



מדע וטכנולוגיה

תחזיות טכנולוגיות לצורכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי דו"ח שנה ב' בנושא : הדפסת תלת מימד ד"ר דפנה גץ ציפי בוכניק ורד גלעד

סביבה
ואנרגיה

תכנון
ארוך טווח

תעשייה
וחדשנות

תשתיות
פיזיות

בריאות

הון
אנושי

השכלה
גבוהה

חברה

חינוך

כלכלה



תחזיות טכנולוגיות לצורכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי

דוח שנה ב'

בנושא: Additive Manufacturing

הדפסת תלת מימד

מוגש למשרד המדע והטכנולוגיה,
המועצה הלאומית למו"פ

חוקרים:

ד"ר דפנה גץ

ציפי בוכניק

ורד גלעד

פברואר, 2019

אין לשכפל כל חלק מפרסום זה ללא רשות מראש ובכתב ממוסד שמואל נאמן מלבד לצורך ציטוט של קטעים קצרים במאמרי סקירה ופרסומים דומים תוך ציון מפורש של המקור.

הדעות והמסקנות המובאות בפרסום זה הן על דעת המחבר/ים ואינן משקפות בהכרח את דעת

מוסד שמואל נאמן.

3.....	תקציר מנהלים	
5.....	מבוא	1
5.....	הקדמה	1.1
6.....	מטרת המחקר	1.2
6.....	מתודולוגיה	1.3
8....	סקר ספרות הדפסת תלת מימד (AM) 3D Printing / Additive Manufacturing (3DP)	2
8.....	מגמות עולמיות והתפתחות טכנולוגית	2.1
9.....	תעשיות מרכזיות ויישומי תלת מימד	2.2
10.....	שלוש שיטות להדפסת תלת מימד במתכת	2.3
11.....	מגמות מרכזיות שמעצבות את האבולוציה של הדפסת התלת מימד	2.4
12.....	השכלה ומיומנויות	2.5
14.....	מימון מו"פ בתחום הדפסת תלת מימד	2.6
16.....	אתגרים	2.7
18.....	הדפסת תלת מימד בישראל	3
18.....	פרסומים בתחום התלת מימד	3.1
20.....	מיפוי חברות בתחום הדפסת תלת מימד בישראל	3.2
23.....	חברות למדפסות תלת מימד	3.3
23.....	מכוני מחקר יישומיים בתחום התלת מימד	3.4
24.....	חדשנות בתחום התלת מימד בישראל	3.5
25.....	הכשרת כוח אדם לעבודה בתחום הדפסת תלת מימד	4
25.....	הכשרה באוניברסיטאות	4.1
27.....	הכשרה במכללות	4.2
28.....	קורסים במסגרת מוסדות שאינם אקדמיים	4.3
29.....	ממצאי הסקר והראיונות	5
29.....	שאלון מחקר	5.1
32.....	ראיונות	5.2
33.....	תובנות מהראיונות ומהסקר	6
34.....	נספחים	7
34.....	נספח 1: סיכומי ראיונות	7.1
46.....	נספח 2- שאלון שנשלח לכל החברות שעוסקות בתחום תלת מימד	7.2

רשימת איורים

- 8..... איור 1: שוק 3D Printing לפי סקטור ושיעור צמיחה
- 9..... איור 2: תעשיות
- 14..... איור 3: סוגי תהליכים ב-AM השיטה, החומרים והשווקים
- 18..... איור 4: פרסומים בנושא 3DP בישראל ובעולם בשנים 2000-2018*
- 19..... איור 5: דרוג מדינות לפי מספר הפרסומים בנושא 3DP בשנים 2016-2018
- איור 6: דרוג מדינות לפי מספר הפרסומים לנפש בנושא 3DP בשנים 2016-2018 (שיעור הפרסומים של כל מדינה מכלל פרסומי העולם בתחום)
- 20.....
- 21..... איור 7: חברות בתחום התלת מימד בישראל בשנים 1986-2018
- 21..... איור 8: חברות תלת מימד לפי סקטור
- 22..... איור 9: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה
- 22..... איור 10: חברות בתחום התלת מימד לפי Funding Stage (2018)
- 25..... איור 11: מקבלי תארים מהאוניברסיטאות בתחומים אלה בשנים 2011-2016
- 29..... איור 12: גודל החברות שענו לשאלון לפי מספר העובדים בחברה

חשיבותו של תחום הדפסת התלת מימד עלתה בעשור האחרון בישראל ובעולם ויש המגדירים אותה כחלק עיקרי של המהפכה התעשייתית הרביעית. התחום מתקדם ומתפתח במהירות הן מבחינת הטכנולוגיה והן מבחינת חומרי ההדפסה ותופס את מקומו ביותר ויותר תחומים. עד 2020 מצופה של-3DP יהיה שוק של 17 ביליון דולר, וההערכות הן לקצב צמיחה של 25% בשוק ה-3DP בשנים 2014-2020. מדינות רבות הכירו בחשיבות של הדפסת תלת מימד ובצורך בהשקעה לאומית בתחום וכן פעילויות מו"פ הממומנות ע"י ה-EU בתחום הדפסת תלת מימד גדלו בשלושת העשורים האחרונים. בשנים 2007-2013 התבצעו 66 פרויקטים במימון של 160 מיליון אירו. הורייזן 2020 מימן מעל 21 פרויקטים במהלך השנתיים הראשונות של התכנית, בסכום כולל של לפחות 95 מיליון יורו. אין מדינה היום בעולם שלא עושה מאמצים בתחום, שנמדדת במיליארדים.

הדפסת התלת מימד היא טכנולוגיה שחוצה סקטורים. היתרונות הפונקציונאליים המגוונים שלה מספקים ערך מוסף למגזרים שונים והיא משפיעה על טווח גדול של עסקים כדוגמת: אווירונאוטיקה, יהלומים, רפואה ובנייה. התחום קיים גם בתעשייה האווירית ותעשיות ביטחון אחרות.

יש הרבה יזמות, יש הרבה ידע ומובילות בתחום המחשוב ומהבחינות האלה תחום הדפסת תלת מימד מתאים לישראל. בישראל ב-2018 פעלו 36 חברות בתחום הדפסת תלת מימד. 64% מהחברות עוסקות בטכנולוגיות תעשייתיות. רוב החברות קטנות- עובדים בהן עד 50 עובדים ורובן נמצאות בשלב מימון התחלתיים. שלוש מהחברות שפועלות בארץ הן מהחברות הגדולות בעולם למדפסות תלת מימד: סטרטסיס, HP-3D Systems.

בשני מכוני מחקר יישומיים בישראל מתבצע מו"פ בתחום הדפסת תלת מימד: במרכז הפלסטיקה והגומי ובמכון המתכות הישראלי. בימים אלה מתגבשת תכנית שמובילה הרשות לחדשנות לאיחוד שלושת מכוני המחקר היישומיים (מכון הפלסטיקה והגומי, מכון המתכות והמכון לקרמיקה וסיליקטים), שההתמקדות שלו תהיה בתחום הדפסת תלת מימד. תשתיות תלת מימד מתקדמות קיימות במכון פראונהופר Fraunhofer בגרמניה ונבחנת אפשרות לשיתוף פעולה בין מכוני המחקר למכון פראונהופר בתחום זה. בנוסף, קיימת בישראל חדשנות פורצת דרך בתחום הדפסת תלת מימד. בדוח הנוכחי הצגנו דוגמאות לכך.

סקר הספרות שנערך במסגרת המחקר הצביע על כך שבמדינות אירופה מערכות החינוך מתקשות לעקוב אחרי ההתפתחויות המהירות של טכנולוגיות הדפסת התלת מימד וכתוצאה מכך שוק העבודה של הדפסת התלת מימד נמצא בסיכון של חוסר מיומנות בכישורים הנדרשים על מנת לתת מענה לצרכי החברות. מהסקר עולה הצורך בפיתוח מיומנויות חדשות ספציפיות לתהליך הייצור עם מדפסות תלת מימד. בנוסף, קיים צורך במהנדסים בעלי הסמכה בהדפסת תלת מימד על מנת להבטיח רמת ביצוע מקצועית ואמינה וצורך בטכנאים ומפעילים עם מיומנויות חדשות ספציפיות לתהליך הייצור עם מכונות additive.

העבודה הנוכחית כללה ביצוע ראיונות עם אנשי אקדמיה ותעשייה מתחום הדפסת תלת מימד ושאלון שהועבר לחברות העוסקות בתחום. מהראיונות שביצענו ומהתשובות לשאלון עולה שקיים מחסור

במיומנויות בתחום הדפסת התלת מימד. ההשכלה האקדמית של עובדים בתחום התלת מימד הינה מהתחומים: תוכנה, מדעים מדויקים, עיצוב, מנהל עסקים, פיסיקה, כימיה, הנדסת מכונות, הנדסת חשמל, הנדסת חומרים, אורומכניקה, אלקטרוניקה, הנדסה מכאנית ומכטרוניקה.

בחינת ההכשרות הקיימות בתחום הדפסת תלת מימד באקדמיה העלתה שמבחינת התחומים הנדרשים לעיסוק בתלת מימד, לא קיים מחסור בלימודים אקדמיים בתחומים של תוכנה, מכונות, כימיה ובתחום העיצוב. לעומת זאת קיים מחסור בתחומים של הנדסת חומרים, הנדסת פלסטיקה והנדסת אלקטרוניקה. בכל הפקולטות, קיים מחסור בהכשרה שמוכוונת לתחום התלת מימד. לימודים לתואר ראשון בהדפסת תלת מימד מתקיימים רק במכללת שנקר. בשאר המוסדות האקדמיים ההכשרה לתחום ניתנת רק במסגרת קורסים.

העונים לשאלון והמרואינים חושבים שנדרשת הכשרה נוספת לתחום התלת מימד מעבר להכשרה איתה מגיעים העובדים לחברות. רוב החברות מקיימות כיום את ההכשרות הנוספות הנדרשות בתוך החברות. המחסור הרב ביותר שצוין הוא של אנשי פיתוח המתמחים בתתי תחום של מדעי המחשב הנוגעים בדפוס תלת מימד, באנשי חומרים, כימאים, פולימרים, מטלורגים ומהנדסים מיומנים בתלת מימד. תכנון כלי מודפס בתלת מימד דורש הבנה גם במכונות, גם במדפסות תלת מימד, גם בתחום אליו מכוון המוצר וגם אתגרים רגולטוריים. יש צורך גם במהנדסים, גם בהנדסאים וגם בטכנאים לתחום.

בסיום העבודה מוצעות דרכי פעולה לקידום התחום שעיקרן: לדאוג לכך שהדפסת תלת מימד תיכנס לתכנית הלימודים בבתי הספר התיכוניים. שבכל בית ספר תהיה מדפסת תלת מימד והחומרים הנדרשים ונדרש להעביר את המורים הכשרות על מנת שיוכלו ללמד הדפסת תלת מימד בבתי הספר; תכנית להעלאת מספר הבוגרים בפקולטות הנדסת חומרים, הנדסת פלסטיקה והנדסת אלקטרוניקה; יש להכניס מסלול לימודי הדפסת תלת מימד בפקולטות מכונות, כימיה, תוכנה וחומרים. לבנות קורסים יעודיים להדפסת תלת מימד שיהיו חלק מתכנית הלימודים בפקולטות להנדסת תוכנה והנדסת חומרים; לפתוח תואר ראשון בעיצוב הנדסי דיגיטלי שישלב לימודי עיצוב עם הנדסת חומרים, אנליזת חוזק בעיצוב תעשייתי, אנליזת זרימה, ניהול מוצר, אבטחת איכות; לפעול להכשרת מהנדסים מולטידיסציפלינאריים לתחום התלת מימד; לכלול במסגרת הלימודים שיתופי פעולה עם תעשיית התלת מימד. קיום הכשרות גם למומחים בתחום הדפסת תלת מימד שימשיכו להתעדכן ולהתמקצע בהתפתחויות המהירות שקיימות בתחום (Life long learning). הקמת מרכז ידע שיספק תשתית מחקרית נרחבת לגבי היבטים השונים הקשורים להדפסת תלת מימד. הידע שיאסף במרכז יעמוד לרשות כל החוקרים בתחום מהאקדמיה והתעשייה.

1.1 הקדמה

שני העשורים האחרונים מתאפיינים בחדירה מואצת של טכנולוגיות חדשות בתחומי הרובוטיקה, התקשורת ומערכות המידע, ננו-טכנולוגיה, ביוטכנולוגיה, אנרגיה ועוד. טכנולוגיות אשר משפיעות על כל תחומי המשק השונים (בריאות, חינוך, תעשייה, חקלאות, מסחר ועוד) ומכתיבות דפוסי עבודה חדשים, מקצועות חדשים מול מקצועות שכבר אין להם ביקוש והכשרות למיומנויות מתאימות. במגזר העסקי בישראל נשמעת לעיתים קרובות הטענה על מחסור בכוח אדם בתחומים שונים (סייבר, מחשבים, חשמל, מים, אנרגיה, סביבה, בינוי, תשתיות ועוד). העלייה הרוסית שהגיעה בשנות התשעים הגדילה את כוח העבודה הטכנולוגי והמדעי בכל תחומי המשק, אך העולים שהשתלבו ותרמו לאקדמיה ולתעשייה נמצאים היום בגיל פרישה ומדינת ישראל צריכה לבחון האם החינוך הטכנולוגי/מקצועי והחינוך האקדמי מכשירים מספיק כוח אדם מתאים על מנת לענות על צרכי השוק. גיבוש מדיניות מדע וטכנולוגיה לטווח ארוך היא משימה חשובה המבוססת על ניתוח מגמות ההתפתחות של התחומים השונים לאורך זמן, הבנת התרומה האפשרית של תחומי המדע והטכנולוגיה לכלכלה ולחברה ואיתור המחסומים המעכבים את ההתפתחויות האפשריות (המרכז הבינתחומי לחיזוי טכנולוגי, 2001).

טכנולוגיות מפציעות וכוח אדם מדעי וטכנולוגי הם נושאים שמוסד נאמן עוסק בהם יותר מעשור. לדוגמה, בשנת 2007, הוגשה עבודה בנושא "כוח אדם מדעי וטכנולוגי במדינת ישראל" שהוכנה ע"י צוות מוסד נאמן בהתאם להזמנה של תת-הועדה לנושא כוח אדם של המולמו"פ. העבודה כללה נתונים המפרטים את ההיצע של כוח אדם מדעי וטכנולוגי ותיאור שוק העבודה במדינת ישראל בתחום זה, באמצעות אינדיקטורים של שכר, אבטלה ותעסוקה עפ"י פילוחים שונים. בנוסף, הובאה סקירת ספרות שתארה את ההיצע והביקוש לכוח אדם מדעי וטכנולוגי במדינות ה-OECD והמלצות לגבי דרכים להגדלת ההיצע של כוח אדם מדעי וטכנולוגי בישראל. בעקבות עבודה זו, בשנים 2008-2009, בוצע מחקר המשך אשר התמקד בנושאים נבחרים כגון: צמצום בריחת מוחות, תחזית להיצע בכוח אדם בהתאם לצרכים עתידיים של התעשייה, הרחבת מאגר העובדים בשוק העבודה המדעי והטכנולוגי, החינוך הטכנולוגי, שיתוף פעולה בין התעשייה לאקדמיה בישראל בהקשר של נושא כוח אדם מדעי וטכנולוגי ועוד. במהלך השנים מוסד נאמן פרסם עבודות המשך בנושא ועבודות בתחומים של טכנולוגיות מפציעות¹.

בשנת 2017, מוסד נאמן זכה במכרז פומבי מס' 5/2016 לביצוע מחקרים מדעיים במסגרת גיבוש מדיניות לאומית כוללת בפיתוח וקידום המחקר המדעי במדינת ישראל, עבור המועצה הלאומית למחקר

¹ עבודה נוספת בנושא, הוגשה למולמו"פ בשנת 2013 ועסקה במודלים ומדדים בתחזיות לצורכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי. העבודה כללה סקירת ספרות על תחזיות טכנולוגיות בעולם, סקירה של מודלים בשימוש לצפי כוח אדם בעולם. ותמונת מצב של המודלים והתחזיות הקיימים בישראל. בוצעו גם מחקרים נוספים בתחום של "טכנולוגיות מפציעות", כאשר נושאים של כוח אדם והכשרת הון אנושי מופיעים כתת נושא. לדוגמה: "מדידת הפעילות האקדמית והכשרת כוח אדם בתחום הגנת הסייבר בישראל בשנים 2010-2013" (2016), "פעילות מו"פ, תשתיות וכוח אדם בתחום החלל האזרחי בתעשייה, באקדמיה ובמערכת החינוך בישראל" (2014).

ולפיתוח במשרד המדע והטכנולוגיה. הנושא של תחזיות לצורכי כ"א מדעי וטכנולוגי מהווה חלק ממכרז זה. בדו"ח המסכם שהוגש בסיום השנה הראשונה של הפרויקט, נסקרו תחזיות טכנולוגיות במדינות נבחרות בעולם, ובוצע תהליך של התאמת תחזיות טכנולוגיות לישראל. תהליך ההתאמה בוצע באמצעות ראינות עם מומחים וקובעי מדיניות מתחומים שונים. מומחים אלו בחנו שורה ארוכה של טכנולוגיות עתידיות בתחומי הביוטכנולוגיה, חומרים מתקדמים, טכנולוגיות דיגיטליות ואנרגיה וסביבה. בנוסף, המומחים סיפקו המלצות שעמדו בבסיס הבחירה של שני נושאים שנחקרו בהרחבה בשנה הראשונה של הפרויקט: פוטוניקה ואגרוטק (חקלאות מדייקת).

מסמך זה הינו דו"ח סופי בנושא הדפסת תלת מימד, שמוגש במסגרת השנה השנייה של הפרויקט.

1.2 מטרת המחקר

מטרת המחקר לבצע תחזיות צרכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי לתחומים/מקצועות נבחרים לטווח קצר (10 שנים), בהתבסס על תחזיות טכנולוגיות עולמיות שהותאמו לישראל.

הרציול הוא כי עבודה זו תסייע בהרחבת ההבנה והידע בנוגע לדרישות עתידיות לכוח אדם מדעי וטכנולוגי תוך התמקדות בנושאים מסוימים ובהכוונה וקביעת סדר עדיפויות בהשקעות להכשרות כוח אדם במדע וטכנולוגיה בתחומים נדרשים.

1.3 מתודולוגיה

לפי ההגדרה המקובלת של ה-OECD, חיזוי הוא **תהליך שיטתי** שבו נעשה ניסיון להסתכל לעתיד **הרחוק טווח** (בדרך כלל חמש עד שלושים שנים) במדע, טכנולוגיה, כלכלה וחברה, במטרה לזהות תחומים אסטרטגים של מחקר, **טכנולוגיות גנריות מפציעות** (Emerging generic technologies) שקרוב לוודאי יובילו ל**רווחים הכלכליים והחברתיים** הגדולים ביותר (Martin, 2001).

בשנים האחרונות גרם תהליך הגלובליזציה בכל התחומים לכך שלא כל מדינה צריכה לבצע בעצמה תהליך חיזוי מורכב וארוך, אלא יכולה להתבסס על תחזיות קיימות, תוך התאמה שלהן לתנאים והמאפיינים המיוחדים שלה.

במסגרת מחקר זה יעשה שימוש בשיטות המחקר הבאות:

- סקר ספרות על התחום הנבחר הכולל תחזיות טכנולוגיות, מצב התחום במדינות נבחרות בעולם, מפות דרכים, נתונים כלכליים ומצב התחום בישראל.
- ראינות עם מומחים בתחום, שיבחרו מהתעשייה ומהאקדמיה, לגבי שוק העבודה העתידי במשק.
- שאלוני מחקר שישלחו לחברות שעוסקות בתחום הדפסת תלת מימד בישראל.

התחזיות הטכנולוגיות המותאמות לישראל והראיונות שבוצעו עם מומחים שונים ועם קובעי מדיניות היוו בסיס לבחירת הנושאים שנחקרו בהרחבה בשנה א'.

המדדים ששימשו לבחירת הנושאים להרחבה בחנו האם לישראל יש בסיס טכנולוגי בתחום, האם יש כוח אדם מומחה שיהווה בסיס להכשרה ולקידום התחום, האם יש השקעות בתחום במגזר העסקי ו/או הממשלתי, האם קיימות תשתיות נדרשות בתחום, האם התחום מתפתח בעולם ומה היקפו וכדו'.

בדו"ח ביניים ראשון סקרנו בקצרה חמישה נושאים (טבלה מרכזת בנספח א'). הנושאים נבחרו מתוך תחזיות ה-OECD והועלו גם ע"י המרואיינים כנושאים שיש צורך לבחון אותם במסגרת מחקר זה בהקשר של כוח אדם מדעי וטכנולוגי המותאם לטכנולוגיות בתחומים שנבחרו. בשנה השנייה של המחקר בחרנו להתמקד בשני נושאים: 1. **הדפסת תלת מימד ו-2. רפואה מדייקת (רפואה מותאמת אישית) וגנומיקה**. תחומים אלה הוגדרו על ידי ה-OECD כטכנולוגיות מתפתחות. בדוח הנוכחי נתמקד בתחום **הדפסת תלת מימד (3D Printing/ Additive Manufacturing)**. (30 ברשימה נספח א')

Construction of 3D-printed homes, Rapid prototyping and rapid manufacturing (3D printing), Bioprinting, personal fabrication, Additive technologies.

2 סקר ספרות הדפסת תלת מימד

(3DP) 3D Printing / Additive Manufacturing (AM)

2.1 מגמות עולמיות והתפתחות טכנולוגית

3DP (יוצר מוצרים פיסיים מקובץ עיצוב דיגיטלי באמצעות שילוב או יצירת input substrate materials) שימוש בגישת הדפסה של שכבה מעל שכבה. כיום בהדפסת תלת מימד נעשה שימוש בשבע טכנולוגיות הדפסה. לכל אחת מהן יש דרך שונה לעיבוד חומרי הקלט למוצר סופי. בשילוב עם סריקה מתקדמת, טכנולוגיות 3DP מאפשרות למוצרים פיסיים להפוך לקבצים של עיצוב דיגיטלי ולהפך. ל-3DP יש את הכוח להפוך את הממשק הפיסי-דיגיטלי לעיצוב מוצר, פיתוח ויצור.

מדפסת התלת מימד הראשונה פותחה ב-1980 אבל המחיר הגבוה והטווח המוגבל של היישומים שלה מנעו שימוש נרחב במדפסת. לקח לתעשיית הדפסת התלת מימד יותר מ-20 שנה להגיע ל-1 מיליארד דולר בשנת 2009. על פי דו"ח חברת המחקר Wohlers, היקף השוק בשנת 2014 הגיע כבר ל-4.5 ביליון דולר, קפיצה של 35 אחוז מהשנה הקודמת, ועד 2020 מצופה של-3DP יהיה שוק של 17 ביליון דולר. ההערכות הן לקצב צמיחה של 25% בשוק ה-3DP בשנים 2014-2020.

איור 1: שוק 3D Printing לפי סקטור ושיעור צמיחה²

Sector	2014 (billion\$)		Five-year CAGR
Aerospace (including defense)	\$0.80	18%	15-20%
Industrial (including construction)	\$0.80	18%	15-20%
Healthcare	\$0.70	15-17%	15-20%
Automotive	\$0.50	12%	15-20%
Jewelry	\$0.50	12%	25-30%
Energy	Less than 5%		25-30%
Other (many sectors)	Less than 20%		25-30%
Total	\$4-5 billion		25%

חברת המחקר הגלובלית PwC שיצאה לבחון את ההיערכות של 100 חברות תעשייתיות יצרניות, לעידן החדש, גילתה כי בשני שליש מהחברות מתבצעים כיום מהלכים להטמעת 3DP בעסק.

אחד התחומים שבו הדפסת תלת מימד כבר מבוססת היטב הוא תחום יצירת אבות הטיפוס. תחום זה מאפשר ליצרנים לעקוף תהליכים מסורתיים של בניית מודלים, כמו גם תבניות, חוסך זמן ונותן תמריץ לתהליך ההכנסה של מוצרים חדשים לשוק. סקר PwC מראה שזה אחד התחומים שיותר אומצו על ידי התעשייה המסורתית: 25 אחוז מהיצרנים משתמשים כיום ב-3DP להפקת אבות טיפוס של מוצרים

² AT Kearney. 3D printing: A manufacturing revolution (2015) <https://www.atkearney.com/documents/10192/5992684/3D+Printing+A+Manufacturing+Revolution.pdf/bf8f5c00-69c4-4909-858a-423e3b94bba3>

שונים לעומת 10 אחוז שגם בונים את המודל וגם מדפיסים את המוצר הסופי בעזרת הדפסת תלת מימד. בכמה מהיצרנים הגדולים בעולם, הדפסת תלת מימד היא חלק בלתי נפרד ממערך המו"פ. לדוגמה, GE, מפעילה רשת של 600 מהנדסים העוסקים בתחום טכנולוגיית ה-התלת מימד. בחברת הרכב פורד, מייצרים את אבות הטיפוס של כמה ממכלולי הרכב – כולל ייצור כמה מראשי הצילינדרים בתלת מימד. BMW משתמשת בטכנולוגיית תלת מימד בתחומים רבים ככלי ארגונומי בהליכי ההרכבה של המכוניות ועד חלקי משאבות מים במכוניות המרוץ היוקרתיות DTM הכוללים חלקי אלומיניום.

2.2 תעשיות מרכזיות ויישומי תלת מימד

התעשיות המרכזיות בהן נעשה שימוש כיום בהדפסת תלת מימד הן: תעשיית הרכב, חלל ותעופה, רפואה וצריכה (תכשיטים בהתאמה, מוצרים לספורטאים).

איור 2: תעשיות מרכזיות ויישומי תלת מימד

	Current applications	Imminent applications	Ideal applications
Automotive	<ul style="list-style-type: none"> Specialized components for engine production 	<ul style="list-style-type: none"> New products with prior design for manufacture limits 	<ul style="list-style-type: none"> Low to medium volume
	<ul style="list-style-type: none"> Innovative designs. such as concept car chassis 	<ul style="list-style-type: none"> Lightweight Structures, such as chassis 	<ul style="list-style-type: none"> High value-to-weight ratio
Aerospace	<ul style="list-style-type: none"> Production - approved, such as fuel nozzles 	<ul style="list-style-type: none"> High-performance parts, such as sensor housing 	<ul style="list-style-type: none"> High fly-to buy and material waste ratio
	<ul style="list-style-type: none"> Prototype jet engine parts 	<ul style="list-style-type: none"> full-scale manufacture of semi standard components 	<ul style="list-style-type: none"> Complex geometry
Medical	<ul style="list-style-type: none"> Orthodontic implants for hips and spines 	<ul style="list-style-type: none"> Stents 	<ul style="list-style-type: none"> Complex multi-part assembly under traditional manufacturing
	<ul style="list-style-type: none"> Surgical guides 	<ul style="list-style-type: none"> Personalized prosthetics 	<ul style="list-style-type: none"> Need for form-function-fit customization
Consumer	<ul style="list-style-type: none"> Custom jewelry 	<ul style="list-style-type: none"> Apparel production 	
	<ul style="list-style-type: none"> High-performance sporting goods 	<ul style="list-style-type: none"> fashion accessories production 	

ATKearney. 3D printing: A manufacturing revolution (2015)³

בתחום התעופה, חברת המחקר הגלובלית PwC מעריכה ש ניתן יהיה לחסוך מעל 3.4 מיליארד דולר מדי שנה בחסכון בחומרי גלם ובתעבורה, וזאת אם הענף יעבור כחצי מחלקי ה- (maintenance, repair, operations) להדפסת תלת מימד. על פי הניתוח השמרני יותר, גם אם DP3 יאומץ ב-20 אחוז

³ <https://www.atkearney.com/documents/10192/5992684/3D+Printing+A+Manufacturing+Revolution.pdf/bf8f5c00-69c4-4909-858a-423e3b94bba3>

מהייצור, מדובר בחסכון של מעל מיליארד דולר בשנה. בשנים האחרונות נעשה שימוש הולך וגובר במדפסות תלת מימד בתעשיית התעופה והחלל. חברת United Launch Alliance שיגרה מבסיס חיל האוויר קייפ קנאברל שבפלורידה את הטיל המשגר Atlas V, ובו רכיבים תרמו-פלסטיים, שיוצרו באמצעות מדפסת תלת מימדית של חברת סטרטסיס. זו הפעם הראשונה שבה נעשה שימוש בהדפסת תלת מימד לצורך ייצור סדרתי של רכיבים עבור טיל שיגור מבצעי. במסגרת ייצור משגר הלוויינים Atlas V, השתמשה ULA במדפסת של סטרטסיס כדי לייצר שורה של רכיבים עבור מערכת האיוורור בחרטום המשגר, שתפקידה לצנן את המעגלים האלקטרוניים ולמנוע את התחממותם במהלך השיגור. שיתוף הפעולה בין ULA לסטרטסיס מלמד על הפוטנציאל העצום שיש לשילוב של מדפסות התלת מימד בתחום התעופה והחלל, הן ברמת הפיתוח והן ברמת הייצור.

2.3 שלוש שיטות להדפסת תלת מימד במתכת⁴

Metal Binder Jetting - הדפסת תלת מימד במתכת מתחילה כמו כל תהליך הדפסה אחר בעיצוב 3D. אבקת מתכת מפוזרת בשכבות דקות וחומר דבק מחבר בין השכבות. שכבות לסירוגין של אבקה וחומר מחבר מותכות יחד ומתחילות להיבנות כלפי מעלה כדי ליצור את האובייקט. במדפסות מסוימות יש תנורי תקרה על מנת לאפשר לשכבות להתייבש. התהליך חוזר על עצמו עד שכל שכבות האובייקט מושלמות מלמטה למעלה. התהליך עשוי להימשך מספר שעות. בשלב זה, המודל שביר ומלא באוויר נקבובי מאוד ויש לשים את האובייקט בתנור בחום של 350 פרנהייט למשך 24 שעות על מנת לחבר את שכבות אבקת המתכת יחד. אחרי שהאובייקט מתקשה לחלוטין ומקורר, ניתן למלא אותו בחומר מילוי ברונזה אשר נותן למודל חוזק. מבלי למלא את החלק הפנימי בחומר מתכת אחר, המודל עדיין חלש למדי ולא מומלץ ליצור חלקים פונקציונליים. השיטה הזאת מאפשרת הדפסה בצבע ועובדת גם עם פולימרים וחומר קרמי. התהליך די מהיר בהשוואה לשיטות additive manufacturing אחרות אבל העיבוד הסופי יכול להימשך זמן רב.

Powder Bed Fusion - התהליך דומה מאוד לתהליך ה-metal binder jetting למעט שבמקום שחומר מחבר שכבות של אבקת מתכת יחד, נעשה שימוש בלייזר בטמפרטורה גבוהה או ב-Electron beam. הלייזר מגביר את הטמפרטורה של האבקה באזורים שבהם העיצוב נבנה ויוצר שכבה מוצקה. התהליך נמשך עד להשלמת המודל כולו. ניתן לבצע Powder Bed Fusion במספר טכניקות.

Directed Energy Deposition - תהליך זה משתמש בשני סוגים שונים של חומר - חוטי מתכת או אבקת מתכת. זרובית הנעה בכיוונים מרובים מפזרת אבקת מתכת או wire שכבה על גבי שכבה לאחר שהחומר הופקד, הוא נמס עם לייזר או קרן אלקטרוניים. תהליך זה נמשך והאובייקט נבנה שכבה אחר שכבה. למרות שמשתמשים בתהליך זה בדרך כלל כדי לתקן ולתחזק חומר מתכת קיים, זה יכול לשמש כדי ליצור אובייקטים.

⁴Learn how 3d printing metal works – Top 3 ways!
<https://pinshape.com/blog/3d-printing-metal/>

2.4 מגמות מרכזיות שמעצבות את האבולוציה של הדפסת התלת מימד⁵

התפתחות התחום שינתה את הדרך שבה חברות רבות מעצבות, מייצרות ואפילו מספקות את המוצרים שלהן ומאפשרת הזדמנות לשנות באופן קיצוני מגוון של מודלים עסקיים לייצור.

מגמות עסקיות- מספר מגמות בעולם העסקים האיצי את כניסת הדפסת תלת מימד לסדר היום. כרבע מהחברות הגלובליות כבר משתמשות בהדפסת תלת מימד ו-12% נוספים שוקלים זאת. אינדווידואליזציה- יש דחיפה גדולה בכלכלה המודרנית להתאמה אישית של מוצרים שנתפרים על פי צרכי הלקוח. היצרנים הגיבו על ידי אימוץ הדפסת תלת מימד על מנת שתאפשר להם להדפיס חלקים קרוב ככל האפשר למועד האספקה.

דמוקרטיזציה- הדפסת תלת מימד מקלה על יחידים או על צוותים לעצב או לייצר מוצרי קצה ולהפחית מחסומים לחדשנות. ליצרני מוצרים, אשר עשויים להיעצר בסביבה ביורוקרטית מסורתית עם דרישות לתהליכים וזמני המתנה לוגיסטיים ארוכים, תהיה כעת אפשרות להכין מוצרים באופן מהיר יותר.

קיימות- יש תנועה גלובלית לעבר קיימות הן בסביבת הבית והן בתאגידים. הדפסת תלת מימד מפחיתה את עלויות ההובלה כשהמדפסת ממוקמת בסמוך לקו הייצור.

תעשיות רבות נמצאות מעבר למינוף כל הדפסת תלת מימד בניסויים, ויתקרו במהלך החמש שנים הקרובות, לביצוע הדפסת תלת מימד בשרשרת הערך שלהן.

שיפורים טכנולוגיים- מגוון החומרים שניתן להשתמש בהם הוא עצום, כולל פלסטיק, חרסינה, קרמיקה, נירוסטה, פחמן, גרפן, טיטניום ומתכות נוספות - וריאציות חדשות נעשות מדי יום. ישנן ארבע מגמות טכנולוגיות שונות שמשנות את הדפסת התלת מימד:

- ההשפעה שיש ליישומי אב טיפוס על תהליכי עיצוב- הדפסת התלת מימד הייתה מוגבלת בהתחלה לאב-טיפוס. עכשיו, שיטות הדפסת תלת מימד כגון selective direct metal laser sintering, metal sintering and electron beam melting קידמו את הדפסת התלת מימד ליישומים תעשייתיים והרכבות סופיות.
- חומרים קלים- Honeycombing, עוד שיטה של הדפסת תלת מימד שמאפשרת להדפיס בעיקר חלקים קלים. ניתן ליצור חלקים חלולים או חלקים עם חדר פנימי.
- פחות רכיבים לגיאומטריה מורכבת- מדפסות תלת מימד מסוגלות ליצור קומפוזיציות שונות של סגסוגות מתכת כדי להתאים לצרכי המוצר הסופי. ההזדמנות לבדוק קומפוזיציות שונות בקלות ובזול יכולה להפעיל את היצירה של חומרים שלא נראו קודם לכן ועשויים להתאים לפריטי עיצוב ספציפיים יותר מאשר חומרים מסורתיים.
- מדע וטכנולוגיה ניהול חומרים מתקדמים- חלקים מודפסים בתלת-מימד ישנו את תמהיל המלאי ותהליכי המעקב. טכנולוגיית (Radio Frequency Identification RFID) לא תהפוך בהכרח לנחלת העבר; עם זאת, אבקת מתכת להדפסה תירכש בהיקפים כ"כ גדולים שתגי RFID יהיו טכנולוגיה שנמצאת פחות בשימוש על מנת לעקוב אחרי אבקה המשמשת לחלקים המודפסים בתלת מימד.

⁵ מקור: Gartner Hype Cycle for 3D Printing, 2016, 19 July 2016, G00307807

סקטורים: הדפסת התלת מימד משפיעה על טווח גדול של עסקים. מאווירונאוטיקה ליהלומים ומאספקה רפואית לבנייה. זו טכנולוגיה שחוצה סקטורים. היתרונות הפונקציונאליים המגוונים שלה מספקים ערך מוסף למגזרים שונים. ככל שטכנולוגיות הדפסת תלת מימד משתפרות, יכנסו הרבה יישומים חדשים. הדפסת התלת מימד יצרה מהפכה בהרבה עסקים גלובליים ע"י נתינה של שיטה חדשה לחלוטין לייצור שמאפשר לפיתוחים פונקציונאליים חדשים להתממש במחיר נמוך יותר עם פונקציונאליות משופרת, פרודוקטיביות וקיימות רבה יותר.

שרשרת אספקה ומודלים עסקיים - הדפסת התלת מימד תהפוך את שרשרת האספקה ואת הדרך שבה עסקים מתחרים על ידי הצגת מודלים עסקיים מהפכניים חדשים אשר מנצלים את הטכנולוגיה. לחברות קטנות ובינוניות חדשניות וזריזות יש הזדמנות להתחרות ולתפוס נתח שוק בהינתן תמיכה נכונה לצמיחה בשרשרת האספקה בעתיד. ספקים גדולים יותר במגזרים שכבר עוסקים בהדפסת תלת מימד, יכולים להגדיל באופן משמעותי את הנוכחות התעשייתית שלהם, ולמגזרים אחרים תהיה הזדמנויות לצמיחה באמצעות אימוץ הדפסת תלת מימד. תמיכה בשירותים מקצועיים עסקיים, מימון, משפט והכשרה, יגדלו על מנת לתמוך בצרכים בתוך הארץ, עם הזדמנויות ליצוא עולמי. התעשייה האירופית תמיד הייתה בחזית החדשנות והמו"פ למציאת פתרונות ייצור. במערך הטכנולוגיות התעשייתיות שצמחו באירופה, (AM) Additive Manufacturing הינו אחד הרלוונטיים ביותר.

כיוון שיותר ויותר השקעות נעשות בפיתוח של הדפסת תלת מימד, מצופה שמחסומי הכניסה לאימוץ הדפסת תלת מימד ירדו עם הזמן. עדיין, מדיניות ונושאים רגולטורים, אם לא יטופלו כראוי, עשויים למנוע את העלייה של הדפסת התלת מימד לנוף התעשייתי. על מנת שאירופה תישאר מובילה בייצור מתקדם, עליה להצליח בתיעוש של הדפסת תלת מימד. התחרות הגלובאלית היא עם מדינות כמו ארה"ב, סין ויפן (AT Kearney, 2015).

2.5 השכלה ומיומנויות

ההצלחה של הייצור המתקדם באירופה נשענת על שילוב בין ידע הנדסי מוצק ועובדים מקצועיים. זה אחד המנועים העיקריים לחדשנות חזקה ואיכות ייצור שיהיו מותאמים לצרכי הלקוח. עם זאת, חברות

יותר ויותר מדברות על מחסור במיומנויות שמתעורר בהקשר של הדפסת תלת מימד.

CECIMO היא האיגוד האירופי שמייצג את האינטרסים המשותפים של ה-Machine Tool Industries ברחבי העולם ברמה של האיחוד האירופי. CECIMO מייצג 15 אגודות לאומיות של בוני כלים למכונות, המייצגים כ-1300 מפעלים תעשייתיים באירופה (EU האיחוד האירופי + EFTA + טורקיה), מעל 80% מהם הן חברות קטנות ובינוניות SMEs. CECIMO מכסה 98% מסך הייצור של כלי מכונה באירופה וכ-36% ברחבי העולם. זה מהווה כמעט 150,000 עובדים מחזור של יותר מ-24 מיליארד אירו בשנת 2016. כ-75% של הייצור CECIMO נשלח לחו"ל, וכמחצית מימנו זה מיוצאת אל מחוץ לאירופה. ל-CECIMO תפקיד מרכזי בקביעת הכיוון האסטרטגי של תעשיית כלי מכונה אירופיים והיא מקדמת את הפיתוח של המגזר בתחומי הכלכלה, הטכנולוגיה והמדע.

ברמת המפעל, ניתוחי מצב, כמו אלה של פרויקט המתכות האירופי בהובלת CECIMO - the European Association of the Machine Tool Industries, הגיעו למסקנה שכל שהדפסת התלת מימד מתקרבת לייצור סדרתי, כוח האדם שעובד על מכונות קונבנציונאליות יצטרך לפתח מיומנויות חדשות. מערכת המיומנות שלו תהיה בהדרגה היברידית, היכן שיכולות ב- manufacturing subtractive יוצמדו למיומנויות חדשות ספציפיות לתהליך הייצור עם מכונות additive. טכנאים ומפעילים עם מיומנויות נוספות אלה יהיו בעלי חשיבות עליונה על מנת להימנע מהאטה בהדפסת תלת מימד תעשייתית.

כיום, התעשייה בעצמה לוקחת לעתים קרובות את האחריות להכשיר עובדים בהדפסת תלת מימד. יש חשיבות עליונה ליצירת מאגר גדול של מהנדסים לתחום הדפסת תלת מימד. מערכות חינוך במדינות אירופה מראות לעיתים סימני התיישנות וקושי לעקוב אחר ההתפתחויות המהירות של טכנולוגיות הדפסת תלת מימד. כתוצאה מכך, שוק העבודה של הדפסת התלת מימד נמצא בסיכון של חוסר מיומנות בכישורים הנדרשים על מנת לתת מענה לצרכי החברות. יש צורך בשינוי בגישה להכנה של תכניות לימודים וקביעת אסטרטגיות הוראה.

ההמלצות שניתנות בדוח CECIMO (2017) הן:

- למעורבות רבה יותר של הסקטור הפרטי. להכניס פרוצדורות של additive system לתכניות הלימודים, כך שהמחנכים יהיו מעודכנים בהתפתחויות האחרונות.
- שמעבדות יצור ברחבי אירופה יהיו מקושרות ויטפחו התאמה של חוזקות משלימות.
- תמיכה בקורסים הקשורים ל- AM בכל שלבי החינוך מבית הספר התיכון לאוניברסיטה ולהתמחות בתואר שני.
- הגדלת המימון של האיחוד האירופי לטיפול במחסור במיומנויות בתעשיית AM. מחקרים מראים שיהיה צורך במיומנויות חדשות בשלבי הייצור של העיצוב (production stages of design), המרת קובץ STL (conversion STL) ומניפולציה של הקובץ (file manipulation), לשלב שלאחר העיבוד (post-processing) ולתחזוקה (maintenance). מענה לביקוש למהנדסי יישומים (application engineers) ומהנדסי עיצוב (design engineers) על מנת להגיע לניצול מלא של היתרונות של תהליך ה- AM.
- לקדם את השימוש בכלים הקיימים להתאמה לעבודה המבוססת על מיומנויות, כגון EURES Job Mobility Portal על מנת להתמודד עם מחסור במיומנויות בטווח הקצר.
- למצוא אפשרויות מימון, לבתי ספר ולאוניברסיטאות לגישה לציוד AM.

סקר שנערך בשנת 2016 על ידי חברת פתרונות ניהול הדפסה, הראה שב- 87% מבתי הספר ברחבי העולם יש גישה מוגבלת של התלמידים להדפסת תלת מימד.

שלושת הסיבות העיקריות לכך הן: חוסר יכולת של המחנכים לנהל ולשלוט בגישה למדפסת תלת-מימד שזמינה

בבית הספר, חוסר יכולת של המחנכים לנהל את זמן הדפסת התלת מימד ובעלות החומרים על מנת להקצות הוצאות לכיתות, והיעדר הדרכה לגבי הוספת הדפסה תלת-מימדית לתוכניות הלימודים בכיתה. מעורבות רבה יותר של התעשייה בחינוך תסייע בהתמודדות עם חלק מקשיים אלה.

2.6 מימון מו"פ בתחום הדפסת תלת מימד

פעילויות מו"פ הממומנות ע"י ה-EU בתחום הדפסת תלת מימד, גדלו בהדרגה בשלושת העשורים האחרונים. בעוד שבשנים 1991-1994 רק שלושה פרויקטים של הדפסת תלת מימד קיבלו מימון מהתכנית מבוססת המדע של ה-EU, בשנים 2007-2013 כבר התבצעו 66 פרויקטים שהתמקדו בחומרים, תהליכים, והיבטים הקשורים לשימושים הסופיים של הטכנולוגיה, והמימון של ה-EU הגיע ל-160 מיליון אירו. כסף נוסף הועבר דרך תכניות אחרות כגון Erasmus, שהנושאים שבה מכוונים למיומנויות והשלכות על שוק העבודה ו-COSME, שמיועד לתמוך ב-SMEs.

הזדמנויות למימון הדפסת תלת מימד אינן מגיעות רק ממענקים. קובעי המדיניות ב-EU קידמו יישום שותפויות פרטיות-ציבוריות (Public Private Partnerships-PPP) על מנת לקדם את הפיתוחים הטכנולוגיים של הדפסת תלת מימד. הם פתחו את האפשרות של מתן כסף ציבורי (Public seed money) אשר צפוי היה להביא להשקעות פרטיות נוספות.

ה-PPP של מפעלי העתיד (The Factories of the Future-FoF) פועל להשגת אותן מטרות בשיתוף פעולה עם בעלי עניין כגון Additive Manufacturing Platform טכנולוגיה אירופאית וה-ManuFuture European Technology Platform (ETP). מימון נוסף ניתן דרך הקרן האירופית להשקעות אסטרטגיות, הבנק האירופאי להשקעות וקרן השקעות אירופית. פעולות אחרות, כמו the Vanguard Initiative (VI) לצמיחה חדשה, הינו מודל מימון מעורב עבור מו"פ ספציפי בהדפסת תלת מימד. Horizon 2020 מימן מעל 21 פרויקטים במהלך השנתיים הראשונות של התכנית, בסכום כולל של לפחות 95 מיליון יורו.

איור 3: סוגי תהליכים ב-AM השיטה, החומרים והשווקים

Process type	Method	Materials	Market
Powder Bed Fusion	Thermal energy (Laser or Electron Beam) selectively fuses regions of powder.	Metals, Polymers	Manufacturing & Prototyping
Directed Energy Deposition	Focused thermal energy (Laser or Electron Beam) is used to fuse materials as deposited.	Metals	Manufacturing & Repair
Material Extrusion	Material is selectively dispensed through a nozzle and material laid down in layers.	Polymers	Manufacturing & Prototyping
Vat Photo-polymerization	Liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization.	Polymers	Prototyping
Binder Jetting	Liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials.	Metals, Polymers	Casting Molds, Manufacturing & Prototyping
Material Jetting	Droplets of building material are selectively deposited. (Ink-Printer)	Metals	Casting Patterns & Prototyping
Sheet Lamination	Sheets of material are bonded to form an object.	Metals	Manufacturing & Prototyping

(Cecimo- European Association of the Machine Tool Industries European Additive Manufacturing Strategy 2017)

הדפסה בתלת מימד מבטלת את מגבלות הייצור הוותיקות והמוכרות ובכך היא מכשירה את הקרקע לגל של חידושים בתחומים שונים. הערך המוסף של הדפסת תלת מימד לעומת השיטות המסורתיות מנוסח בעקרונות הבאים:⁶

עיקרון מס' 1: **מורכבות ייצור בעלות זניחה**. בייצור המסורתי, ככל שצורת הפריט מורכבת יותר הייצור שלו יקר יותר. במדפסת תלת-מימד יש למורכבות ולפשטות אותו מחיר. ייצור של פריט מסובך ועתיר פיתוחים לא דורש יותר זמן, יותר מיומנות או יותר כסף מייצור של פריט פשוט. מורכבות שאינה עולה כסף תנפץ את דגמי התמחור המסורתיים ותשנה את האופן שבו מחשבים עלויות ייצור.

עיקרון מס' 2: **מגוון חופשי**. מדפסת תלת מימד יחידה יכולה להכין צורות רבות. כמו האומן האנושי, גם מדפסת תלת-מימד יכולה לייצר צורה שונה בכל פעם. מכונות הייצור המסורתיות הן הרבה פחות גמישות ומגוון הצורות שהן יכולות ליצור מוגבל. הדפסה בתלת מימד מבטלת את עלויות התקורה הכרוכות בהכשרה של מפעילי מכונות אנושיים או באבזור של מכונות בבתי חרושת עבור כל משימה חדשה. מדפסת תלת מימד צריכה עבור כל פריט חדש, שרטוט דיגיטלי חדש ואספקה טרייה של חומרי גלם.

עיקרון מס' 3: **אין צורך בהרכבה**. מדפסות תלת מימד יוצרות חלקים המחוברים אלה לאלה. הייצור ההמוני מתבסס על עמוד שדרה אחד – פס הייצור. בבתי חרושת מודרניים מכונות יכולות לייצר פריטים זהים שאותם מרכיבים בהמשך רבובטים או פועלים אנושיים, הנמצאים לפעמים ביבשת אחרת לגמרי. ככל שיש במוצר חלקים רבים יותר כך נדרש זמן רב יותר להרכיב אותו ויקר יותר לייצר אותו. ייצור פריטים בשכבות מאפשר למדפסת תלת-מימד להדפיס ביחד, למשל, גם את הדלת וגם את הצירים המחוברים אליה, ללא צורך בהרכבה. צמצום עבודת ההרכבה יקצר את שרשרת האספקה משום שייחסכו העלויות הכרוכות בכוח עבודה ובשינוע. קיצור שרשרת האספקה יביא להפחתה בזיהום האוויר.

עיקרון מס' 4: **זמן הכנה מינימלי**. מדפסת תלת מימד יכולה להדפיס על פי דרישה, כשיש ביקוש לפריט מסוים. היכולת לייצור נקודתי מצמצמת את המלאי הפיזי שחברות צריכות לאגור. סוגים חדשים של שירותים עסקיים עצים ועולים משום שמדפסות תלת מימד מאפשרות לעסק לייצר פריטים ייחודיים – או בהתאמה אישית – על פי דרישה ובהזמנת הלקוח. ייצור בזמן הכנה מינימלי, יכול למזער את עלות השינוע למרחקים גדולים כשהסחורות מודפסות בזמן שבו הן נדרשות ובסמוך למקום שבו הן נדרשות. צמצום אחסון מלאי חלקים.

עיקרון מס' 5: **מרחב עיצוב אינסופי**. רפרטואר הצורות שאפשר לייצר בטכנולוגיות ייצור מסורתיות ובעבודה אנושית הוא סופי ומוגבל בהתאם לכלי הייצור. כך, למשל, מחרטת עץ מסורתית יכולה לייצר רק פריטים עגולים. מכונת כרסום יכולה לייצר רק חלקים שאפשר לטפל בהם עם כלי כרסום. מכונת ציקה יכולה לייצר רק צורות שאפשר לשפוך לתוך תבנית ואחר כך להוציא אותן בלי לשבור את

⁶ "תלת מימד – המהפכה התעשייתית החדשה" מאת פרופ' הוד ליפסון ומלבה קורמן, בהוצאת ר. סירקיס וידיעות ספרים, 2014

<https://www.the3dzone.co.il/%D7%A2%D7%A9%D7%A8-%D7%94%D7%93%D7%99%D7%91%D7%A8%D7%95%D7%AA-%D7%A9%D7%9C-%D7%94%D7%93%D7%A4%D7%A1%D7%94-%D7%91%D7%AA%D7%9C%D7%AA-%D7%9E%D7%9E%D7%93>

התבנית. מדפסת תלת-מימד מבטלת את המחסומים האלה ופותחת לפנינו מרחבי עיצוב חדשים ועצומים. מדפסת תלת מימד יכולה לייצר צורות שעד עתה היו אפשריות רק בטבע.

עיקרון מס' 6: **ייצור קומפקטי ונייד**. קיבולת הייצור הממוצעת של מדפסות תלת מימד לכל מטר מרובע של חלל ייצור היא גדולה יותר מזו של מכונות ייצור מסורתיות. למשל, מכונת יציקה בהזרקה יכולה להכין רק פריטים קטנים במידה ניכרת מהגודל שלה עצמה. לעומתה, מדפסת תלת מימד יכולה לייצר פריטים בגודל מצע ההדפסה שלה. בזכות קיבולת הייצור הגבוהה למטר מרובע, מדפסות תלת-מימד הן אידאליות לשימוש ביתי או משרדי משום נוכחותן הפיזית הקטנה.

עיקרון מס' 7: **פחות פסולת ותוצרי לוואי**. מדפסות תלת מימד שמייצרות חלקים ממתכת, מייצרות הרבה פחות פסולת ותוצרי לוואי מהשיטות המסורתיות לייצור חלקי מתכת. עיבוד שבבי ממוכן של מתכות הוא תהליך בזבזני. ההערכה היא שכ-90% מגוש המתכת המקורי מסולק ממנו בתהליכי העיבוד השבבי ונותר על רצפת בית החרושת. מדפסות תלת מימד הן פחות בזבזניות. ככל שישתפרו חומרי ההדפסה אפשר יהיה לעבור לייצור נקי וירוק יותר.

עיקרון מס' 8: **גיוון אינסופי של חומרים**. שילוב בין חומרי גלם שונים במהלך הייצור של פריט אחד הוא כמעט בלתי אפשרי במכונות הייצור של היום. מכונות הייצור המסורתיות מעניקות לחפצים את צורתם באמצעות גילוף, חיתוך, כרסום, קידוח, הברזה או יציקה, ולכן לא קל לערב בתהליכי הייצור חומרי גלם שונים. עם ההתפתחות של הדפסת תלת מימד מרובת חומרים, תהיה לנו יכולת לערבב ולמזג חומרי גלם שונים בייצור של פריט אחד. שימוש בתערובות של חומרי גלם שעד היום לא עמדו לרשותנו פותח בפנינו קשת גדולה בהרבה של חומרים שרובם טרם נחקרו – חומרים בעלי תכונות חדשניות.

עיקרון מס' 9: **העתקה פיזית מדויקת**. הדפסה בתלת-מימד תרחיב את הדיוק הדיגיטלי גם לעולם החפצים המוחשיים. טכנולוגיות הסריקה וההדפסה התלת מימדיות ישלבו כוחות ויאפשרו מעבר ברזולוציה גבוהה בין העולם המוחשי לעולם הדיגיטלי. אנו נסרוק, נערוך ונשכפל פריטים מוחשיים כדי ליצור העתקים מדויקים ואפילו משופרים של המקור.

חלק מהעקרונות הללו תקפים כבר היום. אחרים ייכנסו לתוקף בעשר עד עשרים (או בשלושים) השנים הבאות.

2.7 אתגרים

יש צורך בשיפור החומרה ל-3DP על מנת להצליח עם פריטים מורכבים ולהשיג את הדרישות הטכניות והעלויות הנדרשות על מנת להגיע מעבר לתפקיד הנוכחי של יצירת אב טיפוס עד לתמיכה בייצור בחומרים שונים.

הכשרה טובה יותר בתחום ויכולות עיצוב יכולים לתת תנופה ל-3DP ולאיימוץ מסיבי יותר ע"י חברות וצרכנים.

דוגמא למדינה שהכירה בחשיבות של הדפסת תלת מימד ובצורך בהשקעה לאומית בתחום, היא בריטניה. לבריטניה יש ניסיון מחקר ב-additive manufacturing ומומחיות בתכנון וייצור. היא רואה

את הפוטנציאל הנרחב של additive manufacturing לחברות ולכן, ההשקעה התעשייתית הצפויה בבריטניה לחמש השנים הבאות הינה 600 מיליון ליש"ט.

למרות הפוטנציאל וההתקדמות עד כה, רבות מהחברות בבריטניה, במיוחד SMEs, חסרות מודעות, משאבים או ניסיון ליישום additive manufacturing כליבה וכחלק בלתי נפרד של תהליך הייצור שלהן. סקר עולמי שנערך לאחרונה על ידי ארנסט ויאנג הראה כי רק ל-17% מהחברות בבריטניה יש ניסיון עם additive Manufacturing לעומת 37% בגרמניה ו-24% בסין.

על מנת שבריטניה תהפוך למובילה ותקבל ערך גבוה מ-additive manufacturing, הוקמו בבריטניה קבוצות עבודה בין-תחומית בנושאי additive manufacturing שזיהו את החסמים העיקריים וכשלי שוק שמעכבים את המסחור המהיר של additive manufacturing בבריטניה. זוהו פעילויות חוצות תחומים שיש לנקוט ונקבע המימון הציבורי הנדרש לכך בסך 225 מיליון אירו לחמש שנים.

ההמלצות שניתנו במסגרת אסטרטגיה זו:

טכנולוגיה: תמיכה בתוכניות מו"פ בכל רמות המוכנות הטכנולוגית (Technology Readiness Level-TRL) העלאת נושא שרשרת הערך של AM- מחומרי גלם ועד המוצר הסופי, כמו גם את האספקטים החיוניים של "עיצוב ל-AM" עקרונות, שיטות וכלים.

מיומנויות והדרכות: טיפול בפער במיומנויות על ידי תמיכה ביצירת תכניות חינוך למומחים ב-AM בכל הרמות שיכללו חונכות, קורסי הדרכה מקוונים, תכניות השכלה ותכניות של רכישת מיומנויות חדשות תוך כדי עבודה. תמיכה בתעשייה ובהתאגדויות בהעלאת המודעות ליכולות (ולמגבלות) של AM.

תמיכה עסקית ופיתוח שרשרת אספקה: לאבטח את הייצור של נכסים פיסיים של AM בבריטניה על ידי מתן של (למשל) מענקי הון להשקעה במכונות של AM, כמו גם פיתוח של כלי מסחר רלוונטיים. הקמת פלטפורמה לפיתוח ולשיתוף של שיטות העבודה הטובות ביותר, תקנים רלוונטיים והגנה נאותה על קניין רוחני.

3 הדפסת תלת מימד בישראל

בשנת 2016 הוקם בישראל מאגד עתיד במסגרת תכנית מגנ"ט. המאגד התמקד בפיתוח טכנולוגיות להדפסה תלת מימדית של מבנים תעופתיים עשויים מטיטניום. המאגד עוסק בניצול מדפסות תלת מימד קיימות לתכנון וייצור מבנים תעופתיים מורכבים. החדשנות הטכנולוגית בפעילות המאגד, היא היכולת לתכנן ולייצר מבנים תעופתיים מסובכים גיאומטריים, הניתנים לייצור אך ורק בהדפסה תלת מימדית. את המאגד הובילה חברת סאייקלון מקבוצת אלביט מערכות, והשתתפו בו התעשייה האווירית, תע"ש, אורביט, אלגת, קאס ואדמר וחוקרים מאוניברסיטאות ת"א, בן-גוריון, הטכניון, מכון המתכות ומכללת אפקה.

במסגרת חלק זה של העבודה ערכנו מיפוי של פירומום, של חברות ושל מכוני מחקר בישראל שעוסקים בתחום הדפסת תלת מימד.

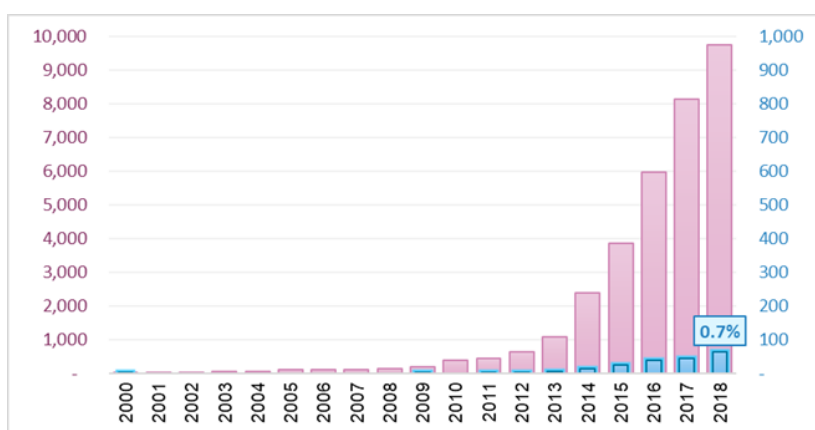
3.1 פרסומים בתחום התלת מימד

את התפתחות תחום התלת מימד בישראל ובעולם, ניתן לראות באמצעות הגידול במספר הפרסומים בנושא⁷.

האיור הבא מתאר את השינוי במספר פרסומי ישראל והעולם בנושאים הקשורים ל- Additive manufacturing / 3D Printing. בעולם, מספר הפרסומים בתחומים אלה החל לצמוח רק משנת 2010. והוא גדל משנה זו בקצב של יותר מ-50% בשנה במוצע.

בישראל, מספר הפרסומים החל לצמוח משנת 2013, והוא מכפיל את עצמו מדי שנה. גם שיעור הפרסומים של ישראל כאחוז מהעולם גדל ועומד על 0.7% בשנים 2016 עד 2018.

איור 4: פרסומים בנושא 3DP בישראל ובעולם בשנים 2000-2018*



עיבוד של מוסד נאמן לנתוני מאגר סקופוס
* הנתונים ל-2018 אינם סופיים

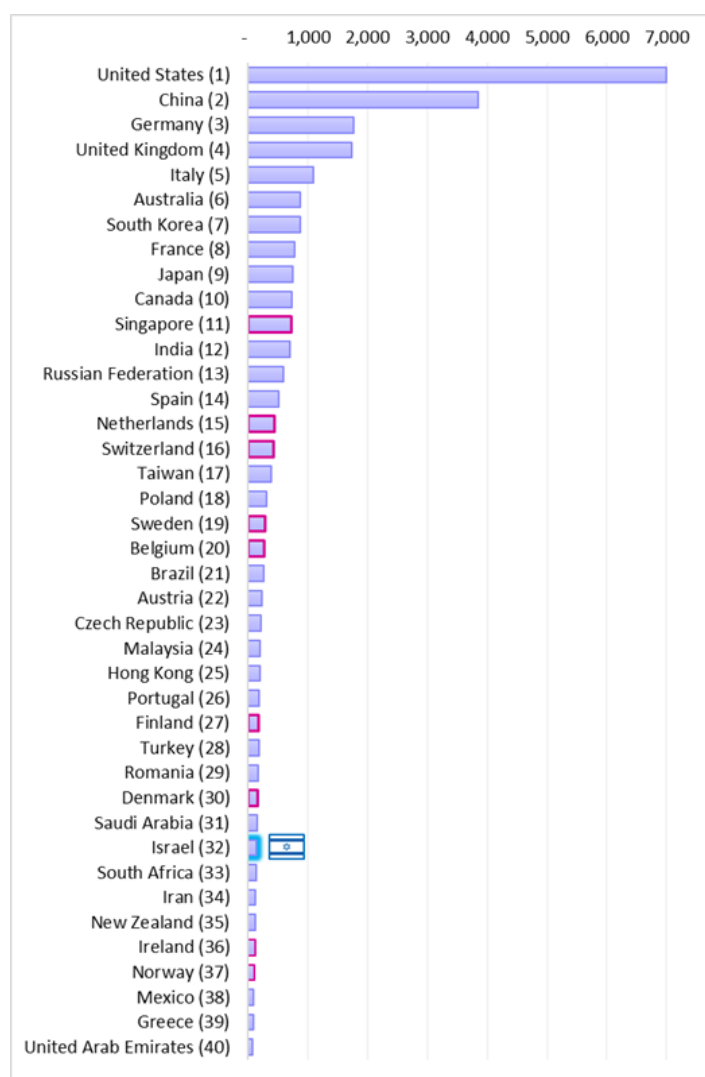
⁷ הגרפים הינם עיבוד של מוסד נאמן לנתוני מאגר סקופוס לפי השאלתא:

⁷ TITLE-ABS-KEY ("3D Printers" OR "Additive manufacturing" OR "3D Printing" OR "Additive manufacture" OR "3D Print" OR "3D Printing" OR "3-D Printing" OR "Three Dimensional Printing")

האיור הבא מתאר את דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בנושאים הקשורים ל- Additive manufacturing / 3D בשנים 2016-2018.

ניתן לראות כי ישראל מדורגת במקום ה-32 בהשוואה למדינות העולם. מספר זה נמוך גם בהשוואה למדינות הדומות לישראל בגודלן (מסומנות במסגרת אדומה באיור) כגון: סינגפור (במקום ה-11), הולנד (במקום ה-15) ושווייץ (במקום ה-16).

איור 5: דרוג מדינות לפי מספר הפרסומים בנושא 3D בשנים 2016-2018

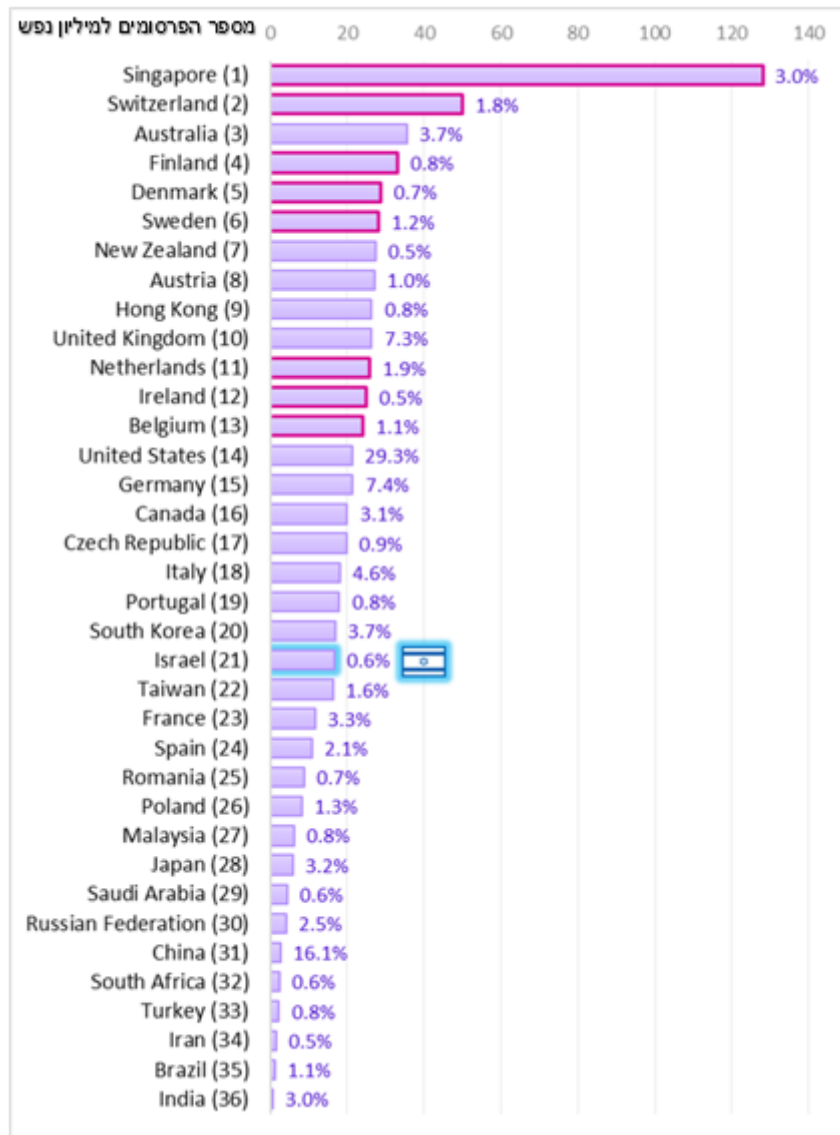


עיבוד של מוסד נאמן לנתוני מאגר סקופוס

הגרף הבא מתאר את דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים לנפש של 36 המדינות שפירסמו 0.5% ומעלה מפרסומי העולם בנושאים הקשורים ל- Additive manufacturing / 3D Printing בשנים 2016-2018.

המדינות המודגשות בורוד הן מדינות בנות השוואה לישראל (רובן מעלינו, חוץ מנורבגיה שלא עברה את סף ה-0.5% ולכן לא נכנסה לדירוג). ניתן לראות כי ישראל מדורגת במקום ה-21 בהשוואה לשאר המדינות. התמונה המשתקפת היא שקיים פער לגבי המופ בישראל בתחום הדפסת תלת מימד ממדינות רבות שהינן בנות השוואה לישראל.

איור 6: דרוג מדינות לפי מספר הפרסומים לנפש בנושא 3DP בשנים 2016-2018 (שיעור הפרסומים של כל מדינה מכלל פרסומי העולם בתחום)



עיבוד של מוסד נאמן לנתוני מאגר סקופוס

3.2 מיפוי חברות בתחום הדפסת תלת מימד בישראל

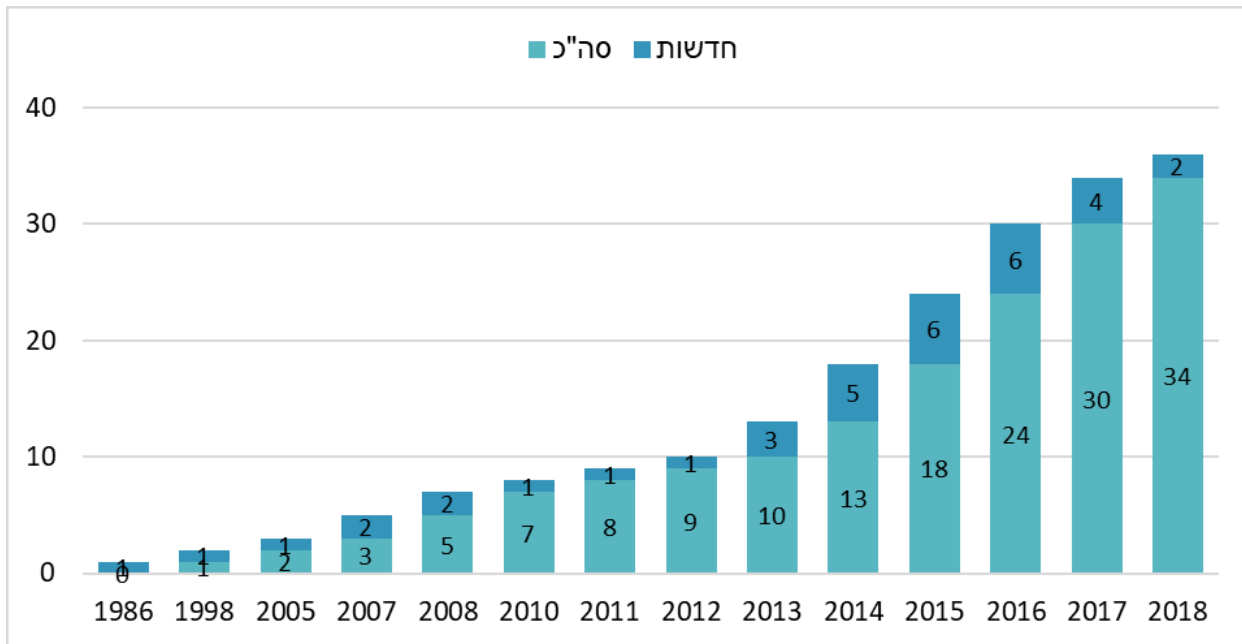
נכון לחודש אוקטובר 2018, היו בישראל 36 חברות טכנולוגיה שתיגו במאגר ה-⁸ Startup Nation Central Finder בלפחות אחת מהתגיות הבאות:

- additive-manufacturing
- 3d-imaging
- 3d-technology

ניתן לראות שהחל משנת 2013 חל גידול מסוים במספר החברות החדשות שהוקמו בתחום מידי שנה.

⁸ קישור לאתר: <https://finder.startupnationcentral.org/>

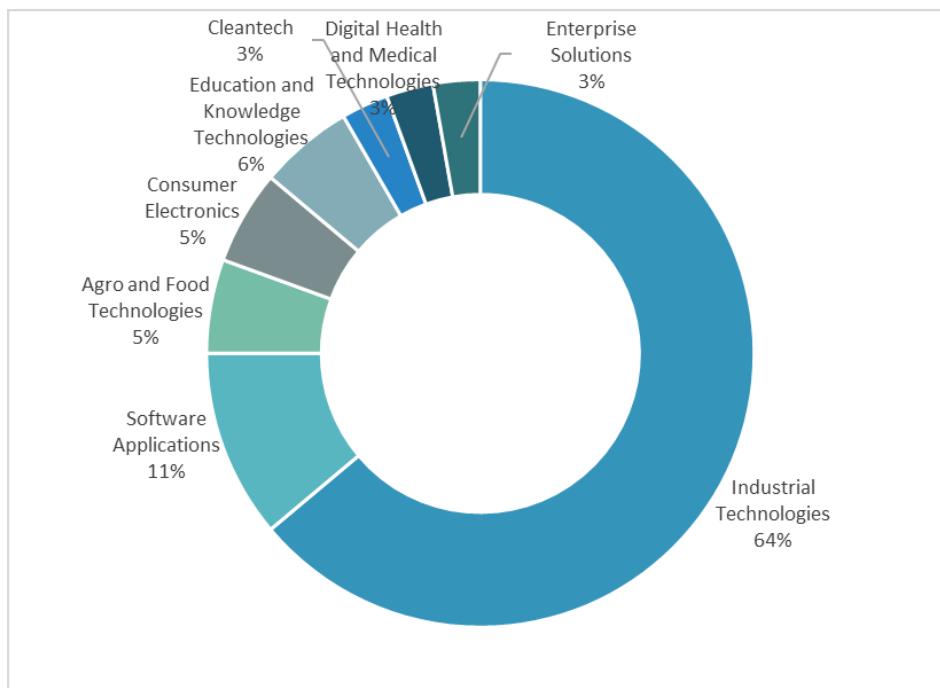
איור 7: חברות בתחום התלת מימד בישראל בשנים 1986-2018



עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

רוב החברות בתחום התלת מימד בישראל (64%) עוסקות בטכנולוגיות תעשייתיות (Industrial technologies), 11% ביישומי תוכנה, 6% בטכנולוגיות חינוך וידע, 5% בסקטורים: טכנולוגיות אגרו ומזון וטכנולוגיות צרכנים ו-3% בסקטורים: פתרונות ארגוניים (enterprise solutions), טכנולוגיות בריאות דיגיטלית ורפואה וקליניקה.

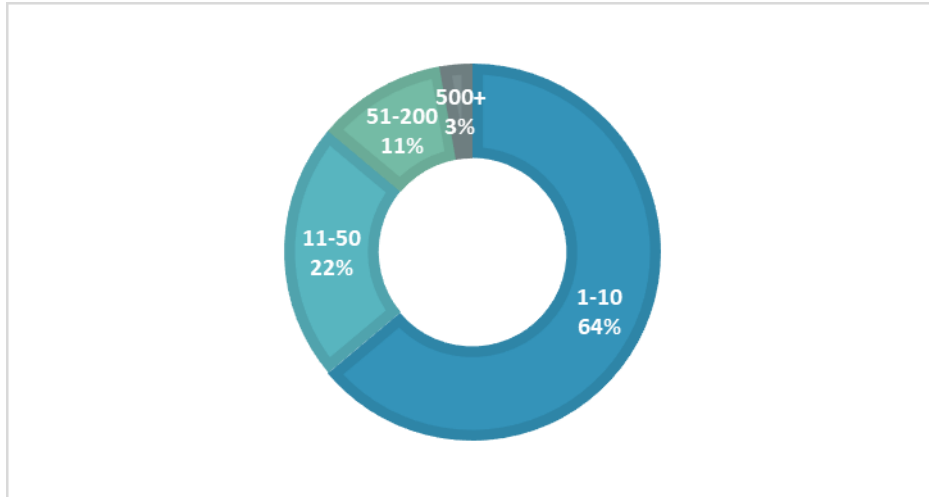
איור 8: חברות תלת מימד לפי סקטור



מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

רוב החברות 86%, הן חברות קטנות שיש בהן עד 50 עובדים (ברוב החברות עובדים עד עשרה עובדים). 11% מהחברות בינוניות ומונות בין 50 ל-200 עובדים ורק 3% הן חברות גדולות המעסיקות למעלה מ-500 עובדים.

איור 9: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה

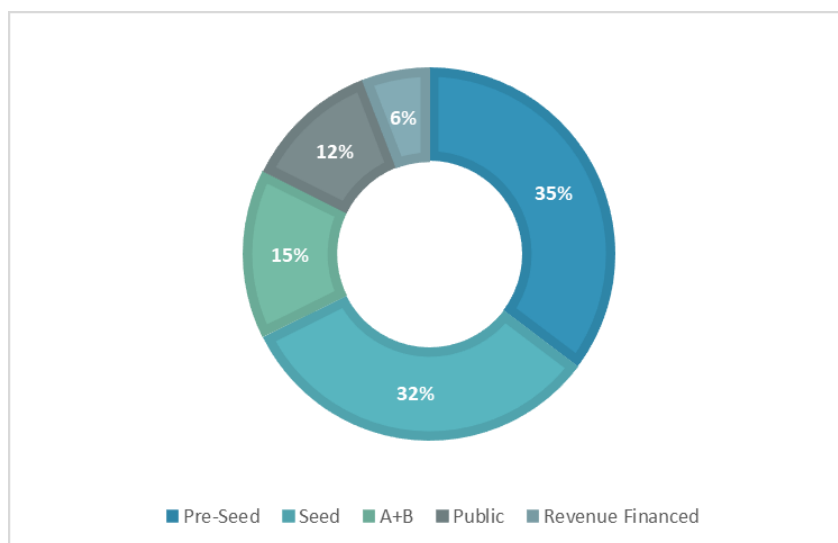


מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

מטבע הדברים חלק גדול מהחברות נמצא בשלבים התחלתיים. האיורים הבאים מציגים את התפלגות החברות לפי Funding Stage ולפי Product Stage.

מבחינת שלב המימון: 35% מהחברות בתחום נמצאות בשלב pre-seed, 32% Seed, 15% נמצאים בסבבי גיוס B+A ורק 6% בשלב Revenue Financed.

איור 10: חברות בתחום התלת מימד לפי Funding Stage (2018)



3.3 חברות למדפסות תלת מימד

בארץ פועלות שלוש חברות גדולות לייצור מדפסות תלת מימד: סטרטסיס, 3D Systems ו-HP. ב-2013 השווי העצום של סטרטסיס ו-3D Systems נסמך גם על ביצועים עסקיים מרשימים וגם על שיעורי צמיחה גבוהים. חברת סטרטסיס האמריקאית, מוזגה לפני כארבע שנים עם חברת אובג'ט הישראלית, ומזוהה מאז כחברה ישראלית. ההכנסות של סטרטסיס מורכבות ממכירת מדפסות, ומהכנסות חוזרות ממכירת חומרי הייצור כמו פלסטיק וניילון ("דיו" למדפסות התלת מימד), וכן משירותי תמיכה ותחזוקה למכונות. ההכנסות של סטרטסיס זינקו בין 2013 ל-2014 ב-55%, מ-484 ל-750 מיליון דולר, והיו ציפיות להמשך צמיחה בשיעורים של 40%–50% גם בשנים הבאות. במחצית השנייה של 2014 המניות של שתי החברות החלו לצנוח. סטרטסיס סיימה את 2015 עם ירידה של 8% בהכנסות ל-696 מיליון דולר. הירידה בהכנסות לוותה בהפסד עצום של 1.3 מיליארד דולר, לאחר שסטרטסיס מחקה מוניטין בסך מיליארד דולר בגין שתי רכישות שביצעה: אובג'ט הישראלית ויצרנית המדפסות הביתיות מייקרבוט. סטרטסיס משקיעה כיום רבות בניסיון למצוא לקוחות חדשים בתחומים התעשייתיים. המטרה היא לזהות את הצרכים של לקוחות בתחומים כמו תעשייה וכלי רכב, ולהראות להם את היתרונות בשימושים במדפסת תלת מימד.

גם חברת 3D הגיעה ב-2015 למכירות של כ-660 מיליון דולר, בדומה ל-2014. המניה שלה צנחה ב-85% והיא נסחרת כעת בשווי של 1.5 מיליארד דולר.

הסיבה לכך יכולה להיות נעוצה בכך שהשימוש המרכזי הנוכחי במדפסות תלת מימד נועד לייצור של אבי טיפוס או של מוצרים סופיים שמיוצרים בכמויות קטנות ואין כדאיות להקים עבורם קו ייצור שלם. בתעשיית המדפסות מעוניינים שהן יבצעו גם ייצור המוני שמחליף תהליכי ייצור קיימים, אבל החברות והמדפסות עדיין רחוקות מכך.

HP נכנסה לשוק מדפסות התלת מימד רק ב-2016. היא חשפה מדפסת מתחרה, והצהירה כי היא מכוונת בטווח הארוך לשוק הייצור ההמוני, שבו לדעתה מצוי הכסף הגדול.

לכל אחת מהחברות יש יתרון יחסי. HP הוציאה מדפסת יותר מהירה, ל-3D יש מדפסת שמשמשת לייצור במתכת, ולסטרטסיס יש מדפסת שיכולה לייצר מוצר שמורכב מכמה חומרים וכמה צבעים (זרחוביץ', 2016).⁹

3.4 מכוני מחקר יישומיים בתחום התלת מימד

בשני מכוני מחקר בישראל קיים עיסוק בתחום הדפסת תלת מימד: במרכז הפלסטיקה והגומי ובמכון המתכות הישראלי. במרכז הפלסטיקה והגומי לומדים וחוקרים הדפסת תלת מימד בחומרים פולימרים: זהו תחום רחב מאוד שמרכז הפלסטיקה עוסק בו באופן מוגבל, אך מעוניין להקים תשתיות ולהתמחות בו במנעד רחב של פעילות מו"פ.

במכון המתכות הישראלי קיימת תשתית לאומית לפיתוח תהליכי הדפסת תלת מימד. במכון למתכות ישנה תשתית של כוח אדם ומספר מכונות להדפסת תלת מימד, אך נדרשת השקעה בקניית מכונות מתקדמות. התשתית להדפסת תלת מימד מיועדת לעסוק בתחום החומרים והייצור המתקדם לשימושי מו"פ באקדמיה ובתעשייה. התשתית תהווה מרכז מו"פ לתהליכי הדפסה של additive manufacturing: מתכות, פולימרים, קרמיקה, חומרים מרוכבים וחומרים היברידיים (למשל, הדפסות

⁹ זרחוביץ', ע. (2016). המהפכה של סטרטסיס נתקעה במדפסת. דה מרקר. אוחר 27/11/2018. <https://www.themarket.com/markets/marketmoney/1.3126920>

משולבות קרמיקה ומתכת, פולימרים על מצע מתכת, חומרים ליישומים ביו-רפואיים כגון שתלים דנטליים ועוד).

3.5 חדשנות בתחום התלת מימד בישראל

בישראל קיימות מספר חברות שפיתחו חדשנות פורצת דרך בתחום הדפסת תלת מימד. דוגמא לכך היא חברת XJet שפיתחה טכנולוגיית ננו להדפסת תלת מימד במתכת ובחומרים קרמיים, שמבטיחה לשנות את תהליכי הייצור בתעשיות רבות. החברה הקימה בפארק המדע ברחובות, מרכז להדפסת תלת מימד (Additive Manufacturing) במתכת וקרמיקה בטכנולוגיה שפיתחה NanoParticle Jetting, ומחומרים קרמיים בהזרקה בניגוד למערכות הדפסה אחרות המבוססות על שימוש באבקה. בטכנולוגיית ה-NanoParticle Jetting מיליון טיפות בשנייה מוזרקות על מנת לייצר שכבות דקות ולבנות חלק תלת מימדי. המערכת שולטת בהזרקה ובהשמה של כל טיפה, על מנת להביא לתוצאות מדויקות. המערכת בטוחה ביותר בשימוש ומאפשרת דיוק ומורכבות הדפסה. חומר ההדפסה מגיע במחסניות נטולות אבקה כך שניתן להפעיל את המדפסות גם בחללים משרדיים סגורים (התמיסות הנוזליות מכילות חלקיקי ננו מוצקים של מתכת ו/או של קרמיקה). ההשקעה במהלכי הפיתוח של XJet, שהניבו לחברה מעל ל-80 פטנטים בתחומים שונים, מוערכת במעל ל-100 מיליון דולר בעשור האחרון. לדברי חנן גוטהייט, מייסד ומנכ"ל XJet, הטכנולוגיה מהווה פריצת דרך בהדפסת תלת מימד במתכת ובקרמיקה, ומאפשרת ייצור מדויק של חלקים מורכבים מאוד ובעלי פרטים קטנים. בחודש שעבר הוענק לחברה על ידי חברת המחקר Frost & Sullivan פרס חדשנות בינלאומי על פיתוח הטכנולוגיה. היכולת להדפיס בדיוק רב ובמספר חומרי גלם, הופך את המערכות של XJet לאידיאליות עבור תעשיית הרכב, הרפואה ורפואת השיניים, התעופה והחלל. החברה חתמה על עסקאות בהיקף של מעל לעשרה מיליון דולר, לאספקת מערכות הדפסה מתוצרתה ללקוחות, מהמובילים בתחומם בארצות הברית, גרמניה, איטליה, שווייץ ובמדינות נוספות ואף בשוק הישראלי.

דוגמא נוספת לחדשנות בתחום בישראל הינה של חוקרים מהאוניברסיטה העברית, פרופ' שלמה מגדסי, ראש המרכז להדפסת תלת מימד באוניברסיטה העברית, פיתח את הטכנולוגיה יחד עם ד"ר עופרה בני, חוקר באוניברסיטה העברית במכון לחקר הסמים, דרך חדשה ליצירת כמוסות תרופה באמצעות מדפסות תלת-מימדיות, שניתן להתאימן לביצוע טוב יותר מהכמוסות המקובלות המיוצרות כיום. הכדורים המודפסים מותאמים אישית מתוך הידרוג'ל שבו מכניסים את התרופה. הטכנולוגיה מאפשרת ליצור גלולות עם עיצובים מורכבים, שיכולים להרחיב, לשנות צורה ולפעול בלוח זמנים קבוע מראש. הגמישות מאפשרת לקפסולות לשחרר את התרופה מקום בו היא צריכה להתמקד. לדוגמא, ניתן להדפיס טבליה שיכולה להתנפח בבטן כדי לתת תחושה של מלאות, או לשחרר רק את התרופה במעי, שם החומציות נמוכה יותר מאשר בבטן. זה גם יאפשר לרופאים להתאים באופן ספציפי יותר את המינון של תרופות לחולים בודדים. אובייקטים מודפסים 3D יוכלו לשנות את הצורה באמצעות מגע עם מים, או לחות ולהיפתח רק בתנאים מסוימים.

המצאה נוספת, שפותחה בשיתוף עם פרופ' עודד שוסיוב מהפקולטה לחקלאות, קשורה להדפסה תלת-מימדית של עץ: החוקרים הגיעו עם הרכב דיו מיוחד המכיל קמח עץ ודבק שיאפשרו הדפסה תלת-מימדית של חפצי עץ (Solomon, 2018)¹⁰.

¹⁰ Solomon, S. (2018). Hebrew U team develops shape-shifting 3D printed pills for better targeted drugs. The Times of Israel. <https://www.timesofisrael.com/hebrew-u-team-develops-shape-shifting-3d-printed-pills-for-better-targeted-drugs/>

4 הכשרת כוח אדם לעבודה בתחום הדפסת תלת מימד

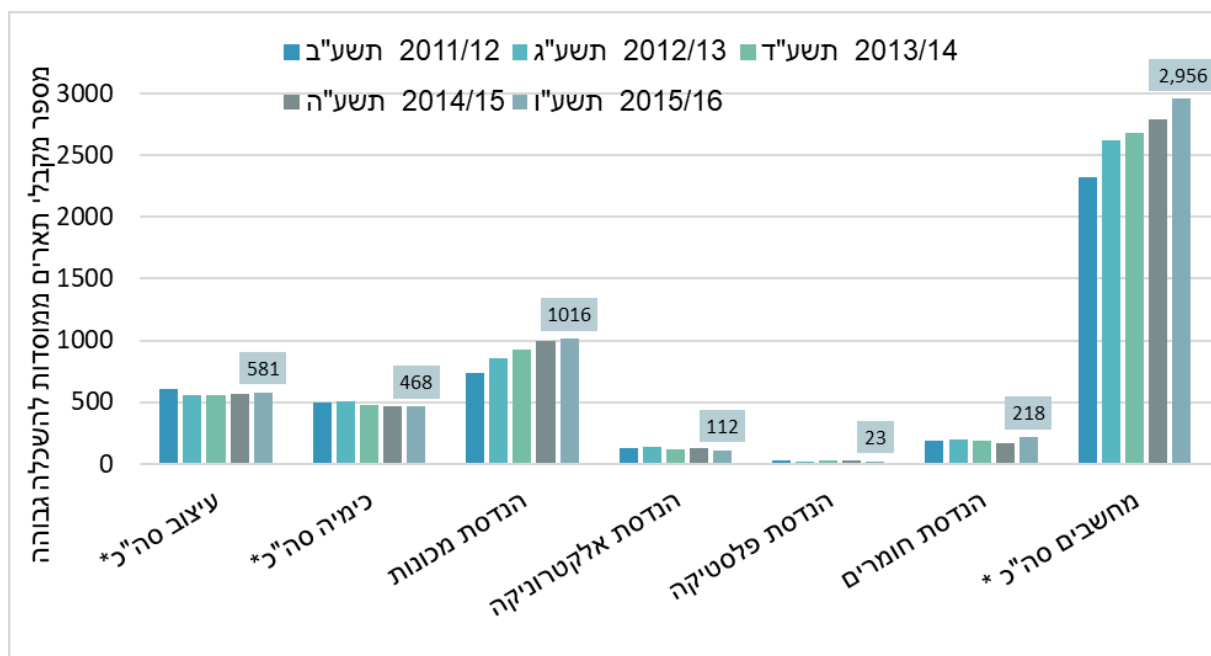
4.1 הכשרה באוניברסיטאות

מהראיונות, השאלונים וסקירת הספרות שביצענו עולה שהדיסיפלינות הנדרשות לתחום התלת מימד הם: **תוכנה, הנדסת חומרים, הנדסת פלסטיקה, הנדסת אלקטרוניקה, הנדסת מכונות, כימיה ועיצוב. בכל אחד מהדיסיפלינות האלה נדרשת הכשרה ספציפית לתחום התלת מימד.**

בגרף הבא מוצגים מקבלי תארים מהאוניברסיטאות בדיסיפלינות אלה בשנים 2011-2016. מספר מקבלי התארים במחשבים עמד על כ-3,000 ובהנדסת מכונות עמד על 1000 בוגרים בשנת 2016. ניתן לראות שמספר מקבלי התארים בתוכנה ובמכונות הוא גבוה ביחס לשאר התחומים ונמצא במגמת עלייה בחמש השנים האחרונות. מספר הבוגרים בתחומי עיצוב וכימיה נמוך יותר ונשאר ללא שינוי כמעט בשנים האחרונות. מספר הבוגרים בהנדסת חומרים, בהנדסת פלסטיקה ובהנדסת אלקטרוניקה נשאר, אף הוא, ללא שינוי בחמש השנים האחרונות והוא נמוך מאוד בהשוואה לשאר התחומים הנדרשים להדפסת תלת מימד, בייחוד תחום הנדסת הפלסטיקה (23 בוגרים בשנת 2016) – תחום הנדרש מאוד למחקר ופיתוח בתחום הדפסת תלת מימד.

מהראיונות והשאלונים עולה כי בכל התחומים קיים מחסור בהכשרה ספציפית לתלת מימד מאחר ותעשיית התלת מימד מתחרה על בוגרים אלה עם תחומים רבים אחרים.

איור 11: מקבלי תארים מהאוניברסיטאות בתחומים אלה בשנים 2011-2016.



מקור: עיבוד מוסד נאמן לנתוני למ"ס (לוח 3.3 - מקבלי תארים מהאוניברסיטאות) הערות: עיצוב סה"כ כולל: עיצוב אפנה, עיצוב טקסטיל, עיצוב תכשיטים, צורפות, תקשורת חזותית, עיצוב תעשייתי, עיצוב קרמי.

כימיה סה"כ כולל: כימיה וכימיה תעשייתית. מחשבים כולל: מדעי המחשב, הדסת מחשבים-מדעי המחשב ומתמטיקה-מדעי המחשב.

בחינת ההכשרות הקיימות בתחום הדפסת תלת מימד באקדמיה נעשתה באמצעות סקירת אתרי האינטרנט של המוסדות האקדמיים וראיונות עם אנשי אקדמיה בתחום הדפסת תלת מימד.

הכשרה לתואר ראשון בהדפסת תלת מימד קיימת רק במכללת שנקר. לימודי הנדסת פלסטיקה בהתמחות חומרים והדפסת תלת מימד לתואר B.Sc.

ההכשרה לתחום התלת מימד שניתנת באוניברסיטאות הינה של קורסים בודדים באוניברסיטת ת"א בפקולטה להנדסה מכנית, בטכניון בהנדסת אווירונאוטיקה ובלימודי חוץ של הטכניון לבוגרי תואר אקדמי בהנדסה, באוניברסיטת בן גוריון בביוטכנולוגיה, באוניברסיטה העברית במדעי הטבע-כימיה ובאוניברסיטת חיפה ובאריאל ניתנים קורסים בעיצוב תלת מימד. במכללות ניתנים קורסים במכללת רמתן גן, בבצלאל ובשנקר.

באוניברסיטת תל-אביב

במסגרת תואר ראשון בהנדסה מכנית, מדעי הטבע- כימיה.

שם הקורס: **הדפסת תלת מימד ותכן חלקי פלסטיקה - 3D printing and design of plastic parts**

מטרת הקורס: לימוד הטכנולוגיות להדפסה תלת מימדית, היישומים המתאימים, המגמות, שיטות התכן והחומרים. לימוד - טכנולוגיות ושיטות התכן של חלקי פלסטיקה בהזרקה Injection Molding, שימוש בתוכנת SOLIDWORKS ובכלי האנליזה (FEA) לתכן מתקדם, והתנסויות בהדפסות תלת מימדיות.

נושאי הלימוד:

- לימוד הטכנולוגיות להדפסה תלת מימדית והיישומים המפותחים כיום.
- לימוד הטכנולוגיות ותכן חלקי הפלסטיקה, שיקולים, חומרים, מידול, חישובים ואנליזות.
- התנסות בתכן ובהדפסה תלת מימדית של חלקי פלסטיקה.

בטכניון

1. במסגרת לימודי חוץ מתקיים בקמפוס הטכניון בשרונה ת"א, קורס שנקרא: **הדפסת בתלת מימד Additive Manufacturing**. הקורס נלמד בהיקף של 70 שעות אקדמיות ומלמדים אותו מומחים בתחום ממכון המתכות בטכניון והוא מיועד לבוגרי תואר אקדמי בהנדסה ו/או מיועדים לעבודה בתחום הדפסת תלת מימד.

מטרת תכנית הלימוד הינה להקנות למהנדסים או לאקדמאים המעוניינים לעסוק בתחום, את הכלים להבנת בסיס ושליטה בתהליכי ריבוד שכבות: פעולת ציוד ובניית מוצר, מגוון חומרי ייצור קיימים כיום, תהליכי התכה והתמצקות של מתכות, סנטור מתכות, דיפוזיה, מעברי פאזה, היווצרות מיקרו מבנה ותכונות של מוצרים, בחירת תהליך מתאים, איתור תקלות, אפיון מוצרים והבטחת איכות וכו'.

2. הפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל מציעה מגוון רחב של אפשרויות להשתלמות לתואר שני ולתואר שלישי למועמדים בוגרי הפקולטה וכן בוגרים של פקולטות ומחלקות הנדסיות או מדעיות שונות (כגון: הנדסת חשמל, הנדסת מכונות, פיסיקה, כימיה ועוד). אחד השטחים להתמחות הוא **מבנה ומכניקת המוצקים** - מכניקת המוצק, יציבות וקריסה, אלמנטים סופיים, מבנים וחומרים מרוכבים, עמידות וכשל, מבנים נבונים, חומרים ביולוגיים אקטיביים, **הדפסה תלת מימדית**.

באוניברסיטה העברית

האוניברסיטה העברית הקימה מרכז הדפסת תלת-מימד (3D and Functional Printing Center), שבו חוקרים, עובדי חברות סטארט-אפ ואנשים מתחומים שונים, יכולים להשתמש במדפסות התלת מימד וליישם את הרעיונות שלהם. רעיונות חדשניים שפותחו במרכז לאחרונה הם:

גלולת תלת-מימד שיש בהן יותר גמישות מבחינת שינוי צורה ושחרור התרופה במקום שמצריך טיפול ורק בתנאים מסוימים. רעיון נוסף שפותח לאחרונה הוא הרכב דיו מיוחד שמכיל קמח עץ ודבק שיאפשר הדפסת תלת מימד של אובייקטים מעץ.

בפקולטה למדעי הטבע-כימיה ניתן קורס: ננו טכנולוגיה בשירות האדם במהלך הקורס יינתנו הרצאות נבחרות בנושאים שונים בתחום הננו-מדע וננוטכנולוגיה כגון: ננו-חומרים, והדפסה תלת-מימדית בננו, אנרגיה חלופית וקטליזה, ננו-ביולוגיה וננו-רפואה, אלקטרוניקה מולקולרית, חישוביות קוונטית, ועוד.

באוניברסיטת בן גוריון

קורס: "ריבוד והדפסה תלת מימדית במתכות" במחלקה להנדסת ביוטכנולוגיה

באוניברסיטת חיפה

קורס: הדפסה בתלת מימד כפרדיגמה ללימוד עיצוב – חוג לרפוי בעיסוק

<https://studapps.haifa.ac.il/catalog/#/course/51546640/001>

באריאל

קורסים של הנדסאים: עיצוב תלת-מימד והדמייה - DMAX3

<http://www.ariel.ac.il/handasaim/certificate/design-and-drafting-software/3d>

שירותי הדפסת תלת מימד <https://www.ariel.ac.il/newsletter/9497>

4.2 הכשרה במכללות

האקדמיה לאומנות ועיצוב בצלאל

במסגרת לימודי עיצוב קרמי זכוכית ניתן הקורס: מבוא לטכנולוגיות תלת מימד.

מטרת הקורס למפות את תחומי הייצור הממוחשב והקשרים האפשריים ביניהם לבין דיסציפלינות חומריות מסורתיות בקרמיקה, זכוכית, מתכת, פלסטיק ועוד. לקיים תהליך עיצוב ותכנון מוצר / אובייקט תוך הטמעת טכנולוגיות דיגיטליות.

שנקר

לימודי הנדסת פלסטיקה בהתמחות חומרים והדפסת תלת מימד B.Sc.

הלימודים מקנים לסטודנטים ידע בסיסי וכלים תכנוניים לתכנון אינטראקטיבי של מוצרי תלת מימד. הסטודנטים לומדים סוגיות יסוד במדעים, בהנדסה, ובהנדסת פלסטיקה ופולימרים כמו כימיה אורגנית, שימושי מחשב, חומרים מורכבים, מכניקה של חומרים פלסטיים זרימה ומעברי חום. בהתמחות בהדפסת תלת מימד לומדים הסטודנטים על עקרונות התכנון החזותי של מוצרים בראייה הנדסית. הם לומדים על התבניות וכלי העיצוב של התעשייה, על בחירה נכונה של חומרים לפי המוצר

המיועד ועל ההיבטים הפונקציונאליים של מוצרי תלת מימד מחומרים שונים. תכנית הלימודים מתמקדת בנושאים מכניים הנדסיים בשילוב אסטרטגיות לבחירת חומרים ותהליכי עיבוד בעזרת תוכנות מודולריות.

מכללת רמת גן

קורס הדפסה בתלת מימד

הקורס מלמד את תהליך פיתוח המוצר. הקורס מקנה את הכלים בטכנולוגיות ייצור המוצר מהמתקדמות בעולם. הקורס מקנה ידע תאורטי ומעשי. הקורס סוקר טכנולוגיות שונות לתכנות והדפסת מוצרים במגוון חומרים וצבעים, תוך תרגול מעשי של תכנון והדפסה. ההדפסות יבוצעו במהלך השיעורים בעזרת מדפסות תלת מימד מהמתקדמות בשוק.

קהל יעד: בעלי מקצוע כגון: מהנדסים, אדריכלים מעצבי פנים, מעצבי מוצר, צורפים, אמנים, מטפלים ועוד.

בוגרי מגמות לימודי הנדסה בתחום המכונות, האלקטרוניקה ומדעי הייצור.
הקורס הנו פרי שיתוף פעולה בין ביה"ס למחשבים והייטק של מכללת רמת-גן וחברת 3D-4all.

4.3 קורסים במסגרת מוסדות שאינם אקדמיים

מכללת עתיד (פרישה ארצית): עתיד היא רשת מכללות שפועלת בפריסה ארצית. ברשת זו אפשר ללמוד בקורס תלת מימד, שבו לומדים על טכנולוגיות הדפסה מתקדמות. היקף התכנית כ- 120 שעות לימוד.

IMPACT HUB (תל אביב): הקורס מנוהל על ידי קהילה עסקית ורעיונית, המפעילה חללי עבודה ליוצרים וליזמים, ומעבירה סדנאות מגוונות בנושאי המכירות, הסטארט אפ והטכנולוגיה. המסלול ללימוד הדפסת תלת מימד מתקיים במתכונת קורס קצר, בן חמישה מפגשים שבועיים, ומתמקד בהפעלת תוכנת SKETCHUP להדפסה במדפסות ביתיות.

מכללת מדיאטק ג'ון ברייס חיפה קורס הדפסת תלת מימד במכללת מדיאטק ג'ון ברייס חיפה כולל כ- 152 שעות לימוד. במהלכו מכירים את טכנולוגיות ההדפסה החדשניות ביותר לשימוש משרדי וביתי.

5 ממצאי הסקר והראיונות

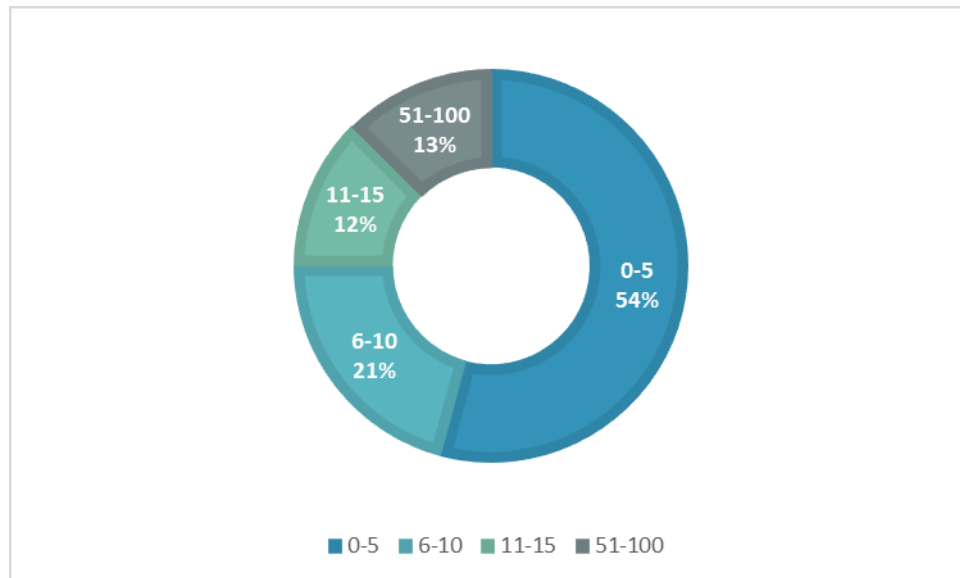
5.1 שאלון מחקר

פרופיל העונים לשאלון (חברה ותפקיד): על שאלון המחקר ענו 24 חברות העוסקות בתחום התלת מימד. החברות שענו על השאלון עוסקות במגוון היבטים של תחום הדפסת התלת מימד: פיתוח תוכנה לייעול תהליך הדפוס ושליטה מרחוק במדפסות תלת מימדיות, פיתוח טכנולוגיה להדפסה תלת מימדית פונקציונאלית לקבלת מבנים תלת מימדים, פיתוח ויצור מדפסות תלת ממד, פיתוח פלטפורמה אינטרנטית לעיצוב בתלת מימד, פיתוח שירות ענן להגנה על קבצים המיועדים ליצור בהדפסת תלת מימד, הגנה על IP בהדפסת תלת ממד, הדפסת תבניות עבור מכלולים תעופתיים, פיתוח מדפסת וחומרים להדפסה תלת מימדית בתחום ה micro manufacturing ועוד.

בין העונים לשאלון היו 9 מנכ"לים, 4 CTO, 2 מייסדים, 2 יזמים ו-6 מנהלים (מנהל הנדסת יצור ומו"פ, מנהל כימיה, מהנדס ראשי, מנהל מכירות, VP product).

גודל החברה: כמחצית מהחברות (54%) הן חברות קטנות שמעסיקות עד 5 עובדים. התפלגות זו דומה למיפוי שביצענו על פי המאגר של Start-up Nation בפרק 3.2.

איור 12: גודל החברות שענו לשאלון לפי מספר העובדים בחברה



פרופיל העובדים בחברה: התפקידים שהעונים לשאלון ציינו היו מגוונים ביניהם: מהנדס/ת מכונות, מנהל טכנולוגי, טכנאי, מהנדס ראשי, ניהול טכני, תמיכה טכנית, תפעול דוגמאות, עיצוב תעשייתי, מהנדס מעבדה, מנהל שיווק, מהנדס ציוד, פיתוח שיווק, פיתוח שווקים ואפליקציות, יזם, מנהל עסקים, כימאי, מטלורגיה, דוקטור לננו אופטיקה, דוקטור לכימיה, פיתוח סוגי דיו ותהליכים שונים, פיתוח דבקים בחום גבוה.

השכלה: הפקולטות בהן למדו עובדי החברות הן: מדעי המחשב, הנדסה, מדעים מדויקים, עיצוב, מנהל עסקים, פיסיקה, כימיה, הנדסת מכונות, הנדסת תוכנה, עיצוב תעשייתי, הנדסת חשמל, הנדסת מזון, הנדסת חומרים, אורומכניקה, אלקטרוניקה, הנדסה מכאנית, מכטרוניקה.

לשאלה: האם נדרשת הכשרה לעובדים בתחום מעבר לרקע איתו הם מגיעים לחברה? רוב העונים לשאלון 83% (19) ציינו שנדרשת הכשרה נוספת ו-17% (4) שלא נדרשת הכשרה נוספת. אחד לא ענה על השאלה.

ההכשרה הנוספת שנדרשת לדעתם לעובדים היא:

- לימוד נרחב של התעשייה והטכנולוגיות הנפוצות
- הכרות עם עולם המושגים, הכרת טכנולוגיות תעשייתיות/ביתיות
- הבנה של שפה חדשה. מחשבה על ייצור תלת מימדי והטכנולוגיה
- ידע בשיטות הדפסה, שמירה על הפרמטרים של הדפסה ותהליכים משלימים לאחר הדפסה.
- טכנאים מולטידיסציפלינריים שמבינים בתיב'מ, מכונות, פיקוד ותהליכי ייצור. קיימת חשיבות גם לצד הטכני והיישומי כמלווה אפיון וצרכי לקוח, ונדרשת היכרות עם פתרונות ייצור לתעשייה, צרכים, אתגרים וכדו.
- תכנון נכון של חלקים. תיכון בעזרת מחשב
- הבנה במטלורגיה ובעבודה בטמפרטורות גבוהות. בטיחות.
- ניתוח CAD
- שימוש במדפסת תלת מימד
- שליטה בתוכנות
- עיצוב בתלת מימד ממשק משתמש, עיצוב פולימרים
- היכרות עם תהליכי ייצור של חלקים. ספציפי לתחום של ייצור (לא prototype) ב- Additive Manufacturing
- הכשרה בפיתוח: חומרים, מכונות, תוכנה

במידה והעובדים עוברים הכשרות אחרי שהם מגיעים לחברה, ההכשרות מתקיימות: 65% (11) ענו שההכשרה היא בתוך החברה, 24% (4) ענו שההכשרה מתבצעת אצל יצרני מדפסות התלת מימד, 1 ענה שבחול: גרמניה, ארה"ב ואנגליה. 1 לימוד עצמי. 5 לא ענו על השאלה.

לשאלה האם יש מחסור בגיוס אנשים בפרופיל הנדרש: ענו רוב המשיבים לשאלון 91% (20) שכן, 2 ענו שלא ו-2 לא ענו על השאלה. המשיבים לשאלון ציינו כי המחסור הוא לעובדים בעלי הפרופיל הבא:

- המחסור הרב ביותר שצוין הוא של אנשי פיתוח המתמחים בתתי תחום של מדעי המחשב הנוגעים בדפוס תלת מימדי.
- מחסור חמור באנשי חומרים, כימאים- דרושים כימאים עם רקע בפולימרים חסרים מטלורגים עם נסיון.
- יש מעט מאוד ובמיוחד בארץ מומחיות בפיתוח תלת מימד ב web

- בד"כ חברות הסטארט אפ בתחום סובלות מאיבוד כח אדם- כאשר חברה קטנה מכשירה סטודנט לתחום, הוא צובר ניסיון ומיד עובר לחברה גדולה.
- דרושים מהנדסים מיומנים בתלת מימד.
- דרושים מנהלים להובלת פרוייקטים. למהנדסים עם ניסיון ניתן לפנות אך ורק לכאלו שיצאו מחברות תלת מימד. למהנדסים חסרי ניסיון נדרשת עקומת למידה ארוכה.

בהסתכלות קדימה, אלו הכשרות חדשות ידרשו לעובדים בתחום?

- היכרות עם חומרים, טכנולוגיות תכנון וייצור שונות
- תוכנה בעיקר בתחום הגרפיקה, עיצוב תעשייתי UI/UX, עיצוב בתוכנות תלת מימד
- כימיה מתקדמת
- פיתוח חומרים והתמחות בחומרים מתקדמים
- התמחות בתהליכי הדפסה מתקדמים, טכנולוגיות של הדפסה חדשות, הכרות מעמיקה עם פורמטים של קבצי הדפסה. הכרת המגבלות של הדפסת תלת מימד מול שיטות ייצור מסורתיות. תכנון להדפסה בשימוש בתלת מימד. היכרות עם מגוון רחב של טכנולוגיות הדפסה ולא רק הבסיסיות
- הבנה עסקית של הצורך, ניהול פרוייקטים מולטידיספלינריים
- הבנה מודולרית ותלת מימדית
- בדיקות
- עיבוד תמונה AI
- הבנת תהליכי ייצור, תכנון וטכנולוגיות בעולם הייצור בהדפסה תלת מימדית
- בעולם בו ניתן יהיה להדפיס חלקים צבעוניים תדרש הכשרה מיוחדת גם לעולמות הצבע. היום בוגרי מכונות או עיצוב תעשייתי מכירים בהקשר התיבם בעיקר הכנת מודל. בעתיד זה יתחבר.
- התאמה לטכנולוגיה ספציפית. אם רוצים לתכנן כלי מודפס לשימוש בניתוח ספציפי, זה דורש הבנה גם במכונות (חוזקים, תכן וכו'), גם במדפסות תלת מימד כדי להבין את יכולות הייצור ואופן הכנת הקבצים. גם בתהליכים רפואיים כדי להבין את עולם העבודה של המשתמש וגם את העולמות ההיקפיים כמו אתגרים רגולטוריים.

האם יש לך המלצות למדיניות הכשרה בתחום זה לאוניברסיטאות ולמכללות?

- לימודים יותר מעשיים. קורסים שמשלבים אקדמיה עם ניסיון תעשייתי. שילוב של מובילי תעשייה בתחום בנקודות השקה מסוימות.
- לשלב מרצים מתוך חברות בתחום להעשרה בקורסים עבור סטודנטים בתחום הנדסה וכימיה. בארץ יש גופי ידע אדירים בסטרטסיס, ב HP, XJET, NNO DIMENSION וכו'- שבוע הכשרה, כולל שילוב סטודנטים בעבודה בחברות אלו, יביא גל חדש של מהנדסים מוכשרים.
- לתת דגש על פיתוח web ועל יישומים וכלי עיצוב שימושיים בתלת מימד. עיצוב בתוכנות תלת מימד.
- התמחות בתוכנת תלת-ממד כלשהי. קורס בגופים תלת ממדים - משטחים, סוגי קבצים, מגוון תוכנות ויישומן, CNC הבנה ותפעול.
- בתחום המכונות והעיצוב התעשייתי כדאי ללמד את עולם הצבע.
- לתת תכנים בתחום של כימיה תעשייתית יחודית, פיתוח חומרים וגם בתחום ההנדסה חשיפה לתחום הדפסת תלת מימד ותכנון.

- לשלב Industry 4.0 ו-AM, ללמד שיטות ל-repeatability ו-consistency DFAM.
- בתחום ההנדסה כדאי לפתוח מחקר של תלת מימד וקורסים לייצור בשיטה זו
- ללמד תיכון עבור מדפסות, טיפולים תרמיים, חומרי גלם, איכות ובקורת חלקים, פיתוח חומרים חדשים.
- ללמד סולידוורקס, לפתוח FABLAB כדי שהסטודנטים יתנסו בהדפסה - עדיף מדפסות ממספר טכנולוגיות שונות, לרכוש סורקים כדי שיתנסו גם בסריקות.
- מהנדסים מולטידיסציפלינריים.

האם יש מקום לשיתופי פעולה בין האקדמיה לתעשייה בנושא הכשרות העובדים לתחום?

- הרבה מאוד מהידע נמצא בתעשייה ולכן שיתוף פעולה כזה יכוון את האקדמיה להציע הכשרות וקורסים שונים בנושא.
- יש בתחום הזה פער גדול בין האקדמיה לתעשייה ושת"פ הכרחי לצמצום פערי ידע וניסיון.
- יש מקום להתמחויות והנחיית פרויקטים.
- בהתנסות בעבודה כסטודנטים לצורך רכישת ידע וניסיון רלוונטי. הכשרות בין תחומים, למשל מהנדס מכאני עם ידע מסויים בהתנהגות חומרים.
- למהנדסים של היום צריך להקנות אוריינטציה מחשבתית מהרגע הראשון לעולם ההדפסה התלת מימדית. ייצור מקומי זה עתיד עולם הייצור. יש המון מקום לחדשנות בעולם הזה. הדפסה תלת מימדית ביחד עם עיבודים משלימים תתפוס נתח גדול בתוך השוק המתפתח של ייצור מקומי.
- תמיכה של התעשייה באקדמיה בהיבט הידע, סילבוס, דוגמאות, ביקורים וכו'.

5.2 ראיונות

במסגרת המחקר נערכו שבעה ראיונות:

1. פרופ' שלמה מגדסי – ראש המרכז להדפסת תלת ממד – האוניברסיטה העברית בירושלים.
2. אמנון שירזלי מרפאל
3. אוהד דולב- מנהל ברפאל בחטיבת מנור את נושא טכנולוגיות ייצור מתקדמות.
4. ד"ר אביגדור זוננשיין- עמית מחקר בכיר במוסד שמואל נאמן. מילא סדרה של תפקידים בכירים ברפאל בתחומי ניהול איכות ומצוינות, ניהול פרויקטים והנדסת מערכות. יושב ראש וועדת התקינה המרכזית לניהול ואיכות במכון התקנים הישראלי.
5. ד"ר אביב זאבי- מנהל זירת תשתית טכנולוגית, הרשות לחדשנות
6. פרופ' עדין שטרן - מהמחלקה להנדסת חומרים – אוניברסיטת בן גוריון
7. פרופ' עזרי תרזי- ראש מסלול עיצוב תעשייתי בפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים בטכניון.
8. פרופ' שמואל קניג - מייסד המחלקה להנדסת פלסטיקה בשנקר, מכהן כדיקן הפקולטה להנדסה ועומד בראש המחלקה לתואר שני בהנדסת פלסטיקה בשנקר

סיכומי הראיונות מופיעים בנספח 1 לעבודה זו.

6 תובנות מהראיונות ומהסקר

כפי שתואר בדו"ח, הדפסת התלת מימד היא טכנולוגיה שחוצה סקטורים ומתפתחת במהירות. היתרונות הפונקציונאליים המגוונים שלה מספקים ערך מוסף למגזרים שונים והיא משפיעה על טווח גדול של עסקים. תחום הדפסת התלת מימד הוא תחום מולטידיספלינרי הן בהיבט הפיתוח והן בהיבט היישום. האנשים שעוסקים בתחום מגיעים מדיסציפלינות שונות. על מנת שתחום הדפסת תלת מימד יוכל לפרוח ולשגשג יש צורך, מצד אחד, בכוח אדם בעל השכלה הנדסית ומדעית בסיסית (כמו הנדסת מכונות, הנדסת חומרים, מחשבים) אך גם בתחומים משלימים כגון עיצוב על גווני השונים (תעשייתי, אופנה ועוד). במחקר עלו מספר פתרונות אפשריים:

1. יש לדאוג לכך שהדפסת תלת מימד תיכנס לתכנית הלימודים לבתי ספר תיכוניים. שבכל בית ספר תהיה מדפסת תלת מימד והחומרים הנדרשים, בצורה שתאפשר לתלמידים להחשף לתחום זה. על מנת שזה יתאפשר יש להכשיר מורים מהמקצועות השונים (מחשבים, עיצוב, מכניקה, כימיה ועוד) ללמד את תחומי הדפסת תלת מימד ולשלב את התחום בתוכניות הלימודים.
2. מספר הבוגרים בפקולטות להנדסת חומרים, הנדסת פלסטיקה והנדסת אלקטרוניקה אינו גבוה ובנוסף, מספרם מתחלק בין תחומים רבים נוספים. לכן יש לבחון דרכים להעלאת מספר הבוגרים בתחומים אלה.
3. יש להכניס מסלול לימודי הדפסת תלת מימד בפקולטות מכונות, כימיה, תוכנה וחומרים. לבנות קורסים יעודיים להדפסת תלת מימד שיהיו חלק מתכנית הלימודים בפקולטות להנדסת תוכנה והנדסת חומרים מכיוון שזה חלק מהמיומנויות שהסטודנט להנדסה צריך לרכוש בתחומים אלה.
4. לפתוח תואר ראשון בעיצוב הנדסי דיגיטלי, שישלב לימודי עיצוב עם הנדסת חומרים, אנליזת חוזק בעיצוב תעשייתי, אנליזת זרימה, ניהול מוצר, אבטחת איכות. זה יכול להיות תואר בשיתוף עם הנדסת מכונות או בפקולטה לארכיטקטורה או מדעי המחשב.
5. לפעול להכשרת מהנדסים מולטידיספלינאריים לתחום התלת מימד. למשל קורסים מולטידיספלינאריים שמשלבים בין עיצוב לחומרים.
6. פיתוח כוח אדם ולימודי המשך (Life long learning) בצורה ממוסדת בתעשייה - אחת הבעיות העיקריות של התעשייה היא שהעשייה היום יומית מאוד שואבת ולא נותר זמן רב ללימודי העשרה והתמקצעות. יש חשיבות רבה להעשרה של עובדים בארגונים תעשייתיים טכנולוגיים באמצעות הרצאות וכנסים בארץ ובעולם, הרצאות של אנשי תעשייה, מעורבות שלהם בתכני הלימודים, התנסות מעשית של סטודנטים שלומדים את התחום בחברות ועוד.
7. הקמת מרכז ידע שיספק תשתית מחקרית נרחבת לגבי ההיבטים השונים הקשורים להדפסת תלת מימד. הידע שיאסף במרכז יעמוד לרשות כל החוקרים בתחום מהאקדמיה והתעשייה.

7.1 נספח 1: סיכומי ראיונות

7.1.1 סיכום ראיון עם פרופ' שלמה מגדסי

מראיינות: ציפי בוכניק ואשרת כץ שחם

תאריך: 12/7/2018

פרופ' מגדסי - ראש המרכז להדפסת תלת ממד – האוניברסיטה העברית בירושלים

פרופ' מגדסי תיאר את מבנה והפעילות של המרכז:

במרכז יש שתי פעילויות:

(1) קבוצת מחקר שעוסקת בחומרים – הדפסה פונקציונלית דו, תלת ממדית. בקבוצה יש כ-20 חוקרים וציוד רב שקשור בהכנת חומרים והרבה מדפסות לאו דווקא תלת ממד. החוקרים ברובם הם כימאים, מהנדסי חומרים ומהנדסי כימיה. רובם באים לעשות מחקר ולומדים אצל פרופ' מגדסי את התחום תוך כדי עבודה בקבוצת המחקר.

(2) לפני שנה וחצי הקמתי מרכז להדפסה פונקציונלית (3D) – במרכז יש מדפסות תלת ממד ואנחנו נותנים שירותים לחברות שונות. במרכז יש בעיקר כוח אדם טכני ברובו כימאים (בעלי תואר ראשון ומעלה) – מוכשרים על ידי חברות המדפסות או בתוך המרכז על ידי עובדים אחרים – ההכשרה היא שולית וקצרה.

המרכז מבצע עבודות הדפסה של 3D וגם 2D לחוקרים וחברות שונות. עושים עבודות כמו הדפסת מוליכים חשמליים. הלקוחות הם מוסדות אחרים כמו בצלאל, טכניון, חברות סטארט אפ, חברות מבוססות וגם עבור מחקר של חוקרים אחרים אצלנו באוניברסיטה – מכל התחומים – ביולוגיה, רפואה, רפואת שיניים, פיזיקה, כימיה, מחשבים ואומנות.

חלק מהלקוחות מגיעים עם תכנון מוכן ולחלק אנחנו עוזרים לבצע את התכנון. עיקר העזרה היא בחומרים (אין הדפסות מתכת) – במרכז מתבצעות הדפסות של פולימרים, חומרים קרמיים, מוליכים חשמליים.

הייחוד של המרכז הוא ביכולת לעזור ברמה של חומרים.

המומחיות של פרופ' מגדסי היא חומרים לתלת ממד וה"קהל" הוא כימאים או מהנדסי כימיה שבאים לעשות תואר מתקדם – מוסמך או דוקטורט.

באקדמיה יש מעט מאוד לימודים שרלוונטיים ל-3D. אני יודע שיש קורס אחד בבצלאל שהמרכז שותף בהעברתו ועוד קורס אחד שמתמקד בתוכנות 3D. גם בשנך יש קורס שהוא רשות למעצבים.

לדעת פרופ' מגדסי התחום עומד לפרוץ – יש חברות שמשקיעות במחקר, יש כספי מחקר בביליוני דולרים בעולם. סטרטיס שהיא חברה ישראלית מהגדולות בעולם למדפסות תלת ממד. בתחום התלת ממד נהוג שמי שמייצר את המדפסות מוכר גם את החומרים.

בתחום הזה נדרש כוח אדם במקצועות הנדסת חשמל, אלקטרוניקה, חומרים, עיצוב, מכונות. זהו תחום מולטידיספלינרי לא פשוט.

פרופ' מגדסי לא מכיר עוד מכוני הדפסת תלת ממד – אולי יקימו בת"א – עוד לא ברור. המכון בטכניון הוא מכון מתכות ולא הדפסה. המרכז היחיד הוא באוניברסיטה העברית.

המלצה למדיניות: לדעתו של פרופ' מגדסי כרגע הקורסים שיש מעטים מידי, ורק באוני' העברית יש קורסים שמשלבים בין עיצוב לחומרים מולטידיספלינרי. אין מרכז כזה בעוד אוניברסיטאות ויש מקום לעשות הרחבה. למשל קורסים יעודים להדפסת תלת ממד למהנדסי מכונות וחשמל כדי לתת חשיפה לסטודנטים של תואר ראשון (אולי יש קורסים כאלה בטכניון – לא בטוח) - זה לא פשוט כי התחום הוא מולטידיפלינרי. בקורס בבצלאל מלמדים היבטים שונים של חומרים, כימיה וטכנולוגיה. זה לא קורס פורמלי. בשנה הקרובה אמור להפתח קורס פורמלי בשיתוף עם רפאל.

להערכתו של פרופ' מגדסי בעשור הקרוב מספר העובדים יעלה ממאות שיש כבר היום לאלף לפחות.

התחום עובר מ-rapid prototype ל-manufacturing. לדוגמא אדיס כרגע מדפיסים רק אב טיפוס ומייצרים כתעשיית פלסטיקה רגילה. אנחנו עכשיו בתקופת מעבר לתהליכי ייצור, זה עוד לא קורה – אבל חד משמעית יקרה. יש שאלה תאורטית של איזה כמות ייצור רלבנטית כדי שזה יהיה כלכלי. אבל זה יקרה – המכונות משתכללות, החומרים יוזלו ואז זה יקרה. זה כבר קורה היום ברפואת שיניים – יש ייצור תעשייתי.

בתעשיית הפלסטיקה זה עניין של מחיר מוצר מול הכמות שמייצרים לעומת 3D המחיר אינו פונקציה של כמות (ההבדל הוא שבתעשיית הפלסטיקה יקר לייצר את התבניות ולכן ככל שמייצרים יותר יחידות המחיר ליחידה יורד לעומת זאת בהדפסת תלת ממד מחירן של כל היחידות זהה – מחירה של היחידה הראשונה זהה ליחידת המיליון).

היתרון של 3D שכיום יש מוצרים שניתן לייצר רק בעזרת הטכנולוגיה של תלת ממד, למשל גלגלי שיניים שמסתובבים אחד בתוך השני ללא צורך בהרכבות.

7.1.2 סיכום ראיון עם אמנון שירזלי מרפאל

מראיינות: ציפי בוכניק ואשרת כץ שחם

תאריך: 27.6.18

אמנון מספר: "התחלנו בשנת 2004 – קנינו מכונה לייצור דגמים (Prototype) של חברה ישראלית Object נקנתה על ידי חברת ¹¹Stratasys. ההשקעה במדפסת החזירה את עצמה כבר בשנה הראשונה. המדפסת נתנה למתכננים יכולת לראות את התכנון, לא רק בתיב"ם (תכנון באמצעות מחשב). ההשקעה הוחזרה בשנה הראשונה ומבחינת רווח תפעולי המכונה מחזירה את עצמה פי 2 כל שנה. את השימוש במכונה הוביל אגף תיב"ם והיא נכנסה גם לאגף ייצור בתוך רפאל. כל תכנת תיב"ם בארגון יכול לבקש כיום הדפסת חלק – תוך כמה ימים מקבלים אותו למפעל. לא כמו שהיה פעם שהיה צריך להצעות מחיר וייצור חיצוני. ככה זה התחיל בדגמים.

במעבדה שלנו, הוכשר אדם לתפעול ותחזוקה בסיסית של המכונה. במכונה הזו לא נדרש מהנדס. לצורך כך מספיק הנדסאי או טכנאי – צריך לדעת לסדר את המכונה ליצור אופטימלי. תחזוקה יותר רחבה ניתנה על ידי אחריות של היצרן.

לפני כעשור, ב-2008, אוהד דולב ואני התחלנו לעשות פעילות ענפה. אני בצד הייצור ההנדסי – יש לי רקע של חומרים, הנדסת מכונות ותהליכים ואוהד בצד של תיב"ם. חברנו יחד והתחלנו לבדוק תשתיות, מה נדרש כדי להפוך חלק פרוטוטייפ לחלק "אמיתי" שאפשר לשים בתוך מכלול. במשך שנתיים סקרנו את הצרכים בארגון ומה הכי מתאים לנו מבחינת השימוש ממה שקיים בשוק. החלטנו לרכוש מכונה הדפסה בטיטניום – אמנם יש לה חוזק גבוה והיא גם מאוד יקרה. כאן נכנסו עוד שיקולים, זה לא כמו לקנות מכונה – זה לא כמו לקנות מחרטה ואתה לוקח מפעיל משתמש. פה צריך גם לקנות את החומר וגם להבין איך להשתמש. אם רוצים לייצר מוצר יש חשיבות גדולה מאוד לתכנון – צריך להבין מה החלק, איך לתכנן נכון את הייצור שלא יכשל. במקרה הזה נדרשת התערבות הנדסית כדי להגיע למצב של מוצר.

מבחינת כוח אדם חוץ ממני ואוהד שהובלנו את הפרויקט – הכשרנו עוד שני הנדסאים שיוכלו לתפעל את המכונה כי היא יותר מורכבת. הובלנו את זה באופן אישי אבל נעזרנו הרבה מאוד גם עם האקדמיה – יש לי שני דוקטורנטים ומסטרנטים מהטכניון. אני עובד עם דני ריטל – התנהגות דינמית. ראובן כץ-חיבורים וריתוכים. גם עם בן גוריון – אלי אגיון – הנדסת חומרים. יש לנו פרויקט גם עם מפא"ת – אודי גלון – בנושא תכנות דינאמי. גם במכון המתכות עם חיים רוזנסון – מנהל מכון המתכות – בדיקות מכניות חסינות שבר.

במקביל אנו עובדים על טכנולוגיות של חיבור חלקים מודפסים – גודל המכונה מוגבל ואם רוצים חלקים גדולים יותר צריך לחבר בין חלקים. יש לנו כבר מוצרים שעברו לייצור סדרתי.

גם בתחום הפולימרי יש לנו מדפסת שיצרה בשנה שעברה 40,000 חלקים שעברו לייצור. כמו כן בשנה שעברה קנינו מכונה נוספת לטיטניום שעובדת עם חוטי מתכת. יש עבודה בחוטים ויש עבודה עם אבקות – אנחנו מתרכזים בחוטי מתכת ובתהליכי חיבור מוצרים למוצר הסופי או ביניים. **מבחינת כוח אדם כיום** - במעבדה יש 7 עובדים (לא כולל אותי) שמתחזקים את המכונות. מתוכם 3 מהנדסים. אני בתפקיד מהנדס ראשי – לא רק בהנדסה אלא בהסתכלות רוחבית על תהליכים.

¹¹<http://www.stratasys.com>

יש קושי של הייצור ופיתוח של התהליך שדורשים התמחות בעיקר במתכות. (פלסטיק יותר פשוט). קושי בשינוי שיטת חשיבה, מתכננים לא רגילים לעבוד בצורת תלת ממד. (אני מלמד אנליזה של תהליכי עיבוד בהנדסת מכונות).

הכשרות – נכון להיום חוץ ממכללת אפקה, לא ידוע לי על שום קורס שניתן באוניברסיטאות בהדפסת תלת ממד. לא לומדים את זה בצורה רצינית. דיברתי עם הדיקן של מכונות בטכניון – אבל זה לא התקדם.

אני יועץ של אורט ובקשו ממני להעביר קורס לתלמידים על מנת לחשוף אותם.

אכן נדרשות הכשרות החל מתוכניות יחודיות שהן יקרות ולא כלולות בנושאים אחרים, כמו אופטימיזציה טופולוגית, מבנים שלא נתפסים בצורת החשיבה הקלאסית. נכון להיום אנחנו נפגשים עם מתכנן המוצר, מבררים את האילוצים שלו (חוזק, משקל מעטפת, גאומטריה וכד') עושים אנליזה כדי להחליט מה המבנה הנדרש – חסרים אנשים עם הכשרה מערכתית כמו שלי.

התחום הולך לגדול מאוד, חסרים הרבה אנשים, יהיה צורך ביותר אנשים עם הכשרות טכנולוגיות מתאימות. ישראל למשל נחשבת למובילה בתחום שתלי השיניים. בנושא הטיטניום אנחנו חלוצים יש קונסורציום טיטניום. עם הזמן זה יהפוך להיות נחוץ. יהיה צורך באנשים בתחום זה אנחנו מתקדמים לאט אך בטוח. חייבים לעשות שינויים בהכשרות. לא צריך פקולטה להדפסות תלת ממד. אני מציע קורס חוצה פקולטות, קורס פתוח לכל הפקולטות – מכונות, חומרים, אירונאוטיקה שפותח את הראייה, אבל לא שייך למסלול ספציפי. גם המכללות יכולות להכשיר, בלי להכניס את כל המתמטיקה והפיזיקה של התהליכים. יש היום לפחות 50 סוגים של הדפסות 3D (לייזר, אולטרסאונד, חוטים, מגשי אבקה, הזרקת אבקה – וזה רק במתכות). זה תחום דינמי שמתעדכן כי יש כוח מחשוב שמאפשר לעשות דברים שאי אפשר היה לעשות בעבר.

דעתי האישית, שזו המהפכה התעשייתית הרביעית – זה משנה את שיטות החשיבה מה אפשר לעשות. הנושא יפרוץ חזר כאשר דור המתכננים יתחלף. יש חשיבות גדולה בהכשרת דור חדש. דבר נוסף שמשפיע הוא עלות החומרים – היום החומרים הופכים להיות יותר זולים. (לדוגמה לפני חמש שנים אבקות טיטניום על 550 יורו לקילו היום אפשר לקנות ב-320 דולר לקילו – המחיר ירד כמעט ב-50%) לדעתי המחירים ימשיכו לרדת וגם עלות המכונות ירד ואני מאמין שזה יפרוץ בגדול.

הטכנולוגיות האלה אינן מתאימות לייצור "פחית שתיה" את זה ימשיכו לייצר בשיטות הישנות. אבל דברים יותר מתקדמים כן ייצרו בטכנולוגיות חדשות.

בתערוכות בארץ ובעולם רואים את ההתפתחות. לפני 10 שנים כשתחלנו ללמוד את התחום היה לי קשה למצוא מאמרים היום אני לא מספיק לקרוא את הכותרות. התחום מתפתח באקדמיה בעולם.

גיוס אנשים – לא מגייס אנשים עם ידע אלא עם פוטנציאל חזק בנושא מחשוב ותיב"ם ואז עושים להם הכשרה. מחפש בעיקר מהנדסי מכונות. גם מהנדסי מטאלורגיה (מטאל) שאני עובד איתם גם להם הכל חדש – כל מבנה החומר נראה שונה.

החברות שמוכרות את המכונות עושות הכשרות גם בארץ וגם בחו"ל. ההכשרות הן על כלי התכנון או שמביאים מדריכים מחו"ל או שנוסעים לחו"ל ללמוד כלי תוכנה ותיב"ם. אם לוקחים מהנדסים טובים

אפשר להכשיר אותם לתחום הזה. מהנדסים מכל תחום כמעט -חום, חוזק, תכנון. חסרה להם ההבנה של סיבוכיות התהליכים. זה לא כמו לכתוב מסמך ולשלוח למדפסת – יש צורך בהבנת התהליך.

7.1.3 סיכום ראיון עם אוהד דולב מרפאל

מראיינות: ציפי בוכניק וורד גלעד

תאריך: 28.6.18

אוהד מנהל ברפאל, בחטיבת מנור את נושא טכנולוגיות ייצור מתקדמות מזה 8 שנים. לפני כן הוא עבד ברפאל בנושאי IT ותיב"ם. הצוות שלו מונה 9 אנשים, 3 מהם מהנדסים והיתר הנדסאים. ברפאל תהליך הסיווג הביטחוני לוקח זמן ממושך ומצמצם את קהל המועמדים האפשריים. יש חסר בשוק בעובדים עם איכויות טובות שהם ברמת הנדסאים וגם מהנדסים. אין בארץ כמעט חינוך טכנולוגי. בד"כ הנדסאים שמגיעים עברו הכשרה של חיל האוויר ואז יש צורך בהכשרה פנימית שלהם ברפאל שאורכת כשנה עד שנה וחצי, שזו תקופה ארוכה. נושא הדפסת התלת מימד התחיל ברפאל ב-2004 וב-2009 הוקמה לנושא זה מסגרת ממוסדת ברפאל. יש 3 טכנולוגיות בסיס שהם עובדים איתן:

1. ייצור בריבוד- מיצרים חלקים בייצור סדרתי בפולימרים, קרמיקה, מתכת ועוד.
2. טכנולוגיות בסריקה לצרכים של בקרת איכות והנדסה שיחזורית.
3. אופטימיזציית מבנה, טופולוגיות.

שלושת התחומים ביחד מהווים סינרגיה והגדלת הערך המוסף ללקוחות. יש מערכות ריבוד, סריקה וכלי אופטימיזציה. מדפסות תלת מימד. חסרים אנשים עם היכולות הדרושות. הנדסאים מעוניינים להמשיך את הכשרתם למהנדסים והתחלופה של העובדים גבוהה. הפקולטות שמעניינות אותם הן מכונות, חשמל ואירונאוטיקה. היכולות של העובדים שהם מעוניינים לקלוט הן בעלי רקע טכני, עיסוק במכונות, בעלי הכרות עם כלי תיב"ם, יכולות סימולציה ואנליזה, יכולות מטרולוגיות, מדידות מדויקות, הכרות עם CT. הקשר שלהם עם האקדמיה מתמצא בנתינת הרצאות מידי פעם. כל נטל ההכשרות מושבת על התעשייה. יש להם ברפאל תכנית חניכה ארוכה ומורכבת שהם פיתחו והם מקדמים.

כל נושא הייצור והתעשייה נדחק מתכניות הלימודים. במקום שיהיה מודל של 'אקדמיה תומכת תעשייה' יש מודל של 'אקדמיה תומכת אקדמיה'. חסר תהליך של הבנת שרשראות ייצור. במכללות המצב מעט יותר טוב מבחינת העיסוק ובתעשייה אך עדיין הן רוצות להיות דומות לאקדמיה.

אוהד משוכנע שההכשרות צריכות להינתן לנושא זה באקדמיה.

יש בסין בתי ספר שמכשירים עובדים לתעשייה.

הנדסאים הם קולטים כמעט רק מאורט בראודה.

אוהד שולח מידי פעם עובדים להכשרות בחול.

7.1.4 סיכום ראיון עם ד"ר אביגדור זוננשיין

מראיינות: ד"ר דפנה גץ, ציפי בוכניק וורד גלעד

תאריך: 21/11/2018

Additive Manufacturing הוא יצור בהוספה. היצור המסורתי הוא יצור בגרייה. בהדפסת תלת מימד זה הפוך. חיבור שכבה אל שכבה בלחץ וחימום. דחיסה.

הסוד הוא באבקות. הרבה מהפיתוח הוא האבקה עצמה. סוג האבקה נקבעת בהתאם למוצר. אם רוצים ממשפחת הפלסטיק אז גם האבקות הן מתחום הפלסטיק. יש גם דיו אלקטרוני בשימוש ב-3DP.

עיקר החכמה היא ביצור מכונות שיכולות לעשות את זה. לרוב נכנסים לעבוד בתחום מהנדסים מתחומי מכונות, אלקטרוניקה, תכנה. יש גם צד עיצובי שנעשה פעמים רבות ע"י אנשי מכניקה.

תהליך פיתוח המוצר הוא של יצור בתוספת. נעשה שינוי בתכונות החומר מבחינת חוזק ועמידות ויש בכך אתגר.

פרופ' עדין שטרן מומחה בתחום זה מאוניברסיטת בן גוריון והוא חבר גם בוועדה לתלת מימד במכון התקנים. מומחה בתחום האבקות המתכתיות.

מתחילים ללמד בבתי ספר על הדפסת תלת מימד. לומדים את התהליך התעשייתי. זה חשוב כי זה מפתח חשיבה של תכנון.

הדפסת תלת מימד מאפשרת לייצר מוצרים שלא יוצרו קודם או לייצר אותם לפי דרישה.

יש בארץ השקעה בכיוון של יצור מתקדם באמצעות IoT. הפיכת המפעל לחכם. שיפור הפיריון של המפעל באמצעות כלים של יצור מתקדם.

3DP משמש לפיתוח של אבי טיפוס-פיתוח מוצרים חדשים, ומעבר ליצור מותאם אישית.

7.1.5 סיכום ראיון עם ד"ר אביב זאבי- מנהל זירת תשתית טכנולוגית, הרשות לחדשנות

מראיינות: ד"ר דפנה גץ, ורד גלעד, סימה ציפרפל

הרשות לחדשנות עצרה בינתיים את הקול קורא הנוגע למכוני המחקר ופועלת לאיגוד של מכוני המחקר מכיוון שהמצוינות המדעית שלהם לא מספיק טובה ברמה הבינלאומית. אין להם הרבה הזמנות עולמיות, הקשרים הבינלאומיים הבודדים שלהם נובעים בדרך כלל ממימון של Horizon, וקשר מסוים עם מכון Fraunhofer בגרמניה (של מכון המתכות בעיקר).

הרשות החדשנות הוציאו קול קורא לשת"פ ננו-גרמניה. אחד הפרויקטים שמומנו במסגרת קול קורא זה הוא של "שמשון מכניקה" עם פרופ' במברגר (מכון למתכות) בנושא של על אבקות חומרים המיועדות בעיקר להדפסות תלת מימד. במסגרת הפרויקט הרשות לחדשנות מימנו שלוש מדפסות תלת מימד (90% מימון) בשביל לדחוף את שלושת המכונים (המתכות, הפלסטיקה והקרמיקה) לתחום של הדפסות תלת מימד. התפיסה העולמית עוברת לתחום של חומרים מורכבים. כיום, המכונים נותנים מענה בשלושה אספקטים: פולימרים, מתכות וחומרים קרמיים, אבל העתיד הגדול הוא שילוב של שלושתם עם חומרים אורגניים המשמשים למשל בהדפסה של שתל חכם, כך שהשתל יהיה יעיל אנרגטית, גמיש ומותאם למטופל (על מנת שהשתל ייקלט בצורה טובה יותר על ידי המטופל הוא חייב להיות מורכב מחומרים אורגניים). אין הצדקה לקיום הפעילות בכל מכון בנפרד. התחזוקה של כל מכון בנפרד לא יעילה לא רק מבחינת המשאבים הנדרשים, אלא גם בגלל שהמכונים לא מצליחים להתקדם קדימה כי הם קטנים (רק 12 חוקרים במכון הקרמיקה) ואין בהם צמיחה. למכונים קשה מאוד לקיים פעילות של מחקר ופיתוח, למשל, הפעילות של המכון למתכות נשענת על מבדקות (ויש תלות מאוד גבוהה של המכון ברשות לחדשנות למימון המבדקות). החברות הזקוקות לעבודה מהמכונים מבקשות תנאי מימון של 90% מהפרויקט אך ברשות לא יכולים לעמוד בזה, לכן הן פונות בדרך כלל או ל-Fraunhofer או למכונים אחרים בעולם. השירות במכונים בעולם לאו דווקא יקר יותר מהמכונים בארץ מכמה סיבות: הסיבה הראשונה היא שהמכונים פה יקרים, היות והם מעסיקים צוות גדול של אקדמאים שהמשכורות שלהם מאוד גבוהות. הסיבה השנייה היא שהמכונים פה פחות יעילים, והסיבה השלישית היא ש-Fraunhofer הוא מכון מסובסד. אופן הסבסוד של Fraunhofer: שלישי מהתקציב מגיע מהממשלה, שלישי מקרנות ושלישי מהתעשייה. המודל הגרמני מבוסס על ההכרה שלא יעיל להם לעבוד בפחות מ-10% מסך הפעילות ויותר מ-40% על מנת לשמור על רמת מחקר יעילה במימון הממשלה. כמו כן, עובדים אצלם חברי סגל מהאוניברסיטאות הסמוכות במשרות חלקיות. אביב חושב שזה מודל נכון אך לא מספיק עבור מכוני המחקר העתידיים.

הרשות לחדשנות מציעה מהלך של איחוד מכוני המחקר מאחר וסך הפעילות של המכונים אינו מצדיק פעילות נפרדת של כל מכון בנפרד. איחוד בהסכמה תחת מכון המתכות עם גב אקדמי של הטכניון ועל בסיס ידע של הדפסות תלת ממד מ-Fraunhofer IKTS. לדעתו של אביב זאבי, יש להתנות בניהול קניין נפרד ובמעורבות גבוהה של התעשייה בניהול המכון.

7.1.6 סיכום ראיון עם פרופ' עדין שטרן- מרצה במחלקה להנדסת חומרים באוניברסיטת בן גוריון בנגב ומרצה במחלקה להנדסה מכנית במכללת אפקה

מראיינות: ציפי בוכניק וורד גלעד

התחום של הדפסת תלת מימד הוא תחום חדש. הרעיונות המעשיים שהפכו לפוטנטיים הם משנות ה-80. ב-10 השנים האחרונות יש האצה והצפי שזה יגדל בשנים הקרובות בהיקף גדול. פרופ' שטרן לא חושב שיש כרגע אנשים שהוכשרו לתחום אלא כאלה שהגיעו לתחום מכל מיני כיוונים. פרופ' שטרן מספר שבמחום הדפסת תלת מימד בבן גוריון מסיימים שני סטודנטים בהנחייתו. הוא לא יודע על מסלול לנושא. פרופ' שטרן מלמד גם במכללת אפקה, שם הוא יזם ב-2015 תואר ראשון בהנדסה מכנית-בין תחומי.

בכל מחלקה בפקולטות להנדסת מכונות וחומרים יש לפחות מדפסת תלת מימד אחת. באפקה יש שתי מעבדות שיש בהן מספר מדפסות.

הדפסת תלת מימד בחומרים פולימרים יותר זולה מבחינת התשתית וכל מה שנדרש (בטיחות, איורור). כשעוברים להדפסה במתכת זה הרבה יותר יקר.

הדפסת תלת מימד פרצה עכשיו מכיוון שתוכנות המחשב התפתחו ברמה מספקת, המחשבים מספיק זולים ומספיק חדשים. מעבר ממסך לשטח מצריך תכנות וכוח חישוב. בנוסף, המכונות נעשו מספיק מדויקות- הזזות בתחום המקרוניום. צריך מכונה אמינה שמסוגלת לעשות תזוזות כאלה, ויש מספיק חומרים שמתאימים להדפסה בתלת מימד.

המוצרים התחילו באבי טיפוס. בהתחלה קראו לתחום Rapid prototyping. אם רוצים לבחון מחשבה ומידית להדפיס אותה, לא צריך תהליכים קונבנציונאליים שלוקחים יותר זמן. היופי בהדפסת תלת מימד, שהמחשבות יכולות לקבל צורה מהמסך לידיים תוך שעות. עברו את הסף שמוצרים מבחינה טכנית ותכונות מכניות יציבות. יש נטיה לעצב מוצרים אישיים.

יש מוצרים רבים בייצור ולא אבי טיפוס. שיניים למשל מתאים בדיוק לתלת מימד כי הצורה אישית. ברפואה נושא התלת מימד קיבל תאוצה, החל משתלי שיניים, ברכיים, השלמת עצמות. כל תחום השתלים.

תחום שני זה חינוך לכיוון רפואה- משהו מודפס שמדמה, שמשמש למטרות לימוד. למשל מודלים אנטומיים שמדמים את גוף האדם ומסיעים לסטודנטים ללמוד. נושא שלישי הוא ברפואה, הכנה לניתוח. CT או MRI- אפשר להדפיס את האזור שנגוי או שלא מתפקד טוב, המנתחים יכולים להתאמן ואז לעבור לניתוח בפועל. בנוסף מדפיסים כלים לניתוחים. לדברים האלה היה בעבר משך זמן יצור ארוך ומחיר גבוה יותר.

ל-MIT יש מאמר בתחום חינוך לתלת מימד. יש פרסום של פרופ' שטרן על הקורס שקיים באפקה. הסטטוס בישראל יחסית לעולם: יש הרבה יזמות, בתחום המחשוב והתוכנות יש הרבה ידע ומובילות בארץ, תחום ואלה דברים שמתאימים לנו. סטרסיס שהינה מספר 2 בעולם בפיתוח מדפסות ומוצרים יושבים בארץ. 3D Printer אימצה את התוכנות שפותחו בארץ. זו החברה הכי גדולה בתחום. ישראל תורמת לקידום השטח.

יש צורך גם במהנדסים, גם בהנדסאים וגם בטכנאים לתחום.

זה תחום מולטידיסציפלינרי. לדעתו של פרופ' שטרן צריך להיות מסלול בהנדסת מכונות שבו סטודנט יכול לבחור מספר תחומי הכשרה בתלת מימד ולא רק קורס אחד. הדרישות רדם לקורס של פרופ' שטרן בהדפסת תלת מימד כוללות: נקודות בתחום חומרים, נקודות בתחום מחשבים וגרפיקה הנדסית-תכן בעזרת מחשב. יש צורך להכשיר מורים לתחום שיוכלו ללמד. הכשרה של תכן בעזרת מחשב CAD. צריך אנשים שיש להם יכולת ורקע בתחום חומרים ותהליכים קונבנציונאליים. רצוי ניסיון בתעשייה.

במכון התקנים יש ועדה לתלת מימד שפרופ' שטרן מוביל אותה. עוקבים אחרי תקינה רב לאומית ויכולים לאמץ תקנים שיוצאים בעולם ISO. אין מדינה היום בעולם שלא עושה מאמצים בתחום שנמדדים במיליארדים. גרמניה מובילה בלעשות מכונות, בתוכנה בלגיה מובילה וגם ישראל. ארה"ב מובילה בפטנטים בתחום.

7.1.7 סיכום ראיון עם פרופ' עזרי טרזי- ראש מסלול עיצוב תעשייתי בפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים בטכניון

מראיינות: ציפי בוכניק וורד גלעד

תאריך: 17.1.19

נדרש הרבה ידע על מנת להבין איך לבנות מוצר בהדפסת תלת מימד. תחום אחד בתעשייה הזאת הוא תחום ההדפסה הבייתית/המשרדית. כאשר התחום יקבל תאוצה בכיוון של מדפסת תלת מימד בכל בית, יקומו מעבדות לתיקוני מדפסות תלת מימד ולמכירת חומרי הגלם למדפסות.

עזרי מלמד את נושא הדפסת התלת מימד, 50 מורים ב-10 בתי ספר. לדעתו צריך ללמד בכיתות מולטידיסציפלינריות שכוללות תלמידים מהדיסציפלינות של עיצוב, אלקטרוניקה, מחשבים, ביומכניקה ורובוטיקה. 1-2 סטודנטים/תלמידים מכל תחום.

כיום מורים שמלמדים הדפסת תלת מימד בבתי ספר מורידים קבצים מוכנים מהאינטרנט ומדפיסים. עזרי רואה ב-3DP כלי לפיתוח רעיון ולא להדגמת רעיון. התכנית שהוא מלמד מתמקדת באיך לפתח רעיונות. הוא לא מכיר תכנית רב שנתית של משרד החינוך בנושא.

עזרי משתתף בצוות בטכניון שמתעתד לתמוך במחקרים בנושא. חברים בצוות גם פרופ' גרשון אלבר ממדעי המחשב ופרופ' ויין קפלן המשנה לנשיא במחקר ופיתוח בטכניון האוניברסיטאות האחרות בארץ מתקדמות בתחום בקצב מאוד מהיר.

מבחינת מיצובו בעולם, בתחומים מסוימים של הדפסת תלת מימד היינו לפני הזמן, ראשונים בעולם ובתחום הביולוגי נכנסנו מאוחר מידי. התחום הזה הכי מתקדם בארה"ב וקצת באירופה - בשווייץ.

הפן השני של מהפכת מדפסות התלת מימד הוא במחקר והוראה. מחקר של מה עוד ניתן להדפיס בתלת מימד (אזניים, אף, רקמות). אין כמעט פקולטה שלא מעורבת ב-AM, ומגוון החומרים שבהם משתמשים ב-3DP הולך וגדל. כל חומר דורש טיפול אחר (פלסטיק, חימר, מתכת).

הפן השלישי הוא פן הייצור. יש שני סוגי יצור: פרוטוטיפ ו-End product.

עוברים מ-Rapid prototype ל-Slow manufacturing. צריך להחליט מה יותר כדאי להדפיס למוצר סופי. בתחום הרפואה זה חשוב וכך גם באוירונאוטיקה תעופה וחלל ובנישות של מוצרים יקרים כמו תכשיטנות. התבנית יקרה והמוצר יקר. יש נקודה שבה זה משתלם. מקומות שבהם אנשים מוכנים לשלם הרבה כסף עבור המוצר. כל החברות בודקות את האפשרות להכניס Mass production.

כל שנה יש חומרים חדשים שנכנסים להדפסת תלת מימד.

ישראל סובלת מאובדן תעשייה. הדפסת התלת מימד יכולה להחזיר את התעשייה לישראל. אם כסא יודפס ב 15-20 דקות, ועלות המדפסת 20,000 דולר. ניתן לקנות 10 מדפסות במחיר תבנית של כסא 200,000 דולר.

קסדה היא מוצר עם מידות ולכן מתאימה להדפסת תלת מימד.

מעצבים תעשייתיים הם חסרי תעסוקה כיום כי התעשייה נמחקה. אין Low Tech. התעשייה נשארה מאחור. אין תכניות של המדינה לעידוד התחום.

עזרי חושב שצריך להקים מאגד להדפסת תלת מימד וכן מרכז ידע Additive Manufacturing Center. המשימה החשובה ביותר כיום הינה להיות חלוצים ב-Rapid Manufacturing.

עזרי היה רוצה לבנות מסלול של תואר ראשון בעיצוב הנדסי דיגיטלי. יש כיום לימודי עיצוב רגיל שבהם לא לומדים הנדסה ברמת חומרים. לא לומדים אנליזת חוזק בעיצוב תעשייתי ולא אנליזת זרימה, ניהול מוצר, אבטחת איכות. זה צריך להיות תואר בשיתוף עם הנדסת מכונות או מסלול עצמאי. מסלול כזה יכשיר אנשים שיפתחו מוצרים ויעצבו אותם. כרגע אין עבודה אז אנשים לא מעוניינים ללמוד את התחום. צריך task force שבו ישתתפו 4-5 חברות ואז תהיה דרישה להכשרה. לכן מנסים בטכניון להקים קרן תמיכה ביזמות עיצובית דיגיטלית.

התמונות הבאות של מדפסת תלת מימד וכסא שהודפס במדפסת תלת מימד, שצולמו בראיון עם עזרי במעבדת התלת מימד שהוא הקים בפקולטה לבינוי ערים בטכניון.



7.1.8 סיכום ראיון עם פרופ' שמואל קניג

מייסד המחלקה להנדסת פלסטיקה בשנקר, מכהן כדיקן הפקולטה להנדסה ועומד בראש המחלקה לתואר שני בהנדסת פלסטיקה בשנקר

מראיונות: ציפי בוכניק וורד גלעד

תאריך: 30.1.19

יש מספר פרויקטים בנושא הדפסת תלת מימד במחלקה להנדסת פלסטיקה ופולימרים בשנקר. חלק מהפרויקטים ממומנים ע"י רשות החדשנות וחלקם ע"י התעשייה.

פרופ' קניג עושה הבחנה בין הדפסת תלת מימד 3DP ל-Additive Manufacturing. הדפסת תלת מימד קשורה להכנת מודלים, עיצוב file דיגיטלי, שימוש במכונת FDM. במקום להראות מודל מצויר יש מודל תלת מימד. בייצור תעשייתי השיטות והתכונות צריכות להיות אחרות. מוסיפים שכבה אחרי שכבה או טיפה אחרי טיפה. כיום זה

3D Additive Manufacturing. עושים AM בשיטות תלת מימד. לדוגמא, אם רוצים לעשות משהו עם תכונות מכניות ולשלב סיבים על מנת לחזק, בשיטות רגילות של 3D זה קשה. משתמשים גם בסיבי זכוכית וגם בסיבי פחמן.

הפרויקטים בשנקר:

פרויקט 1: בנושא שריון- שני ענפים: ענף סיבים קצרים יותר לרכב וענף סיבים רציפים נמשכים שזה יותר לתעופה.

כיום כל חברות הרכב מלי יוצא מהכלל מכניסות במודלים הקיימים חלקים ב-3DAM.

פרויקט 2: שת"פ עם מכון פראונוהופר במינכן. משתתפים תעשייה ישראלית ותעשייה גרמנית- מפתחים חומרים שמתקשים ע"י קרינה או הקשיה טרמית. משלבים ננו חלקיקים לצורך שריון וחיזוק. Jet printing בקצב גבוה. חומר ההדפסה הוא jel radiation שהופך באמצעות קרינה למוצק. הפרויקט היה קול קורא לשת"פ גרמניה-ישראל.

יש שילוב עם מכון המתכות. עובדים על פרויקט משותף לשלושת מכוני המחקר שמטרתו לפתח חומרים ושיטות להדפסות או ייצור ע"י מתכות, פולימרים וחומרים קרמיים. כל אחד מהמכונים מביא ידע ויתרון משלו לפרויקט.

פרויקט 3: ממומן ע"י משרד המדע. שת"פ בין אוניברסיטת ת"א לשנקר. מפתחים תרכובות חדשות של PLA בעלות תכונות מכניות משתנות. החל מהכנת הפולימר, דרך העברתו ליצירת גופים תלת מימדיים. הפרויקט נעשה במענה לקול קורא לפיתוח טכנולוגיות חדשות.

תכנית הלימודים בתחום AM בשנקר:

בשנקר מועברים שני קורסים. משך כל אחד מהם סימסטר אחד. קורס תכן במחלקה להנדסת פלסטיקה ופולימרים, שבו מלמדים את הסטודנטים איך לתכנן מוצר, איך להפוך את התכנון לקובץ דיגיטלי ומכינים חלקים בקנה מידה קטן יותר.

סטודנטים בשנה הרביעית ללימודיהם במכללה, מבצעים פרויקט גמר ב-AM לתואר שני ולדוקטורט בשילוב עם אוניברסיטת מסצ'וסט.

כ-30-50 סטודנטים מסיימים מידי שנה את קורס החובה ב-AM.

פרופ' קניג חושב שחייבים להכניס בתכנית הלימודים בשיטות יצור מתקדמות קורס בנושא AM גם בפולימרים, גם במתכת וגם בקרמיקה.

בנוסף, יש צורך ב- Life Long Learning. בד"כ זה מכוון לאנשים מהתעשייה.

שילוב מערכות מחשב בתעשייה זה נושא שמאוד מתפתח ב-10 השנים האחרונות וגרף היישום שלו אקספוננציאלי.

Industry four point zero שילוב מיחשוב בכל שרשרת הייצור.
התעשייה צריכה להיות מעורבת בנושא ההכשרות כי זה אמור להביא לה כוח אדם טוב יותר.
יש לימודי חוץ בנושא. יותר במכללות כי הקורסים בהן יישומיים.
צריך לפתוח בכל מוסד אקדמי קורסים בנושא ל- Life Long Learning ב-AM, שישלבו גם מרצים מהתעשייה.
כל הנושא של שילוב טכנולוגיות מיחשוב בתעשייה מאוד מתפתח. אוטומציה, רובוטיקה. המיחשוב מביא להתייעלות בייצור ולהעלאת רמת טיב הייצור.
היתרון בישראל זה בשילוב מחשבים. ההשקעה בתשתית הציוד יחסית לא גבוהה ואילו התרומה של ה-IP גבוהה.
יש בארץ חברות 3D, ננו 3D, מיקרו 3D. יש לישראל את השילוב של מיחשוב ותשתית אקדמית אינטלקטואלית.
ממליץ להכניס בהנדסת תוכנה-איך עושים בקרה בצורה יותר יעילה. החלק של ה-Software. לא משקיעים מספיק באקדמיה ב-Software של 3D, וגם Hardware.
מכון 3D באוניברסיטה העברית שמנהל פרופ' שלמה מגדסי עוסק בפיתוח חומרים להדפסת תלת מימד. לשנקר יש שת"פ איתם.
במאגד SHPS העוסק בפיתוח טכנולוגיות גבריות של פני שטח סופר הידרופוביים מנסים להדפיס משטחים סופר הידרופוביים בשיטות 3D ברמת המיקרו. נעשה פיתוח חומרים ותהליכים ברמה מתקדמת יחסית לעולם.
כל המחלקות בהנדסת חומרים באקדמיה צריכות לכלול לפי פרופ' קניג לפחות סימסטר אחד של נושא חומרים ב-3DAM. זה חייב להיות חלק מתכנית הלימודים, מכיוון שזה חלק מהמיומנויות שהסטודנט צריך לרכוש.
בנוסף, יש את כל נושא העיצוב ב-3D. החל מאריגה דרך מודלינג. סריגה או אריגה תלת מימדית מאפשרת יצור Custom made.
בשנקר יש קורסים משולבים של עיצוב עם הנדסה. קורס נוסף זה יזמות וחדשנות בדרך לשוק שם מחליטים על פרויקט לשוק, משלב גם עיצוב וגם הנדסה, עבודה בצוותים עד לפרוטוטיפ.

7.2 נספח 2- שאלון שנשלח לכל החברות שעוסקות בתחום תלת מימד

שלום רב,

מוסד שמואל נאמן מבצע מחקר בנושא תחזיות כ"א מדעי וטכנולוגי בישראל עבור המועצה הלאומית למו"פ במשרד המדע (המולמו"פ).

במסגרת מחקר זה אנו מתמקדים במספר תחומים טכנולוגיים בהם זיהינו פוטנציאל עבור ישראל ובוחנים את צרכי כוח האדם המדעי והטכנולוגי שידרש בתחומים אלו בטווח זמן של 10 שנים.

בשלב הראשון של המחקר בחרנו להתמקד בתחום **הדפסת התלת ממד**. נשמח להיעזר במומחיותך על מנת:

1. לזהות תחומים מתפתחים בעולם הדפסת התלת ממד שמהווים הזדמנות עבור ישראל.
2. להעריך את הצרכים בתחום ההשכלה וההכשרה שנדרשים על מנת לפתח תחומים אלו בישראל.

לשם כך אנו מבקשים שתענה על השאלון הקצר הבא:

- תאר בקצרה את פעילות החברה בתחום התלת מימד
- מספר העובדים בחברה העוסקים בתחום
- מהו הפרופיל ההשכלתי של העובדים בחברה בתחום התלת מימד
- באיזה פקולטות למדו העובדים שמועסקים בתחום התלת מימד?
- האם נדרשת הכשרה לעובדים בתחום מעבר לרקע איתו הם מגיעים לחברה?
- במידה וכן, אנא פרט איזה הכשרה.
- במידה והעובדים בחברה עוברים הכשרות, היכן הן מתקיימות?
- האם יש מחסור בגיוס אנשים בפרופיל הנדרש?
- לאן החברה מעוניינת להתפתח בעתיד בתחום?
- בהסתכלות קדימה, אילו הכשרות נוספות ידרשו לעובדים בתחום?
- האם יש לך המלצות למדיניות הכשרה בתחום זה לאוניברסיטאות ולמכללות?
- האם יש מקום לשיתופי פעולה בין האקדמיה לתעשייה בנושא הכשרות העובדים לתחום?
- אנא רשום חברות נוספות בתחום התלת מימד שאתה מכיר על מנת שנפנה אליהם.

שם ממלא השאלון

שם החברה, תפקידך בחברה

מדע וטכנולוגיה



מוסד שמואל נאמן
למחקר מדיניות לאומית

טל. 04-8292329 | פקס. 04-8231889
קרית הטכניון, חיפה 3200003
www.neaman.org.il