
A_Black = 9.96*2.12*10^-6; % black rubber surface
L0_White = 80;
L0_Black = 80.43;

W_sigma = White_Data.Load_N/A_White;
B_sigma = Black_Data.Load_N/A_Black;

W_epsilon = White_Data.MachineExtension_mm_/L0_White;
B_epsilon = Black_Data.MachineExtension_mm_/L0_Black;

figure
plot(W_epsilon,W_sigma);
xlabel 'Strain'
ylabel 'Stress [Pa]'

figure
plot(B_epsilon,B_sigma)
xlabel 'Strain'
ylabel 'Stress [Pa]';

[~,maxIn] = max(B_epsilon);
Max_B_sigma = B_sigma(99);
set(0,'defaultAxesFontSize',14);
```

## 6.2 Creep Confi Bounds

```
a1 = 0.08316 ; b1 = 0.0002405 ; c1 = -0.0158 ; d1 = -0.09901;

a2 = 0.08266 ; b2 = 0.0001774 ; c2 = -0.03615 ; d2 = -0.1469;

a = 0.08291 ; b = 0.000209 ; c = -0.02598 ; d = -0.123;

max = @(x) a1*exp(b1*x)+c1*exp(d1*x);

min = @(x) a2*exp(b2*x)+c2*exp(d2*x);

model = @(x) a*exp(b*x)+c*exp(d*x);

x=15:0.1:140;
```

```

max_plot = max(x);

min_plot = min(x);

model_plot = model(x);


Rubber_Surface = 9.66*2.04;


Creep = readtable('Rubber.xlsx','sheet','Creep');

Creep.Stress = Creep.Stress/Rubber_Surface*10^6;
Creep.Strain = Creep.Strain / 80;

Ylabel = 'Strain';
Xlabel = 'Time [s]';

plot(Creep.Time(12:end), Creep.Strain(12:end), '.');
hold on
plot(x,max_plot,x,min_plot,x,model_plot);
legend('Data', 'Upper curve', 'Bottom curve', 'Model SLS');
xlabel(Xlabel); ylabel(Ylabel);

```

## 6.3 Stress Relaxation Confi Bounds

```

a1 = 7.494e7 ; b1 = -0.353 ; c1 = 9.615e5 ; d1 = -0.0004115;

a2 = -1.075e7 ; b2 = -0.2322; c2 = 9.562e5 ; d2 = -0.0004714;

a = 3.21e7 ; b = -0.2926 ; c = 9.588e5 ; d = -0.0004414;


SR = readtable('Rubber.xlsx','sheet','SR');
SR.Stress = SR.Stress/Rubber_Surface*10^6;
SR.Strain = SR.Strain / 80;

max = @(x) a1*exp(b1*x)+c1*exp(d1*x);
min = @(x) a2*exp(b2*x)+c2*exp(d2*x);
model = @(x) a*exp(b*x)+c*exp(d*x);
x=15:0.1:140;

max_plot = max(x);
min_plot = min(x);
model_plot = model(x);

Ylabel = 'Stress [Pa]'; Xlabel = 'Time [s]';

```

```

plot(SR.Time(10:end), SR.Stress(10:end), '.');
hold on
plot(x,max_plot,x,min_plot,x,model_plot);
legend('Data' , 'Upper curve','Bottom curve','Model SLS');
xlim([40 140]);
xlabel(Xlabel); ylabel(Ylabel);
%simulink

Creep = readtable('Creep.xlsx');
Creep_Stress = Creep.Load_N_;
Creep_t = Creep.Time_s_;

t = 0:0.001:134;
New_Stress = interp1(Creep_t,Creep_Stress,t);
Var.time = [t'];
Var.signals.values = [New_Stress'];
Var.signals.values(isnan(Var.signals.values)) = 0;

output = sim('Simulink_Exp1');

figure
plot(output.simout.Time,output.simout.Data);
xlabel 'Time [sec]'
ylabel '\Delta L [m]'

figure
plot(output.ConstForce.Time,output.ConstForce.Data);
xlabel 'Time [sec]'
ylabel '\Delta L [m]'
%Q1
time = 0:0.001:134;
tri = [0 49/80 0];
x = 0:67:134;
tri = interp1(x, tri , time);
tri(isnan(tri)) = 0;
triangle.time = time';
triangle.signals.values = tri';

%Q2
x1 = 0:67/3:134;
P_tri = [0 37/80 0 37/80 0 37/80 0];
P_tri = interp1(x1 , P_tri , time);
P_tri(isnan(P_tri)) = 0;
P_triangle.time = time';
P_triangle.signals.values = P_tri';

%Q3

surface = 9.66*2.04;
SR_WR = readtable('SR WR.xlsx');
Mach_Ext = SR_WR.MachineExtension_mm_./80;
SR_Time = SR_WR.Time_s_;

```

```

Mach_Ext = interp1(SR_Time, Mach_Ext, time);
Mach_Ext(isnan(Mach_Ext)) = 0;
SR.time = time';
SR.signals.values = Mach_Ext';

Stress_triangle = sim('Laplace',time);

Stress_Data = Stress_triangle.Stress.Data;
P_Stress_Data = Stress_triangle.P_Stress.Data;
SR_Output = Stress_triangle.SR_Output.Data;
Simu_SR_Output = Stress_triangle.Simu_SR_Output.Data;

figure
plot(tri , Stress_Data');
xlabel 'Strain'
ylabel 'Stress \sigma [Pa]'

figure
plot(P_tri,P_Stress_Data');
xlabel 'Strain'
ylabel 'Stress \sigma [Pa]'

figure
plot(time,SR_Output);
xlabel 'Time [Sec]'
ylabel 'Stress \sigma [Pa]'

figure
plot(time,Simu_SR_Output);
xlabel 'Time [Sec]'
ylabel 'Stress \sigma [Pa]'

figure
plot(time,SR_Output);
xlabel 'Time [Sec]'
ylabel 'Stress \sigma [Pa]'
xlim([20 140]);

```

*Published with MATLAB® R2019a*