

מחלקה להנדסה מכנית

שם הפרויקט: מחקר: "הדפסת 4D חקר פולימרים  
 מוליבי חשמל"

Project Name: Research: 4D Printing  
Research of conductibility in 4D polymers

ספר הפרויקט – Final Year Project Report

שם הסטודנט: עמייחי עמרם

מספר תעודה זהות: 313442659

שם הסטודנט: מתן פיגנבלט

מספר תעודה זהות: 308248251

שם המנחה: פרופ' עדין שטרן

תאריך ההגשה: 9.6.2023

אישור מנהה:



## תוכן עניינים

<b>3 .....</b>	<b>תוכן עניינים.....</b>	
<b>5 .....</b>	<b>רישום תМОנות.....</b>	
<b>6 .....</b>	<b>רישום טבלאות.....</b>	
<b>7 .....</b>	<b>תקציר מנהליים .....</b>	<b>1</b>
<b>10.....</b>	<b>EXECUTIVE SUMMARY</b>	<b>2</b>
<b>13.....</b>	<b>מילון מונחים.....</b>	<b>3</b>
13.....	ריבוד .....	3.1
13.....	שיטת הדפסה – FFF –	3.2
13.....	הדפסה ב-4 ממדים	3.3
13.....	פולימר .....	3.4
13.....	PLA - חומצה פולקלית	3.5
14.....	פחמן שחור .....	3.6
14.....	מערכת צירים .....	3.7
14.....	מצב הדפסה .....	3.8
14.....	צורת מילוי .....	3.9
14.....	תוуб (INSERT) .....	3.10
14.....	תקן – ASTM D7264 .....	3.11
14.....	תקן – ASTM D695 .....	3.12
<b>15.....</b>	<b>הקדמה .....</b>	<b>4</b>
15.....	רקע מדעי .....	4.1
18.....	שלבי תהליך הדפסה התמל ממדית .....	4.2
19.....	חומרים הדפסה .....	4.3
20.....	בחירה הפולימר .....	4.4
20.....	<i>Electrically conductive composite PLA</i> .....	4.4.1
20.....	<i>ABS-EC filament 3D</i> .....	4.4.2
20.....	<i>Conductive Graphene Filament</i> .....	4.4.3
22.....	מוסיבציה .....	4.5
22.....	מדדים .....	4.6
22.....	מטרות .....	4.7
22.....	יעדים .....	4.8
<b>23.....</b>	<b>ספר ספורות ביורוטי מוחרב .....</b>	<b>5</b>
23.....	[1]DIRECT 4D PRINTING VIA ACTIVE COMPOSITE MATERIALS .....	5.1
24.....	[2]A REVIEW OF 4D PRINTING .....	5.2
24.....	[3]CONDUCTIVE 3D PRINTED PLA COMPOSITES: ON THE INTERPLAY OF MECHANICAL, ELECTRICAL, AND THERMAL BEHAVIORS .....	5.3
25.....	[4]TEMPERATURE-DEPENDENT ELECTRICAL RESISTANCE OF CONDUCTIVE PLA FOR FUSED DEPOSITION MODELING .....	5.4
26.....	[5]SELECTED APPLICATIONS OF STIMULI-RESPONSIVE POLYMERS .....	5.5
27.....	[6]RESISTANCE AND STRENGTH OF CONDUCTIVE PLA PROCESSED BY FDM .....	5.6
28.....	[7]TENSION AND COMPRESSION TESTS OF TWO POLYMERS UNDER QUASISTATIC AND DYNAMIC LOADING .....	5.7
<b>29.....</b>	<b>שיטות .....</b>	<b>6</b>
29.....	ציפיפות .....	6.1
30.....	כפיפה ב-3 נקודות .....	6.2
33.....	מדות התנגדות .....	6.3
36.....	מדידת התנגדות כתלות בשינוי טמפרטורה .....	6.4
38.....	מערכת ניסוי ראשונה למד טמפרטורה .....	6.4.1
39.....	מערכת ניסוי שנייה למד טמפרטורה .....	6.4.2
40.....	מדידת התנגדות כתלות בהפעלת עומס משתנה .....	6.5
42.....	מערכת הניסוי למד עומס .....	6.5.1
<b>43.....</b>	<b>תוצאות .....</b>	<b>7</b>

43.....	אפיון ציפויות.....	7.1
43.....	ציפויות דוגמים לכיפה ב-3 נקודות.....	7.1.1
43.....	ציפויות דוגמים למדידת התנגדות.....	7.1.2
44.....	כיפה ב-3 נקודות.....	7.2
44.....	שליעוט.....	7.2.1
45.....	כוח כיפה מרבי.....	7.2.2
45.....	מאםץ כיפה מרבי.....	7.2.3
46.....	מודול האלסטיות.....	7.2.4
46.....	סיכון תוצאות עברו תכונות מכניות.....	7.2.5
48.....	תכונות חשמליות.....	7.3
48.....	התנגדות.....	7.3.1
48.....	התנגדות סגלית.....	7.3.2
49.....	סיכון תוצאות עברו תכונת חשמלית.....	7.3.3
49.....	השוואה בין התוצאות בספרות.....	7.4
50.....	תוצאות מדידת התנגדות כתלות בטמפרטורה.....	7.5
50.....	מדידות גיאומטריות.....	7.5.1
50.....	תוצאות ניסוי ראשוני של מד טמפרטורה.....	7.5.2
52.....	תוצאות ניסוי שני של מד טמפרטורה.....	7.5.3
58.....	השוואה מדידות.....	7.5.4
59.....	סיכון תוצאות עברו מד טמפרטורה.....	7.5.5
60.....	תוצאות מדידות התנגדות כתלות בעומס.....	7.6
60.....	דוגמים.....	7.6.1
61.....	מדידות גיאומטריות.....	7.6.2
62.....	תוצאות.....	7.6.3
63.....	סיכון תוצאות עברו מד עומס.....	7.6.4
64.....	<b>דינן.....</b>	<b>8</b>
65.....	<b>סיכום, מסקנות, ליקויים והמשכיות.....</b>	<b>9</b>
65.....	סיכום ומסקנות.....	9.1
66.....	ליקויים.....	9.2
66.....	הצעות להמשך עבודה.....	9.3
66.....	תודות.....	10
67.....	<b>רשימת מקורות.....</b>	<b>11</b>
67.....	מקורות ספרותיים.....	11.1
68.....	מקורות אינטרנט.....	11.2
68.....	<b>נספחים.....</b>	<b>12</b>
68.....	ריכוז שיבויים.....	12.1
68.....	פוסט הפרויקט.....	12.2
69.....	פוסט שהוצב בכנס ICAM2023.....	12.3
70.....	דף תוכנות יצרן.....	12.4
71.....	דוגמנים.....	12.5
71.....	דוגמים לבדיקות תכונות מכניות.....	12.5.1
73.....	דוגמים למדידת התנגדות.....	12.5.2
74.....	תוכנית עבודה סופית.....	12.6

## רשימת תמונות

15.....	תמונה-1 : תקריב הנקה השבבות
15.....	תמונה-2 : תהילן הסרת חומר לעומת תהליך הוספת חומר
17.....	תמונה-3 : הבדלים בין מדדים שונים
17.....	תמונה-4 : מדפסת FFF בעלת פלטפורמה נעה
18.....	תמונה-5 : תהילן ההדפסה התלת ממדית [c]
19.....	תמונה-6 : מחזור החיים של PLA
20.....	תמונה-7 : Electrically conductive composite PLA
20.....	תמונה-8 : Electrically conductive composite PLA
20.....	תמונה-9 : Conductive Graphene Filament
23.....	תמונה-1 : שני צורה של דגם עקב חיים .....
24.....	תמונה-2 : מבט על הדפסה ב-4 מדדים .....
24.....	תמונה-3 : בדיקת חולכת חום ב-3 צורות הדפסה שונות .....
25.....	תמונה-4 : מדידות ההתקנות והולכת החום כתלות בטמפרטורה
26.....	תמונה-5 : מחזק ברטייסים מדפס .....
27.....	תמונה-6 : דגמים מצורת "עוצם כלב" לבדיקת תכונות מבניות .....
28.....	תמונה-7 : גראפי מאיצ' מעות אמייטיים עבור לחיצה (ימין) ומתייחה (שמאל)
29.....	תמונה-1 : מאזנים אנלטיטים של חברת Arc
30.....	תמונה-2 : שרטוט הדגם לבדיקות מבניות .....
31.....	תמונה-3 : מצב הדפסה ומילוי .....
33.....	תמונה-4 : מכשיר RCL
33.....	תמונה-5 : שרטוט הדגם לבדיקת התקנות .....
34.....	תמונה-6 : תותב (איסרט)
36.....	תמונה-7 : רב מודד .....
37.....	תמונה-8 : שרטוט מד טמפרטורה .....
38.....	תמונה-9 : מערכת ניסוי ראשונה .....
39.....	תמונה-10 : מערכת ניסוי שנייה .....
40.....	תמונה-11 : מערכת הניסוי .....
41.....	תמונה-12 : שרטוט מד העומס .....
42.....	תמונה-13 : מבודדים .....
42.....	תמונה-14 : הדגם הנבדק בהפעלת עומס .....
44.....	תמונה-1 : כיפה ב-3 נקודות .....
48.....	תמונה-2 : חיבור RCL לדגם .....
50.....	תמונה-3 : פלטת חימום דגם D/5/GMH .....
50.....	תמונה-4 : דפורמציה בדגם מס' 1 .....
51.....	תמונה-5 : דפורמציות בדגמים 1,2 .....
52.....	תמונה-6 : מערכת ניסוי 2 - מבט על .....
53.....	תמונה-7 : דגמים בתוספת עובי [mm] $X=0.5$ לאחר הניסוי .....
55.....	תמונה-8 : דגמים בתוספת עובי [mm] $X=1$ לאחר הניסוי .....
57.....	תמונה-9 : דגמים בתוספת עובי [mm] $X=1.5$ לאחר הניסוי .....
60.....	תמונה-10 : דגמים ראשונים .....
60.....	תמונה-11 : דגמים חדשים לאחר ביל (1) .....
61.....	תמונה-12 : דגמים חדשים לאחר ביל (2) .....
61.....	תמונה-13 : מקרה למידות הדגם .....
62.....	תמונה-14 : מדגים תחת עומס בעל עובי של [mm] 15 [N] 1900 .....
68.....	תמונה-1 : פוסטר הפרויקט .....
69.....	תמונה-2 : פוסטר ICAM2023 .....
70.....	תמונה-3 : דף תכונות יצן .....
71.....	תמונה-4 : דגמים שהודפסו בצורת Concentric Upright .....
71.....	תמונה-5 : דגמים שהודפסו בצורת Concentric Flat .....
71.....	תמונה-6 : דגמים שהודפסו בצורת Upright 45/-45 .....
72.....	תמונה-7 : דגמים שהודפסו בצורת Flat 0/90 .....

72.....	תמונה 8-12: דגמים שהודפסו בצורת Upright 0/90
72.....	תמונה 9-12: דגמים שהודפסו בצורת Flat 45/-45
73.....	תמונה 10-12: דגמים לבדיקת התנגדות-אורך בין תותבים 50 [mm]
73.....	תמונה 11-12: דגמים לבדיקת התנגדות-אורך בין תותבים 100 [mm]
73.....	תמונה 12-12: דגמים לבדיקת התנגדות-אורך בין תותבים 150 [mm]
73.....	תמונה 13-12: דגמים לבדיקת התנגדות-אורך בין תותבים 200 [mm]
74.....	תמונה 14-12: טבלת פגישות

## רשימת טבלאות

16.....	טבלה 1-4: יתרונות וחסרונות של טכנולוגיות הדפסה בתלת ממד
27.....	טבלה 5-1: פרמטרי הדפסה שנבחרו לחקר תכונות מכניות
27.....	טבלה 5-2: פרמטרי הדפסה שנבחרו לחקר תכונות חשמליות
31.....	טבלה 6-1: טבלת הדפסות
31.....	טבלה 6-2: פרמטרי הדפסה
34.....	טבלה 6-3: טבלת הדפסות
35.....	טבלה 6-4: פרמטרי הדפסה
37.....	טבלה 6-5: טבלת הדפסות
38.....	טבלה 6-6: פרמטרי הדפסה
43.....	טבלה 7-1: טבלת ציפויות
43.....	טבלה 7-2: טבלת ציפויות
44.....	טבלה 7-3: טבלת שקיעות
45.....	טבלה 7-4: טבלת כוחות בפיפה מרביים
45.....	טבלה 7-5: טבלת מאמצוי בפיפה מרביים
46.....	טבלה 7-6: טבלת מודול אלסטיות
46.....	טבלה 7-7: טבלה מסכמת עבור התכונות המכניות
46.....	טבלה 7-8: תוצאות מחקר סקר ספרות [3]
48.....	טבלה 7-9: טבלת התנגדויות
48.....	טבלה 7-10: טבלת התנגדויות סגוליות
49.....	טבלה 7-11: טבלה מסכמת עבור התכונות החשמליות
49.....	טבלה 7-12: טבלת השוואה
50.....	טבלה 7-13: מידות גיאומטריות
50.....	טבלה 7-14: דגם 1 – טבלת התנגדויות
51.....	טבלה 7-15: דגמים 2 ו-3 – טבלת התנגדויות
52.....	טבלה 7-16: טבלת מומצעי התנגדויות בעלייה וירידה
62.....	טבלה 7-17: מידות גיאומטריות של החלקים המודפסים

## 1 תקציר מנהלים

פרויקט זה התמקד בחקר היבוש של פולימר מוליך בהדפסה ב-4 ממדים. המטרות העיקריות של הפרויקט היו להוכיח את מאגר הנזtones הקויים בשוק ולהוכיח את התכונות מד הטמפרטורה ומד העומס.

את תהליך העבודה החלנו לאחר מציאת חומר הגלם המתאים, הפולימר של חברת ProtoPasta הקרי בשם PLA Electrically Conductive Composite. זה פולימר מוליך שבכדי לקבל את המוליכות שלו, חברת ProtoPasta הוסיפה לו פחמן שחור בתפזרת.

שיטת הייצור בו השתמשנו היא שיטה הנקראת Fused Filament Fabrication או בקיצור FFF. שיטה זו היא אחת מ-7 השיטות הקיימות תחת תהליך הריבוד הנקרא בלועזית Additive Manufacturing או בקיצור AM.

תהליך הריבוד הוא תהליך שבו אנו מוסיפים חומר שכבה על שכבה בשונה מתחלci ייצור אחרים כמו חריטה וברסום שביהם מורידים חומר.

בשיטת ייצור זה אנו נעזרו במדפסת תלת ממד, בכדי להדפיס את הפולימר ב-4 ממדים, כאשר הממד הרביעי הוא ממד הזמן או במקרה שלנו מוליכות הפולימר.  
פרמטרי הדפסה נלקחו מן דף היצן.

הפרויקט חולק למספר שלבים, החל בתקירה של התכונות המכניות והחישומיות של דגמים מודפסים:

1. **תכונות מכניות:** לאחר סקר ספורות שביצענו גילמו כי ישנו 3 צורות מילוי מומלצת מיטבית. לכן החלטנו שבניסוי הראשון נבחן איזה אסטרטגייה הדפסה תהיה הטובה ביותר למציאת התכונות המכניות.

הניסוי הבחירה לבוחינת העומס המקסימלי ומודול האלסטיות הוא ניסוי כפיפה ב- 3 נקודות המבוסס על התקן ASTM D7264, הדגמים בעלי שטח חתך מלבי עוצבו לפי תקן הניסוי, הודפסו 6 דגמים מתחת מצורות המילוי ומאחד מצבי הדפסה, סה"כ 36 דגמים.

תחילת רצינו לוודא כי אכן יש התאמה בין ציפויות החומר המודפס לבין נתוני היצן וכן נעשו מדידות גיאומטריות ושיקלה במאזנים אנליטיים. נעשו מספר חישובים שישו לנו לקבל את ציפויות הדגמים שכן מאוד קרובה לציפויות היצן שהוא  $1.24 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$ .

התוצאות הצבעו על כך שהדגמים שהודפסו בצורה מילוי Concentric ו- $45^\circ$ - $45^\circ$  הציגו את התכונות הטובות ביותר במצב הדפסה Flat, מהן:

.  $E = 1.68[GPa]$  -  $\sigma = 45.3[MPa]$  התקבל Flat – Concentric

.  $E = 1.84[GPa]$  -  $\sigma = 46.33[MPa]$  התקבל Flat –  $45^\circ$ - $45^\circ$  בצורת הדפסה

בכדי להכירע מני שתי צורות המילוי ביצענו סקר ספורות נוספת החלטנו להשתמש בצורה המילוי Concentric בשל הולכת החום ההומוגנית.

2. **תבונות חשמליות:** הודפסו 12 דגמים באסטרטגיית הדפסה שנבחרה קודם לכן, כל דגם בעל חתך מלכני בדומה לניסוי הראשון בו חקרו את התבונות המכניות.

את הדגמים חילקו לארבע קבוצות כאשר כל קבוצה כללת בתוכה 3 דגמים, כל קבוצה הייתה בעלת אורך שונה.

נעשו מדידות גיאומטריות ושקילה במאזנים אנליטיים של הדגמים להמשך הניסוי.

הדגמים הודפסו עם קדחים בקצויותיהם, שلتוך הקדחים הוכנסו תותבים מפליז עם בריגים, הבריגים חוברו למכשיר הנקרה RCL בכך שמכבל לבחון את ההתנגדות החשמלית של הדגמים.

לאחר מציאת ההתנגדות החשמלית של כל הדגמים והמידות הגיאומטריות, באמצעות חישובים מצאנו את ההתנגדות הסగולית של כל דגם אשר היו דומים אחד לשני ולתיוריה. מומוצע ההתנגדויות הסגולית שהתקבל הוא  $[cm \cdot \Omega] = 13.2$ .

לאחר מציאת התבונות המכניות והחסמיות עברנו חלק השני של הפרויקט שהוא כולל פיתוח של ABI טיפוס למד עומס ומד טמפרטורה ובחינת השפעת השינוי בטמפרטורה ובעומס על ההתנגדות החשמלית:

1. **מד טמפרטורה:** ניסוי נועד לבחור את השפעת החום על ההתנגדות. ניסוי זה מבוסס על עקרון שככל שנגד מתחמים כר האוטומים נעים מהר יותר ובכך יש יותר התנגשויות בין האוטומים של החומר לאלקטרונים שעוברים דרך החומר, התנגשויות אלו מעלימות את ההתנגדות של הנגד.

עצבנו מד טמפרטורה בעל שטח חתך מלכני דק במרכזו עקב המוליכות התרמית הנמוכה של הפולימר, אשר בקצוותיו יש הגבהות עם קדחים אליהם הוכנסו התותבים עם הבריגים לצורך מדידת ההתנגדות.

תחילת הודפסו 3 דגמים בעלי עובי מרוץ 0.4 מ"מ אך עקב מערכת ניסוי לא אופטימית הניסויفشل. לאחר מכאן הודפסו דגמים ב-3 קבוצות אשר כל קבוצה בעל עובי מרוץ 0.5 מ"מ, 1 מ"מ ו-1.5 מ"מ. כל קבוצה כללת בתוכה 3 דגמים, סה"כ 9 דגמים.

מערכת הניסוי כללה אמבט עם מים אשר ניתן לחמם, בתוכה האמבט ישב חתיכת אלומיניום מלכנית שעלייה ישב הדגם, בכך למנוע תזוזה של הדגם, הדגם הודבק לחתיכת האלומיניום באמצעות דבר תרמי. הבריגים שנמצאים בתותבים של הדגם חוברו לריב מدد לצורך מדידת ההתנגדות.

מדידות ההתנגדות נערכו כאשר הטמפרטורה עלתה וירידה במספר מחוזרים. מהתוצאות הניסוי נגזר קשר מחזורי והדרי בין ההתנגדות לטמפרטורה:  $R = T - 5.7866$ . בנוסף נמצא שהעובי האופטימלי הוא 1.5 מ"מ.

2. **מד עומס:** ניסוי בוצע בכדי לנתח את השפעת העומס המופעל על ההתנגדות.

ניסוי זה מtabסס על דרכי הולכה הקיימים בפחמן שחור, לפי התיאוריה ברגע שמופעל עומס על הדגם, דרכי הולכה מתקצרות דבר הגרום לירידה בהתנגדות. מנגד לה, ברגע שיש דפורמציה בחלק ישנה עלייה בהתנגדות.

הניסוי הנבחר לבחינת העומס החזץירי מבוסס על תקן D695 ASTM, מד העומס עוצב לפי תקן הניסוי כאשר בקצוותיו יש הגברות עם קדחים אליויהם הוכנסו התותבים עם הרגים לצורך מדידת ההתנגדות.

תחליה הודפסו 3 דגמים, כל דגם נבדק 3 פעמים אך לא נראה שינוי בהתנגדות בתוצאה מהפעלת העומס. לאחר התיעצות עם גורמים מקצועיים נעשה כiol מחדש למדפסת תלת המדריך כדי לקבלת סיווע והדפסו 6 דגמים נוספים הפעם בכל דגם נבדק פעמיים. סה"כ הודפסו 9 דגמים.

מערכת הניסוי כללה מתקן העמסה הקרי בשם "Exceed" של חברת MTS מדגם E43, הדגם הונח בין שתי מבודדים מקצועיה. הרגים שנמצאים בתותבים של הדגם חוברו לריב מדד לצורך מדידת ההתנגדות.

לאחר כiol מחדש למדפסת והדפסת 6 הדגמים הנוספים, נראה כי עדין אין שינוי בהתנגדות בתוצאה מהפעלת העומס. נמצא זה מבטיח לנו שבעת מדידות ההתנגדות הפעלת העומס לא תפגע בותוצאות המתקבלות.

לסיכום, בכל שטכנולוגיית הדפסת ב-4 מדדים מפותחת, אנו רואים עתיד שבו אובייקטים ואבות טיפוס יובילם להגיב באופן דינמי לסבירתם ולהציג פונקציונליות והתאמאה חסרת תקדים. פרויקט זה נדרש את הפוטנציאלי הטמון בהדפסה ב-4 מדדים עם פולימר מוליך, אנו מקווים שמסוגל לפתח אופקים חדשים בתעשייהות שונות, החל משירותי הבריאות ומחוץ לה.

פרויקט זה עמד בדרישות שהגדנו מראש במסמך הגדרת הפרויקט (SOW). בנוסף תוצאות המחקר שנעשו על הפולימר הוצגו על ידינו באמצעות פוסטר בועידת ICAM 2023.

## Executive summary 2

This project focused on investigating the application of a conductive polymer in 4D printing. The main objectives were to expand the existing market database and demonstrate the capabilities of temperature and load gauge.

After thorough research, we selected ProtoPasta's Composite Electrically Conductive PLA as the appropriate conductive polymer, filled with carbon black conductive particles, for conductivity enhancement.

The production method we used is Fused Filament Fabrication or FFF for short. This method is one of the seven existing methods under Additive Manufacturing (AM).

The Additive manufacturing method is where we add material layer upon layer, unlike other methods, such as turning and milling, in which material is removed.

In this production method, we used a 3D printer to print the polymer in 4 dimensions, where the fourth dimension is the dimension of time or, in our case, the conductivity of the polymer.

The printing parameters were taken from the manufacturer's page.

The project was divided into several stages, starting with an investigation of the mechanical and electrical properties of the printed models:

1. **Mechanical Properties:** Through a literature survey, we identified three recommended filling shapes (Concentric, 45°/−45°, 0°/90°) and two printing modes (Flat, Upright) for optimal conductivity.

The mechanical properties were evaluated using a 3-point bending test based on the ASTM D7264 standard. Six models were printed from one of the filling forms and one of the printings modes, A total of 36 models.

Geometric measurements and weighing were conducted to verify the density, which closely matched the manufacturer's  $1.24 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$  specifications.

The results indicated that the models printed with Concentric and 45°/−45° filling shapes exhibited the best mechanical properties in the Flat printing mode, which are:

Flat - Concentric printing strategy  $\sigma = 45.3 [MPa]$  and  $E = 1.68 [GPa]$ .

Flat - 45°/−45° printing strategy  $\sigma = 46.33 [MPa]$  and  $E = 1.84 [GPa]$ .

To decide between the two forms of filling, we performed another literature survey, with the help of which we decided to use the Concentric filling form due to the homogeneous heat conduction.

2. **Electrical Properties:** Twelve models were printed with the previously chosen printing strategy, each with a rectangular cross-section like the first experiment in which we investigated the mechanical properties.

We divided the models into four groups, where each group included three models; each group had a different length.

Geometric measurements and weighing were performed.

The models were printed with drills at their ends, into which brass inserts with screws were inserted. The screws were connected to a device called RCL for measuring electrical resistance.

Calculations based on the resistance and geometry of the models yielded an average specific resistance of  $\rho = 13.2 [\Omega \cdot cm]$ , which was similar to each other and the theory.

The second part of the project involved the development of a load gauge prototype and a temperature gauge to examine the influence of temperature and load on electrical resistance:

1. **Temperature Gauge:** The experiment aimed to investigate the effect of heat on resistance. This experiment is based on the principle that the atoms move faster as a resistor heats up. Thus, there are more collisions between the atoms of the material and the electrons that pass through the material. These collisions increase the resistance of the resistor.

A Temperature Gauge with a thin rectangular cross-section, designed to account for low thermal conductivity, the temperature Gauge was printed when its ends had elevations with drills into which the inserts were imbued with the screws inside them to measure the resistance.

First, three models with a center thickness of 0.4 mm were printed, but the experiment failed due to a non-optimized experimental system.

After this, models were printed in 3 groups, each with a different center thickness of 0.5 mm, 1 mm, and 1.5 mm. Each group included three models, a total of 9 models.

The experimental system included a bath with water that could be heated; inside the bath sat a rectangular piece of aluminum on which the model sat. To prevent the model from moving, the model was glued to a piece of aluminum using thermal glue. The screws inside the inserts were connected to a multimeter device for measuring electrical resistance.

Resistance measurements were conducted as the temperature increased and decreased in cycles. A relationship between resistance and temperature was derived:  $R = 5.7866 \cdot T - 0.9$ . In addition, The optimal thickness was found to be 1.5 mm.

2. **Load Gauge:** The experiment aimed to analyze the impact of applied load on resistance.

This experiment is based on the existing conduction paths in carbon black; according to the theory, as soon as a load is applied to the model, the conduction paths shorten which causes the resistance to decrease. On the other hand, as soon as there is deformation in the part, there is an increase in resistance.

The experiment chosen to test the uniaxial load is based on the ASTM D695 standard, the load gauge was designed according to the test standard with elevations with holes into which the inserts were soldered so screws could be used to measure the resistance.

The first three models were printed and tested three times, no significant change in resistance was observed initially. After consulting with professional parties, the 3D printer was recalibrated while receiving assistance, and six more models were printed; this time, each model was tested twice. A total of 9 models were printed.

The experimental system included a loading device called "Exceed" of the "MTS" company, model E43; the model was placed between two ceramic insulators inside the device. The screws inside the inserts were connected to a multimeter device for measuring electrical resistance.

After recalibrating the 3D printer and printing additional models, no change in resistance due to load application was detected. This finding assures the reliability of resistance measurements under load conditions.

In conclusion, as 4D printing technology evolves, we see a future where objects and prototypes can dynamically respond to their environment and offer unprecedented functionality and adaptability. This project aims to reveal the potential of printing in 4 dimensions with a conductive polymer, and we hope that we will be able to open new horizons in various industries, starting with health services and beyond.

This project met the requirements outlined in the statement of work document (SOW). In addition, the research findings on the conductive polymer were presented at the ICAM 2023 conference through a poster.

### 3. מילון מונחים

#### 3.1 ריבוד

ריבוד, בלועזית Additive Manufacturing – AM, הינו תהליך ייצור המאפשר לנו ליצור דגם באמצעות מבנים תלת-ממדים שהוכנו מראש, הדגם נבנה באופן שכבותי, שכבה על גבי שכבה עד לקבלת מוצר מוגמר. טכנולוגיה זאת מתחלקת ל-7 **שיטות הדפסה שונות**.

#### 3.2 שיטה הדפסה – FFF

నכון להיום תהליך הריבוד כולל תחתיו 7 **שיטות הדפסה שונות**, אלו נשתמש ונתמקד בשיטת הדפסה הנקרואט **Fused Filament Fabrication** או בקיצור FFF, בשיטה זה ההדפסה נעשת על ידי חימום חוט (Filament) העשו מפולימר תרמופלסטי לטמפרטורה גבוהה מעבר זכוכית.

המדפסת מדינה את החוט דרך ראש המדפסת (Extrusion head) ודרך זרבובית. ראש המדפסת מחובר למערכת בעלת 3 צירים המאפשרת תזוזה לאורך הצירים X, Y ו-Z.

המדפסת מחלצת את הסליל המומס בצורה גדלים דקיקים ומניחה אותם בשכבת אחרת שכבה לאורך נתיב שנקבע מראש. לאחר הנחת הגדים החומר מתקרר ומתמקם.

בכדי למלא שטח מסוים מעברים חוזרים ונויישנים נדרשים. ברגע שהמדפסת מסיים את שכבה, המדפסת מעלה את ראש המדפסת ומתחילה שכבה חדשה. תהליך זה חוזר על עצמו עד לקבלת מוצר מוגמר.

שיטה הדפסה זו ידועה גם בשם FDM (Fused Deposition Modelling), והיא הנפוצה ביותר בעולם נכון להיום עקב היותה זולה ומהירה ביחס לשיטות שונות.

#### 3.3 הדפסה ב-4 ממדים

הדפסה ב-4 ממדים מתייחסת להדפסה של חומר יחיד או מספר חומרים בעלי יכולת להשתנות בממדים שונים בתוצאה מגורי חיצוני. הגורוי יכול להתבצע על ידי שינוי טמפרטורה, חסיפה למים, חסיפה לאוויר, כימיים, זרם חשמלי, UV או גירוי סביבתי אחר.

#### 3.4 פולימר

פולימר הוא חומר העשו מרשורת מולקולרית ארכובה או מקרו-מולקולה המורכבת מיחידות חוזרות של מולקולה מסוימת הקשורות ביניהן בקשרים קוולנטיים, או באמצעות קשרים תוך-מולקולריים חזקים אחרים. שמו של הפולימר נקבע בהתאם למונומר המרכיב אותו כאשר ישנה התחלת "פול".

#### 3.5 PLA - חומצה פולילקטית

פולימר אורגני הקרי בשם חומצה פולילקטית או פולילקטיד או בקיצור בשפה הלועזית PLA. פולימר זה בנוי משני מונומרים עיקריים וهم:

- חומצה לקטית – מיוצרת באופן תעשייתי על ידי תסיסה חידקית של חומימות או על ידי סינזה כימית של אתנול, ועלת תרכובת אורגנית  $C_3H_6O_5$ .
- לקטיד – מתקבל מתסיסה של סוכרים הקיימים במשאבים מתחדשים וידידותים לסביבה כמו עמילן תירס, שורשי תפוקה וקנה סוכר, ועל תרכובת אורגנית  $C_6H_8O_4$ .

PLA הינו החומר הנפוץ ביותר בהדפסת בתלת ממד.

### 3.6 פחמן שחון

פחמן שחור מיוצר על ידי בעירה לא מלאה של דלק מאובנים (הנוצר בתוצאה מההתאבות של ארגניזמים בסביבה מחוסרת חמצן), עצים ודלקים אחרים. פחמן שחור בעל מספר תכונות מאוד חשובות, ביניהן הולכה חשמלית, קליטת אור טובת וחימום סביבתו בצורה ייעילה.

### 3.7 מערכת צירים

מערכת צירים קרטזית (Z,Y,X), באשר:

- ציר Z – ניצב למשטח ההדפסה.
- ציר X – ציר הניצב לציר Z ומקביל לחלק הקדמי של מבנות הדפסה.
- ציר Y – ניצב לציר X ולציר Z.

### 3.8 מצב הדפסה

הכוון בו הדגם יונח על משטח הדפסה.

- מצב עמידה – Upright.
- מצב שכיבה – Flat.
- מצב על הצד – On Edge.

### 3.9 צורת מילוי

המבנה הפנימי של הדגמים המודפסים, למשל:

- Concentric •
- Lines •
- Grid •
- Cubic •

### 3.10 תותבת (Insert)

תותבת הוא רכיב המתווסף לחלקים מודפסים בצדיו לשפר את הפונקציונליות, בפרויקט שלו אמו נעזרים בתותבת בצדיו לשפר את החיבור בין הדגמים למכשורי המדייה על מנת לקבל תוצאות יותר מדויקות. תותבים יכולים להיות מרוכבים ממספר חומרים שונים, אך בפרויקט זה נעשה שימוש בתותבת מפליז.

### 3.11 תקן – ASTM D7264

שיטת בדיקה סטנדרטית לתקינות הכיפוי של חומרים מרוכבים. הוא קובע את חזק הכיפוי מודול של החומרים. הבדיקה כוללת הפעלת עומס כיפוף בשלוש נקודות על דגמה עד שהיא נשברת או מגיעה לעיון מוגדר.

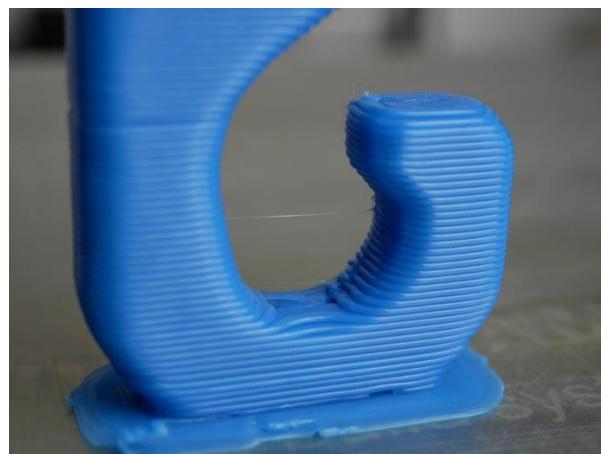
### 3.12 תקן – ASTM D695

שיטת בדיקה סטנדרטית המשמשת לקביעת תכונות הדחיסה של חומרים פלסטיים קשיים. הבדיקה כרוכה בהפעלת עומס חד צירי על דגמה ומדידת הדפורמציה והעומס המקסימלי.

## 4 הקדמה

### 4.1 רקע מדעי

הדפסה תלת-ממדית היא טכנולוגיה המאפשרת לנו ליצור דגמים תלת-ממדים, המתוכננים מראש על ידי המחשב – תוכנת CAD (Computer Aided Design) . תהלייך הדפסה של המדפסת נעשה על ידי חימום חוט פלסטי העשווי פולימר למשל ABS או PLA, את החוט המותך המדפסת מניחה על משטח שכבות על שכבות עד שנוצר לנו מוצר מוגמר מכאן נובע שמו הנוסף של תהלייך זה בלווזית Additive Manufacturing.



תמונה 4-1: תקריב הנחת השכבות

(נלקחה מהאתר: <https://www.cnckitchen.com/blog/big-nozzles-how-do-they-make-your-3d-prints-stronger>)

בתעשייה המודרנית קיימים טכנולוגיות ייצור שונות בגין ברסום וחריטה, תהלייכים אלו שונים ממשמעותית מטהileeיך הדפסה התלת ממדית. בתהלייכי הברסום והחריטה אנו מסירים חומר מאובייקט עד לייצור המוצר המוגמר (Subtractive manufacturing) ואילו בהדפסה תלת ממדית אנו מוסיפים חומר, בתוצאה מכך קיימת משמעות לבליית המזוליה את עליות הייצור בתהלייך הדפסה כיוון שבטהלייכי ייצור אחרים נוצר מצב בו נזק חומר מיותר.

#### **CNC MACHINING //** subtractive manufacturing



#### **3D PRINTING //** additive manufacturing



תמונה 4-2: תהלייך הסרת חומר לעומת תהלייך הוספת חומר

(נלקחה מהאתר: <https://surfaceid.com/blog/cnc-machining-3d-printing>)

לטכנולוגיה התלת ממדית קיימים מספר יתרונות וחסרונות לעומת שיטות ייצור אחרות:

טבלה 4-1: יתרונות וחסרונות של טכנולוגיות הדפסה בתלת ממד

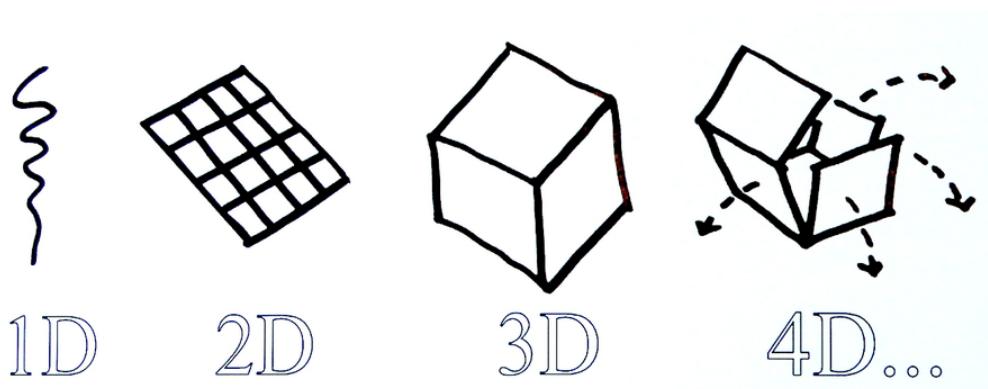
חסרונות	יתרונות
<b>חומרים מוגבלים</b> – נכון להיום קיימים מספר מוגבל של פולימרים וمتכות בהם ניתן להשתמש.	<b>חופש העיצוב</b> – תהליכי זה מאפשר הדפסה של צורות מסובכות כגון מבנים דמי חלת דבש או עם חללים.
<b>גודל בניה מוגבל</b> – כל המדפסות פועלות בשטח מוגדר מראש, דבר העולול לעלות את זמן הייצור עקב הדרישה לייצר כמעט גודלה יותר של חלקים.	<b>יצירתABI טיפוס מהירה</b> – לעומת הדפסה תהליכי ייצור אחרים, תהליכי הדפסה מאפשר לנו להציג מושרטוטים לאב טיפוס מוגמר תוך מספר שעות תוך כדי הורדת עליות.
<b>עיבוד סופי</b> – מרבית החלקים המוספים ידרשו עיבוד סופי כגון הסרת תומכים, הסרת גרדים, החקיקת פני שטח וכדומה.	<b>הדפסה לפי דרישת</b> – ביגוד לתהליכי מסורתיים הדפסה תלת ממדית לא דורשת מקום לאחסון לכליים כיוון שתא הקבצים ניתן לשומר בתוך ענן או במחשב שכן דבר זה חוסר במקום ועליות.
<b>נפח גדול</b> – בתהליכיים כגון הזרקה יצירתי חלקים עם נפח גדול יותר זולה מיצירה באמצעות הדפסה תלת ממדית.	<b>מוצרים בעלי גיאומטריה מסובכת ללא עלות נוספת</b> – בהדפסה ניתן ליצור חלקים בעלי גיאומטריה מסובכת ללא עלות נוספת והתהליך אחד.
<b>קריישה ושבירה</b> – עקב ייצור בתהליכי הוספת שכבות, תחת עומסיהם מסויימים שכבות דקות יותר עלולות לקרוס בקלות רבה ולהישבר.	<b>פסולת מופחתת</b> – עקב תהליכי הוספת השכבות אנו כמעט ולא מייצרים פסולת מיותרת.
<b>זמן ייצור ארוך</b> – ייצור בתהליכי זה בדרך כלל איטי יותר משיטות ייצור מסורתיות, במיוחד כאשר מייצרים חפצים גדולים יותר או מורכבים יותר. הדפסה שכבה אחר שכבה עשויה להיות גוזלת זמן.	<b>התകדיםות רפואי</b> – ההדפסה התלת ממדית נפוצה בקרב התחומי הרפואי וסייע להצלת חיים בעזרת הדפסת איברים כגוןCBD, כליות לב ואפייל עצומות בהתאם אישית.
<b>מצומם משרות</b> – עקב ייצור זריז שאינו דורש מפעיל, הדפסה התלת ממדית מפחיתה את הדרישה בכוח אדם.	<b>גישה</b> – עולם המדפסות התלת ממדית נהיה יותר ויותר נגיש לצרכן וספקים בעליות מופחתת.
<b>טיב פני שטח ירוד</b> – ניתן לראות סימני חיבור בין שכבות לתומכים.	<b>ידידותי לסביבה</b> – בנוסף להפחית הפסולת ישנים גם פולימרים המיוצרים מחומר מתכליה.

בשנים האחרונות התפתח תחום חדש ומשמעותי, תחום זה הינו הדפסה ב-4 ממדים.

הדפסה ב-4 ממדים מתייחסת להדפסה של חומר יחיד או מספר חומרים בעלי יכולת להשתנות בממדים שונים בתוצאה מגيري חיצוני. הגירוי יכול להתבצע על ידי למשל שינוי טמפרטורה, חשיפה למיים, חשיפה לאור, כימיים, זרם חשמלי, UV או גירוי סביבתי אחר.

בעבודה זה עוסוק בפולימר בעל יכולות הולכה חשמלית.

המודלים יודפסו בשיטת FFF (Fused filament fabrication). לאחר תכנון המודלים יבוצעו על המודלים ניסויים ויבחנו תכונותיהם.



תמונה 4-3: הבדלים בין ממדים שונים

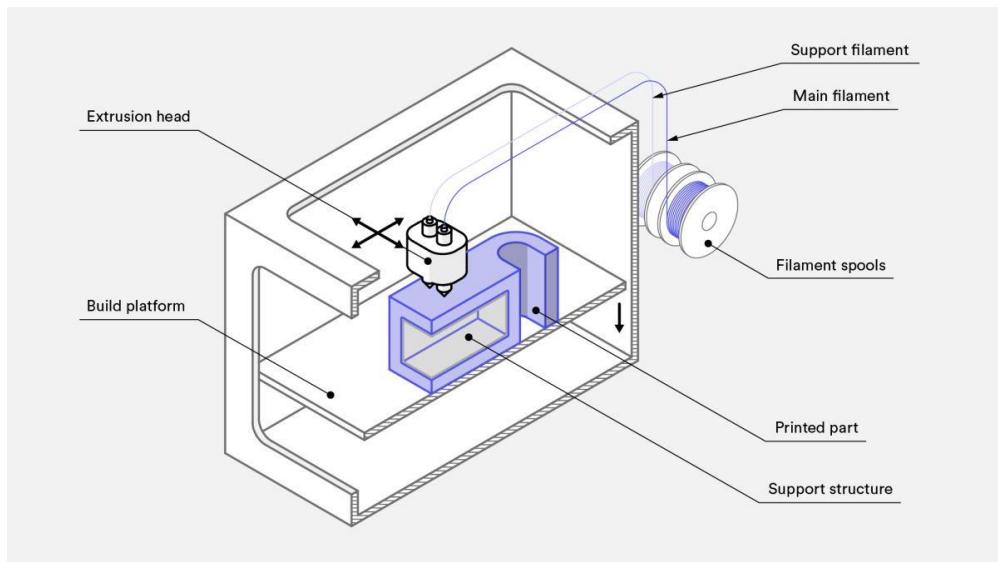
(נלקחה מהמאמר: [https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/147707/farhang\\_1.pdf?sequence=1](https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/147707/farhang_1.pdf?sequence=1))

לצורך ביצוע הדפסה בשיטת ה-FFF (Fused filament fabrication) קודם נדרש סליל מחומר טרומופלסטי, ברגע שנחיר המדפסת (Nozzle) מגע לטמפרטורה הרצiosa המדפסת מזינה את החוט דרך ראש המדפסת (Extrusion head) ודרך הנחיר.

ראש המדפסת מחובר למערכת בעלת 3 צירים המאפשרת תזוזה לאורכו הצירים X, Y ו-Z. המדפסת מחלצת את הסליל המומס בצורה גדילים דקיקים ומוניחה אותם כשבבה אחר שכבבה לאורכו נתיב שנקבע מראש. לאחר הנחת הגדילים החומר מתקרר ומתמצעק.

בכדי למלא שטח מסוימת שבבה, המדפסת מעלה את ראש המדפסת ומתחלילה שבבה חדשה. ישנים מדפסת שהמדפסת מס' ימת שבבה, המדפסת מעלה את ראש המדפסת ומתחילה שבבה חדשה. ישנים מדפסת שמשטח הוא זה שיורד. תהליך זה חוזר על עצמו עד לקבלת תוצר מוגמר.

שיטת הדפסה זה הינה הנפוצה ביותר בעולם נכון ליום עקב היotta זולה ומהירה ביחס לשיטות שונות נוספת המוצרים הסופיים עשויים פלסטיק.

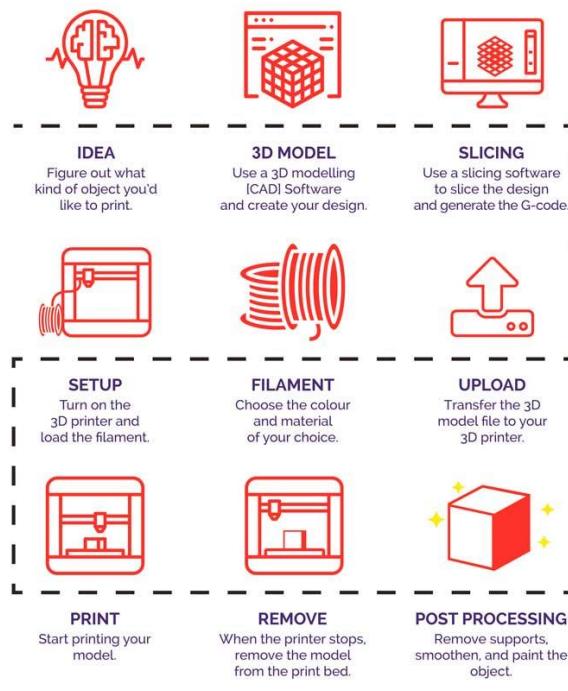


תמונה 4-4: מדפסת FFF בעלת פלטפורמה נעה

(נלקחה מהאתר: <https://top3dshop.com/blog/fused-deposition-modeling-all-you-need-to-know-about-fdm-3d-printing-technology>)

## 4.2 שלבי תהליך הדפסה התלת ממדית

- 1) רעיון – הבסיס ליצירה הוא רעיון וגם בתהליך הדפסה לפני יצירת המודול אנו צריכים להבין מה נדרש מאייתנו, מהי מטרת המוצר הסופי.
- 2) תכנון – מתבצע על ידי אחת מימי תוכנות רבות כגון: SolidWorks, Tinkercad, Sketchup או SolidWorks, תוכנות אלו מאפשרות לנו לפתח קבצים לשנות לעדכן וליצור מודול תלת ממדי ראשון ליצירה. אנו משתמש בתוכנה SolidWorks.
- 3) פריסה – הפרישה משמשת לנו כמתוך בין המודול התלת ממדי לבין המדפסת. תוכנת הפרישה מכינה את המודול הנבחר ומיצרת עבורה G-Code. אנו משתמש בתוכנת Cura.
- 4) העברת הקובץ – לאחר הכנת המודול ויצירת ה-G-Code, علينا להעביר את הקובץ לדפסת התלת ממדית.
- 5) בחירת הסליל – בעת נבחר את הסליל הרצוי לפי צבע ונדרש /או תוכנות החומר.
- 6) הבנת המדפסת – נניח את הסליל במקום המיועד ונקשר בין לבין ראש המדפסת והנחיר.
- 7) הדפסת המודול – בעת הגיע הזמן לרגע גוף ממשי ולחץ על כפתור הדפסה.
- 8) הסרת המודול – לאחר שהדפסה בוצעה בהצלחה אנו ניתן לתוכר להתקrror ונסיר אותו באמצעות כלים מתאימים.
- 9) עיבוד סופי – הסרת תומכים, הסרת גרדים, החלקת פנים שטח, צביעה וכדומה.



[www.thestempedia.com](http://www.thestempedia.com)

תמונה 4-5: תהליכי הדפסה התלת ממדית [c]  
(<https://ai.thestempedia.com/docs/3d-printing/getting-started-with-3d-printing>)  
נלקחה מהאתר:

#### 4.3 חומרי הדפסה

בטכנולוגיה הדפסה הנקה (FFF) נהוג להשתמש בחומרים טרמופלסטיים עקב יכולתם להתרבע בתוצאה מחימום ועצבם ללא פגעה שימושית בתכונות החומר שלהם. SLS, PLA, ABS, Nylon, Ultem, PC, PEEK, וחותרים נוספים.

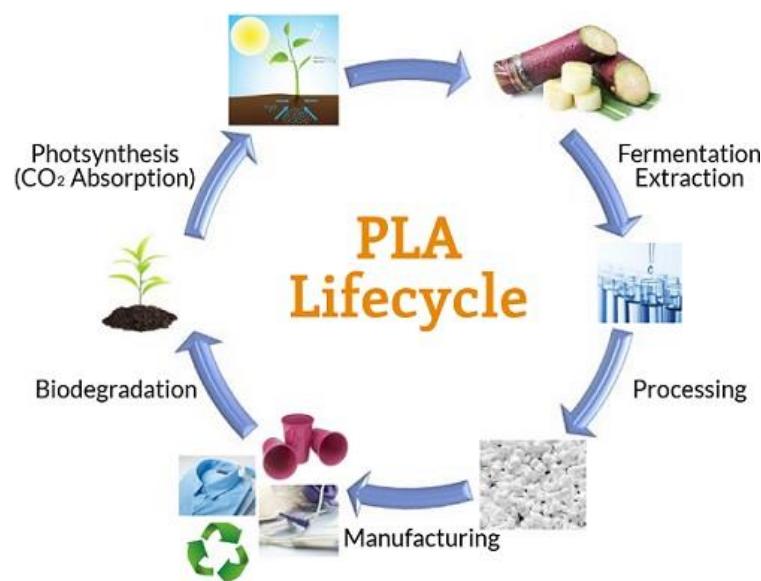
בפרויקט שלנו אנו עוסקים בפולימר אורגני הקרו בשם חומר פולילקטית או פולילקטיד או בקיצור בשפה הלועזית PLA.

שני המונומרים העיקריים מהם נוצר הפולימר הם:

- חומר לקטית או בשמה השני חומרת חלב - חומר זה התגלתה לראשונה בחלב, מיוצרת באופן תעשייתי על ידי תסיסה חיידקית של פחמיימות או על ידי סינטזה כימית של אטנול, בעל تركובות אורגניות  $C_3H_6O_5$ .
- לקטיד - מתkowski מתסיסה של סוכרים הקיימים במשאבים מתחדשים וידידותיים לסביבה בהם עamilן תירס, שורשי תפוקה וקנה סוכר, בעל تركובת  $C_6H_8O_4$ .

לפולימר זה ישנו מספר יתרונות חשובים לעומת פולימרים אחרים.

1. ידידותי לסביבה - נוצר ממוקור מתחדש, מתכללה וניתן למיחזור.
2. מותאם ביולוגית - לא רעל.
3. בעל יכולת עיבוד - בעל יכולת עיבוד תרמית טובה יותר בהשוואה לפולימרים אחרים.



תמונה 4-6: מחזור החיים של PLA  
(<https://wysecn.com/article/do-you-know-what-pla-is-i00011i1.html>)  
(נלקחה מהאתר:

#### 4.4 בחירת הפולימר

בעבודה זה אנו עוסקים בפולימר בעל מוליכות חשמלית, לצורך מציאת הפולימר הרצוי בוחנו מספר אפשרויות הקיימות בשוק.

##### **Electrically conductive composite PLA 4.4.1**

יצרן: ProtoPasta

עלות: 50\$

משקל: 500 [gram]

קוטר: 1.75 [mm]

צפיפות:  $1.15 \left[ \frac{\text{gram}}{\text{cm}^3} \right]$



תמונה 4-7: Electrically conductive composite PLA

התנגדות סגולית בכיוון השכבות:  $[ \Omega \cdot \text{cm} ] = 30$

התנגדות סגולית בניגוד לכיוון השכבות:  $[ \Omega \cdot \text{cm} ] = 115$

##### **ABS-EC filament 3D 4.4.2**

יצרן: Kimya

עלות: 80\$

משקל: 500 [gram]

קוטר: 1.75 [mm]

צפיפות:  $1.035 \left[ \frac{\text{gram}}{\text{cm}^3} \right]$

התנגדות פני שטח:  $< 10^6 [ \Omega \cdot \text{cm} ]$

##### **Conductive Graphene Filament 4.4.3**

יצרן: Black Magic

עלות: 215\$

משקל: 100 [gram]

קוטר: 1.75 [mm]

התנגדות נפחית:  $0.9 [ \Omega \cdot \text{cm} ]$



תמונה 4-8: Electrically conductive composite PLA



תמונה 4-9: Conductive Graphene Filament

בהתאם לדרישות הפרויקט אנו נבחר מוצר בעל מוליכות חשמל ומחרס מודול.

אנו החלפנו לבוחר את המוצר:

Electrically conductive composite PLA

של חברת:

ProtoPasta

המוצר הנבחר בניו מתרכובת של PLA מסוג 4043D Ingeo של חברת NatureWorks ביחד עם פחמן שחור בתפזרת. פולימר זה הינו פולימר המיועד להדפסה תלת ממדית הנutan לנו תכונות מצינית למוצר המוגמר, בין התכונות נכלל:

היזבקות טובה (מאפשר לנו לעبور ללא חימום פלטת ההיזבקות).

סיבוי מופחת לעיוויתים וסלסלים.

ריחות מופחתים.

תכונות אלו בלבד והופכות את פולימר זה לחומר מושלם להדפסה התלת ממדית תוך כדי שימוש במגוון מדפסות שונות ולמגוון שימושים שונים.

בדי שהפולימר 4043D Ingeo יספק לנו חולכה חשמלית טובה, התווסף לו פחמן שחור בתפזרת. פחמן שחור מיוצר על ידי בעירה לא מלאה של דלק מאובנים (הנוצר בתוצאה מהתאבנות של אורגניצמים בסביבה מחוסרת חמוץ), עצים ודלקים אחרים.

פחמן שחור בעל מספר תכונות מאוד חשובות, ביניהן חולכה חשמלית, קליטת אור טובה וחימום סביבתו בצורה יעילה.

#### 4.5 מוטיבציה

הדפסה ב-4 ממדים היא טכנולוגיה מתقدמת וחדשה鄙在MA, יש לה פוטנציאל לחולל מהפכה בדרכם שבה אמן מעצבים ויוצרים אובייקטים ואבי טיפוס שונים. החומרים בהם משתמשים בשיטת הדפסה זו יכולים להשתנות בעקבות גירויים שונים, בפרויקט זה אנו רצינו לחקור את הפולימר המוליך והשימושים השונים האפשריים שלו, בעזרת פולימר מר זה תהיה אפשרות לפתח מוצרים וחלקים בעלי יכולות שונות צורה וגם מוליכות שימושית. זה פותח מגון של אפשרויות חדשות בתחוםים כמו רובוטיקה, אלקטرونיקה ושירותי בריאות. המחבר שמן שואף לחקור את הפוטנציאל של טכנולוגיה מתקדמת זו ולתרום לפיתוח יישומים חדשים להדפסת ב-4 ממדים עם פולימרים מוליכים.

#### 4.6 מדדים

בפרויקט זה אנו נעמיק את הידע בתחום הדפסה ב-4 ממדים בשיטת FFF, ניפויו את הפולימר, נחקור את התכונות המכניות והחשמליות של פולימר.

עקב מחסור במידעים עבור תכונות הפולימר אנו נרצה לבנות מאגר מידע על התכונות החשמליות והמכניות של הפולימר הנבחר.

בנוסף נוישם את התכונות שנמצאו ונבחן את האפשרות לעצב מד עומס בדיק של עד [gram] 5 ומד בטמפרטורה עד  $2^{\circ}C$  העובד בטוויח בטמפרטורה של  $42^{\circ}C - 20^{\circ}C$ .

לאחר הוכחת התכונות של המדים למדידות משקל וטמפרטורה תיבדק האפשרות להשתמש בפולימר הנבחר לבנית התקנים זולים יחסית.

#### 4.7 מטרות

העמקת הידע בתחום הדפסה ב-4 ממדים בשיטת FFF.

איפון הפולימר: חקר תכונות מכניות וחשמליות של פולימר הנבחר.

ישום התכונות שנמצאו, ובחינת האפשרות לעצב מד משקל ומד בטמפרטורה עם עלות סבירה לבניית מאגר מידע על התכונות המכניות והחשמליות עבור הפולימר הנבחר עקב מחסור במידעים בשוק. בניית תוכנית עבודה מסודרת למחקר.

#### 4.8 יעדים

בחירה פולימר מתאים לעבודה.

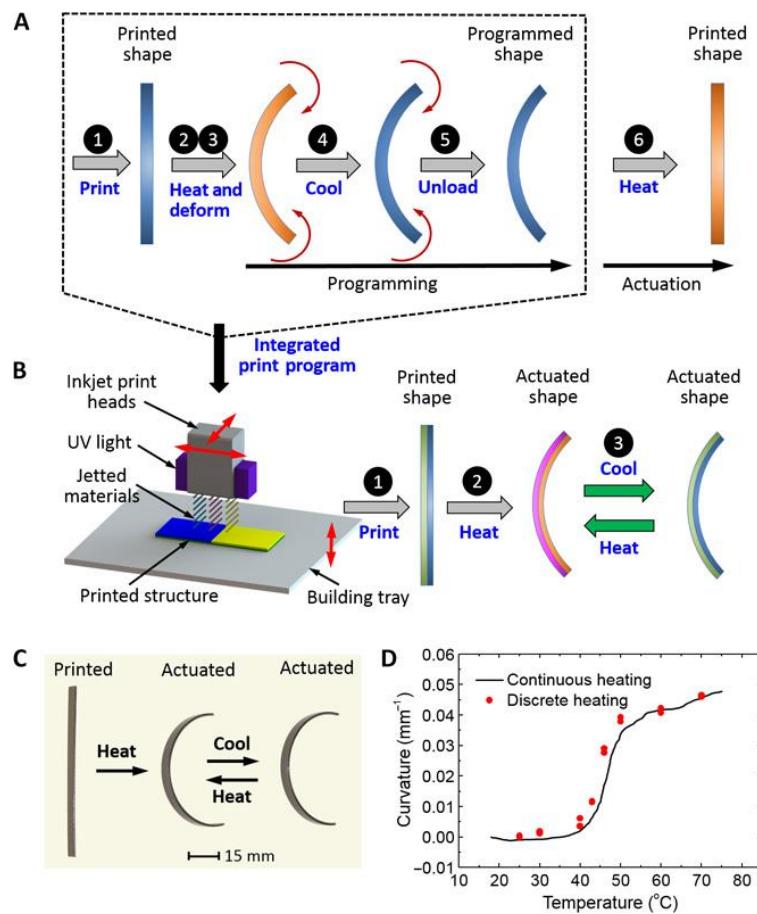
מציאת פרמטרי הדפסה המתאימים לתהיליך הייצור.

תכנון אב טיפוס או הוכחת התכונות של שימוש בתכונות שנמצדו לצורך יצירת מד משקל ומד בטמפרטורה. תיבדק האפשרות להשתמש בפולימר הנבחר לבניית התקנים זולים יחסית לממדית עומס בטמפרטורה.

## 5 סקר ספרות בייקורתי מורחב

### [1] Direct 4D printing via active composite materials 5.1

במאמר זה מדברים על גישה של הדפסה תלת ממדית עם ארכיטקטורות ברמה גבוהה, את חלקים אלו ניתן לשנות ע"י חימום. הזרה הסופית של החלק מתוכננת מראשות באמצעות פרמטרים של ארכיטקטורה ותהליכי המרכיב מפולימר זיכרון בעל צורה זוגית ולסתור.



תמונה 5-5: שינוי צורה של דגם עקב חימום

[2]A review of 4D printing 5.2

המאמר עובר על העבר הווה ועתיד של הדפסה ב-4 ממדים, על השיטות השונות ושימושים שונים של הדפסות. המאמר מפרט כל דוגמה ודוגמה להדפסה ב-4 ממדים ומסביר על צורות שונות של עצוב דגמים להדפסה עתידית. המאמר מספק לנו מסקנות ותובנות עתידיות על הענף של ההדפסה ב-4 ממדים.



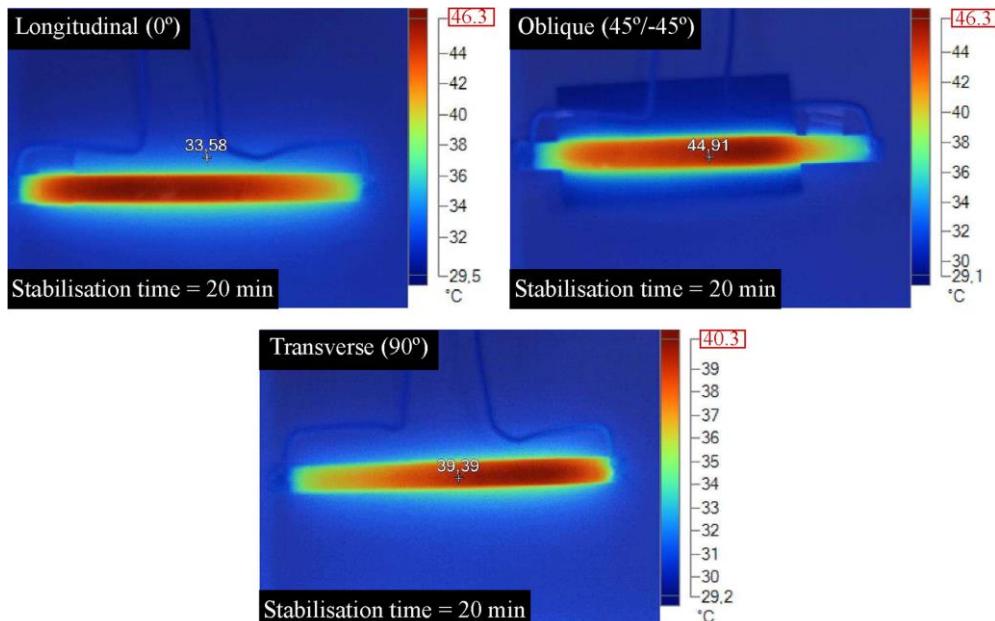
MIST

תמונה 5-2: מבט על הדפסה ב-4 ממדים

Conductive 3D printed PLA composites: On the interplay of mechanical, 5.3

[3]electrical, and thermal behaviors

מחקר זה בודק את יחסיו הגומلين בין התכונות התרמיות, החשמליות והמכניות של דגמים שהודפסו עם PLA בתוספת של קרבון שחוור, במידות של  $165 [mm] \times 13 [mm] \times 3 [mm]$ . הדגים הודפסו ב-3 צורות הדפסה שונות: אורך ( $0^\circ$ ), רוחבי ( $45^\circ$ ) ואלבסוני ( $90^\circ$ ), בכדי לבדוק את השפעת צורת ההדפסה על התכונות לעיל.



תמונה 5-3: בדיקת הולכת חום ב-3 צורות הדפסה שונות

## Temperature-dependent electrical resistance of conductive PLA for fused 5.4

### [\[4\]deposition modeling](#)

מחקר זה עוסק בהדפסה עם חומרים מוליכים, המבחן בדק שני חומרים :

PLA-carbon black .1

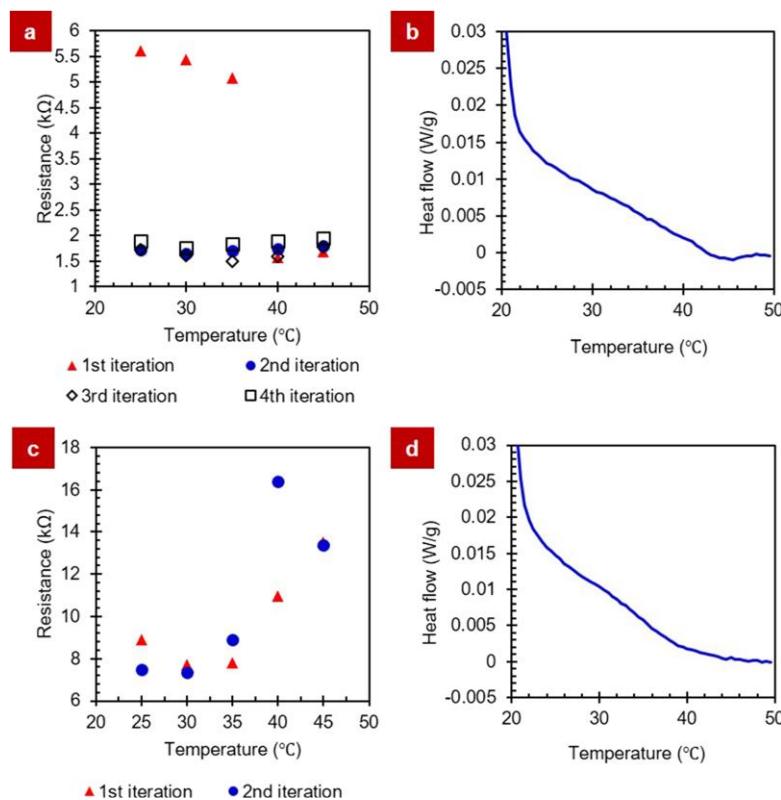
PLA-graphene .2

החומרים הנ"ל נבדקו לפני ואחרי הדפסה, נמצא שלמרות שאין שינוי במיקרו מבנה של החומר ההתנגדות הסגולה קטנה פי 4 עד 6 פעמים מההתנגדות הסגולה שהיא לפני הדפסה.

בנוסף לכך, נמצא שקבועה הטמפרטורה שימושה של ההתנגדות של PLA-carbon black הוא

$$\alpha = 0.01 \sim 0.03 \left[ \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right]$$

בבדיקות שביצעו על PLA-graphene נמצא שאין קבוע טמפרטורי שימושו שיבול לשיער לנו וכן לא מומלץ לשימוש לצורויות.



תמונה 5-4: מדידות ההתנגדות והולכת החום כתלות בטמפרטורה

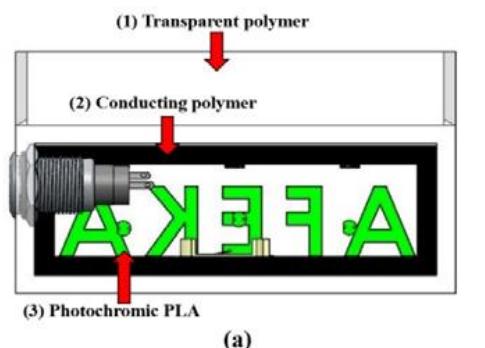
## [5] Selected applications of stimuli-responsive polymers 5.5

במחקר זה נחקרו כמה סוגים של חומרים המשמשים להדפסה ב-4 ממדים והשימושים האפשריים שלהם:

1. CCT BLUE filament של חברת SUNe – חומר זה משנה את צבעו בתגובה לשינוי בחום. מחומר זה הודפס מחוון טמפרטורת מים לבוץ מילחת.
2. CCU RED filament של חברת SUNe – חומר רגיש לקרינה אולטרה סגולה. בעזרתו הודפס צמיד שמעיר על חסיפה ממושכת מידית לאור השימוש.
3. conductive PLA של חברת ProtoPasta – חומר מוליך ששימש לצירת "מעגל" שהפעיל מנורות עם אור אולטרה סגול כדי לבנות מתකן להחזקת ברטיסים (שהלכו הודפס עם CCU RED filament כדי להאר עט לוגו של אפקה).

טכנולוגיית הדפסה ב-3 ממדים תופסת תאוצה בשנים האחרונות ופרויקט זה הראה שימושים אפשריים בטכנולוגיית הדפסה ב-4 ממדים.

אחד המטרות של מחקר זה היא ליצור עビין ולהציג את האפשרויות הבנ忧ט בלתי גבולות של תהליך ייצור זה ותקווה שייתר ויתר אנשים יכלו להשתמש בשיטה זו כדי לפתח ולשפר יישומים מועילים בעזרת חומרים שונים.



(a)



(b)

תמונה 5: מחזק כרטיסים מדפס

## [6]Resistance and strength of conductive PLA processed by FDM 5.6

בחקור זה נחקרו התכונות המכניות והחסמיות של פולימר בתוספת קרבון שחור.

בכדי לבדוק את התכונות המכניות הודפסו שמונה דגמים בצורת "עצם לב" בעלי פרמטרי הדפסה שונים, את פרמטרי הדפסה בחרו באופן רנדומלי מתוך הטבלה הבאה:

טבלה 5-1: פרמטרי הדפסה שנבחרו לחקור תכונות מכניות

אחוז מיילוי:	50%	90%
גובה שכבה:	0.250 [mm]	0.125 [mm]
צורת מיילוי:	Rectilinear	Honeycomb

למשל: דגם A1C2B1 – בעלת 50% מיילוי, גובה שכבה של [mm] 0.250 וצורת מיילוי ריבועית.



תמונה 5-6: דגמים מצורת "עצם לב" לבדיקת תכונות מכניות

בכדי לבדוק את התכונות החסמיות הודפסו 40 דגמים בעלי שטח חתך ריבועי ובעלי פרמטרי הדפסה שונים, את פרמטרי הדפסה בחרו באופן רנדומלי מתוך הטבלה הבאה:

טבלה 5-2: פרמטרי הדפסה שנבחרו לחקור תכונות חסמיות

טמפרטורת זריבורית:	190°C	100 [mm]	מקסימום:
טמפרטורת מדידה:	25°C	10 [mm]	אור:
220°C			

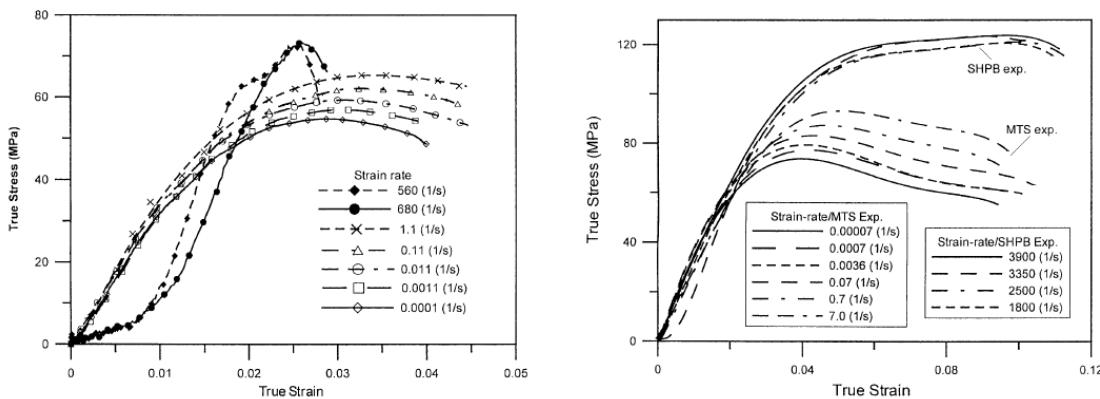
מתוצאות המחקיר התקבל כי הפולימר בעל חוזק של [ $MPa$ ] 32.1 המשמעות היא ש- PLA בתוספת קרבון שחור נותן לנו 60% מהחזקתו המקורי מתקבלים ללא התוספת של הקרבון השחור.

בדיקות ההתנגדות הפגלה כי יש עליה לנארית עקבית בהתנגדות באורךים שונים, ככלומר ניתן לייצר מודל לחיזוי ההתנגדות באורך מסוים, מתוך ניסוי זה גם נראה כי הדפסה עם זריבורית בטמפרטורה גבוהה יותר מגדילה את ההתנגדות הדגם המודפס.

Tension and compression tests of two polymers under quasistatic and 5.7  
[7]dynamic loading

במחקר זה נבדקו שני פולימרים שונים: אפוקס, Epox 828 ופולימטיל מטאקרילט (PMMA). על פולימרים אלו הפעילו כוחות לחיצה ומתרה חד ציריים כדי לבדוק מה ההבדל בתגובה פולימרים האל' דומה באופן כללי לתגובה של כל חומר משפחת הפולימרים.

התוצאות מראות כי בהשוואה לבדיקות במצב קווואזי סטטי כאשר הופעל כוח מתרה דינמי נוצרו עיונותים קטנים יותר, בעוד שדחיסה דינמית מביאה לחזק גודל בצורה משמעותית מאשר במצב קווואזי סטטי, ובשתי המצבים נקרה כי באופן גורף חזק תחת לחיצה גבוהה יותר עברו שני החומרים.



תמונה 5-7: גרפי מאיצן מעוות אמיטים עבור לחיצה (ימין) ומתרה (שמאל)

## 9 שיטות

בכדי ליצר מד עומס ומד טמפרטורה בעלי התכונות הכי טובות, נדרש קודם לבחור את צורת הדפסה ואת צורת המילוי לפיהם התכונות המכניות והחישומיות הן הטובות ביותר.

### 6.1 צפיפות

צפיפות הינה ממד חשוב לאיכות הדפסה, שכן, לאחר הדפסה, הדגמים נשקלו במשקלם שגיאה של  $[0.0001 \text{ gram}]$  וنمדיו המדידות הגיאומטריות בשגיאה של  $[mm]$ , את הצפיפות חישבו על ידי הנוסחה הבאה, והשווו לצפיפות המוגדרת של הרצן לצורך בדיקה אם קיימות חריגות.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{b \cdot h \cdot l}$$

כאשר:

$\rho$  – צפיפות החומר  $\left[ \frac{g}{mm^3} \right]$

$m$  – מסה  $[g]$ .

$V$  – נפח  $[mm^3]$ .

$b$  – רוחב  $[mm]$ .

$h$  – גובה  $[mm]$ .

$l$  – אורך  $[mm]$ .



תמונה 6-1: מזנונים אנלטיים של חברת mrc

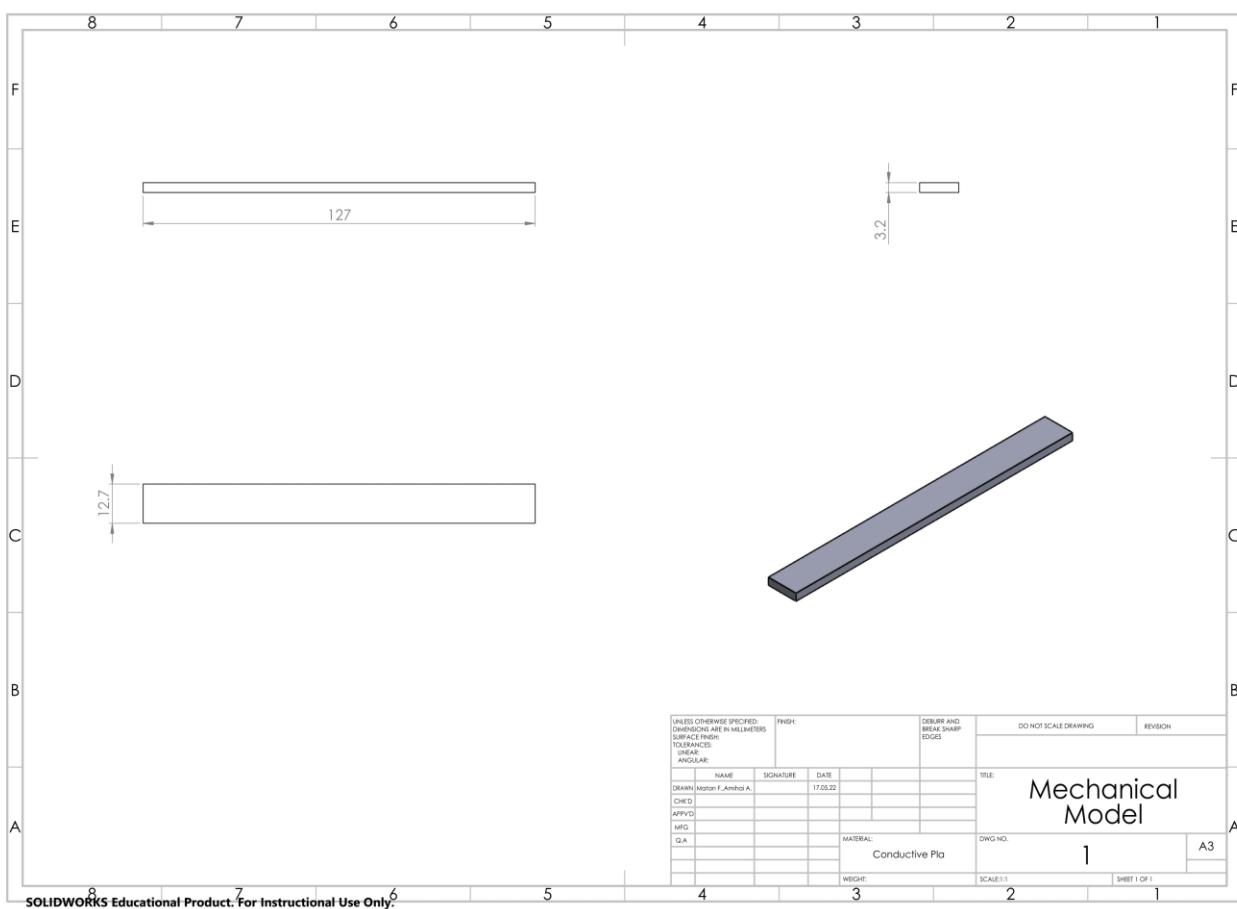
## 6.2 בפייפה ב-3 נקודות

את התכונות המבניות של הפולימר אנו החלטנו לחקור על ידי מבחן בפייפה ב-3 נקודות. מבחן זה מאפשר לנו למצוא את מודל האלסטיות ואת מאץ הփיה המקסימלי של חומר בעל דגם לצורך קורה. המבחן מבוצע בבר שהדגם או הקורה נתמכים מלמטה על ידי שתי נקודות עם מרוח ידוע מראש, במרכז החלק מופעל כוח באופן הדרגי עד לריסת החלק.

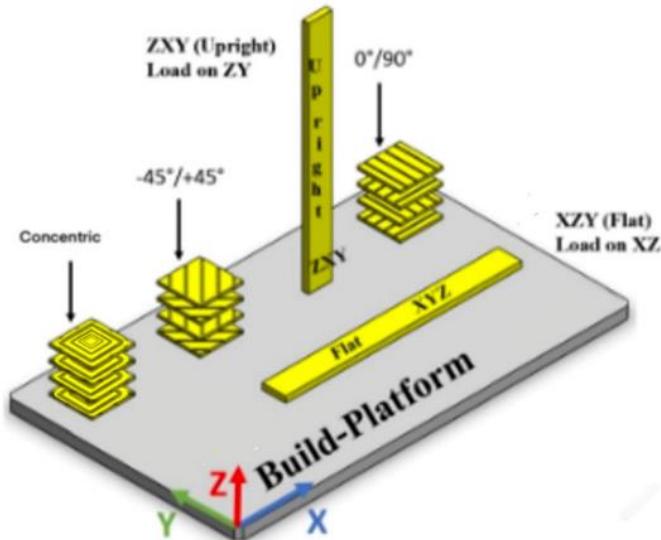
מבחן בפייפה ב-3 נקודות יכול להתבצע לפי תקנים שונים, כגון תקנים של מתכות ובדומה. במקרה שלנו אנחנו בחרנו בתיקן של פולימרים D7264 ASTM. לפי תיקן זה, מבחן בפייפה על פולימר מבוצע על דגם בעל שטח חתך מלבני.

המידות שנבחרו לדגם הם מידות סטנדרטיות עבור בדיקות מבניות והם:

$$. 127 [mm] \times 12.7 [mm] \times 3.2 [mm]$$



תמונה 6-2: שרטוט הדגם לבדיקות מבניות



תמונה 6-3: מבני הדפסה ומילוי

טבלה 6-1: טבלת הדפסות

מצב הדפסה	מילוי	כמות חלקים	מצב הדפסה	מילוי	כמות חלקים	מילוי	כמות חלקים
Flat	0°/90°	6	Upright	0°/90°	6	0°/90°	6
Flat	-45°/+45°	6	Upright	-45°/+45°	6	-45°/+45°	6
Flat	Concentric	6	Upright	Concentric	6	Concentric	6

טבלה 6-2: פרמטרי הדפסה

Material:	Electrically conductive composite PLA
Material manufacturer:	ProtoPasta
Layer Height:	0.2 [mm]
Wall Thickness:	0.4 [mm]
Top/Bottom Thickness:	0 [mm]
Infill Density:	99%
Infill Pattern:	Concentric/Lines
Infill Line Directions:	[0,90] / [45,-45]
Printing Temperature:	230°C / 235°C
Build Temperature:	50°C / 60°C
Print Speed:	30 [ $\frac{mm}{s}$ ]
Travel Speed:	150 [ $\frac{mm}{s}$ ]
Printing Time:	Flat – 54[min] , Upright 82[min]

במהלך הניסוי התקבלו כוח בפיפה מרבי ביחידות של [ $N$ ] ושקיעה ביחידות של [ $mm$ ], באמצעות נתונים אלו חשבו ממוצע הכביפה המרבי ומודול האלסטיות לפי הנוסחאות הבאות:

$$\sigma_{max} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

$\sigma$  – ממוצע בפיפה מרבי [ $Pa$ ].

$F$  – כוח בפיפה מרבי [ $N$ ].

$b$  – רוחב [ $mm$ ].

$h$  – גובה [ $mm$ ].

$L$  – מרחק בין התומכים [ $mm$ ].80.

לצורך קבלת מודול האלסטיות (Young's modulus) אנו נעזר בנוסחה המיעדת לחישוב מודול הכביפה (Flexural modulus), באמצעותה ניתן לבדוק אם כיוון שבבדיקת כפיפה ב-3 נקודות עברו חומרים כמו אכוביות, מתכות ופולימרים, מודול הכביפה ומודול האלסטיות זהים.

$$E = \frac{L^3 \cdot F}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta}$$

$F$  – כוח בפיפה מרבי [ $N$ ].

$b$  – רוחב [ $mm$ ].

$h$  – גובה [ $mm$ ].

$L$  – מרחק בין התומכים [ $mm$ ].80.

$\delta$  – שקיעת הקורה [ $mm$ ].

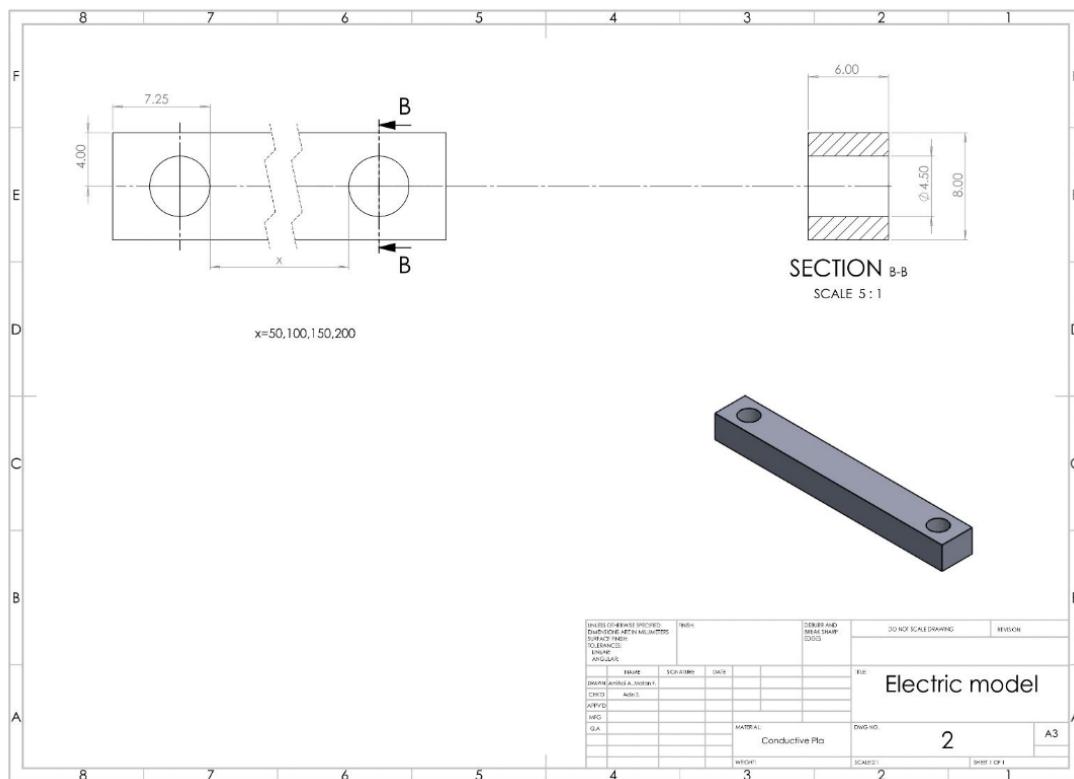
### 6.3 מדידת התנגדות

את התכונות החשמליות של הפולימר אנו החליטנו לחקור על ידי בדיקת ההתנגדות באמצעות מכשיר RCL. מתוך מדידת ההתנגדות ומדידות גיאומטריות אנו חישבנו את ההתנגדות הסגולית.



תמונה 6-4: מכשיר RCL

לאחר סקירת ספרות ובהתאם לתכונות המכניות שנחקרו בפרק הקודם, הוחלט לבצע הדפסה של הדגם בחצר מלכני, במצב הדפסה Flat וצורת מילוי Concentric.



תמונה 6-5: שרטוט הדגם לבדיקת ההתנגדות

ההתנגדות הסגולית הינה תכונה קבועה של החומר המוליך, הכולמר אינה אמורה להשנות בהתאם לשינוי גיאומטריה, בכדי לאמת את תכונה זו אנו השתמשו באורךים שונים.

המידות שנבחרו לדגם הם:

$$(14.5 + x) [mm] \times 8 [mm] \times 6 [mm]$$

$x$  – מרחק בין הקצוות הפנימיים של הקדחים [mm].

טבלה 6-3: טבלת הדפסות

	קבוצה	מצב הדפסה	מילי	אורך - X	כמות חלקים
6	A	Flat	Concentric	50 [mm]	
3	B	Flat	Concentric	100 [mm]	
3	C	Flat	Concentric	150 [mm]	
3	D	Flat	Concentric	200 [mm]	

לצורך מדידת ההתנגדות נעשו קדחים בדגם אליו הוכנסו תותבים, תוך התותבים הוכנסו ברגים אותם חיברנו למכשיר המדידה.



תמונה 6-6: תותב (איסרט)

הזרם זורם בין הקצוות הפנימיים של הקדחים ביוון ששם מוכנסים התותבים. החלקים בין הקצוות הפנימיים של הקדחים לבין קצוות הדגם הם חסרי משמעות מבחינת ההתנגדות והם בעלי משקל, אך לצורך שקליה מודיקת הודפסו 3 דגמים נוספים בעלי אורך  $50 [mm] = x$  שהם הוסרו חלקים אלו ונשקלו.

טבלה 6-4: פרמטרי הדפסה

<b>Material:</b>	<b>Electrically conductive composite PLA</b>
Material manufacturer:	ProtoPasta
Layer Height:	0.2 [mm]
Wall Thickness:	0.4 [mm]
Top/Bottom Thickness:	0 [mm]
Infill Density:	99%
Infill Pattern:	Concentric
Printing Temperature:	230°C / 235°C
Build Temperature:	50°C / 60°C
Print Speed:	30 [ $\frac{mm}{s}$ ]
Travel Speed:	150 [ $\frac{mm}{s}$ ]
Printing Time:	43[min] – 71[min]

התנגדות של גוף נתון תלויה גם בהסתגלות הסגולית של החומר החומר ממנו הוא עשוי וגם במדיו הפיזיים, את התנגדות הסגולית שchosבה השווים להתנגדות הסגולית של היצן ווידיאנו כי הדפסה של הדגם לא פגעה ביכולת הולכה החשמלית. ההתנגדות הסגוליתchosבה באמצעות הנוסחה הבאה:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l}$$

$\rho$  – התנגדות סגולית [ $\Omega \cdot mm$ ].

$R$  – התנגדות [ $\Omega$ ].

$A$  – שטח חתך [ $mm^2$ ].

$l$  – אורך [ $mm$ ].

**6.4 מדידת התנגדות בתלות בשינוי טמפרטורה**  
 את השפעת השינוי בטמפרטורה על התנגדות החשמלית אנו בדקנו על דגמים שעוצבו מראש, את הדגמים הדקנו על גבי משטח מחום וחיברנו לרב מודד (Fluke 287) לצורך מדידת התנגדות.

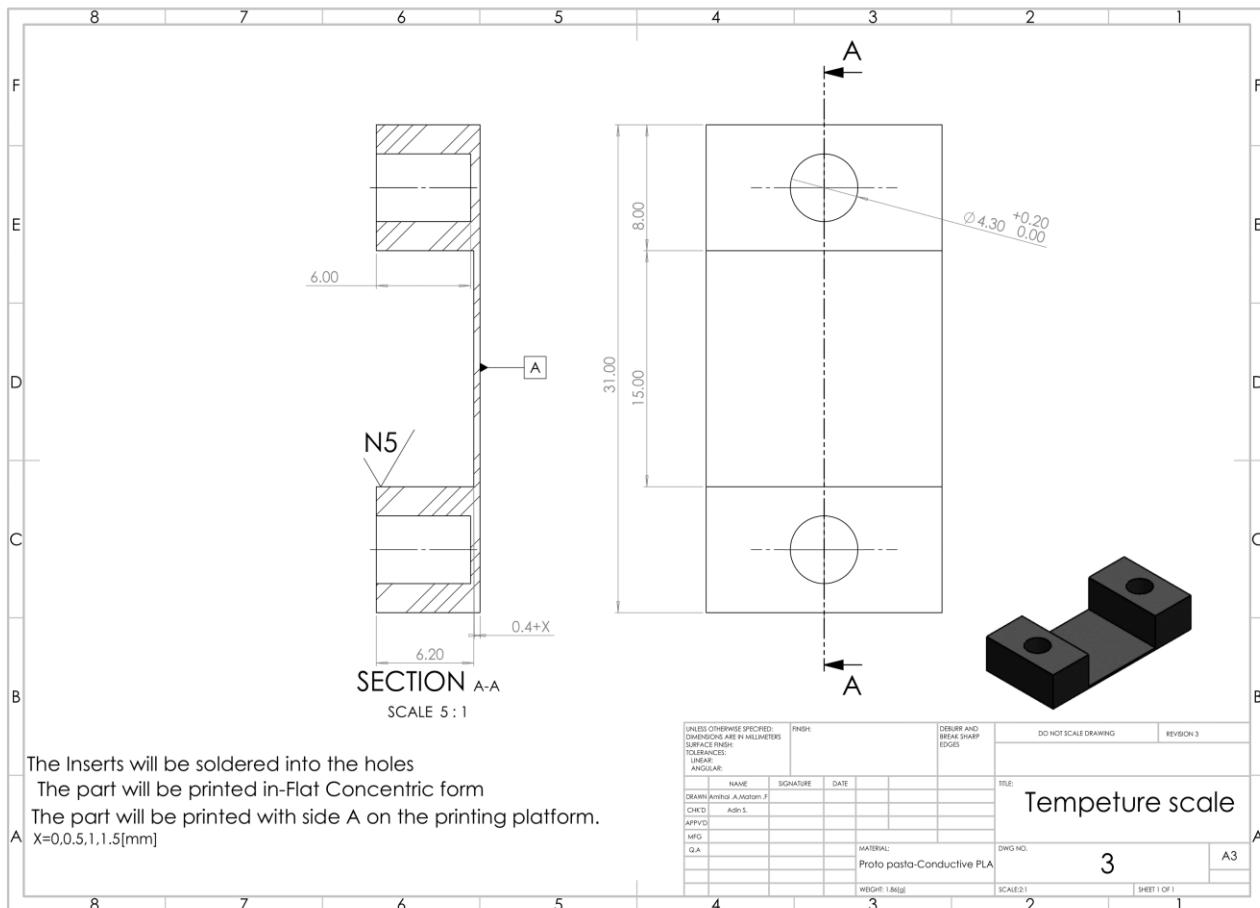


תמונה 6-7: רב מודד

בהתאם לתוצאות התכונות המכניות והחשמליות שנבחנו בפרקים קודמים הוחלט לבצע הדפסה של הדגם במצב הדפסה Flat וצורת מילוי Concentric.

עקב המוליכות התרמית הנמוכה של הפולימר הוחלט כי המשטח האמצעי יהיה בחתך מלבי נעל עובי נמוך ככל האפשר.

לצורך מדידת התנגדות נעשו הגבהות עם קדחים בקצוות הדגם, אליהם הוכנסו תותבים, לתוכן התותבים הוכנסו ברגים אותם חיברנו לרב מודד.



תמונה 6-8: שרטוט מד טמפרטורה

לצורך מדידת השפעת השינוי בטמפרטורה על ההתנגדות החשמלית של הדגם אנו ביצענו את הניסוי מספר פעמיים תוך כדי הגדלת העובי של המשטח האמצעי.

המידות שנבחרו למשטח האמצעי הם:

$$15 \text{ [mm]} \times (0.4 + x) \text{ [mm]}$$

$x$  – העובי אותו אנו מוסיפים לחלק [mm].

טבלה 6-5: טבלת הדפסות

קבוצה	מצב הדפסה	מילוי	גובה - X	כמות חלקים
1	Flat	Concentric	0 [mm]	3
2	Flat	Concentric	0.5 [mm]	3
3	Flat	Concentric	1 [mm]	3
4	Flat	Concentric	1.5 [mm]	3

טבלה 6-6: פרמטרי הדפסה

Material:	Electrically conductive composite PLA
Material manufacturer:	ProtoPasta
Layer Height:	0.2 [mm]
Wall Thickness:	0.4 [mm]
Top/Bottom Thickness:	0 [mm]
Infill Density:	99%
Infill Pattern:	Concentric
Printing Temperature:	230°C / 235°C
Build Temperature:	50°C / 60°C
Print Speed:	30 [ $\frac{mm}{s}$ ]
Travel Speed:	150 [ $\frac{mm}{s}$ ]
Printing Time:	47 [min] – 50 [min]

הניסוי בוצע באמצעות שתי מערכות ניסוי שונות.

6.4.1 מערכת ניסוי ראשונה למד טמפרטורה בנייסוי זה, על משטח מחומר של חברת "Fried Electric" מדגם D GMH 5/5 GMH הונח הדגם אשר מתחתיו נרחה משחה להולכת חום לצורך שיפור ההולכה התרמית בין המשטח לתחתית הדגם.

למשטח המחומר הוצמד טרמומטר בעורתו נמדדה טמפרטורת העבודה, החיבורים בין הרוב מודד לדגם המחברים לברגים הנמצאים בתחום התו定点ים הוחזקו על ידי הסטודנטים בזמן הניסוי.

טוווח הטמפרטורה שנבדק במחזור הראשון היה  $30^{\circ}C - 50^{\circ}C$  אבל הוא ירד ל-  $45^{\circ}C - 30^{\circ}C$  עקב דפורמציה של הדגם.

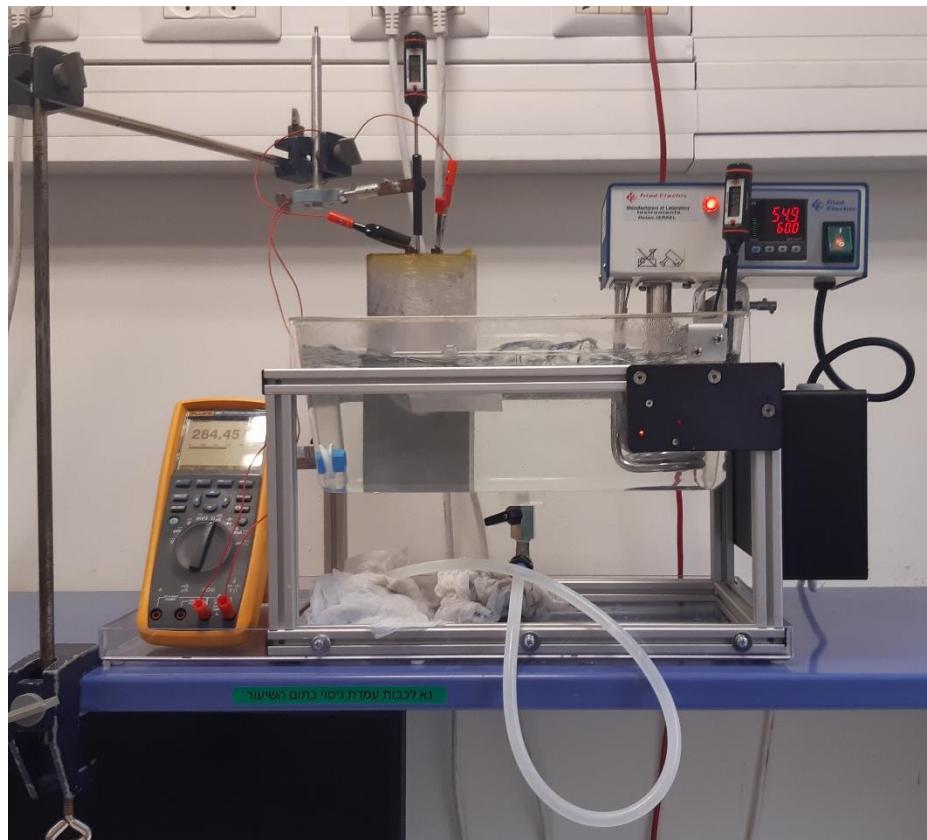


תמונה 6-9: מערכת ניסוי ראשונה

6.4.2 מערכת ניסוי שנייה למד טמפרטורה בניסוי זה הדגם הנימיך מודבק בעזרת דבק תרמי לחטיבת אלומיניום שנמצא בתוך בריכת מים מחומרת. מטרת הדבק התרמי היא טרמי לשפר הולכה תרמית, לספק בידוד חשמלי ולקבע. המים מחממים את חטיבת האלומיניום ובכך הדגם המודפס מתחםם.

ישנם שני מדי טמפרטורה בניסוי – אחד הנמצא במים ומאפשר לנו לראות את הטמפרטורה האמיתית של המים והשני מוצמד לחטיבת האלומיניום בכדי לראות את טמפרטורת העבודה. לדגם מחובר רב ממדד המחבר לברגים הנמצאים בתוך התותבים שמודד את ההתנגדות לאורך כל זמן הניסוי.

בדגמים השונים בוצעו שני מוחזרים הכלולים עליה וירידה של הטמפרטורה בטוווח  $24^{\circ}\text{C} - 42^{\circ}\text{C}$  שהוא תחום הפעולות האנושי, במידה ועוברם את טווח הטמפרטורות זהה זה אנקמן מסתכנים בעיות גדול של הדגמים.



תמונה 6-10: מערכת ניסוי שנייה

6.5 מדידת התנגדות בתלות בהפעלה עומס משתנה  
אנו בדקנו על דגמים שעוצבו מראש את השפעת השינוי בעומס המופעל על ההתנגדות החשמלית,  
הדגמים נבחנו ב מבחן לחיצה.

בניסוי זה השתמשנו בתקן של פולימרים ASTM D695. המבחן מבוצע בכר שהדגם נתמך מלמטה,  
ומעליה מופעל כוח באופן הדרגי עד להגעה לעומס הרצוי.

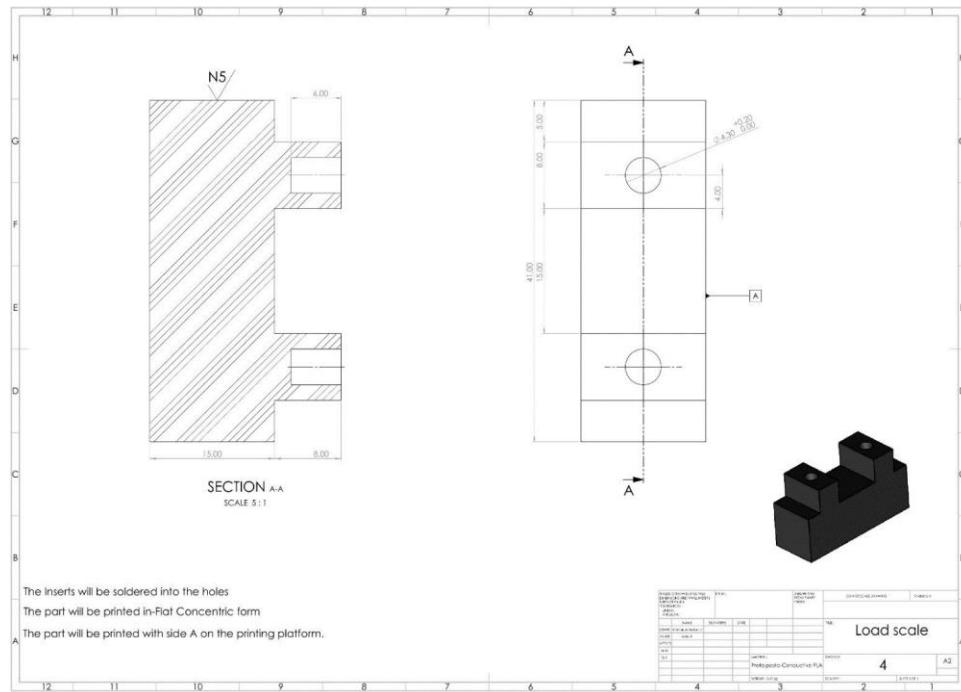
לצורך מדידות ההתנגדות אנו חיברנו את הדגם לרוב מודד (Fluke 287).



תמונה 6-11: מערכת הניסוי

בהתאם לתוצאות התכונות המכניות והחשמליות שנבחנו בפרקious קודמיים הוחלט לבצע הדפסה של הדגם במצב הדפסה Flat וצורת מילוי Concentric.

לצורך מדידת ההתנגדות נעשו הגבהות עם קדחים בקצוות הדגם, אליו הוכנסו תותבים, לתוכם הוכנסו ברגים אותם חיברנו לרוב מודד.



תמונה 6-12: שרטוט מד העומס

לצורך מדידת השפעת השינוי בעומס על התנגדות החשמלית של הדגם אנו ביצענו את הניסוי מספר פעמים.

טבלה 6-7 : פרמטרי הדפסה

Material:	Electrically conductive composite PLA
Material manufacturer:	ProtoPasta
Layer Height:	0.2 [mm]
Wall Thickness:	0.4 [mm]
Top/Bottom Thickness:	0 [mm]
Infill Density:	99%
Infill Pattern:	Concentric
Printing Temperature:	230°C / 235°C
Build Temperature:	50°C / 60°C
Print Speed:	30 [ $\frac{mm}{s}$ ]
Travel Speed:	150 [ $\frac{mm}{s}$ ]
Printing Time:	141 [min]

### 6.5.1 מערכת הניסוי למד עומס

בניסוי זה, במתיקן העומסה הקורי בשם "Exceed" של חברת "MTS" מודגם E43 הונח הדגם בין שתי מבודדים העשוים מקרמיקה בעלי עובי של [mm] 18.5, ביצעו את הניסוי עם מהירות לפ' תקן ASTM D695 שקובע מהירות של הפעלת עומס כ-  $\frac{mm}{s}$  0.02.

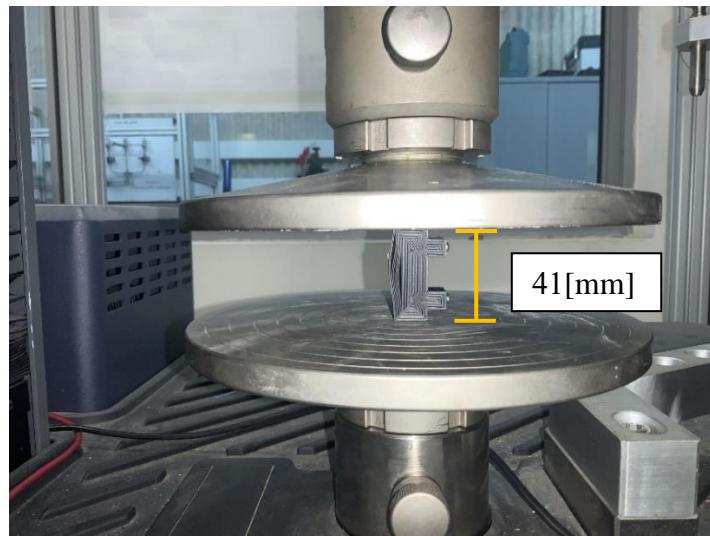
המבודדים סיינו לנו בבדיקה הפולימר מן המערכת, היהת והפולימר מוליך חשמל, רצינו לנתק אותו מכל גורם אפשרי אשר יכול להשפיע על ההתנגדות של הפולימר.



תמונה 6-13: מבודדים

לדגם מחובר רב מడ המחבר לברגים הנמצאים בתחום התו吐בים שמודד את ההתנגדות לאורך כל זמן הניסוי.

המכונה החלה להפעיל עומס חד צרי על הדגם, תחיליה ניבדק עומס מקסימלי כפי שנקבע בניסויים לביקורת מאיץ כפיפה מקסימלי, שהוא [*N*] 70, לאחר מכן בהתאם לתוצאות ההתנגדות נעשתה עלייה בעומס.



תמונה 6-14: הדגם הנבדק בהפעלת עומס

## 7 תוצאות

### 7.1 אפיון צפיפות

#### 7.1.1 צפיפות דגמים לכפיפה ב-3 נקודות

טבלה 7-1: טבלת צפיפות

Density $\frac{g}{cm^3}$						
#	Flat			Upright		
#	45/-45	0/90	Concentric	45/-45	0/90	Concentric
1	1.10	1.10	1.13	1.08	0.97	1.11
2	1.12	1.10	1.12	1.09	1.01	1.12
3	1.12	1.08	1.13	1.12	0.95	1.12
<b>Average</b>	<b>1.11</b>	<b>1.09</b>	<b>1.13</b>	<b>1.10</b>	<b>0.98</b>	<b>1.12</b>
4	1.27	0.96	1.11	1.17	0.76	1.15
5	1.28	0.92	1.21	1.27	0.97	1.17
6	1.27	0.95	1.22	1.26	0.84	1.15
<b>Average</b>	<b>1.27</b>	<b>0.95</b>	<b>1.18</b>	<b>1.23</b>	<b>0.85</b>	<b>1.16</b>

בטבלה לעיל מופיעים צפיפות וממוצעי הצפיפות של כל הדגמים לפי צורת הדפסה ומרקם הדפסה.

מתוך הטבלה ניתן לראות שדגמים שהדפסו בצורה הדפסה:

Flat – Concentric •

Flat – +45/-45 •

Upright - Concentric •

Upright - +45/-45 •

הם בעלי הצפיפות הגבוהה ביותר.

#### 7.1.2 צפיפות דגמים למדידת התנודות

טבלה 7-2: טבלת צפיפות

#	A	B	C	D
1	1.20	1.21	1.18	1.20
2	1.19	1.15	1.18	1.16
3	1.16	1.19	1.19	1.20
<b>Average</b>	<b>1.18</b>	<b>1.18</b>	<b>1.19</b>	<b>1.19</b>

בטבלה לעיל מופיעים צפיפות וממוצעי הצפיפות של כל הדגמים באשר:

• קבוצה A בעלת אורך של [mm] .50

• קבוצה B בעלת אורך של [mm] .100

• קבוצה C בעלת אורך של [mm] .150

• קבוצה D בעלת אורך של [mm] .200

ניתן לראות כי הצפיפות בדגמים השונים נמצא מאוד קרוב, עובדה זו מצביעה על כך שאיכות הדפסה היא טובה.

## 7.2 בפייה ב-3 נקודות



תמונה 7-1: כפייה ב-3 נקודות

### 7.2.1 שקיעות

טבלה 7-3: טבלת שקיעות

Cross Head [mm]						
#	Flat			Upright		
	45/-45	0/90	Concentric	45/-45	0/90	Concentric
1	1.00	1.20	1.20	0.25	0.60	0.45
2	1.50	1.10	1.80	0.30	-	0.50
3	1.10	1.20	1.15	0.20	0.10	0.40
<b>Average</b>	<b>1.20</b>	<b>1.17</b>	<b>1.38</b>	<b>0.25</b>	<b>0.35</b>	<b>0.45</b>
4	1.70	1.30	2.30	1.20	-	0.70
5	2.30	1.00	2.00	0.50	0.20	0.85
6	2.00	1.20	2.00	0.85	0.05	0.80
<b>Average</b>	<b>2.00</b>	<b>1.17</b>	<b>2.10</b>	<b>0.85</b>	<b>0.13</b>	<b>0.78</b>

בטבלה לעיל מופיעים השקיעות וממציעי השקיעה שהתקבלו במהלך הניסוי.

מתוך הטבלה ניתן לראות שדגמים שהדפסו בצורה הדפסה:

Flat – Concentric •

Flat – +45/-45 •

הם בעלי השקיעה הגסה ביותר.

**חשיבות לצין:** דגמים 3,2,1, במדפסת שונה מדגים 6,5,4, ולכן ניתן לראות הבדלים בין הנתונים, אך המסקנות שניתן להסיק מ垦בוצות נתונים אלו הן זהות.

### 7.2.2 כוח כפיפה מרבי

טבלה 7-4: טבלה כוחות כפיפה מרביים

UTS [N]						
	Flat			Upright		
#	45/-45	0/90	Concentric	45/-45	0/90	Concentric
4	192.00	38.95	203.86	58.80	-10.47	55.54
5	193.54	34.68	201.10	41.37	8.54	60.55
6	197.82	43.09	198.00	73.18	0.98	68.25
Average	195.68	38.91	200.99	57.78	-0.32	61.45

בטבלה לעיל מופיעים כוחות ה cpfiphה המרביים וממוצעם כוחות ה cpfiphה המרביים שהתקבלו במהלך הניסוי.

מתוך הטבלה ניתן לראות כי:

1. חלקים שהודפסו בצורה Upright חלשים באופן משמעותי לעומת חלקים שהודפסו בצורה Flat.
2. הדגמים שהראו את החזק ביותר בינו לבין הם:

Flat – Concentric •

Flat – +45/-45 •

ניתן לראות לפי הממוצע כי דגמים מצורת Flat – Concentric הם בעלי החזק הגבואה ביותר.

### 7.2.3 מאץ כפיפה מרבי

טבלה 7-5: טבלה מאצץ כפיפה מרביים

$\sigma [MPa]$						
	Flat			Upright		
#	45/-45	0/90	Concentric	45/-45	0/90	Concentric
4	44.23	9.70	43.46	12.47	-2.59	12.32
5	46.00	8.61	46.03	9.85	2.12	13.59
6	46.65	10.63	46.41	17.26	0.24	14.79
Average	46.33	9.64	45.30	13.19	-0.07	13.57

בטבלה לעיל מופיעים מאצץ ה cpfiphה המרביים וממוצעם מאצץ ה cpfiphה המרביים שהושבו במהלך הניסוי.

מתוך הטבלה ניתן לראות שדגמים שהדפסו בצורה הדפסה:

Flat – Concentric •

Flat – +45/-45 •

הם בעלי מאצץ ה cpfiphה הגבוהים ביותר.

7.2.4 מודול האלסטיות  
טבלה 6: טבלת מודול אלסטיות

Young's Modulus [GPa]						
	Flat			Upright		
#	45/-45	0/90	Concentric	45/-45	0/90	Concentric
4	2.15	0.63	1.59	0.87	-	1.48
5	1.68	0.73	1.91	1.67	0.90	1.34
6	1.68	0.75	1.56	1.66	0.41	1.54
Average	1.84	0.70	1.68	1.40	0.66	1.45

בטבלה לעיל מופיעים כוחות הקפיפה המרביים וממוצעו ככוחות הקפיפה המרביים שוחשבו במהלך הניסוי.

ניתן לראות כי הערכים בעלי מודול יאנג הגבוה ביותר הם:

- Flat – Concentric
- Flat – +45/-45

**חשיבות לצין:** במהלך בדיקות אלו עברו דגמים 1,2,3 התגלה כי הגרפים נשמרו אך התוצאות לא, וכן התוצאות שנרשמו בטבלאות מאמצז המתיחה ומודול האלסטיות עבור דגמים 1,2,3 נלקחו מן הגרפים, אך למרות זאת תוצאות אלו לא שונות מדגמים 4,5,6 שבוצעו בהלכה.

7.2.5 סיכום תוצאות עבור תכונות מכניות  
בחלק זה של הפROYיקט בחנו את התכונות המכניות של הפולימר תוך כדי שינוי צורת הדפסה וצורת מילוי, מטרתנו הייתה לבחנות באיכות התכונות שנמצאו את צורת הדפסה וצורת המילוי האידאלית עבור דגמים עתידיים אותם נרצה לחקור.

להלן תוצאות המבחן (הערכים המספריים הם ערכים ממוצעים):

טבלה 7: טבלה מסכמת עבור התכונות המכניות

צורת הדפסה: (Flat)	שכיבה
צורת מילוי: (Concentric)	קונצנטרטי
צפיפות: $1.18 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$	
כוח קפיפה מרבי: 200.99 [N]	
מאמצז קפיפה מרבי: 45.30 [MPa]	
מודול אלסטיות: 1.68 [GPa]	

לפי נתוני יtran נתון כי צפיפות החומר היא בערך  $\left[ \frac{g}{cm^3} \right] 1.24$ , נתון זה מתאים לתוצאות שהתקבלו במהלך המדידות.

בהתאם למבחן המופיע בסקר הספרות [3] נמצא של black PLA – carbon black הוא בעל התכונות הבאות:

טבלה 8: תוצאות מחקר סקר ספרות [3]

מאמצז קפיפה מרבי: 30.8 [MPa]	מודול אלסטיות: 0.68 [GPa]
------------------------------------	------------------------------

הסיבה להבדלים בין הערכיהם שלנו לבין הספרות היא צורת הדרישה. במחקר [3] הדגמים הודפסו בצורה אורכית (0°) ובפי שניתן לראות בסיכון התוצאות של הבדיקות ההפוכה לצורת הדרישה יש השפעה גדולה על התכונות המבניות של הדגם.

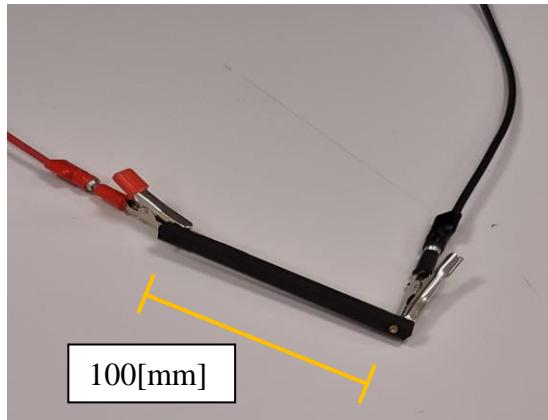
בנוסף בחלק מפרויקט זה הוחלט לייצר מד משקל ומד טמפרטורה בתוצר סופי, התכונות המבניות שנמצאו במהלך הניסוי יסייעו לנו להבין מה הוא העומס המקסימלי אותו נרצה להפעיל על מד המשקל מוביל לגורם לדפורמציה פלסטית.

במידה ואנו נעבור את התחום האלסטי תיווצר לנו דפורמציה פלסטית בלתי הפיכה במד המשקל, דבר אשר יגרום לשינוי תמיד בהתנגדות החשמלית של החומר. במידה וההתנגדות החשמלית תשתנה באופן תמיד, לא יוכל להשתמש בקשר בין העומס לבין השינוי בהתנגדות שנמצא בכך לחשב את המשקל.

השפעת השינוי בעומס על התנגדות החשמלית של הפולימר נובעת ממספר סיבות:

1. התנגדות תלולה במידות הגיאומטריות של הנגד, כלומר שינוי במידות האילו יגרום לשינוי בהתנגדות, כאשר יופעל עומס על החלק ייווצרו שינויים קטנים בגיאומטריה של החלק, דבר זה יגרום לשינוי בהתנגדות, שינוי שאנו יכולים למדוד.
2. פחמן שחור הוא חומר שהוסף בתפוזרת לחומר הדרישה והוא זה שמשמעותו לומר את יכולת להויל, הפחמן השחור יוצר דרכי הולכה שמאפשרות לזרם לעبور בין הסיבים. כאשר מופעל עומס על החלק דרכי הולכה אלה מתקרבות ולכן יכולת הולכה של החלק עולה או במילוי אחרות ההתנגדות של חלק יורדת. את השינוי זהה אנחנו יכולים למדוד באמצעות קשר בין ההתנגדות של החלק לעומס או משקל שמופעל על החלק.

### 7.3 תבונות חשמליות



תמונה 7-2: חיבור RCL לדגם

#### 7.3.1 התנגדות

טבלה 7-9: טבלת התנגדויות

Resistance [ $\Omega$ ]				
#	A	B	C	D
1	156.41	271.53	391.52	536.37
2	166.48	267.17	396.56	10000.00
3	163.52	274.24	394.61	3300.00
<b>Average</b>	<b>162.14</b>	<b>270.98</b>	<b>394.23</b>	<b>536.37</b>

בטבלה לעיל מופיעים התנגדויות וממוצעי התנגדויות של כל הדגמים שנמצאו באמצעות מכשיר .RCL

ניתן לראות כי דגמים D2 ו-D3 הם בעלי התנגדות גבוהה מאשר יתר הדגמים עקב שימוש בתובבים שונים, דבר המשפיע על חישוב התנגדות הסגולית, אך לא נעשה בהם שימוש בחישוב ממוצע התנגדות.

#### 7.3.2 התנגדות סגולית

טבלה 7-10: טבלת התנגדויות סגוליות

Resistivity [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]				
#	A	B	C	D
1	14.51	12.76	12.42	12.71
2	15.26	12.80	12.76	243.62
3	14.81	12.91	12.43	76.50
<b>Average</b>	<b>14.86</b>	<b>12.82</b>	<b>12.53</b>	<b>12.71</b>

בטבלה לעיל מופיעים התנגדויות הסגוליות וממוצעי התנגדויות הסגוליות של כל הדגמים שוחשו.

בטבלה ניתן לראות כי דגמים D2 ו-D3 הם בעלי התנגדות סגולית גבוהה מאשר יתר הדגמים עקב ביצוע הברחות ושימוש בתובבים שונים. שילוב של שני פעולות אלו גורם לעלייה משמעותית בתנגדות ולבסוף לא נעשה בתוצאות אלו שימוש עתידי.

התנגדות הסגולית של הדגמים B, C ו-D1 כמעט זהות בעוד שההתנגדות הסגולית של A גדולה באופן משמעותי וקרובה לתנגדות היצורן.

7.3.3 סיכום תוצאות עבורתכונות החסמיות  
בחלק זה של הפרוייקט בחנו את התכונות החסמיות של הפולימר תוך כדי שינוי אורך הדגם, מטרתנו הייתה לזהות אם אכן יש הולכה חסמית ואם הדפסת החומר פוגעת בהולכה החסמית של הפולימר.

**חשיבות לציין:** כל הדגימות בנסיוי זה הודפסו בצורה Flat – Concentric Flat עקב בדיקות מבניות שבוצעו לפני וכותזאה מחקר חיצוני שנכתב בנושא.

להלן תוצאות המבחן (הערכים המספריים הם ערכים ממוצעים):

טבלה 7-11: טבלה מסכמת עבור התכונות החסמיות

1.18~1.21 [ $\frac{g}{cm^3}$ ]	צפיפות:
162.14~536.37 [ $\Omega$ ]	התנגדות:
12.71~14.86 [ $\Omega \cdot cm$ ]	התנגדות סגולית:

לפי נתוני היצן ההתנגדות הסגולית היא:

1. [ $cm \cdot \Omega$ ] 115 במקביל לשכבה (בכוון Z).

2. [ $cm \cdot \Omega$ ] 30 בণץ לשכבה (בכוון X – Z).

בעוד שההתנגדות שקיבלו בדגמים B, C ו-D היא [ $cm \cdot \Omega$ ] 12.7 בणץ לשכבה.

**חשיבות לציין:** אנו רצינו להציגו להתנגדות סגולית נמוכה ככל האפשר וכן אנו הדפסה את הדגמים כאשר ההתנגדות הסגולית היא בणץ לשכבה (בכוון X – Z).

ישנם כמה הסברים אפשרים להבדלים הדrusטיים בין הערכים שהוצגו על ידי היצן לבין תוצאות המבחן:

1. שינויים בהולכה בתוך סיב החומר – כמו שצוין במחקר [5] למרות שאין שינויים במיקרו מבנה של סיב ההדפסה עדיין ישנה ירידת בהולכה הסגולית של החומר לאחר ההדפסה, בין אם זה עקב

שינויים שאנו חסמו לא רואים במיקרו מבנה, התקרובות של דרכי הולכה או מעבר חלקו של הפולימר לחוכיות, ברגע לא ניתן לדעת.

2. צורת הדפסה – הערכים שモוצאים על ידי היצן הם בणץ לשכבה או במקביל לשכבה אבל אין מידע לגבי צורת הדפסה בה נבדקו הערכים הנתונים על ידי היצן. ניתן שבסכורת הדפסה שבסכורת הדפסה שבחרנו ישנים דרכי הולכה טובות יותר, ולכן ההתנגדות הסגולית שנמדדה אצלנו נמוכה יותר.

3. יתכנו תהליכי אחרים אשר משפיעים על יכולת הולכה של החומר – גורמים כמו לחות בחומר בזמן ההדפסה, תנאי אבסון החומר לפני הדפסה.

#### 7.4 השוואה בין התוצאות לספרות

טבלה 7-12: טבלת השוואה

מבחן [5]	נתוני יצן:	תוצאות ראשונית	מבחן [3]	מבחן [3]
מאיץ כפיפה מרבי	45.3 [MPa]		30.8 [MPa]	
מודול אלסטיות	1.68 [GPa]		0.68 [GPa]	
התנגדות סגולית	13.2 [ $\Omega \cdot cm$ ]	115 [ $\Omega \cdot cm$ ], $\hat{Z}$ 30 [ $\Omega \cdot cm$ ], $\hat{X}, \hat{Y}$		16.7 [ $\Omega \cdot cm$ ]

## 7.5 תוצאות מדידת התנגדות בתלות בטמפרטורה

### 7.5.1 מדידות גיאומטריות

טבלה-13: מדידות גיאומטריות

X=1.5 [mm]	نمذג כאשר X=1 [mm]	نمذג כאשר X=0.5 [mm]	نمذג כאשר X [mm]	תיאורי
30.9	31	31	31	אורך כולל [mm]
1.7	1.1	0.7	0.4+X	עובי מרכז [mm]
14.9	15	15	15	אורך מרכז [mm]
15	15.3	15.1	15	רוחב [mm]
6.4	6.3	6.3	6.6	עובי תושבת [mm]

הטבלה המופיעה לעיל, טבלה 13-7, הינה טבלת המציג את ממוצעי הדגמים עבור כל X.

### 7.5.2 תוצאות ניסוי ראשון של מד טמפרטורה

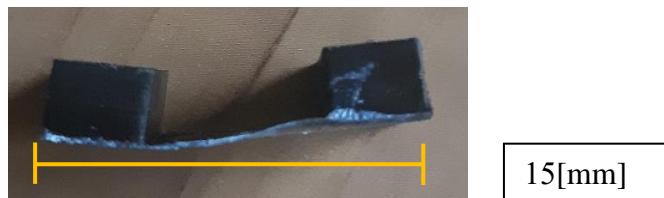


תמונה-7: פלטת חימום דגם GMH 5/5 D

טבלה 14: דגם 1 – טבלת התנגדויות

#	Temperature:	30°C	35°C	40°C	45°C
1	Resistance: [kΩ]	0.54	0.88	1.02	1.11

בטבלה לעיל, טבלה 13-7, ניתן לראות את מדידות ההתנגדות בתלות בטמפרטורה, במחזור זה אנו רצינו להיות בטוחים בטמפרטורות של  $30^{\circ}\text{C}$  –  $50^{\circ}\text{C}$ , אך בעת ביצוע המדידות נתקלנו בדיפורמציה שנוצרה בדגם ולכן הניסוי הופסק.



תמונה-7: דיפורמציה בדגם מס' 1

הוחלט בשבי המחזורים הבאים להקטין את טווח הטמפרטורת ל-  $30^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}$  ואות מדידות התחנכות לבצע בכלל קפיצה של  $3^{\circ}\text{C}$ .

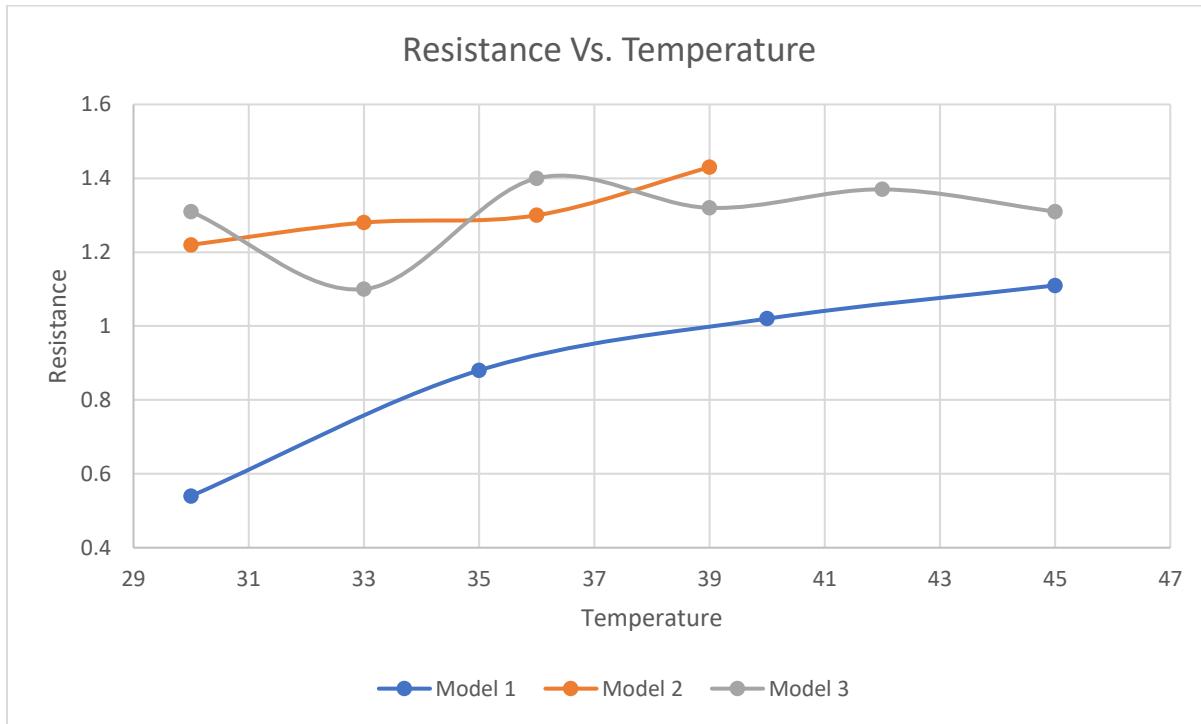
טבלה 7-15: דגמים 2 ו-3 – טבלת התחנכות

#	Temperature	$30^{\circ}\text{C}$	$33^{\circ}\text{C}$	$36^{\circ}\text{C}$	$39^{\circ}\text{C}$	$42^{\circ}\text{C}$	$45^{\circ}\text{C}$
2	Resistance: [ $k\Omega$ ]	1.22	1.28	1.30	1.43		
3	Resistance: [ $k\Omega$ ]	1.31	1.10	1.40	1.32	1.37	1.31

בדומה לדגם הראשון גם בשני ובשלישי נוצר עיוות בדגם, עיוות זה קורה בדגם השני בטמפרטורה יותר נמוכה כפי שניתן לראות בטבלה לעיל, טבלה 7-15.



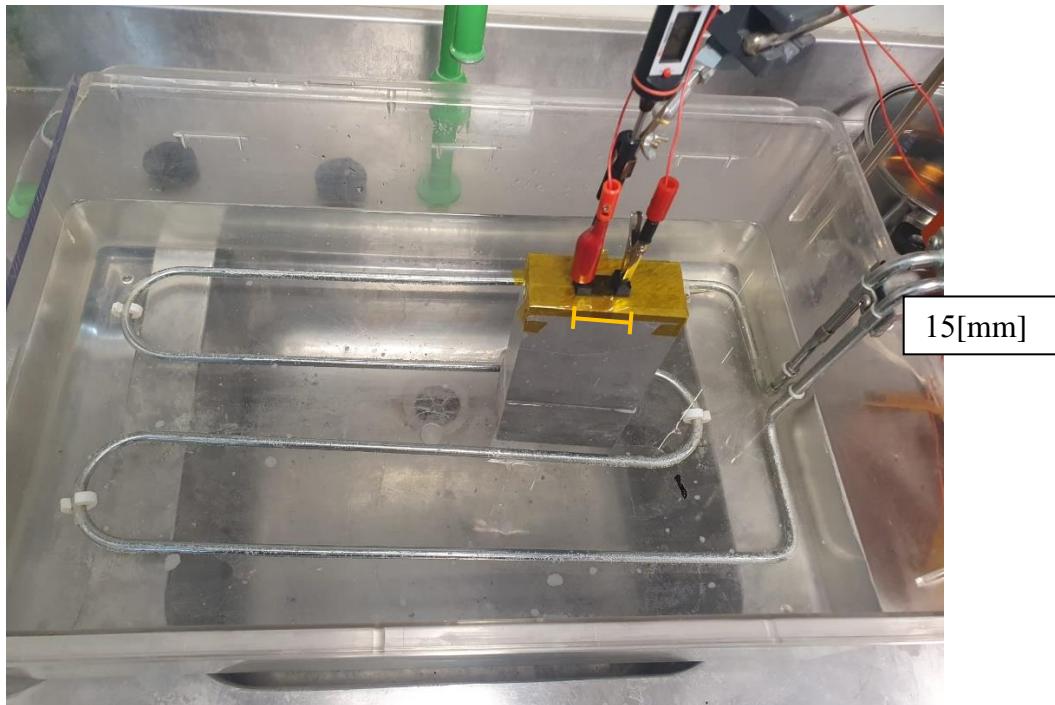
תמונה 7-5: דפורמציה בדגמים 1, 2 ו-3



גרף 7-7: התחנכות נגד טמפרטורה - נסוי 1

בעקבות העיוויתים שנוצרו בדגמים נמנעה מאייתנו האפשרות למדוד מחזר נוסף ולבצע בדיקות חוזרות, לכן הוחלט להחליף את מערכת הניסוי ולנסות לבצע את הניסוי בשנית.

### 7.5.3 תוצאות ניסוי שני של מד טמפרטורה



תמונה 7-6: ערכת ניסוי 2 - מבט על

טבלה 7-16: טבלת ממוצע התנגדויות בעלייה וירידה

Temperature increase:				Temperature decrease:			
X [mm]:	0.5	1	1.5	X [mm]:	0.5	1	1.5
Temperature:	Resistance [ $\Omega$ ]:			Temperature:	Resistance [ $\Omega$ ]:		
24°C	260	196	145	42°C	423	306	250
26°C	280	200	149	40°C	412	293	241
28°C	298	214	158	38°C	388	275	228
30°C	319	229	168	36°C	360	255	217
32°C	339	246	180	34°C	340	236	200
34°C	353	267	197	32°	325	225	188
36°C	373	288	210	30°C	310	213	178
38°C	393	307	222	28°C	295	204	171
40°C	411	319	233	26°C	282	193	163
42°C	419	328	240	24°C	270	172	153

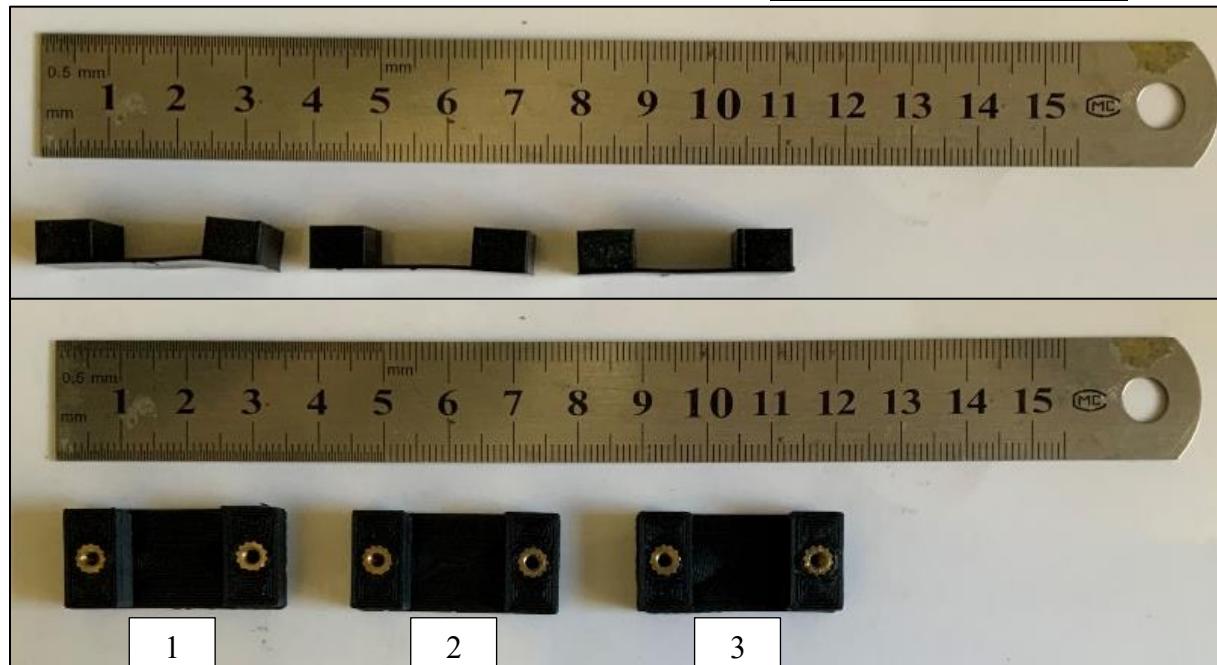
נכיר כי המידות שבוחרו למשטח האמצעי הם:

$$15 \text{ [mm]} \times (0.4 + x) \text{ [mm]}$$

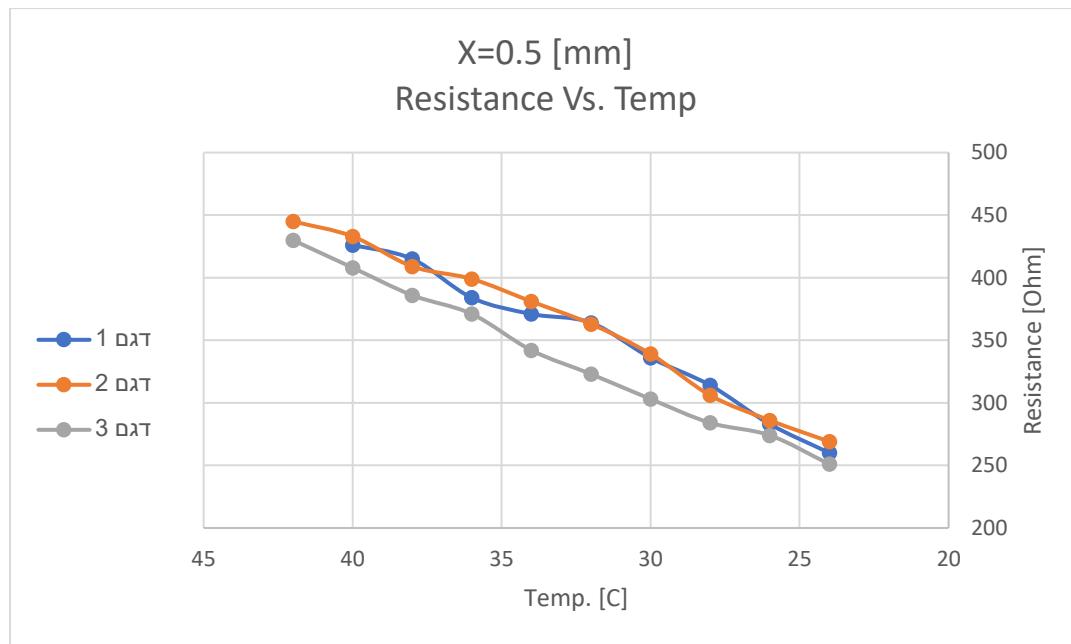
$x$  – העובי אותו אנו מוסיפים לחלק [mm].

בטבלה לעיל, טבלה 16-7, ניתן לראות את ממציעי ההתנגדויות כתלות בשינוי טמפרטורה, ניתן להיווכח כי בכלל שהדגם עבה יותר, ההתנגדות שלו נמוכה יותר, ובנוסף אין הבדל משמעותי ממשמעו של ניכר בהתנגדות החלק כאשר אנו מודדים את ההתנגדות בטמפרטורה הנמצאת בעלייה לעומת מדידת ההתנגדות בטמפרטורה הנמצאת בירידה ככלומר היסטוריים נמור.

#### 7.5.3.1 דגמים עם תוספת עובי 0.5 מ"מ

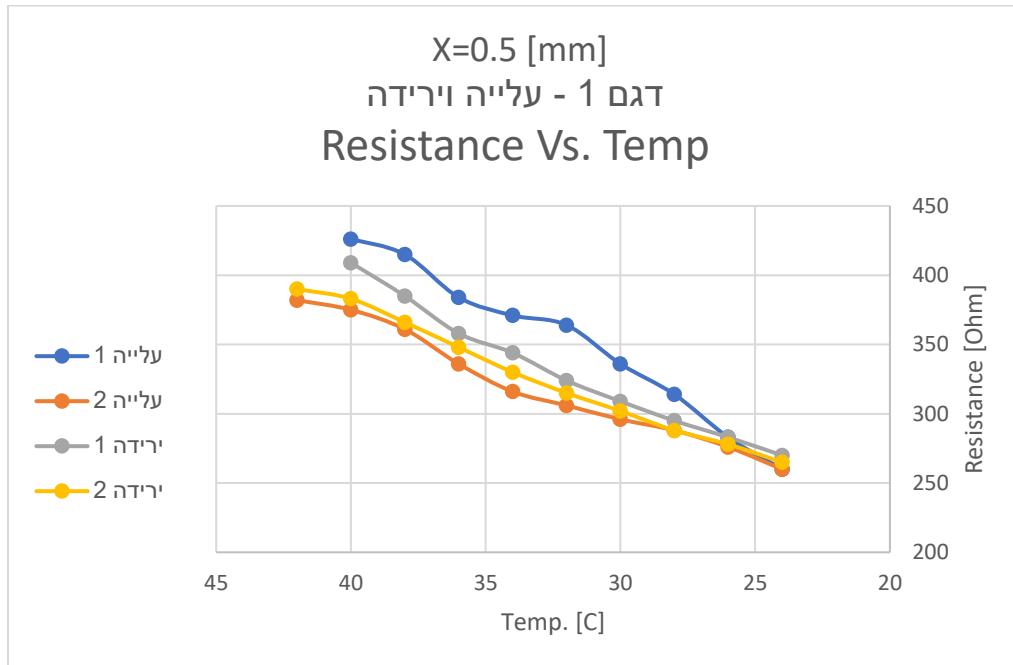


תמונה 7-7: דגמים בתוספת עובי [mm] = X לאחר הניסוי



גרף 7-2: ההתנגדות כנגד טמפרטורה - [mm] X=0.5

בגרף לעיל, גרף 3-7, ניתן לראות השוואת בין הعليיה בהतנגדות של שלושת הדגמים השונים שהודפסו עם תוספת של  $X=0.5$  [mm] לעובי, גרף זה מראה את השינוי בהתנגדות בזמן עליית הטמפרטורה, ניתן לראות שהערכיהם קרובים מאוד לאורך כל הניסוי.

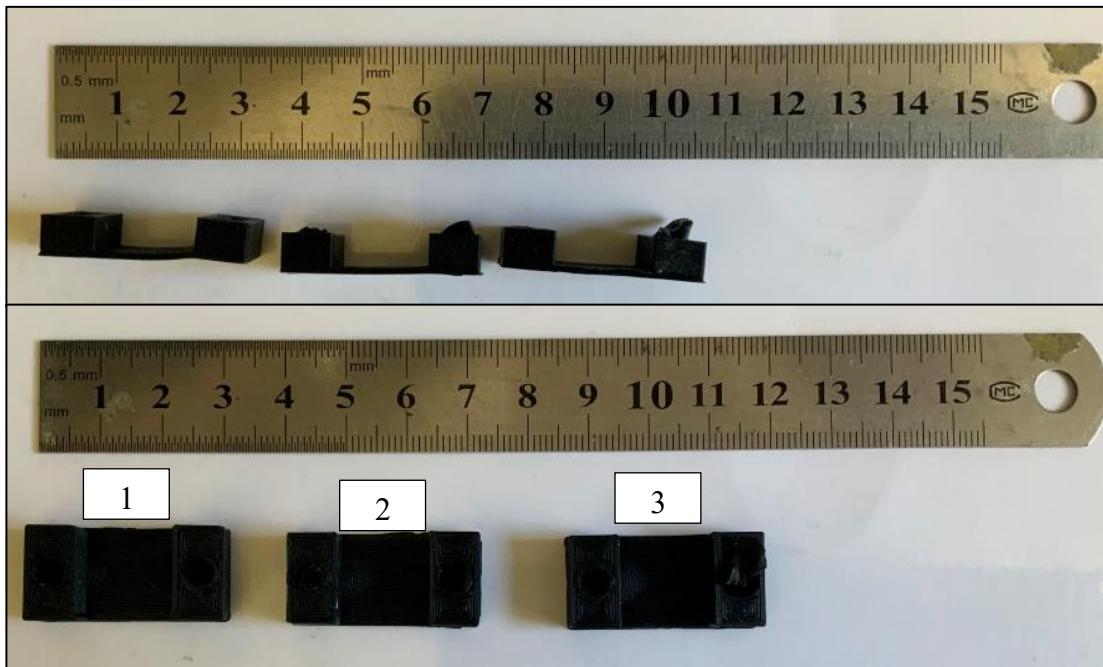


גרף 3-7: התנגדות כנגד טמפרטורה -  $[mm]$  דגם 1

בגרף זה, גרף 4-7, ניתן לראות את תוצאות של שתי מכוזרים של דגם 1, הכולמת שני מכוזרים של עלייה מ- $24^{\circ}C$  עד ל- $42^{\circ}C$  וירידה מ- $42^{\circ}C$  ל- $24^{\circ}C$ .

ניתן לראות שלמרות שיש הפרט קטן בין ההתנגדויות בין המכוזרים הקשר קשור בין הטמפרטורה להתנגדות נשאר זהה.

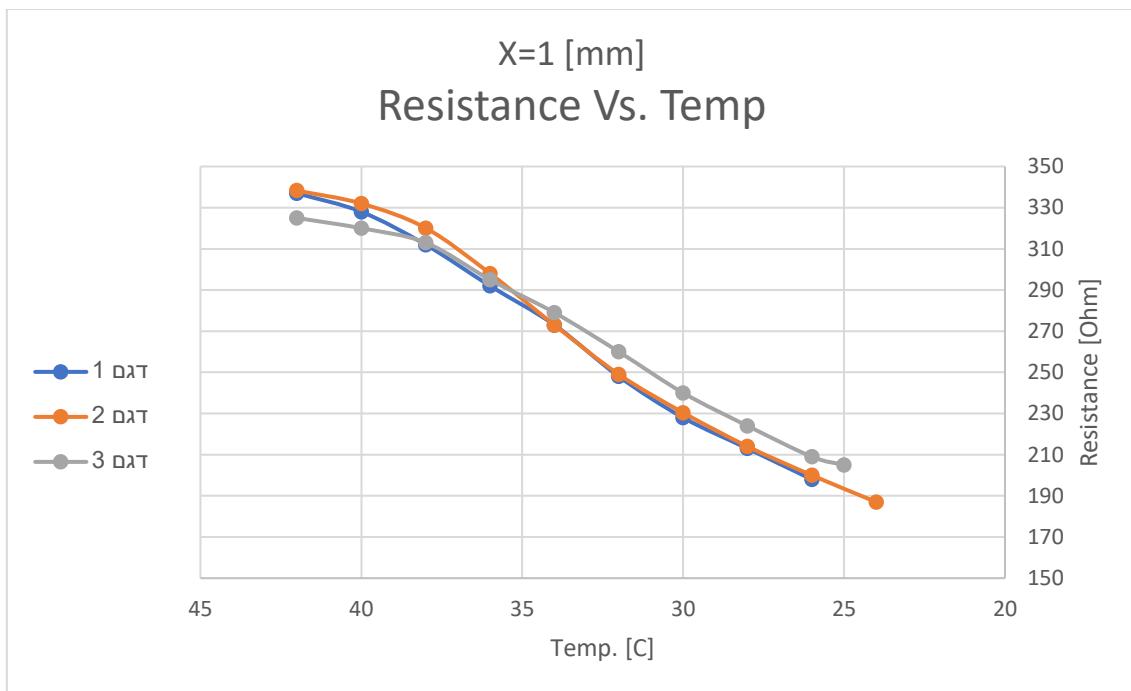
7.5.3.2 דגמים בתוספת עובי 1 מ"מ



תמונה 7-8: דגמים בתוספת עובי [mm] 1=X לאחר הניתוי

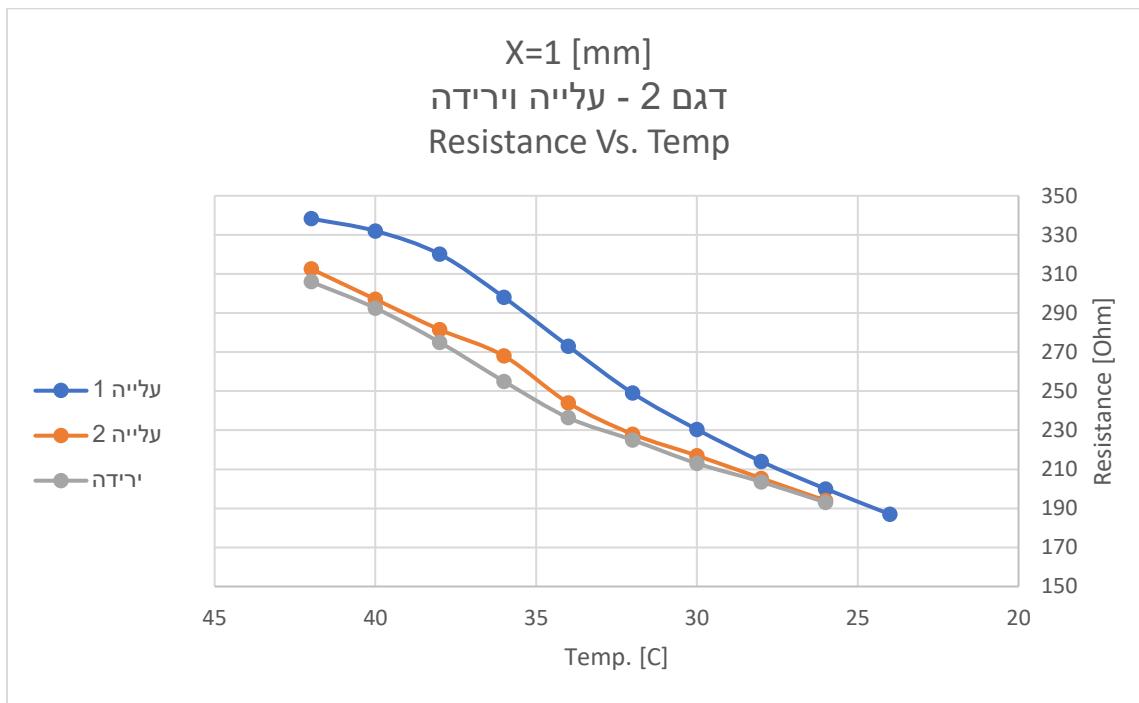
בתמונה 7-8, ניתן לראות את הדגמים בתוספת עובי של [mm] 1=X לאחר ביצוע הניתוי ולאחר הוצאת התותבים, הדפורמציה המופיעה בתמונה נגרמה בעקבות חימום מחדש של התותבים ב כדי לאפשר לנו להוציא אותם מן הדגם.

הוצאת התותבים הייתה הכרחית בעקבות כמות מוגבלת של תותבים שעמדו בראשותנו והיות שנדרש להכניס את התותבים לדגמים הבאים.



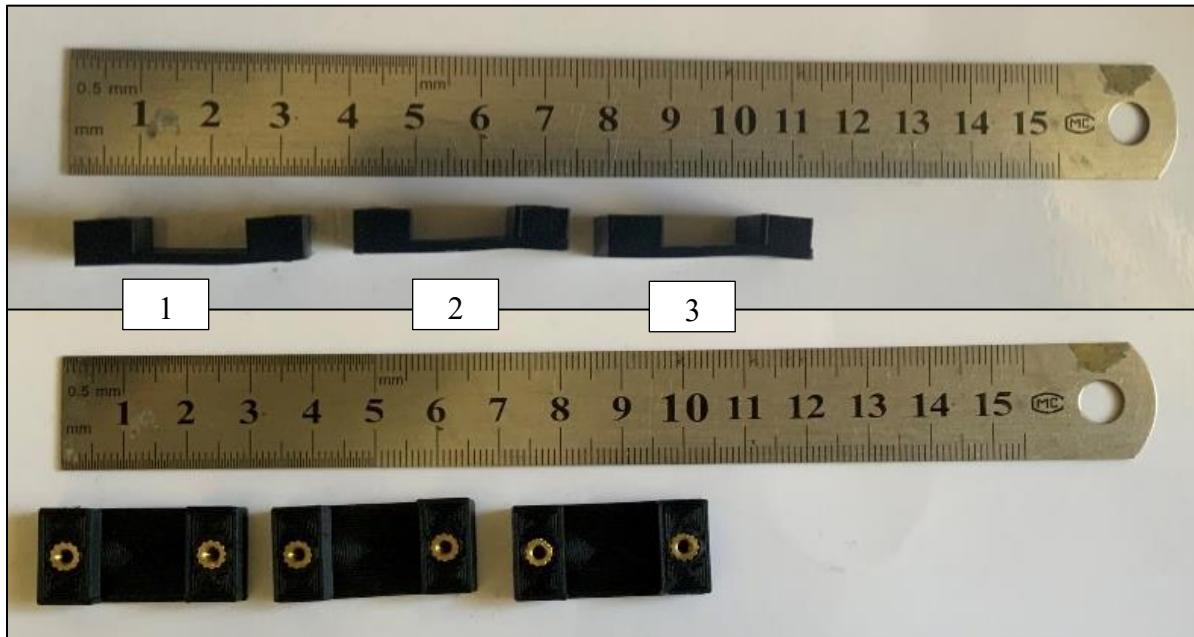
גרף 7-4: התנגדות כנגד טמפרטורה -  $X=1 [mm]$

בדומה לדגם הקודם ( $X=0.5$  [mm]), ישנו קשר ברור בין הטמפרטורה לבין ההתנגדות של החלק בטוויה הטמפרטורית הנבחרה. הקשר הינו עקבי לאורך שלושת הדגמים שהודפסו.



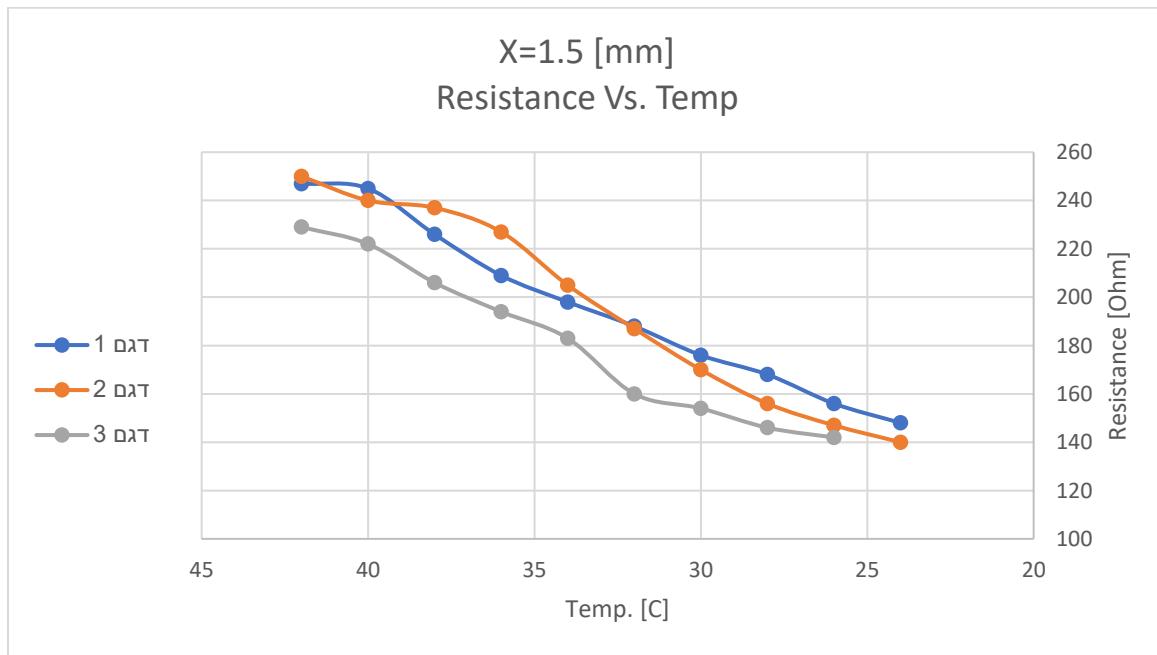
גרף 7-5: התנגדות כנגד טמפרטורה -  $X=1 [mm]$  דגם 2

### 7.5.3.3 דגמים בתוספת עובי 1.5 מ"מ

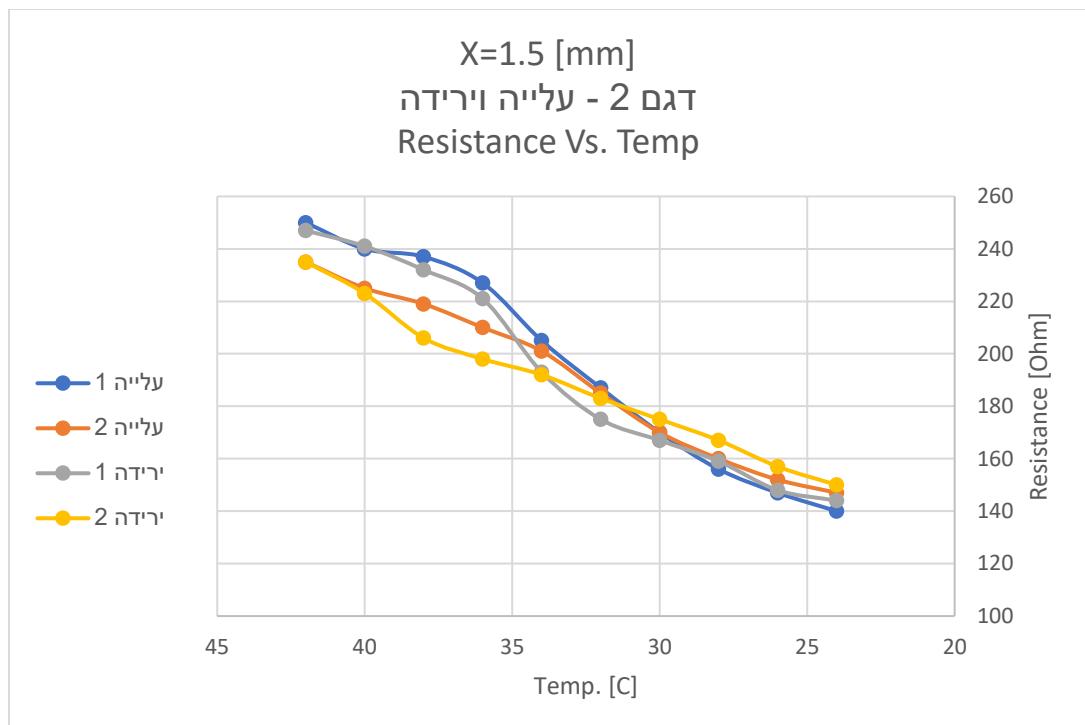


תמונה 7-9: דגמים בתוספת עובי [mm]  $X=1.5$  לאחר הניסוי

בדגמים אלו ניתן לראות עיות שנוצר בזמן החימום בטמפרטורת גבואהות. הדפרמציה נוצרה על אף העובי הגדל יותר מאשר הדגים, סיבה אפשרית לכך היא העלייה המהירה בטמפרטורה. חשוב להבין כי אנו נרצה שדגמים אלו יעבדו בטוויה טמפרטורות של גוף האדם לפחות שבו טמפרטורות האדם תעלה באופן קיצוני איננה אפשרית וכן עיות זה אינו מהוות בעיה רצינית.

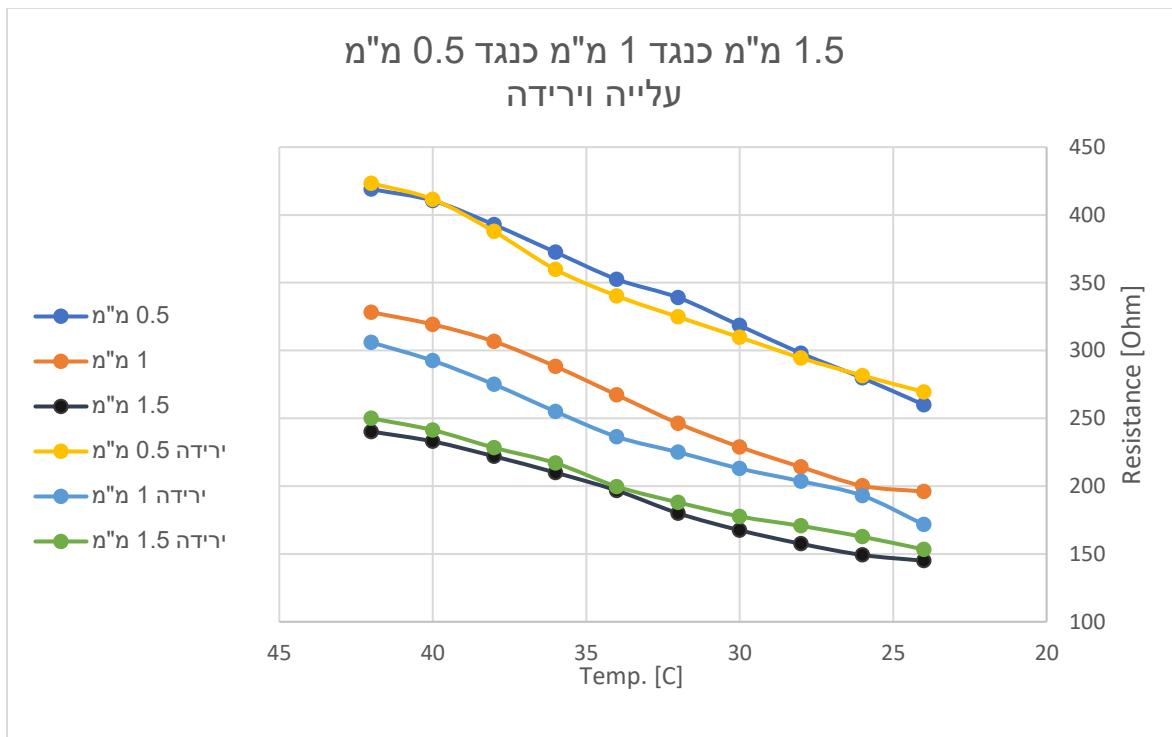


גרף 7-6: התנגדות נגד טמפרטורה -  $X=1.5$  [mm]



graf 7-7: התנגדות כנגד טמפרטורה -  $X=1.5$  mm דגם 2

#### השוואת מדידות 7.5.4



graf 7-8: ההשוואה בין מדידות בעלייה וירידה

בגרף לעיל, גרפ 9-7, ניתן לראות את הקשר הכללי בין הטמפרטורה להסתנוגדות של דגמים שהודפסו בעוביים שונים כאשר אלו מעלים את הטמפרטורה וכאשר אלו מורידים את הטמפרטורה.

כפי שניתן היה לצפות ההסתנוגדות של החלק הדק יותר הוא ההסתנוגדות הגבוהה יותר.

מתוך הנתונים שנמצאו, נמצא הקשר הלינארי עבור הדגמים עובי שונה והוא:

כאשר [ $\text{mm}$ ] =  $X$ :

$$R = 5.7886 \cdot T - 0.9$$

כאשר [ $\text{mm}$ ] =  $X$ :

$$R = 8.1363 \cdot T - 8.99$$

כאשר [ $\text{mm}$ ] =  $X$ :

$$R = 9.0773 \cdot T + 44.7$$

לכן לאחר בוחינת כל התוצאות בנוסף למציאת הקשר בין הטמפרטורה להסתנוגדות נמצא ש-  $X$  האופטימלי הוא 1.5 מ"מ.

7.5.5 סיכום תוצאות עבור מד טמפרטורה גלינו קשר הדיר ומחזרי בין עליית טמפרטורת פני השטח לבין ההסתנוגדות במד הטמפרטורה שלנו. קשר זה פותח דלתות ואפשרויות שימוש מגוונות.

שימוש במדדי טמפרטורה מודפסים בתלת ממד עם פולימרים מוליכים מציע פתרון חסכוני ונitin להתקאה אישית, בנוסף לכך הפולימר זמין לשימוש מסחרי, ופותח אינספור אפשרויות ויישומים חדשים לציבור לחקר.

ניתן להציגם חישונים כך שייתאים למשטחים וסביבות שונות, מה שפותח הזרמנויות לשילוב במכשירים לבישים ובפרויקטים של Arduino.

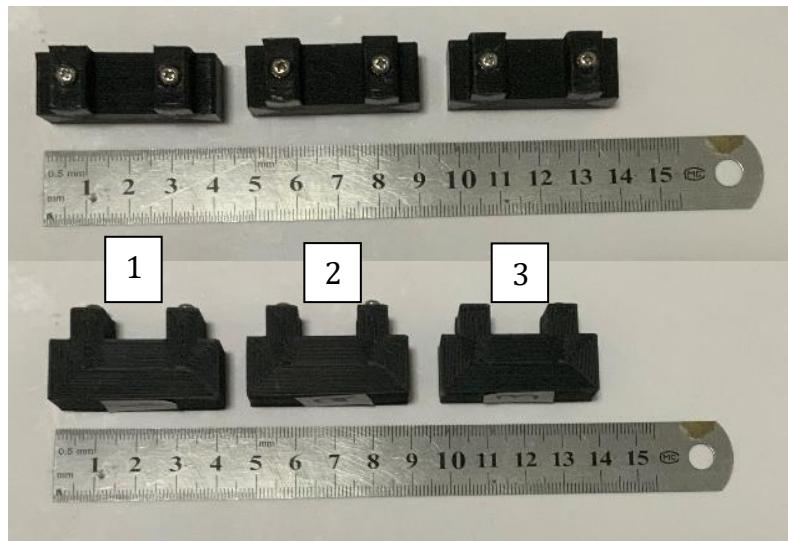
בתהlications רפואיים, ניטור הטמפרטורה הוא חיוני לבטיחות וליעילות. על ידי שילוב מדדי טמפרטורה מודפסים בתלת ממד באמצעות פולימרים מוליכים, אנשים מוכנים בתחום הבריאות יכולים לקבל נתונים בזמן אמת על טמפרטורת פני השטח. דבר זה מאפשר אמצעים יזומים לתנאים מיטביים במהלך הליכים רפואיים וטיפול בחולה.

לסיכום, הקשר בין עליית טמפרטורת פני השטח לבין ההסתנוגדות במדדי טמפרטורה יש פוטנציאל שימושי ביישומים רפואיים.

## 7.6 תוצאות מדידות התנגדות בתלות בעומס

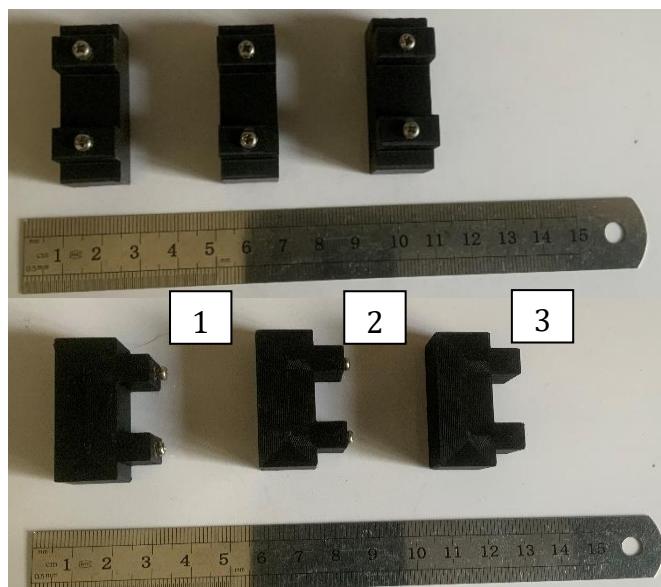
### 7.6.1 מדגמים

להלן הדגמים הראשונים ששימשו אותנו בניסוי.

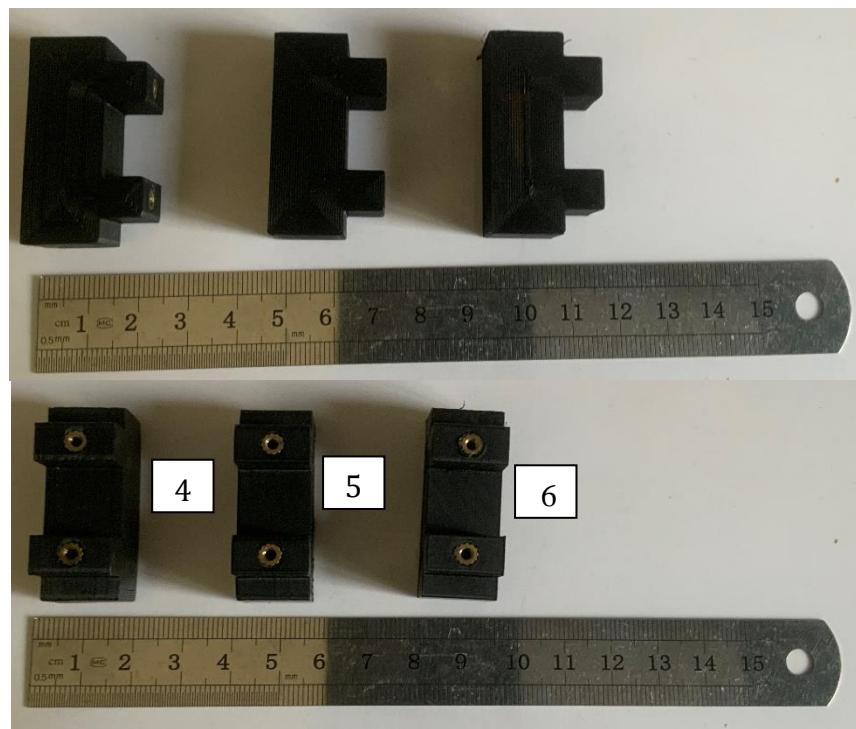


תמונה 7-10: דגמים ראשוניים

היית ולא קיבלנו את התוצאות שרצינו, הוחלט לנסוט להדפיס את הדגמים מחדש לאחר כיול המדפסת מחודש של המדפסת בצורה מיטבית.

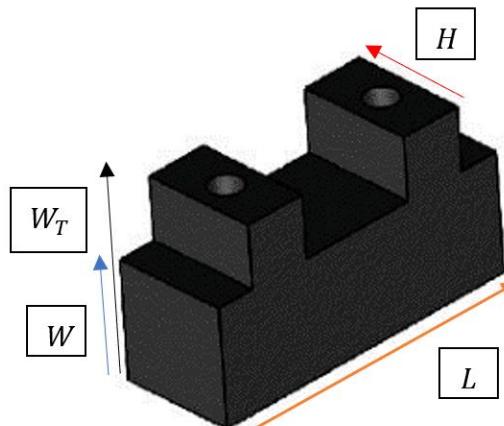


תמונה 7-11: דגמים חדשים לאחר כיול (1)



תמונה 7-12: דגמים חדשים לאחר כיל (2)

#### 7.6.2 מדידות גיאומטריות



תמונה 7-13: מקרה למדידות הדגם

טבלה 7-17: מידות גיאומטריות של החלקים המודפים

דגמים				
$L[\text{mm}]$	$W[\text{mm}]$	$W_T[\text{mm}]$	$H[\text{mm}]$	מספר
41	15	23.3	14.7	1
40.8	14.92	22.92	14.7	2
40.8	15.3	23.2	14.8	3
40.9	15	22.9	14.6	1
41.3	15.1	23.2	15	2
40.9	15	22.7	14.9	3
41.3	15.2	23	15	4
41	14.9	22.9	15	5
41.2	15	23	15	6

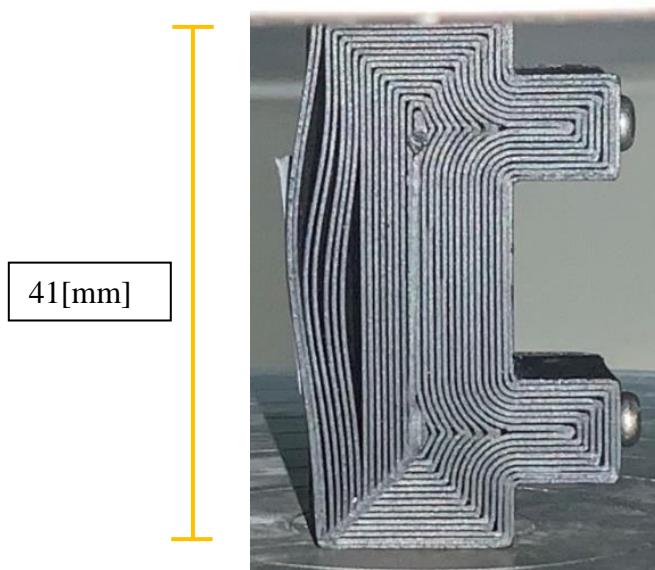
בחלק א' נבדקו 3 דגמים, כולל דגם נבדק 3 פעמים, בחלק השני נבדקו 6 דגמים ובכל דגם נבדק פעמיים. סך הכל נבדקו 9 דגמים ובוצעו 21 בדיקות.

### 7.6.3 תוצאות

#### 7.6.3.1 חלק א' – דגמים ראשוניים

בחלק א' של הניסוי העומס שהופעל על כל החלקים היה [N] 70, בשלב מאוחר יותר של החלק הראשון שראינו שאין שינוי החלטנו להפעיל עומס של [N] 200 ואפיו ממץ מקסימלי של [N] 1900.

אבל עדין לא היה שינוי בהतנגדות ולכן החלטנו להדפיס מחדש חלקים ולבצע את הניסוי עוד פעם.



תמונה 7-14: מוגן תחת עומס בעל עובי של 15 [mm] של [N] 1900

#### 7.6.3.2 חלק ב' – דגמים חדשים

בחלק ב' של הניסוי בשביצענו בדיקה על דגם 1 התקבל קשר, תחיליה ההתנגדות עלתה אבל באשר העומס עליה מעל [N] 40 ההתנגדות החלה לרדת. תוצאה זו חזקה על עצמה כאשר ביצענו ניסוי שני על אותו דגם.

בנוסף לכך ההתנגדות הרגילה של החלק נשארה זהה ככלומר ניתן לבצע ניסוי כלומר לא הייתה דפורמציה פלסטית במבנה הפנימי של הדגם.

אבל תוצאות עם שאר 5 הדגים שהודפסו נבדקו בניסוי זה זהות לניסוי הראשון וכך ניתן להסיק שאין שינוי בהתנגדות בנגד הפעלת עומס נתון, לפחות בצורה הדפסה זו.

יתכן שבצורת הדפסה שונה העומס יופעל על השכבות בצורה שתגרום לדפורמציה יותר גדולה ותשפיע על ההתנגדות אבל בצורה הדפסה אחרת הזרם החשמלי עובר דרך שכבות הדפסה ולא דרך הסיבים וכן לא נחקרו בפרויקט זה.

תוצאות ניסוי זה מועלות לנו משום שאנו רואים שהפעלת לחץ חד ציר לא משפיע על ההתנגדות בצורה הדפסה ועובדת זו יכולה לעזר לעיצוב דגמים עתידיים.

#### 7.6.4 סיכום תוצאות עבור מד עומס

למרות שקיבלנו באחת הדגימות קשר הדיו ומחזורי לא ניתן לקבוע כי זה הקשר בין הפעלת העומס לשינוי בהתנגדות כי בכלל שאר הדגים שנבדקו לא נמצא קשר דומה.

אחד האפשרויות היא שצורת הדפסה המכובחת היא בעייתית היא שהסיבים שבהם עובר הזרם לא מתעוותים בעת הפעלת העומס וכן ההתנגדות לא משתנה.

מטרתנו בפרויקט זה היא לחקור את תכונותיו של פולימר מוליך, באמצעות התכונות הנחקרות לעצב שני אבי טיפוס אשר יסייעו לנו בהוכחת היתכנות של מד טמפרטורה ומד עומס המודפסים מהפולימר הנ查קר.

**את התכונות המכניות** בדקנו באמצעות 6 דגמים שהודפסו באסטרטגיית הדפסה שונות, אסטרטגיית הדפסה כוללת שני מצבים הדפסה שונים, מצב שכיבה (Flat) ומצב עמידה (Upright) ושלוש צורות מיליות, Concentric, 45/-45, 0/90, סך הכל 36 דגמים. על הדגים בוצעה בדיקת כפיפה ב-3 נקודות כדי למצוא את אסטרטגיית הדפסה היעילה ביותר. התוצאות שהתקבלו הודיעות, היה ניתן לראות שיש הבדלים ברורים בין התכונות של צורות הדפסה השונות.

מתוך חקר התכונות המכניות ראינו כי ישנים הבדלים ניכרים בתכונות השונות בין אסטרטגיית הדפסה השונות, עם זאת הגענו למסקנה כי בדגמים שהודפסו בצורה מילי של 45/-45 ו-Concentric במצב שכיבה קיימים ממשי בפייה מקסימלי מרבי ומודל יאנג מרבי.

היות ומטרתנו הייתה לעצב מד טמפרטורה, אנו בחרנו בצורה מילי Concentric בהתבסס על מחקר שמצא כי בצורה מילי זה, התפשטות החום היא הומוגנית.

תוצאות בחלק זה של הניסוי גבוות מלאה שנמצאו בספרות, דבר היכול לנבוע היות ובמספרת לא מצינית אסטרטגיית הדפסה וכפי שניתן לראות מהתוצאות הניסוי אסטרטגיית הדפסה יכולה לגרום לשינויים דרמטיים בתכונות הדגם הסופי.

בשילובו ל-PLA פשוט, היה ניתן לראות שהוספת הפחמן השחור פוגע בתכונות המכניות של הדגם הסופי.

**את התכונות החשמליות** חקרו באמצעות מדידות התנגדות על דגמים שהודפסו באסטרטגיית הדפסה הנבחרת (Flat Concentric), כאשר הדגים בעלי שטח חתך זהה ואורך שונה, שלושה דגמים מכל אורך וארבעה אורכים שונים כלומר 12 דגמים סך הכל. באמצעות התנגדות שנמצאה חישבנו את התנגדות הסגולית.

התנגדות הסגולית הייתה עקבית בכל הארכים השונים דבר שתואם את התאוריה, אבל התנגדות שנמצאה גדולה בהרבה מזו של מתכות מוליביות וכן היה קושי להשתמש בחומר זה במיגלים חמליים.

צורת החיבור גם חשובה, במהלך הבדיקות נבדקה התנגדות של מספר דגמים ללא תובב ומספר דגמים עם תובב, ההבדל בין הערכים היה גדול בכמה סדרי גודל. ככלمر יש צורך בחיבור הדוק ומיטבי ככל האפשר בין הפולימר לבין כל מכשיר אחר שמחובר אליו.

הערכים שנמדדו בניסוי תואמים לספרות אר שונים בהרבה מהערכים שמצויים על ידי היצahn, סיבת אפשרית להבדל זה היא צורת הדפסה שונה, היצahn לא מספק מידע לגבי צורת הדפסה לפיה נבדקו הערכים.

**מד טמפרטורה** עוצב והודפס בעזרת התכונות המכניות והחסמיות שנמצאו, לאחר ביצוע ניסוי השפעת השינוי בטמפרטורה על ההתנגדות התגללה קשר קבוע ללא תלות בעובי החלק בכל הדגים שנבדקו.

תחילה הודפסו חלקים עם עובי של 0.4 מ"מ אבל לאחר הניסוי הראשון עם דגמים אלו נמצא שהדגמים דקים מדי ובנוסף לכך מערכת הניסוי לא הייתה אופטימלית. למרות שהותוצאות שהתקבלו בניסוי זה ייצאו הדירות לא היה ניתן לבצע מחזור נוסף עקב עיוות מוקדם של החלקים.

לאחר בניית מערכת ניסוי שונה הודפסו דגמים נוספים עם תוספת עובי של 0.5, 1 ו- 1.5 מ"מ, שלושה דגמים מכל עובי. על כל דגם בוצעו שתי מחזוריים של עלייה וירידה של טמפרטורות בטוחה הפעולות האנושית עקב הכוונה לשימוש רפואי.

מהניסוי על דגמים אלו התקבלו תוצאות הדירות ומחזריות, אבל גם נראה עיוןם בחלק מהדגמים בניסויים בהם הטמפרטורות על בזורה מהירה מידי. עיונותים אלו היו מינימליים לעומת העיות שנראה בחלקים מהניסוי הראשון.

שbor מד העומס בניסוי הראשון לא התקבלו תוצאות טובות כלל, תחילת חשבנו שהו בעיות בדגמים שהודפסו עקב ספיגת לחות אבל עכל בדיקה של דגמים נוספים וקיבלה תוצאות זהות הבנו שאין השפעה של הפעלת עומס על צורת הדפסה שנבחרה.

במהלך פרויקט זה חקרכנו את הפולימר ובעזרתו עיצבנו והדפסנו שניABI טיפוסים למדדים שונים והוכחנו התכונות של בניית מדים בעזרת הפולימר, בכך עמדנו במטרת הניסוי אותה העמדנו לעצמנו.

## 9. סיכום, מסקנות, לוחים והמשכיות

### 9.1. סיכום ומסקנות

פרויקט זה התמקד בחקר בהדפסה ב-4 מדדים באמצעות פולימר מסחרי בעל יכולת הולכה. במהלך הפרויקט היו לנו שתי מטרות: איפון תכונות החומר והוכחת התכונות של ABI טיפוס בעזרת התכונות הנלמדות.

כדי לאפיין את תכונות החומר ערכנו מדידת וממצאו את התכונות המכניות והחישומיות של הפולימר. המטרה השנייה הייתה להראות את הפוטנציאל של הפולימר על ידי פיתוח של שניABI-טיפוסים: ABI-טיפוס של מד טמפרטורה וABI-טיפוס של מד עומס.

כדי להשיג את מטרת האפיון, הדפסנו דגמים בשש אסטרטגיות הדפסה שונות ובדקנו את התכונות המכניות של הדגמים המודפסים. בנוסף, בדקנו את ההתנגדות של דגמים נוספים לצורך חישוב ההתנגדות הסגולית של הפולימר. באמצעות תהליך האפיון, הצלחנו להזמין אסטרטגיית הדפסה אופטימלית.

לאחר שמצאנו את צורת הדפסה האופטימלית עיצבנו ABI-טיפוסים למד טמפרטורה וABI-טיפוסים למד עומס. לאחר הדפסת המדים עיצבנו מערכת ניסוי שמתאימה לקשר שאותו אנחנו ניסינו למצוא.

הממצאים שלנו חקרו קשר בין ההתנגדות של מד הטמפרטורה למשטח עליון מונח מד הטמפרטורה. עם זאת, לא ראיינו קשר בולט בין הפעלת עומס על מד העומס לבין שינויים בהתנגדות. יש לציין כי תוצאות מדידת ההתנגדות של מד הטמפרטורה הראה שינוי ההתנגדות הפכים והדומים והדגימות את יכולתם לעמוד במחוזרים רבים.

במהלך הפרויקט נתקלנו במספר אתגרים. בתחילת, התמודדנו עם קשיים עם פרמטרי הדפסה עיקב מידע מוגבל על הפולימר הספציפי שהשתמשנו בו. לאחר ניסוי וטעיה, מצאנו את הפרמטרים המתאימים להשגת הדפסות באיכות גבוהה.

אתגר משמעותי נוסף הוא פיתוח המערכת הניסיונית לממדידות בעזרת מד הטמפרטורה. הביצוע הראשוני של הניסוי נתקל בעיוות, שהצריכו שיפורים מהותיים לפני ביצוע הניסוי השני. יש לציין כי היעדר מערכת בקרת טמפרטורה ישירה עבור המשטח עליון הונחו הדגמים הוכנסו גורם שגיאה לניסוי.

בשלבים הבאים של הפרויקט, התמודדנו עם בעיות הקשורות לאחסון עם חומר הדפסה. לאחר תוצאות לא מספקות ב מבחן מד העומס הראשוני, הינו צריכים להדפיס מחדש את המודלים לצורך ניסוי חוזר. עם זאת, גילינו שאחסון לא נכון של החומר הביא לספיגת לחות, והשפיע לרעה על תהליכי הדפסה.

בסוף של דבר, תחום ההדפסה ב-4 ממדים מאפשר שלל אפשרויות עיצוב עבור ישומים ביתיים ותעשייתיים אחד. בפרויקט זה, הتمקדמו בבדיקה אפשרות אחת כזו על ידי הרכבת תכונתו של פולימר מוליך בעזרת בפחמן שחור ופיתוח אב טיפוס למדידת טמפרטורה. על ידי תרומה לבסיס הידע וחשיפת תובנות חדשות, אנו מקווים להקל על הפיתוח של ישומים חדשים ולשפר את האופטימיזציה של היישומים הנוכחיים, ובמקביל להפחית את צריכת החומרים, צריכת האנרגיה, הועלות ודרישות הזמן.

## 9.2 לקחים

- יכול לא נקבע של המדפסת יכול להשפיע במידה רבה על התכונות של הדגם המודפס.
- יש צורך בחיבור הדוק ומיטבי בכל האפשר בין הפולימר לבין כל מבשיר אחר שמחובר אליו, שכן רצוי להשתמש בתותבים.
- בניית מערכת ניסוי נבונה הינה גורם קריטי לקבלת תוצאות אינטגרטיביות.

## 9.3 הצעות להמשך עבודה

- ביצוע בדיקות פרקטוגרפיה לדגמים במדידות התכונות המבניות לצורך הבנת הכשל בדגם.
- חקירת השפעת הזמן על התനודות של הפולימר.

## 10 תודות

ראשית אנו נרצה להודות לאנשי מאוניברסיטת תל אביב, לד"ר א. אינברג ששסייע לנו ביצוע מדידות וד"ר ד. אשכני ששסייעו עם הפרוייקט, המחבר והפוסטר. אנו רוצים להודות גם מהנדס ד. רכיקוב על העזרה ביצוע וניתוח המדידות ועל הזמיןות בכל זמן לצורך מתן עזרה. ובסיומו של דבר אנו נרצה להודות לאנשי מכללת אפקה, ד"ר מ. אייל ולמהנדס א. ילונוב על העזרה ביצוע הבדיקות, עיצוב הדגמים וניתוח התוצאות. כל אחד מהמוזכרים לעיל סיפקו לנו הדרכה אינטגרטיבית, מksamעת ועזרה להעמיק את הבנתנו בנושא. תודה רבה למכללת אפקה שננתנה לנו את הבסיס למידע ואת המבשור לביצוע מדידות.

11 רשימת מקורות  
11.1 מקורות ספרותיים

1. Z.Ding, C.Yuan, T.Wang, H.Qi, & M.Dunn (2017, April 12). *Direct 4D printing via active composite materials*. Retrieved from ScienceAdvances: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.1602890>
2. F.Momeni, S. M.Hassani, X.Liu, & J.Ni (2017, March 17). *A review of 4D printing*. Retrieved from ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127517302034>
3. I. T.Garcia, D. G.Gonzalez, S. G.Hernandez, A.Rusinek, G.Robles, J. M.Tarifa, & A.Arias (2021, June 1). *ScienceDirect*. Retrieved from Conductive 3D printed PLA composites: On the interplay of mechanical, electrical and thermal behaviours: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822321002051>
4. D.Fraser, H. P.Naim, L. M.Arden, W.Leland, & D. R.Adrash (2018, August 18). *Temperature-dependent electrical resistance of conductive polylactic acid filament for fused deposition modeling*. Retrieved from SpringerLink: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-018-2490-z>
5. Y.Ahroni, N.Dresler, A.Ulanov, D.Ashkenazi, M.Aviv, M.Librus, & A.Stern (2020, December 21). *Selected applications of stimuli-responsive polymers: 4D printing by the fused filament fabrication technology*. Retrieved from Journals of "Dunarea de Jos" University of Galati: <https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/awet/article/view/4081>
6. J.Beniak, L.Soos, P.Krizan, M.Matus, & V.Ruprich (2021, February 04). *Resistance and Strength of Conductive PLA Processed by FDM Additive Manufacturing*. Retrieved from MDPI: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/4/678>
7. W.Chen, F.Lu, & M.Cheng (2001, March 17). *Tension and compression tests of two polymers under quasistatic and dynamic loading*. Retrieved from ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941801000551>
8. A.Amaram, & M.Faigenblat (2022, May, 30). *Statement Of Work: 4D printing research of conductivity in 4D polymers*.

## 11.2 מקורות אינטרנטניים

- a. <https://www.statista.com/statistics/315386/global-market-for-3d-printers/>  
(נבדק ועובד בתאריך 30.05.2023)
- b. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>  
(נבדק ועובד בתאריך 30.05.2023)
- c. <https://thestempedia.com/tutorials/getting-started-with-3d-printing/>  
(נבדק ועובד בתאריך 30.05.2023)
- d. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polylactide-pla-bioplastic>  
(נבדק ועובד בתאריך 30.05.2023)
- e. <https://am-conference.aeai.org.il/>  
(נבדק ועובד בתאריך 30.05.2023)

## 12 נספחים

### 12.1 ריבוע שיבומיים

לא נעשו שינויים מהגדרת הפרויקט.

### 12.2 פוסטר הפרויקט

 AFEKA | Mechanical Engineering

**4D Printing of Commercial Based Conductive Polylactic Acid: Strength and Resistance Properties**

**1. Background**  
4D printing (fourth dimension printing) is the next rapid prototyping concept that integrates 3D printing additive manufacturing (AM) technologies and active materials, such as conductive poly(lactic acid) material (PLA), which is capable of conducting electric current.

**2. Research Objectives**  
This study characterizes the strength and resistance of a commercially available electrically conductive poly(lactic acid) (PLA-carbon black) for Fused Filament Fabrication (FFF).  
This poster presents the properties and two applications of samples printed by a FFF apparatus. The research describes the design of the experiments, the process of measuring the material's properties of the printed samples, and the preliminary design of two possible sensors (load-cell sensor and temperature sensor).

**3. Methods**

- The mechanical properties were measured by performing a 3-point bending test on the 3D-printed part. Using the measured loads [N] and crossheads [mm], we calculated and compared the UTS and Young modulus of the materials for six different printing strategies.
- We chose to print parts with a concentric infill in a flat position because of its high UTS and homogenous heat distribution.
- We printed new samples to determine the resistivity of the printed material. Inserts were embedded into the printed part to improve the connection and help us make a more accurate measurement. Resistance was measured using RCL.
- After determining the resistivity and UTS, we wanted to find a connection between temperature and resistance. The connection was determined using a heated water bath to heat a piece of aluminum connected to the printed sample, which was attached to an RCL.

**4. Results**



Different printing strategies strongly influenced the UTS and Young's modulus of the printed parts, with the calculated UTS ranging from 0 to a UTS slightly smaller than standard PLA (53 MPa). From the tables below, we can see that the resistivity of the printed parts remained consistent despite the various lengths that were measured.

Printing strategy	Young modulus [MPa]
Printed	~1.5
Wavy	~1.7
Concentric	~2.0
Random	~2.2
Helical	~2.3
Rectangular	~2.5

Printing strategy	UTS [MPa]
Printed	~4.5
Wavy	~4.8
Concentric	~5.0
Random	~5.2
Helical	~5.5
Rectangular	~5.8

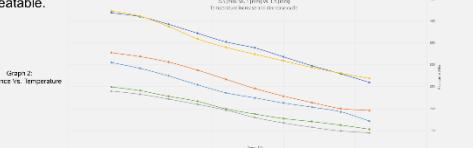
Printing strategy	JIS
Printed	~4.5
Wavy	~4.8
Concentric	~5.0
Random	~5.2
Helical	~5.5
Rectangular	~5.8

Graph 1: Resistivity in different lengths



A connection between the temperature and resistance was measured in a sample with variable thicknesses. As shown by the graph, the results were consistent and repeatable.

Graph 2: Resistivity vs. Temperature



**5. Summary and conclusions**  
4D printing opens the door to a vast new world of design possibilities for home and industrial use, just like its predecessor. In this project, we explore one of these possibilities. We measured the properties of PLA carbon black and developed temperature measurements prototype, and we will develop a load prototype to demonstrate the different uses of this polymer.

תמונה 1-12: פוסטר הפרויקט

## 4D Printing of Commercial Based Conductive Polylactic Acid: Strength and Resistance Properties

A. Amram<sup>a</sup>, M. Faigenblat<sup>a</sup>, A. Ulanov<sup>a</sup>, D. Richkov<sup>a</sup>, M. Ayal<sup>a</sup>, D. Ashkenazi<sup>c</sup>, A. Stern<sup>a,b</sup>

(a) School of Mechanical Engineering, Afeka Academic College of Engineering, Tel Aviv, 6998812, Israel

(b) Department of Materials Engineering, Ben-Gurion University of the Negev, Beer Sheva 8410501, Israel

(c) School of Mechanical Engineering, Tel Aviv University, Ramat Aviv 6997801, Israel

### Abstract

4D printing (fourth dimension printing) is a next rapid prototyping concept that integrates 3D printing additive manufacturing (AM) technologies and active materials, such as conductive polylactic acid material (PLA), which is capable of conducting electric current. This study characterizes the strength and resistance of a commercially available electrically conductive polylactic acid (PLA-carbon black) for Fused Filament Fabrication (FFF). The aim of this poster is to present the properties and two applications of samples printed by a FFF apparatus. The research describes the design of the experiments, the process of measuring the material's properties of the printed samples, and the preliminary design of two possible sensors (load-cell sensor and temperature sensor).

KEYWORDS : PLA , CARBON BLACK , 4D PRINTING

### Introduction

3D printing is a technology that allows us to create 3D models that are predesigned by computer. 3D printing technology made countless new designs possible, and 4D printing seems to be able to complement those designs and assure a new era of design possibility. One of the possibilities for innovation is conductivity; we don't usually think of polymers as conductive because the vast majority of them are not. However, sintering can produce polymers with black carbon to create conductive pathways. The polymer studied in this project combines the design flexibility advantages of polymers, with the added benefit of conductivity, allowing us to create resistors of any shape or size. In this project we discuss the properties of this polymer and its potential applications to encourage further use and hopefully unlock its full potential.

### Materials

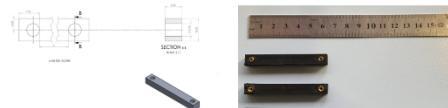
In this project we tested the properties and future uses of a polymer named PLA Carbon Black which is manufactured by a company named "ProtoPasta"

### Methods

- Reading relevant literature articles and creating a base of understanding and theoretical knowledge about the research topic.
- The mechanical properties were measured by performing a 3-point bending test on the 3D printed part with the following dimensions 127x12.7x3.2 [mm]. Using the measured loads [N] and crossheads [mm], we calculated the UTS and Young modulus of the materials for six different printing strategies.



- After comparing our results and results of research [3], we chose to print parts with a concentric infill, in flat position because of its high UTS and homogenous heat distribution which was shown in research [3].
- After selecting the printing strategy, we printed samples with the same cross section but different lengths to determine the resistivity of the printed material. Inserts were embedded into the printed part in order to improve the connection and make a more accurate measurement, resistance was measured using RCL.



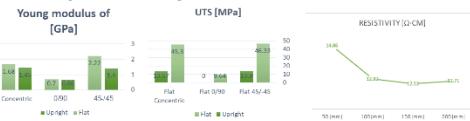
### References

- Z.Dong, C.Yuan, T.Wang, H.Qi, & M.Duan (2017, April 12). *Power 4D-printing via active composite materials*. Retrieved from Science Advances: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1602389>
- F.Momeni, S.M.Hassani, X.Liu, & J.NI (2017, March 17). *A review of 4D printing*. Retrieved from ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127517301204>
- L.Torres, D.G.Gonzalez, S.O.Hernandez, A.Russek, O.Robles, J.M.Tatia, & A.Arias (2021, June 1). *ScienceDirect*. Retrieved from Conductive 3D printed PLA composites: On the interplay of mechanical, electrical and thermal behaviours: <https://link.springer.com/10.1007/s00170-021-02602-z>
- D.Froes, H.P.Naim, L.M.Arden, W.Lindell, & D.R.Adrash (2018,August 18). *Temperature-dependent electrical resistance of conductive polylactic acid filaments for fused deposition modeling*. Retrieved from SpringerLink: <https://link.springer.com/10.1007/s00170-018-1961-2>
- Y.Ahmed, N.Dekar, A.Sherman, A.Karki, A.Ben-David, & A.Stern (2020, December 21). *Selected applications of 4D-printed polymers: 4D printing by the fused filament fabrication technology*. Retrieved from Journals of Thamra de los<sup>®</sup> University of Galati: <https://www.gun.usd.ro/jst/galupress/index.php/jst/article/view/5081>
- J.Benak, L.Sosy, P.Kitzan, M.Matus, & V.Ruprich (2021, February 04). *Resistance and Strength of Conductive PLA Processed by FDM additive Manufacturing*. Retrieved from MDPI: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/4/678>
- W.Chen, F.Liu, & M.Cheng (2004, March 17). *Tension and compressive tests of two polymers under quasistatic and dynamic loading*. Retrieved from ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014294180300551>

### Results

The effect of different printing strategies had a strong influence on the UTS and Young's modulus of the printed parts, with the calculated UTS ranging from 0 to a UTS slightly smaller than that of common PLA (53 MPa).

From the tables below we can see that the resistivity of the printed parts remained consistent despite the various lengths that were measured .



### Discussion

In the mechanical testing part of the project, we obtained UTS of 45.3 [MPa] and Young modulus of 1.68 [GPa], during the resistance testing part we found the resistivity of the selected strategy to be 13.2 [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ].Using the data collected, we designed prototype sensors with different functions.

We designed a load sensor prototype, it would correlate the change in resistance to the load applied to it. The change in resistance occurs because the conductive pathways get closer, thus causing a drop in resistance, temperature measurement sensor prototype was designed to correlate the resistance to change in temp, this time the change in resistance is due to its atoms vibrating faster causing and increase in- collisions between free electrons and ions.



### Conclusions

4D printing opens the door to a vast new world of design possibilities for both home and industrial use, just like its predecessor. In this project, we explore one of these possibilities. We measured the properties of PLA carbon black and developed 2 prototypes for temperature and load measurements to demonstrate some different uses of this polymer.

### Acknowledgements

The authors of this project offer our gratitude to:

- Prof adin stern,
  - Dr. Moshe Ayal
  - Dima Richkov
  - Alexey Ulanov
  - AFEKA Tel-Aviv Academic College of Engineering
  - Dr. Dana Ashkenazi -School of Mechanical Engineering, Tel Aviv University
- for providing the facilities ,equipment ,knowledge and help for this research.

# Proto-pasta

## Technical Data Sheet Rev 1.

### Conductive PLA

Electrify prints for Simple Circuits & Touch-Sensitive Devices.

*Now with improved layer adhesion, increased resilience to break, higher melt flow, and, in general, greater consistency for more trouble-free, higher performance printing experience.*

- Great for simple circuitry and interactive projects
- Also experiment with ESD or 3D printed bearings!

How Conductive Is It?

- Volume resistivity of molded resin (not 3D Printed): 15 ohm-cm
- Volume resistivity of 3D printed parts along layers (x/y): 30 ohm-cm
- Volume resistivity of 3D printed parts against layers (z): 115 ohm-cm
- Resistance of a 10cm length of 1.75mm filament: 2-3kohm
- Resistance of a 10cm length of 2.85mm filament: 800-1200ohm

### Material Properties

Properties	Value/Description
Base material	PLA
Characteristics	low odor, non-toxic, renewably sourced
Molecular structure	Amorphous
Additives	Carbon black / Polymer
Max particle size	N/A
Density	approx. 1.24 g/cc
Length	Approx. 332 m/kg (1.75 mm) & 124 m/kg (2.85 mm)
Min bend diameter	mm 25 (1.75 mm) & mm 50 (2.85 mm)
Glass transition (Tg) onset	N/A
Melt point (Tm) onset	approx. 155 deg C (310 deg F)
Max use	N/A

*Use limit is geometry, load & condition dependent*

### Print Settings

(Based on Ultimaker s5 .15mm Profile)

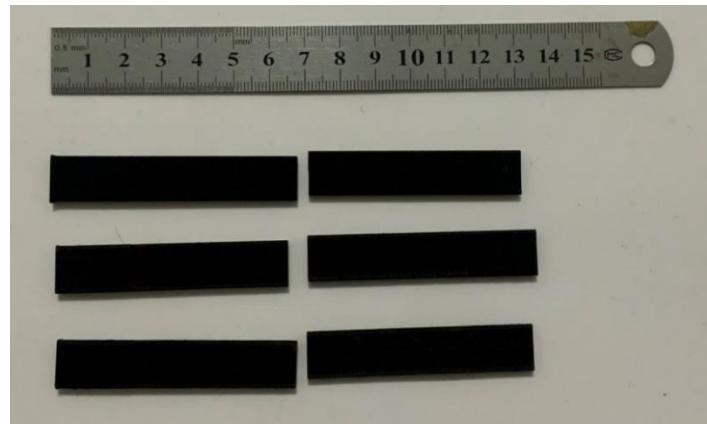
Setting	Value
Nozzle Temperature [°C]	215
Heated Bed Temperature [°C]	60
Print Speed [mm/s]	25-45
Flow Rate/Extrusion Multiplier [%]	100
Extrusion Width [mm]	.45 (.05mm larger than nozzle size)
Volume Flow Rate [mm³/s]	2-3

*Results may vary based on print settings as well as print quality*

**For more information please view [proto-pasta.com/conductive](http://proto-pasta.com/conductive)**

תמונה 3-12 דף תכונות יצור

מדגימים 12.5  
12.5.1 דגמים לבדיקות תכונות מכניות



תמונה 12-4: דגמים שהודפסו בצורת Concentric Upright



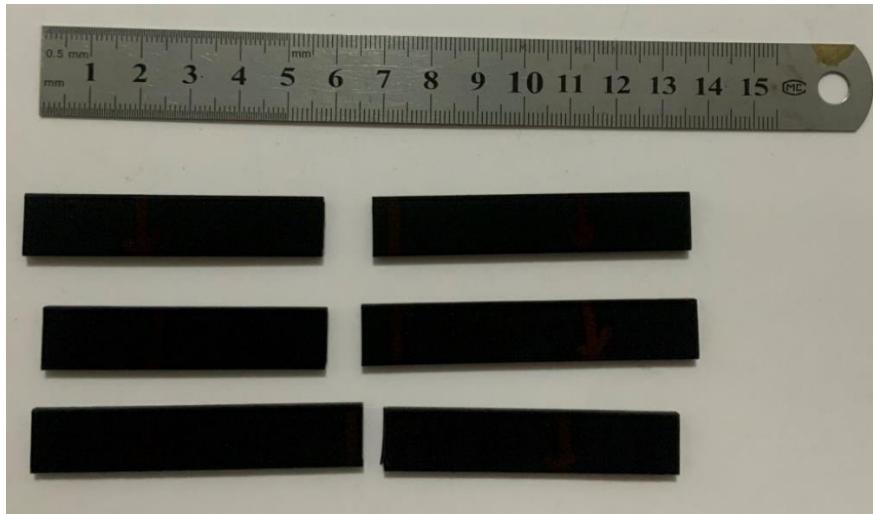
תמונה 12-5: דגמים שהודפסו בצורת Concentric Flat



תמונה 12-6: דגמים שהודפסו בצורת Upright 45/-45



תמונה 12-7: דגמים שהודפסו בצורת 0/90



תמונה 12-8: דגמים שהודפסו בצורת 0/90



תמונה 12-9: דגמים שהודפסו בצורת 45/-45

## 12.5.2 דגמים למדידת התנגדות



תמונה 10-12: דגמים לבדיקת התנגדות-אורך בין תוויבים [mm 50]



תמונה 11-12: דגמים לבדיקת התנגדות-אורך בין תוויבים [mm 100]



תמונה 12-13: דגמים לבדיקת התנגדות-אורך בין תוויבים [mm 150]



תמונה 12-13: דגמים לבדיקת התנגדות-אורך בין תוויבים [mm 200]

## 12.6 תוכנית עבודה סופית

ID	Task name	Duration [days]	Start	Finish	Resource name
1	פרויקט מחקר - הדפסה ב 4 מילדיים	539	16/03/2022	06/09/2023	
2	מסמך הגדרת פרויקט - SOW	78	16/03/2022	02/06/2022	
3	בוחנות פיזיקות - הולוגראף	10	08/02/2022	18/02/2022	Amihai Amram,Matan Faigenblat
4	סגור	99	23/02/2022	02/06/2022	Amihai Amram,Matan Faigenblat
5	שיהה ראשונה עם המנהה	0	03/03/2022	03/03/2022	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat
6	חתימת הסופרחתונה	0	07/03/2022	07/03/2022	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat
7	פגישה ראשונה עם המנהה	0	13/03/2022	13/03/2022	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat,Alexey Ulanov
8	כבלת ספרות מהמנהה	0	14/03/2022	14/03/2022	Prof A.sten
9	רישת וביבליוגרפיה	8	20/03/2022	28/03/2022	Matan Faigenblat
10	פגישה עם המנהה	0	24/03/2022	24/03/2022	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat,Alexey Ulanov
11	הכנות מצגת מושתת יעדם ומדדים	4	26/03/2022	30/03/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram
12	כבלת ספרות מהנהה	0	27/03/2022	27/03/2022	Prof A.sten
13	הכנות לצוות בבעלות המנהה	0	30/03/2022	30/03/2022	Amihai Amram,Matan Faigenblat
14	פגישה עם המנהה	0	31/03/2022	31/03/2022	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat,Alexey Ulanov
15	הכנות לצוות בבעלות המנהה	13	06/04/2022	19/04/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram
16	השתתפות SOW לבריקות המנהה	0	22/04/2022	22/04/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram
17	בריקות SOW	2	22/04/2022	24/04/2022	Prof A.sten
18	הכנות מצגת וסתור לקורע גמר	8	23/04/2022	01/05/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram
19	תיקוני ב-SOW	34	24/04/2022	28/05/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram
20	השתתפות בקורס פורייט גמר	0	01/05/2022	01/05/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram
21	פגישה עם המנהה	0	12/05/2022	12/05/2022	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat,Alexey Ulanov,Dima
22	כבלת ספרות מהנהה	0	14/05/2022	14/05/2022	Prof A.sten
23	פגישה עם המנהה	0	15/05/2022	15/05/2022	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat,Alexey Ulanov
24	כבלת ספרות מהנהה	0	18/05/2022	18/05/2022	Prof A.sten
25	הופעת דראג'יס אל-PLA	1	20/05/2022	21/05/2022	Matan Faigenblat
26	בישוע ניוי לדרכית התנדבות סוציאלית	0	22/05/2022	22/05/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram,Alexey Ulanov
27	PLA בישוע מדירות על PLA	0	23/05/2022	23/05/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram,sasha
28	השתתפות SOW בפעם השנייה בעקבות השניה	0	28/05/2022	28/05/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram
29	בריקות SOW	0	29/05/2022	29/05/2022	Prof A.sten
30	השתתפות מסנבר פורייט	0	02/06/2022	02/06/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram
31	ד"ח הדס	232	02/06/2022	20/01/2023	Matan Faigenblat,Amihai Amram
32	pla-cba הדפסת ותאורה	70	01/07/2022	09/09/2022	Matan Faigenblat,Alexey Ulanov
33	כבלת ספרות מהנהה	0	19/08/2022	19/08/2022	Prof A.sten
34	פגישה עם המנהה	0	25/08/2022	25/08/2022	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat,Alexey Ulanov,richkov dmitry,moshe eyal
35	בישוע מדירות על PLA	0	30/08/2022	30/08/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram,sasha
36	תתייר הופעה לשולקינים סופים לפקי"ק	0	05/09/2022	05/09/2022	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat,Alexey Ulanov,richkov dmitry,moshe eyal
37	בישוע דרכית כוכבי חיל א'	0	20/09/2022	20/09/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram,richkov dmitry
38	בישוע דרכית כוכבי חיל ב'	0	11/10/2022	11/10/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram,richkov dmitry
39	פגישה עם המנהה	0	13/11/2022	13/11/2022	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat,Alexey Ulanov,Eyal moshe
40	השתתפות מומנטן של מדירות	7	13/11/2022	20/11/2022	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat,Alexey Ulanov,Eyal moshe
41	תתייר הופעה לשולקינים סופים לפקי"ק	21	13/11/2022	04/12/2022	Matan Faigenblat
42	כבלת ספרות מהנהה	0	30/11/2022	30/11/2022	Prof A.sten
43	סור בבעל פעל להדריסת מתכנת	30	30/11/2022	30/11/2022	Matan Faigenblat,Amihai Amram
44	פגישה עם המנהה	0	01/12/2022	01/12/2022	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat,Alexey Ulanov,Eyal moshe
45	פגישה עם המנהה	0	01/01/2023	01/01/2023	Prof A.sten,Amihai Amram,Matan Faigenblat,Alexey Ulanov
46	השותות הדס' בבריקות	14	06/01/2023	20/01/2023	Matan Faigenblat,Amihai Amram
47	בריקות מד טפ חיל 1	0	04/01/2023	04/01/2023	Matan Faigenblat,Amihai Amram
48	בריקות דרכ' ח הנדי	0	06/01/2023	20/01/2023	Prof A.sten
49	דרכ' הבס'	232	02/06/2023	20/01/2023	Matan Faigenblat,Amihai Amram
50	הגשה דרכ' הנדי'	0	20/06/2023	20/06/2023	Matan Faigenblat,Amihai Amram
51	תיק פוקרקט	200	01/02/2023	09/06/2023	
52	הציג מהפרק בזגנון	0	13/03/2023	13/03/2023	Matan Faigenblat,Amihai Amram
53	בריקות מד טפ חיל 2	81	20/03/2023	09/06/2023	Matan Faigenblat,Amihai Amram
54	בריקות מד עטוף חיל א'	0	03/04/2023	18/04/2023	Matan Faigenblat,Amihai Amram
55	הופעת מד מעמד	15	23/04/2023	08/05/2023	Matan Faigenblat
56	בריקות מד עטוף חיל ב'	0	21/05/2023	21/05/2023	Matan Faigenblat,Amihai Amram
57	הגשה תיב פוקרקט למנהה	0	28/05/2023	28/05/2023	Matan Faigenblat,Amihai Amram
58	בריקות פגינה	0	09/06/2023	Prof A.sten	
59	הגשה תיק פוקרקט	0	09/06/2023	09/06/2023	Matan Faigenblat,Amihai Amram
60	נבוח על הפוקקט	0	10/08/2023	10/08/2023	Matan Faigenblat,Amihai Amram

### תמונה 14-12 : טבלת פגישות