



מיסודם של  
משרד הבינוי והשיכון

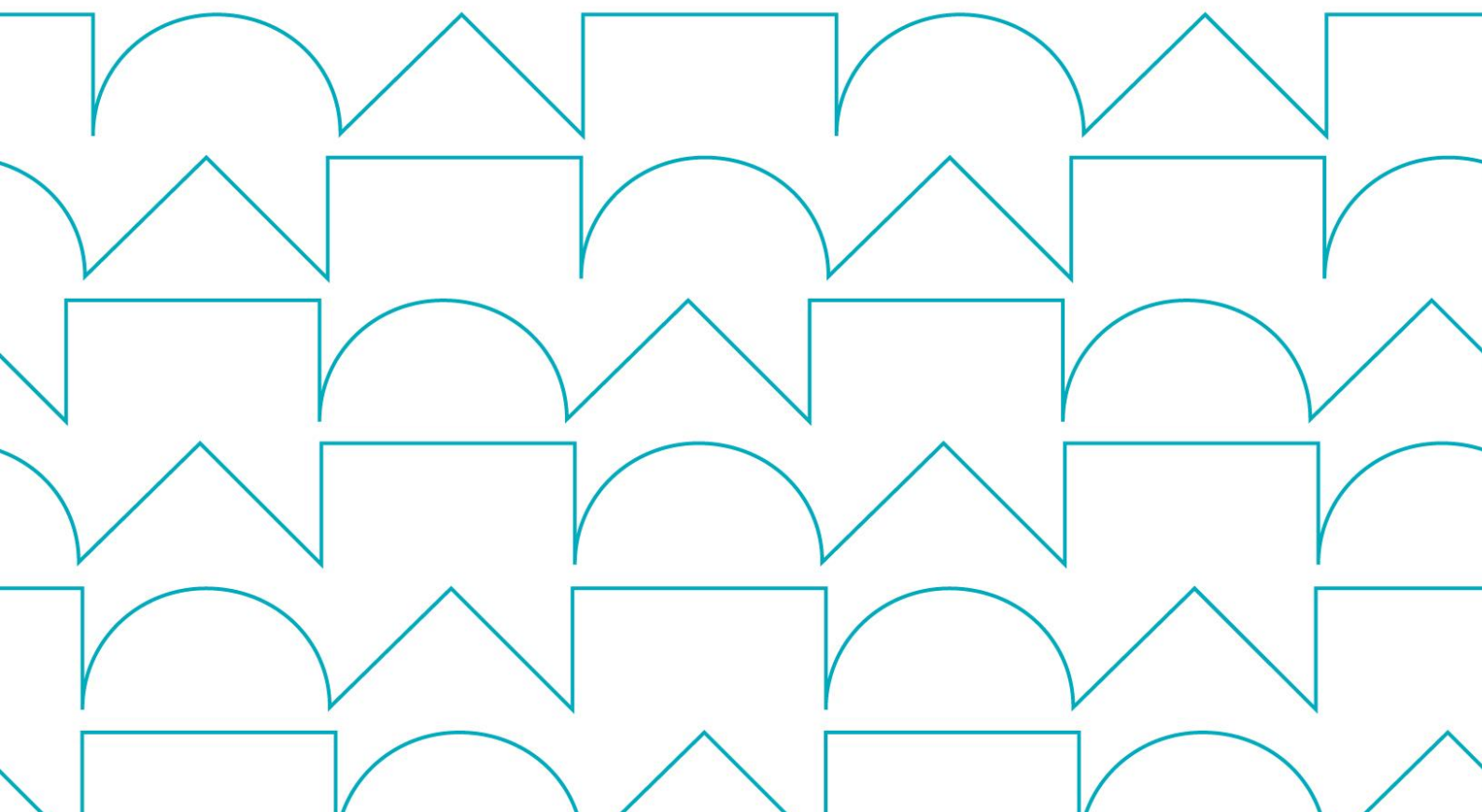
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל  
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

**המכון הלאומי לחקר הבנייה**  
National Building Research Institute



**הדפסת תלת-מימד בביו-פלסטיק  
בחינת תרכובות ביו-פלסטיק בעבור יישומים בענף הבנייה  
באמצעות הדפסת תלת-מימד**

**שני ברט      אברהם כהן      יובל ברגר  
אלון ניסן**





Founded By  
Ministry of Construction

Technion-Israel Institute of Technology  
Faculty of Civil & Environmental Engineering

מיסודם של  
משרד הבינוי

הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל  
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה  
National Building Research Institute



2031205

## הדפסת תלת-ממד בביו-פלסטיק בחינת תרכובות ביו-פלסטיק בעבור יישומים בענף הבנייה באמצעות הדפסת תלת-ממד

חוקרת ראשית שני ברט    דוקטורנט אברהם כהן    מסטרנט יובל ברגר  
עוזר מחקר אלון ניסן

צוות ליווי: מר דביר משה סוויסה    ד"ר יניר שקד    מהנדסת הדס וסרמן

בהזמנת משרד הבינוי והשיכון

מס' הזמנה 4501609646

Copyright © 2023 by S. Barath, A. Cohen, Y. Berger and A. Nisan

The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and  
Development Foundation Limited, Haifa

אוקטובר 2023

חיפה

תשרי תשפ"ד

המכון הלאומי לחקר הבנייה, קריית הטכניון, חיפה 3200003, Israel | 3200003

e-mail: nbri@tx.technion.ac.il | טל. 972-4-8292242/3 | פקס. 972-4-8324534

<http://nbri.net.technion.ac.il>

"למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקר/ים, מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ והטכניון – מכון טכנולוגי לישראל, אינם ולא יהיו אחראים לכל פגיעה ו/או נזק ו/או הוצאות ו/או הפסד, מכל סוג ומין, שנגרם או עלול להיגרם לרכוש ו/או לגוף, כתוצאה ישירה או עקיפה, למקבל הדו"ח ו/או לצד ג' כלשהו, עקב המחקר ו/או דו"ח זה או בהקשר אל מי מהם כמו גם בקשר ליישום האמור בו. מבלי לגרוע מן האמור לעיל, מובהר בזאת כי יישום תוצאות המחקר יהיה באחריותו הבלעדית של המיישם".

## תוכן עניינים

7	.....	תקציר
8	.....	פרק 1: נתוני רקע
11	.....	פרק 2: מטרות ושיטת המחקר
12	.....	פרק 3 : שלבי המחקר
12	.....	הדפסת אב־טיפוס של האלמנט
12	.....	3.1 מיפוי תרכובות פלסטיק, שיטות הדפסה ואפיון לאלמנטים מבניים
13	.....	3.2 הגדרת החומר הנבחר בהתאם לאלמנט ופיתוח מודל מחשובי
13	.....	3.3 התאמת שיטת הייצור לאלמנט ולחומר הנבחר
13	.....	3.4 הדפסת אב־טיפוס של האלמנט המבני מתרכובת ביו־פלסטיק
14	.....	פרק 4: סקירת סוגי תרכובות פלסטיק וביו־פלסטיק
14	.....	4.1 תרכובות פלסטיק – מונחי יסוד
15	.....	4.2 תרכובות פלסטיק בתעשיית הבנייה
15	.....	4.2.1 Polycarbonate (PC)
17	.....	4.2.2 Polyvinyl Chloride (PVC)
18	.....	4.2.3 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)
20	.....	4.2.4 Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified (PETG)
22	.....	4.2.5 Polypropylene (PP)–
23	.....	4.3 תרכובות ביו־פלסטיק
23	.....	4.3.1 Poly-lactic Acid – (PLA)
25	.....	4.3.2 Polyhydroxyalkanoates (PHA/PHB)
27	.....	4.3.3 Bio-Polyamid (PA)
28	.....	4.3.4 Polyhydroxybutyrate-Co-Hydroxyvalerate (PHBV)
32	.....	4.3.6 Poly-lactic Acid + Q (EZ-Q)
33	.....	4.4 תרכובות פלסטיק בלתי אחידות
33	.....	4.4.1 polypropylene Q Carbon Fibers (PPQCF)
34	.....	4.5 מיפוי חומרים להמשך המחקר
36	.....	פרק 5: הדפסת תלת־מימד
36	.....	5.1 שיטות הדפסה
37	.....	5.1.1 התכה ומיזוג לצורך מידול (Fused Deposition Modelling – FDM)
37	.....	5.1.2 הדפסה לא מישורית (Non-Planner Printing – 3.5 Axis)
38	.....	פרק 6: בחירה ואפיון של אלמנט מבני
39	.....	6.1 אקוסטיקה באדריכלות מיפוי וסקירה של אלמנטים
42	.....	6.2 ביצועים אקוסטיים באדריכלות – חזית טכנולוגית
42	.....	6.2.1 אקוסטיקה בייצור מתווסף

45	6.3 עיצוב מסלול הייצור לפיזור וספיגה
47	6.4 סימולציה וולידציה
47	6.4.1 בדיקות אמפיריות
47	6.4.2 סימולציה דיגיטלית
50	פרק 7: מתודולוגיית המחקר
50	7.1 תהליך העבודה
52	7.2 שלב ראשון
52	7.2.1 בדיקת חומרים נבחרים להדפסה בקנה מידה גדול
52	7.2.2 אפיון אלמנט לביצוע אקוסטי של פיזור
52	7.2.3 הגדרה ואפיון של גאומטריות לצורך ביצוע אקוסטי של ספיגה
54	7.3 שלב שני
54	7.3.1 הגדרה ואפיון של מקרה בוחן (CAD)
54	7.3.2 סימולציה ואופטימיזציה של פיזור לבחירת אלמנט
55	7.3.3 פיתוח נתיב כלי לביצוע ספיגה ופיזור
55	7.4 שלב שלישי – הדפסת האלמנט
56	פרק 8: המחקר ותוצאותיו
56	8.1 בדיקת חומרים נבחרים להדפסה בקנה מידה גדול
57	8.2 פיתוח אלמנט פיזור ב-CAD
59	8.3 פיתוח גאומטריות לספיגה
61	8.3.1 מבחנים אמפיריים לגאומטריות לספיגה
67	8.4 סימולציה דיגיטלית לנוחות אקוסטית
69	8.5 הדפסה והתקנה
71	פרק 9: דיון – יתרונות, חסרונות וחסמים
72	פרק 10: סיכום
73	ביבליוגרפיה
84	נספח 1 – טבלאות סיקור מוצרי מדף אקוסטים על פי סיווג חומר וביצוע
89	נספח 2 – טבלאות ביצועי ספיגה אקוסטית למיקרו-סטרוקטורה שפותחו
107	Abstract

## תוכן תמונות

9	תמונה 1: ביתן המודפס מביו־פלסטיק המבוסס זרעי פשתן, חברת Dus Architects
10	תמונה 2 : ייצור אלמנט מבני בעזרת זרוע רובוטית, חברת AI Build
10	תמונה 3: תבנית יציקה מודפסת הניתנת למחזור, חברת AI Build
11	תמונה 4: תקריב פאנל מחומר ביו־פלסטיק למענה אקוסטי בהדפסה
11	תמונה 5: תקריב פאנל מחומר ביו־פלסטיק למענה אקוסטי בהדפסה
15	תמונה 6: מיפוי סוגי הפלסטיק והתפלגות הביו־פלסטיק השכיחים בתעשייה מקור Burlow et al. 2018
15	תמונה 7: חיפוי גלי מ־PC. מקור: פלרם
16	תמונה 8: אהיל PC ממוחזר בהדפסת תלת־מימד. מקור: Vudafieri Saverino
17	תמונה 9: צינורות PVC. מקור: PVC 4 Pipes
18	תמונה 10: חליל PVC מודפס בתלת־מימד. מקור: Print3D
18	תמונה 11: לוחות ABS מקור Industrial Plastics
20	תמונה 12: כיסא מ־ABS מודפס. מקור: IC3D
20	תמונה 13: ציוד רפואי מ־PETG. מקור: Recycling Today
21	תמונה 14: פאנל חזית פרמטרי מ־PETG אשר מודפס בתלת־מימד. מקור: TUM
22	תמונה 15: פקקים של בקבוקי שתייה מ־PP. מקור: recyclingtoday
23	תמונה 16: כוות ביוב מודפסת מ־PP. מקור: Pipelife
23	תמונה 17: אריזות מזון מ־PLA. מקור: ecomena
25	תמונה 18: כיסא מודפס מ־Voxel v1.0. מקור: designcomputationlab0
26	תמונה 19: חלק מכני מודפס מפילמנט PLA-PHA. מקור: colorfabb
27	תמונה 20: כיסוי מנוע מ־EcoPaXX. מקור: DSM
28	תמונה 21: פאנל אקוסטי מביו־פוליאמיד. מקור: Aectual
30	תמונה 22: פלטים PHBV של חברת Plastics
31	תמונה 23: הדפסת D3 של פילמנט PEF. מקור: materialdistrict
32	תמונה 24: פלטים של PEF במסגרת הפרויקט DURAPRINT. מקור: Reflow
32	תמונה 25: פילמנט Ez-Q להדפסת תלת־מימד. מקור: Plastic-app
33	תמונה 26: מגש מזון בר־קיימא המיוצר עם UBQ. מקור: UBQ
34	תמונה 27: דוגמה להדפסה בקנה מידה קטן בפילמנט תוצרת Plastics-App שמשלב UBQ עם Carbon fiber
34	תמונה 28: Perform ✓ Q – פילמנט בר־קיימא. מקור: Plastics App
34	תמונה 29: חלקיקי UBQ בצבעים שונים. מקור: UBQ
35	תמונה 30: מיפוי תרכובות פלסטיק על פי תכונות מכאניות, מקור, התכלות ויכולת מחזור
37	תמונה 31 : תרשים זרימה של חיתוך מודל עד הדפסה. מקור IlearnCANA
38	תמונה 32: הדגמת מיקום האקסטרודר בהדפסה לינארית (A) ולא לינארית (B+C). מקור: Nisja et al. 2021
39	תמונה 33: מיפוי ואפיון אלמנט על תכונות חומר, דרישות וביצוע
43	תמונה 34: שיטות מיקרו־סטרוקטורה בעלות פוטנציאל לביצועים אקוסטיים בסביבה הבנויה. מקור Cop et al. 2022
51	תמונה 35: סכמת תהליך עבודה המוצעת למחקר
53	תמונה 36: מודל דיגיטלי של פיתוח מיקרו־סטרוקטורה (ימין), וניסיונות הדפסה בביו־פלסטיק (שמאל)

תמונה 37: תהליך עבודה של הכנת דיסקות לבדיקה אמפירית, הכנת קובץ דיגיטלי, הדפסה ובדיקה	
בצינור עכבה	54
תמונה 38: דוגמאות להתנסויות חומריות תוך שינוי בפרמטרים של הדפסה ב-Bio-PETG ובחומר	
ppqcf	56
תמונה 39: פיתוח מודל דיגיטלי פרמטרי אשר מהווה בסיס לאלמנט פיזור	57
תמונה 40: הגדרת חלל לצורכי בדיקת פיזור על סמך תקן 17497-1	58
תמונה 41: פיזור הקול בחלל הבדיקה והצבת האלמנט לבדיקה	58
תמונה 42: שטח כיסוי של הגלים המוחזרים מאלמנט הפיזור	58
תמונה 43: איטרציות של אלמנטי פיזור אקוסטיים ותוצאות שטח הפיזור שלהן	59
תמונה 44: ניסיון הדפסת אלמנט פיזור מ-PLA בקנה מידה גדול	59
תמונה 45: סקריפט ליצירת מיקרו-סטרוקטורה לא לינארית תוך כדי בדיקה של היתכנות ההדפסה והימנעות מהתנגשויות בהתאם למכניקה של המדפסת	60
תמונה 46: ניסיון הדפסת מיקרו-סטרוקטורה לא לינארית	61
תמונה 47: הגדרת אסטרטגיות מיקרו-סטרוקטורה שנבחרו למחקר	62
תמונה 48: תקריב של מיקרו-סטרוקטורה מ-Bio-PETG	64
תמונה 49: הדפסה של הדיסקות למבחנים אמפיריים מהחומרים הנבחרים: EZ-Q, Bio-PETG, PLA	64
תמונה 50: גרף משולב של מקדמי הספיגה בהתאם לתדרים של הדיסקות שנבחנו	65
תמונה 51: דיסקה מחומר EZ-Q בעלת צפיפות משתנה של: 2, 4, 6 מ"מ, ומקדם ספיגה 0.4	66
תמונה 52: דיסקה מחומר Bio-PETG בעלת צפיפות משתנה של 4, 6, 8 מ"מ, ומקדם ספיגה 0.25	66
תמונה 53: דיסקה מחומר PLA בעלת צפיפות משתנה של 4, 6, 8 מ"מ, ומקדם ספיגה 0.25	67
תמונה 54: תרשים זרימה של מהלך עבודה של הכנת קובץ לסימולציה נוחות אקוסטית של אלמנט	
ה'ברידי'	68
תמונה 55: סימולציה של זמן הדהוד בחדר ותוצאות עם אלמנט אקוסטי ובלעדיו	69
תמונה 56: הדפסת אלמנט אקוסטי עם מיקרו-סטרוקטורה בחומר EZ-Q	70
תמונה 57: התקנת 4 פאנלים מ-EZ-Q למענה אקוסטי רציף	70

## תקציר

בדומה למגמות ייצור בתעשיות מקבילות (רכב, חלל וחקלאות), בענף הבנייה מופנית כעת תשומת לב לתחום הפלסטיקה, שנעשה בו שימוש נרחב בייצור קירויים, צינורות, חיפויים, יריעות, פרופילים ועוד. עיקר הבעיה כיום מצויה בתרכובות הפלסטיק השכיחות בענף הבנייה שמקורן בנגזרות של תעשיות פטרוכימיות. מרב המוצרים אינם מתכלים באדמה לאחר שימוש, פולטים גזי חממה ואינם מותאמים למגמות ורגולציה גלובלית בהקשרים של קיימות וכלכלה מעגלית בתעשייה.

עקב כך, מחקר רב מתבצע כיום בטכנולוגיות הדפסת תלת־ממד בחומרים מתחדשים ושילובן בתהליכי ייצור בענף הבנייה. טכנולוגיית הדפסת תלת־ממד בייצור רכיבים מבניים מאפשרת חיסכון רב בחומר גלם, מייטרת שימוש בתבניות, מאפשרת מגוון רחב של מוצרים בקנה מידה משתנה ומורכבות צורנית, ומאפשרת הטמעה של חומרים חדשים.

על כן, מחקר זה בחן את השימוש בתרכובות ביו-פלסטיק נבחרות לתעשיית הבנייה באמצעות הדפסת תלת ממד. הוא סקר יישומים נוכחיים ופיתח שימושים פוטנציאליים באמצעות מקרה בוחן הכולל פאנל אקוסטי. הדו"ח מספק סקירה מקיפה של תהליך עיצוב ממוחשב לייצור תלת ממדי באמצעות הדפסה, ומציג תוצאות ביחס לסטנדרטים בתעשייה.

## פרק 1: נתוני רקע

היקף השימוש העולמי בפלסטיק הולך ומתרחב, שכן חוזקו, עמידותו בפני קורוזיה, יכולת הבידוד התרמי שלו, אורך חייו ותחזוקתו הקלה הופכים אותו לשימושי ביישומים רבים ומגוונים (PlasticEurope). ענף הבנייה הוא צרכן משמעותי של פלסטיק, באלמנטים כגון: צנרת, לוחות חיפוי, עיטוף כבלים, פרופילים לדלתות וחלונות, חומרי בידוד ועוד. המגמה העולמית כיום מבקשת למצוא תחליפים לפלסטיקים נפוצים בתעשייה, כגון PE ו-PVC, שכן אלה מבוססים על נגזרות של תעשיות פטרוכימיות ואינם משתלבים בעקרונות הגלובליים של כלכלה מעגלית (Aboukhas et al. 2010). בשל כך, הליכים רגולטוריים לעידוד השימוש בחומרים מתחדשים הובילו למחקרים רבים המתמקדים בשיפור יכולות ההתכלות וההתפרקות הביולוגית של חומרי גלם לייצור (Pakkanen et al. 2017; Ji et al. 2020), ולפיתוחים מסחריים של תוספים וחומרי גלם שמקורם בפסולת אורגנית וחומרי גלם ממקורות טבעיים (חברות כגון: Greentec pro-UBQ, Reflow, Francofil, Imgeo).

לאור הפיתוח הנרחב בתחום הביו-פולימרים, ענף הבנייה והאדריכלות החל לחקור בשנים האחרונות את היתכנות הייצור בהדפסת תלת-מימד של אלמנטים מבניים (פאנלים, קירות, תבניות) ופרוטוטיפים של מבנים שלמים מתרכובות ביו-פלסטיק מבוססות מקורות טבעיים בשילוב פסולת אורגנית (Ozdamar & Ates 2018). שימוש בטכנולוגיית הדפסת תלת-מימד נחלק לרוב לשני תחומים, תחום החומרים ותחום שיטות ההדפסה. בפיתוחים של שיטות הדפסה ישנו צורך באפיון חומרים מתאימים, ולצורך זה נעשה פיתוח משמעותי של חומרים חדשים (Layani & Magadassi 2017; Shoseyov et al. 2019). שימוש הולך וגובר בהדפסת תלת-מימד בתעשיות רבות הרחיב באופן משמעותי את המחקר על חומרים מתחדשים, ואחד העיקריים בהם הוא חומצה פולילקטית (PLA) שהינה פוליאסטר מתכלה ביו-אקטיבי תרמופלסטי. חומרים תרמופלסטיים מהווים כיום כ-75% מכלל הפלסטיק המיוצר בעולם וניתנים למחזור תוך חימום מחדש (Shieh et al. 2020).

PLA, בהשוואה לפולימרים אחרים, מתאים לתהליכי הדפסה בזכות תכונותיו: טמפרטורת היתוך נמוכה יחסית, צמיגיות רבה וזמן התקשות מהיר, אך עם זאת כדי להכינו להדפסה יש להעשירו בתוספים אשר פוגעים רבות בתהליך ההתכלות הטבעי שלו (Carlota 2019). על כן, מחקרים בתחום שואפים לשפר את חומרי הגלם המבוססים PLA ולהביאם לרמת התכלות מרבית, תוך שמירה על התכונות המכאניות של החומר (Mikula et al. 2020). בהקשר זה, PHA (פולי-הידרוקסי אלקונאט) הוא פולימר תרמופלסטי הזוכה לתשומת לב מרובה, בשל יכולתו להתפרק ביולוגית בסביבות שונות ללא צורך בהליך חיצוני (Chee et al. 2010; Vigil Fuentes et al. 2020). כיוון שקיים קושי ניכר בייצור חומרי גלם מבוססי PHA עבור הדפסת תלת-מימד (Wouter 2016), נעשים ניסויים לשילוב PHA ו-PLA לייצור חומרי גלם חדשים המנצלים את יתרונותיהם של שני הפולימרים (Wasti & Adhikari 2020).

שימוש בביו-פלסטיק באמצעות הדפסת תלת-מימד בתחום האדריכלות ניתן לראות כיום בפרויקטים טכנולוגיים פורצי דרך של חברות כגון: AI Build ו-Dus Architect, אשר הדפיסו ביתנים

ואלמנטים מבניים בחומרים ביו-פלסטיים מבוססי PLA. במקביל להיבטים החומריים, פיתוחים עכשוויים במחשוב ושיטות ייצור הובילו לכניסתם של מדפסות ורובוטים תעשייתיים לתחומי העיצוב והארכיטקטורה. השימוש ברובוטים תעשייתיים וההסבה שלהם לתהליכי הדפסה ארכיטקטוניים הוביל למגוון של פיתוחי תוכנות, ממשקי סימולציה וייצור של ראשי הדפסה על ידי אדריכלים ובהתאם למורכבויות ייצור (Braumann & Brell Cokcan 2012). הידע והנגישות המיחשובית מאפשרים למתכננים לתכנת תהליכי ייצור באמצעות כלים פרמטריים, למדוד את איכות הביצוע ולהטמיע שינויים בתהליך הייצור באופן פשוט ומהיר. כיום, ניתן לתכנן ולייצר גאומטריות מותאמות מונחות ביצועים שאינן חזרתיות מבלי לייקר את תהליכי הייצור או להאריכם (Hensel 2013). הדפסת תלת-מימד הנשענת על עיצוב ממוחשב מאפשרת לנו להשתמש באותה מדפסת עבור סוגים שונים של מאפיינים צורניים וחומרים משתנים, וכך למעשה ניתן לפתח מגוון רחב של אלמנטים מרחביים סביב אותה מדפסת (Lim et al. 2018).



תמונה 1: ביתן המודפס מביו-פלסטיק  
המבוסס זרעי פשתן, חברת Dus  
Architects

בייצור המקומי, מרב תעשיית הפלסטיק בענף הבנייה בישראל מבוססת על תהליכי הזרקה לתבניות ואקסטרוזיה המותאמות לפולימרים שאינם מתכלים כגון פי.וי.סי. ופוליקרבונט. שיטות הייצור מלוות בחסמים המגבילים את צורניות האלמנט, גובה החתך, שינוי התבנית לאורך קו הייצור, ייצור בפרופיל משתנה וכן שימוש בתבניות ניתנות למחזור. מסיבה זו המגמה בתכנון הינה של חזרתיות צורנית על פני התאמה גאומטרית מבוססת ביצועים (performance) שמאפשרת דיוק צורני ביחס לפרמטרים

מדידים כגון: מינימום חומר, מינימום משקל, ביצועים קונסטרוקטיביים, ביצועים אקלימיים של הצללה ובידוד וכיוצא באלה.



תמונה 2 : ייצור אלמנט מבני בעזרת זרוע רובוטית, חברת AI Build

המגמות הגלובליות לקיימות הנעזרות בפיתוח של חומרים מתחדשים ופיתוח תהליכי ייצור מותאמים מורגשת בישראל. בשנים האחרונות התגבשו אחריות והבנה שתעשיית ייצור הפלסטיק הישראלית תידרש לעבור שינוי משמעותי (שייתמך ברגולציה) קיימת, ואיתן פורסמו הצהרות ומסמכי קיימות של יצרנים מובילים (Keter Sustainability Report 2019). מחקר זה מבקש לבחון שימוש בהדפסת תלת־מימד כפלטפורמה לפיתוח תהליכי ייצור של אלמנטים מבניים המבוססים ביו־פלסטיק אשר יתמכו במגמה זו ואף ירחיבו אותה.



תמונה 3: תבנית יציקה מודפסת הניתנת למחזור, חברת AI Build

## פרק 2: מטרות ושיטת המחקר

1. בחינת הטמעה של שימוש בתרכובות ביו-פלסטיק עבור רכיבים מבניים טיפוסיים בענף הבנייה.
2. פיתוח תהליכי ייצור בהדפסת תלת-מימדית של אלמנטים מבניים קיימים ופוטנציאליים הניתנים להמרה לביו-פלסטיק.
3. פיתוח שיטות לשימוש ביתרונותיה של הדפסת תלת-מימד בתעשיית הפלסטיק ובענף הבנייה.



תמונה 4: תקריב פאנל מחומר ביו-פלסטיק למענה אקוסטי בהדפסה



תמונה 5: תקריב פאנל מחומר ביו-פלסטיק למענה אקוסטי בהדפסה

## פרק 3 : שלבי המחקר

טבלה 1 לוח הזמנים של מחקר

שלב	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
<b>מיפוי תרכובות, שיטות הדפסה ואפיון אלמנט</b>																			
1. מיפוי וסקירה של תרכובות																			
2. מיפוי וסקירה של שיטות הדפסה																			
3. אפיון אלמנט בניה																			
<b>הגדרת החומר בהתאם לאלמנט ופיתוח מודל מחשובי</b>																			
1. בחירת אלמנט, החומר ושיטת ייצור																			
2. פיתוח מודל מחשובי לייצור בהדפסה																			
<b>התאמת שיטת הייצור לאלמנט ולחומר הנבחר</b>																			
1. התאמה של שיטת הדפסה																			
2. פיתוח סימולציה לייצור בהדפסה																			
<b>הדפסת אב-טיפוס של האלמנט</b>																			
1. הדפסה פיזית של האלמנט																			
2. בדיקת האלמנט המודפס																			

### 3.1 מיפוי תרכובות פלסטיק, שיטות הדפסה ואפיון לאלמנטים מבניים

#### א. מיפוי וסקירה של תרכובות פלסטיק

ניתוח וסקר תרכובות פלסטיק וביו-פלסטיק הנמצאות בשימוש בענף הבנייה ובענפים אחרים מתקדמים בתחום. זיהוי תהליכים ליצירת חומרי גלם, אפיון מידת ההתכלות הטבעית והאילוצים הכרוכים בשימוש התרכובות וכן זיהוי הפוטנציאל בשימוש חומרים אלה בהדפסת תלת-מימד.

#### ב. מיפוי וסקירה של שיטות הדפסה לתרכובות ביו פלסטיק

שיטת ההדפסה תוגדר בהתאם לדרישות הייצור של התרכובות הנבחרות (טמפרטורת התכה, מהירות הדפסה, גובה הדפסה, קירור או חימום פלטת ההדפסה).  
וסיווגם על סמך מידת התאמה לתכונות ודרישות הביצוע של אלמנט מבניים פוטנציאליים (תכונות מכאניות, נראות וכו').

### ג.איפיון אלמנט בניה - פאנלים אקוסטיים

סיווג אלמנט על פי, חומר, גודל, עובי, משקל, שיטת התקנה ומקדם הפחתת רעש. כמו כן תיבדק היתכנות הייצור לשיטות ההדפסה המוצעות. יילקחו בחשבון דרישות ייצור כגון: סביבה מבוקרת, רזולוציה, טמפרטורה, וייצור בעל 5 צירים.

## **3.2 הגדרת החומר הנבחר בהתאם לאלמנט ופיתוח מודל מחשובי**

### א. בחירת אלמנט, הגדרת החומר ושיטת ייצור

הגדרת חומר ביו-פלסטיק לצורך ייצור האלמנט המבני הנבחר לאור תכונות ודרישות הביצוע. על סמך מיפוי תרכובות הביו-פלסטיק בעלות פוטנציאל לשימוש באלמנטים מבניים, ייבחנו התאמות אפשריות בתרכובות על פי הביצועים הנדרשים לצורך הטמעה בתהליכי ייצור חדשים.

### ב. פיתוח מודל מחשובי של אלמנט מבני בעל פוטנציאל לייצור בהדפסה

פיתוח מודל פרמטרי של האלמנט הנבחר בתוכנת התלת-מימד Rhino והתוסף Grasshopper. זהו היבט מחשובי המאפשר לבצע התאמה בין הצורה הגאומטרית לתהליך ייצור בחומר ספציפי ובעקבות כך להשתנות בהתאם לצורך.

## **3.3 התאמת שיטת הייצור לאלמנט ולחומר הנבחר**

### א. התאמת הגדרות הדפסה ייעודיות על בסיס שיטת הייצור

ההתאמה תבוסס על התכונות החומריות והמכאניות של החומר הנבחר (טמפרטורה, מהירות, גובה וכו').

### ב. פיתוח סימולציה לייצור בהדפסה

יצירת סימולציה המאפשרת שליטה בפירוק המודל לשכבות הדפסה (Slicer), ואופטימיזציה של מסלול ההדפסה ביחס לדרישות האלמנט והחומר הנבחרים. החישובים הפרמטריים והסימולציות יבוצעו בתוכנת התלת-מימד Rhino תוך חישוב באמצעות אלגוריתם בעזרת התוסף Grasshopper. תהליך האופטימיזציה יפותח על גבי ניסויי הדפסה באופן איטרטיבי כך שלאחר כל סבב יבוצעו שינויים.

## **3.4 הדפסת אב-טיפוס של האלמנט המבני מתרכובת ביו-פלסטיק**

### א. הדפסה פיזית של האלמנט

הדפסת אב-טיפוס של האלמנט המבני הנבחר מחומר ביו-פלסטיק אשר תואם לתכונות ודרישות הביצוע. הדפסת האלמנט תיעשה במעבדת D.D lab בזרוע רובוטית או מדפסת, בהתאם לגודל של האלמנט.

## **ב. בדיקת האלמנט המודפס מביו-פלסטיק אל מול האלמנט המקורי ופיתוח בקרה**

בדיקת האלמנט המודפס מביו-פלסטיק אל מול אלמנט קיים תוך שימוש בפרמטרים מדידים אשר נקבעו בסעיפים קודמים (תכונות מכאניות ודרישות ביצוע).

## **פרק 4: סקירת סוגי תרכובות פלסטיק וביו-פלסטיק**

### **4.1 תרכובות פלסטיק – מונחי יסוד**

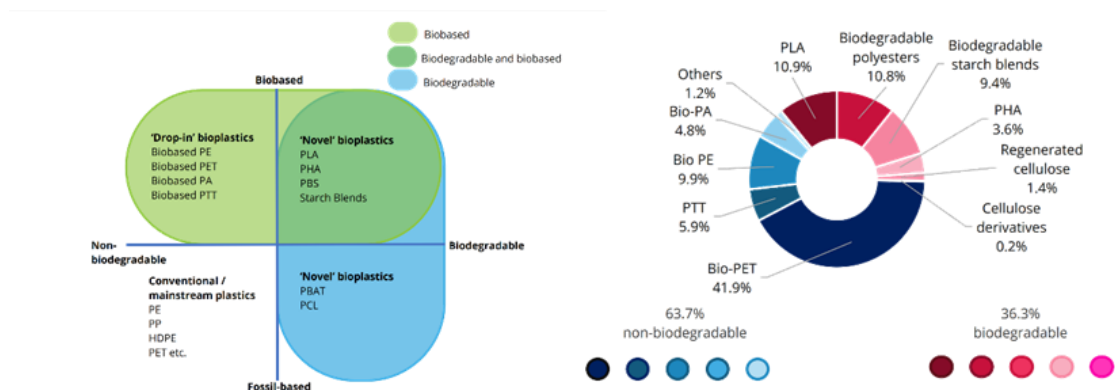
פולימרים מודרניים מתבססים בעיקר על תוצרים של התעשייה הפטרוכימית. לעומת זאת, 'ביו-פלסטיק' מתייחס לפולימרים אשר מתבססים על חומרים ביולוגיים, חומרים מתכלים או שניהם. פלסטיק מחומרים ביולוגיים מיוצר ללא חומרים שמקורם בדלקי מאובנים, במקומם נעשה שימוש בחומרים ביולוגיים. עובדה זו הופכת אותם למבטיחים מאוד בהקשר של חומרים בני-קיימא. למרות תכונות אלה, מקור ביולוגי אינו מבטיח כי התוצר הסופי יהיה מתכלה (היכולת של חומר להתפרק בעזרת מיקרואורגניזמים בסביבה טבעית). כל אלה, לצד מדיניות תומכת מצד האיחוד האירופי, הובילו לעניין מחודש בסטנדרטים שאנו קובעים לשימוש בחומרים בתעשייה, כמו גם שקילה מחדש של סוף מחזור חיים, מיחזור ומעבר לביו-פלסטיק. לפיכך, חומרים ביו-פלסטיים מפותחים כיום כך שיוכלו לעמוד באותם תנאים שפלסטיק מדלקי מאובנים עומד בהם היום ומשמש את התעשייה. בנוסף, דרישה מוגברת לחומרים מתחדשים בייצור אדטיבי (Additive Manufacturing) הובילה לייצור של תרכובות ביו-פלסטיות חדשות המתבססות על חומרים ביולוגיים.

בסקירה זו, התחלנו בזיהוי של החומרים הפלסטיים הנפוצים ביותר בתהליכי הייצור של תעשיית הבנייה, דהיינו פוליקרבונט (PC), פוליפרופילן (PP) ופוליוניל כלוריד (PVC). פוליקרבונט משמש היום בעיקר בייצור חלונות, קירוי וקירות מסך, זאת בשל שקיפותו לצד עמידות טובה שלו לחום ופגיעה. פוליוניל כלוריד משמש בעיקר בייצור חיפוי קירות, רצפות וצינורות, זאת בזכות עמידותו גבוהה, משקלו הקל ויציבותו כימית. יתרה מכך, פוליקרבונט ופוליוניל כלוריד (בצורתם המוקצפת) משמשים במוצרים אקוסטיים בשיטות הפיזור וספיגה. לכן, ההבנה כי התעשייה עושה שימוש בשני חומרים אלה עבור מוצרים אקוסטיים קובעת אותם כנקודת יחס אפשרית להשוואה עם אלטרנטיבות ביו-פלסטיק.

אם כן, ההשוואה תתבסס על שני פרמטרים עיקריים: תכונות הביו-פלסטיק (כלומר, פלסטיק ממקור ביולוגי ו/או פלסטיק מתכלה), וכן התכונות המכאניות והמגבלות החומריות של הפלסטיק (עמידות מוגבלת לקרינת UV, התכווצות, פליטת גזים ועוד). לשם סקירה זו יש לבאר כמה מונחים בסיסיים העוסקים בתכונות של חומרים פלסטיים:

- חוזק מתיחה (Tensile Strength) – העומס המקסימלי שניתן להפעיל על חומר מסוים מבלי שיווצרו כשלים (סדקים/קרעים וכו').

- התארכות (Elongation) – יחידת מדידה המתארת את הדפורמציה אשר מתרחשת בחומר כאשר מופעלים עליו כוחות מתיחה ולפני נקודת הכשל שלו.
- מודול אלסטיות (Model of Elasticity) – ההתנגדות של חומר לשינוי בצורתו עקב הפעלת כוח חיצוני.
- חוזק כפיפה (Flexural Strength) – היכולת המקסימלית של החומר לעבור כיפוף מבלי להגיע לכשל.
- טמפ' מעבר זכוכיתי (Glass Transition Temperature) – טווח הטמפרטורות שבו חומר הופך מחומר מוצק ושברירי למוצק אמורפי (תהליך הפיר).
- טמפ' התכה (Melting Temperature) – הטמפרטורה שבה חומר מוצק הופך לנוזלי.



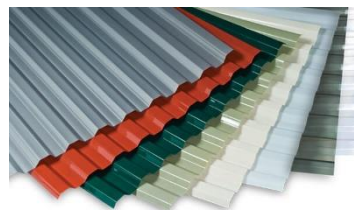
תמונה 6: מיפוי סוגי הפלסטיק והתפלגות הביו-פלסטיק השכיחים בתעשייה מקור Burlow et al. 2018

## 4.2 תרכובות פלסטיק בתעשיית הבנייה

### 4.2.1 Polycarbonate (PC)

#### הגדרה כללית

פוליקרבונט (Polycarbonate – PC) הוא תרמופלסט אשר לרוב מורכב מקבוצות ביספנול A. PC הוא תוצר של תעשיית הנפט, כלומר הוא אינו מגיע ממקור מתחדש ומתאפיין בחוסר יכולת התכלות (Kausar et al. 2017). יחד עם זאת, ל-PC יכולת מחזור טובה עם שימור של עד כ-80% מהחומר שנכנס לתהליך המחזור (Antonakou & Achilias 2013).



תמונה 7: חיפוי גלי מ-PC. מקור: פלרם

### מאפיינים עיקריים

PC הוא חומר בעל תכונות מכאניות טובות, עם מודול אלסטי וחוזק מתיחה בטווח של כ-2.35 GPa ו-160–70 MPa בהתאמה (Brunelle et al. 2006). ה-PC מתאפיין בטמפרטורת מעבר זכוכיתי (glass transition temperature) של 150 מעלות צלזיוס, בעוד טמפרטורת ההתכה שלו נעה בין 100 ל-110 מעלות צלזיוס. כיום PC משמש במגוון רחב של תעשיות, ובהן: בנייה, מוצרי חשמל, רכב, תעופה, ציוד רפואי ואריזות (Balaji et al. 2018). תעשיות אלה מנצלות את תכונותיו המכאניות המוצלחות של PC, לצד התכונות האופטיות (שקיפות) שלו, כדי לייצר מגוון רחב של מוצרים. בתעשיית הבנייה PC משמש לייצור חלונות, חזיתות, קירויים, הצללות ואפילו חלונות מחוסמים. למרות תכונותיו הטובות החומר פגיע בחשיפה ממושכת לקרינת UV, וכן סופח לחות אשר פוגעת בחוזקו. את החסרונות הללו ניתן לאזן בעזרת תוספים שונים וציפויים.

### מידע על הדפסת החומר

כיום PC נמצא בשימוש בהדפסת תלת-מימד כדוגמת פילמנט של חברת polymaker, אך הוא ידוע כחומר מורכב וקשה להדפסה. שילוב של תכונות מכאניות טובות מאוד וטמפרטורת הדפסה גבוהה יוצרות חומר שאינו מתאים לרוב המדפסות הקיימות כיום בשוק. על מנת להבטיח הדפסה טובה נדרשת יכולת הדפסה בכ-280 מעלות צלזיוס על משטח בטמפרטורה של כ-110 מעלות צלזיוס (Pandžić & Hodzic et al. 2021).

### דוגמה להדפסת תלת-מימד

דוגמה ליישום של PC בהדפסת תלת-מימד ובקנה מידה גדול ניתן למצוא בעבודתו של טיצי'אנו וודאפיירי (Tiziano Vudafieri). וודאפיירי ביקש להראות כי ניתן לייצר חיים נוספים לפלסטיק, ושם כך יצר בהדפסה אהיל מ-PC ממוחזר.



תמונה 8: אהיל PC ממוחזר בהדפסת תלת-מימד. מקור: Vudafieri Saverino

## ***Polyvinyl Chloride (PVC) 4.2.2***

### הגדרה כללית

פוליוויניל כלוריד (Polyvinyl Chloride – PVC) הוא תרמופלסט ממשפחת הכלורידים, החומר נחלק לשני סוגים עיקריים: קשיחים וגמישים. בשל הימצאותו של כלוריד החומר יודע לקבל מגוון רב של תוספים מה שהופך אותו לאחד מחומרי הפלסטיק הנפוצים ביותר בשימוש כיום. PVC הוא תוצר של תעשיית הנפט, כלומר הוא אינו מגיע ממקור מתחדש ומתאפיין בחוסר יכולת התכלות. יחד עם זאת, הוא מסוגל להתמחזר היטב ונחשב למוצר מבוקש בתעשיית המחזור (Campo et al., 2008).



תמונה 9: צינורות PVC. מקור: PVC 4 Pipes

### מאפיינים עיקריים

PVC הוא בעל תכונות מכאניות טובות, עם מודול אלסטי וחוזק מתיחה בטווח של כ-3.5 GPa ו-7–62 MPa בהתאמה (Tanzi, Farè & Candiani 2019). ה-PC מתאפיין בטמפרטורת מעבר זכוכית (glass transition temperature) של 80 מעלות צלזיוס בעוד טמפרטורת ההתכה נעה בין 170 ל-180 מעלות צלזיוס (Patrick et al. 2005). כיום PVC משמש בעיקר את תעשיית הבנייה אשר נעזרת בתכונותיו הטובות לשם יצירת ריצוף, דלתות, חלונות, מסגרות, כמו גם צינורות ומחברים שונים. צורתו הגולמית של PVC היא אבקה לבנה ועל כן ניתן לצבוע אותו בקלות רבה, תכונה זו לצד עמידות פיזית וכימית הפכו אותו לפלסטיק השלישי הנפוץ ביותר כיום (Campo et al. 2008). לצד אלה, ל-PVC חיסרון מובהק והוא פליטת גזים רעילים בעת חימום.

### מידע על הדפסת החומר

קיימת אפשרות להדפיס PVC במדפסת תלת-מימד, אך השימוש בחומר יחסית מוגבל ומורכב מאוד ליישום. המגבלה המשמעותית ביותר היא הפצת רעלנים במהלך תהליך ההדפסה, לכן יש צורך בתא

הדפסה סגור שבו מותקנת מערכת סילוק רעלים מתאימה, דבר שאינו זמין ברוב המדפסות כיום. על מנת להבטיח הדפסה טובה נדרשת יכולת הדפסה ב-215–230 מעלות צלזיוס על משטח בטמפרטורה של כ-80 מעלות צלזיוס.

#### דוגמה להדפסת תלת-מימד

אם כן, לאור המורכבות של הדפסת תלת-מימד ב-PVC כיום אין דוגמאות משמעותיות להדפסה שכזאת, אחת על כמה וכמה בקנה מידה גדול. על אף זאת, ראוי לציין כי קיימים מספר רב של פרויקטים קטנים שבהם הודפסו מחברים לצינורות PVC סטנדרטיים. דוגמה מעניינת יותר הינו חליל שקוהאצ'י (Shakuhachi flute) שאותו ייצר דלטון ביסל (Dalton Bissel). החליל מתבסס על צינורות PVC קיימים בקוטר  $\frac{3}{4}$  צול, ולהם נוספה פיה וקצה אשר הודפסו ב-PVC.



תמונה 10: חליל PVC מודפס בתלת-מימד. מקור: Print3D

### **Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) 4.2.3**

#### הגדרה כללית

אקרילוניטריל בוטאדיאן סטירן (Acrylonitrile Butadiene Styrene/ABS) הוא תרמופלסט ממשפחת הקופולימרים. כל אחד מרכיבי הפולימר תורם לסט תכונות ספציפי אשר מייצר את הפולימר המוכר לנו כ-ABS מסחרי (Campo et al. 2008). ה-ABS הוא תוצר של תעשיית הנפט, כלומר הוא אינו מגיע ממקור מתחדש, והוא מתאפיין בחוסר יכולת התכלות. כמו כן, תהליך המחזור של ABS מורכב ודורש ציוד ומשאבים ייחודיים, וכתוצאה מכך אחוז גדול ממוצרי ה-ABS נאגרים ונזרקים בסופו של דבר למזבלות ואינם ממוחזרים (García et al. 2016).



תמונה 11: לוחות ABS מקור Industrial Plastics

מאפיינים עיקריים

ABS בעל תכונות מכאניות טובות עם מודול אלסטי וחוזק מתיחה בטווח של כ-2.2 GPa ו-43 MPa בהתאמה (Peters et al. 2002). ה-ABS מתאפיין בטמפרטורת מעבר זכוכית (glass transition temperature) של 105 מעלות צלזיוס (Rahman, Schott & Sadhu 2016) בעוד טמפרטורת ההתכה היא סביב 200 מעלות צלזיוס (Singh & Singh 2017). ה-ABS מקבל את התכונות שלו מכל אחת מתתי-הקבוצות שמרכיבות את הפולימר. קבוצת האקרילונטריל מקנה לחומר את עמידותו הכימית, את עמידותו לחום וכן את קשיחות פני השטח של החומר; קבוצת הבוטאדיאן מקנה לחומר קשיחות ועמידות לפגיעות; ואילו קבוצת הסטרין תורמת ליכולת העיבוד של החומר. כיום ABS משמש במגוון רחב של תעשיות וקיים במוצרים רבים, כמו פאנלים לחיפוי, קסדות, צינורות, מעטפות של מוצרים אלקטרוניים, מזוודות ועוד (Campo et al. 2008).

מידע על הדפסת החומר

ABS משמש כבר היום להדפסות תלת-מימד והוא נחשב לאחד החומרים הגמישים ביותר לשימוש בהדפסה (Khanna et al. 2021). על מנת להבטיח הדפסה טובה נדרשת יכולת הדפסה בכ-230 מעלות צלזיוס על משטח בטמפרטורה של כ-110 מעלות צלזיוס (Abeykoon, Sri-Amphorn & Fernando 2008). למרות יתרונותיו, ABS סובל מהתכווצות ועיוות משמעותיים אשר יש לקחת בחשבון במהלך הדפסה.

דוגמה להדפסת תלת-מימד

דוגמה ליישום של ABS בהדפסת תלת-מימד ובקנה מידה גדול ניתן למצוא בעבודתו של המעצב שון מורן (Sean Moran). הכיסא הודפס במסגרת אתגר של IC3D לייצר כיסא שיהיה עמיד, קל משקל ובעל משך הדפסה קצר מחמישה ימים. התוצאה היא הכיסא שמוצג להלן, אשר הודפס ב-ABS במשך שלושה ימים. עובייה של כל שכבה בעובי של 2 מ"מ. במהלך ההדפסה נעשה שימוש בגובה שכבה משתנה כדי להשיג זוויות גדולות יותר ללא תמיכה.



תמונה 12: כיסא מ־ABS מודפס. מקור: IC3D

#### ***Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified (PETG) 4.2.4***

##### הגדרה כללית

פוליאיתילן טרפ־טאלט גליקול (Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified – PETG) הוא תרמופלסט ממשפחת הקו־פולימרים. החומר הוא נגזרת של PET ובעת יצירתו יש החלפה של אחד מרכיבי השדרה של הפולימר (Balint et al. 2021). כיום ה־PETG מגיע בעיקר מתוצרים של תעשיית הנפט ולכן גם אינו מתכלה. יחד עם זאת, PETG ידוע כחומר שיכולות המחזור שלו גבוהות (Devsingh 2018).

אומנם PETG הנפוץ כיום מיוצר מתעשיית הנפט, אך ניתן גם להשיג PETG אשר משלב בתוכו תוספים שונים המאפשרים לו להתכלות. חומר זה נקרא (Bio-PETG) (Gokhale 2020).



תמונה 13: ציוד רפואי מ־PETG. מקור: Recycling Today

### מאפיינים בולטים

PETG בעל תכונות מכאניות טובות עם מודול אלסטי וחוזק מתיחה בטווח של כ-2.5 GPa וכ-50 MPa בהתאמה (Balint et al. 2021). ה-PETG מתאפיין בטמפרטורת מעבר זכוכיתי (glass transition temperature) של 75 מעלות צלזיוס בעוד טמפרטורת ההתכה היא סביב 260 מעלות צלזיוס (Latko-Durafek et al. 2019). החומר משמש כיום מגוון רחב של ענפים, ובהם: קונטיינרים למזון ושתייה, ציוד רפואי, תצוגה, הדפסת תלת-מימד ותעשיית הנשק. כמו כן, כבר היום יש ניצנים של שימוש בחומר בתעשיית הבנייה, בעיקר בדמות חזיתות.

### מידע על הדפסת החומר

PETG נחשב כבר היום כחומר הדפסת תלת-מימד מבוקש ואטרקטיבי. על מנת להבטיח הדפסה טובה נדרשת יכולת הדפסה ב-220–240 מעלות צלזיוס על משטח בטמפרטורה של 50–90 מעלות צלזיוס. החומר מתאפיין בעיוות מינימלי, – וזה יתרון משמעותי בחלקים מכניים ומבניים. בנוסף החומר שקוף, עובדה שמהווה יתרון על חומרים פלסטיים אחרים בהדפסה. יתרון משמעותי של PETG הוא יכולת המחזור שלו. למעשה, החומר משמר באופן טוב למדי את תכונותיו המכאניות גם לאחר מחזור, ובמיוחד כאשר הוא משולב עם PETG "נקי" (Devsingh 2018).

### דוגמה להדפסת תלת-מימד

דוגמה ליישום של PETG בהדפסת תלת-מימד ובקנה מידה גדול ניתן למצוא בעבודתו של מוריץ מונגנאסט (Moritz Mungenast) אשר חוקר ב-TUM (Technical University of Munich). בעבודתו הודפס אלמנט חזית שרוחבו 60 ס"מ וגובהו מטר אחד. מוריץ מתאר את המורפולוגיה של האלמנט כמעין וילון שמתנפנף ברוח, כאשר ניתן לשלוט באופן שבו הוא נע על מנת לתת לחזית תכונות אדריכליות ותפקודיות שונות, לדוגמה: סינון קרינת אור, דיפלקציה אקוסטית, שקיפות, טקסטורה ועוד.



תמונה 14: פאנל חזית פרמטרי מ-PETG אשר מודפס בתלת-מימד. מקור: TUM

## Polypropylene (PP) – 4.2.5

### הגדרה כללית

פוליפרופילן (Polypropylene – PP) הינו פולימר תרמופלסטי ממשפחת המונומרים. PP מיוצר לרוב באחת משלוש טכניקות עיקריות, שמקור כולן במתעשיית הנפט (Shubhra et al. 2011). כיוון שמדובר בחומר אשר מגיע מתעשיית הנפט הוא אינו מתכלה, אך ניתן למחזרו. בתהליך המחזור יש ירידה משמעותית בתכונות המכניות של המוצר הסופי (Eriksen et al. 2019).

אומנם PP הנפוץ כיום מיוצר מתעשיית הנפט, אך מחקרים מצביעים על התכונות לייצור Bio-PP על בסיס גלוקוז מן הצומח (Siracusa & Blanco 2020).



תמונה 15: פקקים של בקבוקי שתייה מ-PP.  
מקור: recyclingtoday

### מאפיינים בולטים

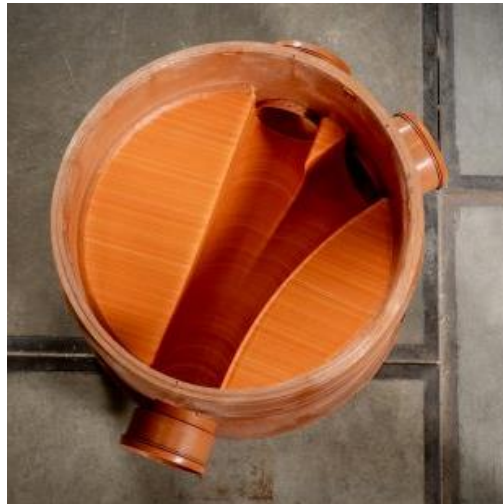
PP הוא פלסטיק בצפיפות נמוכה בעל עמידות מצוינת, עמידות לעומסים ועמידות כימית טובה. ל-PP מודול אלסטי וחוזק מתיחה בטווח של 1.14–1.55 GPa ו-31–41.4 MPa בהתאמה (Handayani 2021). ה-PP מתאפיין בטמפרטורת מעבר זכוכית (glass transition temperature) של 25 מעלות צלזיוס, בעוד טמפרטורת ההתכה היא סביב 170 מעלות צלזיוס (Greene 2021). בשל העלות הנמוכה של החומר הוא משמש למגוון רחב של ענפים, כשהראשי בהם הוא אריזות וכלי פלסטיק. נוסף על אלה, החומר משמש בענפי הרכב, הרפואה, הצעצועים ועוד.

### מידע על הדפסת החומר

PP נחשב כבר היום כחומר הדפסת תלת-מימד מבוקש ואטרקטיבי בשל היותו קל, אטום למים ועמיד מאוד. על מנת להבטיח הדפסה טובה נדרשת יכולת הדפסה ב-220–250 מעלות צלזיוס על משטח בטמפרטורה של 85–100 מעלות צלזיוס. בתנאים הנכונים החומר יכול להעביר אור, כמו כן החומר מקבל פיגמנטים באופן טוב למדי. יתרון משמעותי של החומר מתבטא ביכולת למחזר אותו. PP המסוגל להתמחזר כמה פעמים, מאבד מאיכויות התכונות המכניות והכימיות שלו אך מעט.

### דוגמה להדפסת תלת-מימד

דוגמה ליישום של PP בהדפסת תלת-מימד ובקנה מידה גדול ניתן למצוא במוצרים של חברת Pipelife. החברה מתמחה בפתרונות ניקוז והובלת מים, כאשר אחד הפיתוחים שלהם היא כוורת כניסה (Manhole) מודפסת בעזרת זרוע רובוטית. לדברי החברה, ההדפסה מאפשרת לה לייצר פתרונות מותאמים אישית ומבלי להתפשר על עמידות ואיכות המוצר. כמו כן, לדברי החברה, העובדה שמדובר במוצר מודפס שהותאם אישית מאפשר לצמצם את הצורך בתחזוקה.



תמונה 16: כוורת ביוב מודפסת מ-PP. מקור: Pipelife

## 4.3 תרכובות ביו-פלסטיק

### *Polylactic Acid – (PLA)* 4.3.1

#### הגדרה כללית

חומצה פולילקטית (PLA) הינה פוליאסטר תרמופלסטי מתכלה, המבוסס על מקורות טבעיים ומתחדשים כמו עמילן תירס, קנה סוכר ועוד. תהליך הייצור של החומר ידידותי לסביבה, וצורך-22% פחות אנרגיה מאשר ייצור של פולימרים מהתעשייה הפטרוכימית (Farah et al. 2016). אף ש-



תמונה 17: אריזות מזון מ-PLA. מקור: ecomena

PLA נחשב חומר מתכלה, ניתן לפרק אותו רק בתהליך קומפוסט תעשייתי הדורש תנאים ספציפיים של לחות, חומציות, טמפרטורה וחמצן, והוא נמשך כ-180 יום (Ehman & Area 2021). בסביבה טבעית תהליך ההתכלות של החומר נמשך 80 שנה לפחות (Carlota 2019). קצב ההתכלות האיטי של החומר יכול להוות יתרון או חסרון ביחס לשימוש ואורך החיים הרצוי של המוצר.

#### מאפיינים עיקריים

PLA הוא בעל תכונות מכאניות טובות, עם מודל אלסטי וחוזק מתיחה בטווח של 3.2-3.7 GPa ו-55-60 MPa. ה-PLA הוא פולימר חצי גבישי וטמפרטורת מעבר זכוכית (glass transition) של 65-70 מעלות צלזיוס. טמפרטורת ההתכה שלו היא 160-170 מעלות צלזיוס בקירוב (Krotký et al. 2016). מאפיינים אלה הופכים את PLA לחומר הביופלסטי המבטיח ביותר כיום, מכיוון שהוא מציע תכונות ייחודיות של התכלות ביולוגית כמו גם יכולות עיבוד תרמופלסטיות. כיום ה-PLA משמש עבור יישומים רבים ושונים, החל באריזות, מוצרי פלסטיק חד-פעמיים ורבי-פעמיים וכלה בחקלאות ומוצרים מעולם הרפואה והתרופות. החומר מתאפיין בתכונות אופטיות, פיזיות ומכאניות טובות כמו מודל כיפוף וחוזק מתיחה גבוהים, יחד עם זאת, לחומר פריכות אינהרנטית (brittleness), ועל כן לא בהכרח יתאים לאפליקציות מסוימות הדורשות חוזק מכני (Slapnik et al. 2016).

#### מידע על הדפסת החומר

טמפרטורת ההיתוך, צמיגות ההיתוך וזמן ההתקשות המאפיינים את ה-PLA, הופכים אותו לאידיאלי להדפסת תלת-מימד. על כן הפך נפוץ הן בשוק החומרים להדפסה תלת-מימדית (Filaments) והן כמושא או בסיס למחקר. עם זאת, למרות יתרונותיו הרבים, הפריכות המובנת בחומר מגבילה את השימוש בו במצבו הטהור. מחקרים רבים נעשים על מנת לייצר תרכובות הדפסה מבוססות PLA יחד עם תוספים שיחזקו את יכולותיו המכאניות (Slapnik et al. 2016). בעקבות טמפרטורת ההיתוך ותכונות הצמיגיות של החומר, טמפרטורת ההדפסה של PLA נעה סביב 210 מעלות צלזיוס, ובשל כך היא נוחה ליישום בכלל מדפסות התלת-מימד.

#### דוגמה להדפסה תלת-מימדית

דוגמה ליישום של PLA בהדפסת תלת-מימד ניתן לראות בעבודתם של מנואל חימנס גרסיה וג'יל רטסין (Manuel Jiménez García & Gilles Retsin) ממעבדת העיצוב (UCL Design Computation Lab) של בית הספר לאדריכלות ברטלט, בלונדון, בשיתוף פעולה עם חברת העיצוב Nagami עיצבו את הכיסא Voxel v1.0 המורכב מקו רציף אחד של 2.4 ק"מ, מודפס בתלת מימד מ-PLA על ידי זרוע הדפסה רובוטית. Voxel הוא אב טיפוס להדגמת המאפיינים של תוכנה שפיתחו במיוחד עבור הדפסת תלת-מימד רובוטית, אשר מאפשרת לעצב ולשלט באלפי מקטעים. האלמנטים המודפסים נוצרים בקו אחד רציף של החומר, במקום להדפיס שכבה אחר שכבה. קו זה של PLA

שקוף, מועשר בצבען ציאן (cyan), מותך ומודפס באוויר על ידי הזרוע הרובוטית. החומר מתמצק במהירות ונשאר תלוי באוויר בנקודה שבה הוא הונח.



תמונה 18: Voxel v1.0 כיסא מודפס  
מ־ PLA. מקור:  
designcomputationlab0

### ***Polyhydroxyalkanoates (PHA/PHB) 4.3.2***

#### הגדרה כללית

Polyhydroxyalkanoates – PHA הם משפחה של פוליאסטרים המיוצרים באופן טבעי מחומרים מתחדשים בתהליך תסיסה של מיקרואורגניזמים שונים. תהליך הייצור של החומר, אשר מבוסס על מקורות מתחדשים שאינם מזון, מהווה יתרון גם כן (Mehrpouya et al. 2021). תהליך ההתכלות של ה-PHA מהיר באופן יחסי ויכול להתרחש בסביבה עם או ללא חמצן. התהליך עורך 60–365 יום באדמה, או 14–90 יום במי ים. כיום משתמשים בחומר בעיקר לפיתוח אפליקציות רפואיות למשל בתחום הנדסת העצם והרקמות (Ehman & Area 2021).

#### מאפיינים עיקריים

תכונות החומרים (PHAs) יכולות להשתנות בהתאם להרכב הכימי, אולם המאפיינים העיקריים כוללים חוזק מתיחה גבוה, ניתן לערבב את החומר עם חומרים שונים על מנת לקבל תכונות אחרות. ההבדל העיקרי המאפיין חומר זה לעומת ביו-פלסטיק מתכלים אחרים הוא עמידותו בלחות ואי-מסיסותו במים (Dwivedi et al. 2020). טמפרטורת המעבר הזכוכית (glass transition temperature) של PHA הנמוכה מזו של ה-PLA מקנה לו תכונות מכאניות שונות. יתרון נוסף של PHAs הוא ריבוי המבנים שלהם המאפשר מגוון רחב של מאפיינים, הניתנים להתאמה אישית בהתאם לצרכים הספציפיים של המוצרים הרצויים. עם זאת, הייצור ההמוני של PHAs עדיין יקר. בימים אלה השוק שלהם נמצא בצמיחה עבור ייצור בקנה מידה גדול. קיים מגוון רחב של PHAs. החומרים מתחלקים לשלושה סוגים

עיקריים המשתנים בהתאם לאורך השרשרת שלהם (קצרה/בינונית/ארוכה). בנוסף, לפי מספר אטומי הפחמן בשרשרת הרוחבית משתנות גם תכונות החומר, והוא עשוי להיות שביר יותר או בעל התנהגות קרובה יותר לאלסטומרים (פולימר בעל דרגת אלסטיות גבוהה). למשל PHAs עם שרשרת קצרה (scl-PHA, short chain length-PHA) בעלי 3 אטומים של פחמן בשרשרת שלהם, מתאפיינים בקשיחות ושבירות (stiffness and brittleness) גבוהים ביחס לגבישיות הגבוהה שלהם (50-80%). כיום ידועות יותר מ-150 יחידות מונומריות שונות, מה שמאפשר לייצר PHAs עם תכונות שונות. טמפרטורת המעבר הזכוכית (glass transition temperature) שלהם נעה בין 10 ל-35 מעלות צלזיוס ונקודות ההתכה בין 49 ל-177. לבעלי השרשרת הקצרה משתייך גם PHB (Polyhydroxybutyrate), שהינו אחד הפולימרים הנפוצים ביותר ממשפחה זו (Mehrpouya et al. 2021). ה-PHB אינו אלסטי במיוחד ובעל מודל אלסטיות של 3.8 GPa. השימוש בחומר זה עבור תהליכים שמצריכים המסה הוא מוגבל, היות שטמפרטורת ההתכה של החומר גבוהה יחסית, 180 מעלות צלזיוס, ויש לעבד אותו בין טמפרטורה זו לבין 190 מעלות לכל היותר, שכן טמפרטורה גבוהה יותר גורמת לפירוק תרמו מכאני של החומר. יחד עם זאת, לחומר זה חוזק מתיחה גבוה (45 MPa), אך התארכות נמוכה בשבירה (4%) באופן יחסי לפוליפרופילן (PP) למשל (Fuentes 2020).

#### מידע על הדפסת החומר ודוגמה להדפסת תלת-מימד

למשפחת PHAs יש פוטנציאל גדול ליישום בתלת-מימד, בעיקר עבור מוצרים קשורים לעולם הרפואה לאור יכולת ההתכלות שלהם והעבודה שאינם רעילים. עם זאת, פילמנטים (חומר גלם להדפסה) של PHA אינם בעלי ביצועים כמו אלה שב-PLA. לכן, PHAs מעורבים בעיקר עם פולימרים אחרים/סיבים טבעיים ליצירת מאפיינים משופרים (Mehrpouya et al. 2021). החברה ColorFabb הדפיסה בתלת-מימד חלקים מכאניים כמו חלקי מנוע, באמצעות חומר חדש שפיתחה. הפילמנט החדש מכיל PLA ו-PHA. לטענתם, הוספת ה-PHA הופכת את ה-PLA לקשיח יותר ושביר פחות. כאמור, PHA כמו PLA ביו-פלסטיק, כך שהתערובת החדשה שלהם עדיין מתכלה ב-100%.



תמונה 19: חלק מכני מודפס מפילמנט-PLA  
colorfabb: PHA מקור.

### Bio-Polyamid (PA) 4.3.3

#### הגדרה כללית

ביו-פוליאמיד (Bio-PA) הוא סוג נוסף של ביו-פלסטיק המכונה גם ביו-ניילון. הוא מהווה כ-12% משוק הביו-פלסטיק העולמי (בשנת 2019). לביו-פוליאמיד (Bio-PAs) יש כמה נוסחאות מבניות, וכל אחת מהן מיוצרת בשיטת ייצור אחרת ונושאת תכונות שונות. ביו-פוליאמיד הוא חומר המופק ממשאבים מתחדשים כמו שומנים טבעיים. כל שיטה מהווה סינתזה של מונומר חומצת אמינו ממקורות כמו שמן קיק או ביומסה (castor oil or biomass). בשנים האחרונות נעשה שימוש בביו-פוליאמיד בביו-פלסטיק כגון Terryll® (מבית Cathay Industrial Biotech), EcoPaXX® (מ-DSM) לייצור חלקי רכב (Rahman & Bhoi 2021). פוליאמידים המבוססים על שמן קיק הם הפולימרים מחומרי גלם מתחדשים, מעשה ידי אדם, העתיקים ביותר. חומרי ביו-פוליאמיד אומנם מיוצרים מחומרים מתחדשים, אך נחשבים לא-מתכלים (Kyulavska et al. 2017). סוג אחד מוכר מבין הביו-פוליאמידים הוא ה-PA 11 (11-aminoundecanoic), המיוצר מחומצה שמקורה בשמן קיק (Pagacz et al. 2015).



תמונה 20: כיסוי מנוע מ-EcoPaXX.  
מקור: DSM

#### מאפיינים עיקריים ומידע על הדפסת החומר

סוגי הביו-פוליאמיד (Bio-PAs) בעלי אורכי שרשרת שונים ומתאפיינים בקשרי מימן שונים בהתאם, ובכך בעלי כושר ספיגת מים שונה. באופן כללי ניתן לומר כי ככל ששרשרת הפחמן ארוכה יותר כך החומר חזק יותר, עמידותו גבוהה יותר לממסים ויכולת ספיגת מים שלו נמוכה יותר. מאפיינים אלה מאפשרים לעצב חומרים המבוססים על מקורות מתחדשים, בעלי מאפיינים מותאמים (Pagacz et al. 2015). ביו-פוליאמיד (Bio-PA) מתאפיינים ביציבות תרמית גבוהה באופן יחסי לחומרי פלסטיק אחרים, טמפרטורת המעבר הזכוכית (glass transition temperature) שלהם היא 110 מעלות צלזיוס. בנוסף, חומרים אלה מתאפיינים בתכונות כמו עמידות בפני פגיעות, עמידות בפני שחיקה, יכולת עיבוד טובה, תכונות בידוד טובות וכן עמידות כימית (Rahman & Bhoi 2021). לדוגמה, PA 11 מתאים ליישום בתבניות (extrusion and injection) ומתאפיין בספיגת לחות נמוכה יותר (בהשוואה ל-PA 6 ו-PA 66 למשל), אשר מספקת יציבות טובה יותר, עמידות לכימיקלים, משך זמן התיישנות ארוך, גמישות ועמידות תרמית. בנוסף, מתאפיין בשקיפות, המאפשרת אפשרויות עיצוב רבות. בזכות מאפיינים אלה זכה פוליאמיד 11 להצלחה מסחרית למרות מחירו הגבוה משמעותית

מחומרים אחרים. PA 11 זמין מסחרית כבר למעלה מ-60 שנה והינו הפוליאמיד הראשון המהונדס שלו ביצועים גבוהים על בסיס ביולוגי. מוצרי PA 11, בניגוד לשאר ה-PA, סופחים מעט מאוד לחות. בנוסף, הם ניחנים בתכונות המכאניות הטובות של הפוליאמידים, כמו קשיחות ועמידות אדירה בסביבות קיצוניות וטמפרטורות גבוהות. ל-PA 11 מאפיינים חשמליים יציבים והוא נמצא בשימוש נרחב ליישומים בתחום החשמל, כגון מבדדים. כל התכונות הללו הופכות את PA 11 לאידאלי גם להדפסת תלת-ממד מסוג SLS – הדפסה מבוססת אבקה – של חלקים עמידים במיוחד (Kyulavska et al. 2017).

#### דוגמה להדפסת תלת-מימד

החברה Aectual tch, המתמחה במוצרי אדריכלות ועיצוב פנים המודפסים בתלת-מימד, השיקה סדרת מוצרים חדשה בשיתוף עם מעבדת המחקר מאוניברסיטת ETH בשוויץ, Gramazio Kohler. הקולקציה החדשה מורכבת מלוחות דיפוזיה אקוסטיים מודפסים בתלת-מימד וניתנים להתאמה אישית. הם עשויים מ-100% חומרים על בסיס צמחי, במקרה זה Bio PolyAmide. לטענת החברה, לא רק שהם עשויים מפלסטיק על בסיס צמחי תוך שימוש בתהליך שאינו מייצר פסולת, אלא שמרגע שכבר אין בהם צורך ניתן למחזר אותם ולעשות בהם שימוש חוזר. למעשה, Aectual tch אוספת בחזרה את המוצרים ישירות ויכולה להשתמש בחומר כדי להדפיס מחדש יצירות חדשות.



תמונה 21: פאנל אקוסטי מביו-פוליאמיד.  
מקור: Aectual

#### **Polyhydroxybutyrate-Co-Hydroxyvalerate (PHBV) 4.3.4**

##### הגדרה כללית

למשפחת ה-PHAs משויך גם החומר PHBV (polyhydroxybutyrate-co-hydroxyvalerat), המבוסס על PHB ועל poly3-hydroxybutyrate (PHBV). מתקבל ישירות מתסיסה ומיצוי, ובדומה ל-PHAs אחרים, הוא מיוצר באופן טבעי על ידי מיקרואורגניזמים ונחשב כתחליף ירוק לפלסטיקים ממקורות פטרוכימיים (Fuentes 2020). ל-PHBV שלוש תכונות עיקריות: התכלות ביולוגית, תאימות ביולוגית (אינו יוצר ריאקציה או תגובה מזיקה עם מרקם ביולוגי חי) והוא פולימר מבוסס ממשאב מתחדש. שלושת המאפיינים הללו הופכים אותו לפולימר מבטיח מאוד בעל פוטנציאל גדול להחלפת פולימרים קונבנציונליים מבוססי נגזרות פטרוכימיות, וכן מאפשר לו לתמוך באופן משמעותי בתפיסת

הכלכלה המעגלית (Ibrahim et al. 2021). ה-PHBV בעל 100% יכולת התכלות באדמה, מים וקומפוסט. זמן ההתכלות שלו משתנה בהתאם לתנאים (Rivera-Briso & Serrano-Aroca 2018). הוא אטרקטיבי במיוחד בשל תכונותיו המכאניות הדומות לאלה של פוליפרופילן (PP). למרות זאת, המסחור של PHBV עדיין בשלבים המוקדמים שלו ועלותו עדיין גבוהה יחסית בהשוואה לסוגי פלסטיק המיוצרים בתעשיות פטרוכימיות. כיום ה-PHBV משמש עבור יישומיים רפואיים כמו שחרור מבוקר של תרופות, מוצרי אריזה ועוד (Vandi et al. 2019).

#### מאפיינים עיקריים

PHBV מתאפיין בצמיגות גבוהה בנוזל, היבט חיובי בתהליכי אקסטרוזיה, ותכונות מכאניות טובות יותר, כגון עלייה במתח פני השטח וגמישות רבה יותר בהשוואה ל-PHB. בנוסף, ניתן היום לייצר אותו בקנה מידה גדול. עם זאת, מדובר בפולימר קשיח ושביר למדי, טמפרטורת ההיתוך שלו נמוכה יותר מאשר PHB ויציבותו התרמית ירודה בהשוואה לפולימרים מבוססי תעשיות פטרוכימיות. נקודת ההיתוך וטמפרטורת המעבר הזכוכית (glass transition temperature) של PHBV היא 153–170 מעלות צלזיוס בקירוב, ו-3–9 מעלות צלזיוס בהתאמה. לכן, ביופולימר זה מתנהג כמו גומי בטמפרטורת החדר ואינו יציב במהלך העיבוד, מעל 160 מעלות צלזיוס. הרבה מהתכונות הפיזיקליות והמכאניות שלו חלשות בהשוואה לפולימרים קונבנציונליים, כגון עמידות נמוכה יותר בפגיעה, התארכות מופחתת בשבירה, ופריכות/שביריות (fragility) (Fuentes 2020). התכונות הפיזיקליות והמכאניות של PHBV תלויות מאוד ב-HV3 שנמצאים בו. לכן, חשוב לבחור את ה-PHBV עם תוכן ה-HV3 הרצוי בהתאם ליישום. המאפיינים המכאניים הגרועים, היציבות התרמית הנמוכה ושיטות העיבוד המפרכות הם מספר גורמים המגבילים את השימוש ב-PHBV במגוון רחב של יישומים. על כן, בשנים האחרונות, על מנת להרחיב את היישומים הפוטנציאליים שלו ולשפר את תכונותיו של ה-PHBV, פותחו אסטרטגיות מתאימות. על ידי שילוב עם פולימרים שונים, סיבים טבעיים וכו' (Rivera-Briso & Serrano-Aroca 2018). שילוב של PHBV עם כל חומר פולימרי אחר מביא לשיפור תכונות של כל אחד מהפולימרים. כלומר, לקיומו של פולימר אחד עשויה להיות השפעה של הגדלת הביצועים הכוללים של הפולימרים האחרים (Kiruthika 2022).

#### מידע על הדפסת החומר ודוגמה להדפסת תלת-מימד

ב-PHBV נעשה שימוש בשיטות עיבוד שונות כגון הזרקה ויציקה. עם זאת, המחקר בנוגע לעיבודו בשיטת FDM עדיין חסר. השימוש ב-PHBV בהדפסת תלת-מימד מוגבל בשל יציבותו התרמית הירודה והטווח הצר של הטמפרטורות המאפשר עיבוד, בין נקודות הפירוק וההתכה. כתוצאה מכך, מיזוג PHBV עם ביו-פולימרים אחרים משמש כאמצעי לשיפור המגבלות הללו. למשל, במחקרו של Vigil Fuentes הושגה מתודולוגיה מתאימה להדפסת תלת-מימד של PHBV בשיטת FDM, על ידי שילוב PLA וחומר מאריך שרשרת (CE). התערובת החדשה התאפיינה בתכונות משופרות הן מבחינה תרמית והן מבחינת אלסטיות. בנוסף, נחקרו הפרמטרים של הדפסת התלת-מימד עצמה, כמו

טמפרטורת ההדפסה, מהירות ההדפסה, עובי השכבה וטמפרטורת המיטה, ונמצאו נתוני העיבוד האופטימליים לשיפור הביצועים המכאניים של המוצרים. ניתוחים תרמו־מכאניים ומכאניים של התוצרים הראו מוצרים נוקשים וחזקים יותר בתנאים אלה. הדפסת תלת־מימד מוצלחת של תערובות מבוססות PHBV:PLA:CE תסייע ביצירת חלופות בנות־קיימא לחומרי הדפסת תלת־מימד וצפויה לשמש ביישומים ביו־רפואיים (Vigil Fuentes et al. 2020).



תמונה 22: פלטים PHBV של חברת  
Plastics

### 4.3.5 Polyethylene furanoate (PEF) הגדרה כללית

#### הגדרה כללית

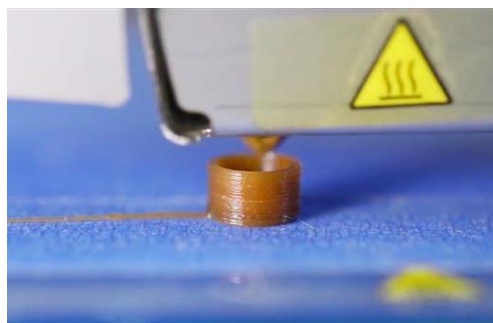
פוליאיתילן פורנואט (Polyethylene furanoate) – PEF הוא פוליאסטר המבוסס על חומרים מתחדשים. PEF מסונתז מ־FDCA ואתילן גליקול ומהווה פולימר יוצא דופן עם מאפיינים בעלי ביצועים גבוהים. על כן, הוא מהווה מועמד בר קיימא להחלפת חומרי הפלסטיק מהתעשייה הפטרוכימית כגון PC ו־PEF. PETG זכה להכרה רחבה בעיקר בשל הדמיון שלו לפוליאיתילן טרפלט מסחרי (PET) וכן התאמתו ליישומים כלליים רבים, במיוחד באריזה של משקאות מוגזים, לאור תכונות מחסום הגז (פחמן דו־חמצני) הייחודיות שלו. PEF פחות חדיר לפחמן דו־חמצני פי 31 מ־PET. מבחינת מיחזור, הן מיחזור מכאני והן מיחזור כימי המבוסס על פעולת אנזימים, הוכחו כאסטרטגיות נאותות. בדיקות הקומפוסט של החומר הראו פירוק PEF מהיר, אם כי ההתכלות הביולוגית של החומר בתנאים סביבתיים לוקה בחסר. על כן, בשנים האחרונות נעשים מאמצים מיוחדים להכנת PEF עם יכולת התכלות על ידי קופולימריזציה שלו עם פולימרים אחרים (Loos et al. 2020). למשל נחקרה קופולימריזציה שלו עם poly(ethylene succinate) (PESu), פוליאסטר אליפטי חצי גבישי, המושך תשומת לב מכיוון שהוא מפגין יכולת התכלות ביולוגית מצוינת, יציבות ותכונות מכאניות טובות. קופולימריזציה של השניים משפרת את קצב ההתכלות של התוצרים, ולצד תכונותיהם המכאניות הופכת אותם לאטרקטיביים כחלופה ירוקה לייצור אריזות מזון וכדומה (Terzopoulou et al. 2016).

### מאפיינים עיקריים

תכונותיו של החומר מזכירות מאוד את תכונות החומר PET ואף טובות ממנו, לדוגמה, נקודת ההתכה שלו מעט נמוכה יותר מה שמשפר את תכונות הקיימות שלו מכיוון שלא צריך להשתמש בחום רב, בנוסף חוזק המתיחה של PEF גבוה יותר במקצת, ובשל כך ניתן לייצר ממנו חומרים קלים יותר. ה-PEF שקוף בעל גוון זהוב הנובע מבסיס הסוכר שלו. PEF רגיש ל-UV, כלומר באור UV ה-PEF מידרדר לאט, ובהתאם לצורך יידרש טיפול UV (Middendorp 2022). PEF מתאפיין בטמפרטורת התכה ( $T_m$ ), בטמפרטורת מעבר זכוכיתי ( $T_g$ ) וטמפרטורת יציבות תרמית של 80–75 ו-350 מעלות צלזיוס בהתאמה. מודול האלסטיות שלו גבוה יותר מאשר של PET (כ-2.0 ו-1.3 GPa, בהתאמה), ועל כן החומר עמיד יותר מבחינה מכאנית למגוון יישומים (Loos et al. 2020).

### מידע על הדפסת החומר ודוגמה להדפסת תלת-מימד

Reflow, לצד Indorama, יצרנית ה-PET הגדולה בעולם, ו-Corbion, המובילה העולמית בייצור חומרים מבוססי ביו, פיתחו את הפרויקט DURAPRINT בתמיכת האיחוד האירופי. הפרויקט כלל בדיקה של שיטות מיחזור מעגליות כמו גם חלופות חומרים מבוססי ביו ליצירת שני סוגים חדשים של פילמנטים בני-קיימא לתעשיית הדפסה התלת-מימד, אשר אחד מהם מיוצר מ-PEF. בפרויקט זה נבחר PEF לא רק בשל היותו ביופולימר מחומרים מתחדשים אלא גם בשל תכונותיו הדומות ל-PETg, שהפכות אותו לאידאלי להדפסת תלת-מימד (Middendorp 2022). בנוסף, גם חוקרים ממכון זלינסקי לכימיה אורגנית פיתחו חומר PEF המתאים להדפסת תלת-מימד, ובעל עמידות כימית גבוהה יותר מאשר פילמנטים אחרים. לטענתם, ניתן להשתמש בחומר במדפסות תלת-מימד נפוצות, ללא צורך בהתאמות של החומרה עצמה. החוקרים מציינים כי ישנם כמה חסרונות לפילמנטים הזמינים מסחרית, שכן מוצרי פלסטיק העשויים מ-PLA, ABS ו-PETG מאבדים את השלמות המבנית שלהם כאשר הם נחשפים לממסים אורגניים. החומר PEF החדש, לעומת זאת, אינו נפגם. לחומר מספר יתרונות שהופכים אותו למתאים במיוחד להדפסת תלת-מימד, כגון הידבקות אופטימלית, תרמופלסטיות, חוסר דלמינציה (delamination – היפרדות של שכבות בחומר) והתכווצות חום נמוכה (Kucherov et al. 2017).



תמונה 23: הדפסת D3 של פילמנט PEF.  
מקור: materialdistrict



תמונה 24: פלטים של PEF במסגרת הפרויקט  
DURAPRINT. מקור: Reflow

### **Polylactic Acid + Q (EZ-Q) 4.3.6**

UBQ הוא חומר תרמופלסטי עשוי פסולת הממוינת ממזבלות. חומר זה מוסף לתערובות שונות באחוז משתנה הנע בין 20% ל-50% בהתאם ליישום המוצר הספציפי, מתוך כוונה לשפר את טביעת הרגל הפחמנית של חומרי פלסטיק שונים. בנוסף מתאפשר מיחזור של החומר. UBQ מונע פליטת מתאן ודלדול נוסף של משאבי טבע. טביעת הרגל החיובית של UBQ פירושה ששילוב של אפילו 15% UBQ בתערובת חומרי הגלם יכול לנטרל את טביעת הרגל הפחמנית של מוצר פלסטיק. בנוסף להפחתת טביעת הרגל הפחמנית, החומר ניתן לשילוב עם מגוון רחב של סוגי פלסטיק ותואם לרוב שיטות ייצור הפלסטיק. החומר מוגדר כ-BioPreferred על ידי ה-USDA, ומכיל לפחות 50% תוכן מבוסס ביו. תרכובת החומר עם החומרים השונים עשויה להשתנות, ונדרשת בדיקה בעת השילוב. החומר לבדו אינו מתאים לשמש בענף הבנייה, אך כתוסף לחומרים שונים יכול כאמור להשתלב ולהקטין את טביעת הרגל הפחמנית.

#### מידע על הדפסת החומר ודוגמה להדפסת תלת-מימד

החברה הישראלית Plastics-App פיתחה פילמנט להדפסת תלת-מימד, המבוסס על החומר בר-הקיימא UBQ וחומצה פולילקטית – PLA. הפילמנט שנקרא EZ-Q הוא תחליף ל-PLA בחומר בעל טביעת פחמן נמוכה מאוד. החומר יכול לשמש כאבטיפוס למוצרים מעוצבים בני-קיימא.



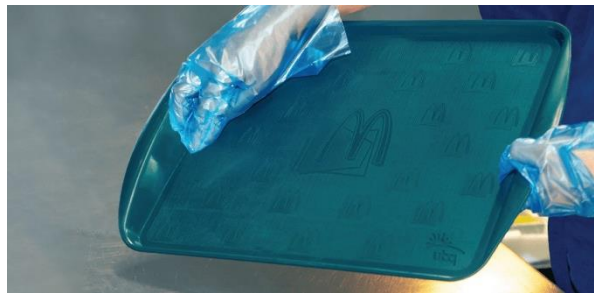
תמונה 25: פילמנט Ez-Q להדפסת  
תלת-מימד. מקור: Plastic-app

## 4.4 תרכובות פלסטיק בלתי אחידות

### 4.4.1 polypropylene Q Carbon Fibers (PPQCF)

#### הגדרה כללית

UBQ הוא חומר תרמופלסטי עשוי פסולת הממוינת ממזבלות, במטרה לשפר את טביעת הרגל הפחמנית של חומרי פלסטיק שונים על ידי הוספתו לתערובת בשיעור משתנה, הנע בין 20% ל-50% בהתאם ליישום המוצר הספציפי. כמו כן מתאפשר מחזור של החומר. UBQ מונעת פליטת מתאן ודלדול נוסף של משאבי טבע. טביעת הרגל החיובית של UBQ פירושה ששילוב של אפילו 15% UBQ בתערובת חומרי הגלם יכול לנטרל את טביעת הרגל הפחמנית של מוצר פלסטיק. בנוסף להפחתת טביעת הרגל הפחמנית, החומר ניתן לשילוב עם מגוון עצום של סוגי פלסטיק ותואם לרוב שיטות דפוס הפלסטיק. החומר מוגדר כ־BioPreferred על ידי ה־USDA, ומכיל לפחות 50% תוכן מבוסס ביו. תרכובת החומר עם החומרים השונים עשויה להשתנות. ונדרשת בדיקה בעת השילוב עם חומרים שונים. החומר לבדו אינו מתאים לשמש בענף הבנייה, אך כתוסף לחומרים שונים יכול להשתלב ולצמצם את טביעת הרגל הפחמנית.



תמונה 26: מגש מזון בר־קיימא המיוצר עם UBQ.  
מקור: UBQ

#### מידע על הדפסת החומר ודוגמה להדפסת תלת־מימד

החברה הישראלית Plastics-App פיתחה פילמנט ראשון מסוגו להדפסת תלת־מימד, המבוסס על חומר בר־קיימא UBQ ופוליפרופילן. הפילמנט, שנקרא PerformQ, מאפשר הדפסת חלקים פונקציונליים בחומר בעלי טביעת פחמן נמוכה מאוד. החומר מתאפיין בעמידות כימית מצוינת, עמידות תרמית טובה, צפיפות נמוכה וטביעת פחמן נמוכה מאד. שימושים פונקציונליים לדוגמה: חלקים בתעשיית הרכב, אבות־טיפוס פונקציונליים, מוצרים בני־קיימא לבית ולגן, ועוד. בעת הדפסתו, החומר נוטה להתעוות ולהיפרד מהפלטפורמה, לכן מומלץ שימוש ביריעות הדבקה ודבק PP, כגון Magigoo PP. בנוסף, לחומר יש נטייה להישחק על כן מומלץ להשתמש בדיזה מפלדה בגודל 0.6 מ"מ ומעלה.



תמונה 27: דוגמה להדפסה בקנה  
מידה קטן בפילמנט תוצרת  
Plastics-App שמשלב UBQ עם  
Carbon fiber



תמונה 28: Q Perform ✓ – פילמנט  
בר-קיימא. מקור: Plastics App

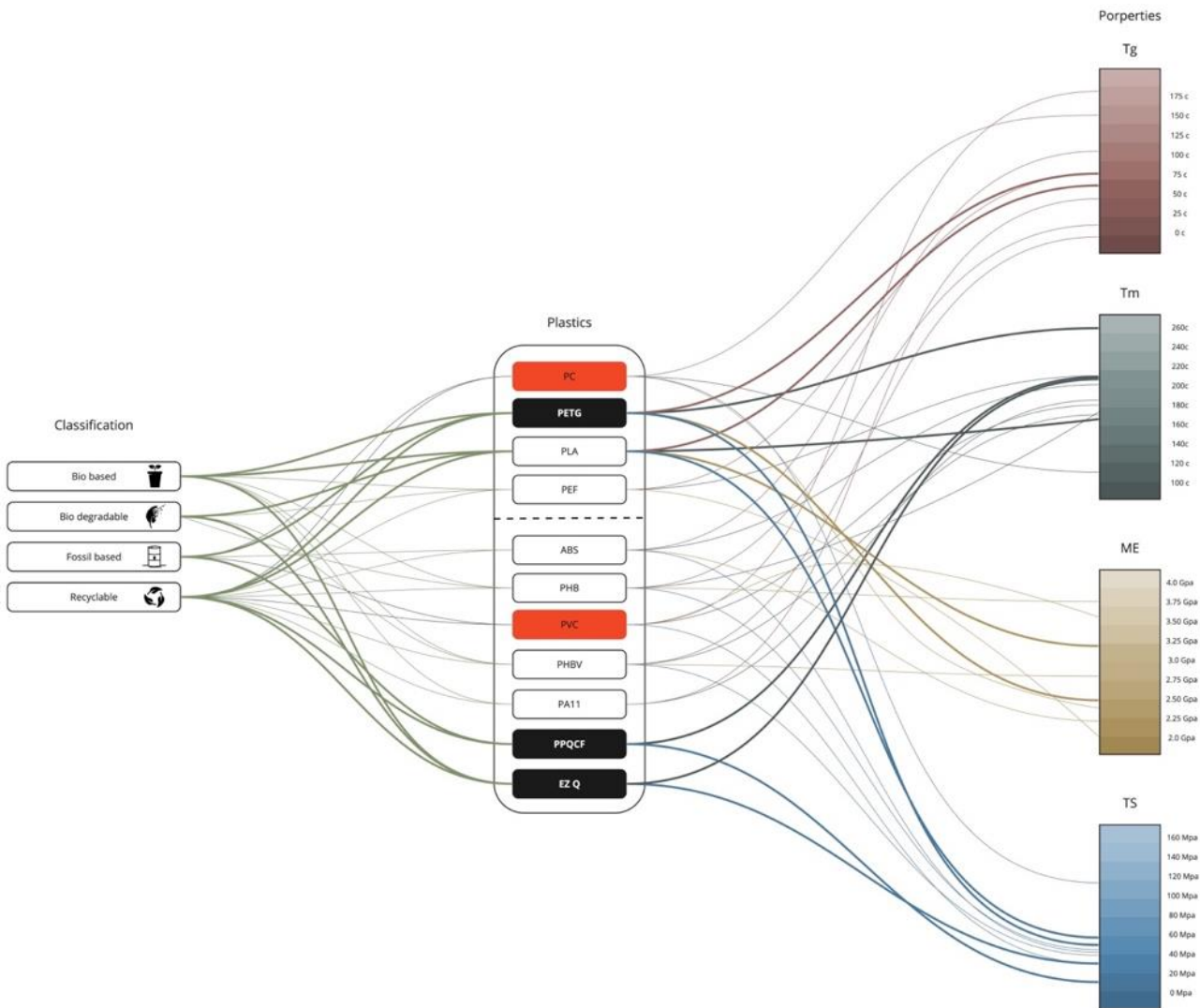


תמונה 29: חלקיקי UBQ בצבעים שונים. מקור: UBQ

#### 4.5 מיפוי חומרים להמשך המחקר

הבנת תכונות החומר העיקריות והיישומים האדריכליים הקשורים שנגזרו מצרכי התעשייה, שימשו מדד לבחינה של תרכובות ביו-פלסטיק שיכולות להתאים לדרישות אלו. נבדקו תרכובות ביחס למקור שלהם, תכונות התכלות, שקיפות/אטימות, תכונות מכאניות, אילוצי חומרים (כגון עמידות UV, פליטת אדים, התכווצות וכו'), כמו גם הפוטנציאל שלהם לשימוש בהדפסה בקנה מידה מבני. לאחר הסקירה, נבחרו ארבעה חומרים להמשך בדיקה. PETG כחומר תחליפי ל Polycarbonate הניתן

למחזור, שקוף וקל להדפסה, PPQCF ו EZ-Q נבחרו כתחליפים לPVC, חומרים אטומים בעלי טביעת פחמן פחותה, יכולת מחזור המכילים חומרי פלסטיק ממקור טבעי. נוסף לשלושת החומרים נבחר גם PLA כחומר לצורך בקרה והשוואה של תכונות הדפסה.



תמונה 30: מיפוי תרכובות פלסטיק על פי תכונות מכאניות, מקור, התכלות ויכולת מחזור

## פרק 5: הדפסת תלת-מימד

### 5.1 שיטות הדפסה

ייצור מתווסף (Additive Manufacturing – AM), הידוע גם בשם הדפסת תלת-מימד, הוא תהליך ייצור הנעשה שכבה על גבי שכבה לבניית חפצים מלמטה למעלה (Gao et al. 2020). ההתקדמות הטכנולוגית של ייצור מתווסף פתחה אפשרויות חדשות לניסויים ושיטות עבודה בתכנון בעזרת מחשב (Computer Aided Design – CAD) וייצור בעזרת מחשב (Computer Aided Manufacturing – CAM) (Gao et al. 2020). אם כן, ככל שהשימוש בייצור מתווסף מתרחב, מתגלים היישומים הפוטנציאליים שלו בקנה מידה גדול המתאימים לשימושים אדריכליים (Agusti-juan & Habert 2016). יתרה מכך, לייצור מתווסף מספר השפעות בסיסיות אשר הוכחו כתורמות ישירות לקיימות:

א. הפחתת השימוש בחומר – ייצור מתווסף מאפשר יצירת מוצרים מורכבים ומוצרים בכמויות קטנות תוך צמצום הפסולת למינימום (Hegab et al. 2023). עובדה זו מאפשרת פתח משמעותי לחדשנות והתאמה אישית, כמו גם אפשרות לאיחוד חלקים וייצור מוצרים סופיים קלים יותר (Wang et al. 2023).

ב. צריכת אנרגיה מופחתת – ייצור מתווסף מאפשר חיסכון באנרגיה בשתי דרכים עיקריות: ראשית, על ידי ייצור מוצרים קלים יותר, הצורכים פחות אנרגיה, ומשפיעים באופן משמעותי על ענף התחבורה. שנית, קיצור של שרשראות אספקה על ידי ייצור קרוב לצרכן וצמצום הצורך בהובלה (Verhoef et al. 2018).

ג. ביצועים משופרים – לייצור מתווסף יש פוטנציאל לייצר פיזור חומר מותאם אישית ובכך לשפר ביצועים בתחומים כמו נוחות תרמית, אקוסטיקה, הצללה ועוד. שיפור שכזה מושג על ידי האפשרות לייצור צורות מורכבות וכן בזכות יכולת לבצע אופטימיזציה טובה יותר בין הסטרוקטורה לדרישות. לדוגמה, ייצור מתווסף יכול לייצר טיפולוגיות מורכבות שעברו אופטימיזציה לביצועים טובים יותר עם משקל מופחת (Khalid & Peng 2021; Wang et al. 2023).

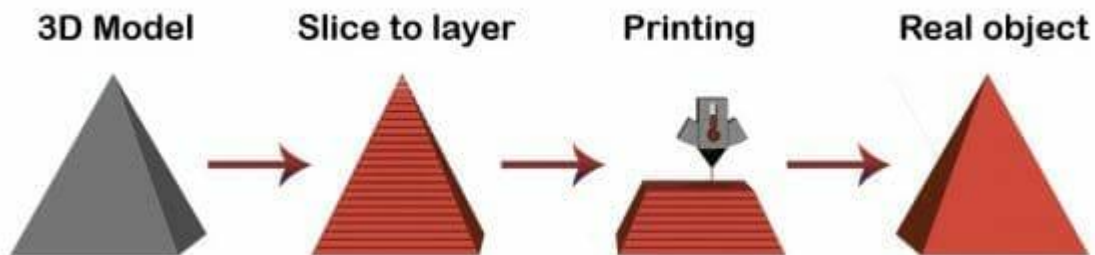
ד. שילוב חומרים חדשים – מחקר בייצור מתווסף הוכיח ניצול מוגבר של חומרים חדשים, כולל חומרים בעלי בסיס ביולוגי (Bio-based) וחומרים מתכלים (Biodegradable). שינוי זה יכול לסייע בהפחתת זיהום ופסולת הנובעים מחומרים המתבססים על תוצרים פטרוכימיים בתעשיית הבנייה (Kretzer & Mostafavi 2020).

למרות היתרונות הנ"ל, מחקר מוגבל התמקד באופטימיזציה של שיטות הדפסה בפלסטיק ובביופלסטיק לשם הפחתת השימוש בחומר בתהליך ההדפסה (Hegab et al. 2023; Manco et al. 2023). למרות כל היתרונות הללו, ייצור מתווסף עדיין לא אומץ באופן רחב בענף הבנייה וכיום הוא נמצא בשלבים הראשוניים בלבד בהשוואה לענפי מפתח כמו רכב, רפואה וחלל (AMFG 2019).

### 5.1.1 התכה ומיזוג לצורך מידול (Fused Deposition Modelling – FDM)

התכה ומיזוג לצורך מידול (Fused Deposition Modelling – FDM) היא שיטת הדפסת התלת-מימד הנפוצה ביותר. שיטה זו מתאפיינת בהתכה של חומר גלם פלסטי המגיע בדמות סליל, המכונה פילמנט (Filament). ההדפסה עצמה נעשית בעזרת ראש הדפסה חם אשר מורכב על מערכת המסוגלת לנוע בשלושה צירים. הפילמנט אשר מועבר אל ראש ההדפסה מותך בטמפרטורה המותאמת לו תוך שהוא מונח במיקום המתאים על ידי מערכת הצירים, כך נבנה המודל שכבה אחר שכבה. השכבות של מודל ההדפסה נחתכות באופן אופקי על ידי תוכנת CAD, כאשר כל שכבה מגדירה מסלול הדפסה ( Tool Path) ומתוקשרת למדפסת בעזרת קובץ Gcode, המהווה את סט ההוראות למנועי המדפסת ( Patel et al. 2022). תהליך זה מתרחש שוב ושוב. תחילה החומר מותך על משטח ההדפסה ולאחר מכן על השכבות הקודמות, עד ליצירת המודל התלת-מימדי השלם.

למבנה השכבות פוטנציאל לייצור צורות מורכבות תוך חיסכון יחסי בחומר. בנוסף, שיטה זו מאפשרת לשלב בו זמנית חומרים שונים בעלי פונקציונליות שונה (Gao et al. 2020). כמו כן, שיטה זו מאפשרת שינוי בטמפרטורת ההדפסה, ובכך שליטה טובה יותר בחומרים המודפסים. לצד היתרונות יש לציין כי לחופש הגאומטרי והחומרי יש מחיר ושיטה זו מוגבלת בחוזק המכאני שלה, כאשר מירב העומסים מתקבלים בניצב לכיוון חיתוך ההדפסה (Singh et al. 2016).

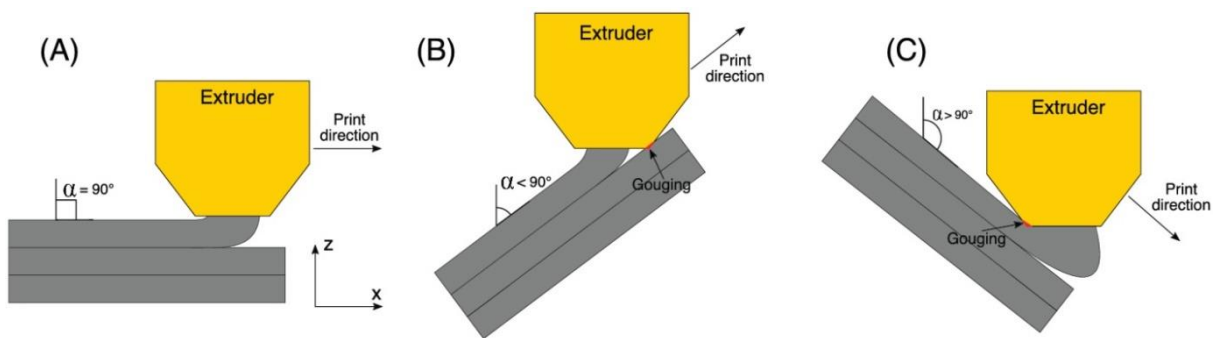


תמונה 31 : תרשים זרימה של חיתוך מודל עד הדפסה. מקור IlearnCANA

### 5.1.2 הדפסה לא מישורית (Non-Planar Printing – 3.5 Axis)

הדפסת תלת-מימד לינארית הינה השיטה הנפוצה ביותר היום והיא למעשה נעשית ב-2.5 מימדים (Ahlers et al. 2019). המדפסת עובדת על בסיס נתיב מתוכנת לינארי (מנועי X ו-Y), כאשר כל שכבה מונחת על גבי קודמתה (מנוע Z). המשמעות היא שברוב המקרים שלושת המנועים אינם פועלים בו זמנית. לשיטה זו חסרונות מובנים, כגון חוסר דיוק גאומטרי עקב צעדי המדרגה, חוזק מופחת של המודל והבדל ויזואלי בין המודל הפיזי לדיגיטלי (Jin et al. 2017). מנגד, עיצוב בעזרת מסלול הדפסה מאפשר דיוק גאומטרי רב יותר וחוזק הדפסה מוגבר, ובכך ניתן ליצור מודל פיזי דומה יותר למקור הווירטואלי תוך מניפולציה של מסלול ההדפסה (Bresghello et al. 2021). לכן, רוב ההדפסות הלא מישוריות מתבססות על מסלול הדפסה ייעודי אשר נוצר בעזרת תוכנת CAD פרמטרית. תכנון מסלול

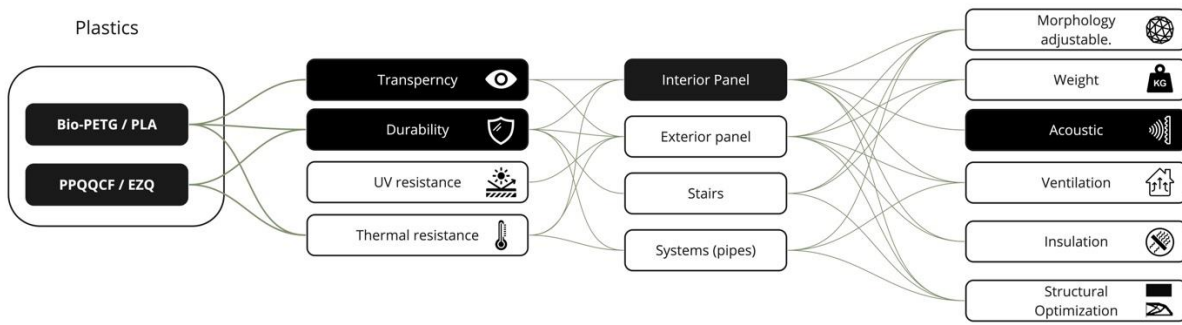
ההדפסה לא נעשה על בסיס הצורה הגאומטרית בלבד אלא גם בהתחשב בסטרוקטורה ובביצועים אשר נדרשים מהמודל (Ahlers et al. 2019; Garcia & Retsin 2015). אם כן, בשנים האחרונות הוצעה שיטה חדשה המשתמשת בשכבות מעוקלות (תלת-מימדיות) לשם יצירת מסלול ההדפסה. עקומות אלה עוקבות אחר פני המודל ויוצרות קווים תלת-מימדיים (שרובם אינם אופקיים) במקום קווים במישור אחד. שיטה זו ידועה בשם Curve Layer Fused Deposition (CLFD) או Form Responsive Method (FRM) (Ahlers et al. 2019; Jin et al. 2017; Molloy & Miller 2018), והיא מבוססת על תנועת כל שלושת המנועים בו זמנית לשם הדפסת השכבה הרצויה. למעשה, כעת מוגדרת הגאומטריה על ידי קווים עקמומיים ולא על ידי משטחים לשם הדפסה תלת-מימדית (Molloy & Miller 2018). שיטה זו פותחת הזדמנויות חדשות לשיפור הפונקציונליות של ההדפסה וכן ליצירת ארטיקולציה שונה מזו הדומה למדרגות ומקובלת בהדפסות תלת-מימדיות פשוטות. CLFD הוכיח כי חלקים אשר מודפסים בשיטה שאינה במישורית יכולים להיות חזקים ונוקשים יותר בשל המשכיות הסיבים לאורך ההדפסה (Ahlers et al. 2019; Jin et al. 2017). אם כן, בהדפסה לא לינארית מסלול ההדפסה מתוכנן מחלקו העליון אל התחתון של המודל, כאשר השכבות העליונות עקמומיות יותר מהתחתונות. תכנון שכזה מאפשר מעבר מהדפסה מישורית אל הדפסה לא מישורית תוך כדי תהליך הייצור (Ahlers et al. 2019). לצד היתרונות לשיטה זו יש גם חסרונות ואילוצים אחדים: צורת המיכון (האופן שבו המדפסת בנויה) יכולה להגביל את הגישה ובכך להגביל את השטח החופשי להדפסה. גם צורת פי ההדפסה קריטית לחישוב התנגשויות אפשריות בהדפסה לא מישורית (Ahlers et al. 2019).



תמונה 32: הדגמת מיקום האקסטרודר בהדפסה לינארית (A) ולא לינארית (B+C). מקור: Nisja et al. 2021.

## פרק 6: בחירה ואפיון של אלמנט מבני

בהתחשב בהגדרת חומרים נבחרים ופירוט שיטות ההדפסה המתאימות לייצור בקנה מידה מבני, הוחלט להתמקד באלמנט מבני מודולרי לחלל פנים כבסיס למקרה בוחן. האלמנט הנבחר הינו פאנל אקוסטי עקב הקשר הישיר שבין גיאומטריה לתפקוד האקוסטי בחלל והיכולת לשפר ביצועים אקוסטיים בעזרת שינוי גיאומטרי. בשנים האחרונות, מתבצע מחקר רב הקושר בין שיטות הדפסה לשיפור יכולות אקוסטיות בתחומים רבים וגם בתחום האדריכלות, בסיס ידע זה יפורט בהמשך הפרק.



תמונה 33: מיפוי ואפיון אלמנט על תכונות חומר, דרישות וביצוע

## 6.1 אקוסטיקה באדריכלות מיפוי וסקירה של אלמנטים

איכות האקוסטיקה בתכנון אדריכלי היא קריטית (Rust et al. 2021), שכן להדהוד גלי קול בחלל יש השפעה ישירה על היכולת שלנו להבין את הסובבים אותנו (Foged et al. 2022). 'איכות אקוסטית' מתייחסת להשגת צליל ברור בעזרת פתרונות אקוסטיים מתאימים, רצוי תוך שליטה בהדהוד גלי הקול ובהבלעותם (Long 2014). מנגד, 'רעש' מתייחס לרמות קול לא רצויות הממסכות את הצלילים הרצויים.

לאדריכלים ומעצבים יש השפעה משמעותית על האיכויות האקוסטיות של חלל. אולם, במקרים שבהם לאקוסטיקה אין תפקיד מרכזי בתכנון המבנה – כמו שיש באולמות קונצרטים למשל – תשומת הלב לשיקולים אקוסטיים נדחית פעמים רבות עד לאחר ביסוס התכנון הראשוני של החלל. עיכוב זה מוביל לרוב לבחירה של מוצרים אקוסטיים שאינם מתאימים לצרכים הספציפיים של החלל (Foged et al. 2022). כיום, ניתן לסווג פתרונות אקוסטיים לשתי קבוצות עיקריות:

1. סופגים: ספיגה, נמדדת על פי כמות אנרגיית הקול שנספגת בחומר בזמן שהקול עובר דרכו (Cox & D'Antonio 2014). פתרונות סופגים מתמקדים בעיקר בשליטה בזמן ההדהוד במרחב. סופגים נקבוביים משתמשים בחומרים בעלי מקדם ספיגה ספציפי ומאופיינים בדרך כלל באלמנטים מישוריים, או בצורת קונוסים ופירמידות.
2. מפזרים: פיזור קול מתייחס להחזר הספקולרי של צליל ממקטעים קטנים בעלי משטח מחוספס (Cox & D'Antonio 2014). אלמנטים מפזרים כוללים משטחים לא סדירים שנועדו לפזר גלי קול, ובכך להשיג פרישה אחידה יותר של צליל בתוך חלל (Foged et al. 2022).

הפתרונות הקיימים כיום מתמקדים בדרך כלל בספיגה או בפיזור, ולא בשילוב של שניהם. התמקדות זו נובעת מהמורכבות של השילוב בין השניים, משיקולי עלות ומהצורך בהתאמה אישית הקשורים לעיצוב אלמנטים מפזרים המתאימים לחללים ספציפיים (Foged et al, 2022). כיום פתרונות של

ספיגה זוכים למרבית תשומת הלב האקוסטית באדריכלות, בעוד שמתעלמים מהחשיבות של פיזור צליל להשגת פרישה אחידה בחלל (Rust et al. 2021).

לפתרונות אקוסטיים הקיימים כיום (גם סופגים וגם מפזרים) יש יישומים שונים בפרקטיקה האדריכלית: פתרונות סופגים מורכבים בעיקר מאלמנטים כגון לוחות תקרה וקיר או אריחים, המשמשים מחסומים לחסימת העברת קול בתוך חלל, ומפחיתים הדים ורמות רעש כלליות. פתרונות מפזרים כוללים גם לוחות (פאנל) שנועדו לפזר באופן אחיד יותר את גלי הקול בחלל, ובכך למזער הדים ולשפר את איכות הצליל.

עבור לוחות, באופן ספציפי, נערכה סריקה של פתרונות מסחריים קיימים (עיין בטבלה 2) תוך התחשבות בקריטריונים כגון חומר, גודל, עובי, משקל, שיטת התקנה ומקדם הפחתת רעש (NRC). סוג החומר והעובי הם גורמים מכריעים בהבנת המתאם בין שימוש בחומר וביצועי הספיגה שלו (Cox & D'Antonio 2014). קריטריונים של גודל וצורה מאפשרים ניתוח של ביצועי האלמנטים מבחינת פיזור וספיגה. גם לשיטת ההתקנה יש חשיבות מכרעת, שכן חלל האוויר הכלוא בין הלוח לקיר אף הוא משפיע ישירות הביצועים האקוסטיים (Cox & D'Antonio 2014). לבסוף, ה-NRC מאפשר השוואה מספרית של הביצועים האקוסטיים של הלוחות. חשוב לציין ש-NRC גבוה אינו מבטיח הפצת צליל טובה או איכותית בחדר, אלא מציין שהאלמנט מסוגל לספוג חלק ניכר מהתדרים 250–2,000 הרץ, ובכך להפחית את ההדהוד בחלל. הסקירה המסחרית התמקדה ביצרני מפתח של פתרונות אקוסטיים, תוך התחשבות בחומרים מתפתחים ומסורתיים כאחד. בנוסף, הסקירה בחנה במיוחד לוחות אקוסטיים צמודי קיר ולא כללה לוחות המשמשים כמחסומים. במקרה של מוצר בעל מספר עוביים, נכלל זה עם ה-NRC הגבוה יותר. סקירת מוצרים על פי סוג חומר וביצועים ניתן למצוא בפירוט בנספחים (ראו נספח 1).

## טבלה 2 – טבלת מוצרים קיימים בשוק וסקירת גודל, משקל ומקדם ספיגה אקוסטי

Material	Type	Geometry	Brand	Product name	Material Thickness	Weight	Dimensions	Installation	NRC
PET	Panel	Flat	Frasch	Weave	36.5mm	68g	95x285.5 mm (27,122.5)	Mount to wall	0.5
PET	Tile	Flat	SilentFiber	Polyboard	25mm	/	150x150 mm (22,500)	Mount to wall	0.5
PET Felt	Panel	Barrels attached to panel	Frasch	PIXL	44mm	/	1200x600 mm (720,000)	Mount to wall	1.1
Stonewool	Panel	Flat	Rockfon	Color-Ai	20mm	2305g	600x600 mm (360,000)	Mount to wall	0.7
PET Felt (recycled PET)	Panel	Flat	Re:Felt	PETFelt Panel	9mm	5700g	2440x1220 mm (2,976,800)	Mount to Wall with 50mm spa	0.65
Recycled wool + polyacril +PET Felt	Panel	Wave	BuzziSpace	BuzziFold	120mm	10000g	1930x950 mm (1,833,500)	Mount to wall	1.35
Concrete	Panel	Flat	Butong	Butong AcousticPanel	45mm	/	900x1200 mm (1,080,000)	Mount to wall	0.1
Polyurethane foam	Tile	Pyramid	SNA	Pyramidacoustic	30-80mm	300g	500x500 mm (250,000)	Mount to wall	0.6
Stonewool cover with thin wood and polyester fabric	Panel	Curved	GikAcoustic	PolyFuser	155mm	9000g	600x1200 mm (720,000)	Mount to wall	1.05
Mycelium composite	Panel	Wave	MOGU	KITE ACOUSTIC	35-70mm	1400g	500x500 mm (250,000)	Mount to wall	0.53
PET Felt	Panel	Flat	KIREI	ECORID	107mm	2267g	584x584 mm (341,056)	Mount to wall	0.9
Raw wool+polyamid/ polyester Thermoband	Panel	Wave	SLALOM	ECORound	50mm	1129g	594x594 mm (352,836)	Mount to wall	0.55

לאחר בחינת טבלת הפתרונות המסחריים, מתברר שרוב האלמנטים משמשים כסופגים מסורתיים בעלי צורות שטוחות. עם זאת, באלמנטים 6, 9, 10 ו-12 מנסים לשלב תכונות של פיזור קול על ידי הטבעת צורות בגאומטריה שלהם ושימוש במספר חומרים. במונחים של שימוש בחומרים, ניתן להסיק כי השילוב של חומרים מתפתחים, ועמידה ביעדי קיימות הופך לאטרקטיבי יותר כיום. חברות כמו 2, 4, 10, 11, 12 מציעות אלמנטים העשויים מחומרים מורכבים כדוגמת: תפטיר, Pet Felt, המכילים לפחות 55-65% PET ממוחזר, וסיבי זכוכית, המכילים לפחות 60% חומר ממוחזר וניתנים למחזור נוסף (בכך עומדים ביעדי קיימות). למרות כל היתרונות הסביבתיים, מוצרים אלה מתמקדים בצורות וביצועים ספציפיים שלא ניתנים להתאמה אישית לחללים שונים.

בהקשר האדריכלי, Badino et al. (2020) ערכו סקירה של 19 פרויקטים בנויים הן מהפרקטיקה והן מהמחקר, שהדגימו שיטת תכנון מבוסס ביצועים (performance based design – PBD) להשגת ביצועים אקוסטיים מותאמים אישית באמצעות אלמנטים המשלבים פיזור או ספיגה או שניהם. החוקרים הגיע למסקנה שהיישום של PBD בפרספקטיבה אקוסטית מוגבל בפרקטיקה האדריכלית הנוכחית. הסיבה לכך נובעת מצורך בתהליכי ניסוי ומחקר, עיצוב מורכב, סימולציה

מסובכת ותהליכי ייצור יקרים, כל אלה מגבילים את השימוש בפרקטיקות אלה לפרויקטים בולטים בלבד. בשנים האחרונות, מחקרים שונים הוכיחו את היכולת לעצב לוחות אקוסטיים מותאמים אישית לחללים ולדרישות ביצועים ספציפיים, תוך שימוש בשיטות ייצור מגוונות כמו תבניות יציקה, CNC וחיתוך חוט להט ומעט דוגמאות להדפסת תלת-מימד (Peters & Olson 2010; Ben Koren 2017; Reinhardt et al. 2018; Rossi et al. 2021; Rust et al. 2021; Foged & Walker 2018; Foged et al. 2022; Setaki et al. 2023). עם זאת, למרות קיומו של מחקר כזה, עדיין ישנם מקרים מוגבלים שבהם ידע זה יושם בפרויקטים מעשיים בשל העלויות הגבוהות והמורכבות הקשורה לתהליכי העבודה והייצור בתכנון.

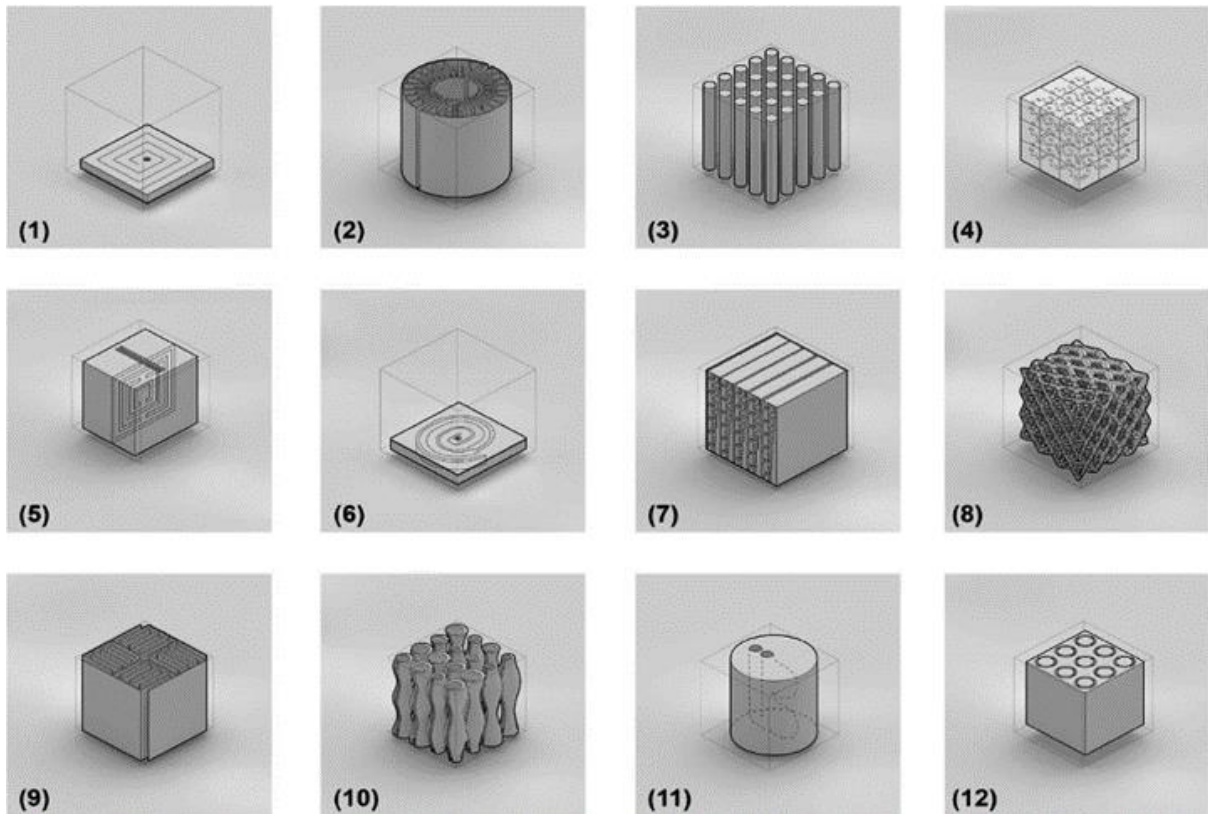
## 6.2 ביצועים אקוסטיים באדריכלות – חזית טכנולוגית

### 6.2.1 אקוסטיקה בייצור מתווסף

ייצור מתווסף (Additive Manufacturing / AM) הינה שיטת ייצור אשר בונה את האלמנט המיוצר שכבה אחר שכבה. השיטה נקראת גם הדפסת תלת-מימד. שיטה זו פתחה אפשרויות חדשות בביצועים אקוסטיים, שכן היא אפשרה אקוסטיקה משופרת ומותאמת אישית על ידי שימוש במיקרו-סטרוקטורות מודפסות (Zielinski et al. 2022). פיתוח של צורות המותאמות לספיגה וכן שימוש במיקרו-סטרוקטורות מודפסות פותח את האפשרות לפתרונות אקוסטיים חדשים הנובעים מטכנולוגיות ההדפסה. Cop et al. (2022) ערכו סקר לשיטות מיקרו-סטרוקטורות שרלוונטיות לסביבה הבנויה וכן יש להן אפשרות להתאים לקנה מידה גדול:

1. Helmholtz Resonance – מערכת המבוססת על קפיצי אוויר ומסה לקליטת קול מחלל החדר (תמונה 34, אלמנטים 2, 5, 7).
2. Coiled Channel – מבנה מפותל שהוכנס לתוך מהדהד Helmholtz כדי לאפשר תהודה קטנה יותר לשמירת קליטת קול (תמונה 34, אלמנטים 1, 6, 9, 11).
3. Periodic Scatters – אלמנטים של פיזור מאורגנים על מנת לייצר מחסום קול אשר לא מאפשר לקול לחדור מבעדו (תמונה 34, אלמנטים 3, 4, 8, 10, 12).

שיטות מיקרו-סטרוקטורה אלה מציעות יתרונות פוטנציאליים לביצועים אקוסטיים בסביבה הבנויה. אינטגרציה שלהן בהדפסת תלת-מימד תאפשר להן התאמה לקנה מידה גדול. על ידי חקירה וניצול מיקרו-סטרוקטורות שכאלה, אדריכלים ומהנדסים יכולים לקדם את התכנון וההתאמה האישית של פתרונות אקוסטיים למגוון יישומים.



תמונה 34: שיטות מיקרו-סטרוקטורה בעלות פוטנציאל לביצועים אקוסטיים בסביבה הבנויה.

מקור Cop et al. 2022

לפי Cop et al. 2022, לא נערך מחקר נרחב על השילוב והיישום של מיקרו-סטרוקטורות בסביבה הבנויה, זאת למרות הפוטנציאל המשמעותי שלהם בבקרת קול. פתרונות שזמינים כיום בשוק מתמקדים בבחירת חומרים עם מקדמי ספיגה גבוהים, ומזניחים את הפיתוח של פתרונות המבוססים על גאומטריות לפיזור או ביצועים היברידיים. פתרונות אלה מציעים ביצועים ספציפיים, אך שימוש בהם מאתגר אם עולה צורך להתאים אישית לחללים ספציפיים או לתוצאות ביצועים רצויות. לעומת זאת, השימוש בשיטות הדפסה של מיקרו-סטרוקטורות מהווה הזדמנות לשילוב מאפייני ביצועים ישירות לתוך הגאומטריה. על ידי התאמת פרמטרים גאומטריים, שיטות אלה מאפשרות התאמה אישית, שיפור ביצועי החומר ושילוב פוטנציאלי של אקוסטיקה באדריכלות (Johnston & Sharma 2021; Zielinski et al. 2022). גישה זו פותחת אפשרויות חדשות לפתרונות אקוסטיים מותאמים אישית ולביצועים רצויים.

Sekar et al. 2019 ערכו סקירה על ספיגה אקוסטית משופרת של חומרים מרוכבים על בסיס חומצה פולילקטית (PLA) וסיבים טבעיים כגון גבעולי המפ, קוקוס, יוטה וקנאף באמצעות הדפסת תלת-מימד. הם הבחינו בכך שבנוסף לתכונות המכניות המשופרות של PLA והסיבים הטבעיים, החומר המורכב יצר חללים בחוט ההדפסה, עובדה שהביאה להיווצרות נקבוביות קטנות שתרמו בצורה חיובית לביצועים אקוסטיים. גם כאן הדגישו המחקרים את החשיבות של הדפסת תלת-מימד בפיתוח לוחות אקוסטיים חדשים המשלבים סיבים טבעיים. עם זאת, היישום של הדפסת תלת-מימד לביצועים

אקוסטיים מוגבל עדיין ולא נחקר במלואו, בוודאי שלא עם חומרים מורכבים ובקנה מידה מלא. הדוגמאות המוגבלות לאלמנטים מודפסים בקנה מידה מלא מייצגות את האפשרויות האקוסטיות המתפתחות. Setaki et al. 2023 השתמשו בשיטת הדפסה שנקראת SLS לשם הדפסת אלמנט סופג קול (630x545 מ"מ) תוך שימוש בשיטת Coiled Channel, והדגימו בכך את היכולת להתאמה אישית דרך הדפסת תלת-מימד. באופן דומה, Rust et al. 2021 השתמשו בהדפסת FDM רובוטית ששונתה במעט על מנת לייצר אלמנט פיזור (585x585 מ"מ), תוך ניצול יכולת ההדפסה להתאמה אישית וייצור בקנה מידה גדול. שני המחקרים (Rust et al. 2021; Setaki et al. 2023) מייצגים את הידע הקיים בתחום הדפסת תלת-מימד. עם זאת, אף אחד מהם לא בחן פתרונות היברידיים המשלבים פיזור וספיגה דרך הדפסה.

כאשר בוחנים שיטות הדפסה, רוב הניסויים במיקרו-סטרוקטורות שנערכו בתחומי הנדסה מקבילים השתמשו בשיטות הדפסה SLS, SLA או Polyjet, על מנת להשיג הדפסה באיכות גבוהה (Zielinski et al. 2022). בשיטות אלה מועברים פרטים מורכבים המתגרים את ההדפסה בשיטת ה-FDM או בשיטות ייצור רובוטיות המיועדות לייצור אלמנטים בקנה מידה גדול. עם זאת, לשיטות הדפסה אלה יש מגבלות מבחינת גודל שטח ההדפסה, עלויות גבוהות ושימוש מוגבל בחומרים, מה שעלול לעכב את אימוצם לאלמנטים בקנה מידה גדול. Johnston & Sharma (2021) וכן Zielinski et al. (2022) ערכו ניסויים המצביעים על אפשרות להשיג מיקרו-סטרוקטורות מותאמות אישית בטכניקת FDM, אך היישום שלהן בקנה מידה גדול (אדריכלי) עוד לא נחקר.

### 6.3 עיצוב מסלול הייצור לפיזור וספיגה

השיטה העיקרית של הדפסת תלת-מימד הנהוגה כיום ידועה בשם הדפסה לינארית, שהיא קרובה יותר להדפסת ב-2.5 ממדים מאשר הדפסת תלת-מימד (Ahlers et al. 2019). בשיטה זו, המדפסת מוציאה את החומר לאורך מסלול מישורי באמצעות מנועים המזיזים את ראש ההדפסה לאורך הצירים X ו-Y, בתום הדפסת כל שכבה, ראש ההדפסה עולה מעלה בעזרת מנוע לאורך ציר ה-Z. כתוצאה מכך, שלושת המנועים בדרך כלל אינם פועלים בו-זמנית. לשיטה זו מספר ליקויים, דיוק גאומטרי מופחת עקב תנועת המנועים בצעדי מדרגה, חולשה יחסית של המודל וכן, פער ויזואלי בין העיצוב הדיגיטלי למודל המודפס (Jin et al. 2017). ואולם, שימוש באסטרטגיות שונות לתכנון נתיב הכלי (Toolpath) יכול להציע דיוק גאומטרי רב יותר, הדפסה חזקה יותר וצמצום הפער בין המודל הווירטואלי לתוצר המודפס. כל אלה נעשים בעזרת תכנון המסלול שבו יעבור ראש ההדפסה (Breseghello et al. 2021). בשנים האחרונות פותחה שיטה חדשה המכונה Curve Layer Fused Deposition – CLFD, הידועה גם בשם Jin Responsive Method – FRM (Ahlers et al. 2019; Jin et al. 2017; Molloy & Miller 2018). שיטה זו משתמשת בשכבות מעוקלות, שהן תלת-מימדיות מטבען, כדי ליצור את נתיב הכלי. הקימורים עוקבים אחר העקמומיות של פני הדגם, וכתוצאה מכך נוצרים קווים תלת-מימדיים, לא אופקיים ברובם, במקום מישוריות שכבות. למעשה, CLFD כרוך בתנועה של כל שלושת המנועים בו זמנית על מנת להדפיס את השכבה הרצויה. באופן זה הוכח כי CLFD מאפשר יצירת חלקים חזקים ונוקשים יותר בשל יצירת סיב רציף לאורך מסלול ההדפסה (Ahlers et al. 2019; Jin et al. 2017). שיטה זו פתחה פתח לשיפור הפונקציונליות של הדפסות תלת-מימד וליצירת ביטויים צורניים חלופיים מעבר לשיטה המוכרת. לדוגמה, בהקשר של ביצועים אקוסטיים, CLFD עשוי להיות עדיף מבחינה אקוסטית לביצועים המתמקדים בפיזור שכן לצורת המדרגות השפעה על האיכויות האקוסטיות, והוא מתגבר עליה (Zielinski et al. 2022). CLFD משמש גם כפלטפורמה לשיטות הדפסה אחרות על ידי יצירת מסלולי כלי מותאמים אישית, תוך שינוי מכון של נתוני ההדפסה ובדיקתם. מטרתן של שיטות אלה היא להשיג צורות ומרקמים מורכבים יותר באמצעות דחיסות חומר שונה, שיכולה להשפיע על ביצועים שונים, בכללם אקוסטיקה, הצללת שמש ותכונות תרמיות. נבחנו טכניקות ההדפסה הבאות:

1. Interwave – שזירת שתי שכבות חומר המודפסות בתלת-מימד. שכבה אחת הודפסה לינארית וללא תמיכה, ואילו השנייה כללה צבירות חומרים בנקודות נבחרות (Molloy & Miller 2018).
2. Flow Crafting – מניפולציה של זרימת החומר על מנת לקבל טקסטורות (Zboinska et al. 2022).
3. Guided fall – הדפסה מערך Z גבוה יותר על מנת לעצב את האופן שבו החומר נופל במהלך ההדפסה (Atwood 2012).
4. Error Accumulation Control – יצירת שלוחה ובחינה עד כמה אפשר להדפיס מחוץ לתחומי הבסיס ללא תמיכה במטרה להטות את החומר המודפס (Molloy & Miller 2018).

5. Pull Printing (Weaving) – כיוון התנועה הסטנדרטית של המדפסת ואקסטרוזיה (שיחול) של קו דק של חומר כדי להשיג אפקט מיתר. על ידי שליטה בתנועת הכלי בתוך שורת עמודים, המדפסת טווה לסירוגין סיבים מודפסים בתלת־מימד באמצעות עמודים דקים (Takahshi & Kim, 2019).

6. Fiber Bridging Method – הדפסה של חומר בין שתי נקודות ללא תמיכה. הטכניקה מסתמכת על הוצאת החומר בקצב ובטמפרטורה המאפשרים לו להתקרר ולהתמצק מהר מספיק כדי לגשר על הפער מבלי לצנוח או ליפול אל משטח ההדפסה (Johnston & Sharma 2021).

כל טכניקות ההדפסה הללו דורשות הגדרות מדויקות של פרמטרים להדפסה, כגון: טמפרטורת הדפסה, מהירות מאוורר, מהירות הדפסה ומהירות תזוזה, על מנת להשיג את התוצאות והתופעות הרצויות. בתחום האקוסטיקה, ניסויים חדשניים בשיטת הדפסה רגילה (לינארית) יישמו טכניקות אלה. Johnston & Sharma (2021) השתמשו בהדפסת משיכה והדפסת סיבים כדי ליצור מיקרו־סטרוקטורות המציגות ספיגה משופרת. באופן דומה, Zielinski et al. (2022) חקרו את הפוטנציאל של מינוף פגמים בתהליך ההדפסה לשיפור איכות הספיגה. בעוד ניסויים אלה הוכיחו את היכולת לשפר את הביצועים האקוסטיים, חשוב לציין שהם נערכו בקנה מידה קטן, ואף אחד מהם לא יושם בקנה מידה של אלמנטים אדריכליים.

## 6.4 סימולציה וולידציה

### 6.4.1 בדיקות אמפיריות

שיטת האימות של המודלים הווירטואליים אל מול הסטנדרטים האקוסטיים הבינלאומיים, שנקבעו על ידי ארגון התקינה הבינלאומי (ISO), נחלקת לשני תחומים עיקריים:

1. בדיקת תכונות הספיגה – צינור העכבה (Impedance Tube) הוא שיטת מדידה המשמשת להשגת מקדם הספיגה של חומר בהתאם לתקן ISO 1063402. בצינור זה מותקנים שני מיקרופונים ומערכת ניתוח תדרים דיגיטלית לקביעת מקדם בליעת הקול של החומר הנבדק (במנעד תדרי קול רגילים). ניתן ליישם את המדידה על משטחים אקוסטיים או על חומרים סופגי קול. התוצאות מספקות מידע על אחוז הספיגה על פני טווח תדרים מ-50 הרץ ועד 6.4 קילו-הרץ. תוצאות אלה משמשות לניתוח מקדם הפחתת הרעש (NRC) של החומר ולשם השוואות ביצועי ספיגה. בדיקת צינור העכבה מתבצעת בדרך כלל כשלב ראשוני בעת פיתוח המוצר מוצר או פיתוח לוח (פאנל).

2. חדר/תא הדהוד – חדר הדהוד (Reverberation Room/Chamber) נועד למדידת פיזור אקוסטי בסביבה שבה אנרגיית הקול מפוזרת באופן שווה לכל הכיוונים (Qui 2016). בניגוד לתא שאינו מהדהד, הגבולות של תא הדהוד מחזירים צליל במקום לספוג אותו. ישנם שלושה תקנים עיקריים הקשורים לשימוש בחדר הדהוד:

א. ISO 354 (קליטה): תקן זה מתייחס למדידת מקדם בליעת הקול של חומרי גמר אקוסטיים, קירות ותקרות או אזור הספיגה המקביל של חפצים.

ב. ISO 17497-1 (פיזור): תקן זה מתמקד במדידת מקדם Random-Incidence Scattering של משטח או שנגרם על ידי מרקם פני השטח. תוצאות המדידה מצביעות על כמות הקול המוחזרת ממשטח המבוסס על הפזרה אספקלרית. הרחבה של ISO 17497-2 מתייחסת למדידת מקדם הדיפוזיה של משטח מבחינת אחידות ההתפלגות הקוטבית המשתקפת.

ג. ISO 3382 (זמן הדהוד): תקן זה מתייחס למדידת זמן הדהוד בחדרים רגילים. ניתן להשתמש בתוצאות המדידה כדי לתקן מדידות אקוסטיות אחרות ולהשוות אותן לדרישות לזמן הדהוד בחדרים.

חשוב לציין כי ישנם מכשירים ידניים רבים זמינים למדידת אקוסטיקה; למרות זאת, מכשירים אלה מתמקדים בעיקר בהפחתת רעש במקום בהערכת איכות אקוסטית.

### 6.4.2 סימולציה דיגיטלית

עלייתם של כלי עיצוב חישוביים ואופטימיזציה הופכים את כלי ההדמיה האקוסטית לנגישים יותר עבור מעצבים משהיו בעבר. הדמיה אקוסטית חישובית מאפשרת למעצבים לאזן את היחסים בין צורת

האלמנט והנוחות האקוסטית שהיא מייצרת בחלל. היא מאפשרת לאמת את נתוני הביצוע המתוכנן ומפחיתה את הפסולת המופקת (Giglio, 2020). (Giglio, 2020) מתאר את השיטות העיקריות המשמשות בסימולציה אקוסטית:

1. Ray Tracing – מעקב אחר קרניים – שיטה זו יוצרת התפשטות צפופה של קרניים המשתקפות סביב החדר ונבדקות במפגש עם כדור.
2. Image-Based Tracing – איתור מבוסס תמונה – שיטה זו מחשבת תמונות של מקורות קול על גבי השתקפותם על קיר.
3. Combined Method – שיטה משולבת – שיטה זו משלבת את הפוטנציאל של מעקב אחר קרניים וגם מתבססת על תמונה להשגת תוצאות אקוסטיות מדויקות לחדר.

רוב כלי הסימולציה האקוסטיים מבוססים על שיטת מעקב אחר קרניים, ופותחו בעיקר כדי לפתור בעיות אקוסטיות הקשורות לאקוסטיקה בחדר. דוגמה אחת היא התוסף Pachyderm, המשתלב עם סביבת עיצוב חישובי Rhino-Grasshopper (Cop & Peters 2022). Pachyderm הוא כלי לסימולציה גאומטרית ומספרית של אקוסטיקה בסביבה הבנויה, תוך שימוש בשיטות מעקב אחר קרניים (ray tracing) ואחר מקור תמונה (Image-based tracing) כדי לדמות מדידות אקוסטיות בתוך חדר (Van Der Harten 2022). כלים למעקב אחר קרניים, הידועים גם כאקוסטיקה גאומטרית (GA), קול מתואר כקרניים ואינו מתחשב באופי הגל של הקול עקב אתגרים חישוביים (Peters et al. 2022). עם זאת, גם על ידי שימוש בקרניים כלים אלה יכולים לבחון ביצועים אקוסטיים בחלל (Giglio 2020). כלים קיימים המשתלבים היטב בתהליכי עבודה של עיצוב אדריכלי מבוססים על דגימת פני השטח, בעוד שכלים למיקרו־סטרוקטורות וספיגה אינם מצויים כרגע (Giglio 2020).

כדי לדמות התנהגות מדויקת של גלי קול בפיזור וספיגה, יש להשתמש בכלי דימות מקצועיים אשר נפרדים מתהליך התכנון, תוך שהם משתמשים בשיטת מחשוב בשם Finite Element Modeling – FEM. FEM היא סימולציה המתבססת על גל, זאת בשונה מ-GA, ונחשבת למדויקת יותר. גרסאות נפוצות לכלים שכאלה הן COMSOL (<https://www.comsol.com>) ו-ODEON (<https://odeon.dk>), שניהם יישומים עצמאיים שאינם משתלבים בתהליך העיצוב. אלה שיטות סימולציה אינטנסיביות מבחינה חישובית, הדורשות זמני סימולציה ארוכים, והן אינן נתמכות כרגע על ידי כל כלי סימולציה אקוסטי המשולב בתוכנת CAD.

Badino et al. (2020) סקרו 19 פרויקטים שפעלו על פי שיטות עבודה מבוססות על סביבת Rhino-Grasshopper, וכולם נאלצו לבצע סימולציית FEM מחוץ לסביבת העבודה או לפתח כלי סימולציה מותאם אישית. לדוגמה, Shetrapi et al. (2021) יצרו כלי מותאם אישית להדמיית תקן ISO 17947, אשר פישט את תהליך הסימולציה האקוסטית ובכך חסך בזמן חישוב, אם כי התוצאה הייתה פחות מדויקת. יחד עם זאת, הסימולציה סיפקה אינדיקציה טובה לכל איטרציה של העיצוב.

לסיכום, כלי הסימולציה הקיימים לאקוסטיקה המשולבים בסביבת Rhino-Grasshopper יכולים לספק תוצאות שנותנות אינדיקציה טובה לביצועים האקוסטיים בחדר בשיטת מעקב אחר

קרניים, והמבוססים על מקדם הפחתת הרעש (NRC) של משטחים מוצקים. בתוכנות CAD אחרות, כמו Revit, ישנם כלי הדמיית סאונד שיכולים להצביע על איך יתנהג הסאונד, אך מבלי לספק תוצאות מספריות רלוונטיות לאיכות אקוסטית. כלי הדמיה מדויקים דורשים שימוש בכלים מקצועיים עצמאיים שאינם משולבים לתוך זרימת העבודה של CAD ל-CAM, מה שהופך אותם לפחות מתאימים למעצבים (Peters et al. 2020). חוסר האינטגרציה בין CAD וכלי סימולציה מציב אתגר עבור מעצבים שרוצים לחקור את ההתנהגות האקוסטית של העיצוב שלהם. זאת ועוד, כלי סימולציה שתוכננו במיוחד ללימוד ההתנהגות האקוסטית של מטא-חומרים, כגון אלה הכוללים מיקרו-סטרוקטורת, אינם זמינים עבור אדריכלים, ולעתים קרובות דורשים פיתוח מותאם אישית. האופי המורכב של מטא-חומרים והתכונות האקוסטיות הייחודיות שלהם מחייבים התאמה אישית – ואלה שיטות דימות (סימולציה) שאינן נגישות כיום בתוכנת עיצוב סטנדרטיות.

## פרק 7: מתודולוגיית המחקר

מתוך סקירת החומרים המחקר יתמקד בשימוש ב PLA, Bio-PETG, PPQCF, EZ-Q כחומרים להדפסה לאלמנט הנבחר. כמקרה בוחן נבחר לפיתוח אלמנט אקוסטי בשל הקשר הישיר בין גיאומטריה וביצוע אקוסטי וכן היכולת לשפר ביצועים אקוסטיים בעזרת שיטות הדפסה. שיטת ההדפסה הנבחרת הינה הדפסה "לא-לינארית" שתאפשר יצירת מסלולי הדפסה מותאמים לביצועים אקוסטיים של ספיגה ופיזור.

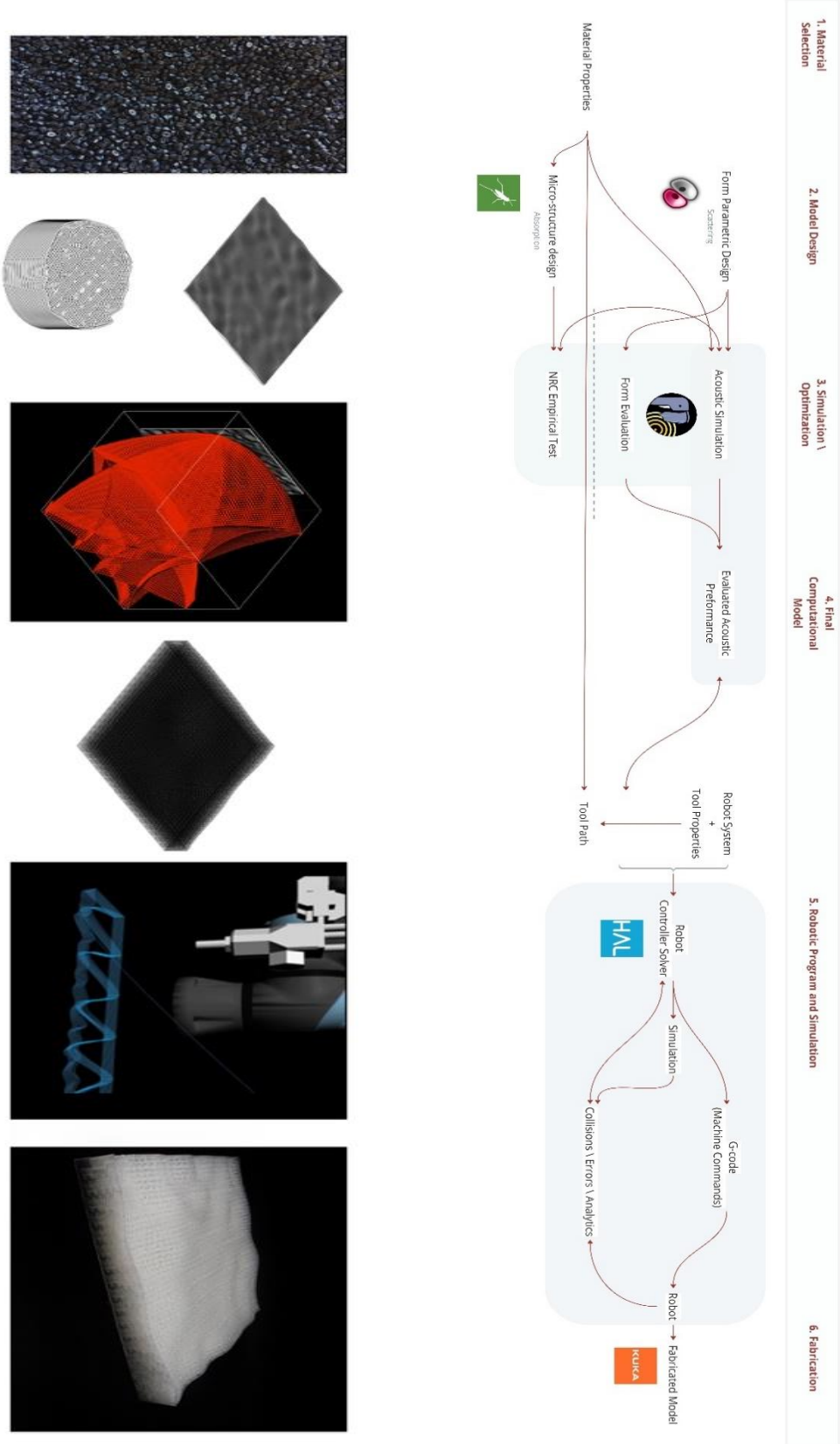
### 7.1 תהליך העבודה

מתודולוגיית המחקר המוצעת מחולקת לשלושה שלבים עיקריים:

1. יצירת מודל בסיס ומסגרת ידע תומכת רחבה הכוללת יכולת עבודה עם גאומטריות, עם חומרים ועם הגדרות הדפסת תלת מימד.
2. סימולציה בעזרת כלי הסימולציה (Pachyderm) לצורך נוחות אקוסטיות, על סמך המדידות האימפריות תוך בחינת האפשרות לשיפור נתיב הכלי ליצירת מטא-חומר המותאם לביצועים אקוסטיים אישיים.
3. הוכחה של הקונספט ואימות של הביצועים של החומר והגאומטריה בקנה מידה 1:1.

הוכחת קונספט ואימות מתודולוגיית המחקר תאפשר פיתוח סכמת עבודה ליצירת אלמנטים אקוסטיים בהדפסת תלת-מימד תוך שימוש בחומרים שונים. סכמה זו מחולקת לשישה חלקים עיקריים:

1. בחירת חומר
2. פיתוח מודל גאומטרי ללוח היברידי
3. סימולציה דיגיטלית למטרת ביצוע אקוסטי
4. יצירת מודל ייצור
5. סימולציית הדפסה ושינוי הגדרות הדפסה בהתאם לחומר וצורה
6. ייצור – הדפסה של האלמנט המתוכנן



תמונה 35: סכמת תהליך עבודה המוצעת למחקר

## 7.2 שלב ראשון

### 7.2.1 בדיקת חומרים נבחרים להדפסה בקנה מידה גדול

בדיקת החומרים נועדה לייצר גוף ידע על אודות חומרים המתאימים להדפסה בקנה מידה גדול. כפי שהוזכר, הדפסה בקנה מידה גדול שונה במעט מהדפסה במדפסת תלת-מימד שולחנית. קצב ההזנה של החומר אינו שווה לקצב התנועה של ראש ההדפסה. אמת מידה להצלחה של שלב זה תהיה הדפסה מוצלחת לכל חומר לפי חוות דעת של מומחה, שתתבסס על הקריטריונים הבאים: דיוק טוב, הידבקות טובה למיטה, ללא שיחול יתר (over extrusion) או שיחול חסר (under extrusion), והידבקות טובה של השכבות אחת לשנייה.

### 7.2.2 אפיון אלמנט לביצוע אקוסטי של פיזור

שלב זה נועד ליצירת צורה גאומטרית אקוסטית לצורכי פיזור של גלים. הצורה הגאומטרית תבוסס על מורכבות גאומטרית של גלים ועל סמך כללי אצבע ליצירת אלמנט פיזור אקוסטי הנסמכים על ידע תיאורטי. הפרמטרים של המודל יהיו שינוי מספר חתכי הגל במודל וצורת הגל של כל חתך. תכנון האלמנט יבוצע בתוסף גרסהופר (Grasshopper3D) שבתוכנת המידול התלת-מימדית ריינו (Rhino3D), אשר מאפשרת תכנון פרמטרי המקנה בחינה של מספר רב של איטרציות תוך התבססות על מידע גאומטרי פרמטרי. על מנת לאשרר את יכולת הפיזור של האלמנט, ייבנה סקריפט בגרסהופר אשר יבחן את יכולת הפיזור של כל איטרציה, על פי תקן מספר 1-17497. סקריפט זה יאפשר לדמות באופן דיגיטלי את יכולת פיזור הגלים של כל אלמנט בחלל. אלמנט שיאפשר את יכולת הפיזור המיטבית, על פי הגדרת החוקים הגאומטריים ליצירת האיטרציה, ייבחר כמודל בסיס לפיתוח של השלבים הבאים.

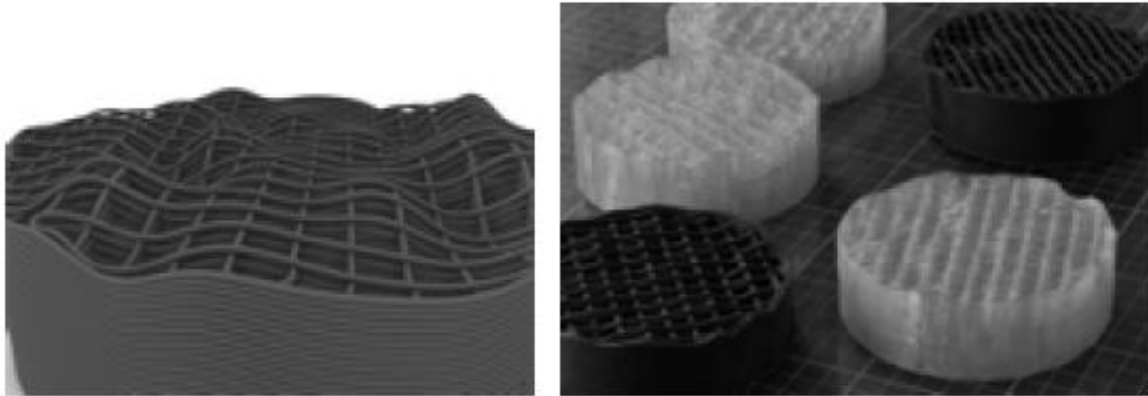
### 7.2.3 הגדרה ואפיון של גאומטריות לצורך ביצוע אקוסטי של ספיגה

שלב זה כולל מחקר והגדרת גאומטריות ספיגה עבור אלמנטים מביו-פלסטיק להדפסה בקנה מידה גדול. שלב זה ייצר שלושה קטלוגים שונים: אחד עבור חומרי הדפסה, שני עבור גאומטריות ספיגה (ומסלולי כלי תואמים) ושלישי למקדמי ספיגה המבוססים על בחירה חומרית.

#### 7.2.3.1 פיתוח (CAM) Toolpath לביצועי ספיגה

שלב זה כולל יצירת קטלוג גאומטריות ספיגה. הספרות הקיימת מעידה על כך שמיקרו-סטרוקטורות ספיגה נחקרו בעיקר במדפסות תלת-מימד בקנה מידה קטן ובהדפסה בעזרת פייה בעובי קו דק (0.4 מ"מ). לפיכך, שלב זה נועד לפתח דגם CAD של כ-20 דיסקות עגולות באמצעות גרסהופר. מודלים אלה יתבססו על שיטות ספיגה כגון לוחות מיקרו מחוררים, הדפסים מורכבים, מבני קצף, מיקרו רשתות מסובבות, חומרים סיביים מודפסים ושילוביהם.

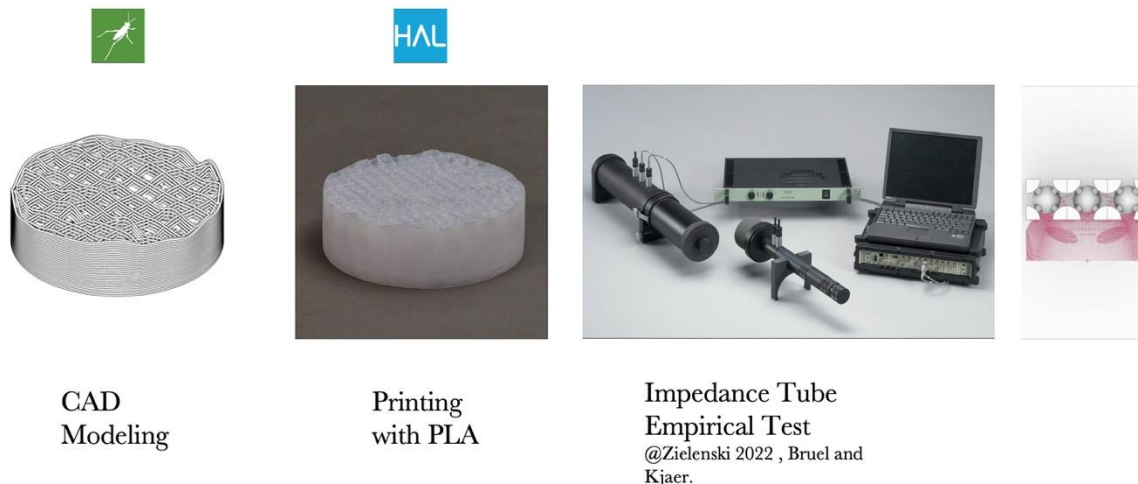
השוואה של הגאומטריות לתוצאות בדיקות של דיסקות מחומר מלא, מבחינת משקל ומקדם ספיגה, תאפשר את הבחירה מתוך עשר הגאומטריות המבטיחות ביותר כמבני יסוד לשלבי המחקר הבאים.



תמונה 36: מודל דיגיטלי של פיתוח מיקרו-סטרוקטורה (ימין), וניסיונות הדפסה בבי-פלסטיק (שמאל)

### 7.2.3.2 הדפסת דסקות ספיגה לצורך בדיקה אמפירית

שלב זה נועד לשלב חומרים נבחרים וגאומטריות מיקרו-סטרוקטורה ספיגה, פיתוח קטלוג של מקדמי ספיגה המבוססים על חומרים ומיקרו-סטרוקטורות עתאימים. הוא מתייחס להדפסה ולאינציה של חומרים שונים, המאפשרים התאמה חזקה יותר בין תכונות החומר והיתכנות של הדפסת מיקרו-סטרוקטורות. תהליך ההדפסה ישמש באסטרטגיות ההדפסה הספציפיות שפותחו עבור כל אחת מהגאומטריות בשלב הקודם. השלב מורכב משני חלקים: בניית קטלוג מקדם ביו-פלסטיק והערכת הביצועים של אלמנטים בקנה מידה אדריכלי. בחלק הראשון, כל גאומטריה של מיקרו-סטרוקטורה תודפס באמצעות החומרים הנבחרים והגדרות ההדפסה שנקבעו. התאמות למהירות המכונות, טמפרטורת ההדפסה או חלופה של אסטרטגיית ההדפסה ייעשו במידת הצורך. הדפסות מוצלחות אשר עמדו בקריטריונים שנקבעו בשלב הקודם יעברו לצורך בדיקה אמפירית. החלק הבא כולל בדיקה של הדגימות המודפסות באמצעות בדיקה אמפירית בצינור עכבה (impedance tube) כדי להעריך את מקדם הספיגה של כל חומר ומיקרו-סטרוקטורה. תוצאות אמפיריות משביעות רצון ייחשבו ככאלו שנותנות ביצוע של לפחות 50% ממקדם הספיגה של החומר המוצק וערך NRC מינימלי של 0.15. שלב זה יעמיק את ההבנה של ההשפעות החומריות על הקליטה ויאפשר השוואה של החומרים הנבחרים. לסיכום, שלב זה משמש כבסיס לשלב הבא.



תמונה 37: תהליך עבודה של הכנת דיסקות לבדיקה אמפירית, הכנת קובץ דיגיטלי, הדפסה ובדיקה בצינור עכבה

## 7.3 שלב שני

### 7.3.1 הגדרה ואפיון של מקרה בוחן (CAD)

בשלב זה יוגדר מקרה בוחן – חדר אשר נועד לטיפול אקוסטי לצורך הוכחת היתכנות של סכמת העבודה והדפסת אלמנט אקוסטי בקנה מידה 1:1. בשלב זה ישולבו תוצאות המבחנים האמפיריים של גאומטריית הספיגה, עם מודל אלמנט הפיזור, ויצרו יחד סימולציה של נוחות אקוסטית – זמן הדהוד בחדר (Reverbration Time). זמן הדהוד בחדר הינו מדד אשר מהווה תוצאה מספרית של ממוצע הזמן שלוקח לכל התדרים לרדת ב-60 דציבלים (השקטה מלאה) מרגע היווצרות הקול. תוצאה של ממוצע גדול ידועה גם בתור הפנומנה של אקו – הדהוד בחלל שאינו רצוי מבחינה אקוסטית. בהתבסס על החומר הנבחר של הלוח, תיבחר מיקרו-סטרוקטורה רלוונטית עם ה-NRC שלה לצורך הדפסת הפאנל וסימולציה. תוצאות הסימולציה ייבדקו אל מול תוצאות מומלצות מהספרות לאותו סוג חדר שיבחר, ולאחר מכן יודפס בקנה מידה 1:1.

### 7.3.2 סימולציה ואופטימיזציה של פיזור לבחירת אלמנט

המודל יעבור תחת סימולציה אקוסטית בעזרת Pechyderm כדי לקבל תוצאות RT60. בכדי לחשב את ה-NRC של המודל, המשטח יחולק לרשת של 10 x 10 ס"מ, ובהתבסס על הצורה הגאומטרית של תא הרשת, ה-NRC של התא יחולץ בהתבסס על הדיסקיות. ה-NRC הכולל של הדגם יהיה הממוצע של נתוני ה-NRC, ויוזן לתוך Pachyderm. כל איטרציה תשווה לתוצאה של החדר ללא

הפאנל. בהתבסס על תוצאות הסביבה שנבחרה, האיטרציה שעבורה יתקבל ערך המינימום RT60 ISO 3382 (זמן הדהוד), תיבחר כדגם בסיס.

### **7.3.3 פיתוח נתיב כלי לביצוע ספיגה ופיזור**

בהתבסס על המודל הנבחר, על המיקרו־סטרוקטורה הרלוונטית ועל אסטרטגיית פיזור החומר, תחולץ טכניקת ההדפסה משלב קודם ליצירת מודל ההדפסה לביצוע ספיגה. בשלב זה, יילקחו בחשבון הפרמטרים של ההדפסה וההתנהגות החומרית על בסיס הידע שפותח משלבים קודמים, ואלה יותאמו לקנה המידה של הפאנל הנוכחי.

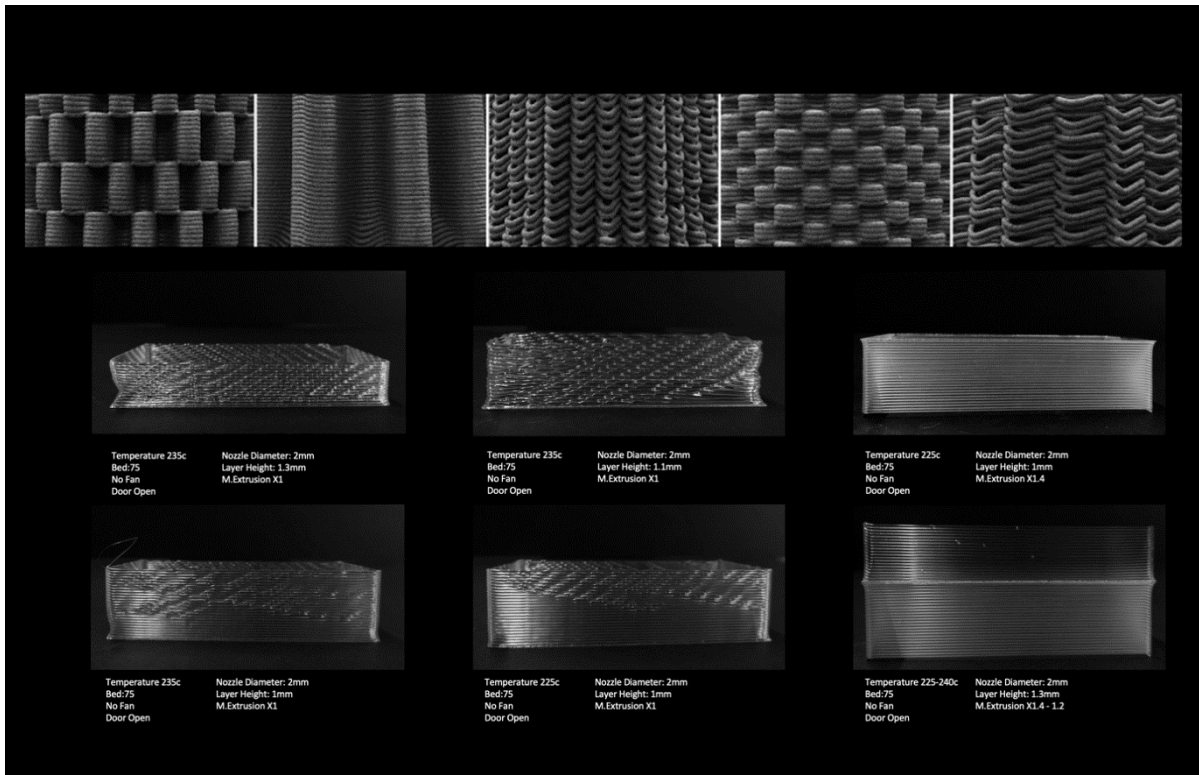
### **7.4 שלב שלישי – הדפסת האלמנט**

לאחר בחירת החומר לדגם המיועד להדפסה בתלת־מימד, פרמטרי ההדפסה יחולצו מהשלב הראשון ובהתאם תבוצע התאמה למהלך ההדפסה. אם יחול כשל בהדפסה, יבוצעו התאמות בפרמטרי ההדפסה או במודל הייצור עד השגת הצלחה. שלב זה מתאר הוכחת היתכנות של תכנון תהליך העבודה לקראת ביצועים אקוסטיים עם חומרים ביו־פלסטיים. הצלחת שלב זה תיחשב כהוכחה לכך שניתן להתאים אישית פתרונות אקוסטיים בהדפסה בקנה מידה גדול עם חומרים נחותים כגון ביו־פלסטיק.

## פרק 8: המחקר ותוצאותיו

### 8.1 בדיקת חומרים נבחרים להדפסה בקנה מידה גדול

לאחר בחירת החומרים הפוטנציאליים למחקר, כל חומר הודפס בעזרת מדפסת בקנה מידה גדול אשר נתוניה המכאניים הינם זהים להדפסות בקנה מידה גדול, בדומה להדפסה רובוטית, על מנת לזהות את הגדרות ההדפסה הרלוונטיות. אשר כוללות: טמפרטורת הדפסה, טמפרטורת מיטה, פקטור אקסטרוזיה, מהירות הזנה, מהירות הדפסה, מהירות ריצה, אוורור והאם שומש אמצעי עגינה למיטה – חציית (הדפסה של מספר שכבות אופקיות בשכבה הראשונה על מנת לעגן את המודל אל מיטת המדפסת). כמו כן נבחנו תוצאות ההדפסה מבחינת הדבקת שכבות, התנהגות חומרים בתצורות שונות (קווים ישרים או מעוקלים אשר משפיעים על אופן הדפסת החומר), טקסטורה ושקיפות. מטרתו של שלב זה, מלבד זיהוי הגדרות הדפסה נכונות לכל חומר, הייתה הבנה של ההתנהגות החומרית, וזאת על מנת שמודל הייצור יוכל להשתנות בהתאם להתנהגות ולהבטיח הצלחת הדפסה.

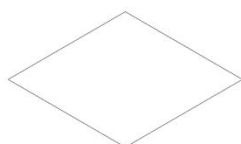


תמונה 38: דוגמאות להתנסויות חומריות תוך שינוי בפרמטרים של הדפסה ב-Bio-PETG ובחומר ppqcf

לאחר בחינת החומרים הוחלט להמשיך עם החומרים Bio-PETG כחומר שקוף ו-EZ-Q כחומר אטום, אשר תוצאות ההדפסה שלהם היו מוצלחות, ולכן יש להם פוטנציאל לפיתוח גאומטריות מורכבות. PLA, בעל תכונות ההדפסה הקלות, יהווה כחומר רפרנס לפיתוח בעזרת החומרים הנזכרים.

## 8.2 פיתוח אלמנט פיזור ב־CAD

בשלב זה פותח סקריפט אשר ייצור אלמנט פיזור אקוסטי. הצורה הגאומטרית תבוסס על מורכבות גאומטרית של גלים, ועל סמך כללי אצבע ליצירת אלמנט פיזור כפי שנזכר קודם. בשיטה זו הוגדר מלבן שחולק לשני צירים אשר מהווים פלטפורמה לפיתוח חתך גלי. לאחר יצירה של מספר חתכים גליים נוצר משטח גלי לא אחיד, אשר מהווה בסיס לאלמנט הפיזור (תמונה 39).



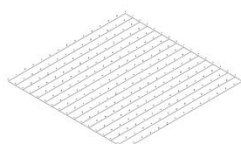
1. Define size of panel



2. Amount of X lines



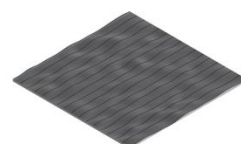
3. Amount of Y points



4. Change Z value



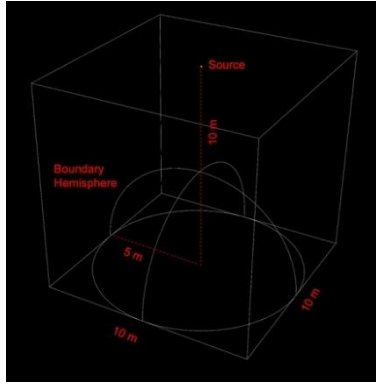
5. Connect to wave based curves



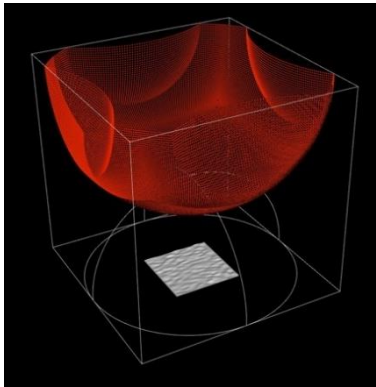
6. Generate wavy surface from curves

תמונה 39: פיתוח מודל דיגיטלי פרמטרי אשר מהווה בסיס לאלמנט פיזור

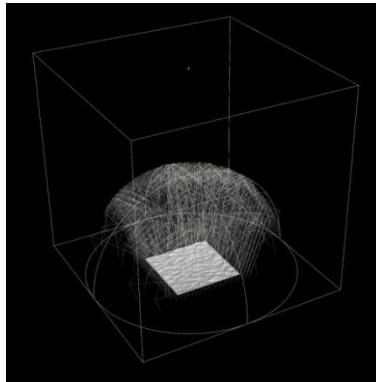
לאחר יצירת סקריפט פרמטרי אשר מייצר אלמנט פיזור, פותח סקריפט אשר תפקידו לעשות סימולציית בדיקה לאלמנטים של הפיזור. הסימולציה התבססה על פי תקן 1-17497, שתפקידו לבדוק את שטח הכיסוי של גלים מוחזרים מאלמנט. כדי לייצר זאת ובדומה לבדיקה הפיזית, הוגדר חלל שגודלו 10x10 מ' וגובהו 10 מ'. במרכז תחתית החלל מוצב האלמנט, כיפה שקוטרה 5 מטר מוצבת מסביב (תמונה 40) (במציאות זוהי רשת של מיקרופונים) אשר מטרתה להבחין בגלי קול המוחזרים מהאלמנט. מקור הקול מוצב 10 מטר מעל לאלמנט על מנת להתייחס גם לתדרים נמוכים, שכן הם בעלי גלים ארוכים (תמונה 41). בעת הבדיקה מתפזרים גלי קול בחלל הבדיקה, והסקריפט מחשב את שטח הפיזור של הגלים לאחר פגיעה אחת בפאנל (החזרה ראשונה, תמונה 42). שטח פיזור הגלים על הכיפה מאפשר לתת אינדיקציה ליכולת הפיזור של גלי הקול באלמנט זה.



תמונה 40 : הגדרת חלל לצורכי בדיקת פיזור על סמך תקן 17497-1

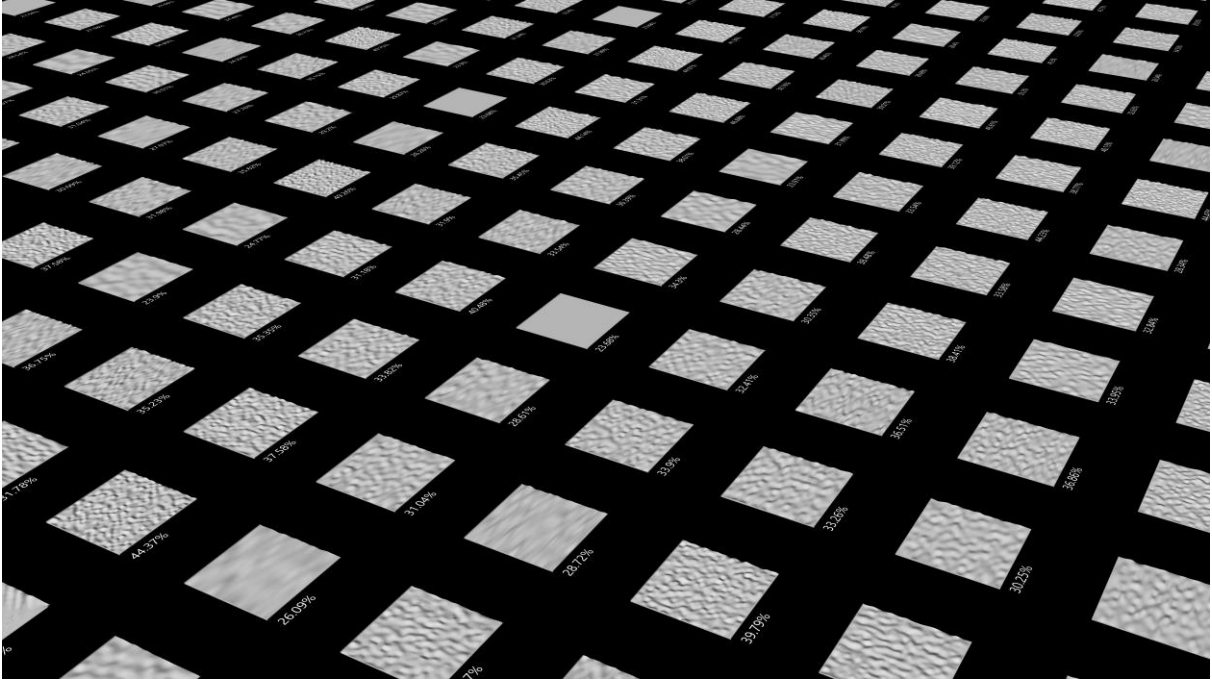


תמונה 41 : פיזור הקול בחלל הבדיקה והצבת האלמנט לבדיקה



תמונה 42 : שטח כיסוי של הגלים המוחזרים מאלמנט הפיזור

לאור העובדה כי תהליך זה נעשה בגרסההופר, תוכנת מחשוב פרמטרית, בוצעה בדיקה של אלף איטרציות (תמונה 43). הבדיקה שתוצאותיה הראו את שטח הכיסוי הגבוה ביותר נבחרה להוות המשך לפיתוח.



תמונה 43 : איטרציות של אלמנטי פיזור אקוסטיים ותוצאות שטח הפיזור שלהן

בשלב זה, על מנת להבין את היתכנות ההדפסה במיכון הקיים במעבדה, הודפס מקטע של אלמנט הפיזור. מטרת ההדפסה הייתה להבין האם יש מגבלות גאומטריות שהמדפסת אינה יכולה לבצע ואת המורכבות הצורנית של אלמנט הפיזור.

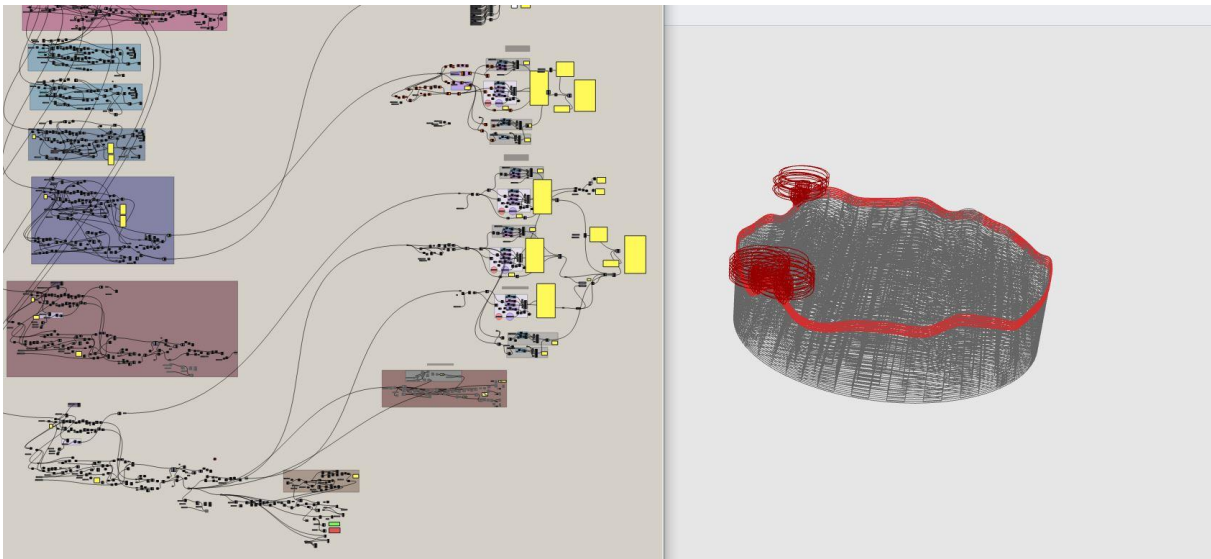


תמונה 44 : ניסיון הדפסת אלמנט פיזור מ-PLA בקנה מידה גדול

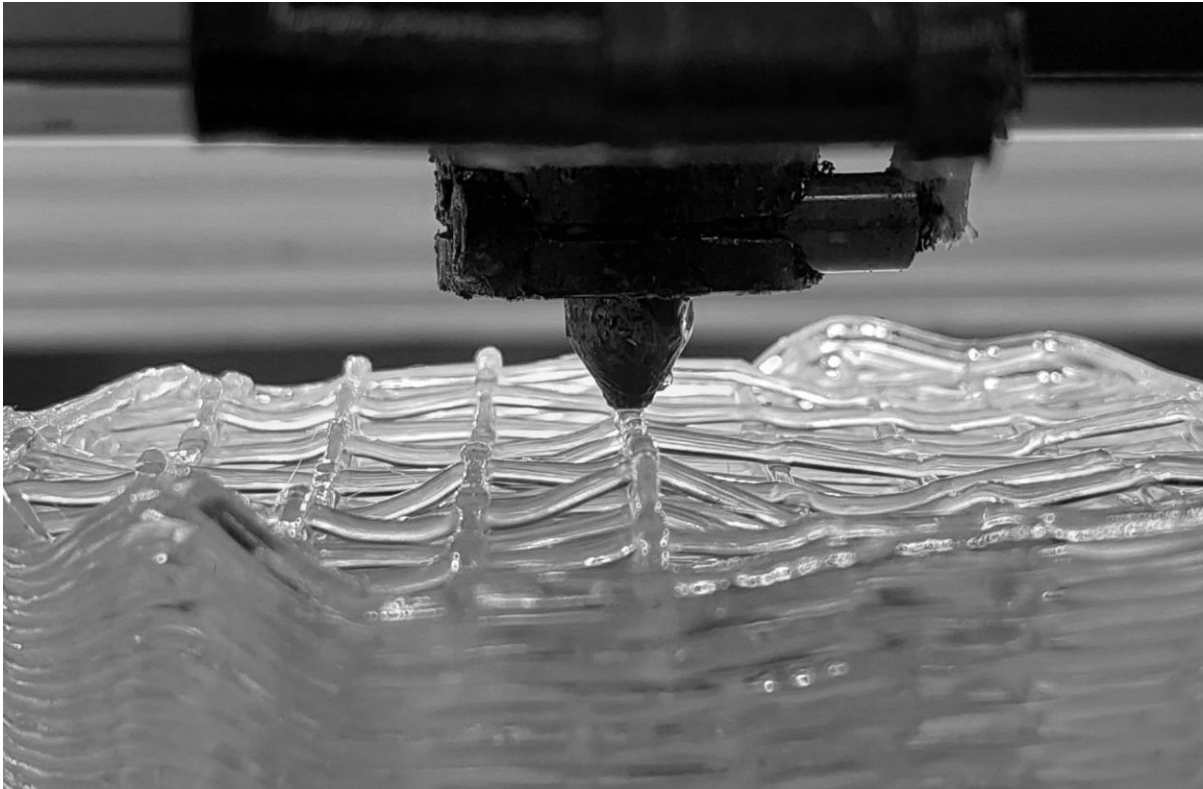
### 8.3 פיתוח גאומטריות לספיגה

בעוד שבשלב הקודם המחקר התמקד בפיתוח גאומטריה לצורך פיזור, בשלב זה ההתמקדות הייתה בפיתוח מיקרו-סטרוקטורה שתהווה אינפיל וכן תעניק יכולות ספיגה גבוהות יותר לחומרים הפלסטיים. מרבית המחקרים המתמקדים בפיתוח מיקרו-סטרוקטורה לצורכי ספיגה נעשו במדפסות בעלות

רזולוציה גבוהה מאוד ולא נבדקו בקנה מידה אדריכלי גדול יותר. לצורך כך, המחקר התמקד בשתי אסטרטגיות הדפסה שנלקחו מן הספרות, שהן בעלות הפוטנציאל הגדול ביותר לשילוב בהדפסה בקנה מידה גדול: האחת של Johnstow & Sharma אשר מתבססת על שינוי סדר אינפיל בעת הדפסה; והשנייה שילוב של Johnstow & Sharma ושל Zielinski method, אשר מתבססת על טעויות בהדפסה והזחות לצורך יצירת מורכבות וחללים לא מתוכננים. העובדה שמחקרים אלה התבססו על הדפסה לינארית היוותה מכשול בפיתוח אלמנט המשלב ספיגה ופיזור. בעת הדפסה לינארית של אלמנט בעל תכונה גאומטרית גלית, נוצרת תופעת ה־stair-stepping עקב אופן פעולת ההדפסה אשר פוגעת ביכולת הפיזור של האלמנט. אי לכך, פותחה אסטרטגיה שלישית לצורך מחקר זה, אשר מאחדת את האסטרטגיות הקודמות עם שיטת הדפסה לא לינארית. לצורך כך פותח מנגנון הדפסה אשר מאפשר הדפסת מיקרו־סטרוקטורה באופן לא לינארי תוך כדי הימנעות מהיתקלות מכאנית (mechanical collision) ויצירת מורכבות גאומטרית רצויה (תמונה 45). על פיתוח של אסטרטגיה זו ניתן לקרוא בהרחבה במאמר Integrating Large Scale Additive Manufacturing and Bioplastic Compounds for Architectural Acoustics Performance, Cohen & Barath 2023.



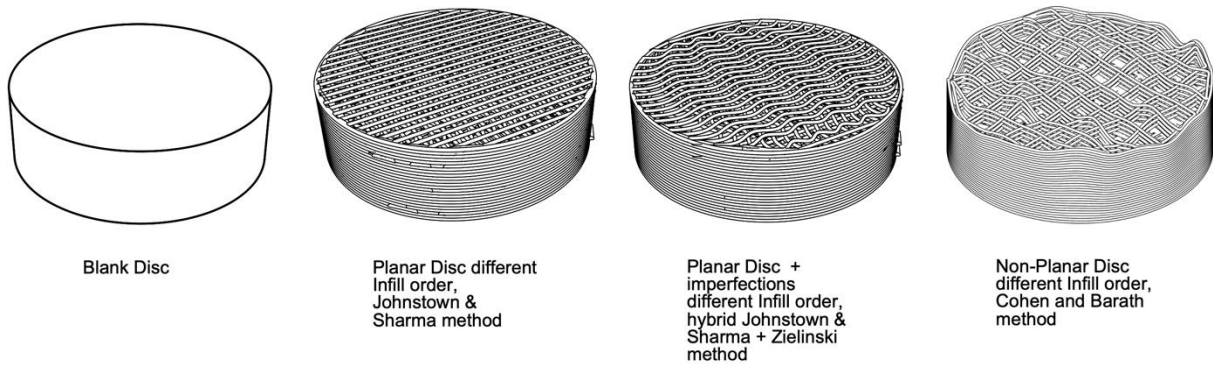
תמונה 45 : סקריפט ליצירת מיקרו־סטרוקטורה לא לינארית תוך כדי בדיקה של היתכנות ההדפסה והימנעות מהתנגשויות בהתאם למכניקה של המדפסת



תמונה 46 : ניסיון הדפסת מיקרו־סטרוקטורה לא לינארית

### 8.3.1 מבחנים אמפיריים לגאומטריות לספיגה

על מנת לבדוק את היתכנות הדפסת מיקרו־סטרוקטורות בהדפסה בקנה מידה גדול והבנת ההשפעה שלהן על מקדמי הספיגה, נבחנו שלוש אסטרטגיות ההדפסה שהוזכרו לעיל, וכן דיסקה מלאה של חומר שהיוותה רפרנס (תמונה 47). בדיקת הדיסקות אל מול דיסקה מלאה מאפשרת הבנה של חיסכון בחומר (ומשקל) וכן הבנה האם המיקרו־סטרוקטורה שיפרה את מקדם הספיגה של החומר. כל אסטרטגיה של מיקרו־סטרוקטורה מלבד הדיסקה המלאה פותחה בכמה צפיפויות שונות, על מנת להבין את ההשפעה של כמות החומר וגודל הפתחים. כמו כן, הדפסה של אותן דיסקות מסוג שונה של חומר איפשרה הבנה של השפעת החומר עצמו.

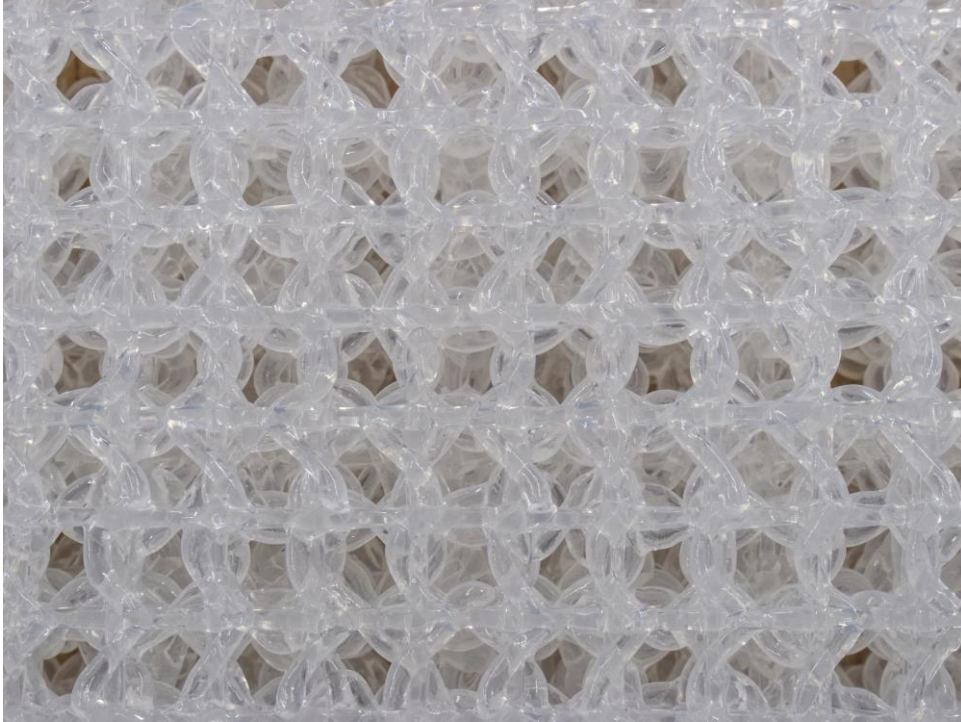


תמונה 47: הגדרת אסטרטגיות מיקרו-סטרוקטורה שנבחרו למחקר

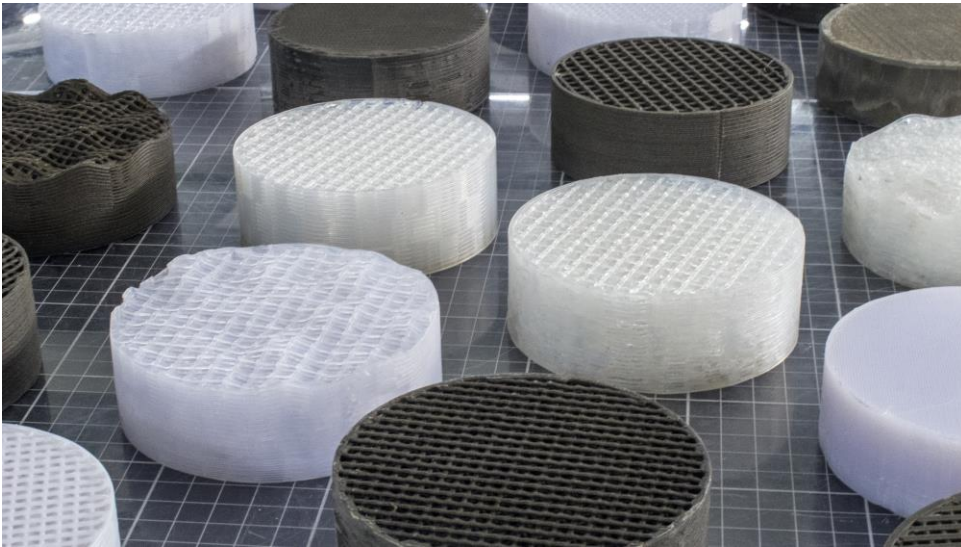
המיקרו-סטרוקטורות הודפסו בשני גדלי דיסקות בהתאם למבחן האמפירי של *impadence* tube – בקוטר של כ-99 מ"מ לתדרים נמוכים ובקוטר של 29 מ"מ לתדרים גבוהים. עקב השינוי בגודל הדיסקות ובהתנהגות החומרית, בוצע מעקב סיסטמתי על הגדרות ההדפסה הכוללות טמפרטורת הדפסה, טמפרטורת מיטה, מהירות הזנה, מהירות הדפסה והנתונים הפיזיים של ההדפסה: משקל וזמן הדפסה. מעקב זה מאפשר לשחזר נתונים בעת ההדפסה של האלמנט עצמו, וכן לאפשר הבנה מעמיקה לגבי זמני ייצור והבדלים בחומר (טבלה מס' 3).

טבלה מס' 3 – מעקב אחר נתוני הדפסה של כל אחד מהחומרים ואסטרטגיית מיקרו-סטרוקטורה

Run Number	File Name	Material	Printing Temp	Bed Temp	Part 1	Part 2	Bed Closed	Feed Rate	Extrusion Mul	Flow	Start	Printing Speed	Travel speed	Layer Height	MM distance	Shell det	Success Value	Notes
KNOWN UNKNOWN BASED ON PREVIOUS TESTS																		
1	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	2.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	Minimum wall distance in the end of each topology there is a white unattached material. the model are to list top wall distance
2	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3	תלם	YES	500	1600	1.2	6	0.75	Success	
3	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	5	תלם	YES	500	1600	1.2	8	0.75	Success	
4	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	5	תלם	YES	500	1600	1.2	10	0.75	Success	
5																		
CHANGES IN YELLOW																		
MM2 TESTS 2024																		
1	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no additional bed 2. printing continued
2	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
3	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	6	0.75	Success	1. no bed additional
4	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	8	0.75	Success	1. no bed additional
5	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	8	0.75	Success	1. no bed additional
6	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	8	0.75	Success	1. no bed additional
7	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	8	0.75	Success	1. no bed additional
8	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	8	0.75	Success	1. no bed additional
MM2 TESTS 2024																		
1	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
2	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
3	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
4	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
5	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
6	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
7	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
8	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
MM2 TESTS 2024																		
1	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
2	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
3	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
4	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
5	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
6	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
7	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional
8	1201016	EM2	210	210	תלם	תלם	תלם	4	3.5	תלם	YES	500	1600	1.2	4	0.75	Success	1. no bed additional



תמונה 48: תקריב של מיקרו-סטרוקטורה מ-Bio-PETG

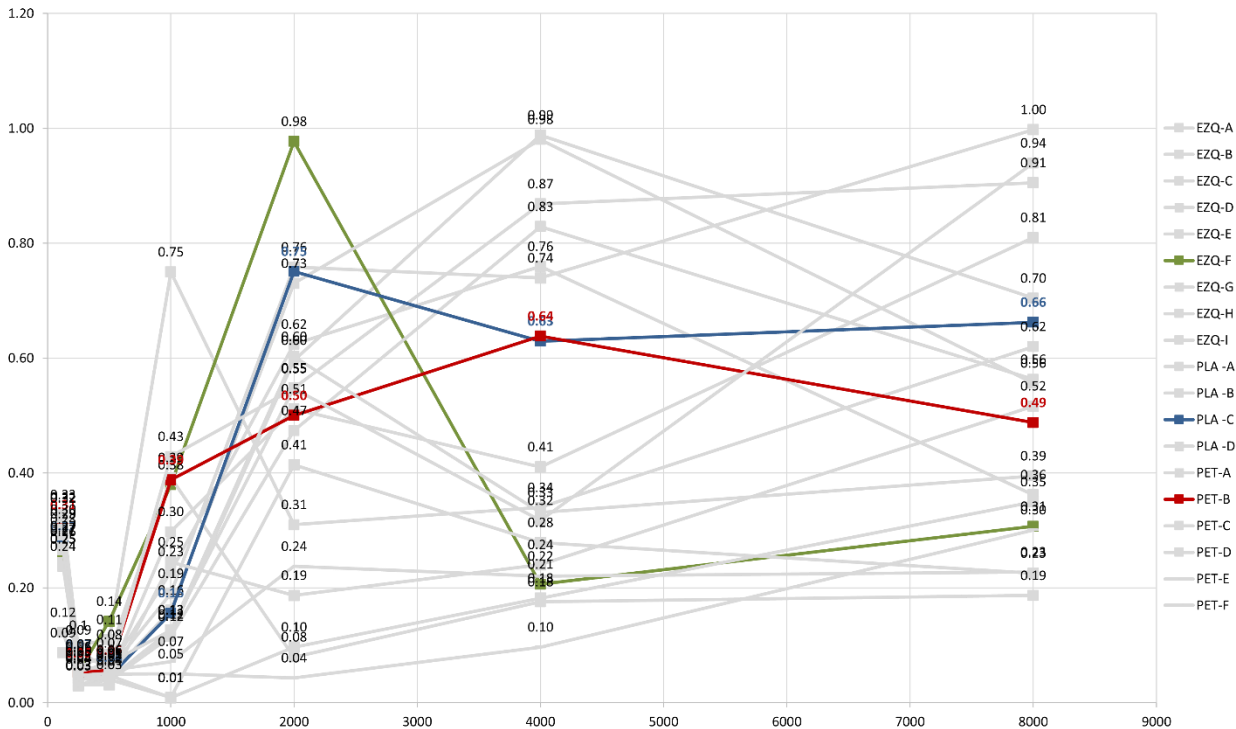


תמונה 49: הדפסה של דיסקות למבחנים אמפיריים מהחומרים הנבחרים: EZ-Q, Bio-PETG, PLA

לאחר ההדפסה, נבחרו 20 דיסקות אשר נשלחו למבחן אמפירי במכון מ.ג. אקוסטיקה על מנת לקבל תוצאה של מקדם הספיגה. כל דיסקה נבחנה פעמיים, פעם אחת צמודה (הדמיה להתקנת אלמנט צמוד קיר) ופעם אחת עם מרווח של 5 ס"מ (הדמיה להתקנת אלמנט אשר תלוי על מערכת ומרחקו מהקיר כ-5 ס"מ), בדומה לאלמנטים קיימים וכמקובל בשוק.

לאחר קבלת התוצאות נוכחנו לדעת כי ישנן מיקרו סטרוקטורות בשילוב חומר אשר תוצאות ה-NRC שלהן הגיעו ל-0.4, תוצאה שעולה בקנה אחד עם חלק מוצרים הקיימים בתעשייה (תמונה

מס' 50). כמו כן החומר EZ-Q הראה תוצאות יותר טובות משאר החומרים, וניתן להעריך כי הסיבה לכך היא חוסר ההומוגניות של החומר אשר תורמת לביצוע של החומר. יש לציין כי מקדם הספיגה 0.4 הגבוה ביותר שקיבלנו אינו תוצאה מספקת באופן אקוסטי, שכן הבדיקה נועדה לבדוק את היתכנות ההדפסה והספיגה של מיקרו-סטרוקטורה בהדפסה בקנה מידה גדול. עוד יש לציין כי מקדם ספיגה גבוה אינו מבטיח אקוסטיקה טובה בחלל, וזהו רק עוד מדד וכלי על מנת לקבל אינדיקציה לטיפול אקוסטי בחלל.



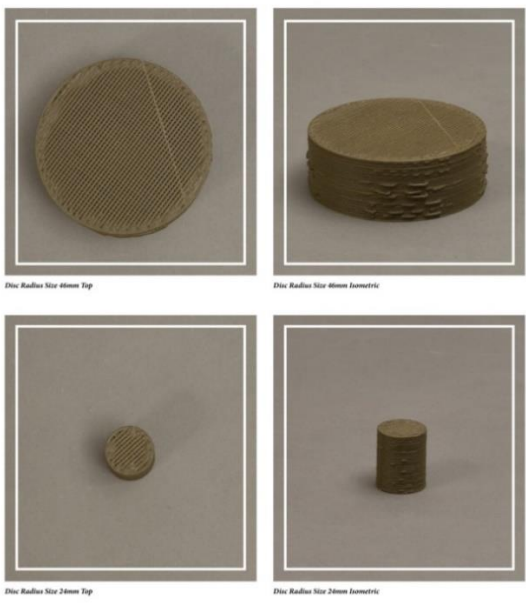
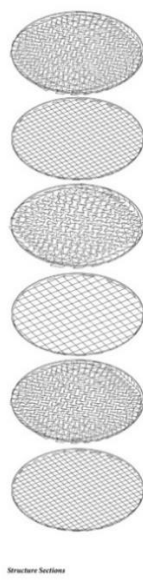
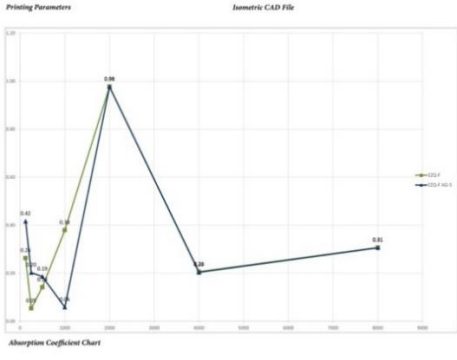
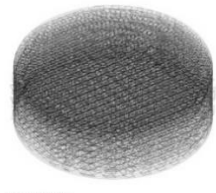
תמונה 50 : גרף משולב של מקדמי הספיגה בהתאם לתדרים של הדיסקות שנבחנו

לשם מיקוד הדיון כאן נבחר להתמקד בשלוש וריאציות של מיקרו-סטרוקטורות, ונציג אותן בהמשך. הרחבה של כלל התוצאות עבור כל דיסקה ניתן למצוא בנספחים. בנוסף, מהסתכלות על שלוש הדיסקות הנבחרות עולים שני דברים עיקריים מעניינים, אשר יכולים לתרום להבנה ופיתוח של טיפול אקוסטי בחלל.

1. הגרפים המציגים "פסגות" – משמעם כי מתרחשת ספיגה גבוהה משמעותית בטווח תדרים מסוים לעומת שאר התדרים, דבר זה יכול לבוא לידי ביטוי בטיפול ספציפי בתדרים/קסטומיזציה של ספיגה לטווח תדרים מסוים בעת טיפול אקוסטי.
2. במקרים שונים, בטווח תדרי הדיבור מקדם הספיגה נמוך – משמע גלי הקול של דיבור בני אדם ינועו בחלל יותר בחופשיות כי האלמנט אינו יספוג אותם.

### EZQ F- Planar ZigZag 462

Type		Planar/ZigZag	
Material	EZQ		
Infill	6, 4, 2		
Nozzle	1.5		
Disk Radius Size	46 mm	24 mm	
Printing Temp.	200	190	
Bed Temp.	60	60	
Flow	75	70	
Printing Speed	18	18	
Weight	187g	17g	
Printing Time	120 min	22 min	
<b>Avg. NRC: 0.4</b>			

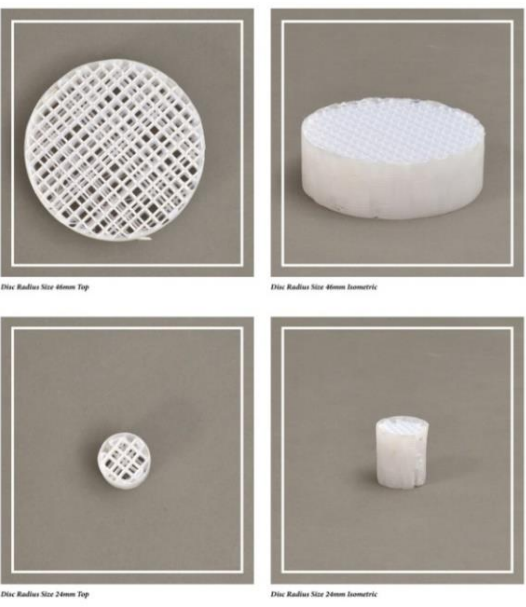
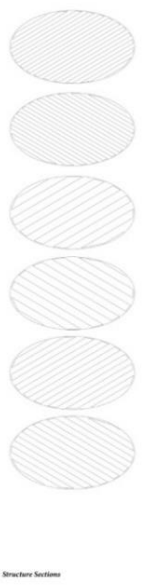
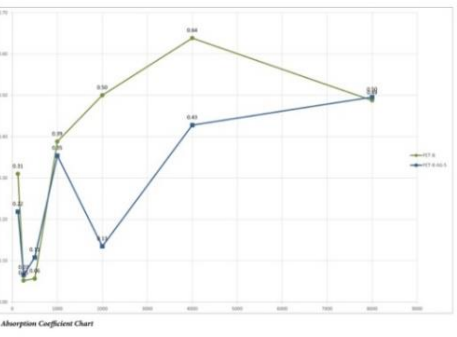
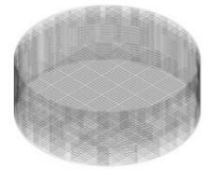


תמונה 51: דיסקה מחומר EZ-Q בעלת צפיפות משתנה של: 2, 4, 6 מ"מ, ומקדם ספיגה 0.4

ניתן לראות בגרף המציג את מקדם הספיגה כי יש "פסגה" בטווח תדרים מסוים וכן מקדם ספיגה נמוך בטווח תדרי הדיבור.

### PET B- Planar 684

Type		Planar Jones	
Material	PETG		
Infill	6, 4, 2		
Nozzle	1.5		
Disk Radius Size	46 mm	24 mm	
Printing Temp.	230	230	
Bed Temp.	75	75	
Flow	55	55	
Printing Speed	20	20	
Weight	91g	10g	
Printing Time	85 min	11 min	
<b>Avg. NRC: 0.25</b>			



תמונה 52: דיסקה מחומר Bio-PETG בעלת צפיפות משתנה של 2, 4, 6, 8 מ"מ, ומקדם ספיגה 0.25.

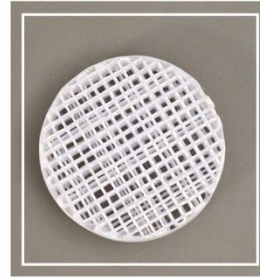
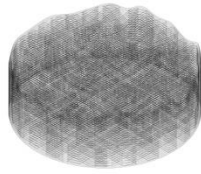
ניתן לראות כי פתחים גדולים יותר בקצה הדיסקה מאפשרים ספיגה גדולה יותר של תדרים גבוהים.

## PLA C- Non-Planar 684

Type	Non Planar	
Material	PLA	
Infill	6, 8, 4	
Nozzle	1.5	
Disk Radius Size	46 mm	24 mm
Printing Temp	200	190
Bed Temp	60	60
Flow	85	70
Printing Speed	25	20
Weight	120g	14g
Printing Time	100 min	17 min
Avg. NRC: 0.25		

Printing Parameters

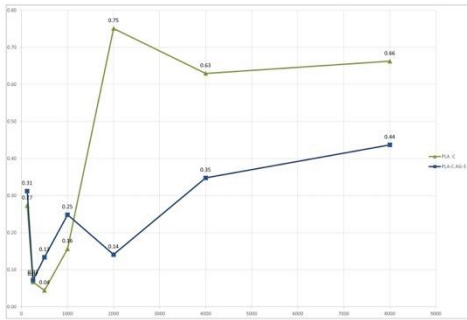
Isometric CAD File



Disk Radius Size 46mm Top

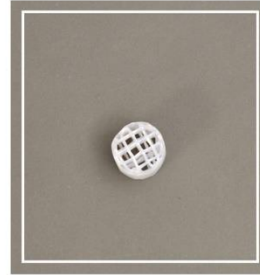


Disk Radius Size 46mm Isometric



Absorption Coefficient Chart

Structure Sections



Disk Radius Size 24mm Top



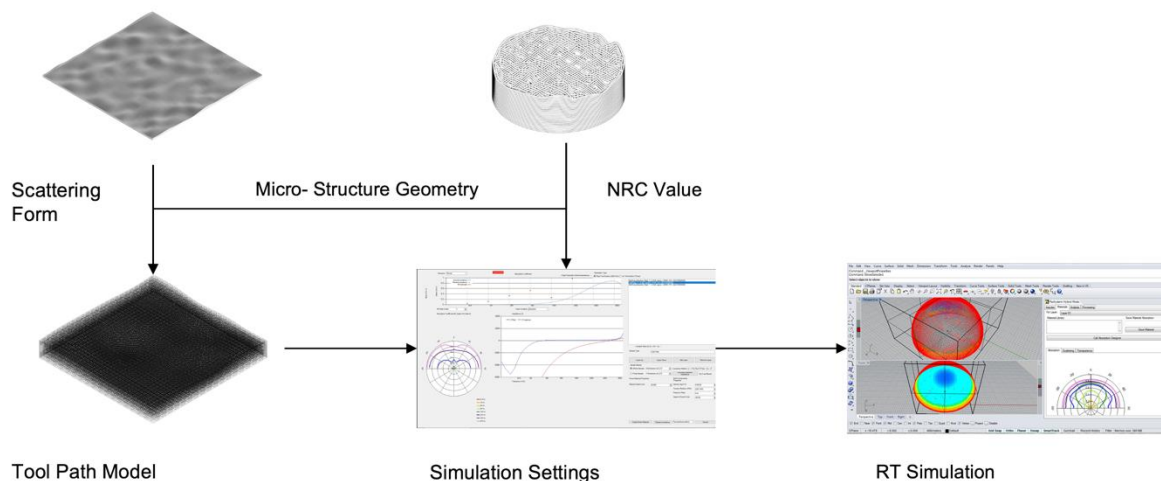
Disk Radius Size 24mm Isometric

תמונה 53 : דיסקה מחומר PLA בעלת צפיפות משתנה של 4, 6, 8 מ"מ, ומקדם ספיגה 0.25

ניתן לראות את השוני הגדול במקדם ספיגה בעת שינוי שיטת ההתקנה (צמוד קיר או במרווח מהקיר). תוצאות שלב זה מראות כי הדפסה של מיקרו-סטרוקטורות בקנה מידה גדול משפרת את מקדם הספיגה של הפלסטיק הנבחר. בעקבות כך, קיים פוטנציאל להמשך פיתוח של שיטות למיקרו-סטרוקטורה אשר ישפרו את הערך האקוסטי של מקדם הספיגה ויאפשרו אדפטציה למבנים בקנה מידה אדריכלי.

## 8.4 סימולציה דיגיטלית לנוחות אקוסטית

לאחר שני השלבים הראשונים – בחירת אלמנט פיזור בשלב הראשון ובדיקה של אסטרטגיית מיקרו-סטרוקטורה והבנת מקדם הספיגה שלה בשלב שני – מטרת השלב השלישי היא לאחד את שתי אסטרטגיות הטיפול האקוסטי לכדי אלמנט היברידי אחד, וכן לבדוק את הנוחות האקוסטית שהוא מייצר על פי מדד RT60. כדי לעשות זאת תחילה נלקחה גאומטריית הפיזור ואוכלסה באסטרטגיית המיקרו-סטרוקטורה שנבחרה מתוך השלב השני. כעת מודל הפיזור מאוכלס במיקרו-סטרוקטורה אשר מהווה אינפיל ומאכלסת את הגאומטריה. בשלב זה מתקבלת בפעם הראשונה למעשה תצורה היברידית של הפתרון האקוסטי המשלבת ספיגה ופיזור באלמנט אחד. את המודל הזה מעבירים בתוכנת הסימולציה pachyderm בגרסה הפור. כדי שהסימולציה תצליח לתת אינדיקציה לתוצאות ההדהוד, היא אמורה לקבל קלט של מקדם הספיגה של החומר הנבחר. לשם כך יוזן מקדם הספיגה מתוצאות השלב השני של המיקרו-סטרוקטורה הנבחרת. ניתן לראות את תרשים הזרימה של מהלך העבודה לצורך הסימולציה בתמונה 54.



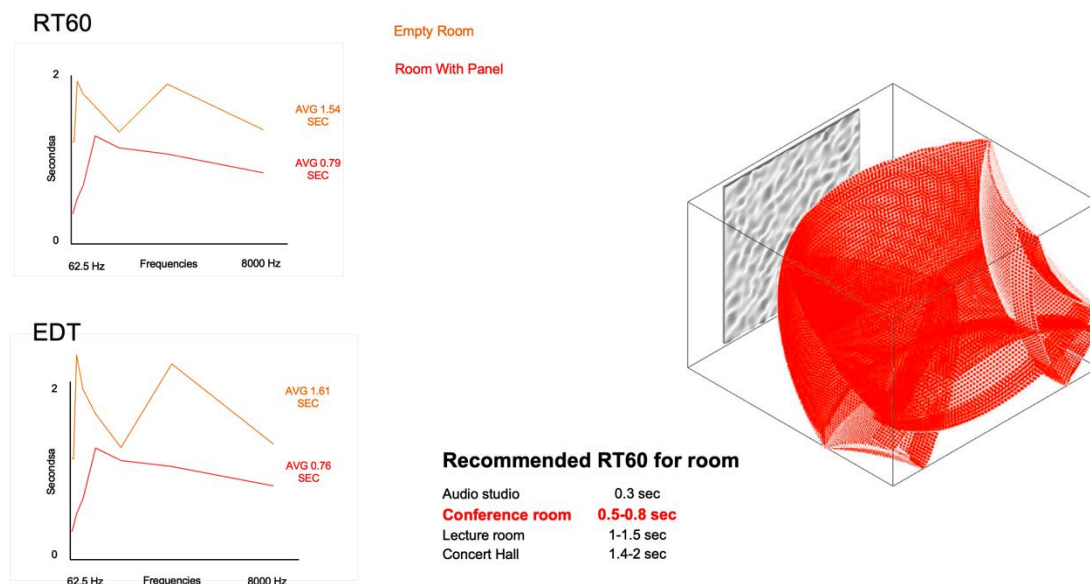
תמונה 54 : תרשים זרימה של מהלך עבודה של הכנת קובץ לסימולציה נוחות אקוסטית של אלמנט היברידי כעת, כדי לקבל מדד אינדיקטיבי ליכולת האלמנט ההיברידי, נבחר להציבו בחלל מקרה בוחן במימדים של חדר שגודלו 55 מ' וגובהו 3 מ'. הגדרת החומרים לקירות ורצפת החדר הונחו כחדר סטנדרטי מבטון ומקדם הספיגה שלהם נלקח מן הספרות. כדי להבין את השפעת האלמנט, תחילה רצה הסימולציה על חדר ריק. תוצאת הסימולציה של חדר ריק הראתה כי זמן הדהוד ממוצע של כל התדרים בין 50 ל-8,000 הרץ הוא 1.54 שניות. על פי הספרות זמן הדהוד מקובל לחדר מסוג זה נע בטווח 0.8–0.5 שניות – משמע ללא טיפול אקוסטי חדר זה מהדהד וקיים בתוכו אקו.

לצורך האלמנט עצמו נבחרה מיקרו־הסטרוקטורה שערך מקדם הספיגה שלה הוא 0.25 ולא התוצאה הגבוהה ביותר שקיבלנו בשלב השני. להצבה של מיקרו־סטרוקטורה זו שתי סיבות עיקריות:

1. כמות החומר הנדרשת להדפסה של אלמנט בקנה מידה 1:1.
2. בדיקה האם מקדם ספיגה שאינו גבוה אך שאנו יודעים את תכונותיו האקוסטיות יוכל לתת תוצאה מספקת לנוחות אקוסטית בשילוב עם גאומטריית פיזור.

הצבת האלמנט ההיברידי ותכונותיו הביאו לתוצאה ממוצעת של 0.79 שנייה – משמע האלמנט השפיע על האיכות האקוסטית בחדר ואף עומד בזמן ההדהוד המקובל. בהסתכלות על גרף RT60 בתמונה 55 רואים את ההבדל בהתנהגות התדרים בחדר עם אלמנט אקוסטי וללא. כמו כן, ניתן להבחין בשני דברים מעניינים נוספים:

1. תדרי הדיבור בגרף מקבלים "פסגה" משמע טווח תדרי הדיבור מובחן יותר ומצריך הכי מעט אנרגיה כדי להישמע ולהישאר בחלל.
2. בדומה לגראפים מקבילים בעולם האקוסטיקה של סאונד ומוזיקה, תצורת הגרף דומה ל-Roll off – משמע תדרי הבס הנמוכים הינם שקטים יותר ומתגברים לאורך טווח הדיבור, ומטווח הדיבור ישנה ירידה יחסית מתונה לאורך התדרים הגבוהים, מה שמאפשר איזון בסאונד.



תמונה 55: סימולציה של זמן ההדוד בחדר ותוצאות עם אלמנט אקוסטי ובלעדיו

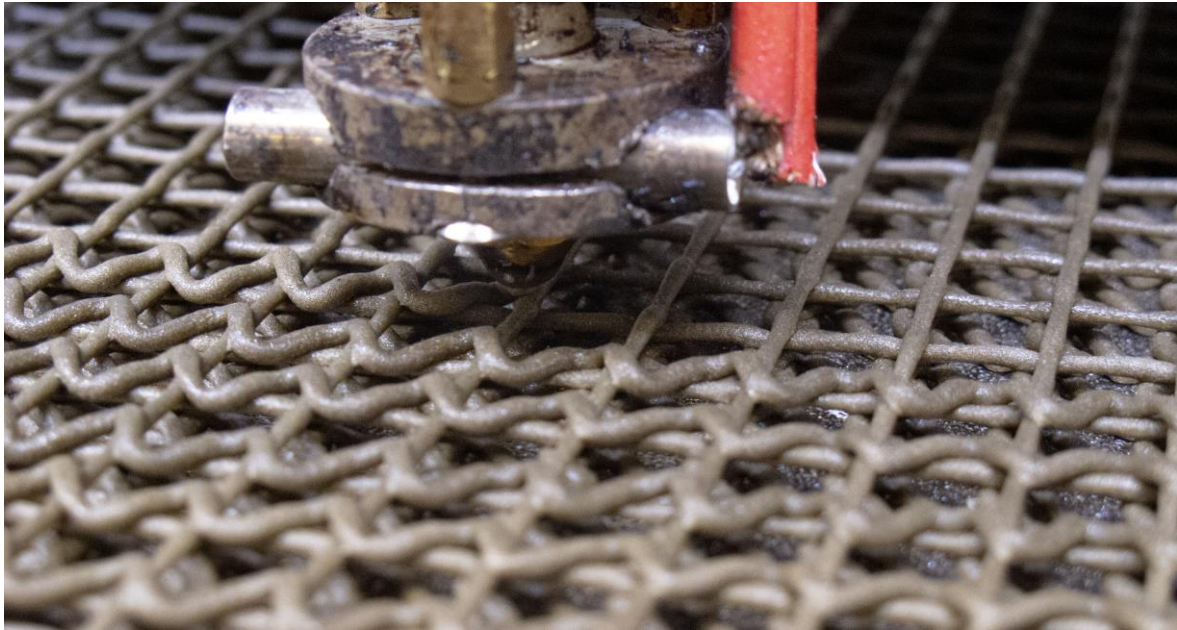
תוצאות שלב זה הביאו לאינדיקציה כי אלמנט היברידי אכן ייתן פתרון אקוסטי, אשר אותו ניתן לאפיין על פי צורך ולשלב בעת תכנון. שילוב אסטרגיית מיקרו-סטרוקטורה על מנת לשפר את מקדם הספיגה של ביו-פלסטיק והגדלת שטח הפיזור באלמנט הביאו לפתרון אקוסטי, אשר מציע נוחות אקוסטית העומדת בהמלצות, על פי הספרות.

## 8.5 הדפסה והתקנה

לאחר תוצאות הסימולציה, מטרת שלב זה הייתה להדפיס חלק מהאלמנט בקנה מידה 1:1 לצורך הוכחת היתכנות.

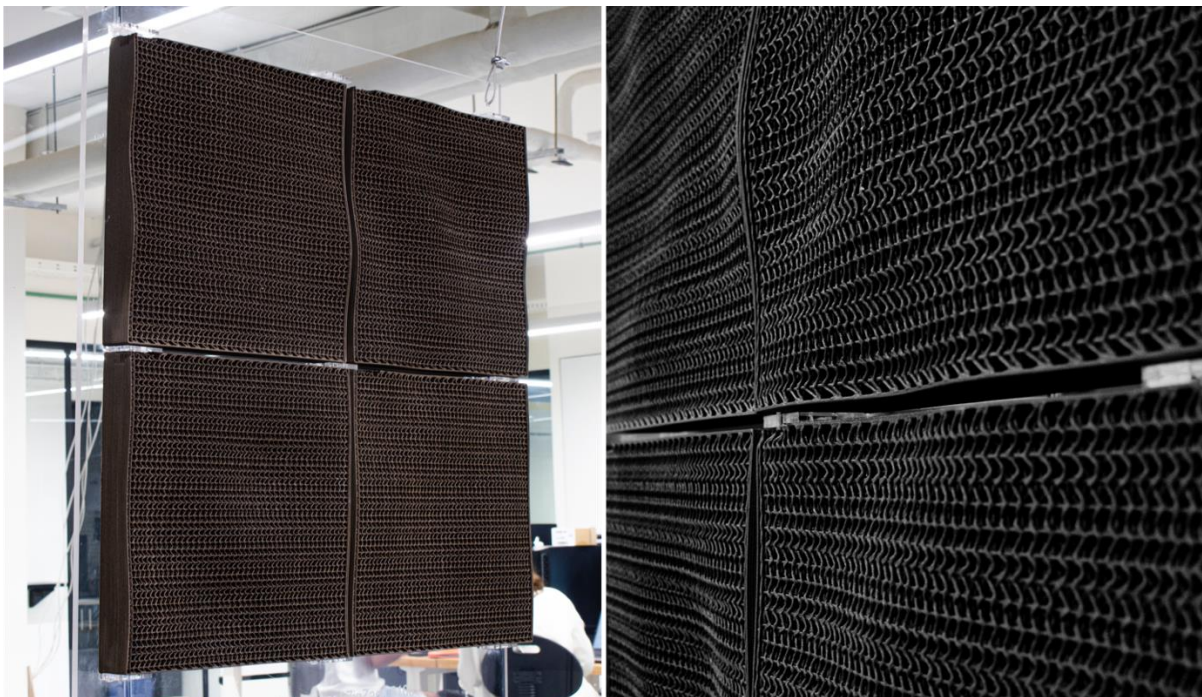
כדי לייצר את הפאנל תחילה הוגדר גריד של 30x30 ס"מ, שנקבע בהתאם להגבלות המיכון (גודל מיטת ההדפסה של המדפסת), האלמנט ההיברידי חולק לפאנלים. מתוך האלמנט הגדול נבחרו 4 פאנלים חופפים אשר איכלסו בתוכם את ההשתנות הגאומטרית (לצורך פיזור) הגדולה ביותר מתוך הפאנל – זאת כדי שבמקרה של הצלחה בייצור של ארבעת הפאנלים האלה, ניתן להסיק כי המדפסת תצליח להדפיס את שאר הפאנלים.

לאור העובדה כי עד כה במחקר הודפס בקנה מידה גדול רק אלמנט פיזור, וכן כל אסטרטגיות המיקרו-סטרוקטורה הודפסו עד לקנה מידה של קוטר 10 ס"מ, ולא נעשה ניסיון להדפסה של אלמנט היברידי בקנה מידה 1:1 תוך כדי שימוש בהדפסה לא לינארית, בוצע מעקב נוסף על ההדפסות. מעקב זה כלל הגדרות הדפסה, כגון: מהירות הדפסה, מהירות הזנה, טמפרטורת הדפסה וקירור חיצוני נוסף (מאורר) אם היה צריך לשנות אותן בהתאם לשינוי קנה המידה.



תמונה 56: הדפסת אלמנט אקוסטי עם מיקרו־סטרוקטורה בחומר EZ-Q

לבסוף הודפסו ארבעה פאנלים מחומר EZ-Q בקנה מידה 1:1 אשר הוצבו כפי שתוכנן באופן דיגיטלי. הדפסת ארבעת הפאנלים הביאה להוכחת היתכנות של סכמת העבודה אשר הוצגה בתחילת המתודולוגיה – המאפשרת לשלב ביו־פלסטיק בהדפסה בקנה מידה גדול תוך כדי ניצול יתרונות הדפסת התלת־מימד לצרכים אקוסטיים.



תמונה 57: התקנת 4 פאנלים מ־EZ-Q למענה אקוסטי רציף

## פרק 9: דיון – יתרונות, חסרונות וחסמים

שילוב כלים חישוביים לשיפור תכונות אקוסטיות – המחקר הציג בדיקה של השילוב הפוטנציאלי של ביו-פלסטיק בהדפסת תלת-מימד בקנה מידה גדול לצורך אקוסטי, והראה היתכנות ליצירת אבטיפוס 1:1 של פאנלים אקוסטיים המדגימים פתרון היברידי.

המחקר תיאר תהליך עבודה מוצע של ייצור מ-CAD ל-CAM, שמטרתו לשפר ביצועים אקוסטיים כדי להשיג נוחות אקוסטית ואלמנטים מותאמים אישית אקוסטית עבור חללים אדריכליים, כחלק אינטגרלי מתהליך התכנון האדריכלי הכולל. זאת נעשה בעזרת שילוב של כלים חישוביים במטרה לייעל את היכולות האקוסטיות של חומרים נחותים, ביו-פלסטיק, תוך שימוש בהדפסת תלת-מימד של מיקרו-סטרוקטורות המקנות לחומר יכולת ספיגה משופרת. כמו כן, בוצעו סימולציות לצורך אופטימיזציה של פיזור ונוחות אקוסטית, אשר ניתנים להתאמה אישית – זהו פתרון אשר אינו קיים בשוק כיום. תכונות מכאניות של תרכובות נבחרות בתהליך הדפסה – בתהליך המיון והתאמה של תרכובות ביו-פלסטיק לאלמנטים מבניים יתכנו פערים בתכונות המכאניות של תרכובות הביו-פלסטיק ביחס לתרכובות הקיימות. במצב זה ובהסתמך על מיפוי המחקר ניתן מענה של תרכובות ביו-פלסטיק לאלמנטים עם דרישות מכאניות תואמות (אלמנטי פנים) והגדרת תרכובות עבור אלמנטים אקוסטיים בהדפסת תלת-מימד, ובכך מביא לשיפור של הייצור בהיבטי צמצום פסולת, זיהום ופליטות גזי חממה. כמו כן, אנו רואים כי יש לקיים מחקר המשך בבחינת תרכובות נוספות אשר יעמדו בתקינה של ענף בנייה עם דרישות גבוהות.

כדאיות כלכלית – שינויים מהותיים בפסי הייצור הקיימים במפעלים בישראל ידרשו השקעה כלכלית גדולה. בשיחות שערכנו עם חברות בשוק הישראלי ניתן להתרשם שקיימת הבנה ברורה שהרגולציה בתעשיית הפלסטיק בישראל נמצאת במסלול ליישור קו עם מגמות עולמיות, ועל כן יש צורך בחשיבה לטווח הרחוק בנוגע לתרכובות מחומרים טבעיים ולתהליכי ייצור מותאמים. פסי הייצור הקיימים גם מציבים חסמים לגבי מגוון המוצרים וגודל המוצרים. בחינת המעבר לייצור על גבי תבניות להדפסת תלת-מימד תאפשר גם השתנות צורנית ופיתוח אלמנטים מורכבים שאינם חזרתיים, תוך שילוב של מערכות קריאה, לימוד ובקרה [סנסורים] המאפשרים דיוק ותיקון תוך כדי תהליך הייצור. לאור הבנת האקלים הרגולטורי וחסמי הייצור הקיימים, אנו מאמינים שנכון לבצע מחקר זה כעת על מנת לסייע למחוקק ולתעשייה בהגדרת צעדים ראשונים במימוש הרוויזיה בתעשיית הפלסטיק בענף הבנייה. המחקר מציג פתרון היברידי אקוסטי, המנצל את הפוטנציאל של טכנולוגיית הדפסת התלת-מימד. בשל מורכבות ייצור ועלויות גבוהות, הדפסת תלת-מימד מתגלה כמתוון פוטנציאלי להחדרת פתרון כזה לענף הבנייה. כמו כן, מחקר זה אינו עסק בכדאיות כלכלית, אנו רואים לנכון כי יש לבצע מחקר המשך לבדיקת כדאיות כלכלית על מנת להבין את יכולת האינטגרציה בשוק.

## פרק 10: סיכום

הצעת המחקר שואפת לשלב פתרונות אקוסטיים והדפסה בקנה מידה גדול עם תרכובות ביו־פלסטיק, תוך הצגת מתודולוגיית עיצוב חדשה לאקוסטיקה מותאמת אישית עם מיקוד בר קיימא. מחקר זה טומן בחובו פוטנציאל משמעותי לתרומה בתחומים שונים. ראשית, על ידי בחינת השילוב של מיקרו־סטרוקטורות וגאומטריות מותאמות אישית, מחקר בייצור תוסף (AM) יכול לקדם ביצועים אקוסטיים באלמנטים אדריכליים. זה כולל שיפור תכונות ספיגת הקול, פיזור ודיפוזיה, ובסופו של דבר יצירת חללים נוחים ויעילים מבחינה אקוסטית תוך שיפור חווית המשתמש. שנית, AM מאפשרת התאמה אישית וגמישות עיצובית לשם התאמה של אלמנטים אדריכליים לדרישות אקוסטיות ספציפיות ולהעדפות עיצוביות. חקירת טכניקות AM בהקשר זה מספקת תובנות חשובות לגבי אופטימיזציה של ביצועים אקוסטיים תוך שמירה על שיקולים אסתטיים. בנוסף, המחקר נועד להועיל לאדריכלים ולמעצבים על ידי שיפור תהליך העבודה של CAD ל-CAM.

באמצעות משוב וניתוח בזמן אמת של ביצועים אקוסטיים בשלב התכנון, מחקר זה יכול לתרום לפיתוח תהליכי עבודה ידידותיים למשתמש המאפשרים קבלת החלטות מושכלות לגבי בחירת חומר, אופטימיזציה של גאומטריה ותכנון אקוסטי כולל בשלב מוקדם בתהליך התכנון. יתר על כן, על ידי ביצוע ניסויים על אלמנטים ארכיטקטוניים בקנה מידה גדול יותר ובחינת פתרונות היברידיים המשלבים פיזור וספיגה, המחקר יכול לגשר על הפער בין ידע תאורטי ליישום מעשי. יישום מעשי זה של ממצאי מחקר יכול להיות בעל ערך עבור אדריכלים, מהנדסים ויצרנים, שיכולים ליישם את התובנות על פרויקטים בעולם האמיתי ולאמץ טכניקות AM לשיפור הביצועים האקוסטיים בבנייה ותעשייה. חשוב לציין כי קיימות ויעילות החומר הם שיקולים מכריעים במחקר זה. ל-AM יש את הפוטנציאל להפחית את בזבז החומרים ולמטב את ניצול המשאבים. חקר חומרים בני קיימא, כגון PLA מבוסס קומפוזיט וסיבים טבעיים, והתכונות האקוסטיות שלהם בתהליכי AM יש בכוחם לתרום למקסום ביצועים אקוסטיים תוך מזעור ההשפעה הסביבתית, תוך התאמה לעקרונות של עיצוב ובנייה בני קיימא. למחקר ב-AM לאקוסטיקה אדריכלית יש פוטנציאל לשפר את ההבנה, היישום והאופטימיזציה של פתרונות אקוסטיים בסביבה הבנויה. זה יכול לשפר את הנוחות האקוסטית, לטפח קיימות ולהרחיב את גבולות האפשרויות העיצוביות באקוסטיקה אדריכלית, לטובת בעלי עניין שונים המעורבים בענף הבנייה.

- Abeykoon, Chamil, Pimpisut Sri-Amphorn, and Anura Fernando. 2020. "Optimization of Fused Deposition Modeling Parameters for Improved PLA and ABS 3D Printed Structures." *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 3 (3): 284–97. <https://doi.org/10.1016/J.IJLMM.2020.03.003>.
- Agirbas, A. 2019. "The Effect of Complex Wall Forms on the Room Acoustics An Experimental Case Study." In , 2:97–102. [https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019\\_068](https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_068).
- Agusti-Juan, Guillaume Habert. 2016. "An Environmental Perspective on Digital Fabrication in Architecture and Construction." In *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing, Proceedings of the 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2016) / Melbourne 30 March–2 April 2016*, Pp. 797-806. CUMINCAD. [http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2016\\_797](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2016_797).
- Ahlers, Daniel, Florens Wasserfall, N. Hendrich, and Jianwei Zhang. 2019. *3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34888.26881>.
- Akiwate, D.C., M.D. Date, B. Venkatesham, and S. Suryakumar. 2019. "Acoustic Characterization of Additive Manufactured Perforated Panel Backed by Honeycomb Structure with Circular and Non-Circular Perforations." *Applied Acoustics* 155: 271–79. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.05.025>.
- Akiwate, D.C., M.D. Date, B. Venkatesham, and S. Suryakumar. 2021. *Acoustic Properties of Additive Manufactured Porous Material*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5776-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5776-7_12).
- Allum, J., J. Kitzinger, Y. Li, V.V. Silberschmidt, and A. Gleadall. 2021. "ZigZagZ: Improving Mechanical Performance in Extrusion Additive Manufacturing by Nonplanar Toolpaths." *Additive Manufacturing* 38. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101715>.
- AMFG. 2019. "How Mature Is Your Industry In Its Adoption Of 3D Printing? [Infographic]." AMFG (blog). July 9, 2019. <https://amfg.ai/2019/07/09/how-mature-is-your-industry-in-its-adoption-of-3d-printing/>.
- Andrew, J.J., and H.N. Dhakal. 2022. "Sustainable Biobased Composites for Advanced Applications: Recent Trends and Future Opportunities – A Critical Review." *Composites Part C: Open Access* 7. <https://doi.org/10.1016/j.icomc.2021.100220>.
- Antonakou, E V, and D S Achilias. 2013. "Recent Advances in Polycarbonate Recycling: A Review of Degradation Methods and Their Mechanisms." *Waste and Biomass Valorization* 4 (1): 9–21. <https://doi.org/10.1007/s12649-012-9159-x>.
- Arif, Z.U., M.Y. Khalid, M.F. Sheikh, A. Zolfagharian, and M. Bodaghi. 2022. "Biopolymeric Sustainable Materials and Their Emerging Applications." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 10 (4). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108159>.
- Arjunan, Arun, Ahmad Baroutaji, and John Robinson. 2022. "Advances in Acoustic Metamaterials." In *Encyclopedia of Smart Materials*, edited by Abdul-Ghani Olabi, 1–10. Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00091-7>.
- Arjunan, Arun, Ahmad Baroutaji, John Robinson, and Chang Wang. 2022. "Characteristics of Acoustic Metamaterials." In *Encyclopedia of Smart Materials*, edited by Abdul-Ghani Olabi, 35–45. Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00090-5>.
- Askari, Meisam, David A Hutchins, Peter J Thomas, Lorenzo Astolfi, Richard L Watson, Meisam Abdi, Marco Ricci, Stefano Laureti, Luzhen Nie, and Steven Freear. 2020. "Additive Manufacturing of Metamaterials: A Review." *Additive Manufacturing* 36: 101562.
- Augustynowicz, E., M. Smigielska, D. Nikles, T. Wehrle, and H. Wagner. 2021. "Parametric Design and Multirobotic Fabrication of Wood Facades." In . <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85135309947&partnerID=40&md5=2029688708b2ed0db343fe92ec132274>.
- Badino, E., L. Shtrepi, and A. Astolfi. 2020. "Acoustic Performance-Based Design: A Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice." *Acoustics* 2 (2): 246–78. <https://doi.org/10.3390/acoustics2020016>.

- Balaji, Anand B., Harshini Pakalapati, Mohammad Khalid, Rashmi Walvekar, and Humaira Siddiqui. 2018. "Natural and Synthetic Biocompatible and Biodegradable Polymers." *Biodegradable and Biocompatible Polymer Composites: Processing, Properties and Applications*, January, 3–32. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100970-3.00001-8>.
- Balint, Tomáš, Jozef Zivcak, Radovan Hudak, Teodor Toth, M Kohan, and Samuel Lancoš. 2021. "Destructive and Non-Destructive Testing of Samples from PLA and PETG Materials." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1199 (June): 12045–12045. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1199/1/012045>.
- Ballesterro, Eric, Noé Jiménez, J-P Groby, S Dance, H Aygun, and V Romero-García. 2019. "Experimental Validation of Deep-Subwavelength Diffusion by Acoustic Metadiffusers." *Applied Physics Letters* 115 (8): 081901.
- Bhatt, Pooja, and Alka Goe. 2017. "Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use." *Material Science Research India* 14 (1): 52–57. <https://doi.org/10.13005/msri/140109>.
- Bhuvaneswari, V., B. Devarajan, B. Arulmurugan, R. Mahendran, S. Rajkumar, S. Sharma, K. Mausam, C. Li, and E.T. Eldin. 2022. "A Critical Review on Hygrothermal and Sound Absorption Behavior of Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites." *Polymers* 14 (21). <https://doi.org/10.3390/polym14214727>.
- Bi, Minghao, Lingwei Xia, Phuong Tran, Zhi Li, Qian Wan, Li Wang, Wei Shen, Guowei Ma, and Yi Min Xie. 2022. "Continuous Contour-Zigzag Hybrid Toolpath for Large Format Additive Manufacturing." *Additive Manufacturing* 55 (July): 102822. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102822>.
- Bostanci, HB, and AM Tanyer. 2022. "Bio-Based Construction Materials for Bio-Circular Transition: A Brief Bibliometric Analysis." [https://www.researchgate.net/profile/Hafize-Bostanci/publication/365368286\\_Bio-Based\\_Construction\\_Materials\\_for\\_Bio-Circular\\_Transition\\_A\\_Brief\\_Bibliometric\\_Analysis/links/637292ef37878b3e87aec550/Bio-Based-Construction-Materials-for-Bio-Circular-Transition-A-Brief-Bibliometric-Analysis.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hafize-Bostanci/publication/365368286_Bio-Based_Construction_Materials_for_Bio-Circular_Transition_A_Brief_Bibliometric_Analysis/links/637292ef37878b3e87aec550/Bio-Based-Construction-Materials-for-Bio-Circular-Transition-A-Brief-Bibliometric-Analysis.pdf).
- Boulvert, Jean, Josué Costa-Baptista, Théo Cavalieri, Maxime Perna, Edith Roland Fotsing, Vicente Romero-García, Gwenael Gabard, Annie Ross, Jacky Mardjono, and Jean-Philippe Groby. 2020. "Acoustic Modeling of Micro-Lattices Obtained by Additive Manufacturing." *Applied Acoustics* 164: 107244.
- Brell-Cokcan, Sigrid, and Johannes Braumann. 2014. "Robotic Production Immanent Design: Creative Toolpath Design in Micro and Macro Scale."
- Breseghello, L., and R. Naboni. 2022. "Toolpath-Based Design for 3D Concrete Printing of Carbon-Efficient Architectural Structures." *Additive Manufacturing* 56. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102872>.
- Brunelle, Daniel J. 2006. "Polycarbonates." In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst255.pub2>.
- Campo, E. Alfredo. 2008. "Polymeric Materials and Properties." *Selection of Polymeric Materials*, January, 1–39. <https://doi.org/10.1016/B978-081551551-7.50003-6>.
- Carbajo, J., S. Ghaffari Mosanenzadeh, S. Kim, and N.X. Fang. 2020. "Multi-Layer Perforated Panel Absorbers with Oblique Perforations." *Applied Acoustics* 169. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107496>.
- Carbajo, J., J.M. Molina-Jordá, L.P. Maiorano, and N.X. Fang. 2021. "Sound Absorption of Macro-Perforated Additively Manufactured Media." *Applied Acoustics* 182. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108204>.
- Casarini, Cecilia. 2021. "Towards a Quieter World: Three-Dimensional Printed Acoustic Metamaterials for Noise Control." <https://stax.strath.ac.uk/concern/theses/h415pb089>.
- Casini, M. 2021. *Construction 4.0: Advanced Technology, Tools and Materials for the Digital Transformation of the Construction Industry*. Construction 4.0: Advanced Technology, Tools and Materials for the Digital Transformation of the Construction Industry. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821797-9.00014-3>.

- Chen, J.-S., Y.-B. Chen, Y.-H. Cheng, and L.-C. Chou. 2020. "A Sound Absorption Panel Containing Coiled Helmholtz Resonators." *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics* 384 (35). <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2020.126887>.
- Chen, X., and N. Yan. 2020. "A Brief Overview of Renewable Plastics." *Materials Today Sustainability* 7–8 (March): 100031. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100031>.
- Chen, Z., L. Zhang, and P.F. Yuan. 2019. "Innovative Design Approach to Optimized Performance on Large-Scale Robotic 3D-Printed Spatial Structure." In , 2:451–60. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85068356189&partnerID=40&md5=54693b80d90d2cb17374a4b361c7655a>.
- Cheng, Gong, David W Herrin, and Nan Zhang. 2017. "Scale Modeling of Acoustic Scattering." In , 254:813–20. Institute of Noise Control Engineering. <https://www.ingentaconnect.com/content/ince/incecp/2017/00000254/00000002/art00100>.
- Ciochon, Agnieszka H, John Kennedy, Raphael Leiba, and Lara Flanagan. 2022. "The Impact of Additive Manufacturing on the Acoustic Performance of Novel Porous Materials." In , 2903. <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2022-2903>.
- Cook, Ed, Emma Burlow, Sam Reeve, Edward Kosior, Bernie Thomas, Brian Riise, and John Gysbers. 2018. *Eliminating Avoidable Plastic Waste by 2042: A Use-Based Approach to Decision and Policy Making*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16460.92800>.
- Cop, Philipp, John Nguyen, and Brady Peters. 2022. "Modelling and Simulation of Acoustic Metamaterials for Architectural Application." In , 223–36. Springer International Publishing Cham. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-13249-0\\_19](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-13249-0_19).
- Costa-Baptista, J., E.R. Fotsing, J. Mardjono, D. Therriault, and A. Ross. 2022. "Design and Fused Filament Fabrication of Multilayered Microchannels for Subwavelength and Broadband Sound Absorption." *Additive Manufacturing* 55. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102777>.
- Cox, Trevor J., and Peter D'Antonio. 2014. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. 2nd ed. London: CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781482266412>.
- Cummer, Steven A, Johan Christensen, and Andrea Alù. 2016. "Controlling Sound with Acoustic Metamaterials." *Nature Reviews Materials* 1 (3): 1–13.
- Dahy, H. 2017. "Biocomposite Materials Based on Annual Natural Fibres and Biopolymers – Design, Fabrication and Customized Applications in Architecture." *Construction and Building Materials* 147 (August): 212–20. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.079>.
- Deshmukh, S., H. Ronge, and S. Ramamoorthy. 2019. "Design of Periodic Foam Structures for Acoustic Applications: Concept, Parametric Study and Experimental Validation." *Materials and Design* 175. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107830>.
- Devsingh, Dharavath. 2018. "Characterization of Additive Manufactured PETG and Carbon Fiber-PETG" 4 (June). <https://doi.org/10.18231/2454-9150.2018.0139>.
- Dhakal, Hom Nath, and Sikiru Oluwarotimi Ismail. 2021. "4 - Design, Manufacturing Processes and Their Effects on Bio-Composite Properties." In *Sustainable Composites for Lightweight Applications*, edited by Hom Nath Dhakal and Sikiru Oluwarotimi Ismail, 121–77. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818316-8.00005-0>.
- Dong, M., S. Jia, J. Liu, X. Lin, Q. Xue, and W. Sun. 2020. "Properties of 3D Printed Bionic Wood Sound Absorption Structure with Different Hole Angles." *Linye Kexue/Scientia Silvae Sinicae* 56 (5): 113–17. <https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.20200513>.
- Dritsas, Stylianos, Samuel EP Halim, Yadunund Vijay, Naresh G Sanandhiya, and Javier G Fernandez. 2018. "Digital Fabrication with Natural Composites." *Construction Robotics* 2 (1): 41–51.
- Duan, H., X. Shen, E. Wang, F. Yang, X. Zhang, and Q. Yin. 2021. "Acoustic Multi-Layer Helmholtz Resonance Metamaterials with Multiple Adjustable Absorption Peaks." *Applied Physics Letters* 118 (24). <https://doi.org/10.1063/5.0054562>.
- Duan, H., F. Yang, X. Shen, Q. Yin, E. Wang, X. Zhang, X. Yang, C. Shen, and W. Peng. 2022. "Acoustic Metamaterials for Low-Frequency Noise Reduction Based on Parallel Connection of Multiple Spiral Chambers." *Materials* 15 (11). <https://doi.org/10.3390/ma15113882>.

- Duque-Acevedo, M., I. Lancellotti, F. Andreola, L. Barbieri, L.J. Belmonte-Ureña, and F. Camacho-Ferre. 2022. "Management of Agricultural Waste Biomass as Raw Material for the Construction Sector: An Analysis of Sustainable and Circular Alternatives." *Environmental Sciences Europe* 34 (1). <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00655-7>.
- Elkaseer, A., T. Müller, D. Rabsch, and S.G. Scholz. 2021. *Impact of Nonplanar 3d Printing on Surface Roughness and Build Time in Fused Filament Fabrication*. Vol. 200. Smart Innovation, Systems and Technologies. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-8131-1\\_26](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8131-1_26).
- Eriksen, M. K., J. D. Christiansen, A. E. Daugaard, and T. F. Astrup. 2019. "Closing the Loop for PET, PE and PP Waste from Households: Influence of Material Properties and Product Design for Plastic Recycling." *Waste Management* 96 (August): 75–85. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.07.005>.
- Fan, J., B. Song, L. Zhang, X. Wang, Z. Zhang, S. Wei, X. Xiang, X. Zhu, and Y. Shi. 2023. "Structural Design and Additive Manufacturing of Multifunctional Metamaterials with Low-Frequency Sound Absorption and Load-Bearing Performances." *International Journal of Mechanical Sciences* 238. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107848>.
- Fan, Junxiang, Lei Zhang, Shuaishuai Wei, Zhi Zhang, Seung-Kyum Choi, Bo Song, and Yusheng Shi. 2021. "A Review of Additive Manufacturing of Metamaterials and Developing Trends." *Materials Today*.
- Feng, T., Y. Wang, J. Wang, and Z. Huang. 2021. "Progress in Research and Application of Structural Acoustic Metamaterials." *Zhendong Yu Chongji/Journal of Vibration and Shock* 40 (20): 150–57. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2021.20.019>.
- Ferrara, M. 2021. "Circular Material for Creative Industries: The Emerging Bioplastics."
- Ferreira-Filipe, Diogo A., Ana Paço, Armando C. Duarte, Teresa Rocha-Santos, and Ana L. Patrício Silva. 2021. "Are Biobased Plastics Green Alternatives?—A Critical Review." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (15): 7729. <https://doi.org/10.3390/ijerph18157729>.
- Fico, Daniela, Daniela Rizzo, Raffaele Casciaro, and Carola Esposito Corcione. 2022. "A Review of Polymer-Based Materials for Fused Filament Fabrication (FFF): Focus on Sustainability and Recycled Materials." *Polymers* 14 (3): 465.
- Figliola, Angelo, and Alessandra Battisti. 2021. "Informed Architecture and Plastic Materials. Overview of the Main European Research Paths." In *Post-Industrial Robotics: Exploring Informed Architecture*, edited by Angelo Figliola and Alessandra Battisti, 105–35. Singapore: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5278-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5278-6_4).
- Foged, Isak Worre, Anke Pasold, Jacob Hilmer, Asbjørn Søndergaard, Gabriella Rossi, and James Walker. 2022. "Development and Testing of Novel Acoustic Clay Tiles." *Journal of Architectural Engineering* 28 (2): 05022004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000536](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000536).
- Foged, Isak Worre, and Antonio Scaffidi. 2022. "A Design and Fabrication Method for Hemp Based Acoustic Elements." In , 101–10. eCAADe.
- Fotsing, Edith Roland, Arnaud Dubourg, Annie Ross, and Jacky Mardjono. 2019. "Acoustic Properties of Periodic Micro-Structures Obtained by Additive Manufacturing." *Applied Acoustics* 148: 322–31.
- Frone, A.N., S. Berlioz, J.-F. Chailan, D.M. Panaitescu, and D. Donescu. 2011. "Cellulose Fiber-Reinforced Polylactic Acid." *Polymer Composites* 32 (6): 976–85. <https://doi.org/10.1002/pc.21116>.
- Gao, N., Z. Zhang, J. Deng, X. Guo, B. Cheng, and H. Hou. 2022. "Acoustic Metamaterials for Noise Reduction: A Review." *Advanced Materials Technologies* 7 (6). <https://doi.org/10.1002/admt.202100698>.
- Garcia, Manuel Jimenez and Retsin. 2015. "Design Methods for Large Scale Printing." In *Martens, B, Wurzer, G, Grasl T, Lorenz, WE and Schaffranek, R (Eds.), Real Time - Proceedings of the 33rd ECAADe Conference - Volume 2, Vienna University of Technology, Vienna, Austria, 16-18 September 2015, Pp. 331-339*. CUMINCAD. [http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2015\\_247](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2015_247).
- García, María de Gracia Trujillo, Manfred Schlatter, Francisco Mata Cabrera, José Tejero Manzanares, and Issam Hanafi. 2016. "Recycling of Acrylonitrile–Butadiene–Styrene Using Injection Moulding Machine." *Procedia Technology* 22 (January): 399–406. <https://doi.org/10.1016/J.PROTCY.2016.01.068>.

- Ghasemieshkaftaki, Marzieh, Marco A Ortiz, and Philomena M Bluysen. 2021. "An Overview of Transparent and Translucent 3D-Printed Façade Prototypes and Technologies."
- Giglio, A. 2021. *Towards an Advanced Acoustic Ecology*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54081-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54081-4_10).
- Giglio, Andrea, Ingrid Paoletti, and Maia Zheliazkova. 2020. "Performance-Based Design Approach for Tailored Acoustic Surfaces." In *Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment*, 137–48. Springer, Cham.
- Gokhale, Sneha. 2020. "3D Printing with Bioplastics."
- Greene, Joseph P. 2021. "3 - Microstructures of Polymers." In *Automotive Plastics and Composites*, edited by Joseph P Greene, 27–37. William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818008-2.00009-X>.
- Handayani, Sri Utami, Muhamad Fahrudin, Wiji Mangestiyono, and Alaya Fadlu Hadi Muhamad. 2021. "Mechanical Properties of Commercial Recycled Polypropylene from Plastic Waste." *Journal of Vocational Studies on Applied Research* 3 (1): 1–4. <https://doi.org/10.14710/jvsar.v3i1.10868>.
- Harten, Arthur. 2022. "Open-Source Acoustics Simulation in the Education Environment." *The Journal of the Acoustical Society of America* 152 (October): A255–A255. <https://doi.org/10.1121/10.0016192>.
- Hegab, Hussien, Navneet Khanna, Neamat Monib, and Amr Salem. 2023. "Design for Sustainable Additive Manufacturing: A Review." *Sustainable Materials and Technologies* 35 (April): e00576. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00576>.
- Hu, Xiangzhou, Zhijie Yang, Senxian Kang, Man Jiang, Zuowan Zhou, Jihua Gou, David Hui, and Jing He. 2020. "Cellulose Hydrogel Skeleton by Extrusion 3D Printing of Solution." *Nanotechnology Reviews* 9 (1): 345–53. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0025>.
- Isa, Mohammed A., and Ismail Lazoglu. 2019. "Five-Axis Additive Manufacturing of Freeform Models through Buildup of Transition Layers." *Journal of Manufacturing Systems* 50 (January): 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.12.002>.
- Jassmi, Hamad Al, Fady Al Najjar, and Abdel-Hamid Ismail Mourad. 2018. "Large-Scale 3D Printing: The Way Forward." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 324 (1): 012088. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/324/1/012088>.
- Jensen, M.B. 2019. "Robotic Fabrication of Acoustic Geometries - An Explorative and Creative Design Process within an Educational Context." *ArchiDOCT* 6 (2): 34–45.
- Jia, Yanhong. 2021. "Novel Structure and Expression of Printing Path for 3D Printing in Rapid Prototyping." In , 637–40. <https://doi.org/10.1109/AIID51893.2021.9456511>.
- Jiang, C., D. Moreau, and C. Doolan. 2017. "Acoustic Absorption of Porous Materials Produced by Additive Manufacturing with Varying Geometries." In . <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041375809&partnerID=40&md5=6fc07aff61c635ddc86efab80c035d07>.
- Jin, Yuan, Jianke Du, Yong He, and Guoqiang Fu. 2017. "Modeling and Process Planning for Curved Layer Fused Deposition." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 91 (1): 273–85. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9743-5>.
- Jo, Hyun In, and Jin Yong Jeon. 2022. "Optimizing Sound Diffusion in a Concert Hall Using Scale-Model Measurements and Simulations." *Journal of Building Engineering* 50 (June): 104240. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104240>.
- Johnston, W., and B. Sharma. 2021. "Additive Manufacturing of Fibrous Sound Absorbers." *Additive Manufacturing* 41. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101984>.
- Kausar, Ayesha. 2018. "A Review of Filled and Pristine Polycarbonate Blends and Their Applications." *Journal of Plastic Film & Sheeting* 34 (1): 60–97. <https://doi.org/10.1177/8756087917691088>.
- Kennedy, John, Lara Flanagan, Luke Dowling, G. J. Bennett, Henry Rice, and Daniel Trimble. 2019. "The Influence of Additive Manufacturing Processes on the Performance of a Periodic Acoustic Metamaterial." *International Journal of Polymer Science* 2019 (July): e7029143. <https://doi.org/10.1155/2019/7029143>.

- Khalid, Marwan, and Qingjin Peng. 2021. "Sustainability and Environmental Impact of Additive Manufacturing: A Literature Review." *Computer-Aided Design and Applications* 18 (6): 1210–32. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.1210-1232>.
- Khanna, Anand Sawroop. 2021. "Natural Degradation on Plastics and Corrosion of Plastics in Industrial Environment." *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, January. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00105-X>.
- King, Y.-J., and K.-K. Teo. 2020. "Application of 3D Printed Structured Materials as the Sound Absorption Panels." In . Vol. 463. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012032>.
- Kishore, SE, R Sujithra, and B Dhatreyi. 2021. "A Review on Latest Acoustic Noise Mitigation Materials." *Materials Today: Proceedings* 47: 4700–4707.
- Koren, BENJAMIN S, and TOBIAS Müller. 2017. "Digital Fabrication of Non-Standard Sound-Diffusing Panels in the Large Hall of the Elbphilharmonie." In , 122–29. JSTOR.
- Kretzer, M., and S. Mostafavi. 2020. "Robotic Fabrication with Bioplastic Materials Digital Design and Robotic Production of Biodegradable Objects." In , 1:603–12. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85128204611&partnerID=40&md5=f12fd473a2f3397000fd537956210c51>.
- Kshirsagar, A.R., D. Job Sandeep Rajprian, and J. Jeyanthi. 2021. *Design and Development of Acoustic Metamaterial and Micro-Perforated Panel by Using 3D Printing*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1769-0\\_45](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1769-0_45).
- Kumar, Sanjay, and Heow Pueh Lee. 2019. "The Present and Future Role of Acoustic Metamaterials for Architectural and Urban Noise Mitigations." In , 1:590–607. MDPI.
- Latko-Durałek, Paulina, Kamil Dydek, and Anna Boczkowska. 2019. "Thermal, Rheological and Mechanical Properties of PETG/RPETG Blends." *Journal of Polymers and the Environment* 27 (June). <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01544-6>.
- Leschok, Matthias, Ina Cheibas, Valeria Piccioni, Bharath Seshadri, Arno Schlüter, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, and Benjamin Dillenburger. 2023. "3D Printing Facades: Design, Fabrication, and Assessment Methods." *Automation in Construction* 152 (August): 104918. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104918>.
- Li, S., H. Nguyen-Xuan, and P. Tran. 2023. "Digital Design and Parametric Study of 3D Concrete Printing on Non-Planar Surfaces." *Automation in Construction* 145. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104624>.
- Liao, G., C. Luan, Z. Wang, J. Liu, X. Yao, and J. Fu. 2021. "Acoustic Metamaterials: A Review of Theories, Structures, Fabrication Approaches, and Applications." *Advanced Materials Technologies* 6 (5). <https://doi.org/10.1002/admt.202000787>.
- Licitra, G., F. Bianco, F. Brocchi, L.G. Del Pizzo, and U. Berardi. 2021. "Design and Experimental Validation through 3D - Printing of a Highly Effective and Permeable Acoustic Metamaterial Silencer." In . <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85117499988&partnerID=40&md5=ad30fe45ad86e6719548ead300e5e7e6>.
- Liu, Z., M. Fard, X. Liu, J.L. Davy, and J. Zhan. 2017. "Sound Absorption of Micro-Perforated Panel Produced by Additive Manufacturing." In . <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029406893&partnerID=40&md5=6b9a5d699aa031237cde38ff12c19e36>.
- Liu, Zhengqing, Jiaying Zhan, Mohammad Fard, and John Laurence Davy. 2017. "Acoustic Properties of Multilayer Sound Absorbers with a 3D Printed Micro-Perforated Panel." *Applied Acoustics* 121 (June): 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.032>.
- Long, Marshall. 2014. "Architectural Acoustics (2nd Ed.)." In *Architectural Acoustics (Second Edition)*, edited by Marshall Long, 39–79. Boston: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398258-2.00002-7>.
- Lu, Qiangbing, Xin Li, Xiujuan Zhang, Minghui Lu, and Yanfeng Chen. 2022. "Perspective: Acoustic Metamaterials in Future Engineering." *Engineering* 17 (October): 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.020>.

- Mahmud, S., K.M.F. Hasan, M.A. Jahid, K. Mohiuddin, R. Zhang, and J. Zhu. 2021. "Comprehensive Review on Plant Fiber-Reinforced Polymeric Biocomposites." *Journal of Materials Science* 56 (12): 7231–64. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05774-9>.
- Maiti, S., M.R. Islam, M.A. Uddin, S. Afroj, S.J. Eichhorn, and N. Karim. 2022. "Sustainable Fiber-Reinforced Composites: A Review." *Advanced Sustainable Systems* 6 (11). <https://doi.org/10.1002/advsu.202200258>.
- Manco, Pasquale, Mario Caterino, Marta Rinaldi, and Marcello Fera. 2023. "Additive Manufacturing in Green Supply Chains: A Parametric Model for Life Cycle Assessment and Cost." *Sustainable Production and Consumption* 36 (March): 463–78. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.01.015>.
- Miftahur Rahman, N. R. Schott, and Lakshmi Kanta Sadhu. 2016. "Glass Transition of ABS in 3D Printing." *Comsol*.
- Mikula, Katarzyna, Dawid Skrzypczak, Grzegorz Izydorczyk, Jolanta Warchoń, Konstantinos Moustakas, Katarzyna Chojnacka, and Anna Witek-Krowiak. 2021. "3D Printing Filament as a Second Life of Waste Plastics—a Review." *Environmental Science and Pollution Research* 28 (10): 12321–33. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8>.
- Minors, A. 2018. "Architectural Patterning and Its Influence on Sound—a Case for Visual Analysis." In , 40:162–68. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85060083292&partnerID=40&md5=66979e371bad332b1e4ecb40acf1bd32>.
- Mohit, H., S. Mavinkere Rangappa, S. Siengchin, S. Gorbatyuk, P. Manimaran, C. Alka Kumari, A. Khan, and M. Doddamani. 2022. "A Comprehensive Review on Performance and Machinability of Plant Fiber Polymer Composites." *Polymer Composites* 43 (1): 608–23. <https://doi.org/10.1002/pc.26403>.
- Molloy, Isabella; Miller. 2018. "Digital Dexterity. Freeform 3D Printing through Direct Toolpath Manipulation for Crafted Artifacts." In *ACADIA // 2018: Recalibration. On Imprecision and Infidelity. [Proceedings of the 38th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-0-692-17729-7] Mexico City, Mexico 18-20 October, 2018, Pp. 266-275. CUMINCAD*. [http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia18\\_266](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia18_266).
- Monkova, K., M. Vasina, P.P. Monka, J. Vanca, and D. Kozak. 2022. "Effect of 3D-Printed PLA Structure on Sound Reflection Properties." *Polymers* 14 (3). <https://doi.org/10.3390/polym14030413>.
- Mungenast, Moritz Basil. 2019. "3D-Printed Future Facade." Technische Universität München. <https://mediatum.ub.tum.de/?id=1456068>.
- Nazarian, S., J.P. Duarte, S.G. Bilén, A. Memari, A. Radlinska, N. Meisel, and M. Hojati. 2021. *Additive Manufacturing of Architectural Structures: An Interplay Between Materials, Systems, and Design*. Advances in Science, Technology and Innovation. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35533-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35533-3_15).
- Oberti, Ilaria, and Alessia Paciello. 2022. "Bioplastic as a Substitute for Plastic in Construction Industry." *Encyclopedia* 2 (3): 1408–20.
- Opiela, K.C., M. Rak, and T.G. Zielinski. 2018. "A Concept Demonstrator of Adaptive Sound Absorber/Insulator Involving Microstructure-Based Modelling and 3D-Printing." In , 1091–1103. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85060376670&partnerID=40&md5=8d2bc2d2205d360366a5fa753db6887d>.
- Pandžić, Adi, and Damir Hodzic. 2021. "Mechanical Properties Comparison of PLA, Tough PLA and PC 3D Printed Materials with Infill Structure – Influence of Infill Pattern on Tensile Mechanical Properties." In . Vol. 1208. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1208/1/012019>.
- Patrick, S. 2005. *Practical Guide to Polyvinyl Chloride*. Rapra Technology. <https://books.google.co.il/books?id=uuVCAQAACAAJ>.
- Peng, Tao, Karel Kellens, Renzhong Tang, Chao Chen, and Gang Chen. 2018. "Sustainability of Additive Manufacturing: An Overview on Its Energy Demand and Environmental Impact." *Additive Manufacturing* 21 (May): 694–704. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.022>.
- Peters, B., N. Hoban, and K. Kramer. 2020. "Sustainable Sonic Environments." In , 2:455–64. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091710316&partnerID=40&md5=5b3e349b7864670a9cb623c919cab842>.

- Peters, Brady, Nicholas Hoban, Jay Yu, and Ziju Xian. 2019. *Improving Meeting Room Acoustic Performance through Customized Sound Scattering Surfaces*. Universitätsbibliothek der RWTH Aachen.
- Peters, Edward N. 2002. "Plastics: Thermoplastics, Thermosets, and Elastomers." In *Handbook of Materials Selection*, 335–55. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470172551.ch11>.
- Piana, Edoardo Alessio, Paolo Bonfiglio, and Monika Rychtarikova. 2022. "Acoustic Properties of Absorbing Materials." *Applied Sciences* 12 (9): 4446.
- Qiu, X. 2016. "5 - Acoustic Testing and Evaluation of Textiles for Buildings and Office Environments." In *Performance Testing of Textiles*, edited by Lijing Wang, 103–28. Woodhead Publishing Series in Textiles. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100570-5.00006-2>.
- Rajeshkumar, G., S.A. Seshadri, V. Hariharan, and S. Gokulkumar. 2022. "PLA Based Sustainable Composites." In *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers*, edited by M.S.J. Hashmi, 520–29. Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00276-5>.
- Rehfuss, Randall Jay. 2018. "Exploring Novel, Hard, Acoustically Absorbent, Materials."
- Reinhardt, D. 2018. "The Sound of Space in 3 Robotic Prototypes: Introducing 6-Axis Robotic Fabrication to Shape Macro and Micro-Geometries for Acoustic Performance." *A/Z ITU Journal of the Faculty of Architecture* 15 (1): 79–92. <https://doi.org/10.5505/ituifa.2018.87894>.
- Reinhardt, D., and D. Cabrera. 2017. "Randomness in Robotically Fabricated Micro-Acoustic Patterns." In , 853–62. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85021716831&partnerID=40&md5=8c3caf47235490922897c4bcb510ed55>.
- Reinhardt, Dagmar, Densil Cabrera, and Matthew Hunter. 2017. "A Mathematical Model Linking Form and Material for Sound Scattering."
- Rossi, G., J. Walker, A. Sondergaard, I.W. Foged, A. Pasold, and J. Hilmer. 2020. "Design-to-Manufacture Workflows of Sound-Scattering Acoustic Brick Walls." In , 1:474–83. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85115698285&partnerID=40&md5=992738a09209300fa7be95eed15374fb>.
- Rumpf, Moritz, Markus Schein, Johannes Kuhnen, and Manfred Grohmann. 2017. "Adaptable Acoustic Structures—Design, Detailing and Fabrication of a Fully Parametric Acoustic Ceiling." In , 2017:1–10. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
- Rust, R., A. Xydis, C. Frick, J. Strauss, C. Junk, J. Feringa, F. Gramazio, and M. Kohler. 2021. "Computational Design and Evaluation of Acoustic Diffusion Panels for the Immersive Design Lab An Acoustic Design Case Study." In , 1:515–24. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85124671380&partnerID=40&md5=a37e4b4570fa07174a7f3fa8b9650458>.
- Rust, R., A. Xydis, K. Heutschi, N. Perraudin, G. Casas, C. Du, J. Strauss, et al. 2021. "A Data Acquisition Setup for Data Driven Acoustic Design." *Building Acoustics* 28 (4): 345–60. <https://doi.org/10.1177/1351010X20986901>.
- Sailesh, R., L. Yuvaraj, M. Doddamani, L. Babu Mailan Chinnapandi, and J. Pitchaimani. 2022. "Sound Absorption and Transmission Loss Characteristics of 3D Printed Bio-Degradable Material with Graded Spherical Perforations." *Applied Acoustics* 186. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108457>.
- Samir, A., F.H. Ashour, A.A.A. Hakim, and M. Bassyouni. 2022. "Recent Advances in Biodegradable Polymers for Sustainable Applications." *Npj Materials Degradation* 6 (1). <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00277-7>.
- Sanandiya, Naresh D., Yadunund Vijay, Marina Dimopoulou, Stylianos Dritsas, and Javier G. Fernandez. 2018. "Large-Scale Additive Manufacturing with Bioinspired Cellulosic Materials." *Scientific Reports* 8 (1): 8642–8642. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26985-2>.
- Savage, Kiefer, Nicholas Hoban, and Brady Peters. 2022. "Gradient Acoustic Surfaces: The Design, Simulation, Robotic Fabrication of a Prototype Wall." In *19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Futures, CAAD Futures 2021, July 16, 2021 - July 18, 2021*, 1465–1465. CCIS:360–77. Communications in Computer and Information Science. Virtual, Online: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1280-1\\_23](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1280-1_23).

- Sekar, V., S.Y. Eh Noum, A. Putra, S. Sivanesan, and D.D. Chin Vui Sheng. 2022. "Fabrication of Light-Weighted Acoustic Absorbers Made of Natural Fiber Composites via Additive Manufacturing." *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 5 (4): 520–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.06.007>.
- Sekar, V., S.Y. Eh Noum, S. Sivanesan, A. Putra, D.D. Chin Vui Sheng, and D.H. Kassim. 2022. "Effect of Thickness and Infill Density on Acoustic Performance of 3D Printed Panels Made of Natural Fiber Reinforced Composites." *Journal of Natural Fibers* 19 (13): 7132–40. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1944426>.
- Sekar, V., M.H. Fouladi, S.N. Namasivayam, and S. Sivanesan. 2019. "Additive Manufacturing: A Novel Method for Developing an Acoustic Panel Made of Natural Fiber-Reinforced Composites with Enhanced Mechanical and Acoustical Properties." *Journal of Engineering (United Kingdom)* 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4546863>.
- Sekar, V., S.Y.E. Noum, S. Sivanesan, A. Putra, D.H. Kassim, Y.S. Wong, and K.C. Chin. 2021. "Effect of Perforation Volume on Acoustic Absorption of the 3D Printed Micro-Perforated Panels Made of Polylactic Acid Reinforced with Wood Fibers." In . Vol. 2120. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2120/1/012039>.
- Setaki, F., M. Tenpierik, A. Van Timmeren, and M. Turrin. 2016. "New Sound Absorption Materials: Using Additive Manufacturing for Compact Size, Broadband Sound Absorption at Low Frequencies." In , 4073–78. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84994652384&partnerID=40&md5=b949a54c2c5db4cdf0a451a5dc7d8ef7>.
- Setaki, F., F. Tian, M. Turrin, M. Tenpierik, L. Nijs, and A. van Timmeren. 2023. "3D-Printed Sound Absorbers: Compact and Customisable at Broadband Frequencies." *Architecture, Structures and Construction*, February. <https://doi.org/10.1007/s44150-023-00086-9>.
- Shembekar, A.V., Y.J. Yoon, A. Kanyuck, and S.K. Gupta. 2019. "Generating Robot Trajectories for Conformal Three-Dimensional Printing Using Nonplanar Layers." *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 19 (3). <https://doi.org/10.1115/1.4043013>.
- Shtrepi, L. 2019. "Advances in Diffusive Surface Design Using 3D Architectural Parametric Modelling Programs." In , 2019-September:2289–96. <https://doi.org/10.18154/RWTH-CONV-239424>.
- Shtrepi, L., T. Mendéz Echenagucia, E. Badino, and A. Astolfi. 2021. "A Performance-Based Optimization Approach for Diffusive Surface Topology Design." *Building Acoustics* 28 (3): 231–47. <https://doi.org/10.1177/1351010X20967821>.
- Shubhra, Quazi T H, AKMM Alam, and M A Quaiyyum. 2011. "Mechanical Properties of Polypropylene Composites: A Review." *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 26 (3): 362–91. <https://doi.org/10.1177/0892705711428659>.
- Shunmugasundaram, M., Ahmed Ali baig Maughal, and M. Ajay Kumar. 2020. "A Review of Bio-Degradable Materials for Fused Deposition Modeling Machine." *First International Conference on Advanced Lightweight Materials and Structures* 27 (January): 1596–1600. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.267>.
- Singh, Guravtar, Raja Sekhar Dondapati, and Lakhwinder Pal Singh. 2022. "Biomaterials Printing for Sustainability." In *Sustainability for 3D Printing*, 15–28. Springer.
- Singh, Narinder, and Rupinder Singh. 2017. "Conducting Polymer Solution and Gel Processing." *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, January. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03733-4>.
- Siracusa, Valentina, and Ignazio Blanco. 2020. "Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly(Ethylene Terephthalate) (Bio-PET): Recent Developments in Bio-Based Polymers Analogous to Petroleum-Derived Ones for Packaging and Engineering Applications." *Polymers* 12 (8). <https://doi.org/10.3390/polym12081641>.
- Song, Kaili, Xiaoji Zhu, Weiming Zhu, and Xiaoyan Li. 2019. "Preparation and Characterization of Cellulose Nanocrystal Extracted from Calotropis Procera Biomass." *Bioresources and Bioprocessing* 6 (1): 45–45. <https://doi.org/10.1186/s40643-019-0279-z>.

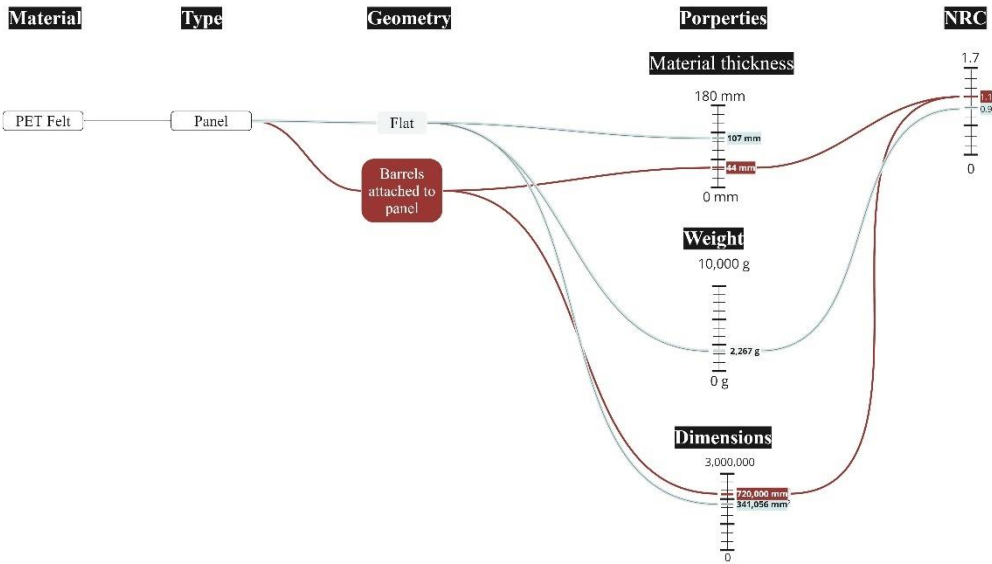
- Soutis, C. 2005. "Carbon Fiber Reinforced Plastics in Aircraft Construction." *Materials Science and Engineering: A* 412 (1–2): 171–76. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2005.08.064>.
- Suárez, Luis, and María del Mar Espinosa. 2020. "Assessment on the Use of Additive Manufacturing Technologies for Acoustic Applications." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 109 (9): 2691–2705.
- Szttyler, B., and P. Strumiłło. 2022. "Acoustic Metamaterials." *Archives of Acoustics* 47 (1): 3–14. <https://doi.org/10.24425/aoa.2022.140727>.
- Tanzi, Maria Cristina, Silvia Farè, and Gabriele Candiani. 2019. "Mechanical Properties of Materials." *Foundations of Biomaterials Engineering*, January, 105–36. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101034-1.00002-5>.
- Tenperik, Martin, Michela Turrin, Yvonne Wattez, Tudor Cosmatu, and Stavroula Tsafou. 2018. "Double Face 2.0: A Lightweight Translucent Adaptable Trombe Wall." *SPOOL* 5 (2-). <https://doi.org/10.7480/spool.2018.2.2090>.
- Thomsen, M.R., and M. Tamke. 2022. "Towards a Transformational Eco-Metabolic Bio-Based Design Framework in Architecture." *Bioinspiration and Biomimetics* 17 (4). <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ac62e2>.
- Tribot, Amélie, Dan Batalu, Clément Brasselet, Cédric Delattre, Lu Wei, Jonathan Lao, Petre Badica, Philippe Michaud, and Hélène de Baynast. 2022. "Chapter 20 - Green Polymer Filaments for 3D Printing." In *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science*, edited by Tariq Altalhi and Inamuddin, 463–516. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99643-3.00015-2>.
- Tyagi, Rashi, Nandan Kumar Jha, Ashutosh Tripathi, Nishant Ranjan, and Ranvijay Kumar. 2022. "Sound Absorption Characteristics of 3d Printed Biodegradable Structure Backed with Luffa Fiber," SSRN, .
- Vasina, Martin, Katarina Monkova, Peter Pavol Monka, Drazan Kozak, and Jozef Tkac. 2020. "Study of the Sound Absorption Properties of 3D-Printed Open-Porous ABS Material Structures." *Polymers* 12 (5): 1062.
- Venkatarajan, S., and A. Athijayamani. 2021. "An Overview on Natural Cellulose Fiber Reinforced Polymer Composites." *Materials Today: Proceedings* 37 (Part 2): 3620–24. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.09.773>.
- Verhoef, Leendert A., Bart W. Budde, Cindhuja Chockalingam, Brais García Nodar, and Ad J. M. van Wijk. 2018. "The Effect of Additive Manufacturing on Global Energy Demand: An Assessment Using a Bottom-up Approach." *Energy Policy* 112 (January): 349–60. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.034>.
- Vijay, Y., N.D. Sanandiya, S. Dritsas, and J.G. Fernandez. 2018. "Control of Process Settings for Large-Scale Additive Manufacturing with Sustainable Natural Composites." In . Vol. 4. <https://doi.org/10.1115/DETC2018-85994>.
- Vinod, A., M.R. Sanjay, Siengchin Suchart, and Parameswaranpillai Jyotishkumar. 2020. "Renewable and Sustainable Biobased Materials: An Assessment on Biofibers, Biopolymers and Biocomposites." *Journal of Cleaner Production* 258 (June): 120978. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120978>.
- Vomhof, M., L. Vasey, F. Gramazio, M. Kohler, S. Bräuer, K. Eggenschwiler, and J. Strauss. 2014. "RObotic Fabrication of Acoustic Brick Walls." In , 2014-October:555–64. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85051920572&partnerID=40&md5=98c68110aef41f3be4044b3da5c6f169>.
- Walker, J., and I.W. Foged. 2018. "Robotic Methods in Acoustics Analysis and Fabrication Processes of Sound Scattering Acoustic Panels." In , 1:835–40. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85127725804&partnerID=40&md5=ec4355f972471f0741dca0a0775f562c>.
- Wang, Dingyi, Tingting Zhang, Xudong Guo, Dayi Ling, Ligang Hu, and Guibin Jiang. 2023. "The Potential of 3D Printing in Facilitating Carbon Neutrality." *Journal of Environmental Sciences* 130 (August): 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.10.024>.

- Wang, Xiaolin, and Hao Liang. 2017. "Effects of Pore-Size Distribution on Sound Absorption of Material Fabricated by Additive Manufacturing." In *24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017, July 23, 2017 - July 27, 2017*, ANV; Cirrus Research Plc; Orion. 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017. London, United Kingdom: International Institute of Acoustics and Vibration, IIAV.
- Wang, Y., J. Sultana, M.M. Rahman, A. Ahmed, A. Azam, R.T. Mushtaq, and M. Rehman. 2022. "A Sustainable and Biodegradable Building Block: Review on Mechanical Properties of Bamboo Fibre Reinforced PLA Polymer Composites and Their Emerging Applications." *Fibers and Polymers* 23 (12): 3317–42. <https://doi.org/10.1007/s12221-022-4871-z>.
- Xiao, Yu, and Maria Watson. 2019. "Guidance on Conducting a Systematic Literature Review." *Journal of Planning Education and Research* 39 (1): 93–112. <https://doi.org/10.1177/0739456X17723971>.
- Yan, S., J. Wu, J. Chen, Q. Mao, and X. Zhang. 2021. "Design of Honeycomb Microperforated Structure with Adjustable Sound Absorption Performance." *Shock and Vibration* 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6613701>.
- Yavuz, E., B. Çolakoğlu, and B. Aktaş. 2018. "From Pattern Making to Acoustic Panel Making Utilizing Shape Grammars." In , 2:477–86. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85128235400&partnerID=40&md5=f004bf84939dc600a8b72499c526dea8>.
- Yi, Li, Moritz Glatt, Praveen Sridhar, Kristin de Payrebrune, Barbara S. Linke, Bahram Ravani, and Jan C. Aurich. 2020. "An Eco-Design for Additive Manufacturing Framework Based on Energy Performance Assessment." *Additive Manufacturing* 33 (May): 101120. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101120>.
- Yuan, Philip F., Zhewen Chen, and Liming Zhang. 2019. "Design Optimum Robotic Toolpath Layout for 3-D Printed Spatial Structures." In *The International Conference on Computational Design and Robotic Fabrication*, 322–30. Springer.
- Zboinska, Malgorzata A., Isac Mjörnell, Sebastian Oguz, Rebecka Rudin, and Toste Skånberg Dahlstedt. 2022. "Non-Standard Robotic 3D Printing for Architects - A Comprehensive Digital Fabrication Lab Pedagogy Integrating Non-Programmable Material Effects." In , 19–28. Ghent, Belgium. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.1.019>.
- Zhang, Han, Tong Liu, Lu Lu, Xiling Yao, Shaoying Li, and Shangqin Yuan. 2021. "Multi-Axis Toolpath Planning for Extrusion-Based Polymer 3D Printing: Review and Prospective." In , 402–6. IEEE.
- Zhang, Zhao. 2022. "A Review on Additive Manufacturing of Wave Controlling Metamaterial." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–34.
- Zhao, G., G. Ma, J. Feng, and W. Xiao. 2018. "Nonplanar Slicing and Path Generation Methods for Robotic Additive Manufacturing." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96 (9–12): 3149–59. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1772-9>.
- Zheng, Li-Yang, Xiu-Juan Zhang, Ming-Hui Lu, Yan-Feng Chen, and Johan Christensen. 2021. "Knitting Topological Bands in Artificial Sonic Semimetals." *Materials Today Physics* 16 (January): 100299. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100299>.
- Zhu, Y., Z. Qu, R. Liu, and H. Peng. 2020. "The Effect of the Pore Size and Shape on Acoustic Absorption of Porous Materials." *Zhongshan Daxue Xuebao/Acta Scientiarum Natralium Universitatis Sunyatseni* 59 (1): 71–76. <https://doi.org/10.13471/j.cnki.acta.snus.2020.01.009>.
- Zieliński, T.G., N. Dauchez, T. Boutin, M. Leturia, A. Wilkinson, F. Chevillotte, F.-X. Bécot, and R. Venegas. 2022. "Taking Advantage of a 3D Printing Imperfection in the Development of Sound-Absorbing Materials." *Applied Acoustics* 197. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108941>.
- Zieliński, Tomasz G, Kamil C Opiela, Piotr Pawłowski, Nicolas Dauchez, Thomas Boutin, John Kennedy, Daniel Trimble, Henry Rice, Bart Van Damme, and Gwenael Hannema. 2020. "Reproducibility of Sound-Absorbing Periodic Porous Materials Using Additive Manufacturing Technologies: Round Robin Study." *Additive Manufacturing* 36: 101564.

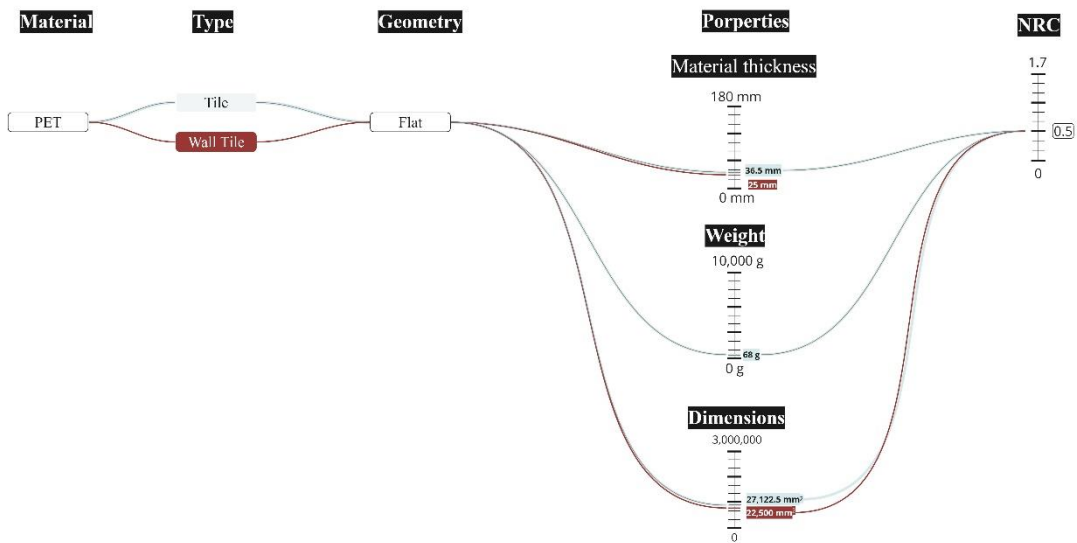
נספחים

נספח 1 – טבלאות סיקור מוצרי מדף אקוסטיים על פי סיווג חומר וביצוע.

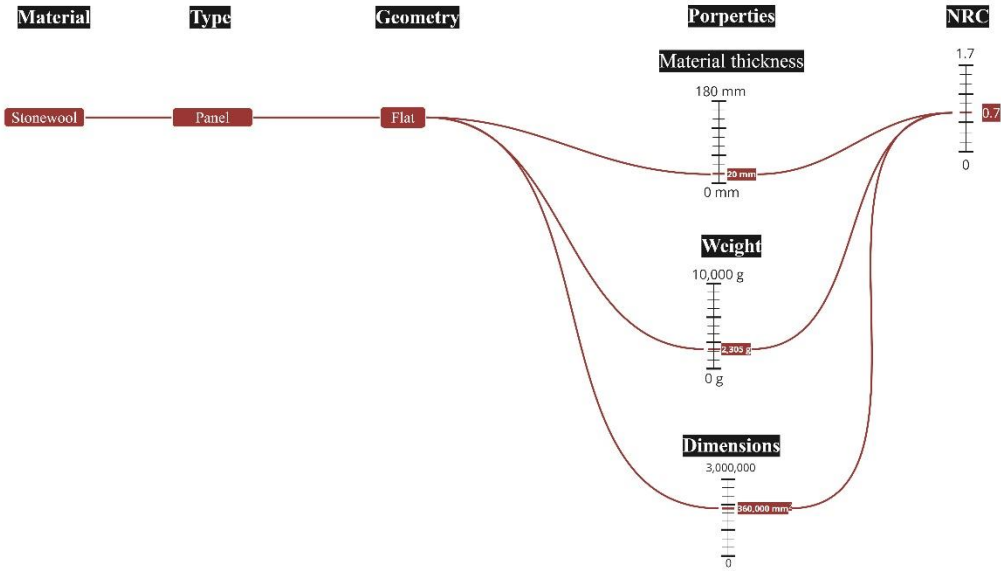
נספח 1.1 - PET Felt



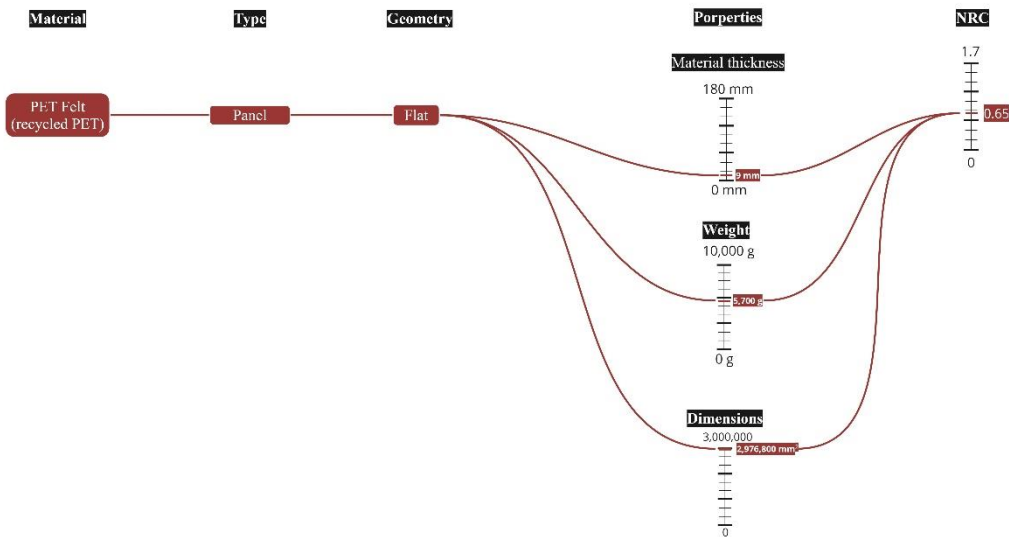
נספח 1.2 - PET



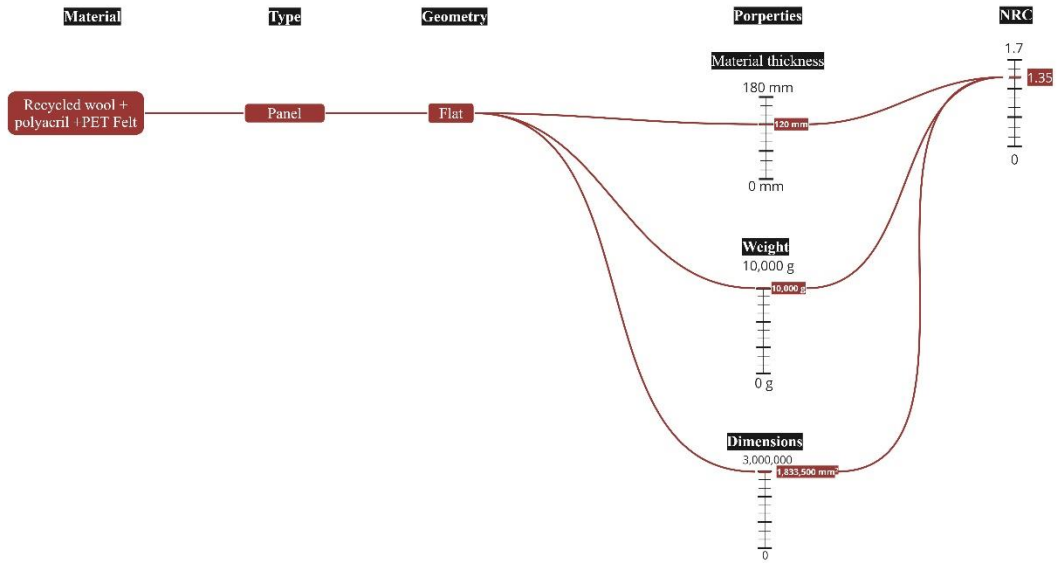
**Stonewool - 1.3 ηφον**



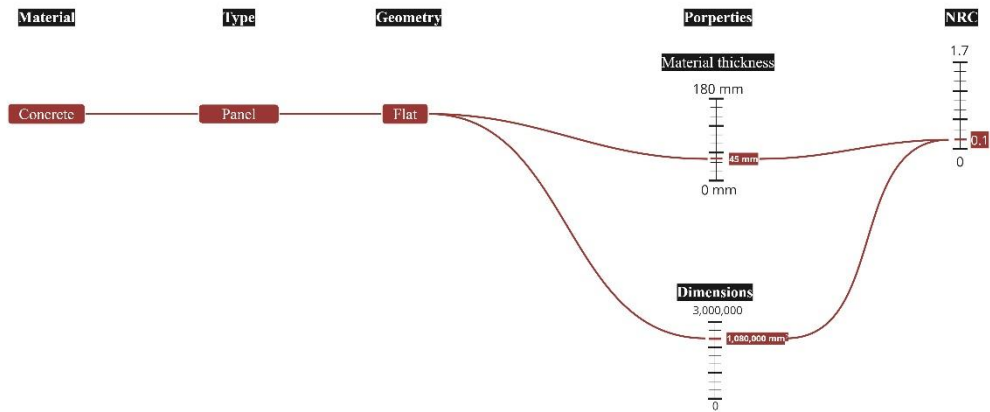
**PET Felt (Recycled PET) - 1.4 ηφον**



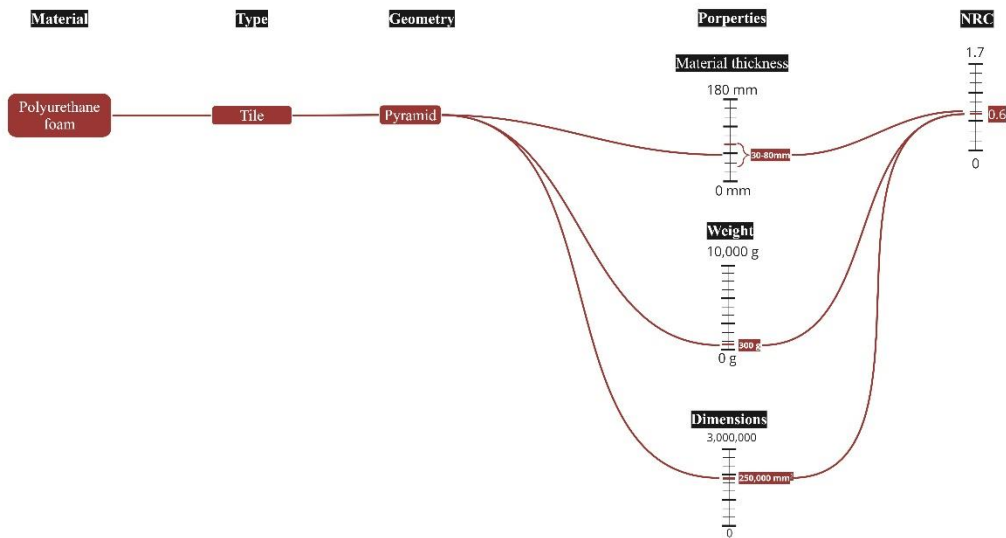
## Recycled Wool + Polyacril + PET Felt - 1.5 נפח



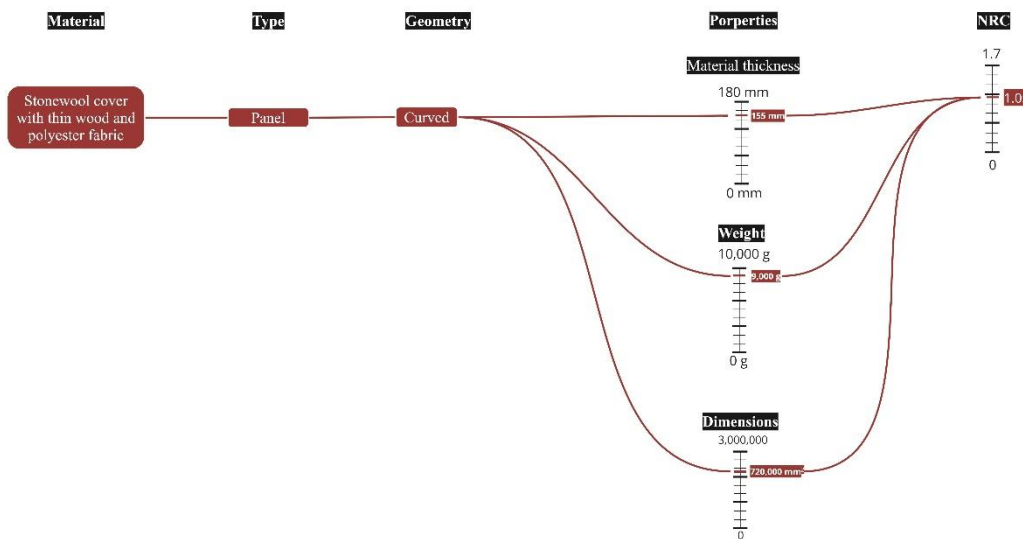
## Concrete - 1.6 נפח



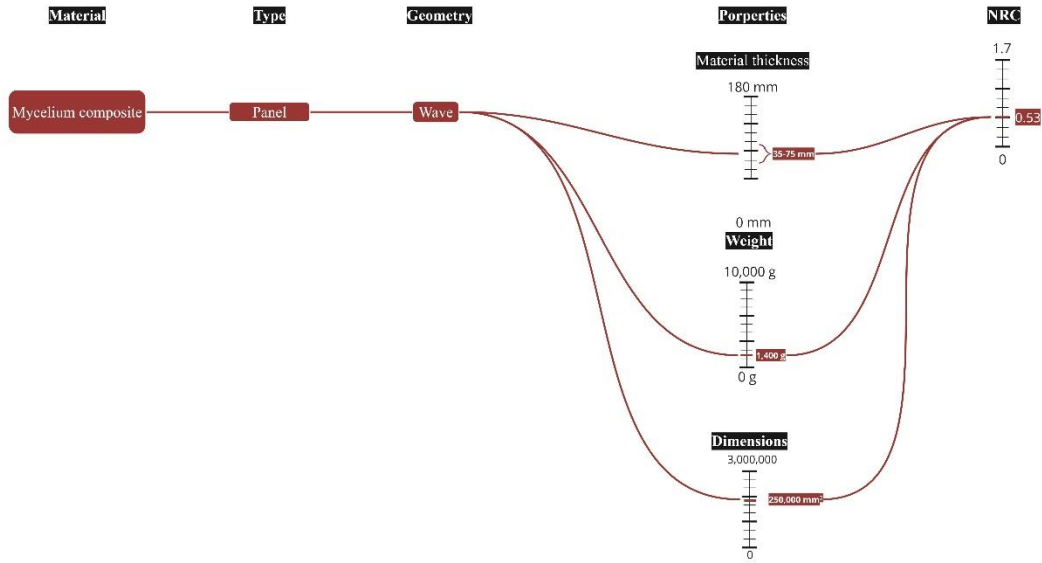
## Polyurethane Foam - 1.7 תפוז



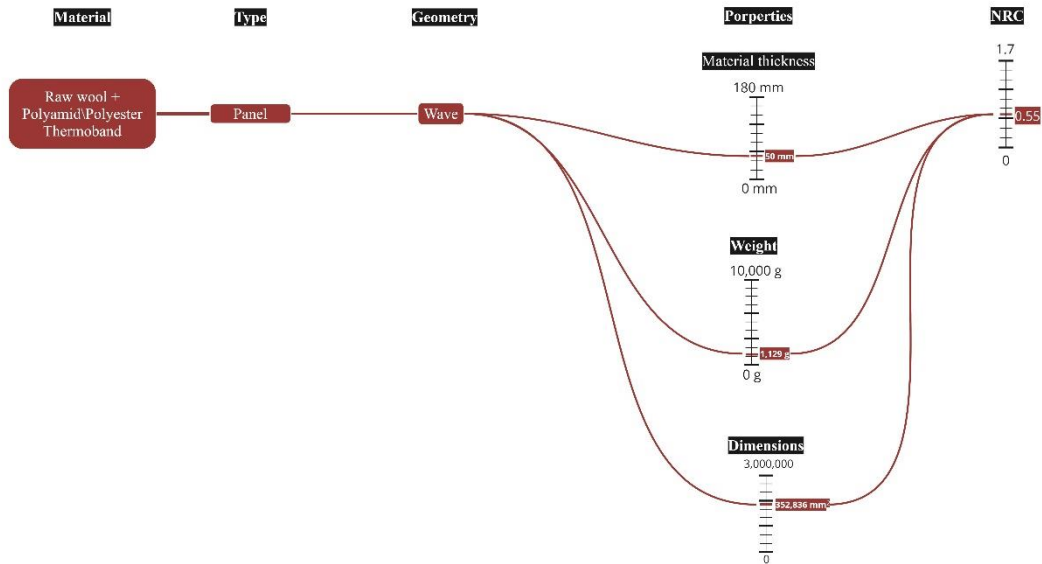
## Stonewool cover with thin wood and polyester fabric - 1.8 תפוז



### Mycelium Composite - 1.9 תפוק



### Raw wool + Polyamid/Polyester Thermoband - 1.10 תפוק



# נספח 2 – טבלאות ביצועי ספיגה אקוסטית למיקרו-סטרוקטורה שפותחו

## נספח 2.1 – EZQ Planar Jones 462

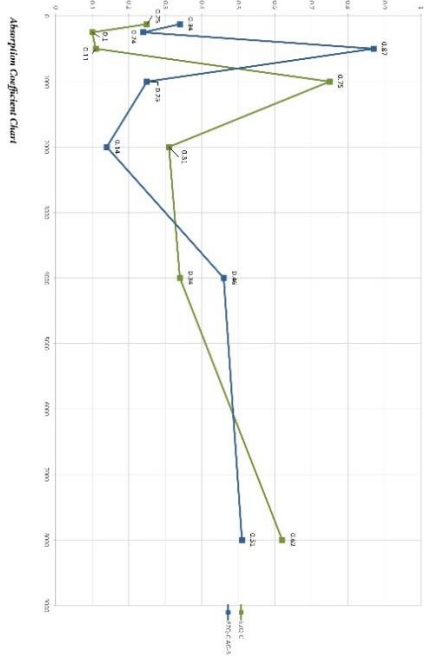
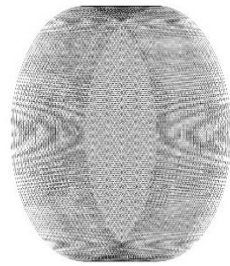
### EZQ\_PlanarJones\_462

Type	Planar Jones
Material	EZQ
Infill	4,612
Nozzle	1.5
Disk radius Size	46 mm / 24 mm
Printing Temp	270 / 270
Bed Temp	60 / 60
Flow	70 / 70
Printing Speed	75 / 30
Weight	148 g / 14 g
Printing Time	87 min / 18 min

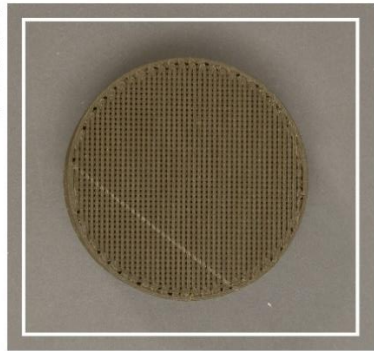
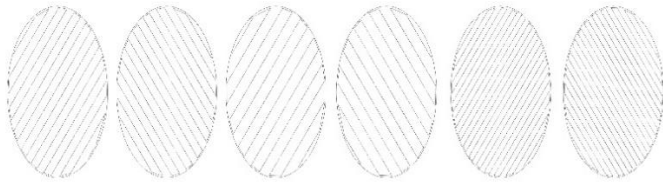
Avg. NRC: 0.30

Printing Parameters

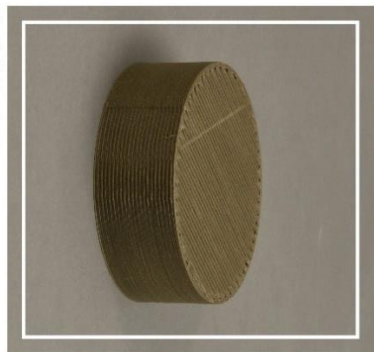
Isometric (CA) file



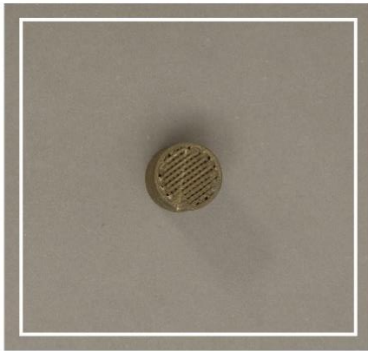
Structure Sections



Disk Radius Size: 60mm Top



Disk Radius Size: 60mm Isometric



Disk Radius Size: 24mm Top



Disk Radius Size: 24mm Isometric

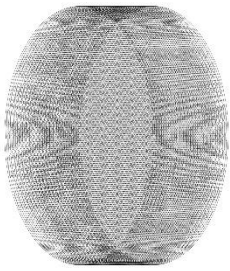
# EZQ Planar Jones 684 – 2.2 684

## EZQ\_PlanarJones\_684

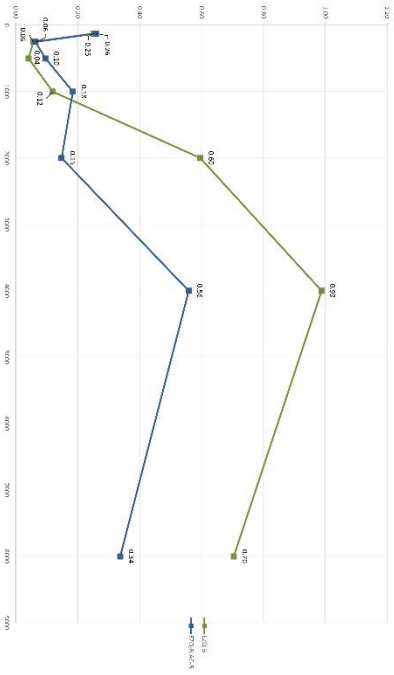
Type		Planar Jones	
Material	EZQ		
Infill	6,8,7		
Node	1,5		
Disk Radius Size	46 mm	24 mm	
Printing Temp	210	205	
Bed Temp	60	60	
Flow	70	70	
Printing Speed	25	30	
Weight	97 g	11 g	
Pending Time	30 min	10 min	

Avg. NRC: 0.2

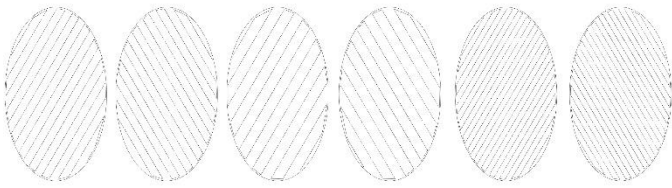
Printing Parameters



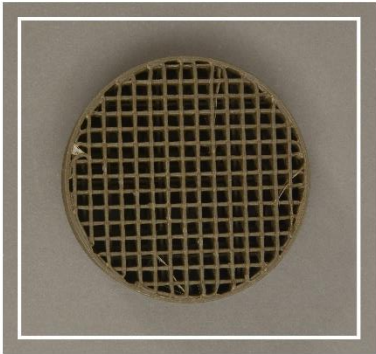
Isometric CAD File



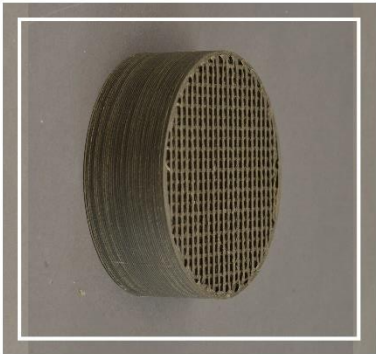
Absorption Coefficient Chart



Structure Sections



Disk Radius Size from Top



Disk Radius Size from Isometric



Disk Radius Size 2mm Top



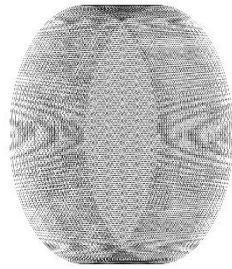
Disk Radius Size 3mm Isometric

# EZQ Planar Jones 8106 – 2.3 ηφασ

## EZQ\_PlanarJones\_8106

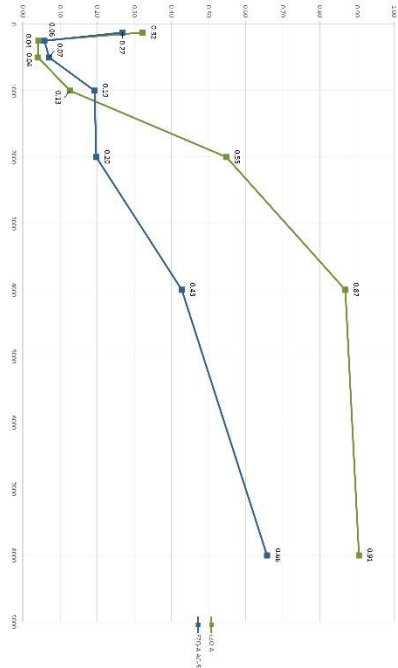
Type	Planar Jones	
Material	EZQ	
Infill	8,10,6	
Nozzle	1.5	
Disk Radius Size	46 mm	24 mm
Printing Temp	200	190
Bed Temp	60	60
Flow	70	80
Printing Speed	25	/0
Weight	77 g	8 g
Printing Time	40 min	8 min

Avg. NRC: 0.2

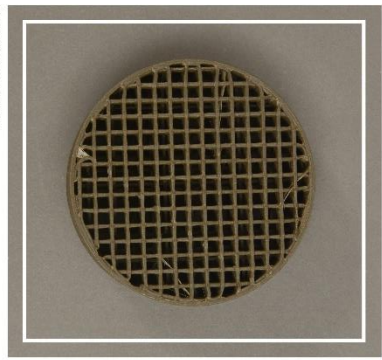
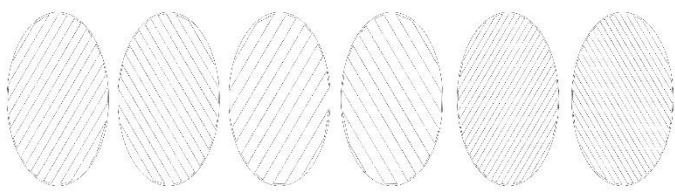


Isometric CAD file

Printing Parameters



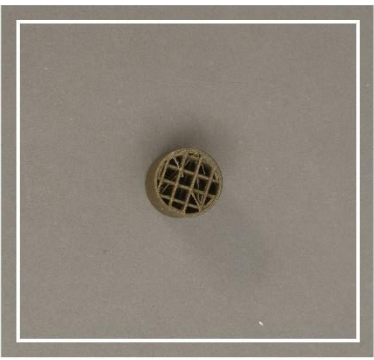
Strategic Sections



Disk Radius Size 46mm Top



Disk Radius Size 46mm Isometric



Disk Radius Size 24mm Top



Disk Radius Size 24mm Isometric

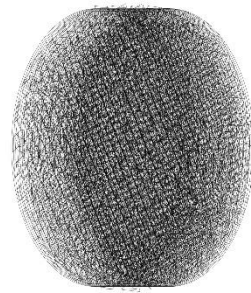
# EZQ Planar Zig Zag 462 – 2.4 ηφωσ

## EZQ\_PlanarZigZag\_462

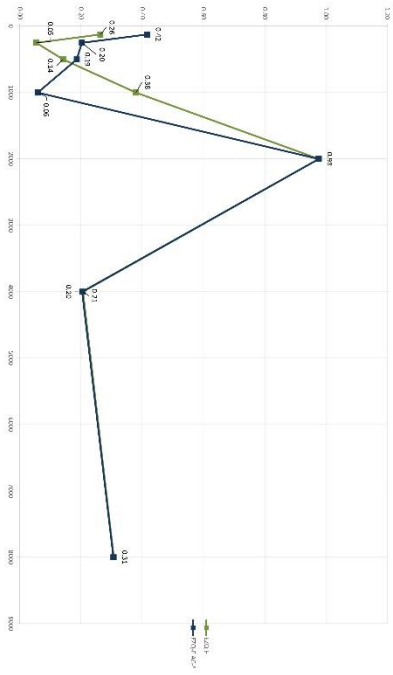
Type	Planar Zig Zag	
Material	EZQ	
Infill	4, 6, 2	
Nozzle	1.5	
Disk Radius Size	46 mm	24 mm
Printing Temp	200	200
Bed Temp	60	60
Flow	75	75
Printing Speed	18	25
Weight	189 g	14 g
Printing Time	120 min	17 min

Avg. NRC: 0.40

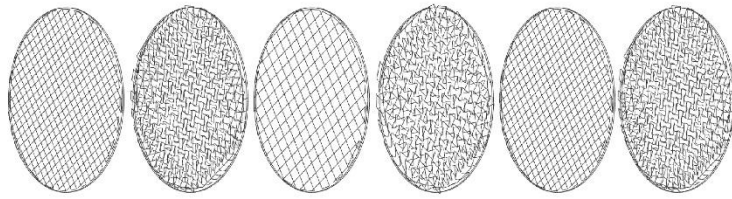
Printing Parameters



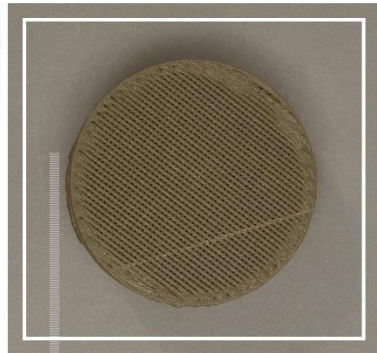
Isometric CAD file



Absorption Coefficient Chart



Structure Sections



Disk Radius Size 46mm Top



Disk Radius Size 46mm Isometric



Disk Radius Size 24mm Top

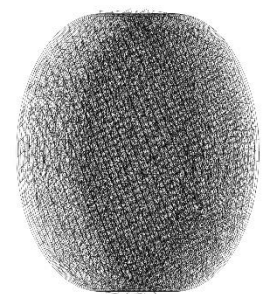


Disk Radius Size 24mm Isometric

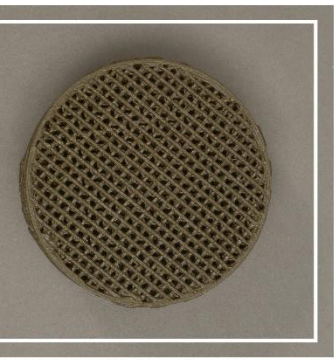
# EZQ Planar Zig Zag 684 - 2.5 φ

## EZQ\_PlanarZigZag\_684

Type	Planar Zig Zag	
Material	EZQ	
Infill	6, 8, 4	
Nozzle	1.5	
Disk Radius Size	46 mm	24 mm
Printing Temp	200	200
Bed Temp	60	60
Flow	75	75
Printing Speed	18	18
Weight	139 g	13 g
Printing Time	39 min	11 min



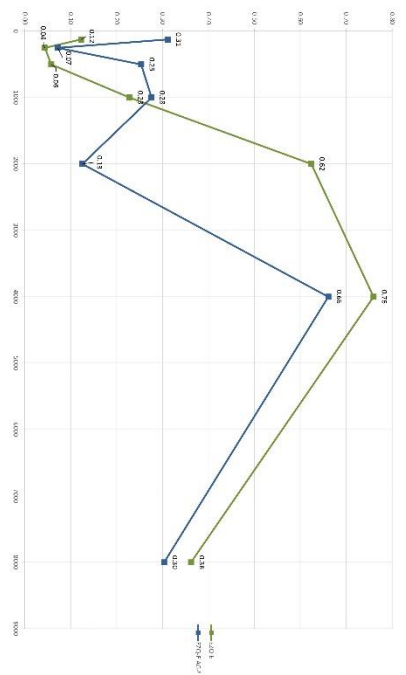
Isometric CAD file



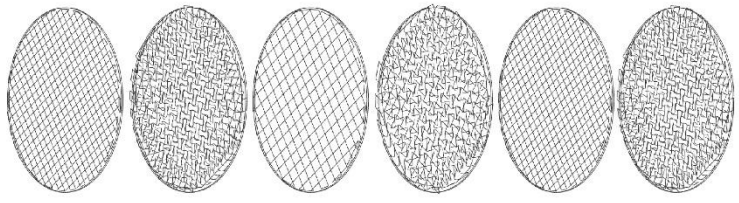
Disk Radius Size 46mm Top



Disk Radius Size 46mm Isometric



Asymptotic Coefficient Chart



Structure Sections



Disk Radius Size 24mm Top



Disk Radius Size 24mm Isometric

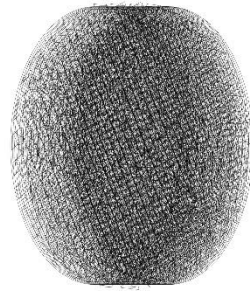
# EZQ Planar Zig Zag 8106 - 2.6 ɱɔɔɓ

## EZQ\_PlanarZigZag\_8106

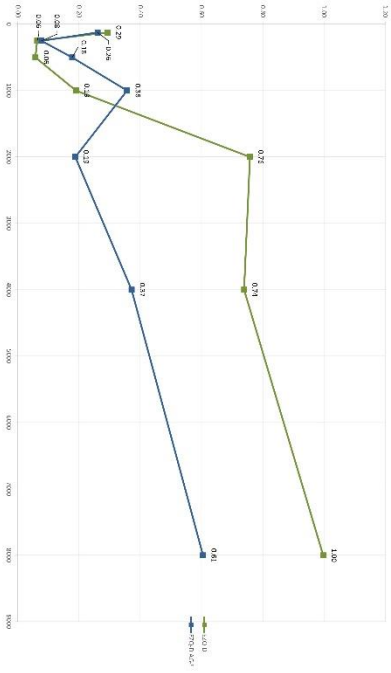
Type	Planar Zig Zag
Material	EZQ
Infill	8,10,6
Nozzle	1.5
Disk Radius Size	46 mm 24 mm
Printing Temp	200 190
Bed Temp	60 60
Flow	75 75
Printing Speed	18 25
Weight	119 g 12 g
Printing Time	86 min 14 min

Avg. NRC: 0.25

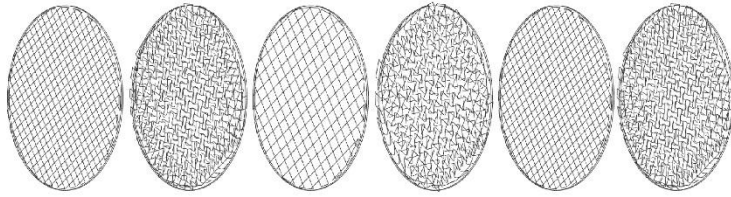
Printing Parameters



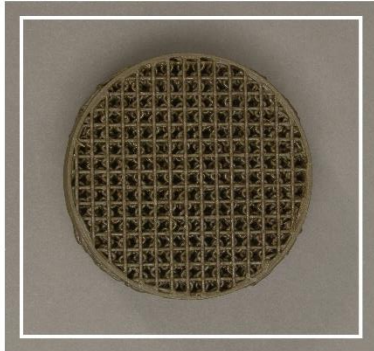
Isometric CAD file



Absorption Coefficient Chart



Structure Sections



Disk Radius Size 46mm Top



Disk Radius Size 46mm Bottom



Disk Radius Size 24mm Top



Disk Radius Size 24mm Bottom

EZQ Non-Planar 684 - 2.7 תפוס

EZQ\_NonPlanar\_684

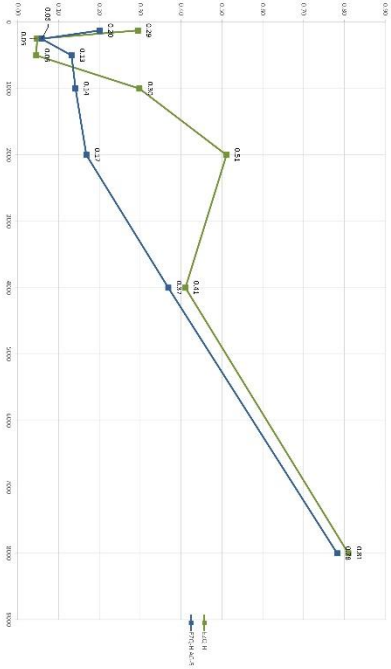
Type	Non Planar
Material	EZQ
Infill	6, 8, 4
Nozzle	1.5
Disk Radius Size	48 mm 24 mm
Printing Temp	200 200
Bed Temp	60 60
Flow	150 150
Printing Speed	20 25
Weight	120 g 14 g
Printing Time	100 min 20 min

Avg. NRC: 0.25

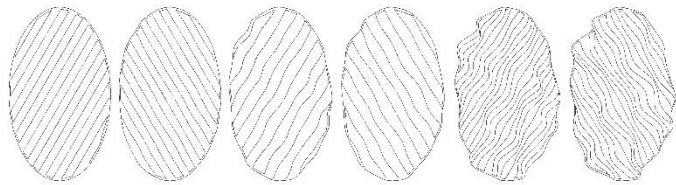
Printing Parameters



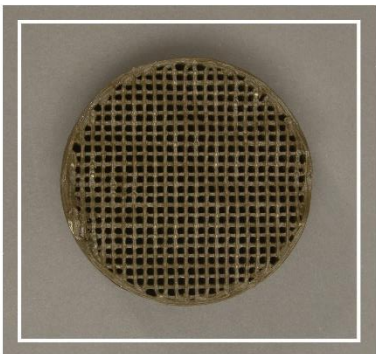
Isometric CAD file



Absorption Coefficient Chart



Structure Sections



Disk Radius Size 48mm Top



Disk Radius Size 48mm Isometric



Disk Radius Size 24mm Top



Disk Radius Size 24mm Isometric

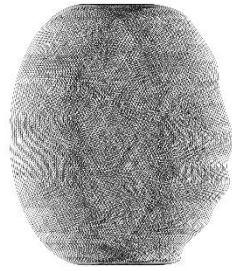
# EZQ Non-Planar 8106 - 2.8 mm φ

## EZQ\_NonPlanar\_8106

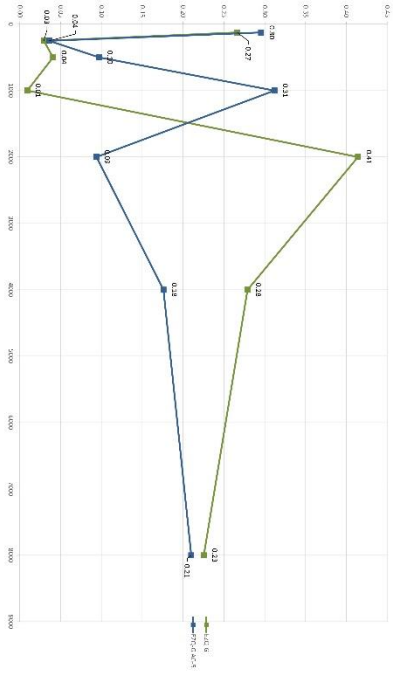
Type	Non Planar
Material	EZQ
Infill	8,10,6
Nozzle	1.5
Disk Radius Size	48 mm 24 mm
Printing Temp	200 200
Bed Temp	60 60
Flow	150 150
Printing Speed	20 25
Weight	133 g 115
Printing Time	100 min 18 min

Avg. NRC: 0.10

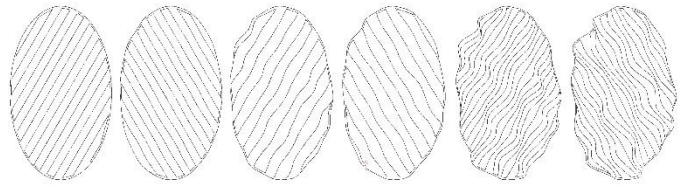
Printing Parameters



Isometric CAD file



Aspheric Coefficient Chart



Strategic Sections



Disk Radius Size 48mm Top



Disk Radius Size 48mm Isometric



Disk Radius Size 24mm Top



Disk Radius Size 24mm Isometric

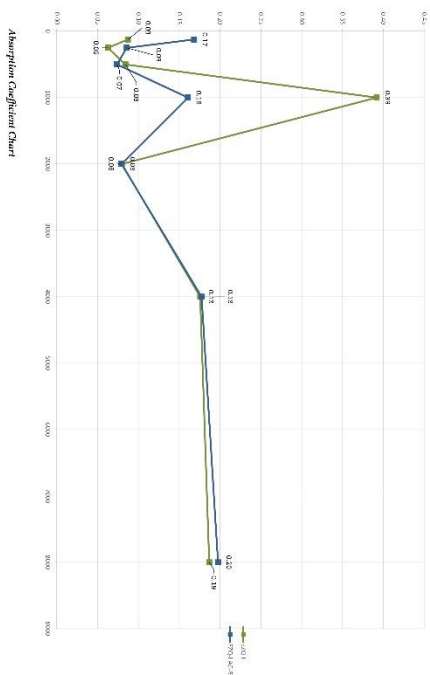
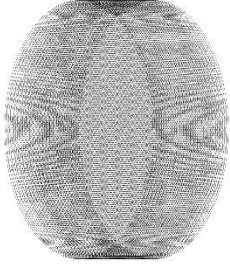
# EZQ Full Disc – 2.9 גרם

## EZQ\_FullDisc

Type	FullDisc
Material	EZQ
Infill	Full Disc
Nozzle	0.8
Disc Radius Size	48 mm 24 mm
Printing Temp	210 210
Bed Temp	60 60
Flow	80 80
Printing Speed	60 60
Weight	240 g 18g
Printing Time	528 min 57 min

Printing Parameters

Isometric CAD file



Disc Radius Size 48mm Top



Disc Radius Size 48mm Isometric



Disc Radius Size 24mm Top



Disc Radius Size 24mm Isometric

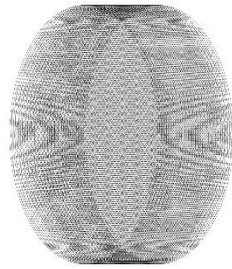
Bio-PETG Planar Jones 684 – 2.10 684

**BiOPETG\_PlanarJones\_684**

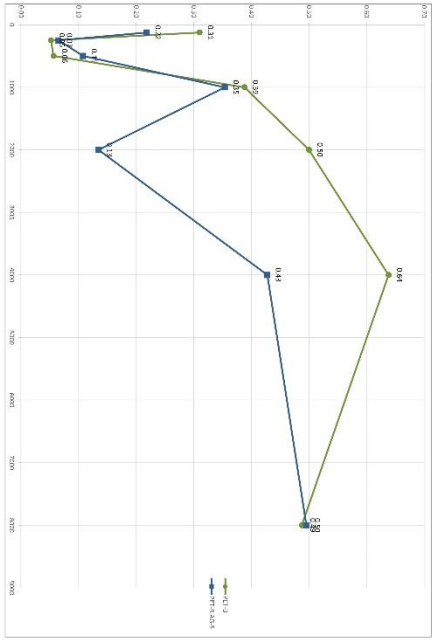
Type	Planar Jones
Material	PE10
Infill	6, 8, 4
Nozzle	1.5
Disk Radius Size	46 mm      24 mm
Printing Temp	220
Bed Temp	75
Flow	55
Printing Speed	20
Weight	91g      10g
Printing Time	80 min      12 min

Avg. NRC: 0.25

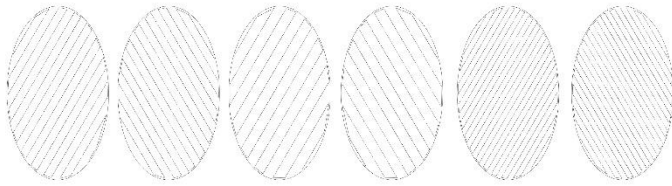
Printing Parameters



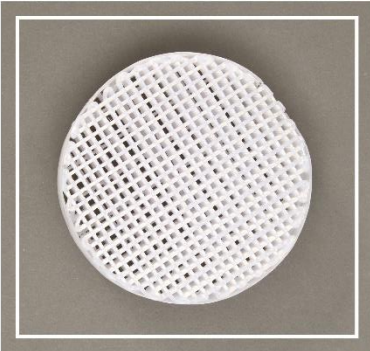
Isometric CAD file



Absorption Coefficient Chart



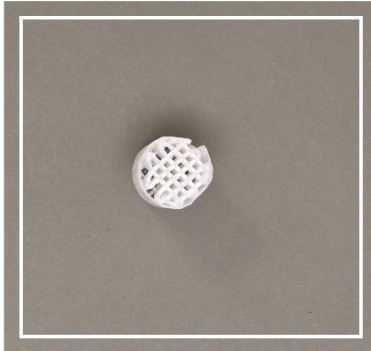
Structure Sections



Disk Radius Size 46mm Top



Disk Radius Size 46mm Isometric



Disk Radius Size 24mm Top



Disk Radius Size 24mm Isometric

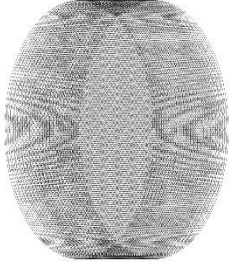
# Bio-PETG Planar Jones 8106 - 2.11 2021

## BiOPETG\_PlanarJones\_8106

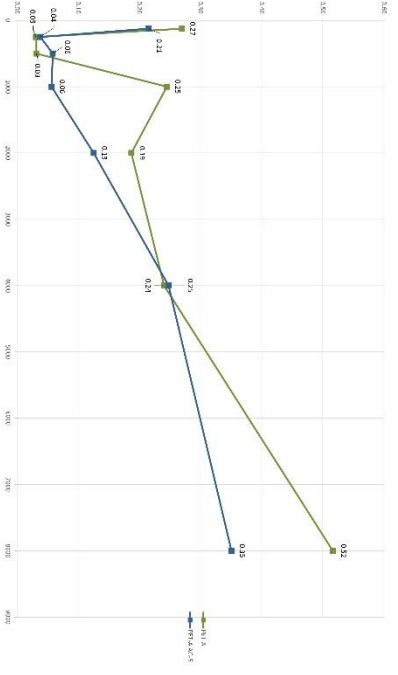
Type	Planar Jones	
Material	PETG	
Infill	8,10,6	
Nozzle	1.5	
Disk Radius Size	46 mm	24 mm
Printing Temp	220	220
Bed Temp	75	75
Flow	60	60
Printing Speed	20	20
Weight	71g	9g
Printing Time	83 min	12 min

Avg. NRC: 0.25

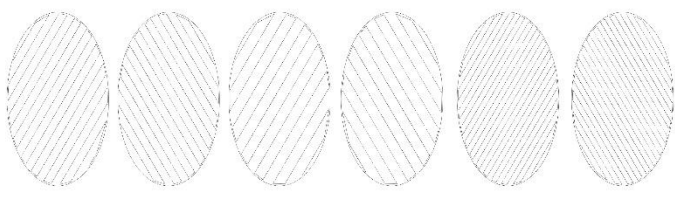
Printing Parameters



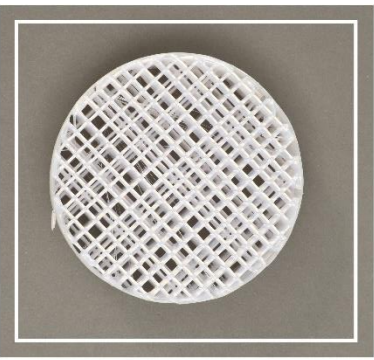
Isometric CAD file



Absorption Coefficient Chart



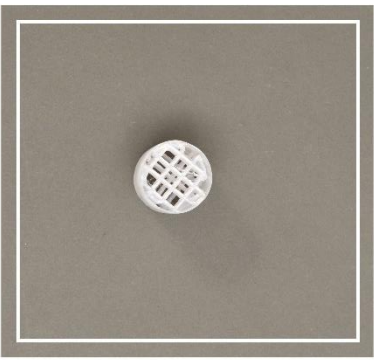
Strategic Sections



Disk Radius Size 46mm Top



Disk Radius Size 46mm Isometric



Disk Radius Size 24mm Top



Disk Radius Size 24mm Isometric

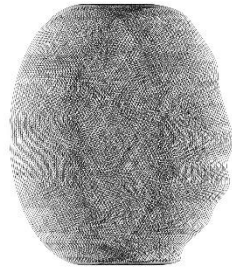
Bio-PETG Non-Planar 8106 - 2.12 2021

**Biopetg\_NonPlanar\_8106**

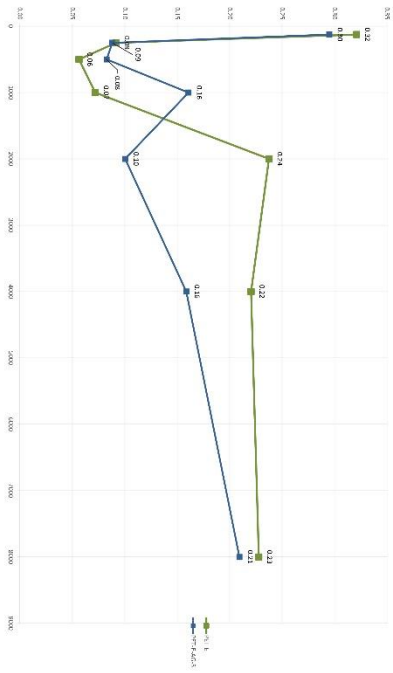
Type	NonPlanar
Material	PETG
Infill	8,10,6
Nozzle	1.5
Disk Radius Size	46 mm 24 mm
Printing Temp	220 220
Bed Temp	75 75
Flow	95 95
Printing Speed	20 20
Weight	80g 9g
Printing Time	81 12

**Avg. NRC: 0.1**

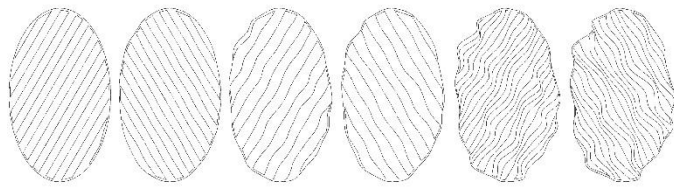
Printing Parameters



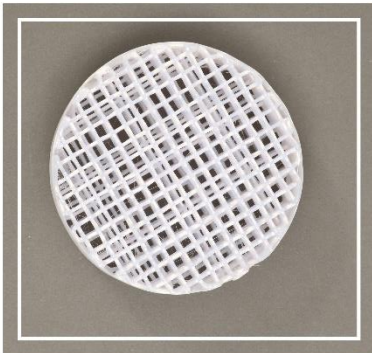
Isometric CAD file



Absorption Coefficient Chart



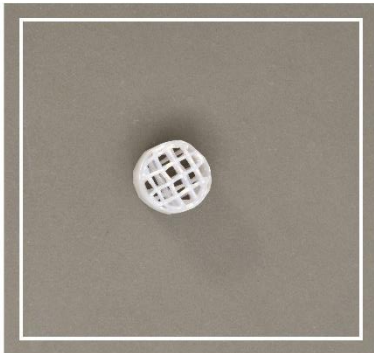
Structure Sections



Disk Radius Size 66mm Top



Disk Radius Size 66mm Isometric



Disk Radius Size 24mm Top



Disk Radius Size 24mm Isometric

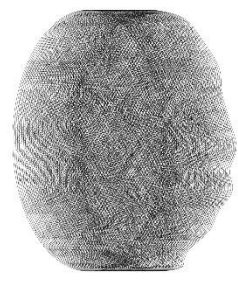
PLA Non-Planar Zig Zag 684 - 2.13 6801

PLA\_NonPlanar\_ZigZag\_684

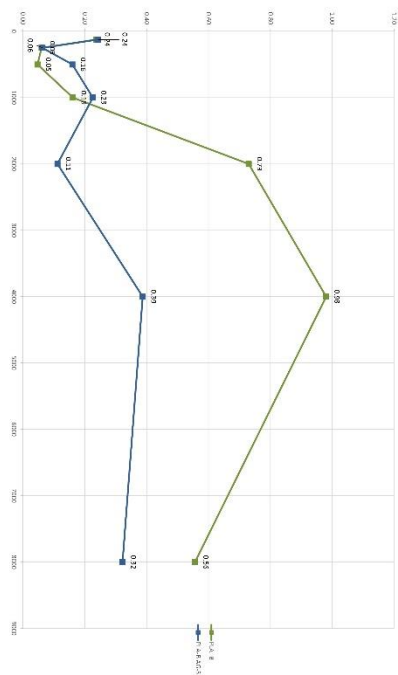
Type	Non Planar Zig Zag
Material	PLA
Infill	6, 8, 4
Nozzle	1.5
Disk Radius Size	46 mm 24 mm
Printing Temp	210 210
Bed Temp	60 60
Flow	150 150
Printing Speed	20 20
Weight	11g 10g
Printing Time	150 min 14 min

Avg. NRC: 0.25

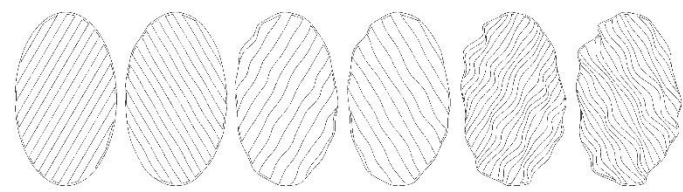
Printing Parameters



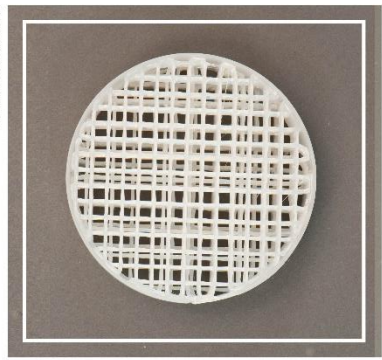
Isometric CAD file



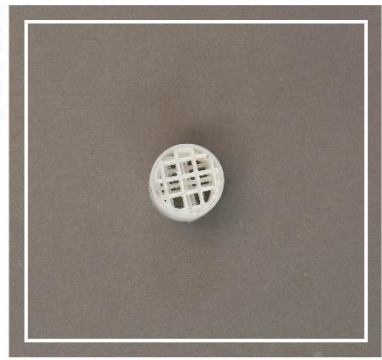
Absorption Coefficient Chart



Strategic Sections



Disk Radius Size 46mm Top



Disk Radius Size 24mm Top



Disk Radius Size 46mm Isometric

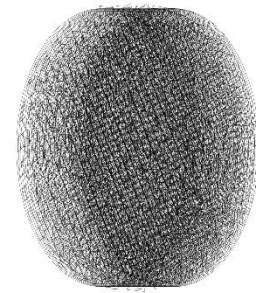


Disk Radius Size 24mm Isometric

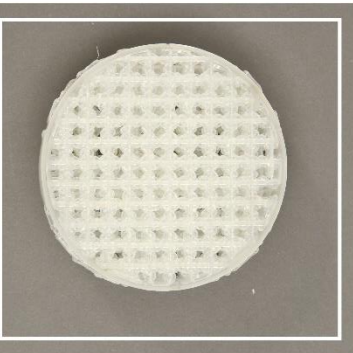
# PLA Planar Zig Zag 8106 - 2.14 תפוס

## PLA\_PlanarZigZag\_8106

Type	Planar Zig Zag
Material	PLA
Infill	8,10,6
Nozzle	1.5
Disk Radius Size	46 mm 24 mm
Printing Temp	210 210
Bed Temp	60 60
Flow	75 75
Printing Speed	18 25
Weight	119g 11g
Printing Time	86 min 14 min



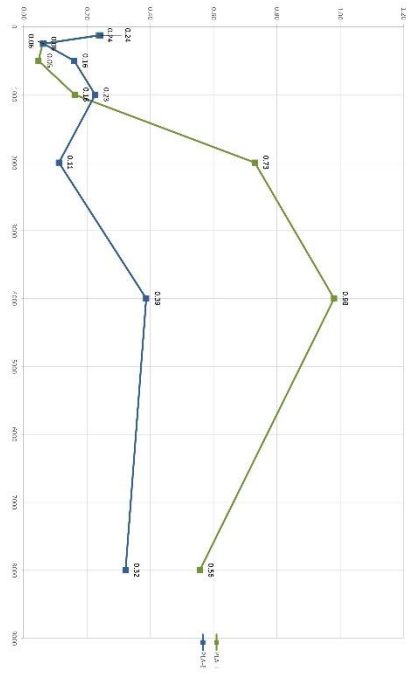
Isometric CAD file



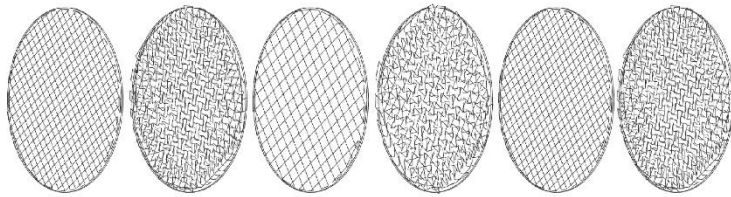
Disk Radius Size 46mm Top



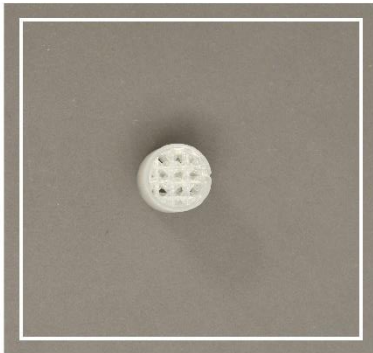
Disk Radius Size 46mm Isometric



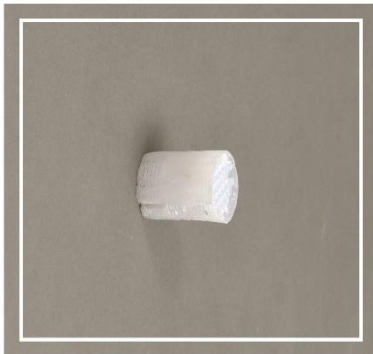
Absorption Coefficient Chart



Structure Sections



Disk Radius Size 24mm Top



Disk Radius Size 24mm Isometric

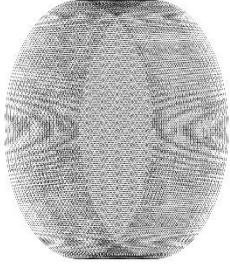
PLA Planar Jones 8106 - 2.15 φ

PLA\_PlanarJones\_8106

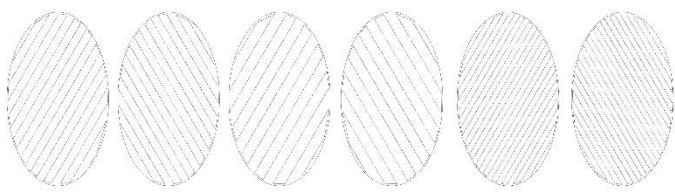
Type	Planar Jones
Material	PLA
Infill	81,06
Nozzle	1.5
Disk Radius Size	48 mm 24 mm
Printing Temp	210 210
Bed Temp	60 60
Flow	70 80
Printing Speed	25 70
Weight	79g 9g
Printing Time	45 min 8 min

Avg. NRC: 0.15

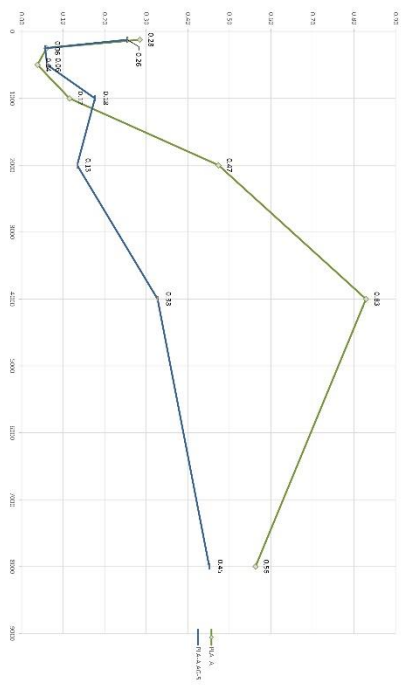
Printing Parameters



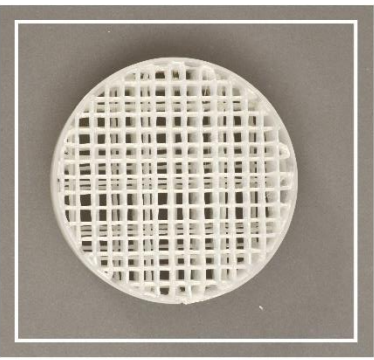
Isometric CAD file



Strategic Sections



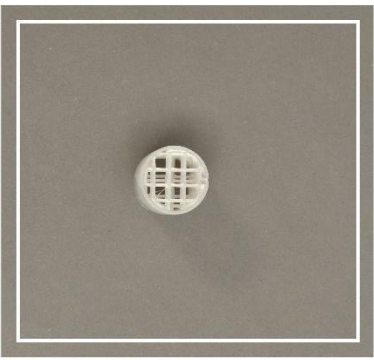
Absorption Coefficient Chart



Disk Radius Size 48mm Top



Disk Radius Size 24mm Isometric



Disk Radius Size 24mm Top



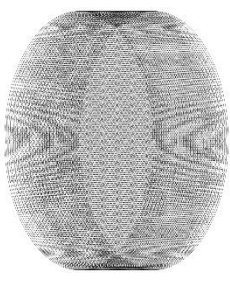
Disk Radius Size 24mm Isometric

# Bio-PETG Full Disc – 2.16 ηφωσ

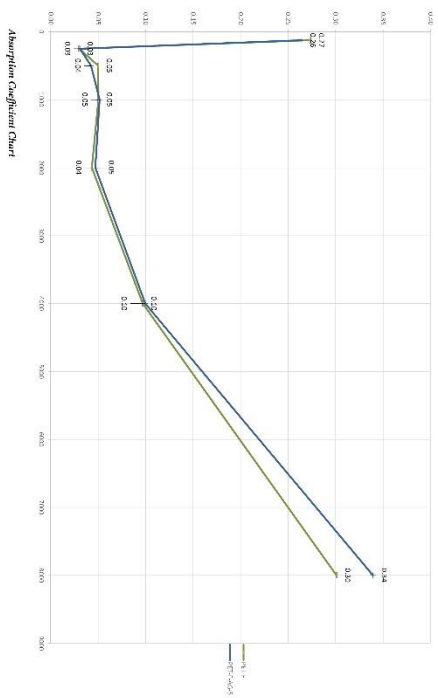
## BioPetg\_FullDisc

Type	Full Disc
Material	PETG
Infill	Full
Nozzle	0.8
Disc Radius Size	46 mm 24 mm
Printing Temp	220
Bed Temp	75
Flow	60
Printing Speed	60
Weight	272g 23g
Printing Time	528 min 57 min

Avg. NRC: 0.05



Isometric CAD file



Absorption Coefficient Chart



Disc Radius Size 46mm Top



Disc Radius Size 24mm Isometric



Disc Radius Size 24mm Top



Disc Radius Size 24mm Isometric

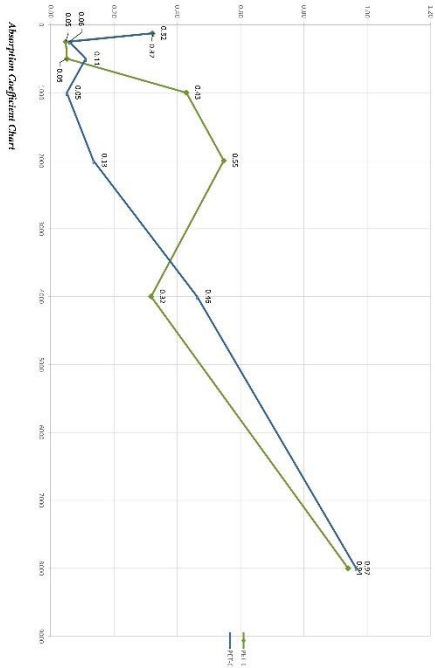
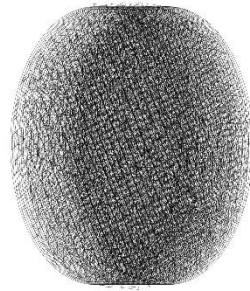
Bio-PETG Planar Zig Zag 8106 - 2.17 תפוח

**Biopetg\_PlanarZigZag\_8106**

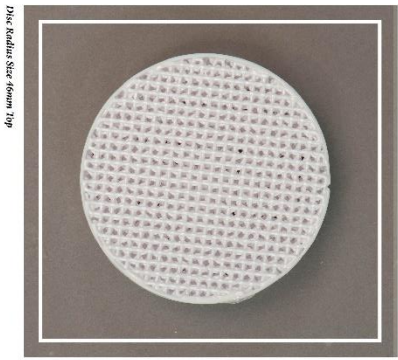
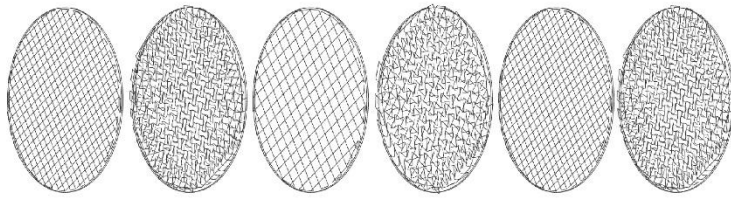
Type	Planar Zig Zag
Material	PETG
Infill	8106
Nozzle	1.5
Disk Radius Size	46 mm 24 mm
Printing Temp	220 220
Bed Temp	75 75
Flow	95 95
Printing Speed	13 13
Weight	87% 12
Printing Time	105 14

Printing Parameters

Isometric CAD file



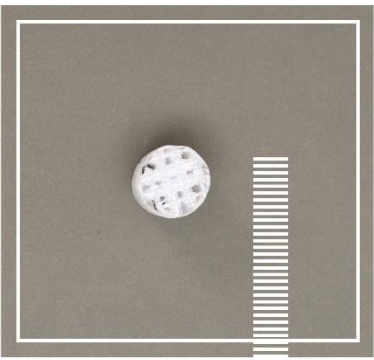
Structure Sections



Disk Radius Size 46mm Top



Disk Radius Size 46mm Isometric



Disk Radius Size 24mm Top

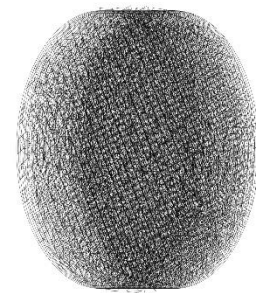


Disk Radius Size 24mm Isometric

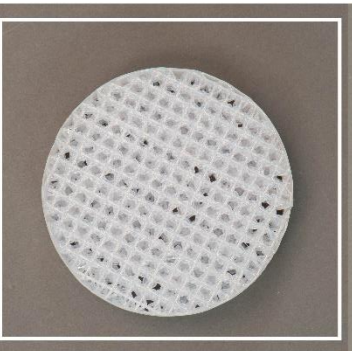
# Bio-PETG Planar Zig Zag 684 – 2.18 mm

## Biopetg\_PlanarZigZag\_684

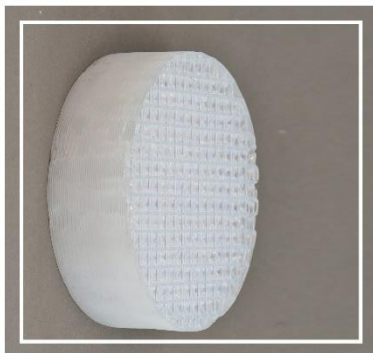
Type	Planar Zig Zag
Material	PETG
Infill	6, 8, 4
Nozzle	1.5
Disk Radius Size	46 mm 24 mm
Printing Temp	220 220
Bed Temp	75 75
Flow	95 95
Printing Speed	13 13
Weight	44g 12
Printing Time	95 11



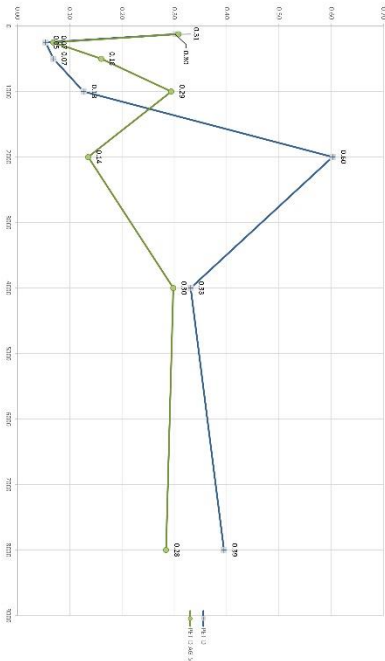
Isometric CAD file



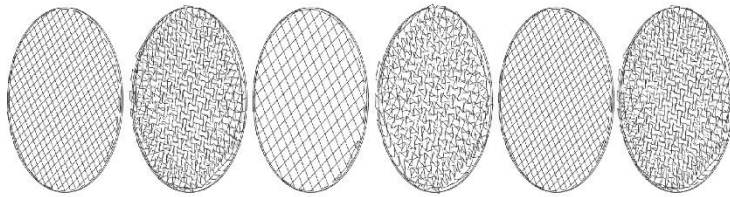
Disk Radius Size 46mm Top



Disk Radius Size 24mm Top



Absorption Coefficient Chart



Structure Sections



Disk Radius Size 24mm Top



Disk Radius Size 24mm Isometric

## **Abstract**

Similar to recent manufacturing developments in parallel industries (automotive, space, and agriculture), attention is now shifting towards the construction industry as well. This can be seen in the field of plastics, which is widely used in the production of roofing, pipes, coverings, sheets, profiles, and more. The primary issue today lies in the common plastic compounds used in the construction industry, which are derived from petrochemical industry byproducts. Most of these products do not decompose in the soil after use, emit greenhouse gases, and fail to align with global sustainability goals and regulations.

Therefore, a significant amount of research is currently being conducted on the integration of 3D printing technologies and sustainable materials into the construction industry. 3D printing for building components offers substantial raw material savings, eliminates the need for molds, accommodates a wide variety of products with varying scales and complex forms, and allows for the assimilation of new materials.

This research examined the use of selected bioplastic compounds for the construction industry through 3D printing. It reviewed current applications and developed potential uses through a case study involving an acoustic panel. The report provides a comprehensive overview of a computational design-to-fabrication printing workflow and showcases results that target established acoustic standards.



Founded By  
Ministry of Construction  
Technion-Israel Institute of Technology  
Faculty of Civil & Environmental Engineering

מיסודם של  
משרד הבינוי  
הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל  
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה  
National Building Research Institute



2031205

# BIOPLASTIC BASED ADDITIVE FABRICATION

## Robotic Fabrication Workflow of Large-Scale Additive Manufacturing Components Testing the Integration of Bio-Based Plastics Components

Principal Investigator Shany Barath    PhD. Candidate Avraham Cohen, Master  
Candidate Yuval Berger    Research Assistant Alon Nisan

Copyright © 2023 by S. Barath, A. Cohen, Y. Berger and A. Nisan

The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and Development Foundation Limited, Haifa

Haifa

October 2023

National Building Research Institute, Technion City, Haifa 3200003, Israel | המכון הלאומי לחקר הבנייה, קריית הטכניון, חיפה 3200003, ישראל

Fax: 972-4-8324534 . פקס | Tel: 972-4-8292242/3 . טל. | e-mail: nbri@tx.technion.ac.il

<http://nbri.net.technion.ac.il>

