



מדע וטכנולוגיה

תחזיות לצורכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי דו"ח סופי – שנה ד'

ד"ר דפנה גץ
ציפי בוכניק
ורד גלעד

מידעניות:
אלה ברזני
איילת רווה

סביבה
ואנרגיה

תכנון
ארוך טווח

תעשייה
וחדשנות

תשתיות
פיזיות

בריאות

הון
אנושי

השכלה
גבוהה

חברה

חינוך

כלכלה



תחזיות לצורכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי

דו"ח סופי – שנה ד'

מוגש למשרד המדע והטכנולוגיה, המועצה הלאומית למד"פ

חוקרות: ד"ר דפנה גץ, ציפי בוכניק, ורד גלעד

מידעניות: אלה ברזני, איילת רווח

דצמבר, 2020

אין לשכפל כל חלק מפרסום זה ללא רשות מראש ובכתב ממושרד המדע והטכנולוגיה ו/או 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.

תוכן עניינים

10.....	תקציר מנהלים	
20.....	מבוא	
22.....	מדדים לשוק העבודה המדעי והטכנולוגי בישראל	
31.....	צרכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי טכנולוגיות עתידיות רלבנטיות למדינת ישראל	
32.....	אגרוטק וחקלאות מדייקת	
33.....	מגמות עולמיות בתחום הטכנולוגיה החקלאית	1
37.....	אגרוטק בישראל	2
47.....	סיכום והמלצות- צרכי כוח אדם לתחום אגרוטק	3
49.....	מקורות לסקר ספרות אגרוטק/חקלאות מדייקת	4
50.....	פוטוניקה ופוטוניקה אינטגרטיבית	
51.....	רקע	1
55.....	תחום הפוטוניקה האינטגרטיבית בישראל	2
60.....	היתרונות של ישראל בתחום הפוטוניקה	3
65.....	סיכום והמלצות- צרכי כוח אדם לתחום הפוטוניקה והפוטוניקה האינטגרטיבית	4
66.....	הדפסה תלת ממדית של חומרים מתקדמים, טכנולוגיות ויישומים	
67.....	רקע	1
71.....	תחום הדפסת תלת ממד וחומרים מורכבים להדפסת תלת ממד בישראל	2
	הכשרת כוח אדם מדעי וטכנולוגי לעבודה בתחום הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים, טכנולוגיות ויישומים	3
80.....	סיכום צרכי כוח אדם לתחום חומרים מורכבים חכמים להדפסת תלת ממד והמלצות	4
82.....	רפואה מדייקת וגנומיקה	
84.....	רקע	1
85.....	תעשיית הגנומיקה והרפואה המותאמת אישית בישראל	2
90.....	פרסומים בנושאי רפואה מותאמת אישית	3
92.....	תשתיות בתחום רפואה מותאמת אישית	4
94.....	הכשרת כוח אדם לעבודה בתחום רפואה מדייקת	5
97.....	מקורות	6
100.....	אגירת אנרגיה	
102.....	רקע	1
103.....	תעשיית אגירת אנרגיה בישראל	2
106.....	תשתית אקדמית בתחום אגירת אנרגיה	3
110.....	הכשרת כוח אדם לעבודה בתחום אגירת אנרגיה	4
113.....	מסקנות ותובנות לגבי צרכי כוח אדם לתחום אגירת אנרגיה	5
115.....		

117	ערים חכמות	
118.....	רקע	1
123.....	הכשרת כוח אדם לעבודה בתחום ערים חכמות	2
123.....	פרסומים בתחום ערים חכמות	3
127.....	מיפוי חברות בתחום ערים חכמות בישראל	4
129.....	מסקנות ותובנות לגבי צרכי כוח אדם לתחום ערים חכמות	5
131	בינה מלאכותית, מדעי הנתונים ורובוטיקה חכמה	
132.....	רקע	1
133.....	תעשיית הבינה המלאכותית בישראל	2
135.....	תפוקות מחקר	3
138.....	תשתיות בתחום הבינה המלאכותית	4
139.....	חוקרים והכשרה באקדמיה	5
143.....	מסקנות ותובנות לגבי צרכי כוח אדם לתחום AI	6
145	מקורות מזון אלטרנטיביים	
146.....	רקע	1
150.....	תחום מקורות המזון האלטרנטיביים בישראל	2
153.....	מיפוי חברות בתחום מקורות מזון חדשים	3
155.....	אקדמיה ומכוני מחקר	4
158.....	היתרונות של ישראל בתחום המזון האלטרנטיבי	5
159.....	הכשרת כוח אדם לעבודה בתחום מקורות מזון חדשים	6
160.....	סיכום צרכי כוח אדם לתחום מקורות מזון חדשים	7
161.....	מסקנות ותובנות לגבי צרכי כוח אדם לתחום	8
162.....	מקורות לפרק מקורות מזון אלטרנטיביים	9
165	תקשורת לוויינים	
166.....	רקע	1
169.....	פעילותה של ישראל בתחום תקשורת הלוויינים	2
169.....	תעשייה בישראל בתחום של תקשורת לוויינים	3
177.....	פעילות באקדמיה בתחום תקשורת לוויינים	4
178.....	הכשרת כוח אדם לעבודה בתחום תקשורת לוויינים	5
179.....	מקורות	6
180..	(Bio - Convergence) שילוב רב תחומי ביולוגיה, תוכנה והנדסה לעולם הרפואה	
181.....	רקע	1
183.....	יתרונותיה של ישראל בתחום	2
184.....	הסקטור האקדמי	3
186.....	כנסים בישראל	4

187	הסקטור התעשייתי	5
193.....	תובנות והמלצות	6
198.....	מקורות	7

איור 1: התפלגות תלמידי כיתות יב', נבחנים בבחינות בגרות על פי זכאות לתעודת בגרות, 1997, 2004-2018..... 23

איור 2: שיעור הנבחנים ב- 5 יח"ל במקצועות מדע וטכנולוגיה מתוך סך הנבחנים לבגרות לפי מגדר ושייכות, 2019 (באחוזים*)..... 24

איור 3: שיעור הנבחנים ב- 5 יח"ל במקצועות מדע וטכנולוגיה מתוך סך הנבחנים לבגרות, השוואה בין 2006 ל-2019..... 24

איור 4: סטודנטים במוסדות להשכלה גבוהה לתואר ראשון לפי תחומי לימוד עיקריים..... 25

איור 5: סטודנטים במוסדות להשכלה גבוהה לתואר שני לפי תחומי לימוד עיקריים..... 26

איור 6: סטודנטים במוסדות להשכלה גבוהה לתואר שלישי לפי תחומי לימוד עיקריים..... 26

איור 7: אחוז הלומדים במקצועות ICT לתואר ראשון ושיעור השינוי בן השנים 2013-2017, השוואה בינלאומית..... 28

איור 8: מספר המועסקים (באלפים) לפי משלחי יד נבחרים, 2012-2018..... 29

איור 9: משרות פנויות לפי משלחי יד נבחרים והיחס בין היצע לביקוש, 2018..... 30

איור 10: חברות בתחום אגרוטק בישראל עד שנת 2020..... 39

איור 11: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה..... 39

איור 12: גיוסי הון בתחום האגרוטק בשנים 2014-2018..... 40

איור 13: מספר הסטודנטים לחקלאות בתואר ראשון בישראל ושיעורם מסך הסטודנטים בשנים 1996/1997-2019/2020..... 44

איור 14: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בשנים 2015-2019..... 45

איור 15: השינוי במספר הפרסומים הישראליים בנושאי חקלאות מדייקת ושיעורם מפרסומי העולם בתחום, 2000-2019..... 45

איור 16: גופי המימון העיקריים שמופיעים ברשימות הספונסרים של פרסומים בנושאי חקלאות מדייקת בשנים 2015-2019..... 46

איור 17: מספר הבקשות לפטנטים בקטגוריית Precision Agriculture לפי נתוני USPTO- 2001-2020..... 46

איור 18: השינוי במספר הפרסומים בתחום פוטוניקה אינטגרטיבית בישראל יחסית לעולם,..... 58

איור 19: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בשנים 2015-2019..... 59

איור 20: גופי המימון המובילים לפי מספר המאמרים שפורסמו בתחום פוטוניקה אינטגרטיבית 2015-2019..... 59

איור 21: מספר בקשות לפטנט ב-USPTO של מגישים ישראלים לפי שנת הגשת הבקשה..... 60

איור 22: השוק העולמי להדפסת תלת ממד לשנים 2018-19 ותחזית לשנת 2024..... 67

איור 23: חברות בתחום התלת ממד בישראל לפי שנת הקמה..... 72

איור 24: חברות תלת ממד לפי סקטור..... 72

איור 25: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה..... 73

איור 26: חברות בתחום התלת ממד לפי Funding Stage (2018)..... 73

איור 27: השינוי במספר הפרסומים בתחום חומרים מורכבים להדפסת תלת ממד בישראל יחסית לעולם..... 75

איור 28: דירוג המדינות בתחום חומרים מורכבים להדפסת תלת ממד, לפי מספר פרסומים, בשנים 2015-2019..... 76

איור 29: גופי המימון העיקריים שהופיעו ברשימות הספונסרים של הפרסומים המדעיים בתחום חומרים מורכבים להדפסת תלת ממד במהלך השנים 2015-2019..... 76

איור 30: מספר הפטנטים שנרשמו ב USPTO בשנים 2014-2018..... 77

איור 31: מקבלי תארים מהאוניברסיטאות בתחומים אלה בשנים 2012-2017..... 78

איור 32: חברות בתחום הרפואה המותאמת אישית והגנומיקה בישראל בשנים 1981-2020..... 91

איור 33: גודל החברות בתחום רפואה מותאמת אישית וגנומיקה לפי מספר העובדים בחברה..... 91

איור 34: חברות בתחום רפואה מותאמת אישית וגנומיקה לפי Funding Stage (2018)..... 92

איור 35: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בנושאי רפואה מותאמת אישית בשנים 2015-2019..... 93

איור 36: השינוי במספר הפרסומים הישראליים בנושאי רפואה מותאמת אישית ושיעורם מפרסומי העולם בתחום, 2000-2019	93
איור 37: גופי המימון העיקריים שמופיעים ברשימות הספונסרים של פרסומים בנושאי רפואה מותאמת אישית בשנים 2015-2019	94
איור 38: השינוי במספר משפחות הפטנטים ב-PatBase בנושאי רפואה מותאמת אישית	94
איור 39: מקבלי תארים מהאוניברסיטאות בתחומי רפואה מדייקת בשנים 2011-2017	98
איור 40: הגידול במספר החברות בשנים 2010-2019 לפי סקטור	107
איור 41: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה	107
איור 42: סך גיוס ההון (במיליוני \$) של חברות בישראל בתחום אגירת אנרגיה בשנים 2008-2019	108
איור 43: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בשנים 2015-2019	111
איור 44: השינוי במספר הפרסומים בתחום אגירת אנרגיה בישראל יחסית לעולם בשנים 2000-2019	112
איור 45: דירוג גופי המימון המובילים לפי מספר הפרסומים בשנים 2015-2019	112
איור 46: מקבלי תארים ממוסדות השכלה הגבוהה בתחומי אגירת אנרגיה בשנים 2012-2017	114
איור 47: עולמות התוכן של העיר החכמה	119
איור 48: תתי התחומים המרכזיים בעולמות התוכן של העיר החכמה	119
איור 49: השינוי במספר הפרסומים בעולם בנושא Smart City במהלך השנים 2000-2019	125
איור 50: תחומי המחקר המובילים בעולם במספר הפרסומים בנושא Smart City במהלך השנים 2015-2019	125
איור 51: המדינות המובילות 139 במספר הפרסומים המדעיים בנושא Smart City במהלך השנים 2015-2019	126
איור 52: גופי המימון העיקריים שהופיעו ברשימות הספונסרים של הפרסומים המדעיים בנושא ערים חכמות 2015-2019	126
איור 53: חברות בתחום ערים חכמות בישראל בשנים 2000-2020	127
איור 54: חברות בתחום ערים חכמות לפי סקטור	127
איור 55: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה	128
איור 56: התפלגות חברות לפי Funding Stage (2018)	128
איור 57: דוגמאות לתחומי ותתי תחומי הבינה המלאכותית	132
איור 58: חברות בתחום הבינה המלאכותית לפי שנת הקמה	133
איור 59: חברות בתחום הבינה המלאכותית לפי מספר עובדים	134
איור 60: חברות בתחום הבינה המלאכותית לפי סקטורים	134
איור 61: השקעות בתחום הבינה המלאכותית, מספר העסקאות ושוויין, 2015-2019	135
איור 62: השינוי במספר הפרסומים הישראליים בנושאי הבינה המלאכותית ושיעורם מפרסומי העולם, 2000-2019	136
איור 63: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בנושאי AI בשנים 2015-2019	137
איור 64: גופי המימון העיקריים שמופיעים ברשימות הספונסרים של פרסומים בנושאי AI בשנים 2015-2019	137
איור 65: השינוי במספר משפחות הפטנטים ב-PatBase בנושאי AI	138
איור 66: התפלגות מסלולים לפי סיווג - תואר ראשון	141
איור 67: התפלגות מסלולים לפי סיווג - תארים מתקדמים	142
איור 68: תזות לתארים שני ושלישי לפי שנים, 2007-2016	142
איור 69: תזות לתארים שני ושלישי לפי מוסדות מחקר, 2007-2017	143
איור 70: צריכת בשר ותחליפי בשר בשוק העולמי במילארדי דולרים, 2025-2040 וחלקם של בשר 'קונבנציונלי', תחליפי בשר חדשניים מהצומח ובשר מתורבת בצריכה באחוזים	148
איור 71: תחזית למחיר ממוצע לבשר מתורבת ובשר קונבנציונלי, 2015-2030	148
איור 72: גידול צפוי בשוק החרקים האכילים	149
איור 73: גיוסי הון של חברות טכנולוגיה בתחום מקורות מזון אלטרנטיביים בישראל, \$M, -2019	152

איור 74: חברות בתחום הבשר המתורבת (בשר ממקור תאי) בעולם שהודיעו על גיוסי הון (עד שנת 2018) לפי מדינות*	152
איור 75: משקיעים אסטרטגיים באקוסיסטם העולמי בתחום הבשר המתורבת (בשר ממקור תאי)*	153
איור 76: חברות בתחום מקורות מזון חדשים בשנים 2007-2020	154
איור 77: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה	154
איור 78: התפלגות חברות לפי Funding Stage	155
איור 79: מספר הפרסומים בעולם בשנים 2019-2000	156
איור 80: 30 המדינות המובילות במספר הפרסומים בשנים 2015-2019	157
איור 81: פטנטים בתחום הבשר המתורבת (active ו- pending) בשנים 2017-2009	157
איור 82: גידול במספר חברות הבשר המתורבת בעולם בין השנים 2016 ל-2019*	158
איור 83: מספר החברות בתחום תקשורת לוויינים לפי שנת הקמה, 2000-2020	170
איור 84: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה	170
איור 85: בקשות לפטנטים ב-USPTO של מגישים ישראלים בתחום תקשורת לוויינים 2011-2019, לפי שנת הגשת הבקשה לפטנט	171
איור 86: מספר הפרסומים בעולם ובישראל, 2000-2018	172
איור 87: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בשנים 2014-2018	173
איור 88: תיאור סכמטי של התפלגות הפרסומים בשנים 2014-2018 לפי אוניברסיטאות וחוקרים נבחרים	173
איור 89: גופי המימון המובילים לפי מספר המאמרים בעולם שמומנו בתקופה שבין 2014-2018	174
איור 90: מספר מקבלי התארים (ראשון, שני ושלישי) בהנדסה ביו-רפואית בישראל (שנה"ל תשס"ח-תשע"ו)	186
איור 91: אחוז גיוס ההון לשנת 2018 בישראל לפי תחום העיסוק של החברה	188
איור 92: מספר בקשות לפטנט ב-USPTO, לפי שנת הגשת הבקשה על פי סיווג טכנולוגי A61	190
איור 93: עשרת המגישים המובילים לפטנט בשנים 2017-2007 ב USPTO לפי סיווג טכנולוגי A61	190
איור 94: מספר הבקשות לפטנט ב USPTO לפי פילוח סקטוריאלי בשנים 2017-2007 לפי סיווג טכנולוגי A61	191
איור 95: מספר בקשות לפטנט ב-USPTO, לפי שנת הגשת הבקשה על פי תת סיווג טכנולוגי A61N,A61B	191
איור 96: מספר הפרסומים המדעיים בתחום ההנדסה הביו-רפואית בישראל ובעולם 2000-2018	192
איור 97: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בתחום ההנדסה הביו-רפואית בשנים 2014-2018	192
איור 98: גופי המימון המובילים לפי מספר הפרסומים בתחום ההנדסה הביו-רפואית בשנים 2014-2018	193
איור 99: תיאור סכמטי של התפלגות הפרסומים הישראלים בתחום ההנדסה הביו-רפואית לפי אוניברסיטאות בשנים 2014-2018	193

רשימת טבלאות

טבלה 1: סיכום של צורכי כוח האדם בתחומים נבחרים: ההכשרה הקיימת, האם ההכשרה נותנת מענה לדרישות התחום והמלצות לצמצום הפער.....	14
טבלה 2: סטודנטים להנדסה לפי מקצועות לימוד, 2010-2018.....	27
טבלה 3: מענקי מחקר בתחום פוטוניקה אינטגרטיבית.....	60
טבלה 4: היקף גיוס ההון שבוצע בחברות בתחום אגירת אנרגיה.....	108
טבלה 5: מענקי מחקר בתחום אגירת אנרגיה.....	113
טבלה 6: שטחי יישום של טכנולוגיות דיגיטליות נפוצות בערים עכשוויות.....	120
טבלה 7: קטגוריות של מקורות חלבון חדשניים.....	147
טבלה 8: גידול צפוי לפי סוגי חלבון.....	149
טבלה 9: מאפייני סוגי מסלולי לוויינים.....	166
טבלה 10: מגישים מובילים בהגשת בקשות לפטנט ב-USPTO בין השנים 2010-2018.....	172
טבלה 11: מענקי מחקר בתחומי תקשורת לוויינים מקרנות נבחרות.....	176
טבלה 12: מענקי מחקר בתחומים רלוונטיים ל Bio-Convergence.....	189

תקציר מנהלים

אנו נמצאים כיום בתקופת המהפכה הרביעית, שנקראת גם המהפכה הדיגיטלית/"ייצור חכם". עידן זה מאופיין בשימוש בטכנולוגיות חדשניות שמתפתחות בקצב מהיר מאוד כגון: רובוטיקה, סנסורים, בינה מלאכותית, מציאות רבודה, 3DP ועוד. טכנולוגיות אלה מיושמות בכל תחומי החיים – רפואה, חקלאות, חלל, אנרגיה סביבה ועוד. על מנת שישראל תוכל להיות חלק מעידן זה, יש צורך בכוח אדם בעל הכשרה מתאימה.

מטרת העבודה היתה ביצוע של תחזיות צרכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי לתחומים נבחרים על מנת לסייע בהרחבת ההבנה והידע בנוגע לדרישות עתידיות לכוח אדם מדעי וטכנולוגי ובהכוונה וקביעת סדר עדיפויות בהשקעות להכשרות כוח אדם במדע וטכנולוגיה בתחומים נבחרים.

העבודה הנוכחית כללה שני חלקים: החלק הראשון מציג מדדים לשוק העבודה המדעי והטכנולוגי בישראל. מטרתו של הפרק לתת תמונת מצב של המשק בהיבטי חינוך, השכלה גבוהה ותעסוקה ותרומתם לצרכי שוק העבודה המדעי והטכנולוגי בישראל. בחלק השני בחנו מהם צרכי כוח האדם בעשר טכנולוגיות עתידיות רלבנטיות למדינת ישראל.

מסקירת החלק הראשון שבו מוצגים מדדים לשוק העבודה המדעי והטכנולוגי בישראל עולה כי שיעורי התעסוקה ברוב מדינות ה-OECD נמצאים במגמת עלייה. הסיבה לכך היא שמשורות נוצרות בקצב מהיר יותר מכפי שהן נעלמות ונוצרות הזדמנויות חדשות לאנשים שבעבר הודרו משוק העבודה וכיום בזכות האטומיזציה והגלובליזציה נפתחות בפניהם משרות. עובדה זו מציבה אתגר לא מבוטל בפני קובעי מדיניות על השינויים שיש לבצע בתחומי החינוך, ההכשרה והתעסוקה.

למערכת החינוך תפקיד מרכזי בהכנת עתודות להשכלה גבוהה. יש חשיבות רבה לתלמידים בעלי יכולות גבוהות המהווים את הדור הבא ללימודים גבוהים ולהתפתחות המדעית והטכנולוגית של המדינה. בשנת הלימודים 2018, 66% מתלמידי התיכון היו זכאים לתעודת בגרות, כאשר רק 56% עמדו גם בדרישות הסף של האוניברסיטאות. מספר זה מהווה אומדן קרוב להיקף של המשאב העיקרי של ישראל - כוח אדם משכיל – שיצטרף לשוק העבודה בעוד מספר שנים.

מבחינה של שיעור הסטודנטים הלומדים את תחומי ההנדסה והאדריכלות עולה כי בשנת 2018/19 בתואר הראשון 18.8% מהסטודנטים למדו בתחומי ההנדסה והאדריכלות. לעומת זאת, בתואר שני רק 6.2% למדו את התחומים אלה. בהשוואה בינלאומית, בשנת 2017 שיעור הסטודנטים ללימודי הנדסה לתואר ראשון היה נמוך מהמוצע במדינות ה-OECD. בהתמקדות בסטודנטים הלומדים מקצועות ICT, עולה כי חלקם היחסי של לומדי ICT לתואר ראשון מתוך כלל לומדי תואר ראשון בישראל עלה בשנים 2013-2017 מ-4.6% ל-8.1%. סטודנטים אלה יהוו את ההיצע לשוק העבודה המדעי והטכנולוגי.

על מנת להבין מה הביקוש הקיים לבוגרי מדע וטכנולוגיה בחנו את מספר המועסקים לפי משלח ידם. ניתן לראות עלייה חדה ומשמעותית במספר המועסקים כמפתחי תכנה, מנתחי יישומים, ומהנדסי מסדי נתונים ורשתות. עובדה זו משתקפת גם במדד המשרות הפנויות – מספר המשרות הפנויות בתחומי ה-ICT גבוה משמעותית מתחומים אחרים וגם היחס בין היצע לביקוש הוא הנמוך ביותר.

בחלק השני של העבודה בחנו מהם צרכי כוח האדם בעשר טכנולוגיות מובילות. נבחרו טכנולוגיות שהוגדרו בעולם כטכנולוגיות עתידיות, ומתוכן גובשה רשימת טכנולוגיות עתידיות רלבנטיות למדינת ישראל. הקריטריונים לבחינת הטכנולוגיות שיכולות להתאים למדינת ישראל היו בין היתר: קיומו של ידע אקדמי בתחום, היכולת של התעשייה הישראלית לקלוט את הטכנולוגיה, היכולת למימוש הפוטנציאל וקיומו של צורך לאומי.

עשר הטכנולוגיות שנבחרו לעבודה הן: **אגרוטק וחקלאות מדייקת, פוטוניקה אינטגרטיבית, הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים, רפואה מדייקת וגנומיקה, אגירת אנרגיה, ערים חכמות, בינה**

מלאכותית מדעי הנתונים ורובוטיקה חכמה, מקורות מזון אלטרנטיביים, תקשורת לוויינים ושילוב רב תחומי ביולוגיה, תוכנה והנדסה לעולם הרפואה (Bio-Convergence).

עבור כל אחת מהטכנולוגיות בוצעה סקירה של התחום בישראל ובעולם, נערכה בחינה של מהי ההכשרה הנדרשת לכוח אדם מדעי וטכנולוגי בתחום והאם היא מספקת את ההכשרה שתדרש לתחום בשנים הקרובות, האם יש כיום מענה לצרכי כוח האדם הנדרש בתחום בישראל, האם צפוי שינוי בביקוש לכוח אדם בתחום והאם נדרשת היערכות/ התאמת ההכשרות לקראת שינוי זה. לבסוף בוצעה אינטגרציה של צרכי כוח האדם שעולים מכלל הסקירות של עשרת התחומים.

המתודולוגיה לביצוע המחקר התבססה על עבודות שונות שנעשו בשנים האחרונות במוסד שמואל נאמן, כולל עבודות שבוצעו בשנים קודמות במסגרת העבודה הנוכחית, בוצעו סקירות לגבי הנעשה בארץ ובעולם, ראיונות עם מומחים, שאלונים שהופצו לבעלי עניין בכל אחד מהתחומים, ניתוח ביבליומטרי, ניתוחי פטנטים ועוד.

ממצאי המחקר מראים כי כל עשרת התחומים שבחנו הינם תחומים מולטי-דיסציפלינריים ועל מנת לעסוק, לחקור ולפתח בהם יש צורך בכוח אדם בעל ידע והכשרה מדיסציפלינות מגוונות. בדרך כלל תחומים אלה משלבים בין תחום התמחות עיקרי ותחומים משלימים. לדוגמא, לתחום האגרוטק – נדרשת השכלה בתחום החקלאות אך גם בתחומי ההנדסה השונים (מכונות, מחשבים, תקשורת ועוד), גם תחומי הרפואה המותאמת אישית וה-Bio-Convergence הם תחומים המשלבים מספר עולמות תוכן: מדעי החיים, רפואה והנדסה, בתחום ההדפסת תלת ממד יש צורך בהכשרות כגון, מכונות, חומרים, פלסטיקה, עיצוב ועוד. גם תחום מקורות מזון אלטרנטיביים שנראה כתחום ממוקד דורש הכשרה וידע לא רק בהנדסת מזון אלא גם בביולוגיה, הנדסה ביו-רפואית הנדסת רקמות, ביוטכנולוגיה, צמחים, כימיה, ואולי אף הנדסת מכונות - עם מכוונות לחלבון אלטרנטיבי.

מניתוח עשר הטכנולוגיות עולה כי **ההכשרות הנדרשות ביותר ממחצית מהתחומים הן: הנדסת/מדעי המחשב ומערכות מידע, הנדסת חשמל והנדסת מכונות. מקצועות נוספים שהינם רחביים ונדרשים למספר תחומים הם: הנדסת מערכת, מדעי הנתונים (כולל ביו-אינפורמטיקה), הנדסת חומרים וכן הכשרות הנוגעות לשילוב של ביולוגיה רפואה וטכנולוגיה – הנדסה ביו-רפואית וביוטכנולוגיה.**

בכל עשרת התחומים שנבחנו במסגרת העבודה נמצא שההכשרה הקיימת כיום לכל תחום הינה חסרה ביחס לצרכי כוח האדם הטכנולוגי הנדרש לתחום. בכל אחד מהתחומים קיימת התקדמות טכנולוגית שמרבית האוניברסיטאות והמכללות להנדסה עדיין לא כוללים בתוכנית הלימודים.

התובנות וההמלצות המרכזיות של המומחים שראיינו היו בנוגע לצורך להוסיף תוכניות אקדמיות, לחזק את הלימודים במערכת החינוך בתחומים מסוימים, לחזק שיתופי פעולה אקדמיה-תעשייה בהכשרת כוח אדם ולפתח את כוח האדם הקיים במסגרת לימודי המשך (Life Long Learning):

הוספת תוכניות אקדמיות:

אגרוטק: תוכניות אקדמיות שיכשירו בעלי תואר הנדסי או מדעי לנושא מולטי-דיסציפלינרי. הכשרה לתחום צריכה לכלול: מדעי הנתונים, בינה מלאכותית וניהול פרויקטים.

פוטוניקה ופוטוניקה אינטגרטיבית:

• להכשיר מהנדסי מערכת עם התמחות ברמת הרכיב.

• לחזק לימודי טכנאים/ הנדסאים/מכשירנים במסגרת המכללות הטכנולוגיות בישראל.

הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים:

• להכניס מסלול לימודי הדפסת תלת ממד בפקולטות מכונות, כימיה, תוכנה וחומרים. לבנות קורסים ייעודיים להדפסת תלת ממד שיהיו חלק מתוכנית הלימודים.

• מסלול מולטי-דיסציפלינרי שישלב לימודי עיצוב עם הנדסת חומרים, אנליזת חוזק בעיצוב תעשייתי, אנליזת זרימה, ניהול מוצר ואבטחת איכות.

• לבחון דרכים להעלאת מספר הבוגרים בפקולטות להנדסת חומרים, הנדסת פלסטיקה והנדסת אלקטרוניקה.

רפואה מדייקת וגנומיקה:

- בניית תוכנית המיועדת להכשרת המטולוגים ואונקולוגים.
- הכשרת אנשים בעלי ידע מולטי-דיסציפלינרי לתחום- ההכשרה דורשת גם מדעים מדויקים וגם מדעי החיים לפחות ברמה של דוקטורט ובתור דוקטורנט. הכנסת חשיבה כמותית לתוכניות לימודים בביו-רפואה ורפואה וחשיפת סטודנטים לביו-רפואה למקצועות ההנדסיים, שתביא ליותר הבנה של היכולות והמגבלות החישוביות עבור תלמידי רפואה ורופאים בקליניקות ובבתי החולים. במקביל יש לתת יותר דגשים על הצד הרפואי בלימודי ביואינפורמטיקה.

אגירת אנרגיה:

- לשלב בתוכנית הלימודים קורסים באנרגיה מתחדשת ובאגירת אנרגיה. המלצה לשנות את חוק החשמל שיאפשר למוסדות להשכלה גבוהה לבצע שינויים בתוכניות הלימוד ובהכשרות כך שיותאמו לצרכים הנדרשים לחברות בתחום.
- על מנת לענות על הצורך בהכשרה מעשית וחשיפה של סטודנטים וחוקרים צעירים לעסוק בתחום, יש צורך במעבדות בנושא לסטודנטים לתואר ראשון ושני.
- הגדלת מספר הסטודנטים הלומדים חומרים והנדסה כימית.

ערים חכמות:

- יש צורך בפתיחת תוכניות מולטי-דיסציפלינריות בנושא ערים חכמות. ההכשרה הנדרשת לתחום יכולה להתקיים בפקולטות לתכנון ערים, תעשייה וניהול או מנהל עסקים והיא צריכה לכלול: קיימות ותכנון, מדיניות ציבורית, יזמות וחדשנות.

בינה מלאכותית, מדעי הנתונים ורובוטיקה חכמה:

- יש צורך במדיניות להגדלת מספר הסטודנטים למחקר בתחום ה-AI ביחוד במדעי הנתונים והבינה המלאכותית על מנת לתת מענה לצרכי התעשייה ולייצר את הדורות הבאים של חוקרים באקדמיה.
- לאור הביקוש העולה פקולטות הנדסיות ומדעיות שוקלות לתת לסטודנטים קורסי בסיס או הכרות עם בינה מלאכותית ומדעי הנתונים בפקולטות להנדסה ומדעים מדויקים – נדרש לבחון אפשרות לזרז מתן אישורים לפתיחת הקורסים.
- הכשרות חוץ אקדמיות המתאימות להכשרת מפעילי כלי AI ברמת הטכנאות, הכשרת בוגרי הנדסה או מדעים מדויקים שעברו קורסים מקצועיים לתפקידים התחלתיים.

מקורות מזון אלטרנטיביים:

- העלאת המודעות למסלולי לימוד כמו מדעי המזון והנדסת ביוטכנולוגיה ומזון.
- קורסים ייעודיים לנושא ויותר מעבדות מחקר בתחום. הכשרות מעמיקות בחלבונים אלטרנטיביים- עיבוד חלבונים, פונקציונליות של חלבונים.
- הכשרה חשובה הן למומחי פרמנטציה והן לחברות פיתוח זני צמחים היא העמקה בחלופות בשר, בצרכים של התעשייה. יכולה לעזור לחברות להיכנס לתחום.

תקשורת לוויינים:

- יש צורך במסלול ייעודי לתקשורת לוויינים במוסדות האקדמיים.
- התחום הינו מולטי-דיסציפלינארי ונדרשות בו יכולות בתחומי חומרה, תקשורת, קודים, תוכנת זמן אמת, תוכנות ניהול, אנטנות, RF, מיקרוגל, שידור/קליטה, תכנון רכיבים, סייבר, מגברי הספק, מכניקה, בקרה ועוד.

Bio-Convergence:

- בלימודי ביולוגיה צריך לכלול כלים מתמטיים וחישוביים ברמה גבוהה, כמו כן יש ללמד שילוב של טכנולוגיה, בפרט רובוטיקה בביצוע ותכנון ניסויים.
- לתחומי הפיתוח צריך להכשיר אנשים עם רקע פיזיקאלי או הנדסת חשמל, עם ראייה מולטי-דיסציפלינרית.

חיזוק לימודים במערכת החינוך:

- פוטוניקה ופוטוניקה אינטגרטיבית: יש לחזק משמעותית את לימודי הפיזיקה במערכת החינוך.
- הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים: להכניס הדפסת תלת ממד לתוכנית הלימודים בבתי ספר התיכוניים על מנת לחשוף את התלמידים לנושא ולהכשיר מורים ללמד את הנושא.
- רפואה מדייקת וגנומיקה: לאפשר לתלמידי תיכון ללמוד את השילוב של מתמטיקה, פיסיקה, כימיה וביולוגיה ולא כפי שקיים כיום שהם צריכים לבחור ביניהם.

חיזוק שיתופי פעולה אקדמיה-תעשייה בהכשרת כוח אדם:

פוטוניקה ופוטוניקה אינטגרטיבית: לתת הכשרה נוספת על ידי הצטרפות לפרויקטים בתעשייה המובילים על ידי בעל מקצוע. הכשרה תוך כדי התנסות של מהנדסי מערכת.

הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים: התמחויות והנחיית פרויקטים, התנסות בעבודה כסטודנטים לצורך רכישת ידע וניסיון רלוונטי והקניית אוריינטציה מחשבתית לעולם ההדפסה התלת-ממדית.

:Life Long Learning

הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים: העשרה והתמקצעות של עובדים בארגונים באמצעות הרצאות וכנסים בארץ ובעולם.

רפואה מדייקת וגנומיקה: בניית תוכניות הכשרה לרופאים שתכלול העשרה בתחומי הרפואה המותאמת אישית. קביעת מדיניות שתאפשר לרופאים לפנות זמן ומשאבים על מנת לעסוק במחקר בסוגיות של רפואה מותאמת אישית בבתי החולים.

המלצות נוספות:

הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים: הקמת מרכז ידע שיספק תשתית מחקרית נרחבת לכל החוקרים בתחום מהאקדמיה ומהתעשייה לגבי היבטים שונים הקשורים להדפסת תלת ממד.

Bio- Convergence: מומלץ להקים באחד מהמוסדות להשכלה גבוהה מכון מחקר להנדסה מתוך ראייה של הצורך בשילוב תחומים שונים של ביולוגיה, רפואה והנדסה. מיזם הכולל מהנדסים, אנשי ביולוגיה וקלינאים.

ערים חכמות: ליצור צוותי חדשנות ברשויות המקומיות, שינהלו את תהליכי החדשנות בכל עירייה, יבדקו לאן העיר רוצה להתפתח, לאן העולם מתקדם בתחום ויקבעו מדיניות.

בעקבות ממצאי המחקר בכל התחומים שהצביעו על הצורך בכוח אדם בעל ידע והכשרה מדיסיפלינות מגוונות, עולה הצורך לבחון את האפשרות להכשיר סטודנטים בגישות מולטי-דיסיפלינריות.

אנו מציעים לבצע עבודה שבמסגרתה תבוצע סקירה של הכשרות מולטי-דיסיפלינריות בעולם וכן הערכה של לימודים מולטי-דיסיפלינריים שכבר מתקיימים במוסדות אקדמיים בישראל מבחינת: תוכניות הלימודים, הביקוש להתקבל לפקולטות מולטי-דיסיפלינריות, הביקוש של מקומות עבודה לבוגרי פקולטות אלה יחסית לבוגרי פקולטות אחרות, הצלחת הבוגרים להשתלב במקומות עבודה, הצורך בפתיחת הכשרות מולטי-דיסיפלינריות נוספות. מחקר כזה יאפשר לקובעי מדיניות להבין איך ומה נעשה כיום בעולם ובישראל.

סיכום קצר של ממצאי המחקר לגבי צרכי כוח האדם בכל אחת מעשר הטכנולוגיות שנבחנו במסגרת העבודה, מופיע בטבלה הבאה.

טבלה 1: סיכום של צורכי כוח האדם בתחומים נבחרים: ההכשרה הקיימת, האם ההכשרה נותנת מענה לדרישות התחום והמלצות לצמצום הפער

המלצות	האם ההכשרות עונות על דרישות התחום	ההכשרה הנדרשת והקיימת כיום לתחום
1. אגרוטק וחקלאות מדייקת		
<p>1. לייצר תוכניות אקדמיות לבוגרי הנדסה מחד ולבוגרי מדעי החיים מאידך, לתואר שני ושלישי, על מנת שיהיו "קטרים" לחממות טכנולוגיות למוצרי אגרוטק וחקלאות מדייקת. תוכנית שאליה יגיעו אנשים שיש להם תואר הנדסי או מדעי, ויוכשרו לנושא בין-דיסציפלינרי. התוכנית צריכה להיות צמודה לפקולטה או לתוכנית כמו מערכות אוטונומיות או הנדסת מערכת.</p> <p>2. להכשיר את העוסקים בתחום במדעי הנתונים, בתהליכים כלכליים וחברתיים, בניהול פרויקטים ובינה מלאכותית.</p>	<p>- אין כיום מענה לצורכי כוח אדם טכנולוגי בתחום, היות שאין מנגנון אקדמי שמכשיר כוח אדם בין-תחומי המשלב הייטק טכנולוגיה ומדעי החיים. יש כיום מהנדסים טובים עם ידע בתחום הטכנולוגי בלי ידע בחקלאות או אנשים עם חוש טכני והשכלה באגרונומיה שצריך להשלים להם את התחום הטכנולוגי.</p> <p>- יש צורך בכוח אדם עם הכשרה טובה יותר במדעים המדויקים, במדעי הנתונים, הבנה בתהליכים כלכליים וחברתיים ויכולות של ניהול פרויקטים.</p> <p>- חסר כ"א בעל ידע בבינה מלאכותית.</p>	<p>התחום משלב חקלאות והנדסה ולכן נדרש ידע משולב בשני התחומים. כלומר או בוגרי הנדסה בתחומים מחשבים, חשמל, מכונות וכדומה שיתמחו באופן עצמאי או יקבלו הכשרה בתחומי מדעי החיים, או בוגרי מדעי החיים/חקלאות שיתמחו בנושאי הנדסה.</p>
2. פוטוניקה ופוטוניקה אינטגרטיבית		
<p>1. לחזק משמעותית את לימודי הפיזיקה במערכת החינוך.</p> <p>2. לחזק לימודי טכנאים/ הנדסאים/מכשירנים במסגרת המכללות הטכנולוגיות בישראל.</p> <p>3. להכשיר מהנדסי מערכת עם התמחות ברמת הרכיב שכוללת התנסות.</p> <p>4. מערכות אלקטרו אופטיות הן מולטי-דיסציפלינאריות. ולכן נדרשים לימודים מולטי-דיסציפלינריים.</p> <p>יש לפתח הכשרות משלימות למהנדסי מיקרואלקטרוניקה ואנשי אלקטרואופטיקה ובמקביל לחשוב על הכשרה מראש לתחומי המיקרופוטוניקה.</p> <p>5. לתת הכשרה נוספת על ידי הצטרפות לפרויקטים בתעשייה המובלים על ידי בעל מקצוע.</p>	<p>- קיים מחסור בכוח אדם בתחום הפוטוניקה שקיבל הכשרה לנושא.</p> <p>רוב הפיסיקאים העוסקים בתחום לא נחשפו לנושא במהלך לימודיהם האקדמיים, ואין בנמצא טכנאי אלקטרו-אופטיקה חדשים בשוק העבודה. חסרה הכשרת מהנדסים כמהנדסי מערכת לאלקטרואופטיקה.</p> <p>- חסרה הכשרה מולטי-דיסציפלינרית- מהנדסי מכונות לא מספיק מכירים הנדסת חומרים והנדסת אופטיקה, מהנדסי אלקט' לא מספיק מכירים שיקולי חום, מהנדסי תוכנה מגיעים עם הבנה בסיסית בתשתית העיבוד (אלקט') וכו'.</p> <p>- חסר כוח אדם: במעטפת של הרכיבים בגין המצוקה הכללית במהנדסי פתרון, חסרים מתכננים אופטיים, מתכנני אופטימניקה, פיסיקאים שמבינים באופטיקה ובמכ"ם, מכשירני פיתוח, מהנדסי מערכת והנדסת תהליכים בעולמות של רכיבים אופטיים ומהנדסי איכות למערכות מורכבות.</p>	<p>המסלול שמשלב פיזיקה והנדסת חשמל במוסדות האקדמיים נותן את הבסיס לעסוק בתחום. בקבלה לעבודה מתקיימת בחברות הכשרה של הנדסת מערכת והנדסת תהליכים בעולמות של רכיבים אופטיים.</p>

המלצות	האם ההכשרות עונות על דרישות התחום	ההכשרה הנדרשת והקיימת כיום לתחום
3. הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים, טכנולוגיות ויישומים		
<p>1. להכניס הדפסת תלת ממד לתוכנית הלימודים בבתי ספר תיכוניים. שבכל בית ספר תהיה מדפסת תלת ממד וחומרים נדרשים, על מנת לחשוף את התלמידים לנושא. לשם כך יש להכשיר מורים למקצועות השונים (מחשבים, עיצוב, מכניקה, כימיה).</p> <p>2. לבחון דרכים להעלאת מספר הבוגרים בפקולטות להנדסת חומרים, הנדסת פלסטיקה והנדסת אלקטרוניקה. בנוסף, תעשיית התלת ממד מתחרה על ההעסקה של בוגרי הפקולטות הרלוונטיות עם תחומים רבים אחרים.</p> <p>3. להכניס מסלול לימודי הדפסת תלת ממד בפקולטות מכונות, כימיה, תוכנה וחומרים. לבנות קורסים ייעודיים להדפסת תלת ממד שיהיו חלק מתוכנית הלימודים.</p> <p>4. לפעול להכשרת מהנדסים מולטי-דיסציפלינריים לתחום התלת ממד. מסלול מולטי-דיסציפלינרי שישלב לימודי עיצוב עם הנדסת חומרים, אנליזת חוזק בעיצוב תעשייתי, אנליזת זרימה, ניהול מוצר ואבטחת איכות.</p> <p>5. לפתח את כוח האדם הקיים בתחום במסגרת לימודי המשך (Life Long Learning). העשרה והתמקצעות של עובדים בארגונים באמצעות הרצאות וכנסים בארץ ובעולם.</p> <p>6. הקמת מרכז ידע שיספק תשתית מחקרית נרחבת לכל החוקרים בתחום מהאקדמיה ומהתעשייה לגבי היבטים שונים הקשורים להדפסת תלת ממד.</p> <p>7. עידוד שיתופי פעולה בין האקדמיה לתעשייה דרך התמחויות והנחיית פרויקטים, התנסות בעבודה כסטודנטים לצורך רכישת ידע וניסיון רלוונטי והקניית אוריינטציה מחשבתית לעולם ההדפסה התלת ממדית.</p>	<p>- לא קיים כיום מענה לצרכי כוח האדם הנדרש בתחום בישראל. קיים מחסור בולט של כוח אדם מקצועי (מהנדסים והנדסאים) בתחום הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים.</p> <p>- נדרש כוח אדם מיומן בתחומי פיתוח ויישום חומרים להדפסה תלת ממד, לתכנון מוצרים ותהליכים ליצור בתלת ממד ולתפעול ותחזוקת ציוד היצור בתחום.</p> <p>- נדרש תגבור של חוקרים בתחומים: חומרים, כימאים עם רקע בפולימרים, מטלוגים בעלי ניסיון, תכן מוצרים ובדיקות מוצרים שיוצרו בטכנולוגיות הדפסת תלת ממד. יש מחסור בכוח אדם שמכיר היטב את התהליכים, מגבלותיהם, והפיכתם למוצרים.</p> <p>- יש מחסור במהנדסים בחברות שיישמו את הידע ויפתחו יישומים על בסיס זה בתעשיית הייצור.</p> <p>- יש מחסור באנשי מו"פ שידעו לבצע שילוב של חומרים אורגנים וחומרים אנאורגנים.</p>	<p>הדיסציפלינות הנדרשות לתחום התלת ממד הן: תוכנה, הנדסת חומרים, הנדסת פלסטיקה, הנדסת אלקטרוניקה, הנדסת מכונות, כימיה ועיצוב.</p> <p>בנוסף לכל אחת מהן נדרשת הכשרה לתחום התלת ממד.</p> <p>כיום, רוב ההכשרה הנדרשת לתחום מתבצעת (בחברות On-the-job training)).</p>
4. רפואה מדייקת וגנומיקה		
<p>1. אין גוף מקצועי שמקדם את הידע הנדרש בגנטיקה, המטולוגיה, אונקולוגיה וטכנולוגיית מעבדה והנגזרות שיש לעניין בתחום בריאות הציבור. התחום דורש הכשרה מיוחדת- יש צורך בבניית תוכנית</p>	<p>אין כיום מענה מספק לצרכי כוח האדם הנדרש בישראל לתחום הרפואה המדייקת והגנומיקה. התחום הפך לרב תחומי יותר מבעבר ודורש מיומנות רחבה יותר.</p>	<p>הדיסציפלינות הנדרשות לתחום הרפואה המותאמת אישית הן: הנדסה ומדעי המחשב, רפואה, מדעי הרפואה, הנדסה ביו-רפואית,</p>

המלצות	האם ההכשרות עונות על דרישות התחום	ההכשרה הנדרשת והקיימת כיום לתחום
<p>המיועדת להכשרת המטולוגים ואונקולוגים. יש צורך שחלק מההכשרה יעשה בשיתוף עם מומחים לגנטיקה ומומחים לאבחנה מעבדתית.</p> <p>2. נדרשת הכשרה בין תחומית בביואינפורמטיקה, AI והכרת עולם הרפואה המעשי. הכשרת אנשים בעלי ידע מולטי-דיסציפלינרי לתחום. ההכשרה דורשת גם מדעים מדויקים וגם מדעי החיים (כולל רפואה) לפחות ברמה של דוקטורט ובתר דוקטורנט. הכנסת חשיבה כמותית לתוכניות לימודים בביוולוגיה ורפואה וחשיפת סטודנטים לביו-רפואה למקצועות ההנדסיים, שתביא ליותר הבנה של היכולות והמגבלות החישוביות עבור תלמידי רפואה ורופאים בקליניקות ובבתי החולים. במקביל יש לתת יותר דגשים על הצד הרפואי בלימודי ביואינפורמטיקה.</p> <p>3. לאפשר לתלמידי תיכון ללמוד את השילוב של מתמטיקה, פיסיקה, כימיה וביוולוגיה ולא כפי שקיים כיום שהם צריכים לבחור ביניהם.</p> <p>4. בניית תוכניות הכשרה לרופאים Life Long Learning שתכלול העשרה בתחומי הרפואה המותאמת אישית. קביעת מדיניות שתאפשר לרופאים לפנות זמן ולקבל משאבים על מנת לעסוק במחקר בסוגיות של רפואה מותאמת אישית בבתי החולים.</p>	<p>נדרש ידע חישובי, הבנה בביוולוגיה ורפואה, בפרוטיאומיקה, טרנסקריפטומיקה, ומטבולומיקה, ובתחומים נוספים. כלומר ידע רב תחומי וידע חישובי, ביולוגי, פיסיקאלי, ביוכימי, כימי, פרמקולוגי, ועוד.</p> <p>ההכשרה בארץ צרה מכדי לענות לצרכים של פעילות שהיא רב תחומית בעיקרה. מעט מאוד מהעוסקים במדעי החיים או הרפואה הם בעלי יכולת תכנותית או חישובית, הידע של רוב הבוגרים בסטטיסטיקה אינו מספק וההבנה של הכלים הטכנולוגים לא מספיק עמוקה.</p> <p>נדרשת הכשרה רבה לאחר העסקת העובדים וזה נטל לא קטן על מקומות העבודה (On-the-job training).</p>	<p>גנטיקה, ביולוגיה, ביוטכנולוגיה, הנדסת פרמצבטיקה – תרופות, גנומיקה וביואינפורמטיקה.</p> <p>כיום הנושא נכלל בטכניון בפקולטה למדעי המחשב, בירושלים במדעי המוח, באוניברסיטת ת"א יש מסלול ייעודי לתחום.</p>
5. אגירת אנרגיה		
<p>1. על מנת לענות על הצורך בהכשרה מעשית וחשיפה של סטודנטים וחוקרים צעירים לעסוק בתחום, יש צורך במעבדות בנושא לסטודנטים לתואר ראשון ושני.</p> <p>2. הגדלת מספר תוכניות הלימודים הייעודיות לתחום. לשלב בתוכנית הלימודים קורסים באנרגיה מתחדשת ובאגירת אנרגיה. המלצה לשנות את חוק החשמל שיאפשר למוסדות להשכלה גבוהה לבצע שינויים בתוכניות הלימוד ובהכשרות כך שיותאמו לצרכים הנדרשים לחברות בתחום.</p> <p>3. הגדלת מספר הסטודנטים הלומדים חומרים והנדסה כימית.</p>	<p>- רוב המומחים טוענים שאין כיום מענה לצורכי כוח האדם הנדרש בתחום. זהו תחום חדש יחסית בעולם שכולל טכנולוגיות שונות שמרבית האוניברסיטאות והמכללות להנדסה עדיין לא כוללים בתוכנית הלימודים. לכל טכנולוגיה של אגירת אנרגיה דרושה הכשרה שונה: לאגירת אנרגיה חשמלית (BESS) דרושה הכשרה במערכות כוח תלת פאזיות במתח נמוך, בינוני וגבוה (שנאים, ממירים, הגנות, חישובי כבלים ורשת), מערכות זרם ישר במתחים עד VDC1500 (מצברים) ואלקטרו כימיה. בטכנולוגיות אגירה אחרות כגון תרמו-סולארי נדרשת הכשרה בהנדסת חומרים ותרמו דינמיקה, אנרגיה גרביטציונית –</p>	<p>באגירת אנרגיה צריך את השילוב של הנדסת אלקטרוכימיה, חשמל ו-data science. הכשרת כוח אדם לתחום נעשית בלימודים אקדמאים של הנדסת: חומרים, כימיה, מכונות, חשמל, אנרגיה ואיכות הסביבה ומשאבי טבע. הקורסים שניתנים במוסדות האקדמיים הם בעיקר באלקטרוכימיה, מקורות כוח ומדע חומרים נותנים את ההכשרה הבסיסית הנדרשת לתחום.</p>

המלצות	האם ההכשרות עונות על דרישות התחום	ההכשרה הנדרשת והקיימת כיום לתחום
	<p>אנרגיה שאובה, אנרגיה קינטית (גלגלי תנופה), אנרגיית לחץ (אוויר דחוס).</p> <p>- קיים מחסור בהכשרה מעשית וחשיפה שתעודד סטודנטים וחוקרים צעירים לעסוק בתחום. בנוסף, קיימת תחרות על כוח האדם בין חברות הפועלות להקמת פרויקטים בישראל אל מול חברות העוסקות בפרויקטים בינלאומיים.</p> <p>- זוהה מחסור בכוח אדם מקצועי עוזרי מחקר/ מנהלי מעבדה שיתחזקו את התשתיות הנדרשות לתחום.</p>	
6. ערים חכמות		
<p>1. יש צורך בפתיחת תוכניות מולטי-דיסציפלינריות בנושא ערים חכמות. ההכשרה הנדרשת לתחום יכולה להתקיים בפקולטות לתכנון ערים, תעשייה וניהול או מנהל עסקים והיא צריכה לכלול: קיימות ותכנון, מדיניות ציבורית, יזמות וחדשנות.</p> <p>2. יש צורך בתפקיד מנמ"ר (מנהל מערכות מידע) ואיש חדשנות שבודק לאן העיר רוצה להתפתח, לאן העולם מתקדם בתחום ולקבוע מדיניות וכן מהנדס נתוני עתק. בנוסף, יש צורך לייצר צוותי חדשנות ברשויות המקומיות, שינהלו את תהליכי החדשנות בכל עירייה.</p>	<p>הטמעת המערכות הטכנולוגיות בערים חכמות יצרה דרישה למשאבים וכוח אדם. קיימת כיום בארץ בעיקר הכשרה במסלול דיגיטלי שמתמקדת בטכנולוגיה. יש צורך גם בהכשרה נוספת לניהול עיר חכמה. יש צורך במנמ"רים המכירים את התחום ובהכשרה נוספת על מנת לייצר צוותי חדשנות ברשויות המקומיות, שינהלו את תהליכי החדשנות בכל עירייה.</p>	<p>ארבע מוסדות בישראל מלמדים את תחום הערים החכמות: אוניברסיטת בר אילן, המרכז הבינתחומי בהרצליה, הטכניון ואוניברסיטת ת"א.</p> <p>קיימת תוכנית "מאיצים דיגיטליים בשלטון המקומי שמטרתה הכשרת מובילי שינוי המקדמים חדשנות דיגיטלית ברשויות המקומיות.</p> <p>כיום קיימת הכשרה במסלול דיגיטלי בלבד והיא מתמקדת בעיקר בטכנולוגיה.</p>
7. בינה מלאכותית, מדעי הנתונים ורובוטיקה חכמה		
<p>1. יש צורך במדיניות להגדלת מספר הסטודנטים למחקר בתחום ה-AI ביחוד במדעי הנתונים והבינה המלאכותית על מנת לתת מענה לצרכי התעשייה ולייצר את הדורות הבאים של חוקרים באקדמיה. לאור התחרות עם התעשייה ועם אוניברסיטאות בחו"ל עלו מספר אסטרטגיות עיקריות להתמודדות: (1) הדגשת היתרונות שבאקדמיה ובהן קביעות ובטחון תעסוקתי, אפשרות לבצע מחקר משמעותי וחופש אקדמי (לאנשי סגל), ואפשרות 'לשדרג' את המעמד בשוק העבודה (לסטודנטים). (2) שיפור משמעותי בנגישות לדאטה, כולל דאטה שקיים רק באקדמיה. (3) מציאת דרך לבצע בידול במלגות</p>	<p>בתחום מדעי הנתונים יש ביקוש הולך וגובר לבוגרי תואר ראשון עם ידע בתחום. הביקוש לבוגרים צפוי לגדול משמעותית.</p> <p>בתעשייה קיים ביקוש גדל לבוגרי תארים מתקדמים בתחומי הבינה המלאכותית.</p> <p>כמענה לביקוש, עולה מספר הסטודנטים המבקשים כיום ללמוד תארים מתקדמים בתחומי ה-AI. זוהה קושי של מנחים ביכולתם לקבל סטודנטים למחקר, בעיקר בתחומי הבינה המלאכותית.</p>	<p>על מנת לעסוק בתחום ה-AI יש צורך בהכשרה בתחומים: מערכות מידע/מדעי הנתונים; בינה מלאכותית/ למידת מכונה/מע' נבונות/ מע' מבוזרות; ביו-אינפורמטיקה/ קוגניציה/ פסיכולוגיה בדגש לימודי מידע; מסלול משולב מע' נבונות/לומדות ומדעי המידע; רובוטיקה/ מע' אוטונומיות.</p> <p>ההכשרות ניתנות באוניברסיטאות ובמכללות בעיקר בפקולטות השונות להנדסת חשמל,</p>

המלצות	האם ההכשרות עונות על דרישות התחום	ההכשרה הנדרשת והקיימת כיום לתחום
<p>לסטודנטים ובשכר לסגל במקצועות בהן קיימת תחרות עם התעשייה ועם אוניברסיטאות בחו"ל. 4) בחינת מודלים חדשים לעבודת חוקרים מהאוניברסיטאות בתעשייה.</p> <p>2. הכשרות חוץ אקדמיות המתאימות להכשרת מפעילי כלי AI ברמת הטכנאות, הכשרת בוגרי הנדסה או מדעים מדויקים שעברו קורסים מקצועיים לתפקידים התחלתיים.</p> <p>3. קורסים תשתיתיים בפקולטות להנדסה ומדעים מדויקים – לאור הביקוש העולה פקולטות הנדסיות ומדעיות שוקלות לתת לסטודנטים קורסי בסיס או הכרות עם בינה מלאכותית ומדעי הנתונים. נדרש לבחון אפשרות לזרז מתן אישורים לפתיחת הקורסים.</p> <p>4. הבנה בסיסית של המונחים והאפשרויות הגלומות ב-Big Data הם חלק מהאוריינות הדיגיטלית/מדעית הנדרשת אצל בוגרי אוניברסיטאות. מדעי הנתונים הופכים להיות שיטת מחקר מרכזית גם במדעי החברה והרוח.</p>		<p>מערכות מידע, הנדסת תעשייה וניהול, מדעי המחשב.</p> <p>התמחות ברובוטיקה/ מערכות אוטונומיות נפוץ בעיקר בפקולטות להנדסת מכונות, הנדסת אווירונאוטיקה וחלל, הנדסת חשמל והנדסה אזרחית וסביבתית.</p>
8. מקורות מזון אלטרנטיביים		
<ul style="list-style-type: none"> העלאת המודעות למסלולי לימוד כמו מדעי המזון והנדסת ביוטכנולוגיה ומזון. קורסים יעודים לנושא ויותר מעבדות מחקר בתחום. הכשרות מעמיקות בחלבונים אלטרנטיביים- עיבוד חלבונים, פונקציונליות של חלבונים. <p>הכשרה חשובה הן למומחי פרמנטציה והן לחברות פיתוח זני צמחים היא העמקה בחלופות בשר, בצרכים של התעשייה. יכולה לעזור לחברות להיכנס לתחום.</p>	<p>נדרשת הכשרה של תארים מתקדמים בכל המשרות בתחומי הנדסת מזון, ביולוגים, מהנדסים ביו-רפואיים, הנדסת רקמות, ביוטכנולוגיה ומזון, צמחים, ביולוגיה, כימיה, ואולי אף הנדסת מכונות - עם מכוונות לחלבון אלטרנטיבי. יש גם רלוונטיות גדולה לתחום של מדעי הבשר (כדי לשפר את ה mouth feel של התחליפים מבחינת הטעם, הרכב, טקסטורה).</p> <p>כיום בכל החוגים הרלבנטיים לתחום אין התייחסות לאפליקציות של חלבון אלטרנטיבי ובהעדר תקנים ותקצוב רק בודדים יגיעו לעסוק בתחום במסגרת התמחות או דוקטורט.</p> <p>מהנדסים עם ידע בפיתוח טכנולוגיות חדשות לתחום שמשלבות ביו-הנדסה וביוטכנולוגיה. רקע בביולוגיה ובמזון. ידע בהנדסת רקמות וביולוגיה סינטטית.</p>	<p>ההכשרה הנדרשת היא הנדסת מזון עם התמחות בתחום טכנולוגי לדוגמא, בתחום החלבון האלטרנטיבי. ההכשרה משתנה בהתאם לתחום הטכנולוגיה.</p> <p>בפקולטה להנדסת ביוטכנולוגיה ומזון קיים מסלול המכשיר מהנדסים לתחום, אך כמות הבוגרים, במיוחד כאלה המסיימים תארים מתקדמים שהמחקר שלהם מתמקד בתחומי המזון אינו רב. ההכשרה ניתנת באוניברסיטה העברית במסלול של מדעי המזון, במכללת תל חי בתחומי מדעי המזון. במכללת אורט בראודה במסלול לביוטכנולוגיה שכולל התמחות במזון.</p> <p>GFI ישראל כתבו ומעבירים את הקורס האקדמי הראשון לחלבון אלטרנטיבי בעולם, שמוצע השנה בשלוש אוניברסיטאות (העברית, תל אביב ובן גוריון) ויחשוף כ-150 סטודנטים מכל התארים לתחום.</p>

המלצות	האם ההכשרות עונות על דרישות התחום	ההכשרה הנדרשת והקיימת כיום לתחום
9. תקשורת לוויינים		
<p>יש צורך במסלול יעודי לתקשורת לוויינים במוסדות האקדמיים. התחום הינו מולטי-דיסציפלינרי ונדרשות בו יכולות בתחומי חומרה, תקשורת, קודים, תוכנת זמן אמת, תוכנות ניהול, אנטנות, RF, מיקרוגל, שידור/קליטה, תכנון רכיבים, סייבר, מגברי הספק, מכניקה, בקרה ועוד. כדאי לנתב חלק מהמאמץ הלאומי להכשיר כוח אדם בנושאים המובילים למוצרים, המהווים את התשתיות של התקשורת, חישוב, ולא רק תוכנות וסייבר.</p>	<p>לרוב לא ניתן לגייס מועמדים עם ניסיון בתחום הלווייניות ועל כן נדרשת השלמה והדרכה בחברות. בעתיד צפוי כי תחום הגנת הסייבר בחלל יגדל מאוד ולכן ידרוש הכשרה בתחומים של תקשורת אופטית, (Machine Learning, Artificial Intelligence, Deep Learning), לאופטימיזציה של התקשורת הלוויינית ועוד. כמו כן יש יותר ויותר ארגונים אשר משגרים לוויינים קטנים לחלל ועל כן נדרשות גם יכולות של הבנת התחום כולל חישוב מסלולי הלוויינים ועוד. רואים היווצרות של מחסור בכ"א מיומן ומנוסה במחקר בנושא פיתוח ותכנון מכלולי מיקרוגל בתחומי תדר גבוהים. ישנו מחסור ניכר במהנדסים בתחום הספציפי ובתחומי תשתית נדרשים כגון: התמחויות בהנדסת מערכת, מערכות חומרה, תקשורת ספרתית, תדרי רדיו (RF) והנדסת רכיבים.</p>	<p>כיום באקדמיה קיימת פעילות בתחום החלל: בטכניון, באוניברסיטת בן גוריון בנגב, באוניברסיטת ת"א. אין כיום תוכניות לימודים ייחודיות לתחום תקשורת הלוויינים.</p>
10. שילוב רב תחומי ביולוגיה, תוכנה והנדסה לעולם הרפואה (Bio- Convergence)		
<p>1. בלימודי ביולוגיה צריך לכלול כלים מתמטיים וחישוביים ברמה גבוהה, כמו כן יש ללמד שילוב של טכנולוגיה, בפרט רובוטיקה בביצוע ותכנון ניסויים .</p> <p>2. לתחומי הפיתוח צריך להכשיר אנשים עם רקע פיזיקאלי או הנדסת חשמל לראיה מולטי-דיסציפלינרית.</p> <p>3. כדי לקדם את נושא ה-Bio-Convergence נדרש לגייס מספר משרדי ממשלה (משרד הכלכלה, משרד האוצר, משרד הבריאות, משרד החינוך, משרד לאיכות הסביבה). כמו כן, יש צורך לרתום את המל"ג לצרכי הכשרה מתאימה ואת- ISF לשם קבלת מענקי מחקר. יש צורך לעודד מענקי מחקר נוספים ולהגדיל את המענקים במסגרת תוכניות קמין ונופר של רשות החדשנות. מומלץ להקים באחד מהמוסדות האקדמיים מכון מחקר להנדסה בהשראה ביולוגית מתוך ראייה של הצורך בשילוב תחומים שונים של ביולוגיה, רפואה והנדסה. מיזם הכולל מהנדסים, אנשי ביולוגיה וקלינאים.</p>	<p>ההכשרה הקיימת כיום לתחום הינה חסרה מאוד ביחס לצרכים. צפוי שיכנסו כלים חישוביים ורובוטיקה לעולם הביולוגיה, דבר שידרוש הכשרה בתחומים אלו.</p> <p>בתחום השייווק נראה שישנם הרבה מאד מועמדים עם הרבה מאד ניסיון ואילו בתחומי הפיתוח נראה שאין מספיק אנשים עם רקע פיזיקאלי או הנדסת חשמל, עם ראייה מולטי-דיסציפלינרית מספקת. קשה מאד למצוא אנשים עם רקע חזק באלקטרופיזיולוגיה.</p>	<p>קיימות פקולטות להנדסה ביו-רפואית: בטכניון, באוניברסיטת בן גוריון בנגב, באוניברסיטת ת"א, באוניברסיטת בר אילן, באוניברסיטה העברית קיים מסלול לימודים ישיר לתואר שלישי בביו-הנדסה ובמכון ויצמן למדע קיימים מרכזים המבצעים מחקר בתחומים המשלבים רפואה, ביולוגיה, תוכנה והנדסה.</p>

מבוא

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 שאין להם כבר ביקוש והכשרות ומיומנויות מתאימים. 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 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 לחינוך טכנולוגי, 2001).

סקירה כללית של 4 שנות המחקר

ב-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 ולפיתוח במשרד המדע והטכנולוגיה. הנושא של תחזיות לצרכי כ"א מדעי וטכנולוגי מהווה חלק ממכרז זה.

לפי ההגדרה המקובלת של ה-OECD, חינוך 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 לרווחים הכלכליים והחברתיים הגדולים ביותר (Martin, 2001).

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

מטרת המחקר היא ביצוע של תחזיות צרכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי לתחומים/מקצועות נבחרים (10 שנים). הרצינות הוא כי עבודה זו תסייע בהרחבת ההבנה והידע בנוגע לדרישות עתידיות לכוח אדם מדעי וטכנולוגי ובהכוונה וקביעת סדר עדיפויות בהשקעות להכשרות כוח אדם במדע וטכנולוגיה בתחומים נדרשים.

בדו"ח המסכם שהוגש בסיום השנה הראשונה של הפרויקט, נסקרו תחזיות טכנולוגיות במדינות נבחרות בעולם ובוצע תהליך של התאמת תחזיות טכנולוגיות לישראל באמצעות ראיונות 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 לנושאים שנחקרים בהרחבה.

הנושאים שנבחרו למחקר:

- **בשנה א':** אגרו-טק - שיין לתחום Biotechnologies ופוטוניקה - שיין לתחום Digital technologies
- **שנה ב':** הדפסת תלת ממד - שיין לתחום Advanced materials ו- רפואה מותאמת אישית וגנומיקה - שיין לתחום Biotechnologies
- **שנה ג':** אגירת אנרגיה - שיין לתחום Energy and Environment וערים חכמות - אינו שיין לתחום טכנולוגי מסוים מאחר וזהו תחום מולטי-דיסציפלינרי הכולל בתוכו נושאים רבים (כגון: תחבורה, IOT, סנסורים, רשת חכמה ועוד). הפרק דן בחסמים ובכוח אדם ובהכשרות הנדרשות על מנת לקדם את התחום.

הדו"ח של השנה הרביעית לעבודה כולל שני חלקים:

החלק הראשון - מדדים לשוק העבודה המדעי והטכנולוגי בישראל ומטרתו לתת תמונת מצב של מוכנות המשק לצרכי שוק העבודה המדעי והטכנולוגי בישראל. הפרק כולל נתונים על החינוך העל היסודי (זכאות לבגרות, מצטיינים וכד), נתוני סטודנטים ובוגרים בהשכלה גבוה לפי תואר ותחומי למוד ונתונים על התעסוקה לפי משלח יד.

בחלק השני - נעשתה עבודה אינטגרטיבית לגבי צרכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי.

במסגרת עבודות שונות שנעשו בשנים האחרונות במוסד שמואל נאמן, כולל במחקר הנוכחי, נבחרו טכנולוגיות שהוגדרו בעולם כטכנולוגיות עתידיות, ומתוכן גובשה רשימת טכנולוגיות עתידיות רלבנטיות למדינת ישראל. הקריטריונים לבחינת טכנולוגיה שיכולה להתאים למדינת ישראל היו בין היתר: קיומו של ידע אקדמי בתחום, היכולת של התעשייה הישראלית לקלוט את הטכנולוגיה, היכולת למימוש הפוטנציאל וקיומו של צורך לאומי.

רשימת הטכנולוגיות והנושאים שזוהו:

1. אגרוטק וחקלאות מדייקת
2. פוטוניקה ופוטוניקה אינטגרטיבית
3. הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים, טכנולוגיות ויישומים
4. רפואה מדייקת וגנומיקה
5. אגירת אנרגיה
6. ערים חכמות
7. בינה מלאכותית, מדעי הנתונים ורובוטיקה חכמה
8. מקורות מזון אלטרנטיביים
9. תקשורת לוויינים
10. שילוב רב תחומי ביולוגיה, תוכנה והנדסה לעולם הרפואה (Bio - Convergence)

עבור כל אחד מהנושאים בוצע:

- סיכום קצר של מצב התחום בישראל ובעולם, מהי ההכשרה הנדרשת לכוח אדם מדעי וטכנולוגי בתחום, היכן בארץ ניתנת ההכשרה, האם קיים צורך בהכשרה נוספת.
- כדי לענות על השאלה מהם צרכי כוח האדם המדעי והטכנולוגי שיידרש בתחומים אלו בטווח זמן של 10-15 שנים פנינו למספר מומחים בכל תחום וביקשנו מהם לענות על השאלות הבאות:
 - האם לדעתך יש כיום מענה לצרכי כוח האדם הנדרש בתחום בישראל? אנא פרט.
 - מהי ההכשרה הנדרשת כיום לתחום? האם היא מספקת את ההכשרה שתידרש לתחום בשנים הקרובות?
 - האם צפוי שינוי בביקוש לכוח אדם בתחום זה מבחינת כמות ו/או סוג הכשרה, והאם נדרשת היערכות/ התאמת ההכשרות לקראת שינוי זה?
- בוצעה אינטגרציה של צרכי כוח האדם מדעי וטכנולוגי כפי שעולה מכלל הסקירות הטכנולוגיות העתידיות שנעשו ומהתשובות לסקר.
- דו"ח זה מסכם תובנות והמלצות בהתבסס על כל עשר הטכנולוגיות שנסקרו במסגרת זה.

מדדים לשוק העבודה המדעי והטכנולוגי בישראל

ההתפתחויות הטכנולוגיות במאה ה-20 שינו את רוב העבודות בשוק התעסוקה, מעבודות מבוססות כוח פיזי לעבודות מבוססות ידע. כיום, טכנולוגיה וידע הם גורמי מפתח בייצור. עם הגידול בניידות של מידע וכוח עבודה גלובלי, ידע וניסיון יכולים להיות מועברים באופן מיידי ברחבי העולם. היתרון היחסי של חברות כיום בא לידי ביטוי בתהליך החדשנות שלהן, שמשלב את שוק הטכנולוגיה עם הכישרון והיצירתיות של עובדי ידע. כלכלת הידע מוגדרת כייצור ושירותים המבוססים על פעילויות עתירות ידע שתורמות להאצת תהליך הפיתוח ומקנות יתרון טכני ומדעי. המרכיב העיקרי של כלכלת ידע הוא הסתמכות רבה יותר על יכולות אינטלקטואליות מאשר על תשומות פיזיות או משאבי טבע (Powell and Snellman, 2004; Carlaw et al., 2006).

שינויים אלה הובילו גם לשינויים בעולם העבודה. גופים ומחקרים רבים עוסקים בשאלה כיצד יראה שוק העבודה העתידי, על כל רבדיו. אלו מקצועות חדשים יתפתחו ואלה מקצועות יעלמו משוק העבודה.

ככל שרובוטים, בינה מלאכותית וטרנספורמציה דיגיטאלית מחלחלים יותר ויותר את עולם העבודה, גובר החשש מההשפעה של מגמות אלה על מספר המשרות. יש המציינים תמונה עגומה במיוחד של העתיד, וטוענים כי האוטומציה תביא להעלמות של כמעט מחצית מהמשרות במהלך העשורים הבאים. על פי ההערכה של ה-OECD¹ עולה כי למרות שהעתיד לא בטוח תעסוקתית, אבטלה מסיבית מסיבות מעבר לאוטומציה וטכנולוגיה מתקדמות נראית בלתי סבירה. ה-OECD מעריך כי 14% מהמשרות הם בסיכון גבוה לאוטומציה (בהסתברות של 70%) - משמעותית פחות מתחזיות שרווחות על ידי חוקרים שונים בתחום (איור 1). בישראל שיעור המשרות הנמצאות בסיכון גבוה לאוטומציה עומד על 16.8% והוא גבוה בהשוואה לממוצע ה-OECD. לעומת זאת, שיעור המשרות שנמצאות בסיכון משמעותי לשינוי עומד על 28% והוא נמוך מממוצע ה-OECD.

מהנתונים של ה-OECD, שיעורי התעסוקה ברוב מדינות ה-OECD נמצאים במגמת עלייה. הסיבה לכך היא שמשרות נוצרות בקצב מהיר יותר מכפי שהן נעלמות ונוצרות הזדמנויות חדשות לאנשים שבעבר הודרו משוק העבודה והיום בזכות האוטומציה והגלובליזציה, נפתחות בפניהם משרות. בנוסף, שינויים אלה מביאים להפחתת עלויות הייצור, להעלאת איכות המוצרים ולפתיחת שווקים חדשים - כל אלה מביאים לביקוש נוסף ולהגברת הפרודוקטיביות ועל כן, ליצירת מקומות עבודה נוספים. כל המומחים שעוסקים בתחום מדגישים שלא ניתן לחזות מה יהיו מקצועות העתיד, ולכן יש אתגר גדול למערכת החינוך, שחייבת לעבור לחינוך ששם דגש על עבודת צוות, פתרון בעיות, חשיבה ביקורתית ויזמות².

פרק זה כולל מדדים המשקפים תמונת מצב של מוכנות המשק לצרכי שוק העבודה המדעי והטכנולוגי בישראל. הפרק כולל נתונים על החינוך העל היסודי (זכאות לבגרות, מצטיינים וכדו'), נתוני סטודנטים ובוגרים בהשכלה גבוהה לפי תואר ותחומי לימוד ונתונים על התעסוקה לפי משלח יד.

¹ OECD (2019), *OECD Employment Outlook 2019: The Future of Work*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9ee00155-en>.

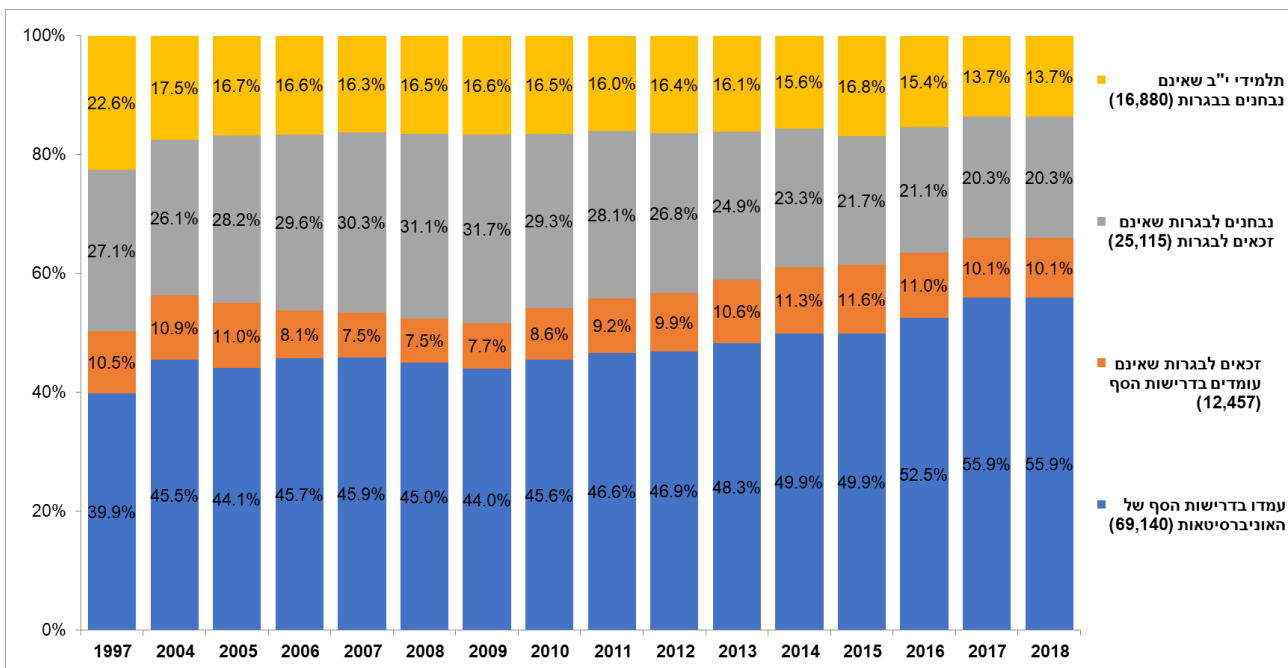
² <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001239304> דפנה אבירם-ניצן, שעומדת בראש ועדה במכון הישראלי לדמוקרטיה, שעוסקת בשוק העבודה העתידי, ושותפים לה נציגים משלל גופים, רבים מהם ממשלתיים.

1.1 חינוך על יסודי

למערכת החינוך תפקיד מרכזי בהכנת עתודות להשכלה גבוהה. יש חשיבות רבה לתלמידים בעלי יכולות גבוהות המהווים את הדור הבא ללימודים גבוהים ולהתפתחות המדעית והטכנולוגית של המדינה. מדד כמו שיעור התלמידים שסיימו תעודת בגרות בהרכב של מקצועות ריאליים (מתמטיקה, פיסיקה, כימיה וכד') יכול לשמש כמדד טוב לפוטנציאל התלמידים בעלי יכולות גבוהות שישתלבו במקצועות המדעיים וההנדסה.

בשנת הלימודים 2018 66% מתלמידי תיכון (81,597 תלמידים) היו זכאים לתעודת בגרות, כאשר רק 56% עמדו גם בדרישות הסף של האוניברסיטאות*. מספר זה מהווה אומדן קרוב להיקף של המשאב העיקרי של ישראל - כוח אדם משכיל - שיצטרף לשוק העבודה בעוד מספר שנים. שיעור התלמידים הזכאים לבגרות השתנה מ-1997. בשנה זו רק כ-50% מתלמידי התיכון עמדו במבחנים. החל משנת 2009 מדד זה נמצא במגמת עליה, כאשר ב-2018 שיעורם מגיע ל-3.66%.

איור 1: התפלגות תלמידי כיתות יב', נבחנים בבחינות בגרות על פי זכאות לתעודת בגרות, 1997, 2004-2018



מקור: עיבוד מוסד נאמן לנתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה הערות: עמידה בדרישות הסף כוללות, בנוסף לזכאות לתעודת בגרות, ציון עובר ברמה של 3 יחידות לימוד במתמטיקה, 4 יחידות לימוד באנגלית, ומקצוע מוגבר אחד נוסף).

האיור הבא מציג את שיעור הנבחנים ב-5 יח"ל במקצועות מדע וטכנולוגיה מתוך סך הנבחנים לבגרות לפי מגדר ושייכות. ב-2019, 20% מסך הנבחנים בחינוך העברי נבחנו **במתמטיקה** ברמה של חמש יחידות – 22% מהבנים ו-17% מהבנות. לעומת זאת בחינוך הערבי רק 10% מהנבחנים נבחנו ברמה 5 יח"ל - 8% מהבנים ו-12% מהבנות.

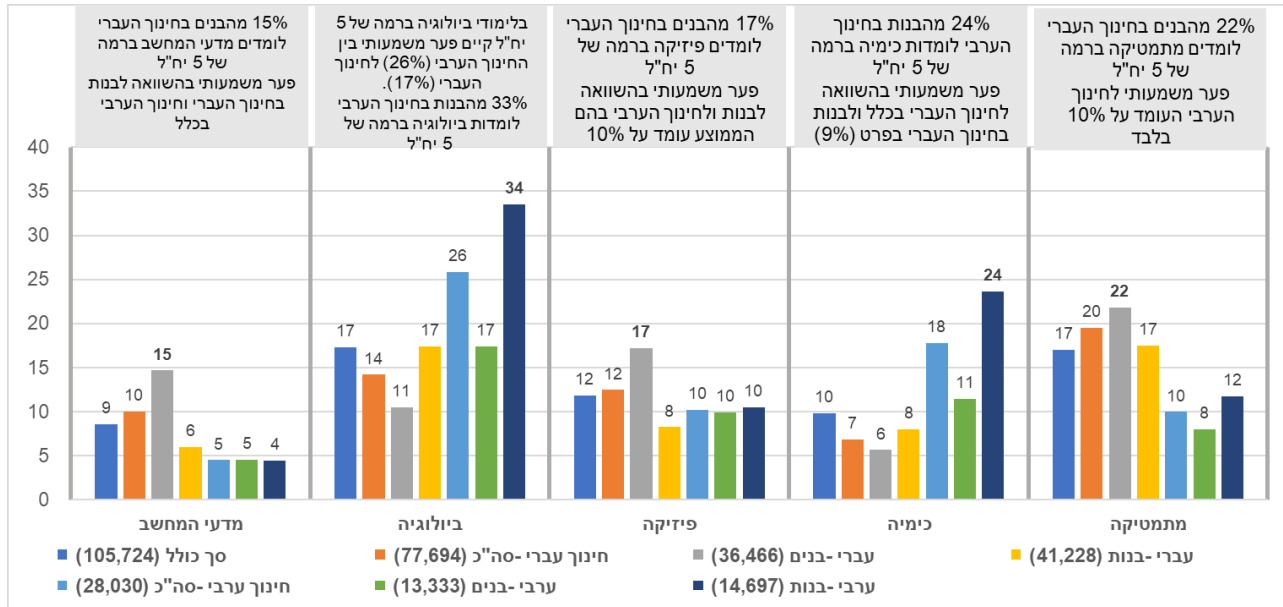
בכימיה שיעור הנבחנים ב-5 יח"ל בחינוך העברי עומד על 7% - 7% מהבנים ו-6% מהבנות. לעומת, 18% בחינוך הערבי. בחינוך הערבי קיים פער משמעותי בין שיעור הבנים הלומדים כימיה (11% לבין שיעור הבנות (24%).

תמונה דומה ניתן לראות בשיעור הנבחנים ב-5 יח"ל **בביולוגיה**. שיעור הלומדים 5 יח"ל ביולוגיה בחינוך הערבי (28%) גבוה בהרבה משיעורם בחינוך העברי (14%). ביחוד בולט הפער בין הבנות – 34% בחינוך הערבי לעומת 17% בחינוך העברי.

³ מקור: גץ, ד', בוכניק, צ', זטקובצקי, א'. (2020), מדדים למדע, לטכנולוגיה ולחדשנות, מוסד שמואל נאמן.

במקצוע מדעי המחשב – הנחשב כמקצוע העתידי היינו מצפים לראות שיעור גבוה של לומדים מקצוע זה כמקצוע מורחב ברמה של 5 יח"ל. אך הנתונים מראים כי רק 9% מסך הנבחרים לומדים מדעי המחשב. 10% בחינוך העברי ו-5% בחינוך העברי קיים פער משמעותי בין הבנים (15%) לבנות (6%).

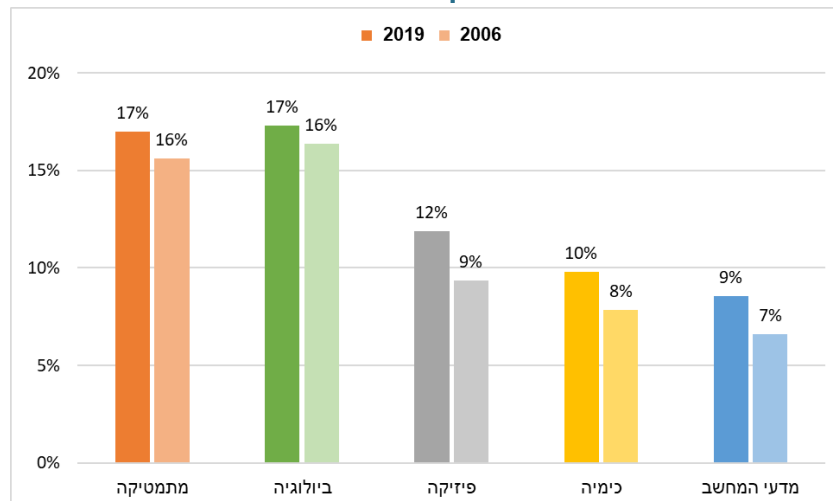
איור 2: שיעור הנבחרים ב- 5 יח"ל במקצועות מדע וטכנולוגיה מתוך סך הנבחרים לבגרות לפי מגדר ושייכות, 2019 (באחוזים)*



מקור: עיבוד מוסד נאמן לנתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה הערה: * המספר בסוגריים מייצג את מספר הלומדים בקבוצה.

שיעור הנבחרים במקצועות מדע וטכנולוגיה בחמש יחידות לימוד יכול להוות מדד לשינויים החלים בהעדפות התלמידים ובעתודות להשכלה גבוהה. איור 3 מציג את שיעור הנבחרים במקצועות מדע וטכנולוגיה ברמה של חמש יח"ל מתוך סך הנבחרים לבגרות בשנת 2019 בהשוואה ל-2006. ניתן לראות כי בתקופה זו של יותר מעשור, גדל שיעור הלומדים מתמטיקה באחוז אחד בלבד. שינוי דומה חל גם בתחום הביולוגיה, שגם בו שיעור הלומדים נשאר כמעט ללא שינוי. לעומת זאת, בתחומי הפיזיקה, הכימיה ומדעי המחשב חל גידול של 2-3%. אמנם שינויים אלה אינם גדולים אך הם יכולים להוות סמן לשינוי.

איור 3: שיעור הנבחרים ב- 5 יח"ל במקצועות מדע וטכנולוגיה מתוך סך הנבחרים לבגרות, השוואה בין 2006 ל-2019



מקור: עיבוד מוסד נאמן לנתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה

לסיכום, בישראל, שני שליש מהתלמידים זכאים לתעודת בגרות, כאשר רק קצת מעל מחציתם (56%) עומדים גם בדרישות הסף של האוניברסיטאות. שיעור הלומדים מתמטיקה ומקצועות מדעיים וטכנולוגיים ברמה של 5 יח"ל אינו גבוה ועומד על 17%. כאשר בחינוך הערבי שיעורם נמוך אף יותר ועומד על 10% בלבד. במדעי המחשב, שהינו מקצוע העתיד השיעור נמוך מאוד ועומד על 9%. גם כאן, קיים פער משמעותי בין החינוך העברי לערבי, 9% מול 6% בהתאמה.

1.2 סטודנטים ובוגרים בהשכלה גבוהה

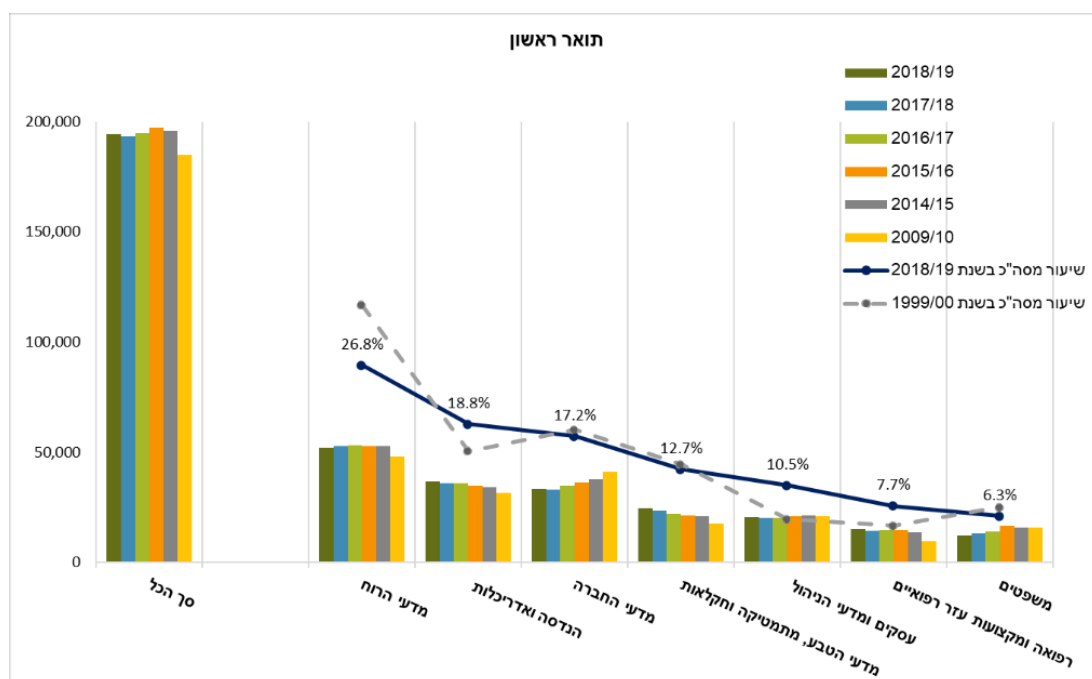
מאגר ההון האנושי מורכב הן מההון האנושי בהווה והן מעתודה שהמדינה משקיעה בחינוך ובהשכלה גבוהה למען יצירת הון אנושי איכותי בעתיד, שיוכל לענות על צרכי המשק בכלל ושוק העבודה בפרט. לאוניברסיטאות שני תפקידים מרכזיים האחד, להכשיר עובדים למגזר העסקי והשני הינו מחקר. מאחר ושינויים בלימוד ובהכשרה הם תהליכים שלוקחים זמן וניתן לראות אותם רק לאחר שנים, יש צורך להבין את צרכי השוק ולהתאים מדיניות שתענה על הדרישות.

על פי דוח של המל"ג⁴ לעידוד מדיניות ללימודי הייטק, מספר הסטודנטים הלומדים הנדסה עלה בשנים האחרונות ועבר את מספר הסטודנטים למדעי החברה, וניתן לראות גידול משמעותי במספר הלומדים מתמטיקה ומדעי המחשב. יותר מ-18% מהסטודנטים לתואר ראשון לומדים הנדסה ומדעים.

בשנת 2018/19 למדו 194,265 סטודנטים לתואר ראשון, 61,014 סטודנטים לתואר שני ו-11,987 סטודנטים לתואר שלישי במוסדות להשכלה גבוהה בישראל. בתואר הראשון 18.8% מהסטודנטים למדו בתחומי הנדסה ואדריכלות ו-12.7% בתחומי מדעי הטבע, מתמטיקה וחקלאות. לעומת, 6.2% בהנדסה ואדריכלות ו-9.6% במדעי הטבע, מתמטיקה וחקלאות בתואר השני. כאשר בתואר השלישי ניתן לראות כי שיעור הלומדים מדעי הטבע, מתמטיקה וחקלאות הינו הגבוה ביותר (41.6%) לעומת שיעורם בתארים ראשון ושני.

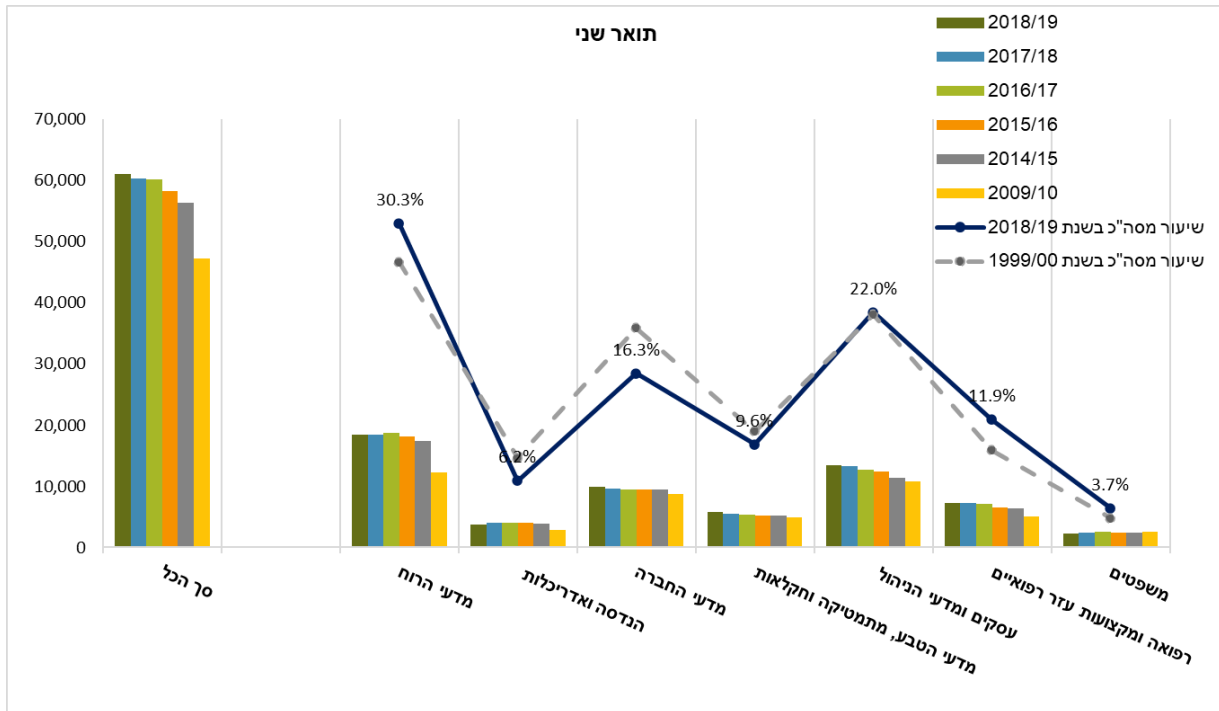
בהשוואה לשנת 1999/00, מספר הלומדים הנדסה לתואר ראשון עלה ביותר מ-80% אך שיעורם מסך הלומדים תחומים אחרים עלה רק ב-3% (מ-15.2% ל-18.8% בהתאמה). בתואר השני מספר הלומדים הנדסה עלה ב-47%. בתואר השלישי ניתן לראות את העלייה המשמעותית של 156% במספר הלומדים, אך לעומת זאת שיעורם מסך הלומדים תואר שלישי לא עלה משמעותית (מ-7.7% ל-10.9%).

איור 4: סטודנטים במוסדות להשכלה גבוהה לתואר ראשון לפי תחומי לימוד עיקריים

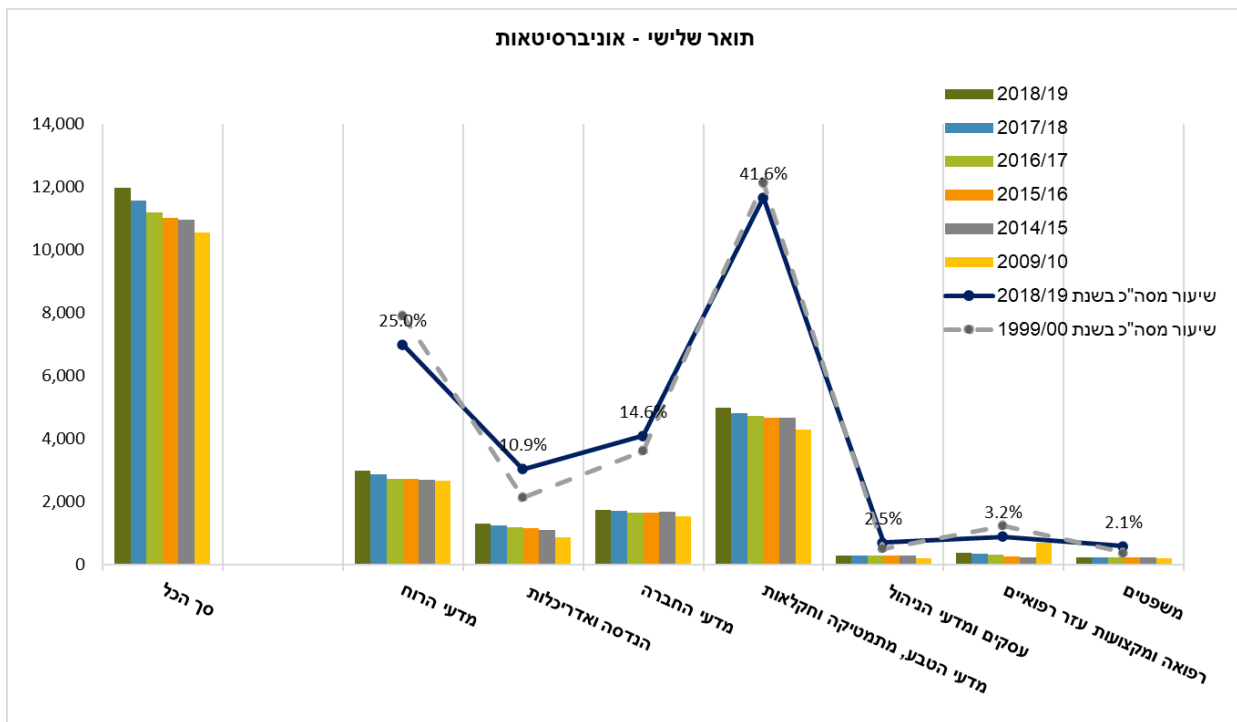


⁴ מערכת ההשכלה הגבוהה בסימן 60 שנה למל"ג ו-70 שנות מצוינות אקדמית

איור 5: סטודנטים במוסדות להשכלה גבוהה לתואר שני לפי תחומי לימוד עיקריים



איור 6: סטודנטים במוסדות להשכלה גבוהה לתואר שלישי לפי תחומי לימוד עיקריים



מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני הלמ"ס

הטבלה הבאה מציגה את מספר הסטודנטים להנדסה לפי מקצועות לימוד משנת 2010 ועד 2018. את שינוי לאורך השנים ניתן לראות בטבלה על פי הצבעים – אדום מייצג את המספר הנמוך ביותר עבור אותו מקצוע, ירוק את הגבוה ביותר וצהוב את הממוצע בשנים אלו. ניתן לראות כי, מספר הסטודנטים בהנדסה עלה באופן קבוע לאורך השנים מ-35,791 בשנת 2010 ל-41,818 בשנת 2018.

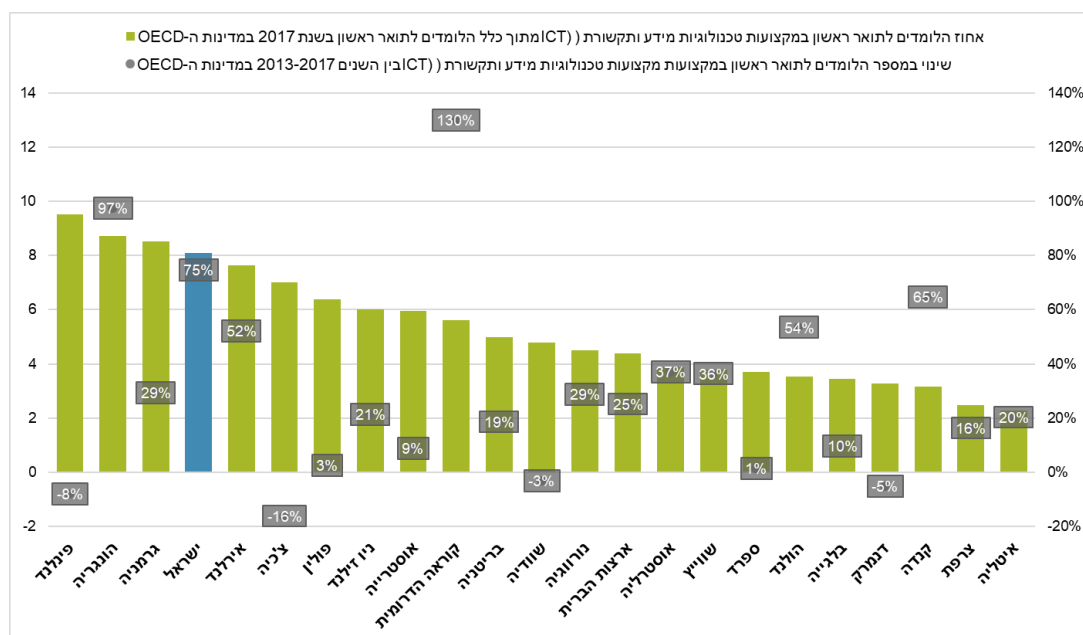
טבלה 2: סטודנטים להנדסה לפי מקצועות לימוד, 2010-2018

ש"ע	2018/19	2017/18	2016/17	2015/16	2014/15	2013/14	2012/13	2011/12	2010/11	2009/10	
שיעור השינוי תש"ע-תשע"ט	תשע"ט	תשע"ח	תשע"ז	תשע"ו	תשע"ה	תשע"ד	תשע"ג	תשע"ב	תשע"א	תש"ע	
18%	42,238	41,818	42,055	40,688	39,629	39,010	38,189	37,560	37,014	35,791	הנדסה ואדריכלות- סה"כ
224%	1,957	2,124	2,039	1,710	1,367	1,179	1,129	948	796	604	הנדסה אזרחית
113%	2,030	2,074	2,161	2,077	2,054	1,933	1,512	1,305	1,123	951	הנדסת בניין
7%	15	21	20	19	18	18	15	16	18	14	גאו-טכנולוגיה
63%	194	204	229	226	199	185	125	130	111	119	הנדסת תחבורה ותעבורה
-27%	206	196	247	267	279	263	263	285	307	281	הנדסה סביבתית
-20%	41	47	62	79	91	105	101	83	67	51	הידרו-טכניקה
18%	187	203	195	200	170	152	144	170	171	159	הנדסה גאודזית
1464%	172	174	194	198	181	172	122	91	46	11	הנדסה וניהול משאבי מים
33%	5,495	5,496	5,345	5,253	5,207	5,170	4,992	4,806	4,523	4,136	הנדסת מכונות
314%	58	62	57	49	46	39	29	14			הנדסת רובוטיקה
2%	9,075	9,109	9,074	8,823	8,713	8,690	8,808	8,764	8,956	8,939	הנדסת חשמל
113%	1,061	734	983	881	768	649	573	519	484	498	הנדסת מחשבים - חשמל
66%	5,506	5,521	5,389	5,091	4,714	4,275	3,839	3,605	3,452	3,318	הנדסת מחשבים - מדעי המחשב
-37%	415	397	393	429	483	574	578	622	643	662	הנדסת אלקטרוניקה
-11%	124	116	131	136	153	165	167	158	146	139	הנדסת אלקטרו אופטיקה
-66%	158	188	225	254	287	318	356	413	474	460	הנדסת מערכות תקשורת
-7%	493	503	504	477	481	544	551	544	528	532	הנדסת אווירונאוטיקה וחלל
-5%	1,253	1,304	1,364	1,388	1,460	1,459	1,410	1,399	1,328	1,314	הנדסה כימית
-7%	619	657	718	726	713	669	654	627	639	666	הנדסת מזון וביוטכנולוגיה
-1%	143	149	162	161	162	162	156	142	145	144	הנדסת פלסטיקה
-64%	75	85	105	136	193	245	283	360	302	206	הנדסת פרמצבטיקה - תרופות
-6%	6,449	6,048	5,977	5,889	5,859	6,135	6,463	6,677	6,903	6,886	הנדסת תעשייה וניהול
17%	1,153	988	870	780	813	802	847	920	940	984	הנדסת מערכות מידע
539%	390	479	428	390	333	258	172	99	61		הנדסת מערכות
210%	31	30	39	33	33	36	31	23	17	10	הנדסת תוכן וייצור
122%	40	50	56	59	67	59	54	42	27	18	ניהול והנדסת בטיחות
-8%	94	97	102	101	102	121	129	122	122	102	הנדסת איכות
13%	1,824	1,830	1,833	1,815	1,833	1,772	1,749	1,704	1,654	1,612	ארכיטקטורה ובינוי ערים
36%	118	109	115	119	109	114	114	108	91	87	אדריכלות נוף
-32%	39	63	65	73	47	58	53	50	50	57	עיצוב תעשייתי (הנדסה)
14%	973	911	926	922	890	873	916	903	920	851	הנדסת חומרים
-67%	27	24	26	19	31	35	44	59	61	83	הנדסה גרעינית
25%	1,229	1,261	1,209	1,168	1,062	1,004	969	968	974	981	הנדסה ביו-רפואית
-12%	205	170	184	169	139	163	194	241	233	232	מדעי ההנדסה
-9%	231	228	246	268	261	264	276	273	260	253	הנדסה ביוטכנולוגית
7%	16	14	14	10			11	12	15	15	ביו-הנדסה
200%	132	142	114	105	111	104	98	44			הנדסת אנרגיה

בשנת 2017 שיעור הסטודנטים ללימודי הנדסה לתואר ראשון בישראל היווה 13.0% מסך הסטודנטים לתואר ראשון. שיעור זה נמוך מהמוצע במדינות ה-OECD שעומד על 14.4%. בשנים 2013-2017 הייתה בישראל עלייה של 75% במספר הלומדים, והיא דורגה במקום השלישי במדינות ה-OECD מבחינת אחוז הגידול אחרי קוראה הדרומית (130%) והונגריה (97.4%) ופי 3 מהאחוז בארצות הברית (עלייה של כ-25%).

בהתמקדות בסטודנטים הלומדים מקצועות ICT (מקצועות טכנולוגיות מידע ותקשורת - ICT כוללים את מדעי המחשב, מערכות מידע, אינטרנט וחברה, מערכות מידע ניהוליות, הנדסת מחשבים - מדעי המחשב) עולה כי חלקם היחסי של לומדי ICT לתואר ראשון מתוך כלל לומדי תואר ראשון בישראל עלה בשנים אלו מ-4.6% ל-8.1%. מדד המהווה אינדיקציה לביקוש הגדל למקצועות אלה.

איור 7: אחוז הלומדים במקצועות ICT לתואר ראשון ושיעור השינוי בן השנים 2013-2017, השוואה בינלאומית



מקור: עיבוד מוסד נאמן לנתוני הלמ"ס

גם בקרב לומדי תואר שני במקצועות ה-ICT בשנים אלו חלה בישראל עלייה של 13.5% והיא ממוקמת באמצע מבחינת אחוז הגידול. ב-2017 חלקם היחסי של לומדי תואר שני במקצועות ICT מתוך כלל לומדי תואר שני בישראל היה 2.2%, נמוך מהמוצע במדינות ה-OECD (3.0%). **בלימודי הנדסה לתואר שני בישראל הייתה עלייה של 14.7%**, גבוה מהמוצע במדינות ה-OECD (13.9%).

מספר הסטודנטים לתואר שלישי במקצועות ICT בישראל עלה ב-14.3%, בדומה לשוודיה (14.7%) ולספרד (13.4%). ב-2017 חלקם היחסי של לומדי תואר שלישי במקצועות ICT מתוך כלל לומדי תואר שלישי בישראל היה 3.7%, בדומה לאחוז בקוראה הדרומית וגבוה מהמוצע במדינות ה-OECD (3.3%). **בהנדסה, לעומת זאת, נרשמה עלייה של 18.9%** לעומת יציבות בממוצע ה-OECD.⁵

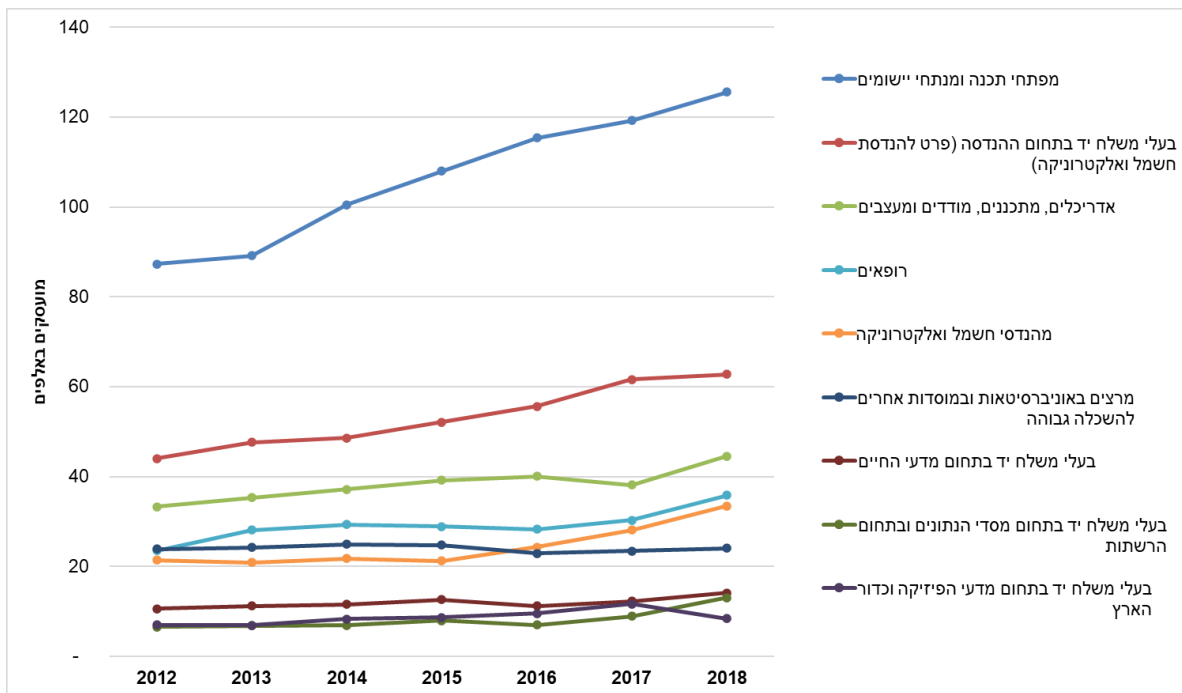
לסיכום, על פי הנתונים שהצגנו שיעור הסטודנטים הלומדים את תחומי ההנדסה והאדריכלות בתואר הראשון עומד על פחות מחמישית מסך הסטודנטים לתואר ראשון, בתואר שני רק 6% למדו את התחומים אלה. סטודנטים אלה מהווים את ההיצע לשוק העבודה המדעי והטכנולוגי והוא נמוך בהשוואה בינלאומית. שיעור הסטודנטים ללימודי הנדסה לתואר ראשון נמוך מהמוצע במדינות ה-OECD. למרות זאת ניתן לראות שינוי משמעותי בשנים האחרונות בישראל בשיעור הסטודנטים למקצועות ICT. חלקם היחסי של לומדי ICT לתואר ראשון מתוך כלל לומדי תואר ראשון בישראל עלה בשנים 2013-2017 מ-4.6% ל-8.1%.

⁵ למ"ס, הודעה לתקשורת, השכלה גבוהה בישראל – נתונים נבחרים לשנת הלימודים תשע"ט (2018/19) - לרגל פתיחת שנת הלימודים האקדמית, אוקטובר 2019, https://www.cbs.gov.il/he/mediarelease/DocLib/2019/318/06_19_318b.pdf

1.3 תעסוקה

להלן נתונים נבחרים על מספר המועסקים ומשרות פנויות במשלחי יד נבחרים במדע וטכנולוגיה. ניתן לראות את העלייה החדה והמשמעותית במספר המועסקים כמפתחי תכנה ומנתחי יישומים. גם במספר המועסקים בתחום מסדי הנתונים והרשתות חלה עליה חדה בשנתיים האחרונות. בכל התחומים, פרט לבעלי משלה יד בתחום מדעי הפיזיקה וכדור הארץ, ניתן לראות מגמת עלייה. תחום נוסף שמעניין לבחון שבו לא חל שינוי ואף ירידה בשנים מסוימות הם מרצים בהשכלה גבוהה. בהנחה שמרצים במוסדות להשכלה הם גם מכשירים את הסטודנטים לשוק העבודה וגם מבצעים מחקרים, העובדה שלא חל שינוי במספרם יותר מעשור יכולה להצביע על מחסום. במידה ויוחלט על מדיניות להגדלת מספר הסטודנטים יהיה צורך גם להגדיל את מספר הסטודנטים בהתאמה על מנת לשמור על איכות ההוראה והמחקר.

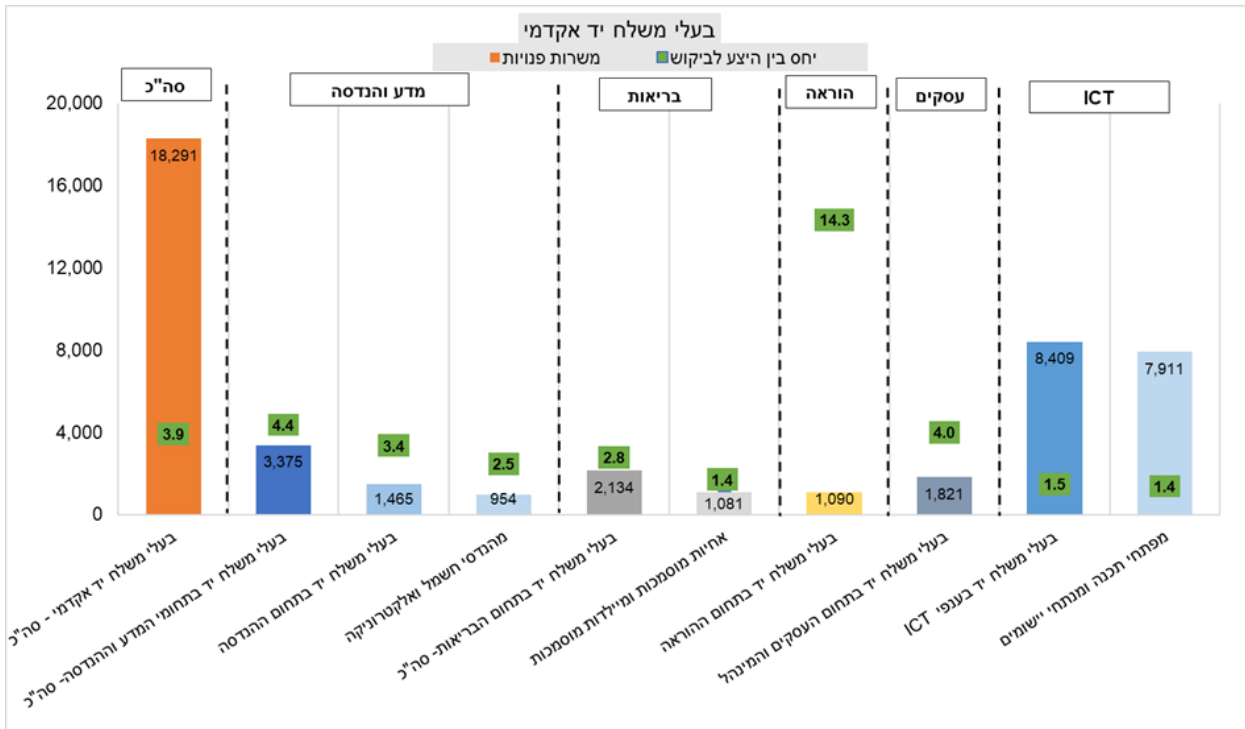
איור 8: מספר המועסקים (באלפים) לפי משלחי יד נבחרים, 2012-2018



מקור: עיבוד מוסד נאמן לנתוני הלמ"ס

האיור הבא מציג את מספר המשרות הפנויות לפי משלחי יד מדעים וטכנולוגים נבחרים וכן את היחס בין ההיצע והביקוש – כלומר כמה מועמדים יש לכל משרה במוצע. מספר המשרות הפנויות בתחומי ה-ICT גבוה משמעותית מתחומים אחרים וגם היחס בין ההיצע לביקוש הוא הנמוך ביותר (כלומר, על כל משרה מתחרים רק כ- 1.4 מבקשי עבודה).

איור 9: משרות פנויות לפי משלחי יד נבחרים והיחס בין היצע לביקוש, 2018



מקור: עיבוד מוסד נאמן לנתוני הלמ"ס

לסיכום, ניתן לראות עלייה חדה ומשמעותית במספר המועסקים כמפתחי תכנה, מנתחי יישומים, ומהנדסי מסדי נתונים ורשתות. עובדה זו משתקפת גם במדד המשרות הפנויות – מספר המשרות הפנויות בתחומי ה-ICT גבוה משמעותית מתחומים אחרים וגם היחס בין היצע לביקוש הוא הנמוך ביותר.

צרכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי

טכנולוגיות עתידיות

רלבנטיות למדינת ישראל

במסגרת עבודות שונות שנעשו בשנים האחרונות במוסד שמואל נאמן, כולל במחקר הנוכחי, נבחנו טכנולוגיות שהוגדרו בעולם כטכנולוגיות עתידיות, ומתוכן גובשה רשימת טכנולוגיות עתידיות רלבנטיות למדינת ישראל. הקריטריונים לבחינת טכנולוגיה שיכולה להתאים למדינת ישראל היו בין היתר: קיומו של ידע אקדמי בתחום, היכולת של התעשייה הישראלית לקלוט את הטכנולוגיה, היכולת למימוש הפוטנציאל וקיומו של צורך לאומי.

רשימת הטכנולוגיות והנושאים שזוהו ונכללו בעבודה בנוכחית:

1. אגרוטק וחקלאות מדייקת
2. פוטוניקה ופוטוניקה אינטגרטיבית
3. הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים, טכנולוגיות ויישומים
4. רפואה מדייקת וגנומיקה
5. אגירת אנרגיה
6. ערים חכמות
7. בינה מלאכותית, מדעי הנתונים ורובוטיקה חכמה
8. מקורות מזון אלטרנטיביים
9. תקשורת לוויינים
10. שילוב רב תחומי ביולוגיה, תוכנה והנדסה לעולם הרפואה (Bio - Convergence)

אגרוטק וחקלאות מדייקת



1 מגמות עולמיות בתחום הטכנולוגיה החקלאית⁶

תעשיית האגרוטק עוסקת בטכנולוגיות, מוצרים ופתרונות לתחומים שונים בשרשרת היצור החקלאי. שוק טכנולוגיות החקלאות והמזון נמצא בתהליך גדילה מואצת. אתגרי מים ואקלים, איכות הגידולים החקלאיים ועבודות קרקע פוריה מציבים קושי בפני השאיפה לגידול מזון איכותי בכמות מספקת לאוכלוסיית העולם, שגם היא, בתורה, גדלה בקצב מהיר תוך שינויים בפריסת האוכלוסייה ובדיאטה שלה, בעיקר במדינות המתפתחות. בשל התפרצות הקורונה והגבלות הסחר, שוק החקלאות העולמי צפוי לרדת מ-9,997 מיליארד דולר ל-9,890 מיליארד דולר בשנת 2020, בשינוי שנתי ממוצע (CAGR) של -1.08%. הגורמים העיקריים לכך הם שיבושים בשרשראות האספקה וירידה בצריכה. החקלאים התמודדו עם קשיים בקציר, שיווק תוצרתם וייצוא התוצרת החקלאית ירד משמעותית כאשר המדינות הטילו מגבלות על סחר חוצה גבולות. למרות זאת, הצפי הוא כי השוק יתאושש בשלוש השנים הבאות ויצמח ב-CAGR של 5% מ-2020 ויגיע ל-2,168.3 מיליארד דולר בשנת 2023.⁷ תחום הטכנולוגיות החקלאיות, כולל קשת רחבה של נושאים שתכליתם לשפר את הביצועים החקלאיים. בשנים האחרונות גוברת המגמה של חדירת טכנולוגיות מתעשיות שונות והתאמתן לחקלאות המודרנית (כאמור, חקלאות שנדרשת גם להגדיל תפוקות, להתייעל ולצמצם השפעות סביבתיות). למשל טכנולוגיות מתחומי הגנומיקה non-GMO (מזון שאינו מהונדס גנטית), טכנולוגיות מתחום הרחפנים (drones), אינטרנט של דברים (IoT), תחליפי חלבון ומודלים חדשים למכירה ושינוע של הסחורות לצרכן.

מנתוני AgFunder⁸ עולה, כי בשנת 2019 עמדו סך ההשקעות בתחום הטכנולוגיות החקלאיות החדשניות על היקף של 4.7 מיליארד דולר. בשנת 2019 הגיעו הקפי ההשקעות לרמה הגבוהה ביותר מאז 2012. הגידול בהשקעה היה עקבי לאורך השנים עם גידול משמעותי ב-2017 וב-2018.

כ-75% מהשקעות מתבצעות בארבע תחומים עיקריים: Ag Biotechnology (23%), Novel Farming (19%), Farm Mgmt SW, Sensing & IoT (20%), Systems (19%) ו-Agribusiness Marketplaces (14%).

סקטור הטכנולוגיות החקלאיות מתאפיין בשונות גדולה וכולל תת סקטורים כגון: עיבוד יבול וגידול בע"ח לצרכי מאכל, ביו-דלקים, כימיקלים ועוד. בנוסף, הסקטור כולל את אחסון התוצר, עיבודו, אריזה, שינוע ושרותי מסחר המקשרים אל הצרכנים.

שינויי האקלים, המחסור במים, איבוד שטחים חקלאיים ומזג אוויר קיצוני, כל אלה צפויים להוות איום על החקלאות ולשבש את אספקת התוצרת. אם מגמה זו תימשך, האיום הגדול ביותר יהיה מחסור חמור במזון בקנה מידה עולמי, שעלול להתפתח כבר בעשור הקרוב. תופעת לוואי נוספת היא הופעת מזיקים הנובעת מעומסי חום כבדים ומזג אוויר לא יציב המלווה בתקופות ארוכות של טמפרטורות גבוהות. חלק מהדרכים להתמודדות עם אתגרים אלה כוללות השבחת זנים במטרה להתאימם לסביבת הגידול - פיתוחים חדשים בתחום כוללים זיהוי גנים רלוונטיים להתמודדות הצמח עם בעיות סביבתיות (כגון תנאי עקת מים), הארכת חיי הצמח תוך סבילות לבצורות, האצת קצב צמיחה בעצים ועוד.

חברת הייעוץ מקנזי (Goedde, Horil, & Sanghvi, 2015) זיהתה 24 תחומים 'חמים' עבור השקעות עתידיות בתחום האגרוטק. בתחום החקלאות המדייקת החברה צופה סיכון נמוך מחד ותשואה גבוהה מאידך.

1.1 תתי-תחומים באגרוטק

סקטור טכנולוגיות החקלאות והמזון – אגרוטק, הוא אחד מפלחי השוק הגדולים והחשובים בכלכלה העולמית והוא מייצר כ-8.5% מהתוצר המקומי הגולמי בעולם (AgFunder, 2015). תתי התחומים הנכללים בשוק האגרוטק הינם רבים ומגוונים וכוללים, בין השאר:

- **הגנת הצומח** - מחקר, פיתוח וייצור פתרונות להגנת הצומח בפני מזיקים.
- **השקיה ומים** - מחקר פיתוח וייצור מערכות השקיה, רכיבי השקיה וטיהור מים.
- **זרעים** - מחקר ופיתוח זנים חדשים באמצעות טיפוח והנדסה גנטית.

⁶ מבוסס על אילון et al, 2016

⁷⁷ The Business Research Company Agriculture Market Global Briefing 2020: COVID-19 Impact and Recovery

2020

⁸ <https://research.agfunder.com/2020/2020-farm-tech-report.pdf>

- **משק חי** - מחקר ופיתוח טכנולוגיות ופתרונות לניהול משק החי ולישיפור תוצריו.
- **חקלאות מים** - מחקר ופיתוח טכנולוגיות, פתרונות ושיטות גידול במי ים ובמים מליחים.
- **אגרו ICT (חקלאות מדייקת)** - פיתוח פתרונות וטכנולוגיות אופטימיזציה בשיטות הטיפול וצריכת המשאבים. כולל בתוכו חברות המפתחות ומייצרות מערכות אוטומטיזציה וניהול ושליטה מרחוק של תשומות ותפוקות חקלאיות.
- **Post-harvest** - מחקר ופיתוח של פתרונות וטכנולוגיות לטיפול, שימור ואריזת תוצרת חקלאית.
- **מזון** - חברות המייצרות, מעבדות ומפתחות מזון.
- **דישון** - מחקר, פיתוח וייצור בתחום הדשנים.
- **מיכון חקלאי** - מחקר, פיתוח וייצור של מיכון חקלאי.

1.2 חקלאות מדייקת⁹

חקלאות מדייקת הינה תחום רחב המוגדר כסט של טכנולוגיות המשלבות חיישנים, טכנולוגיות מידע, שיפורים מכניים וניהול מונחה-ידע, למיקסום יבולים ע"י התחשבות בשונות המובנית של סביבות חקלאיות (Gebbers, 2010). טכנולוגיות אלו מוצעות כיום לרוב סוגי הגידולים – מגידולי שורות למיניהם ועד למטעים, ומאפשרות גמישות בהפניית משאבים כגון מים ודשן למקומות הדרושים להם, במידה הדרושה להם ובזמן הנכון להם (variable rate approach). בכך טכנולוגיות אלו מגדילות את יעילות הניצול של מים ודשן בשדה, מגדילות את רווחיות החקלאים ומקטינות שטפי מזהמים לסביבה כגון חנקות (NO_3) או חמצן דו-חנקני (N_2O). ישנם לפחות שני גורמים אשר צפויים להיות קטרי צמיחה בשימוש בכלים של חקלאות מדייקת בעתיד – הגדלת הרווחיות לחקלאי והקטנת ההשפעה הסביבתית.

לחקלאות מדייקת יש ניסיון מוכח הנתמך במחקרים רבים בהגדלת היבול והרווח לחקלאי. למשל שימוש במערכות קבלת החלטות לניהול משטר הדישון באזורים שונים בעולם מאפשר להגדיל את רווחי החקלאים (Xu, 2014). כלים נוספים, כגון שימוש בחיישנים לניטור עקת חנקן בצומח, הגדילו גם הם את רווחי החקלאי (למשל במחקר במדינת מיזורי בארה"ב Scharf, 2011).

מנוף שני להטמעה של טכנולוגיות חקלאות מדייקת הינו היכולת שלהן להקטין זליגת מזהמים שונים ממקורות חקלאיים לסביבה. כיום חקלאים מבינים כי הנושא הסביבתי אינו ניתן להפרדה מתפעול אופטימלי של השדה. מדינות רבות עיגנו תקנות בנושא השימוש בנוטריינטים בחקלאות (עם דגש על חנקן וזרחן) והן שמות דגש על ניטור מוקפד של איכות מקורות מים. בנוסף, חברות ענק בתחום קמעונות המזון (Walmart, United suppliers ועוד) מקצות משאבים רבים להקטנת טביעת הרגל הסביבתית שלהן והתחייבו בפומבי להגדיל את הקיימות לאורך שרשרת הייצור שלהן. מגמה זו תלך ותגדל בעתיד, כאשר חברות קמעונות נוספות יצטרפו ויבינו את הערך המוסף הטמון במיתוג ובהבלטת פעולות מקיימות (sustainability) בחברה וכמנוף לצמיחה עתידית של טכנולוגיות חקלאות מדייקת בעולם.

מובילות את תחום החקלאות המדייקת תעשיות גדולות כמו John Deere. כל מרכזי John Deere באזור אייוה, דביוק, מולין הם מרכזים גדולים של תכנון מכונות חקלאיות שנכנסו לנושא מערכות מידע. הפיתוח המואץ שעשו ב-John Deere של מכונות גדולות, קומביינים וכו' כבר הפסיק לייצר רווחים. רווחי החברה מגיעים היום מפיתוח טכנולוגיות ויישומן. החקלאות המדייקת רוצה למקסם את התפוקה ליחידה. באמצעים הקיימים כיום אפשר להקטין את היחידה החקלאית אליה מתייחסים עד לרמה של סנטימטרים ספורים של קרקע.

חקלאות מדייקת הוא תחום מולטי-דיסציפלינרי. התחום משלב טכנולוגיות מתקדמות של אופטיקה, חישה מרחוק, תקשורת ומערכות מידע עם העשייה החקלאית בשטח. אנשי חקלאות מדייקת לא מובילים מחקר בסיסי, אלא לוקחים מה שפותח ברפואה, בצבא וכדומה ומתרגמים אותו לנושא החקלאי. בישראל חסר מוסד אקדמי שיקשר בין כל הגורמים. באקדמיה קיים כיום קישור בין טכנולוגיה לנושאים הקשורים לחקלאות בעקיפין, כמו סביבה, מערכות עירוניות וכו', אבל לא חקלאות נטו.

בשנים האחרונות עוברים לקרוא לחקלאות מדייקת 'חקלאות חכמה' (Smart Agriculture), כי לחקלאות מדייקת קונוטציה ספציפית של טיפול בשונות המרחבית בשדה. זה כולל גם מערכות מידע וחיישנים, ביצוע פעולות בצורה יעילה מתוך מידע שבא ממערכות חכמות.

⁹ פרק זה הוכן ע"י ד"ר שי סלע, המחלקה למדעי הצומח והקרקע, אוניברסיטת קורנל, ארה"ב

להלן יודגמו בקצרה חמש מגמות בחקלאות מדייקת בתחום הצומח, אשר צפויות להתפתח משמעותית בשנים הקרובות. חקלאות מדייקת הינה תחום רחב וישנם תחומים רבים וחשובים אשר לא מובאים כאן מפאת קוצר היריעה. נעשה ניסיון לאתר ולהבליט את התחומים אשר יכולים להיבנות ולהרוויח משילוב של הידע המצטבר בישראל כמעצמת היי-טק ומערכות מידע בשילוב עם החדשנות החקלאית הרווחת בארץ.

1.3 Big data ואינטגרציה בין חיישנים וטכנולוגיות שונות לניטור מצב השדה

אחד היישומים הנפוצים של חקלאות מדייקת הינו יצירת בסיסי נתונים מרחביים עתירי ידע, על ידי חיבור בין תצפיות ופעולות חקלאיות (קציר, דישון, בקרת מזיקים) לאמצעי מיקום מבוססי לווייניים (GPS). יותר מתמיד, החקלאות המודרנית הפכה לזירה בה החקלאי מוצף על ידי מידע מרחבי המגיע ממבחר מקורות, כגון: חיישני רטיבות קרקע המותקנים במקומות שונים בשדה; בדיקות מעבדה לקביעת זמינות נוטריינטים (חנקן למשל) מדוגמאות קרקע ברחבי השדה; מפות מפורטות של נתונים הנוגעים למצב השדה כגון עקות שונות בצמח (טמפרטורה, זמינות מים או נוטריינטים), המגיעים ממקורות של חישה מרחוק; מפות מפורשות במרחב של יבול בכל חלקי השדה המופקות מבקרים המותקנים על גבי קומביין הקציר, ועוד. החקלאי מקבל לידיו את כל שכבות המידע האלו וצריך לתרגם אותן להחלטות – כמויות השקיה ודישון, הדברת מזיקים ועוד. לעושר נתונים זה פוטנציאל גדול, אך הניהול של המידע הרב וההפקה של ידע שימושי ממנו, המגדיל את תנובות היבול, הפך להיות אחד האתגרים של החקלאי המודרני. מכיוון שבהרבה מקרים חברות הציד המכני הינן גם המשווקות של הציד לחקלאות מדייקת, ישנם מקרים בהם חקלאים שרכשו ציוד מחברות שונות לכלים שונים בחווה, מגלים שהם גם צריכים להחזיק תוכנות נפרדות לעבודה עם אותם כלים. בסופו של יום, חקלאים רבים נתקלים בקשיים טכנולוגיים המרתיעים אותם מניצול מיטבי של המידע שברשותם.

הצורך בפיתוח מערכות תומכות החלטה המתחשבות בשלל מקורות המידע הזמינים לחקלאי, כולל נתונים ארוכי טווח, והפקת המלצות שימושיות לחקלאי בצמתי החלטה שונים במהלך העונה- הן הזרז להתפתחות זו של החקלאות המדייקת.

1.4 שימוש בכלי חישה מרחוק ומקרוב בחקלאות מדייקת, בדגש על זיהוי מחלות צמחים

חקלאות מדייקת עושה שימוש תדיר בתוצרי חישה מרחוק ומקרוב. שימוש זה גדל משנה לשנה וצפוי להמשיך לגדול בשנים הקרובות. לכלים אלו פוטנציאל רב בניטור מצב השדה, מתוך ההנחה שחסרים שונים ניתנים לזיהוי באמצעות חתימות ספקטרליות ייחודיות. מחקרים רבים הוקדשו למציאת סמנים של תכונות פיזיולוגיות של הצומח באמצעות ניתוח החזרים ספקטראליים באורכי גל שונים (Haboudane, 2002; Thenkabail, 2000). לאחר מציאת חתימות אלו ניתן להשתמש בהן לניטור רציף ובאופן שיטתי של מצב השדה. בין התחומים שקיבלו את מרב תשומת הלב המחקרית, ושעברו משימוש בידי חוקרים לשימוש נפוץ יותר באמצעות חברות מסחריות, הוא זיהוי יצרנות ויבול השדה. יצרנות ובריאות גידולים שונים קשורה קשר הדוק לאינדקס שטח העלה (LAI - Leaf Area Index), ופותרו כלים בחישה ספקטרלית והיפר ספקטרלית לחיזוי פרמטר זה (Liang, 2015) (González-Sanpedro, 2008). תחום נוסף שעושה שימוש תדיר בחישה מרחוק, הינו זיהוי עקות שונות כגון מחסור בחנקן או מים. מחסור בנוטריינטים כגון חנקן מתבטא בתכולת הכלורופיל בעלה, שאותה ניתן לזהות באמצעות חישה היפרספקטרלית (Devadas, 2015; Morier, 2015) או באמצעי חישה תרמיים (Elarab, 2015). באמצעות כלים אלו ניתן להתאים את מנות הדשן לרמת החסרים בפועל לכל רחבי השדה, להקטין זליגת נוטריינטים לסביבה ולהגדיל את רווחיות החקלאי.

היעילות הכלכלית והסביבתית המוכחת של כלי חישה מרחוק לניטור מצב השדה צפויה להגדיל את הדרישה לשימוש בכלים אלו בעתיד.

שימוש נוסף בחישה מרחוק בחקלאות שיש לו פוטנציאל לגדול בשנים הקרובות הינו השימוש בכלים אלו לניטור מחלות ומזיקים בצמחים. חשיפת צמחים לפאתוגנים שונים מתבטאת במנגנוני הגנה מורכבים. תגובות אפשריות של הצמח הינם למשל ירידה בקצב הפוטוסינתזה (Martinelli, 2014) ובתכולת הכלורופיל בעלה, אשר לרוב אינם ניתנים לזיהוי מוקדם בעין אך ניתנים לזיהוי באמצעים מולטיספקטראליים (Polischuk, 1997). האפשרות לזיהוי מוקדם של מחלות בשדה ומתן תגובה מהירה הינה חשובה ביותר, ולכן ישנה היתכנות לחישה מרחוק להפוך להיות כלי יעיל לניטור מחלות בשדה. עם זאת, עושר הנתונים המתקבל בחישה מרחוק מציב אתגר בזיהוי המידע הרלוונטי, בייחוד בעבודה עם תוצרי חישה היפר או מולטי-ספקטראלית. לצורך כך נעשה שימוש בכלי

עיבוד נתונים מורכבים כגון אלגוריתמים של כריית מידע (Bauriegel, 2011), או למידת מכונה (Mahlein, 2012) שהוכחו כיעילים בזיהוי של מחלות צמחים בשלבים שונים (Martinelli, 2014).

העלייה בזמינות תוצרי החישה מרחוק, השיפור ברזולוציה המרחבית עקב שימוש מוגבר במצלמות למיפוי השדה והעלייה בכוח המחשוב הזמין (שיכול להיות ברובו מבוסס טכנולוגיית ענן), יוצרות פוטנציאל גדול להפוך זיהוי מחלות צומח בחישה מרחוק לזמין הרבה יותר.

1.5 פיתוח כלי סימולציה לניטור רציף של קרקע, צומח, מים ודשן

לשימוש בחיישנים כאמצעי תצפית על מצב השדה יתרונות רבים, כפי שנסקר למעלה. עם זאת, לכלים אלו גם חסרונות, ובראשם העובדה שהם משמשים לתיאור מצב זמני, נקודתי על ציר הזמן, של מצב השדה. חקלאים מעטים יכולים לספוג את העלות של שימוש תדיר ורציף בטכנולוגיות אלו במשך העונה, בייחוד אם הדבר כולל שימוש במצלמות או שימוש בהדמיות לוויין ברזולוציה מרחבית גבוהה. ישנם מודלים פיזיקליים המתארים את גדילת הצמח בהתאם לתנאים המקומיים של השדה כגון גשם, אידוי פוטנציאלי, סוג הקרקע וכו'. למודלים אלו אפשרות לספק לחקלאי תמונת מצב רציפה של מצב השדה מבחינת זמינות הנוטריינטים או תכולת הרטיבות בקרקע. בנוסף מודלים אלו יכולים להתחבר לממשקים קיימים של בסיסי נתונים מבוססי מ"ג (GIS) כגון תכונות קרקע או טופוגרפיה ובכך לייעל את אפיון השדה. כך החקלאי יכול לקבל המלצות דישון או השקיה ייעודיות ברזולוציה מרחבית גבוהה לכל רחבי השדה. דוגמא לשירות כזה הינו המודל Adapt-N (Sela, NA) (Melkonian 2008), שפותח באוניברסיטת קורנל. מודל זה עבר אימות אינטנסיבי במשך 5 שנים בשדה, ולאחרונה עבר מסחור ומוצע כעת כשירות בתשלום למגדלי תירס בכל רחבי ארה"ב. הכלי הינו שילוב של שלושה מודלים – הידרולוגיה, צומח וקרקע – ומאפשר לתת לחקלאי תמונה רציפה של חוסרי החנקן והמים בשדה, קליטת החנקן בצמח ואיבודי חנקן לסביבה כחנקות למי תהום או בפאזה גזית לאטמוספירה. המודל מחובר בזמן אמת לנתוני אקלים ברזולוציה גבוהה (4X4 ק"מ) ונותן לחקלאי המלצות יומיות על כמויות הדשן שיש לתת להגעה ליבול אופטימלי. כמו כן, המודל עושה שימוש בטכנולוגיית ענן והינו מבוסס רשת, כך שהחקלאים יכולים לקבל את כל המידע על השדה שלהם ישירות לטלפון החכם או למחשב הנייד, בכל עת שהם חפצים בכך.

תחום שירות מבוסס מודלים זה גדל במהירות בשנים האחרונות. עדות לפוטנציאל הרב הקיים בו אפשר למצוא בכניסתן לשוק של שתי חברות ענק, מונסנטו ודופונט-פיוניר, המציעות כל אחת מודלים משלה למטרה זו. תחום זה צפוי להמשיך לגדול בשנים הקרובות ולהציע מענה רחב לניהול השדה, תוך התמקדות בצרכים הייחודיים של גידולים זנים שונים, באזורים שונים בעולם.

1.6 השקיה מדייקת

התמודדות עם מחירי מים עולים, שינויי אקלים, ובעיות סביבתיות הנובעות משאיבת יתר של מי תהום הם חלק מהסיבות להגדלת יעילות ניצול המים בחקלאות. בישראל מוכרת היטב ההשקיה בטפטוף, אך למרות ששיטת השקיה זו מאפשרת ניצול מים מרבי, העלות הגדולה יחסית של הטמעת מערכות טפטוף לעומת שיטות מסורתיות של השקיה בהצפת פני השטח מקשה על אימוץ שיטות אלו. כפועל יוצא, רק אחוזים ספורים מהשטח העולמי המשמש לחקלאות הינו מושקה בטפטוף, בעיקר בגידולי מטעים (Jensen, 2014). שיטות ההשקיה הנפוצות הן על ידי מכונות השקיה (קו-נועים קווים ומעגליים) (McCarthy, 2011) והשקיה על ידי הצפת השוחות. לחצים סביבתיים ומחסור במים זמינים להשקיה בעתיד צפויים להפנות תשומת לב להגדלת יעילות ניצול המים של שיטות אלו, אתגר אשר ניתן לתקוף אותו במסגרת של חקלאות מדייקת.

יש צורך ביצירת פתרונות לחקלאים המפשטים עבודה עם מערכות השקיה, כולל יצירת מרשמי השקיה מדויקים ודינאמיים ממערך של חיישנים שונים. סוג נפוץ נוסף של מערכות השקיה אשר ניתן לשפר את יעילותם באמצעות טכנולוגיות חקלאות מדייקת הוא השקיה בשוחות. השקיה בשוחות מבוססת על קו מים מרכזי – לרוב צינור או תעלה פתוחה – אשר יש לו סיפונים או צינורות המזרימים מים ישירות לשוחות בין השורות. השוחות מוצפות ומתמלאות בקצב שתלוי בספיקת המים ובתכונות החידור של הקרקע. מערכות השקיה כאלו קשה להתאים למנות מים שונות בשדה, אך עדיין ניתן לשפר את יעילותן, למשל באמצעות מודלים הידרולוגיים המחשבים את שינוי תכולת הרטיבות בקרקע לאורך השוחה (Gillies, 2015; Koech, 2014).

עבודה עם מערכות כאלו מציבה אתגרים רבים, אך השימוש הנפוץ בהן מציב פוטנציאל רב לפיתוח מערכות אוטומציה המייעלות אותן.

1.7 יישומי רובוטיקה בחקלאות

התחום האחרון בסקירה קצרה זו אשר צפוי לגדול בשנים הקרובות, הינו השימוש ברובוטים בחקלאות (Pedersen, 2006). רובוטים הם כלים אוטונומיים אשר יפעלו על פי תוכנית סדורה, יסיירו בין השורות ויכולו לבצע פעולות אשר כיום דורשות שעות עבודה רבות, כמו זריעה מדויקת (Haibo, 2015) או קטיפה (Bac, 2014). כלים כאלה כבר קיימים ומוצעים לשימוש מסחרי, ובאפשרותם לחסוך שעות עבודה המוקדשות להכשרת עובדים ובעיות של תחלופה גבוהה של כוח אדם. בין הגורמים הצפויים לתמוך בעלייה בשימוש בכלים אלו:

א. עליה בגודל החוות – ישנה מגמה עולמית בה גודל החוות הממוצע עולה בהדרגה. לכלי חקלאות מדייקת יתרון גדול בניטור שטחים רחבים וחוות גדולות יכולות לרוב לעמוד בהוצאות ההתחלתיות והשוטפות של שימוש בכלים אלו. לכן שינוי מבני מתמשך זה יתרום להגדלה בהטמעת טכנולוגיות חקלאות מדייקת כגון רובוטים לחקלאות.

ב. עלייה ביכולות עיבוד התמונה, והשימוש שלה בחקלאות. שיטות עיבוד תמונה שונות משמשות בהצלחה להפרדה בזמן אמת בין הגידול לעשבים שונים (Tellaeché, 2008; Zhang, 2012), או לזיהוי מחלות צמחים (Camargo, 2009). יתכן וייקח זמן להגיע לכך, אך בעתיד יתכנו מערכות אוטונומיות המשלבות כלים קרקעיים ואוויריים, אשר מותקן עליהם מערך חיישנים כולל לניטור עקות מים, נוטריינטים ומחלות. מערכות אלו יוכלו לבצע בנוסף פעולות בסיסיות כמו ריסוס נקודתי של עשבים (טכנולוגיה הקיימת כבר בשימוש מסחרי), מתן דשן ברמה הנאותה לכל מקום, ויספקו מיפוי כולל של מצב השדה בזמן אמת ישירות לחקלאי.

חזון זה כולל אתגרים רבים, החל מאינטגרציה בין חיישנים, פיתוח כלי עיבוד התמונה או החישה מרחוק ועד לבעיות של התקדמות ועבירות הכלים בשדה (Papadakis, 2013) אך קיימת כיום הזדמנות לפיתוח הטכנולוגיה שתביא אותנו לשם בעתיד.

2 אגרוטק בישראל

2.1 רקע¹⁰

בישראל התפתחו תשתיות לחקלאות במשך שנים של התמודדות עם אתגרים מקומיים הכוללים מחסור במשאבי קרקע ומזג אויר צחיח בחלק מאזורי המדינה. מרבית התוצר בסקטור זה הינו מגידולים חקלאיים – הן לצריכה מקומית והן לייצוא – בעוד שהחלק של ייצוא טכנולוגיות וציוד חקלאי מתקדמים נותר קטן באופן יחסי. אף על פי כן, בשנים האחרונות ניכרת עליה בהיקפי הפעילות בתחומי הטכנולוגיה החקלאית הישראלית, המופנית גם לייצוא, זאת היות שיותר ויותר מדינות בעולם מתמודדות עם אתגרים דומים בחקלאות, ובשל כך פונות לחיפוש אחר פתרונות אשר כבר פותחו ויושמו בישראל. עם השנים, כתוצאה מפיתוח לחקלאות המקומית, פותחה תעשיית מערכות השקיה, טפטפות, בקרי השקיה ממוחשבים ועוד, פיתוחים שאפשרו הקמת מספר ניכר של מפעלי תעשייה וייצוא משמעותי. חלק ממפעלים אלו פועל כיום בשיתוף עם חברות ענק בהודו ובסין.

היתרונות היחסיים של התעשייה החקלאית בישראל כוללים חקלאות מבוססת ומתקדמת טכנולוגית, אקלים מגוון (ארבעה אזורי אקלים שונים), מיתוג בי"ל חזק של הובלה בתחום המים, אקדמיה מפותחת ומתקדמת (בתחומים משיקים), סביבה עסקית מוכוונת יזמות ואקוסיסטם תעשייתי תומך (תעשיות ביטחוניות, היי טק). הידע והחדשנות החקלאית בישראל ניזונים בעיקרם מפיתוחים מחקרניים באקדמיה ובמכוני המחקר החקלאיים, הכוללים את מכון וולקני המשויך למשרד החקלאות ופיתוח הכפר ושמונה מרכזי מו"פ אזוריים. עם זאת, נראה כי מעבר הידע מתחום המחקר לכדי יישום מסחרי לוקה בחסר, ובשל סיבות שונות לא תמיד מגיע לכדי מימוש. חלקה של הממשלה בתמיכה בתעשייה החקלאית בא לידי ביטוי בעיקר במתן מענקי מו"פ באמצעות מגוון מסלולים, הן דרך לשכת המדען הראשי במשרד הכלכלה והן דרך משרד החקלאות ופיתוח הכפר. מסלולים אלו כוללים, בין היתר, מאגדים, תוכניות העברת ידע מהאקדמיה לתעשייה וחממות טכנולוגיות.

¹⁰ הרקע מבוסס על אילון et al., 2016

על פי הערכות שונות¹¹, בישראל פעילות מאות חברות בתחומי האגרוטק השונים, שהינן בשלבי בגרות שונים ופרוסות לרוחב שלל תתי-תחומים. אף על פי שמספר חברות ההזנק (סטרטאפ) בתחום האגרוטק אינו גדול באופן יחסי, ניכרת מגמה של עניין גובר בתחום ובהתאם עלייה במספר היזמויות הנמצאות בשלבי הקמה ראשוניים. הימצאותם של מספר הולך וגדל של גופי מימון הון סיכון וחממות טכנולוגיות המתמחים ומתמקדים בתחום האגרוטק, מהווה אינדיקציה נוספת למגמה זו. יתרה מכך, היקף הפעילות של חברות רב-לאומיות וקרנות בינלאומיות בתחומי החקלאות בישראל נמצא בעליה, דבר הבא לידי ביטוי בקיומם של מרכזי פיתוח מקומיים, בביצוע השקעות ובעסקאות מיזוג ורכישה של חברות ישראליות. כל אלו מצביעים על כך שבישראל ישנה "מסה קריטית" של ידע, יכולת וניסיון הדרושים להתפתחותה של סביבה יזמית פורייה בתחום האגרוטק.

התפתחות תחום האגרוטק בישראל משקף את היתרונות של ישראל בתחום:

- בישראל ניסיון רב שנים בהתמודדות עם מחסור במשאבים ויש טכנולוגיות חדשניות שהתפתחו כתוצאה מכך, אם לפתרון בעיות המים בחקלאות (ניהול נכון של משק המים, יעילות, מחזור לחקלאות), שימוש באנרגיות מתחדשות ועוד.
 - בישראל כמות פטנטים גדולה מאוד בתחום Biological enhancement וכן בנושא הגנה על הצומח.
 - יש בישראל יתרון בשילוב של כוחות מתחומים ורקעים שונים כגון: IT, הנדסה, חקלאות ועוד.
 - לישראל יתרון יחסי במפגש בין חקלאות ישראלית ממותגת חובבית, היי טק ממותג היטב ומפותח ואף מתוספים היתרונות של תעשיות ביטחוניות מצליחות.
- החסמים שזוהו כאיומים שעשויים להשפיע על התפתחות התחום:
- כיום חסר הון אנושי בתחום, הפקולטה להנדסה חקלאית בטכניון נסגרה, אין דרישה של סטודנטים לתואר ראשון בהנדסה חקלאית, בין היתר כתוצאה ממיתוג שלילי של תחום החקלאות.
 - יש מיעוט חוקרים באקדמיה הרואים בתחום יעד ואין מסלולי תמיכה מתאימים שיאפשרו לחוקרים לתעדף תחום זה על פני מחקרים אקדמיים טהורים.
 - קיים אתגר מיוחד במחקר במעבר לשלב היישום המסחרי (גימלון, scaling up) – חסרים מקורות למימון המשך, בין היתר, כתוצאה מקושי בהגדרת השוק.
 - קיים קושי בקשרי אקדמיה-תעשייה ובין האוניברסיטאות למדען הראשי, דבר שמוביל לבעיה ב- Deal flow.
 - על אף הזינוק בהשקעות באגרוטק בעולם, עדיין מזוהה חוסר וכשל שוק בהשקעות ה-Seed.
 - חסם ייחודי קשור בהטמעת הטכנולוגיה אצל החקלאי, מידת פתיחות הלקוחות לתוכנות חדשות.
 - קיים קושי לחברות קטנות, בעיקר כאלה המתבססות על תוכנה בגיבוש המודל העסקי.
 - מחזור הפיתוח של המוצר תלוי באופן מובנה בסוג הגידול ומחזורי הגידול, דבר שמכתיב קצב פיתוח איטי יחסית להייטק.

2.2 האקוסיסטם בתחום האגרו-טק בישראל

פיתוח יכולות חדשנות, שימור הערך הנגזר מיכולות אלו ותרומן לצרכי הכלכלה והחברה, אינם תלויים באופן בלעדי בפריצת דרך טכנולוגית או יזמות מוצלחת. תהליכים אלו הם פרי יכולתה של מערכת החדשנות לחבר את כלל המרכיבים לכדי מערכת של יצירת ערך בת קיימא, התומכת במעגלי התפתחות מתמשכים של יצירת ערך, תפיסתו ותרומתו לקידום של יעדים לאומיים מוגדרים (בקרמן & ממו, 2012).

בארץ שותפים למערכת החדשנות המגזר הממשלתי, האקדמיה, התעשייה והמגזר השלישי.

2.2.1 תעשייה

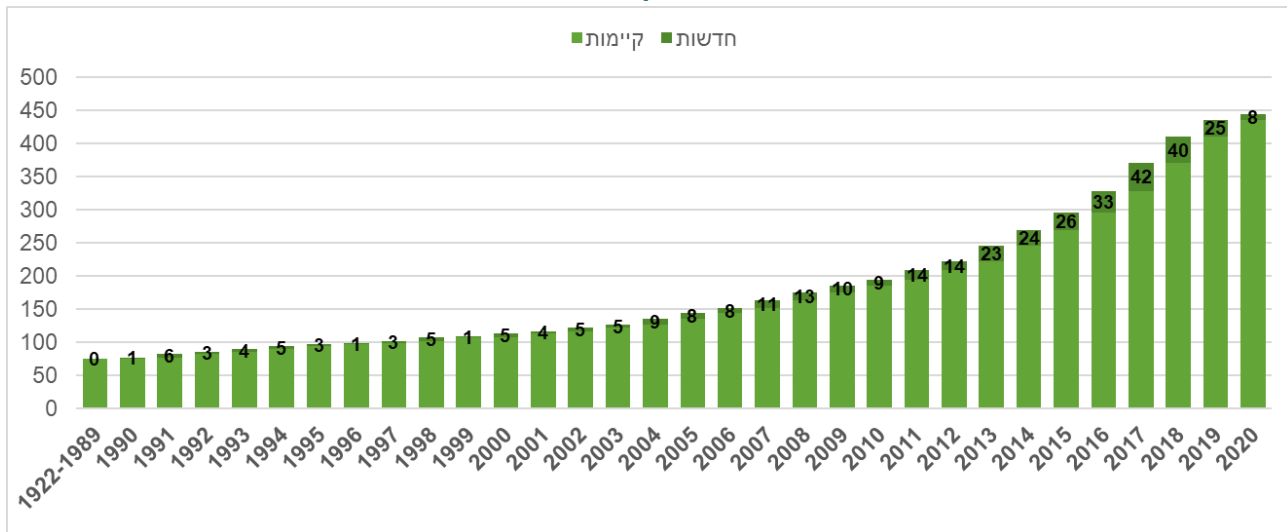
נכון לחודש אוקטובר 2020, פעלו בישראל 444 חברות שתיוגו במאגר ה- Startup Nation Central Finder¹² בתגיות agtech או precision-agriculture. ניתן לראות שהחל מ-2007 חל גידול במספר החברות החדשות

¹¹ לדוגמא, במסמך ישראל כמרכז חדשנות גלובלי בתחומי האגריטק-דו"ח לוועדה למינוף המו"פ החקלאי בישראל של המכון הישראלי למדיניות מדע טכנולוגיה וחדשנות והמועצה הלאומית למחקר ופיתוח מ-2012, מצוינות "258 חברות בתחומי החקלאות השונים"

¹² קישור לאתר: <https://finder.startupnationcentral.org>

המוקמות בתחום מידי שנה ומספר זה נמצא במגמת עלייה עד שנת 2018. יותר מ-60% מהחברות הוקמו בעשור האחרון.

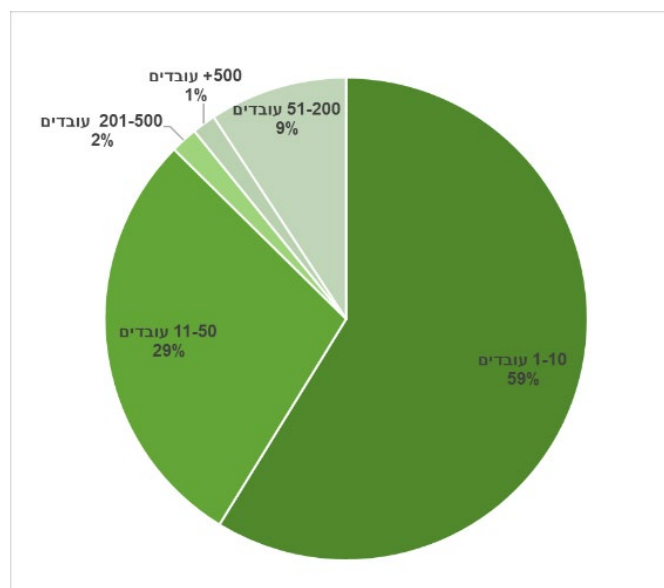
איור 10: חברות בתחום אגרוטק בישראל עד שנת 2020



עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

רוב החברות 88%, הן חברות קטנות שיש בהן עד 50 עובדים (ב-59% מהחברות עובדים עד עשרה עובדים). 9% מהחברות בינוניות ומונות 51-200 עובדים ורק 3% הן חברות גדולות המעסיקות למעלה מ-200 עובדים. נתונים אלה מחזקים את העובדה כי זהו תחום מתפתח ורוב החברות נמצאות בתחילת דרכן, כפי שניתן לראות גם באיור הבא.

איור 11: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה



מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

דוגמאות לחברות בתחום החקלאות המדייקת בישראל:

- **Taranis**¹³: המלצות להדברה והגנת הצומח באמצעות מטאורולוגיה ותמונות לווי ברזולוציות גבוהות לקבלת מידע מקומי ומדויק. בחברה זו יש שילוב של אנשי תקשורת שאינם חקלאים עם אגרונומיים.
- **Manna Irrigation**¹⁴: חברה בת של **Rivulis**¹⁵, מערכות המלצה להשקיה לחקלאים בהתבסס על לוויינים ומדידות קרקע.
- **Phytech**¹⁶: חיישנים לחממות וגידולים אחרים בהתבסס על פלטפורמות לוויינים בשילוב חיישנים קבועים מראש על הקרקע להמלצה על פעילות כמו השקיה ודישון. החידוש הוא לא במערכו הנדסיות ומכניות, אלא אינטגרציה של מערכות לקבלת החלטות.
- **Farm Dog**¹⁷: איסוף מידע אינטנסיבי בבתי צמיחה ובשדה, על מנת לעזור לחקלאים לקבל החלטות בהתבסס על מידע מלוויינים וחיישנים מפוזרים.

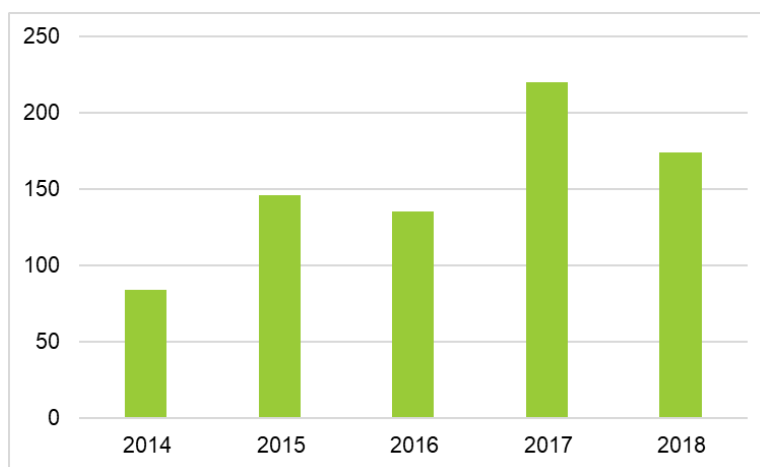
דוגמא לשימוש בטכנולוגיה מתחום הראייה הממוחשבת בחקלאות

- בצמח הבננה אין זרעים, והריבוי נעשה על ידי שתילת שלוחה של בננה קודמת. מפעל תרבות רה"ן בראש הנקרה¹⁸ מספק 15% משתלי הבננות בעולם. אבל הכנת השלוחות ע"י חיתוך הצמח היא עתירת עבודה ידנית, ולכן הייצור הועבר להודו ודרום אמריקה. מיכון ורובוטיקה יכולים להחזיר את המפעלים לארץ. ראייה ממוחשבת יכולה להחליף את הראייה האנושית שנדרשה עד עכשיו בשביל חיתוך הצמח.

2.2.2 משקיעים

עם העלייה במספר החברות חלה באופן טבעי גם עלייה בהיקף הפעילות. האיור הבא מדגים את העלייה בהיקף גיוסי ההון של חברות בתחום האגרוטק בשנים 2014-2018. בשנים אלה הושקעו כ-800 מיליון דולר בחברות בתחום האגרוטק. כרבע מההשקעות נרשמו בתחום Farm Management Software, Sensing & IoT.

איור 12: גיוסי הון בתחום האגרוטק¹⁹ בשנים 2014-2018.



מקור: (Start-Up Nation Central, 2019)

2.2.3 הסקטור הממשלתי

הגופים העיקריים המעניקים תמריצים כלכליים לחברות בתחום האגרוטק הם רשות החדשנות ומשרד החקלאות. תוכניות רשות החדשנות הרלוונטיות לחברות בתחום (בהתאם לשלב בו הן נמצאות וגורמים נוספים) הן: קרן המו"פ, תוכנית מו"פ עסקי בחקלאות (בשיתוף משרד החקלאות), תוכנית החממות הטכנולוגיות, תוכניות מגנ"ט (נופר, קמין, מגנטון, מאגדים).

¹³ [/http://www.taranis.ag](http://www.taranis.ag)

¹⁴ [/https://manna-irrigation.com](https://manna-irrigation.com)

¹⁵ [/http://rivulis.com](http://rivulis.com)

¹⁶ [/https://www.phytech.com](https://www.phytech.com)

¹⁷ [/https://farmdog.ag](https://farmdog.ag)

¹⁸ http://www.raham.co.il/?page_id=454&lang=he

¹⁹ https://www.export.gov.il/api//Media/Default/Files/Economy/economy_agtech_megamot.pdf

משרד החקלאות מעניק סיוע לחברות בתחום האגרוטק באמצעות הקמת מוקדי ידע כחלק מיישום המלצות הועדה הבין-משרדית למינוף המו"פ החקלאי משנת 2012²⁰. בנוסף מפעיל משרד החקלאות את תוכנית 'ניצן' למימון מחקרים יישומיים בתחומי החקלאות ואת תוכנית 'ניצן מורחב' (תיבת נוח) למימון מחקרים יישומיים בתחומי החקלאות התומכים בתעשיית המזון.

גופים נוספים המסיעים לחברות בתחום האגרוטק הם התוכנית לקידום טכנולוגיות מים ואנרגיה מתחדשת (Israel NewTech) ומכון הייצוא.

2.2.4 אקדמיה - הכשרת כוח אדם מדעי וטכנולוגי לעבודה בתחום החקלאות המדייקת

הטכניון

בשנות ה-50 וה-60 הייתה פריחה של נושא ההנדסה החקלאית בטכניון (ובישראל). באותה תקופה היה לובי חקלאי חזק, האוריינטציה הייתה התיישבותית, והייתה הבנה כללית שיש צורך בכ"א חקלאי איכותי שיוכל למצוא פתרונות איכותיים להתמודדות עם תנאי קרקע ומים מוגבלים. שתי הפקולטות שהיו בארץ: אחת אגרונומית (הפקולטה לחקלאות ברחובות) ואחת הנדסית (הנדסה חקלאית בטכניון). זה היה מחולל ידע מצוין, הביא משתלמים, מסטרנטים, דוקטורנטים ופוסט דוקטורנטים מארה"ב. היחסים הביטורליים עם אירופה ואפריקה נבעו מהבסיס החקלאי.

עם הזמן חלה ירידה במספר החקלאים בארץ. הנוער פנה לתחומי היי-טק אחרים וחלה ירידה כללית בחינוך הטכנולוגי, ובתוכו בהנדסה חקלאית. ב-2002 היה מיזוג בטכניון שהביא את הנישה החקלאית לתוך האזרחית ויצר שלוש יחידות: 1) הנדסת בניין, מבנים וניהול הבנייה, 2) גיאודזיה ותחבורה, 3) סביבה, מים וחקלאות. כיום אין הרבה ביקוש לתחום של הנדסת מים.

גם תוכנית 'אבטחת איכות בביו-תהליכים' שנפתחה בשלב מסוים כאלטרנטיבה להנדסה חקלאית ביחד עם הפקולטה למזון וביוטכנולוגיה לא הצליחה. במסלול למדו כימיה, ביולוגיה ופיזיקה ועשו פרויקטים באבטחת איכות בקו אוטומטי בטבע ובתעשיות מתקדמות. התוכנית נסגרה בשל קושי באחזקת תוכנית אינטרדיסציפלינרית בטכניון וגם היות שהסטודנטים העדיפו את תחום הביוטכנולוגיה.

בסה"כ מדובר על שלוש תוכניות/מסלולים שלא רשמו הצלחות: הנדסה חקלאית שהתאחדה עם הנדסה אזרחית בשנת 2002, תחום מים וחקלאות בתוך הפקולטה להנדסה אזרחית שסובל מחוסר ביקוש והתוכנית 'אבטחת איכות בביו-תהליכים' שנסגרה.

הפקולטה לחקלאות מזון וסביבה של האוניברסיטה העברית ברחובות

כרגע אין בפקולטה לחקלאות שילוב עם הנדסה וטכנולוגיות מידע ותקשורת (ICT). שיתופי הפעולה הקיימים עם הפקולטה להנדסה בגבעת רם הינם ובהיקפים קטנים. עם זאת, לאחרונה מורגשת דרישה אשר מגיעה מהשטח לפתח שילוב כזה. בזמן האחרון התקבלו לפקולטה חוקרים חדשים שיש להם הכשרה בתחומי חישוב ועיבוד מידע. בפקולטה רואים חשיבות לשילוב של הנדסה עם חקלאות, ולכן מנסים לפתח אשכול או חטיבה שיעסקו ב-smart Agriculture או ב-Precision Agriculture, חקלאות עם אלמנטים חישוביים בתחומים כמו Imaging, מידול, עיבוד מידע וטכנולוגיות נוספות של Big-Data ו-Data Sciences. באשכול יתקיים חיבור בין האנשים האוספים מידע לאנשים המעבדים מידע. מלבד החוקרים יש בפקולטה גם פיזיקאים שנותנים פן שמתקרב יותר להנדסה, אבל החיבור הזה צריך להיות יותר חזק ויותר ממוקד. לא מדובר בבניית מרכז חדש, אלא בהידוק שיתוף הפעולה.

האוניברסיטה העברית

התמחות באגרו-אינפורמטיקה תוכנית חדשה המעניקה תואר בוגר²¹. התוכנית מקנה ללומדים בה ידע תיאורטי ומעשי בגישות חישוביות מודרניות בתחום החקלאות, המזון והסביבה. בעידן המודרני נדרשים כלים חישוביים הן לניהול ועיבוד המידע והן להפקת תובנות. על כך אמונה האגרו-אינפורמטיקה, שהינה תחום דעת אינטרדיסציפלינרי חדש המשלב בין עולם החקלאות, המזון והסביבה לעולם המתמטיקה, מדעי המחשב, הפיזיקה וההנדסה. הטכנולוגיה החדשה מאפשרת קבלת נתונים רבים מחיישנים הממוקמים בשדה, מהדמיות ברמת המקרו (לוויינים מרובי-ערוצים) והמיקרו (מיקרוסקופיה), מאנליזות גנומיות ועוד. הדרך היחידה לעשות

²⁰ <http://www.pmo.gov.il/Secretary/sederyom/Documents/915B.pdf>
²¹ <http://catalog.huji.ac.il/pages/WebChugInfoNew.aspx?page=&removebotton=1&faculty=8&year=2020&entityType=e=chug&entityId=7725°reeCode=71>

שימוש מושכל במידע רב זה היא על ידי פיתוח דרכים חדשות לשמירה ארגון, עיבוד וניתוח, הכוללות אלגוריתמים מתמטיים, מודלים, תוכנות מחשב, כלים סטטיסטיים ולמידת תוכנה. כך ניתן לחבר מיליוני פיסות מידע לתמונה שלמה המאפשרת לזהות את תבניות הפעולה העיקריות. פיתוח של טכנולוגיות חדשות וגישות חקלאיות מתקדמות בעזרת האגרו-אינפורמטיקה, מאפשר ביטחון תזונתי לאוכלוסיית העולם המתפתחת תוך שמירה על איכות הסביבה ומשאבי הטבע.

התוכנית מיועדת לסטודנטים המעוניינים להעמיק את הידע בגישות חישוביות מודרניות ולרכוש הן את היכולות התיאורטיות והן את היכולות המעשיות בתחום. חטיבת הלימודים משולבת ב-7 מתוך 8 תוכניות הלימודים לבוגר (חוגים) בפקולטה לחקלאות מזון וסביבה: אגרו-אקולוגיה ובריאות הצמח, ביוכימיה ומדעי המזון, כלכלת סביבה וניהול, מדעי בעלי החיים, מדעי הצמח בחקלאות, מדעי הקרקע והמים ומדעי התזונה.

מכללת אחווה

תואר ראשון במדעי החיים עם תחום מיקוד: אגרו-טק. תוכנית הלימודים מקנה ידע בסיסי ויישומי במקצועות הביולוגיה החדשניים והקלאסיים. הסטודנטים בתוכנית יכולים לבחור תחום מיקוד בהתאם להעדפתם, תוך שילוב ייחודי של תחומים חדשניים: אגרו-טק²². רשימת קורסים לדוגמה: הדברה ביולוגית, שמורות טבע בישראל ובעולם, חקלאות מדייקת.

מכללת תל-חי

במכללת תל חי קיים קורס באגרוטק במסגרת התואר במדעי הסביבה²³.

מכללת כנרת

מסלול הנדסה חקלאית במכללת כנרת ומגעים לשת"פ עם אוניברסיטת חיפה:

- במכללת כנרת יש תואר בהנדסת תעשיות מים²⁴ (לא חקלאות), והבוגרים 'נחטפים' לכל תעשיות המים-טיהור שפכים ומי קלחין, טפטפות, חקלאות קרקע ומים ועוד. התוכנית פועלת מזה כ-10 שנים, זו המחלקה הגדולה והמצליחה במכללה, עם 40 בוגרים המסיימים מידי שנה. זה הבסיס לרצון לפתוח במכללה גם מסלול להנדסה חקלאית. למכללת כנרת יש הסכם עם מכון וולקני לפתוח תואר בנושא הנדסה חקלאית (השת"פ עם מכון וולקני הוא שת"פ אקדמי והסטודנטים יבצעו פרויקטים בתעשייה במשך שנה שלמה). מכיוון שיש קושי בפתיחת תואר חדש במל"ג, הרעיון הוא לפתוח מסלול של הנדסה חקלאית בתוך התואר הקיים בהנדסת תעשיות מים. במסלול זה כל הסטודנטים ילמדו במשך 3 שנים את אותם הדברים, ובשנה הרביעית כל אחד יבחר במסלול שלו. בנוסף יש גם אישור לתוכנית לתואר שני, ועכשיו חושבים באיזה כיוון יהיה המאסטר. התואר השני מיועד לאנשים עם רקע בהנדסה.
- אוניברסיטת חיפה, במסגרת התוכנית להפיכתה לאוניברסיטה רב קמפוסית, רצתה לפתוח תוכנית בחקלאות (כמדע, לא כהנדסה). לחיפה יש פקולטה לחקלאות ימית. שר החקלאות, שתומך בהקמת פקולטה לחקלאות בצפון כבר אישר לאוניברסיטת חיפה שטח במטה אשר ליד הים. לפי פרופ' גפשטיין אין מקום במדינת ישראל לפקולטה נוספת לחקלאות היות שהפקולטה לחקלאות של האוניברסיטה העברית ברחובות ממלאה את כל צרכי המשק בכוח אדם מדעי. מה שכן נדרש זו הנדסה חקלאית או 'אגרוטק'. באוניברסיטת חיפה אין תוכנית מל"ג לתואר ראשון במדעים. פרופ' גפשטיין סבור שיהיה קל ונכון יותר לפתוח את התואר הראשון בהנדסת מים עם המסלול המתוכנן לחקלאות כתואר משותף לאוניברסיטת חיפה ולמכללת כנרת ובשיתוף מכון וולקני, ובנוסף תואר שני בהנדסה חקלאית או אגרוטק ובעתיד תואר שלישי משותף למכללה ולאוניברסיטה. החזון הזה נותן אפשרות לבנייה איטית, בלי להשקיע מיד בהתחלה את הסכומים הנדרשים לפתיחת פקולטה חדשה.

<http://new.achva.ac.il/wp-content/uploads/2017/02/yedion2019i.pdf>²²

<https://www.telhai.ac.il/%D7%9E%D7%90%D7%9E%D7%A8%D7%99%D7%9D/%D7%90%D7%92%D7%A8%23>

<D7%95%D7%98%D7%A7>

<http://www.kinneret.ac.il/Web/StudyTopics/KinneretBA/EngineeringSchool/WaterIndustryBSc/About/Default.aspx>²⁴

דוגמא לשיתוף פעולה בין התעשייה לאקדמיה: מרכז כנרת לחדשנות ויזמות בתחום ה-AGRO-TECH²⁵
המרכז הוא קואליציה אזורית המורכבת מצמח מפעלים ומשקי עמק הירדן, המכללה האקדמית כנרת, מועצה אזורית עמק הירדן ובית החולים פדה-פזורה.

הרעיון הוא להקים את המרכז סביב המכללה (האקדמיה), בניגוד למיג"ל (שקם כמכון מחקר שלא קשור לאקדמיה, ורק אח"כ יצר קשר עם מכללת תל חי). כל חברי מכון וולקני שותפים, והמטרה היא לעניין חברות מהעולם לעשות את המו"פ שלהם בישראל. בחצי שנה גויסו 15 חברות, ובהן חברת מטרו, רשת הסופרמרקטים השלישית בגודלה באירופה, ועוד חברות רבות עומדות בתור. המרכז יכול לספק אפשרות תעסוקה לסטודנטים, אפשרויות מחקר לחברי הסגל בבית הספר להנדסה במכללה ולתרום לפיתוח הפריפריה. בין החברות שגויסו גם פלקס שיכולה לתת מענה לחברות שיצטרכו פיתוח בתחום האלקטרוניקה, ורפאל שמתמחים בתחום של חישה מרחוק וראייה ממוחשבת.

תוכניות לימוד בתחום של חקלאות מדייקת במסגרת משרד החינוך

ניתן לראות התפתחות של התחום גם בבתי ספר. מצאנו כי קיימת מגמת לימוד של חקלאות מדייקת גם במסגרת חינוך תיכוני. לדוגמא, בבית ספר גלים – כפר הנוער גלים²⁶ ומגמת לימוד בישיבת בני-עקיבא כפר הרא"ה²⁷

פעילות מחקרית

לפי בקרמן וממו (2012) בשש מהאוניברסיטאות בארץ מתקיים מחקר הקשור לתחומי החקלאות: האוניברסיטה העברית, מכון ויצמן, אוניברסיטת תל אביב, אוניברסיטת בר אילן, הטכניון ואוניברסיטת בן גוריון. בפקולטה לחקלאות ברחובות של האוניברסיטה העברית יש קרוב ל 90 חוקרים וחברי סגל. בשאר האוניברסיטאות ישנם חברי סגל בודדים במחלקות השונות לביולוגיה/כימיה/הנדסה וכו' אשר עוסקים במחקר חקלאי. לפי אסיף (2016), הפקולטה לחקלאות של האוניברסיטה העברית היא המובילה בארץ במחקר חקלאי, אך מחקרים פורצי דרך בתחומי הגנת הצמח והמזון נעשים גם באוניברסיטת תל אביב, אוניברסיטת בן גוריון ומכון ויצמן. הפקולטה להנדסה חקלאית שהייתה קיימת בטכניון נסגרה בשנת 2002 כאשר אוחדה עם הפקולטה להנדסה אזרחית.

מכון המחקר המשמעותי ביותר בתחום החקלאות הוא מינהל המחקר החקלאי במשרד החקלאות- מכון וולקני. מכון זה הוא המוסד הגדול ביותר בישראל העוסק במחקר חקלאי ונמנה עם הידועים מסוגו בעולם. תפקידו העיקריים הם לסייע לחקלאי ישראל בפתרון בעיות שונות, לבצע מחקר ופיתוח בנושאים חדשים ומבטיחים בחקלאות ובמדעי המזון ולתכנן, לארגן וליישם מחקר חקלאי בישראל. חוקרי מינהל המחקר החקלאי מלמדים במוסדות להשכלה גבוהה ובקורסים מתקדמים לחקלאות המיועדים למשתתפים מהארץ ומחו"ל ומנחים סטודנטים בעבודותיהם לתארים גבוהים. רבים מהחידושים שפותחו במינהל המחקר החקלאי מיושמים כבר ברמה המסחרית בארץ ובעולם. היישום מתבטא במיוחד בתחומים הבאים: גידולים מוגנים (חממות), השקיה, חקלאות באזורים צחיחים, טיפול בתוצרת לאחר הקטיף, הגנת הצומח, מיכון, זננים חדשים של פירות, ירקות וצמחי נוי²⁸.

דוגמאות לחוקרים בישראל בתחום החקלאות המדייקת בתחום הטכנולוגיה, החקלאות או שניהם:

- פרופ' מקסים שושני²⁹ (הטכניון), איש חישה מרחוק, עוסק במערכות סביבתיות- חורש טבעי, יערות, אקולוגיה וסביבה. השתתף במחקרים משותפים עם מכון וולקני, אבל רק כנספח לפעילות המרכזית שלו.
- פרופ' רפי לינקר³⁰ (טכניון): איש אוטומציה, בקרה ומיכון. עסק בחקלאות ועכשיו בפקולטה להנדסה אזרחית. עוסק בתחומי החקלאות, אבל לא במערכות תקשורת וחישה מרחוק.
- ד"ר אנה ברוק³¹ (אוניברסיטת חיפה), מגיעה מנושא הסביבה, ועוסקת גם בתחום החקלאות וחישה מרחוק בלבד.

²⁵ [/http://www.agrotech.org.il](http://www.agrotech.org.il)

²⁶ https://meyda.education.gov.il/files/Mazkirut_Pedagogit/AgaffPituachPedagogi/galim_medayeket.pdf

²⁷ https://meyda.education.gov.il/files/Mazkirut_Pedagogit/AgaffPituachPedagogi/haklout_kfarharoe.pdf

²⁸ אתר מינהל המחקר החקלאי- מכון וולקני, <http://www.agri.gov.il/he/pages/1023.aspx>

²⁹ <http://cee.technion.ac.il/CivilEng/Templates/ShowPage.asp?DBID=1&TMID=139&LNGID=2&FID=166&PID=0&ID=382>

³⁰ <http://cee.technion.ac.il/CivilEng/Templates/ShowPage.asp?DBID=1&TMID=139&LNGID=2&FID=166&PID=0&ID=334>

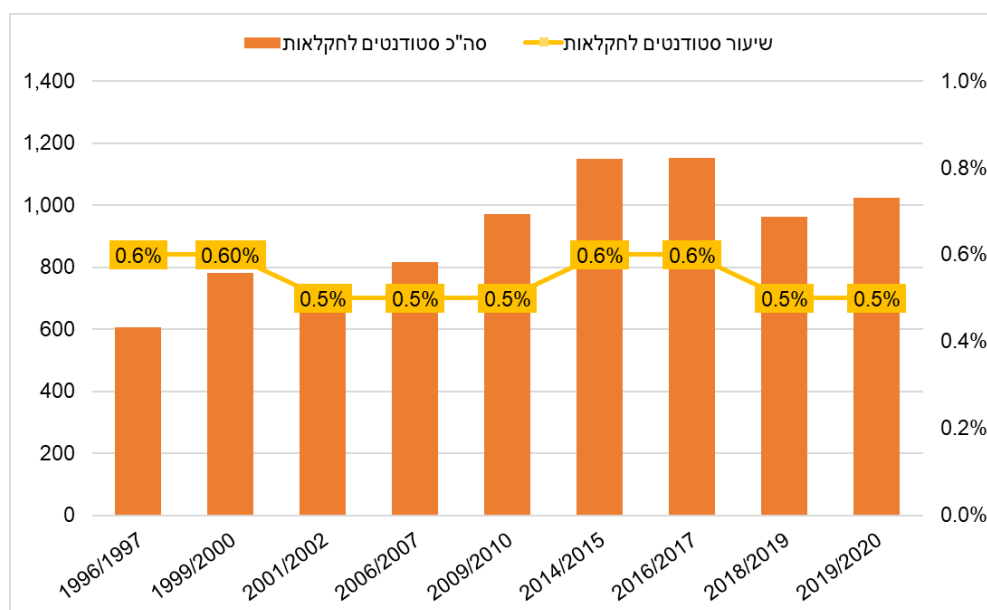
³¹ [/https://sites.hevra.haifa.ac.il/abrook](https://sites.hevra.haifa.ac.il/abrook)

- פרופ' מנחם מושליון³² (הפקולטה לחקלאות מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית).

הכשרה

לפי נתוני מל"ג (המועצה להשכלה גבוהה, 2017), שיעור הסטודנטים לתואר ראשון בחקלאות מכלל הסטודנטים בישראל נע בעשור האחרון מ-0.5% ועד 0.6% מכלל הסטודנטים. מספרם הכולל של הסטודנטים לחקלאות לתואר ראשון עלה מ-607 בשנת הלימודים 1996/1997 ל-1,150 בשנת הלימודים 2016/2017:

איור 13: מספר הסטודנטים לחקלאות בתואר ראשון בישראל ושיעורם מסך הסטודנטים בשנים 1996/1997 - 2019/2020



מקור: המועצה להשכלה גבוהה (2017)

בשנת 2017 הסטודנטים לתואר שני בחקלאות היו כ-1.5% מכלל הסטודנטים לתואר שני באוניברסיטאות, ומספרם עמד על כ-585 סטודנטים.

2.2.5 מדדים ביבליומטריים

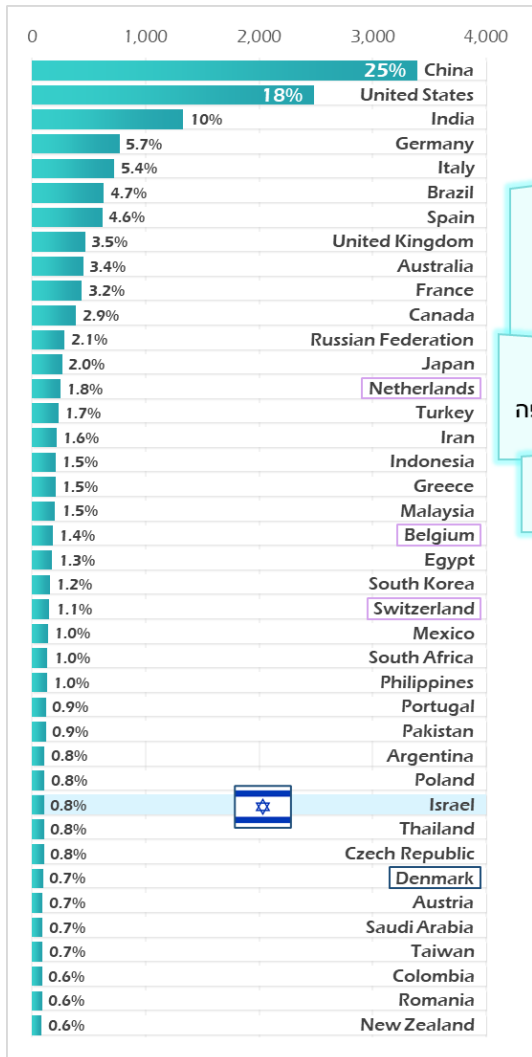
באיור הבא מוצגות 40 המדינות המובילות בעולם במספר הפרסומים המדעיים בנושאי חקלאות מדייקת בשנים 2015-2019. האחוזים מציינים את שיעור הפרסומים של כל מדינה מכלל הפרסומים בעולם בתחום.

סין מובילה את הדירוג עם רבע מפרסומי העולם בתחום, ארה"ב במקום השני עם 18%, הודו במקום השלישי עם 10%. באיור מודגשות בסגול מדינות ברות השוואה לישראל (מבחינת גודל האוכלוסייה ומספר הפרסומים המדעיים).

ישראל מדורגת במקום ה-31 עם 0.8% מפרסומי העולם בתחום. מספר הפרסומים הישראליים עלה פי 2.8 במהלך העשור החולף; מספר הפרסומים בעולם עלה בשיעור דומה (איור 14).

³² http://departments.agri.huji.ac.il/plantscience/people/Menachem_Moshelion

איור 14: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בשנים 2015-2019



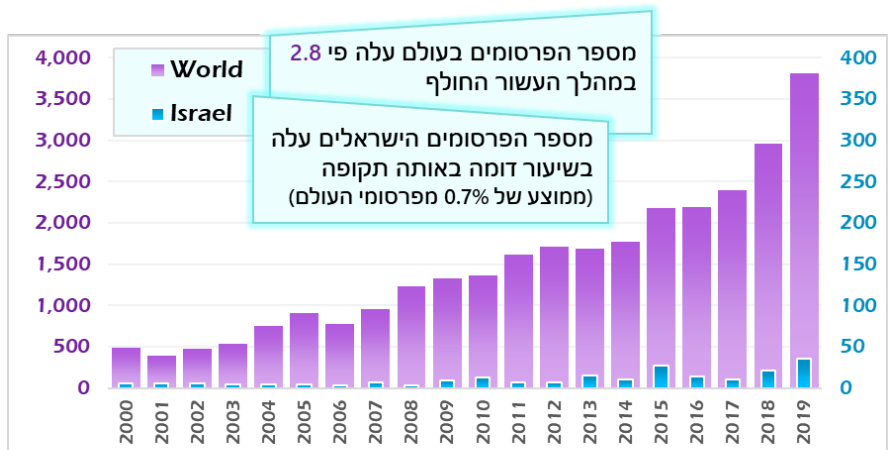
סין מובילה במספר המאמרים בשנים 2015-2019 עם רבע מכמות הפרסומים בעולם; במקום השני - ארה"ב עם 18%; הודו - 10%

ישראל ממוקמת במקום ה-31 עם 0.8% מפרסומי העולם באותה תקופה

מודגשות בסגול מדינות בנות השוואה לישראל

עיבוד של צוות מוסד שמואל נאמן לנתוני מאגר סקופוס

איור 15: השינוי במספר הפרסומים הישראליים בנושאי חקלאות מדייקת ושיעורם מפרסומי העולם בתחום, 2000-2019



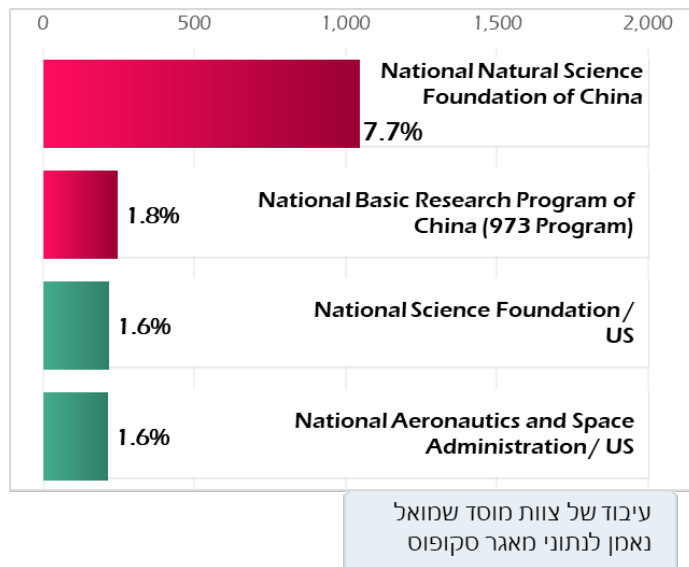
מספר הפרסומים בעולם עלה פי 2.8 במהלך העשור החולף

מספר הפרסומים הישראליים עלה בשיעור דומה באותה תקופה (ממוצע של 0.7% מפרסומי העולם)

עיבוד של צוות מוסד שמואל נאמן לנתוני מאגר סקופוס

האיור הבא מציג את דירוג גופי המימון העיקריים שמופיעים ברשימות הספונסרים של הפרסומים³³ בנושאי חקלאות מדייקת בשנים 2015-2019. הקרן הלאומית למדעי הטבע של סין (National Natural Science Foundation of china) מובילה את הרשימה עם 7.7% מהפרסומים. במקום השני – הקרן הלאומית הסינית למחקר בסיסי. ה-NSF ו-NASA האמריקאיים במקום השלישי והרביעי.

איור 16: גופי המימון העיקריים שמופיעים ברשימות הספונסרים של פרסומים בנושאי חקלאות מדייקת בשנים 2015-2019



2.2.6 בקשות לפטנטים

מספר הבקשות לפטנטים שהוגשו ל-USPTO בקטגוריית חקלאות מדייקת עלה פי 8 במהלך העשור החולף.

איור 17: מספר הבקשות לפטנטים בקטגוריית Precision Agriculture לפי נתוני USPTO 2001-2020



³³ התפלגות גופי המימון על בסיס מספר הפרסומים לא בהכרח משקפת את התפלגות ההשקעות

היתרונות והאתגרים שלהלן וההמלצות הם תולדה של ראיונות עומק עם מומחים בתחום האגרוטק³⁴.

היתרונות והאתגרים של ישראל בתחום חקלאות מדייקת/חקלאות חכמה

לישראל יש מספר יתרונות שבזכותם היא יכולה להיות מובילה בתחום הפיתוח בחקלאות חכמה:

- ישראל היא ארץ קטנה עם מגוון סוגי אקלים, קרקעות, גידולים- כמו מעבדה. יש בה אקלים סאב-טרופי, שהוא אקלים המאפיין את רוב האזורים בעולם הסובלים מבעית מזון. במקומות כאלו פתרונות חקלאיים חדשים יכולים להיות עם אימפקט.
- ישראל היא מדינה בעלת משאבים מוגבלים (למשל אדמות ומים). הצורך לאחריות בשימוש במשאבים מכתוב מציאת פתרונות שאפשר לנסות או ליישם בישראל. (מציאות זו יכולה להסביר את הצלחת נושא המיכון החקלאי בשנות ה-60 והצלחת טכנולוגיות צבאיות ישראליות שאומצו לצרכים אזרחיים)
- החקלאות בישראל מתקדמת, הפרוטוקולים החקלאיים, השקיה, דישון וכו' הם ברמה גבוהה.
- בניגוד לאגרו-ביוטכנולוגיה ששם לוקח כ-10 שנים עד ליישום בתעשייה, בחקלאות החכמה לוחות הזמנים קצרים ואין צורך באישור FDA. מדינת ישראל הצליחה במקומות בהם הפתרון לשוק מהיר ולכן פיתוחים יוצאים הישר לעולם.

שילוב של יתרונות אלה עם Smart Agriculture הוא שילוב ייחודי. יש בישראל את כל הקצוות שאפשר לקשור כדי לקבל 'חבילת חקלאות חכמה' אבל כיום הרכיבים מפוזרים ומתבססים על חוקרים אינדיבידואלים. אין בארץ מרכזים של חקלאות מדייקת כמו באנגליה למשל, שם יש מרכזים לאומיים, כמו באוניברסיטת הרפר-אדאמס³⁵ ובאוניברסיטת לינקולן³⁶, שמוקדשים רק לנושא החקלאות החכמה. החל מינואר 2018 החל לפעול מאגד Phenomics (אותו מובילה חברת 'הזרע').

מהראיונות שקיימנו עם מומחים בתחום עולה שאין היום מענה לצורכי כוח אדם טכנולוגי בתחום:

1. אין מנגנון אקדמי מתאים שמכשיר כוח אדם בין-תחומי המשלב הייטק טכנולוגיה ומדעי החיים.
2. יש צורך בכוח אדם עם הכשרה יותר טובה במדעים המדויקים, במדעי הנתונים. חסרה גם הבנה בתהליכים כלכליים וחברתיים ויכולות של ניהול פרויקטים ושיתוף עם חו"ל.
3. חסר כוח אדם המצוי בבינה מלאכותית ויידרש להכשיר אנשים נוספים בשנים לבוא.

כיום כשמנסים למצוא אנשים שיעבדו בתחום של חקלאות מדייקת יש אנשים בשני קצוות: מהנדסים טובים עם ידע בתחום הטכנולוגי בלי ידע בחקלאות או אנשים עם חוש טכני והשכלה באגרונומיה שצריך להשלים להם את התחום הטכנולוגי. בחברות רואים את זה בצורה חד משמעית- מנסים לפתח משהו חדשני, אבל הידע הוא אגרונומי בלבד וחסר ידע טכנולוגי.

א. שילוב חקלאות וטכנולוגיה באקדמיה

העוסקים כיום בתחום מגיעים מהכשרות שונות של הנדסה כגון: מחשבים, חשמל, מכונות, ניהול ועוד, שלמדו באופן עצמאי את תחומי מדעי החיים. יש גם כאלו שלמדו מדעי החיים חקלאות והתמחו באופן עצמאי בנושאי הנדסה.

בנושא של חקלאות מדייקת או המהפכה הדיגיטלית שנכנסה לחקלאות ההזדמנות או האימפקט הגדול טמון באינטרדיסציפלינריות. היתרון של ישראל הוא בשילוב של חקלאות עם תחומי החוזק של ישראל בהייטק.

³⁴ המומחים אותם ראיינו הם: דר' ויקטור אלחנתי, הנדסה חקלאית, הנדסת מערכות חישה, מידע ומיכון, מכון וולקני, פרופ' שמעון גפשטיין, נשיא המכללה האקדמית כנרת, פרופ' מאשה ניב, סגן דיקן למחקר הפקולטה לחקלאות מזון וסביבה של האוניברסיטה העברית (רחובות), קלמן קאופמן, יזם, מרכז כנרת לחדשנות ויזמות בתחום ה-AGRO-TECH, מנש (מנשה) שלום, מנכ"ל צמח מפעלים ומשקי עמק הירדן, פרופ' יצחק שמולביץ, פרופ אמריטוס - הפקולטה להנדסה אזרחית בטכניון, פרופ' מאשה ניב ודר' רפי לביא.

³⁵ [/https://www.harper-adams.ac.uk](https://www.harper-adams.ac.uk)

³⁶ [/http://agrifoodtech.blogs.lincoln.ac.uk](http://agrifoodtech.blogs.lincoln.ac.uk)

בעולם מפותח הנושא של יישום בשדה של חקלאות מדייקת, מערכות שמנצלות את הידע שנוצר באמצעות מערכות החישה ומערכות המידע, אבל זה לא קורה בישראל. יש מקומות בארץ שנוגעים בזה, אבל כתחום בפני עצמו- אין אף מקום בישראל שאפשר לקבל בו השכלה מולטי-דיסציפלינרית כוללת.

חסר מסלול המשלב חקלאות וטכנולוגיה. קשה לדעת אם נדרשת פקולטה או מסלול או מה הדרך לתת את ההכשרה. זה דומה במידה מסוימת לנושא של ביו-רפואה. פעם לא הייתה בטכניון פקולטה הנדסה ביו-רפואית, רק תואר שני ואז הקימו את הפקולטה כמשלבת את שני הכיוונים, טכנולוגיה ורפואה.

מרכז חקלאות חכמה ישלב בין אנשי טכנולוגיה שרוצים להתמחות בחקלאות או אנשי חקלאות שרוצים לשלב טכנולוגיה בהשכלה שלהם.

אחד המודלים האפשריים הוא מודל של לימודי בסיס במדעים ולימודים גבוהים בהנדסה. כל התעשיות שמתעסקות עם חומרים טבעיים ירוויחו מהמודל. מדובר בתוכנית שאליה יגיעו מהנדסים מתחומים שונים: כימיה, ביו-רפואה, מכונות, תעשייה וניהול וכו', אנשים שיש להם תואר הנדסי או מדעי ויוכשרו לנושא בין דיסציפלינרי. הרעיון הוא לדלג על התואר הראשון, כל תואר הנדסי או מדעי יכול להיות להתאים לצורך העניין, ולתת השלמות מדעית/הנדסית לטובת מהנדסים שמכירים חומרים טבעיים וגם יודעים לעסוק בהנדסה. התוכנית המתקדמת צריכה להיות צמודה לפקולטה או לתוכנית כמו מערכות אוטונומיות.

בפקולטה לחקלאות מזון וסביבה של האוניברסיטה העברית מנסים לפתח אשכול או חטיבה שיעסקו ב- smart Agriculture או ב-Precision Agriculture. לא מדובר בבניית מרכז חדש, אלא בהידוק שיתוף הפעולה בין חוקרים בתחום.

בטכניון סגרו את נושא ההנדסה החקלאית עקב חוסר ביקוש. עם זאת בינתיים חלה עלייה קלה בביקוש ללימודי חקלאות. בפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה של האוניברסיטה העברית ברחובות הייתה ירידה גדולה בכמות הלומדים לפני 10 שנים, והיום יש התעוררות של כאלו שרוצים ללמוד ולעבוד בתחום. חברות בעולם מחפשות פיתוחים בביו-לוגיה ובהיי טק בתחום החקלאות והמזון. הסגירה של מסלול הנדסה חקלאית בטכניון התרחשה דווקא בתקופה שחקלאות היא נושא מדובר ויש הרבה עסקאות בתחום. הסגירה בוצעה על רקע חוסר רצון של הסטודנטים ולא על רקע הנדסי. **בהצגה נכונה יותר של תחום החקלאות החכמה יתכן שיהיה אפשר להגדיל את מספר הסטודנטים.**

הנושא של חקלאות מדייקת צפוי להמשיך ולצמוח מסיבות שונות של בריאות, הספקת מזון הקטנת עלויות של יצור מזון, הגברת איכותו ועוד. יש לייצר תוכניות אקדמיות לבוגרי הנדסה מחד ומאידך לבוגרי מדעי החיים לתואר שני ושלישי ולייצר מבוגרים אלו "קטרים" לחממות טכנולוגיות למוצרי אגרוטק וחקלאות מדייקת שייצרו דרך הדגמות את השינויים בשרשרת יצור המזון.

ב. תשתית של חקלאות חכמה

ישראל צריכה ליצור **תשתית לאומית של חקלאות חכמה** שתהיה בה גישה לציוד תשתיתי למחקר שקבוצות בודדות לא יכולות לגייס. בעבר היה ניסיון ליצור מרכז כזה דרך פורום תל"ם, אבל הנושא לא התקדם וגווע. מרכז כזה יכול להיות מרוכז על ידי מכון וולקני, בשיתוף פעולה עם האוניברסיטאות שיש בהן פעילות בנושא: הטכניון, אוניברסיטת חיפה, אוניברסיטת תל אביב, האוניברסיטה העברית, אוניברסיטת באר שבע (שיש לה מרכז לחקלאות בשדה בוקר) ובר אילן.

4 מקורות לסקר ספרות אגרוטק/חקלאות מדייקת

אילון, א., פרוינד קורן, ש., ליבס, ע., & זרביב ציון, מ. (2016). תעשיית הטכנולוגיות החקלאיות החדשניות בישראל. חיפה.

אסיף, ש. (2016). אגרו-טכנולוגיה בישראל- חסמי צמיחה וכלים לתמיכה. ירושלים. Retrieved from <http://milkeninnovationcenter.org/wp-content/uploads/2016/10/107-HB-F-W-Sheri.pdf>

בקרמן, ל., & ממו, ב. (2012). ישראל כמרכז חדשנות גלובלי בתחומי האגרוטק- דו"ח לוועדה למינוף המו"פ החלקאי בישראל. Retrieved from <http://most.gov.il/Molmop/Reports/Documents>. PDF. חדשנות-אגרוטק.

המועצה להשכלה גבוהה. (2017). לקט נתונים לקראת פתיחת שנת הלימודים האקדמית תשע"ח – Retrieved from <http://che.org.il/wp-content/uploads/2017/10/%D7%94%D7%95%D7%93%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%A2%D7%99%D7%AA%D7%95%D7%A0%D7%95%D7%AA-%D7%AA%D7%A9%D7%A2%D7%97.pdf>

AgFunder. (2016). Agtech investing report Year Review 2016. Retrieved from <file:///C:/Users/oshrat/Downloads/AgFunder-Agtech-Investing-Report-2016.pdf>

.Cleantech Group. (2016). CTG Insights

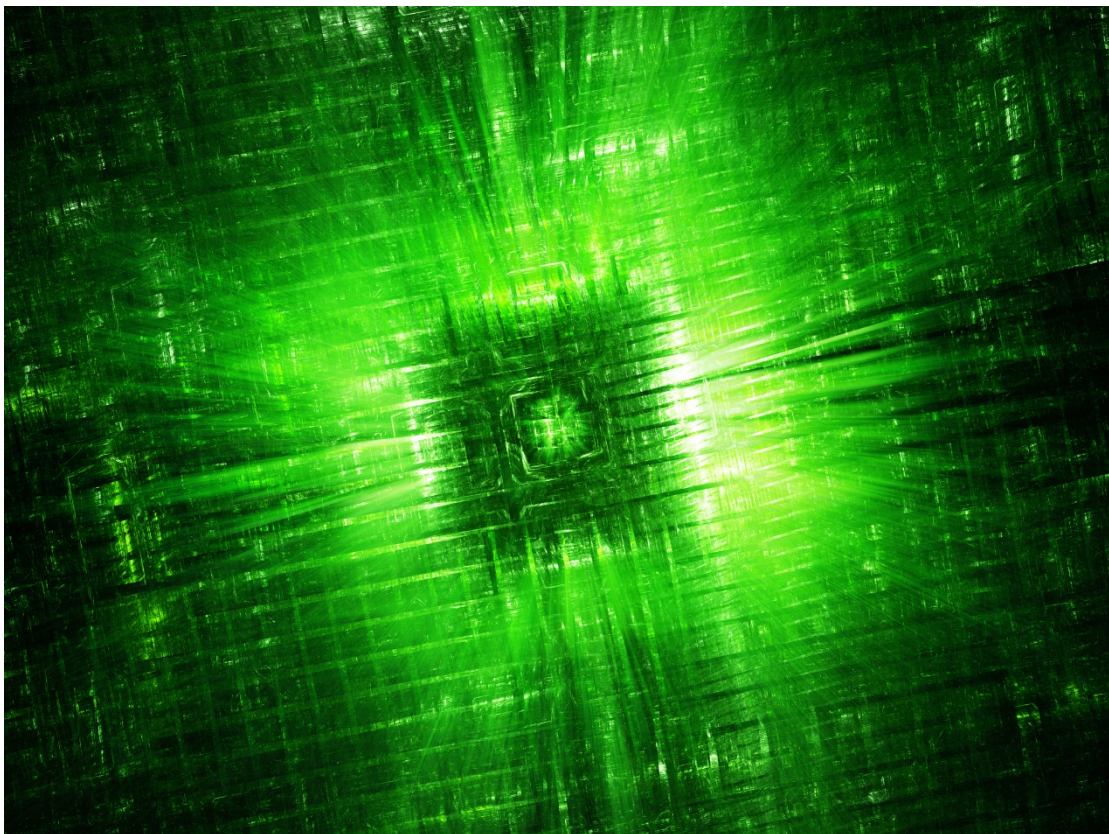
Goedde, L., Horil, M., & Sanghvi, S. (2015). Pursuing the global opportunity in food and agribusiness. Mckinsey Quarterly. Retrieved from http://www.mckinsey.com/insights/Food_Agriculture/Pursuing_the_global_opportunity_in_food_and_agribusiness?cid=other-eml-alt-mip-mck-oth-1507

Start-Up Nation Central. (2017). Agritech Report 2017. Retrieved from http://mlp.startupnationcentral.org/rs/663-SRH-472/images/Agritech_Report_2017.pdf?mkt_tok=eyJpIjoiTIRjMk5ESXIZVEkxTVRjYdYsInQiOiJrVjEySjVTV3FmbiNUdIBXdEVzYIZ0UzVWTjFLd3dcL0cyWkc1XC9rVGxYSU9JaTBjMFBpdzkrV2pjZFltdVNDcWdUNmh4aThXRXFgaWljWGpxUGVcL1BGUytiQ3NQ

Startup Nation Central. (2017). AgriTech Map. <http://lp.startupnationcentral.org/agri-map/>

פוטוניקה

ופוטוניקה אינטגרטיבית



פוטוניקה הוא תחום מדעי וטכנולוגי המשותף להנדסת חשמל ופיזיקה ושורשיו מאלקטרואופטיקה והאופטיקה, העוסק ביצירה, הגברה, העברה, גילוי, אפנון ועיבוד של חלקיקי אור - פוטונים. התחום מכסה את כל היישומים הטכנולוגיים של האור לכל אורך התחום הספקטרוני החל מאולטרה סגול דרך האור הנראה ועד לתת אדום הרחוק. המונח פוטוניקה התפתח בשנות השישים והשבעים עם המצאת דיודת הלייזר והסיבים האופטיים. זהו תחום רחב מאוד של טכנולוגיות ויישומים במגוון תחומים כולל תקשורת אופטית, רפואה, צבא ועוד.

ערך השוק העולמי של יישומי פוטוניקה הוערך בשנת 2019, ב- 686.86 מיליארד דולר, והוא צפוי להגיע לשווי של 1,080.3 מיליארד דולר עד 2025, לפי שיעור גידול ממוצע שנתי של (CAGR) של 7.89% בתקופת התחזית (2020-2025). אפליקציית פוטוניקה מבוססת סיליקון היא המניע של שוק הפוטוניקה. לייזרי סיליקון היברידיים (סיליקון וקבוצת מוליכים למחצה III-V) משמשים ביישומי טלקומוניקציה ומרכז נתונים, דבר שנותן את היתרון של תכונות פולטת אור של חומרים מוליכים למחצה III-V. ההתקדמות הטכנולוגית בטכנולוגיות מבוססות אור הובילה את גל החדשנות באמצעות מתן פתרונות ברי-קיימא לאתגרים העולמיים, אשר זוהו כגורם מניע מרכזי לשוק העולמי. עם זאת, בשל העלות הגבוהה של היישומים של מוצרי פוטוניקה, השוק צפוי להתמודד עם אתגרים בעתיד.³⁷

לפי דו"ח אוסטרלי (Lieberman et al., 2017), שוק הליבה של רכיבי פוטוניקה לבדו (להבדיל ממוצרי פוטוניקה, יישומים מבוססי פוטוניקה ושירותים מבוססי פוטוניקה)³⁸ (Anderson, 2015) מספק תעסוקה לכ-863,000 אנשים ב-50 מדינות. כ-3,000 חברות פועלות בשוק הליבה, ומייצרות הכנסות של כ-182 מיליארדי דולרים בשנה. הגידול הצפוי בביקוש למוצרי פוטוניקה יביא לגידול גם בביקוש לעובדים. מוצרים ושירותים חדשים שיתבססו על רכיבי ליבה אלו יביאו לגידול היצע של כוח עבודה מיומן בתחום הפוטוניקה, בכל רמות הפיתוח הטכנולוגי, החל ממו"פ בסיסי ועד פרויקטי פיילוט לפני העברה לייצור המוני ולכל אורך שרשרת הייצור, ממנהלים ועד עובדי רצפת ייצור. יש צורך ביצירת מיומנויות בתחום הפוטוניקה על מנת לאפשר את התפתחות התעשייה בתחום (European Technology Platform Photonics, 2017).

סיליקון פוטוניק (פוטוניקה אינטגרטיבית) היא טכנולוגיה בה מועברים נתונים בין מרכזי נתונים על ידי שימוש בקרניים אופטיות שיכולות להעביר מידע רב יותר, למרחקים ארוכים יותר ובקצב מהיר יותר, מאשר במוליכים אלקטרוניים. בטכנולוגיה זו, סיבים אופטיים בנויים ישירות על שבב מוליכים למחצה כדי לשפר את מהירות העברת הנתונים. ניתן לייצר מכשירים מבוססי סיליקון פוטוניק בטכנולוגיות ייצור שונות. עם זאת, מכיוון שרוב השבבים האלקטרוניים מיוצרים כיום על מצעי סיליקון, ניתן ליצור מכשירים היברידיים שיש בהם רכיבים אופטיים ואלקטרוניים משולבים על צ'יפ אחד. למכשירים מבוססי סיליקון פוטוניק יש יישומים בתחומים שונים, כולל תקשורת אופטית, נתבים אופטיים ומעבדי אותות, טלקומוניקציה ארוכה, תצוגת שדות אור ועוד. היישום שלהם בתקשורת אופטית מהווה את נתח השוק הגדול ביותר. הגדלת הביקוש לתקשורת במהירות גבוהה עם פחות שיבושים היא אחד הגורמים העיקריים שגורמים לביקוש למעגלים משולבים פוטוניים. השוק העולמי של מעגלים משולבים פוטוניים (Photonic Integrated Circuit (IC), צפוי להגיע לכ- 2.25 מיליארד דולר עד שנת 2025 ו-CAGR של 27.6% בין השנים 2019-2025.³⁹

הגורם שהניע את התעשייה למציאת האלטרנטיבה של מעגלים משולבים פוטוניים (PIC- photonic integrated circuit), היתה המגבלה שקיימת במעגלים אלקטרוניים משולבים (electronic integrated ICs)

³⁷ <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/photronics-market-market>

³⁸ **דוגמאות לרכיבי פוטוניקה** (כל הדוגמאות מובאות מתוך Anderson, 2015):

. optical filters, gratings, optical fiber, LEDs, lasers, detectors, image sensors, lenses, prisms

דוגמאות למוצרי פוטוניקה:

. markers, manufacturing and inspection systems, LED lamps, cameras, displays, optical scanners

דוגמאות ליישומים מבוססי פוטוניקה:

datacenters, smart phones, vision systems, TVs, medical imaging systems & Lighting, internet

דוגמאות לשירותים מבוססים פוטוניקה:

e-commerce, Internet, streaming video and audio (music), cloud storage services

³⁹ [https://www.marketwatch.com/press-release/photonic-integrated-circuit-ic-market-size-status-global-outlook-](https://www.marketwatch.com/press-release/photonic-integrated-circuit-ic-market-size-status-global-outlook-2019-to-2025-2020-04-25?mod=mw_more_headlines&tesla=y)

2019-to-2025-2020-04-25?mod=mw_more_headlines&tesla=y

(circuits) של מספר גדל והולך של טרנזיסטורים על מצע סיליקון בודד. מעגלים משולבים פוטוניים פותחו כדי לספק מהירות גבוהה יותר, בגודל קטן יותר ובפונקציונליות מתקדמת.

רשתות חשמל מסורתיות, המורכבות מאוסף מתגים אלקטרוניים (עם רכיבים חשמליים שונים) מחוברים ביניהם באמצעות רשת של חיבורי סיבים אופטיים דרך רשתות מקומיות, מטרופוליטניות או רשתות רחבות (WANs). על מנת לספק מענה לדרישה הגוברת לרוחב פס וגמישות. רשתות אלה עוברות שינוי מתמיד על ידי הוספת מתגים וסיבים נוספים, הגדלת הקצב לסיב ושדירוג הגודל והפונקציונליות של המתגים. רשת מוגברת כזו מובילה בסופו של דבר לרשתות מורכבות וגדולות שהינן יקרות וקשות להתקנה, הפעלה ותחזוקה. התפתחות הטכנולוגיה האופטית מבטיחה רשת אופטית מהפכנית שתוביל לשיפור כלכלי, גמישות וחוזק תוך שימוש בביסי הסיבים הקיים.

מעגל משולב פוטוני דומה ל IC-אלקטרוני. בעוד שהאחרון משלב קבלים, טרנזיסטורים ונגדים רבים, PIC משלב רכיבים אופטיים מרובים כגון מודולאטורים (modulators), לייזרים, גלאים, multiplexers, demultiplexers, attenuators ומגברים אופטיים. PICs בקנה מידה גדול, בדומה למקביליהם האלקטרוניים בקנה מידה גדול, מגדילים את היקף האינטגרציה, בשל עשרות רכיבים אופטיים המשולבים במכשיר אחד.

נכון לעכשיו, מכשירי PIC משולבים בהצלחה במכשירים קטנים כמו מכשירים ניידים ומכשירי רדיו, והם צפויים לשמש בפעולות RF וחשיפה מתקדמות. תחום הפוטוניקה של הסיליקון תפס תאוצה רבה מכיוון שהוא מאפשר ייצור זול של מכשירים אופטיים, תוך שימוש בטכניקות ייצור סטנדרטיות, המשולבות בשבב מיקרואלקטרוני.

1.1 Roadmap-ה של מעגלים משולבים פוטוניים

קצב תעבורת הנתונים חווה גידול דרמטי בעידן שבו משתמשי קצה צורכים אפליקציות, שירותים ותכנים וויזואליים ברשת. בדור החמישי של התקשורת, יישומי תקשורת מורכבים ומתקדמים, כמו מציאות מדומה, מציאות רבודה, ערים חכמות, רכבים אוטונומיים ו-LoT, יגבירו משמעותית את צרכי תעבורת הנתונים. בעתיד ייווצר צורך להזרמת נתונים ברוחב פס גבוה, שתאפשר למשתמשי הקצה לצפות בווידיאו באיכות גבוהה גם במכשיר הנייד, להוריד קבצים במהירות, ולחבר התקני IoT רבים לרשת. הפתרון טמון בשימוש בתקשורת נתונים אופטית המבוססת על סיבים אופטיים שעשויים מסיליקה. הסיבים האופטיים אינם מתכלים ומאפשרים העברת מידע בקצב גבוה למרחקים ניכרים. כבר כיום התקשורת האופטית משמשת כתשתית לתעבורת נתונים, מספקות השרות ועד לצרכן הביתי במודל Fiber to Home. גם הסלולאר נתמך ע"י תקשורת אופטית.

יצור שבבי סיליקון-פוטוניים עובר מהפכה הודות לשיפורים טכנולוגיים, שמאפשרים לייצר התקנים אלקטרוניים בסיליקון בגודל ננו, לשלב התקנים פוטוניים על גבי סיליקון, לממש אותם בפלטפורמות של System on the chip, המתאפיינת באינטגרציית רכיבים אלקטרוניים ופוטוניים, שמקטינות את עלויות הייצור ואת הסיבוכיות הנלווית. כלומר, אותה טכנולוגיה ששימשה לייצור רכיבים אלקטרוניים משמשת כיום לייצור רכיבים פוטוניים ומערכות אלקטרוניות ואופטיות משולבות.

טכנולוגיית סיליקון פוטוניקס מאפשרת לממש פונקציות מתמטיות מורכבות לעיבוד אותות באמצעות התקנים פוטוניים. תכונה זו היא שמאפשרת להוריד את מגבלת המהירות של רכיבים אלקטרוניים, ולצורך עיבוד אותות להשתמש במערכות אופטיות שמאפשרות עיבוד בקצב גבוה יותר תוך שהן מקטינות את זמן ההשהיה לעיבוד האותות, שנקבע על ידי גודל הרכיב ומהירות ההתפשטות של האות בהתקן. כמו כן, עקב הפסדי האור הקטנים בהתקנים הללו, מתבטל הצורך בקירור ההתקנים כמעט לחלוטין, דבר שיוביל לחסכון של עד 50% מצריכת האנרגיה של מערכת ממוצעת.

המחקר בפוטוניקת סיליקון החל בסוף שנות השמונים והפך מאז לאחד מתחומי המחקר המרכזיים. הטכנולוגיה משתמשת בלייזר בכדי להעביר נתונים באמצעות פולסים של אור. multiplexer משמש לשילוב כל פולסי האור הללו לאות בודד שניתן להעביר דרך סיב אופטי אל קולט סיליקון, שם demultiplexers משמשים לפענוח פולסי האור כדי להשיג את הנתונים המקוריים.

אחד האתגרים העיקריים העומדים בפני תחום פוטוניקת הסיליקון הוא העובדה שמכשירי הלייזר המייצרים את קרני האינפרא אדום (IR) הנושאים את הנתונים, צורכים כמות גדולה של כוח. המחקר הרב בתחום פוטוניקת הסיליקון הביא לשילוב חומרים שונים כדי לשפר את יכולת ההולכה של ה-IR של הסיליקון.

1.2 התפלגות השוק לפי יישומים

התפתחות תחום המעגלים המשולבים הפוטוניים (PIC) מתרחשת במידה רבה על בסיס היישום שלהם במגוון תחומים. היישומים העיקריים שבהם משתמשים במעגלים משולבים פוטוניים הם: ביו-פוטוניקה, חישה ויישומים נוספים שבהם PIC מתפקדים בצורה שונה. היישום הרב ביותר הוא בתחום התקשורת האופטית, והוא צפוי להמשיך ולהוביל את השוק. נתח השוק של יישומי סיליקון של מעגלים משולבים פוטוניים בתקשורת אופטית עומד כיום על 59.4%.

הירידה שחלה בעלויות המחקר והפיתוח וקיצור זמני הפיתוח הניעה את שוק היישומים של PIC ובעתיד צפוי שהמחיר של יישומים אלה ירד באופן משמעותי עם העלייה בהיקף הייצור של ציפים אלה. צריכת חשמל מופחתת ויעילות גבוהה יותר צפויים גם הם להשפיע באופן חיובי על הביקוש לפוטוניקה סיליקון. ניתן להתגבר על סוגיות הקשורות למכשירי IC אלקטרוניים, באמצעות שימוש ב-PICs, היות שהם מציעים פחות פיזור ותורמים לצריכת חשמל מופחתת. השימוש ב-PICs במקורות אור במצב מוצק, כמו במנורות LED, הראה ביצועים טובים כמעט כמו של כל המקורות האחרים מבחינת יעילות הספק. לשימוש ב-PICs במקורות אור במצב מוצק, יש פוטנציאל לחסוך כ- 50% מהאנרגיה, ואף יותר מכך כאשר השימוש נעשה במערכות ניהול אור חכמות. לפיכך, יעילות ההספק הגבוהה המוצעת על ידי PICs צפויה להמשיך ולהניע את השוק בשנים הקרובות.

סיליקון פוטוניקס ליישומי תקשורת

בדור החמישי של התקשורת, יישומי תקשורת מורכבים ומתקדמים, כמו מציאות מדומה, מציאות רבודה, ערים חכמות, רכבים אוטונומיים ו-IOT, יגבירו משמעותית את צרכי תעבורת הנתונים. שירותי הדור הרביעי הקיימים היום דורשים קצב תעבורת נתונים של כ-100 מגה-ביט/שנייה בממוצע, באיכות HD. לעומתם, שירותי התקשורת של הדור החמישי ידרשו הרבה יותר. דבר המצריך הרחבה של רוחב הפס הקיים. דרישה הכרחית נוספת הינה זמן שהייה של פחות ממילי-שנייה. לדרישה זו תהיה השפעה חזקה הן על הרכיבים והן על ארכיטקטורת המערכת בה הם כלולים, אשר כפועל יוצא צריכה לקצר מסלולי תעבורה ולאפשר הקטנה משמעותית של זמן התעבורה והתפשטות הנתונים והאותות במערכת. מגמה זו מביאה להיווצרות של עומסים חסרי תקדים על רשתות התקשורת האלחוטית, וספקיות התקשורת נתקלות באתגר ההולך וגדל של תעבורה גבוהה על תשתית שמתפרסת למרחקים, תחת מגבלות של רוחב פס ברשת המבוססת בסופו של דבר על תקשורת קווית.

הפתרון טמון בשימוש בתקשורת נתונים אופטית המבוססת על סיבים אופטיים שעשויים מסיליקה. הסיבים האופטיים אינם מתכלים ומאפשרים העברת מידע בקצב גבוה למרחקים ניכרים. כבר היום ניתן לראות שהתקשורת האופטית חודרת לכל מקום כתשתית לתעבורת הנתונים, החל מספקיות השירות ועד לצרכן הביתי במודל FIBER TO HOME. גם הסלולר נתמך כיום על-ידי תקשורת אופטית וגם מתקני דאטה סנטר עושים בהם שימוש. הקישורים האופטיים ישמשו גם להעברת מידע בתוך השרת עצמו, על-גבי המעגל המודפס, ואף בתוך השבב.

יותר ויותר שימוש ב-PICs נעשה במערכות תקשורת אופטיות, בהן יש להעביר כמות גדולה של נתונים, במהירות גבוהה לאורך מרחק רב. פוטוניקה צפויה להיות הטכנולוגיה המאפשרת לכל טכנולוגיות הפס הרחב האלחוטיות והקוויות העתידיות. שילוב של PICs עם אלקטרוניקה בחבילה אחת (כמו FPGA) מסייע בהפחתת צריכת החשמל, בצפיפות, בעלויות ושיפור שיעורי העברת הנתונים, מבלי לשבש את רמת הביצועים.

יישום התקשורת האופטית בפוטוניקה מיקרוגל/RF החזיק בנתח השוק הגדול ביותר ב-2016 וצפוי להמשיך ולהוביל את השוק.

היישום של מעגלים משולבים פוטוניים באירופה החזיק בנתח השוק הגדול ביותר בשנת 2016, עם הכנסות של 102 מיליון דולר. עם זאת, אסיה-פסיפיק צפויה להיות המגזר הצומח במהירות הרבה ביותר ותוביל את השוק עד 2022.

השוק העולמי עבור מעגלים משולבים פוטוניים ביישומי תקשורת אופטית הוערך בשנת 2017 בכ-320 מיליון דולר והוא צפוי להגיע ל-1 מיליארד דולר עד 2022, CAGR של 26.5%.

1.3 חישה Sensing

השימוש ב-PIC ליישומי חישה הוא שוק אטרקטיבי, שמציע רגישות גבוהה, תגובה מהירה, חסינות אלקטרומגנטית, קומפקטיות ואינטגרציה בעלות נמוכה עם מכשירים אלקטרוניים בתחום החישה האופטית. יתרונות אלה סייעו ל-PICs לספק מענה ליישומי החישה של תעשיות שונות, כולל רכב, בנייה, תעשיות, אווירונאוטיקה, חלל, רפואה וביוטכנולוגיה. שילוב הפונקציונליות שמציע PICs ומעגלים אלקטרוניים מאפשרים לחיישנים פוטוניים למדוד מגמות מרובות פרמטרים בו זמנית ובמדויק. בנוסף, תקנות ורגולציה ממשלתית צפויים להאיץ את ההתפתחות של חיישנים פוטוניים.

הנדסת מבנים היא פלח היישומים הגדול ביותר ליישום מעגלים משולבים פוטוניים בחישה. ההיקף הגדול והשילוב האפקטיבי של רכיבים אופטיים, העונים על הביקוש הגבוה הם שני הגורמים העיקריים המזינים את הביקוש בפלח יישומים זה. חיישנים משמשים לשליטה במגוון מפרטים וניתן לשפר אותם באמצעות רכיבים פוטוניים.

הובלה וחלל תעופה הוא המגזר הצומח במהירות הרבה ביותר. PICs מספקים פתרונות יעילים להתמודדות עם אתגרים קריטיים כמו חשיפה לטמפרטורה וחומרת הקרינה הקשורה לתעשיית התעופה והחלל. גירוסקופים עוזרים בזיהוי מיקום ומעקב אחר שינויים במהלך התנועה. מערכות פיקוח מפקחות על יעילות רכבים מבחינת מעגלים פנימיים שונים ברכב. המערכת מזהה את התקלה באמצעות מקלטים העשויים מרכיבים אופטיים.

היישום של חישה באנרגיה ושירותים, החל מ-LED יעיל שמוריד את צריכת האנרגיה, לפאנלים של אנרגיה סולארית, המגדילים את ייצור האנרגיה המקומית וחיישנים אופטיים המאפשרים לחברות נפט וגז להפיק משאבים חדשים בבטחה, ל-PICs יש פוטנציאל לעצב מחדש את צריכת האנרגיה העתידית, להיות יעילה, נקייה ובטוחה יותר. בשל הדינמיקה המשתנה והדרושים הגבוהים לדיוק, משתמשים במעגלים משולבים פוטוניים כדי למדוד חישה פוטו-וולטאית ורמה גבוהה של חישה חשמלית במהירות גבוהה יותר. היקף מוגבר זה עזר לשוק לצמוח.

השוק בצפון אמריקה ליישום מעגלים משולבים פוטוניים בחישה החזיק בנתח הגדול ביותר בשנת 2016 וצפוי להמשיך ולהוביל את השוק. עם זאת, אסיה-פסיפיק היא השוק הצומח במהירות הרבה ביותר בשווי של 14 מיליון דולר בשנת 2016. השוק העולמי למעגלים משולבים פוטוניים ביישומי חישה הוערך בכ- 86 מיליון דולר ב-2017 וצפוי להגיע ל 303 מיליון דולר עד 2022, CAGR של 28.6% משנת 2017 עד 2022.

1.4 ביו-פוטוניקה Bio-photonics

ביו-פוטוניקה הוא מונח המתייחס לשילוב של ביולוגיה ופוטוניקה. ביו-פוטוניקה משמשת בהדמיה ואבחון, ומסייעת בחקר מולקולות ביולוגיות בתאים וברקמות. השוק האירופי ליישום מעגלים משולבים פוטוניים בביו-פוטוניקה החזיק בנתח השוק הגדול ביותר בשנת 2016 וצפוי להמשיך ולהוביל את השוק. עם זאת, אסיה פסיפיק הוא השוק הצומח במהירות הגדולה ביותר המוערך ב-7 מיליון דולר ב-2016. השוק העולמי ליישום מעגלים משולבים פוטוניים בביו-פוטוניקה הוערך ב-65 מיליון דולר בשנת 2017.

1.5 עיבוד אותות אופטי Optical Signal Processing

ביקוש מוגבר לרוחב פס גבוה ושיעורי העברת נתונים, הניע את הצורך ברשתות עיבוד אותות אופטיים. ברשתות כאלה האותות האופטיים המהירים אינם תלויים במודולציה ובפורמט הסיב והם מועברים מקצה לקצה ללא המרה יקרה OEO (אופטי-חשמלי-אופטי). PICs משמשים להעברת אותות בזמן תגובה הרבה יותר קצר. זה בתורו, מגדיל את מהירות העברת הנתונים ללא או במינימום הפסדים, אפילו בקצה ה-plug-ins של התקני סיבים אופטיים. החלק העיקרי באבולוציה זו צפוי להיות פיתוח של מכשירי PIC המסוגלים לפעול במהירות של 40 ג'יגה-ביט לשנייה. לפיכך, הביקוש למכשירי עיבוד אותות אופטיים בעלי ביצועים גבוהים, מהירות גבוהה ויעילות גבוהה, צפוי לעלות משמעותית.

מטרולוגיה אופטית הינה המגזר הגדול ביותר בשוק ליישום מעגלים משולבים פוטוניים בעיבוד אותות אופטיים וצפוי להמשיך ולהוביל את השוק. מגזר המטרולוגיה האופטית הוערך ב-32 מיליון דולר ב-2016. עקב מדידת הנתונים המדויקת שלהם או מדידת נתונים עם טעויות קלות, במהלך מדידת מרחק/תזוזה ואורך גל

וכיול PDL/PDM, קיים ביקוש גבוה ל-PICs. העברת נתונים ללא אחור בזמן, מספקת תוצאות יותר מדויקות מכל מעגל אלקטרוני.

מכשור אופטי הוא גם היישום העיקרי לעיבוד אותות אופטי בשווי 13 מיליון דולר בשנת 2016 וצפוי להגיע ל 37 מיליון דולר עד שנת 2022, CAGR של 16.8% משנת 2017 ועד 2022.

היישום של מעגלים משולבים פוטוניים בעיבוד אותות אופטיים באירופה החזיק בנתח השוק הגדול ביותר בשנת 2016. עם זאת, הוא צפוי לאבד את נתח השוק בגלל שיעורי צמיחה יציבים ושוק מבוסס היישומים של מעגלים משולבים פוטוניים בעיבוד אותות אופטיים הוערכו ב-21 מיליון דולר ב-2016. השוק העולמי ליישום מעגלים משולבים פוטוניים בעיבוד אותות אופטיים מוערך בשווי של כ-68 מיליון דולר ב-2017 וצפוי להגיע ל-246 מיליון דולר עד שנת 2022, CAGR של 29.3%.

קיימים יישומים רבים אחרים שפוטוניקת הסיליקון יכולה לאפשר, שכוללים מחשבים בעלי ביצועים גבוהים, טלקומוניקציה, חיישנים, מדעי החיים, מחשבים קוונטיים ויישומים מתקדמים אחרים. שני יישומים מעניינים במיוחד שמתאפשרים בשל העובדה שפוטוניקת סיליקון יכולה לדחוף את שילוב הפונקציות האופטיות והמזעור עוד יותר כדי להשיג מוצרים כמו: חיישן לייזר שנקרא LIDAR (ראשי תיבות של Light Detection and Ranging) מסוגל למדוד את המרחק של הרכב מעצמים בסביבתו בדיוק של עד שני סנטימטר באמצעות הבזקי אור קצרים וחיישנים ביוכימיים וכימיים.

בתוך שוק של מערכות סיוע לנהג (ADAS) שצפוי להגיע ל-3,9 מיליארד דולר בשנת 2017, LIDAR מבוסס סיליקון פוטוני ישחק תפקיד מפתח. היישום השני הוא של קבוצת Photonic Microsystems של MIT שמבצעת פרויקט מוצלח של DARPA, תוך שימוש בפוטוניקה של סיליקון (on-a-chip with steerable transmitting and receiving phased arrays and on-chip Ge photodetectors). חיישנים ביוכימיים וחיישני גז אינם חדשים, ויש להם כבר מספר יישומים. העניין בחישה הגז (Gas sensing) מקבל חשיבות בשל הופעתם של יישומים ניידים גדולים. שילוב חיישני ביוכימיה או גז בטלפונים חכמים או לבישים נמצא כרגע במפת הדרכים של חברות רבות, אך סוגיות של גודל, עלות ורגישות עדיין לא נפתרו. כדי להרחיק את המזעור של חיישן הגז האופטי, חברות מסוימות כבר שוקלות פוטוניקה של סיליקון כפלטפורמת אינטגרציה למכשירים שלהן. יישומי מרכזי נתונים אלה צפויים להגיע לכ-300 מיליון דולר בשנת 2025.

1.6 מרכזים מובילים בעולם בפוטוניקה אינטגרטיבית

שני המרכזים הגדולים בעולם בפוטוניקה אינטגרטיבית הם:

המכון האמריקאי לייצור רכיבים פוטוניים (AIM – American Institute for Manufacturing Integrated Photonics) שהינו איגוד ממשלתי-תעשייתי אמריקאי אשר מקים תשתיות ייצור והעברה טכנולוגית בתחום הפוטוניקה כדי להבטיח תשתיות ייצור PIC בארצות הברית (photonic integrated circuit). זה מרכז שהממשלה האמריקאית הקימה בהשקעה מאוד גדולה כדי לפתח את התחום הזה.

השני הוא **המכון לפוטוניקה משולבת (integrated photonics) באיינדהובן, הולנד**, אזור איינדהובן בהולנד נחשב למקום מספר 2 בעולם בתחום המיקרו-פוטוניקה. המכון לפוטוניקה משולבת פועל לצד הקונסורציום האקדמי-תעשייתי **Photon Delta** כדי לקדם את התחום באזור.

מרכז גדול נוסף לפוטוניקה אינטגרטיבית קיים ב- Fraunhofer בברלין.

2 תחום הפוטוניקה האינטגרטיבית בישראל

2.1 תעשייה בתחום הפוטוניקה והפוטוניקה אינטגרטיבית

בישראל יש מספר של חברות עוגן בתחום הפוטוניקה ובהן, אורבוסק (נסחרת ב-NASDAQ), רפאל, אפלייד מטיראלס, סינרון, אופיר אופטרוניקס, Given Imaging, סיוון טכנולוגיות מתקדמות, אלביט מערכות, Semi-Conductor Devices (SCD). בנוסף, יש מספר גדול (כ-300 חברות) של חברות קטנות, רובן חברות הזנק.

פרופ' אברהם קציר⁴⁰ מעריך שכ-10,000 בעלי מקצוע מועסקים בתחום האופטיקה והאלקטרואופטיקה בישראל, באקדמיה, במכוני המחקר ובכ-500 חברות, שרובן חברות הזנק. אנשי מקצוע אלו עוסקים בבי-פוטוניקה, מע' הגנה אלקטרו-אופטיות, תקשורת אופטית, התקנים אופטיים, ציוד בדיקה ובקרת איכות אופטי, אנרגיה מתחדשת ודפוס. לפי פרופ' קציר, החברה הישראלית הגדולה ביותר בתחום היא אל-אופ, שהמכירות שלה הן מעל מיליארד דולר לשנה. יש לפחות 15 חברות שמוכרות בסכום של מעל 100 מיליון דולר בשנה, וביניהן מובילאיי המפתחת מערכות ראייה למכוניות ורכבים אוטונומיים, התעשייה האווירית המפתחת מוצרים בתחום ההגנה, אינדיגו, המפתחת מערכות דפוס חדשניות, אורבוסק ו-applied Materials המפתחות מערכות לייזר לדיאגנוסטיקה ותיקון של מעגלים משולבים, GE Healthcare ופיליפס המפתחות מערכות בתחום הבריאות, לומניס המפתחת מערכות לייזר רפואי לניתוחים, סינרון ואלמה המפתחות מערכות לייזר לטיפולים אסתטיים, Given Imaging המפתחת גלולות הדמיה למערכת העיכול, SCD המפתחת סנסורי IR ולייזרים מתקדמים ורפאל המפתחת מערכות אלקטרו-אופטיות שונות, כולל לייזר בעוצמה גבוהה למטרות צבאיות.

שוק הפוטוניקה של הסיליקון עדיין צנוע עם מעט מאוד חברות בעלות מוצרים בשוק. מלאנוקס, סיקו, לוקסרה, אינטל, ST מיקרואלקטרוניקה, אקשיה, קבוצת מר, SEE Tree, Finisar Corporation, חברת סיון טכנולוגיות מתקדמות ומולקס הן חלק מהחברות המובילות בתחום. אין כמעט חברות ישראליות שמפתחות, רוב החברות מזמינות פיתוח של רכיבים מחברות בחו"ל (הולנד, מכוני פראונהופר ועוד)⁴¹.

איגוד תעשיות האופטרוניקה בישראל

איגוד תעשיות האופטרוניקה בישראל הוקם ב-2017 במסגרת איגוד תעשיות החדשנות עתירות הטכנולוגיה בהתאחדות התעשיינים. מקימי האיגוד מעריכים שהעמיד של תעשיית השבבים תלוי בהתפתחות תחום המיקרו-פוטוניקה. התפתחות זו תגרום לקפיצת מדרגה בכל תחומי הפוטוניקה. לכן חברות כמו אינטל משקיעות סכומי עתק בנושאים כמו סיליקון פוטוניקס וטכנולוגיות אופטיות. המיקרו-פוטוניקה תייצר סביבה תעשיות רבות של ציוד, מכשירי בדיקה ומדידה ועוד, כמו שעשתה תעשיית השבבים. לישראל יש כיום את כל המאפיינים הדרושים כדי להצליח בתחום: תעשייה חזקה עם חברות עוגן גדולות, חברות סטארט-אפ ואקדמיה מתקדמת בתחומי האופטיקה.

המטרות שהציב לעצמו האיגוד כוללות: בניית קשרים עם גופי פוטוניקה מובילים בהולנד, ארה"ב וגרמניה, הרחבת הקשרים עם החברות הישראליות, והגדרת צורכי התעשייה בעשור הקרוב בשיתוף עם הטכניון.

הארגון נמצא בקשר עם המכון לפוטוניקה משולבת (integrated photonics) באינדהובן הולנד, שנחשב למספר 2 בעולם בתחום המיקרו-פוטוניקה. המכון לפוטוניקה משולבת פועל לצד הקונסורציום האקדמי-תעשייתי Photon Delta כדי לקדם את התחום באזור. שיתוף פעולה קיים גם בין חברות פוטוניקה ישראליות עם המכון האמריקאי לרכיבים פוטוניים (AIM – American Institute for Manufacturing Integrated Photonics). זה איגוד ממשלתי-תעשייתי אמריקאי אשר מקים תשתיות ייצור והעברה טכנולוגית בתחום הפוטוניקה כדי להבטיח תשתיות ייצור PIC בארצות הברית (Photonic integrated circuit).

2.2 מרכז לאומי לפוטוניקה

המכרז להקמת מרכז תשתיות מו"פ לפוטוניקה מתקדמת פורסם על ידי הפורום לתשתיות לאומיות למחקר ולפיתוח (פורום תל"מ) באמצעות המנהל למחקר ופיתוח אמצעי לחימה ותשתיות טכנולוגיות (מפא"ת) במשרד הביטחון. ההתנעה של הקמת המרכז כתשתית לאומית החלה באוקטובר 2014 על ידי ממ"ג שורק בשיתוף עם אוניברסיטת בן גוריון, וזאת לאחר זכייתם במכרז להקמת המרכז הלאומי לפוטוניקה בהשקעה של מעל 180 מיליון ₪. במרכז מתבצעים מחקרים חדשניים, פיתוח של תהליכי ייצור ויישומים בתעשייה.

הרציונל להקמת התשתית היה שקיימת תשתית נרחבת בארץ בתעשייה ובאקדמיה בנושא פוטוניקה: חברות, היקף פעילות של 5 מיליארד דולר לשנה וכוח אדם מיומן המתמחה בתחום הפוטוניקה באקדמיה ובתעשייה. סיבה נוספת הייתה החסר בתשתית פיזית בתחום הפוטוניקה בארץ במספר נושאים כדי לקדם את העשייה בתחום לחזית העולמית.

⁴⁰ "Photonics in Israel 2017 | International Commission for Optics," 2017

⁴¹ המידע מבוסס על ראיון שנערך עם חיים רוט

2.3 צבא

מחלקת אופטרוניקה ביחידת המחקר והפיתוח (מפא"ת) אחראית לייזום ופיתוח טכנולוגיות, רכיבים, מדגמים ומערכות אלקטרו-אופטיות הנדרשים בטווח הרחוק לשימוש זרועות צה"ל ומערכות הביטחון. מחלקת אופטרוניקה עוסקת בפיתוח של טכנולוגיות ליבה בתחום האלקטרואופטיקה ופועלת לפתח מערכות מתקדמות יחד עם התעשיות הביטחוניות הגדולות, לצד פיתוח חדשני בחברות הזנק ובחברות קטנות. המחלקה עוסקת במחקר ופיתוח של מערכות מתקדמות, המסוגלות לאסוף מודיעין איכותי ביום ובלילה, בקרקע ובאוויר, באמצעות גילוי ואיכון אופטרוני מדויק ולזהות ירי המבוצע לעבר הכוחות בשטח, בפיתוח מערכות לייזר ליישומים רבים ומגוונים ובפיתוח מערכות להגנה על מטוסי נוסעים.

2.4 מאגדים של רשות החדשנות

מאגד **ALTIA** (ראשי תיבות של **Advanced Laser Technologies for Industrial Applications**)

הוקם ב-2016 כמיזם מחקר ופיתוח של הדור הבא של טכנולוגיות לייזר מתקדמות. למטרה זאת התאגדו יחד שש חברות מסחריות וקבוצות מחקר מובילות בתחום פיזיקת לייזרים ורכיבים פוטוניים מהמוסדות המחקריים הבאים: הטכניון, מכון ויצמן והאוניברסיטאות העברית, בר-אילן, בן גוריון ותל אביב. בנוסף שותפים במאגד מכון לב והמרכז הישראלי לפוטוניקה מתקדמת בשורק. מצד התעשייה שותפות במאגד שלוש חברות לייזרים מובילות – וי-ג'ן, סיוון ואל-אופ – ושלוש חברות מתחום הרכיבים: רייקול, שמייצרת גבישים אופטיים; הולו, שמייצרת אלמנטים אופטיים דיפרקטיביים מתקדמים, ואורבוטק, שמייצרת מערכות ופתרונות לתהליכי ייצור בתעשיית האלקטרוניקה והיא משתמשת הקצה של הלייזרים המפותחים במאגד. ד"ר קובי לסרי, מנכ"ל וי-ג'ן (V-Gen), מונה להיות יו"ר המאגד.

שיתוף פעולה עם הישגים מרשימים הביא לפיתוח טכנולוגיות אמינות ויעילות ליצירת פולסים קצרים בקבוצה של פרופ' גדי אייזנשטיין מהטכניון ופרופ' אבי פאר מאוניברסיטת בר-אילן ביחד עם וי-ג'ן וסיוון.

שיתוף פעולה נוסף של אלאופ וסיוון עם המרכז לפוטוניקה מתקדמת לפיתוח רכיבים ייחודיים יאפשר לחברות יכולת ייצור עצמית של כלל מרכיבי הלייזר. המאגד סיים את פעילותו.

מאגד המשך ל-**ALTIA** – העוסק בפיתוח טכנולוגיות תכנון וייצור של לייזרים ורטיקלים-**VCSEL** – עדיין לא אושר

במסגרת הקול הקורא של מסלול מאגדי מגנט ב-2019, קבוצת יזמים בהובלת החברות מלנוקס, סיוון ואורבוטק, התארגנו להגשת הצעה להקמת מאגד VCSEL בתחום הלייזרים הורטיקליים. המאגד עדיין לא אושר.

ויקסלים (VCSEL – Vertical cavity surface emitting laser) הם לייזרים ורטיקליים הנפוצים במגוון טכנולוגיות, מתקשורת ועד לייזרים בהספק גבוה. היתרונות האינהרנטים של ויקסלים אלו הם במחיר הוייפרים, מחיר העיבוד, קלות הבדיקה הסופית והאפשרות למזער מערכות המשלבות אותם. כיום, הידע והייצור של ויקסלים באיכויות גבוהות, מצוי בידי מספר מצומצם מאוד של חברות בעולם.

מאגד **PetaCloud** הוקם ב-2015 והתמקד בפיתוח תשתיות טכנולוגיות לנתבים ומתגים אלקטרו-אופטיים שיהיו מסוגלים לספק זמני השהייה קצרים של מספר ננו-שניות.

המאגד התמקד בפיתוח מערכות מיתוג וניתוב מהירות מאוד עבור מרכזי מידע, הכוללים את אבני הבניין הבאות: ארכיטקטורת רשת מרכז מידע, המשלבת רובדי מיתוג אופטיים ואלקטרוניים בטופולוגיות ייעודיות. טכנולוגיות מיתוג אופטי מהיר, עם קבועי זמן מיתוג של ננו-שניות. מקמ"ש אופטו-אלקטרוני התומך במיתוג מהיר. רכיבים אלקטרו-אופטיים, הדרושים לבניית מקלט/משדר בקצבים של מאות ג'יגה-ביט לשנייה, ואלגוריתמים דלי הספק, לעיבוד אותות, בקצב אולטרה מהיר הייעודי לתמיכה באותות תקשורת אופטית. המאגד סיים את פעילותו.

2.5 מחקר בתחום הפוטוניקה והפוטוניקה האינטגרטיבית

שבע אוניברסיטאות בישראל (אוניברסיטת בן גוריון, אוניברסיטת בר אילן, אוניברסיטת תל אביב, אוניברסיטת חיפה, האוניברסיטה העברית, מכון ויצמן והטכניון) מבצעות מחקר בתחום הפוטוניקה במחלקות השונות, במכון לנוו פוטוניקה (במרכז BINA בבר אילן) ובמכון לב בירושלים.

Diffraction and Quantum optics, Integrated photonics, Biophotonics, Hyperspectral imaging, Remote sensing, Opto-fluidic MEMS (Micro-Electro- phase optics, Microscopy, optical communication and Mechanical Systems), Optical materials and fibers and biomedical optics cryptography, Opto genetics

במרכז למחקר גרעיני שורק מתבצע מחקר פעיל בתחום הלייזרים והחומרים האופטיים, רכיבים משולבי פוטוניקה ו-Structured Fibers.

חוקרים מובילים:

פרופ' יוסף בן-עזרא, מדען ראשי בקבוצת מר המציעה פתרונות תקשורת ובטחון מקיפים. פרופ' בן עזרא מתמחה בתחום טכנולוגיית התקני העברת מידע בקצב גבוה על גבי שבבי סיליקון, ומשמש כדיקן הפקולטה להנדסה במכון הטכנולוגי חולון.

פרופ' גדי אייזנשטיין, טכניון. פרופ' גדי אייזנשטיין זכה בפרס ההישג המדעי ע"ש ויליאם סטרייפר של האגודה לפוטוניקה של ה-IEEE לשנת 2014.

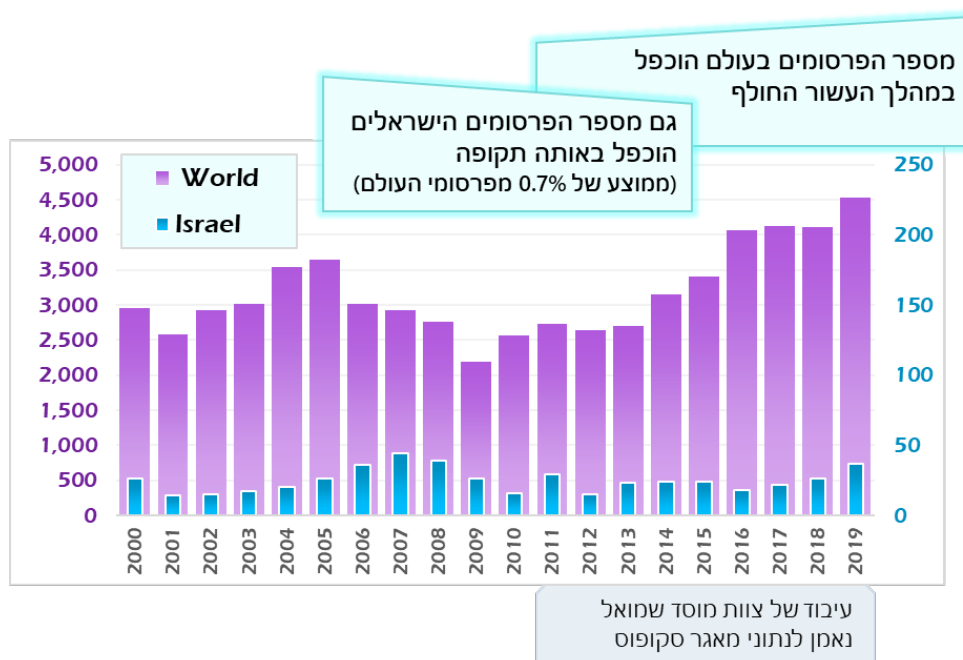
בשנת 2011 זכה הטכניון בפרויקט תחרותי גדול בתחום הננו-פוטוניקה לצורכי גילוי וחישה. צוות המחקר שהוקם לצורך פרויקט זה כלל חוקרים מארבע פקולטות בטכניון וחוקרים ממכון ויצמן, מהאוניברסיטה העברית ומאוניברסיטת תל אביב. החוקרים פעלו במטרה לפתח רכיבי חישה מתקדמים המבוססים על ננו-פוטוניקה לשימוש התעשייה הישראלית.

פרופ' אוריאל לוי מהאוניברסיטה העברית שמכהן גם כסמנכ"ל הטכנולוגיה בחברת TriEye. המחקר שלו הוא בנושא: פיתוח שבבים המורכבים מסיבים אופטיים זעירים. קבוצת המחקר שלו משלבת אנשים בעלי ידע באופטיקה, אלקטרוניקה וננוטכנולוגיה. פרופ' לוי עובד עם פרופ' אמריטוס יוסי שפיר, שמגיע מתחום המיקרואלקטרוניקה. שילוב שאפשר לפתח רכיבים אופטיים שמכילים מיקרואלקטרוניקה.

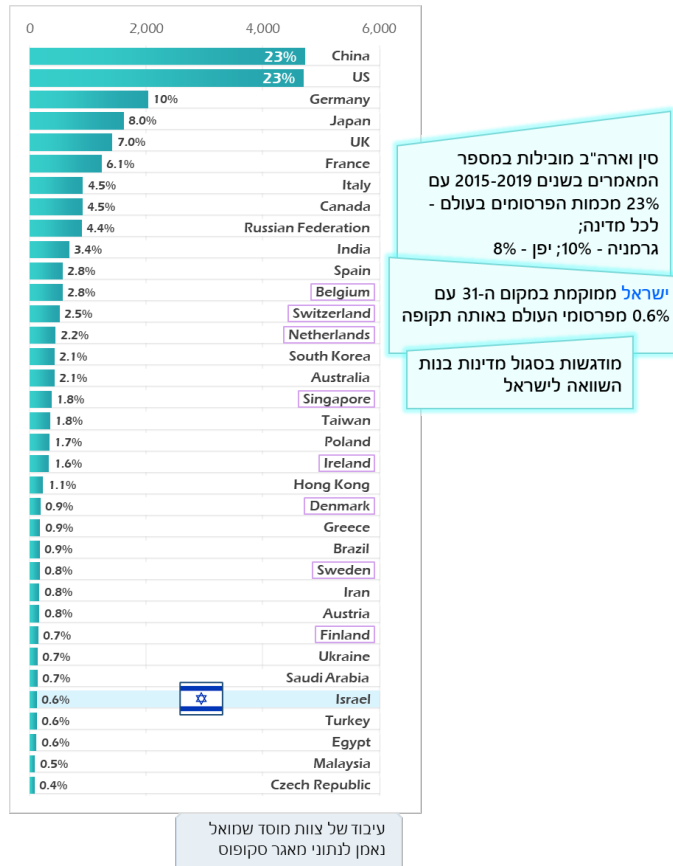
2.6 מדדים ביבליומטריים

מספר הפרסומים בתחום פוטוניקה אינטגרטיבית בעולם הוכפל במהלך העשור החולף. גם מספר הפרסומים הישראליים בתחום הוכפל באותה תקופה. כרבע מהמאמרים שפורסמו על-ידי חוקרים מישראל בתחום פוטוניקה אינטגרטיבית, פורסמו ע"י חוקרי הטכניון.

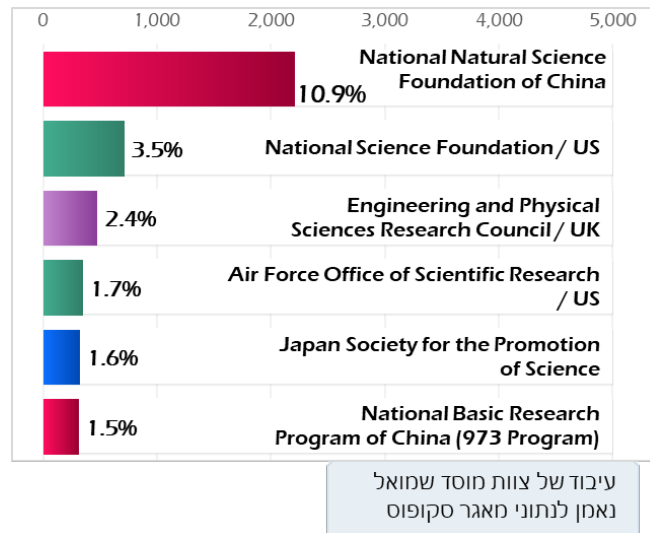
איור 18: השינוי במספר הפרסומים בתחום פוטוניקה אינטגרטיבית בישראל יחסית לעולם, 2000-2019



איור 19: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בשנים 2015-2019



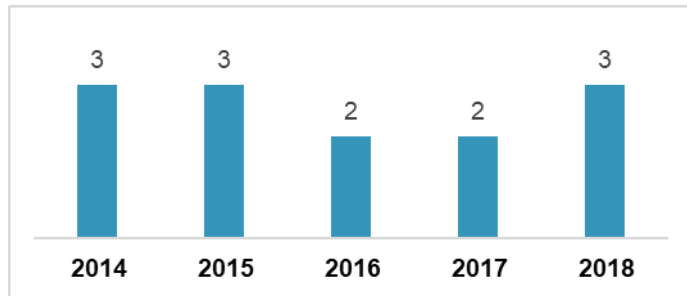
איור 20: גופי המימון המובילים לפי מספר המאמרים שפורסמו בתחום פוטוניקה אינטגרטיבית 2015-2019



2.7 בקשות לפטנטים

בשנים 2014-2018 הוגשו ב-USPTO 13 בקשות לפטנט בתחום פוטוניקה סיליקון ע"י מגישים ישראלים. בתקופה זאת נרשמו ב-USPTO שבעה פטנטים של מגישים ישראלים. חברת מלנוקס מובילה בהגשת בקשות לפטנט ב-USPTO בקרב המגישים הישראלים עם שבע בקשות לפטנט בין השנים 2014 ל-2018. בתקופה זו הגישו רפאל, PRIMESENSE LTD, ORIEL SILICONE PHOTONIC LTD, מוסד הטכניון ושני מגישים פרטיים, כל אחד בקשה אחת לפטנט.

איור 21: מספר בקשות לפטנט ב-USPTO של מגישים ישראלים לפי שנת הגשת הבקשה



2.8 מענקי מחקר

נסקרו הגופים העיקריים מהם מקבלים חוקרי ישראל מענקי מחקר. נסקרו כל מענקי המחקר המתוארים באתר הרלוונטי, בכל השנים עבורן יש נתונים⁴². נמצאו 28 מענקי מחקר שהוענקו לחוקרים על מחקריהם בתחום.

טבלה 3: מענקי מחקר בתחום פוטוניקה אינטגרטיבית

Foundation	For Years	No. of relevant Grants
ERC (European Research Council)	2007 - 2019	8
BARD (US-ISRAEL BINATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH AND DEVELOPMENT FUND)	2016 - 2019	0
GIF (The German- Israeli Foundation for Scientific Research and Development)	2011 - 2018	1
BIRD (Binational Industrial Research and Development) Foundation	1988 - 2019	8
ISF (Israel Science Foundation)	1991 - 2019	10
BSF (U.S.-Israel Binational Science Foundation)	1997 - 2019	1
Total		28

3 היתרונות של ישראל בתחום הפוטוניקה

לפי דו"ח של סוכנות החדשנות ההולנדית (Rijksdienst Voor Ondernemend Nederland, 2017), יתרונה של ישראל בשוק הפוטוניקה העולמי מתבסס על מצוינות אקדמית, תעשייה ביטחונית ונוכחות תעשייתית (אזרחית) בולטת.

ב-2018 נערכה סדנה בנושא תחזיות טכנולוגיות לצורכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי בתחום הפוטוניקה בישראל. בסדנה השתתפו 17 מומחים מהתעשייה, מהאקדמיה, מהממשלה ומהצבא⁴³.

בחלק הראשון של הסדנה התבקשו המומחים לבחור אלו תחומים עסקיים צפויים להתפתח בישראל ב-10 השנים הקרובות ולהתייחס לחשיבותו של תחום הפוטוניקה כמאיץ להתפתחות התחומים. המסקנות העיקריות שעלו:

1. קיימת הסכמה על צמיחה צפויה בשוק הפוטוניקה הישראלי. התחומים הקלאסיים של ביטחון ואבטחה, ציוד רפואי, בקרה תעשייתית ודפוס ימשיכו לצמוח אם כי לא בקפיצות מדרגה.
2. תחומים חדשים אשר עשויים לצמוח בעשור הקרוב הם: מערכות לרכבים חשמליים ואוטונומיים, מערכות לחקלאות מדייקת, ביופוטוניקה ומיקרופוטוניקה.

⁴² הסריקה נעשתה על ידי מילות החיפוש "OR "silicon photonics" OR "Photonic Integration" OR "Photonic Integrated" OR "Integrated Photonics" OR "Photonic Integrations" OR "Semiconductor Lasers" OR "Silicon Photonic" OR "Integrated Nanophotonic". בחלק מהקטגוריות לא מופיע תקציר המחקר ולכן לא ניתן לאמת את הרלוונטיות. ייתכן שיש עוד מענקים שלא נספרו כאן מסיבה זו (במיוחד מטעם ISF), או כאלה שנזכרו אך אינם רלוונטיים (במיוחד BIRD).
⁴³ המשתתפים בסדנה בנושא תחזיות טכנולוגיות לצורכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי בתחום הפוטוניקה בישראל:

אגסי אייל - המכון הביולוגי; בר חיים אריק - רשות החדשנות; גליק ברוך - מנכ"ל SCD לשעבר; ואן זוהרן משה (ג'ו) – Jerusalem Business Networking Forum; ויזר בועז - אל-אופ; לביא רפי - מרכז פוטוניקה שורק; לינדבאום חיים; מינצר נילי- רשות החדשנות; סרוסי גבי -אוניברסיטת בן גוריון; פינקלר רמי - התאגדות מהנדסי החשמל והאלקטרוניקה בישראל; קלמני גל - מפא"ת; קרפל ניר – רפאל; רוזנברג שי -משרד הבטחון; שושן איתמר - רשות החדשנות; שטריכמן איתי – SCD; שר אריאל - מרכז פוטוניקה שורק; בליט שמואל.

3. לא ברורה ההשפעה של תחומי Integrated Photonics על המשק הישראלי. המהפכה העולמית תהיה עצומה אבל מקום התעשייה הישראלית לא מובטח ללא גיבוש אסטרטגיה לאומית.

ביטחון ואבטחה

- בצד הביטחוני האופטרוניקה נכנסת ליותר ויותר. הכניסה למערכות סופר טכנולוגיות יותר איטי ולא דומה לטכנולוגיית סייבר.
- עבודה בלהקות, drones, שוק הלייזרים- מחיר של רכיבים (קומפוננטות) יורד, קונספטים שנחשבו בעבר לייקרים למימוש, היום אנחנו מרגישים את ההשפעה הדרמטית של השוק האזרחי על התפתחותם.
- הנושא הצבאי ובטחון פנים ימשיך להתפתח. הצבאות כיום עדיין מבוססים על טכנולוגיה ישנה. על כל חייל שיש לו ציוד אופטרוני יש עשרות אחרים עם ציוד מלפני 50 שנה. המפתח להצטיידות הוא בעיקר הוזלה של המערכות שיביא בעקבותיו פוטנציאל להצטיידות.
- היום השווקים מתפתחים במקביל והשוק הצבאי יכול לעשות שימוש במוצרים אזרחיים. עדיין יש מוצרים שהצבא יצטרך שיתחן במיוחד עבורו והדרישה עולה.

בקרה תעשייתית ודפוס

- תחום שבו התעשייה והאקדמיה כבר פועלות בהצלחה – בעיקר בתחום של אוטומציה, inspection (בתעשיית המוליכים למחצה), machine vision, metrology, ו-clean tech.
- חברות דפוס מתקדמות וכשהם ידעו להכתיב צרכים טכנולוגים בתחום הפוטוניקה (מקורות אור וגלאים וסנסורים) וזה יביא קדמה טכנולוגית לתחום.
- אי אפשר לייצר יצור ממוזער ללא תיקונים. יש תעשייה די גדולה שעוסקת בתיקונים של רכיבים ממוזערים.

מערכות לרכבים חשמליים ואוטונומיים ורחפנים

- תחום הרחפנים והעבודה בנחילים מקושרים באופן אוטונומי יגדל בקצב מעריכי ויתפוס נישות חדשות.
- שני תחומים גלובליים הם רכבים אוטונומיים ורחפנים בהקשר הרחב ביותר – למעשה יש כיום דרישה גוברת לפיזור סנסורים יותר טובים ויותר זולים. לא בטוח שלמדינת ישראל יש יתרון בזה. לתעשיית הפוטוניקה בישראל אין יתרון בסנסורים זולים. אנחנו כן טובים וייחודיים בטכנולוגיות של המון סנסורים קטנים שיודעים לתקשר אחד עם השני.
- שוק הרחפנים תופס תאוצה מטורפת בשנים האחרונות גם צבאי וגם אזרחי. יש מספר רב של סטארט-אפים לאפליקציות מדהימות. למשל monitoring בתעשיית הבניה – יש צורך בסנסורים שהם לא רק מצלמה. הדרישה היא לחיישנים מדויקים ושכל מערכת החישה והעיבוד תימצא בתוך הרחפן.
- רכבים אוטונומיים זקוקים לאמצעי ראיית לילה, ללייזרים ועוד. החברות הישראליות מאד פעילות בשוק בתחומים אלה.

מערכות לחקלאות מדייקת

- תחום זה גדל בעולם בשנים האחרונות בכ-10% וצפוי להמשיך ולצמוח (דו"ח מקנזי).
- החקלאים פתוחים להכניס טכנולוגיות חדשות וישראל מהווה beta-site מאוד טוב. יש בישראל הרבה ידע.

ביופוטוניקה

- Bio-sensing יש כר מאוד נרחב (bio-photonics). בישראל יש המון מחקרים שעושים באקדמיה וגם סטארט אפים בתחום.

מיקרופוטוניקה

התחום של תעשיית המיקרו-פוטוניקה נמצא בתהליך צמיחה בארה"ב, גרמניה, יפן, בריטניה ומדינות נוספות. כפי שצוין לישראל יש יתרונות (חוקרים, תעשייה ופיתוח צבאי המבצעים מו"פ מתקדם) ואין שום סיבה שישראל לא תהיה בו אחד השחקנים המובילים. כבר כיום אנו מובילים במערכות אלקטרו-אופטיות מתקדמות לשימושים צבאיים ואזרחיים כאחד. על מנת שישראל לא תפספס את ההזדמנות להיות חלק משוק זה, הממשלה צריכה לקדם ולהכווין לתחום זה כלומר, להגדיר ולגבש אסטרטגיה שבה יוגדרו כיווני הפיתוח והתשתיות הנדרשות כמו גם התקציבים הנדרשים להשקעה על ידי מדינת ישראל.

בפוטוניקה אינטגרטיבית היתרון של ישראל הוא לא בפיתוח הרכיבים המתקדמים, שיתבצע ע"י החברות הגדולות המובילות בעולם כמו אינטל וחברות אחרות, ישראל יכולה להיות מובילה ביישומים של הטכנולוגיה. למשל בפיתוח של מוצרים רפואיים ואחרים על בסיס הטכנולוגיה שתפותח. פריצות דרך יכולות להיות למשל ביישום רפואי שלא ניתן ליישם כיום בממדים גדולים והטכנולוגיה יכולה לאפשר לעשות בממדים יותר קטנים.

בנוסף, ישראל הצליחה להיות החברה המובילה ב-Inspection של קווי הייצור. רוב ציוד ה-inspection במפעלי הייצור של המיקרואלקטרוניקה הוא ישראלי. זה מתאים לישראל, מכונות גדולות, אופטיקה מורכבת, אלקטרוניקה מורכבת, הנדסת מערכת רצינית. התרומה של ישראל יכולה להיות בעולמות של ציוד טיסה או בעולמות אחרים.

אפשר להקביל את המהפכה בתחום הפוטוניקה למהפכה שקרתה בתחום האלקטרוניקה. כמו במיקרואלקטרוניקה למרות שישראל לא נמצאת בין 'השחקנים הגדולים' הצליחו למצוא נישות מעניינות, כך גם בתחום הפוטוניקה האינטגרטיבית צריך למצוא מה הן הנישות. כדאי לעשות חשיבה איפה היתרונות היחסיים של ישראל ומיהן החברות הרלבנטיות שרוצות להיכנס לתחום.

לישראל יש הרבה מאוד ידע ייחודי בתחום הזה, שהוא בעל ערך עצום. יש הרבה סטרטאפים בתחום, הרבה אקדמיה שעושה אלקטרואופטיקה. יש ייחודית עצומה בתחום אלקטרואופטיקה קוואנטית, יש את קבוצות המחקר הכי טובות בעולם אבל אין תשתיות. כדי לעשות את זה צריך פאב, לעשות הרבה עבודה תשתיתית. היום תעשיית החומרה הישראלית מניחה שהחומרה בתחום היא לא בארץ. במלנוקס למשל הולכים לפרויקטים של האיחוד האירופי, IMEC, ונוספים.

בישראל אין פיילוט ליין. זה קונספט שלא קיים היום במדינת ישראל. אפשר לראות הרבה יותר מגנטים סביב נושאים ולא סביב טכנולוגיות שהולכות לכיוון מוצרים, וזה מה שיוצר Valley of death. זה מה שהאיחוד האירופי מנסה ליצור בתוך הורייזן. אנחנו טובים במחקר, אבל כשרוצים לייצר מזה מקומות עבודה, אז שם הבעיה. כל מה שקשור ל-Integrated צריך שיהיה פיילוט ליין- כמו IMEC או פראונופור. שתהיה תפיסת מדינה כמו בפרויקטים של מגנט, פיתוח סביב רעיון טכנולוגי חדשני או סביב קו שבו ניתן לשלב בין התעשיות השונות.

3.1 הכשרת כוח אדם מדעי וטכנולוגי לעבודה בתחום הפוטוניקה והפוטוניקה האינטגרטיבית⁴⁴

הכשרה ייעודית לתחום הפוטוניקה מתחילה בהשכלה הנדסית ומדעית בסיסית בפיזיקה. האנשים העוסקים בתחום זה מגיעים מדיסציפלינות ומפקולטות שונות ולרוב הסטודנטים לפיזיקה לא נחשפים לנושאי הפוטוניקה ולפוטוניאל הגלום בה ולכן קיים מחסור בכ"א בתחום הפוטוניקה שקיבל הכשרה בנושא. רוב הפיסיקאים העוסקים בתחום לא נחשפו לנושא במהלך לימודיהם האקדמיים, וטכנאי אלקטרו-אופטיקה חדשים בשוק העבודה אינם בנמצא כלל.

חסר נוסף הינו במענה לצרכי כוח אדם במעטפת של הרכיבים בגין המצוקה הכללית של מהנדסי פתרון. ההכשרה היא הנדסת תהליך בעולמות של רכיבים אופטיים. יש הרבה תלמידי תארים מתקדמים בנישה הזו. לגבי אריזת הרכיב ומימושו כפתרון או כמערכת, נדרש מהנדס מערכת עם התמחות ברמת הרכיב שיש לאפשר.

בנוסף, נאמר בראיונות שחסרים מתכננים אופטיים, מתכנני אופטומכניקה, פיסיקאים שמבינים באופטיקה ובמכ"ם, מכשירני פיתוח, מהנדסי מערכת ומהנדסי איכות למערכות מורכבות. חלק מהמקצועות נלמדים באוניברסיטה אך מכשירנות פיתוח והנדסת מערכת יש ללמוד תוך כדי התנסות.

המסלול שמשלב פיזיקה והנדסת חשמל במוסדות האקדמיים נותן את הבסיס לתחום. ההכשרות אינן מספקות ובסופו של דבר חלק גדול מהכשרת כוח האדם מבוצע במקומות העבודה. מערכות אלקטרו אופטיות הן מולטי-דיסציפלינריות ונדרשת להם הכשרה נוספת ע"י הצטרפות לפרויקטים בתעשייה המובילים ע"י בעל מקצוע ותיק.

להלן מוסדות ההשכלה בהם ניתנת הכשרה לתחום:

בטכניון – קיימת תוכנית לימודים משולבת לתואר מוסמך למדעים בהנדסת חשמל ופיזיקה - הטכניון מציע מסלול למועמדים מצטיינים המעוניינים בלימודי הנדסה בתחום של אלקטרוניקה, אופטואלקטרוניקה,

⁴⁴ חלק זה הנוגע להכשרת עובדים לתחום הפוטוניקה מתבסס על ראיונות/שאלונים שנערכו עם: ד"ר אייל אגסי, דן וילנסקי, שימשי אלרועי – רפא"ל, בועז וייזר-אל אופ, ד"ר חיים רוסו, נוה בהט – תע"א, דוד מנדלוביץ-Corphotonics.

גלים ותקשורת עם חשיפה ויכולת להשתלב בכל התחומים בהנדסת חשמל עם בסיס מדעי רחב בפיזיקה. המסלול בא לענות על דרישות התעשיות עתירות המדע, המקבלות לשורותיהן בוגרי טכניון בעלי השכלה מדעית-טכנולוגית מעמיקה ורחבה. המסלול מקנה תואר ראשון בפיזיקה ובהנדסת חשמל.

באוניברסיטת בן גוריון – ניתן ללמוד במסגרת לימודי הפיזיקה במגמת פוטוניקה. זוהי אחת ממגמות הלימוד שבהן יכולים לבחור סטודנטים במסגרת לימודי פיזיקה לתואר ראשון ובה לומדים על סוגיות מרכזיות שונות בענפי הפוטוניקה והאלקטרו אופטיקה. בוגרי המגמה מחזיקים בידע ובכלים שיכולים לסייע להם בהשתלבותם בתעשייה עתירת הידע בענפי הפיתוח והמחקר האלקטרו אופטי. כמו כן, הבוגרים יכולים לפתוח דלת לתפקידים בפיתוח אלגוריתמים, במחקר ביולוגי ומולקולרי, בתעשייה הביטחונית ובענפים נוספים. באפשרותם גם להמשיך לתארים מתקדמים ולפתוח בקריירה אקדמית מחקרית בענף הפוטוניקה.

אוניברסיטת בן-גוריון מציעה תוכניות לימודים באלקטרואופטיקה לתארים גבוהים. היחידה פתוחה לבוגרי מחלקות הפקולטה למדעי ההנדסה או לבוגרי מחלקות הפקולטה למדעי הטבע. האוניברסיטה מציעה תוכנית לימודים לתואר שני ביחידה להנדסת אלקטרואופטיקה, בפקולטה למדעי ההנדסה. תוכנית הלימודים כוללת נושאי טכנולוגיה עילית (הייטק), כגון: תקשורת אופטית בסיבים, עיבוד נתונים אופטי, אופטיקה ביו-רפואית, צגים ומאפנני אור מרחביים ופאטוניקה משולבת. היחידה מציעה מספר תחומי התמחות אפשריים: מערכות דימות ועיבוד תמונה. אופטיקה ביו-רפואית, אופטיקה קוונטית ולייזרים, תקשורת אופטית, התקנים אופטו-אלקטרוניים להדמיה וצגים, ננפוטוניקה, פלסמוניקה ופוטוניקה משולבת. בנוסף, כוללת תוכנית הלימודים קורסי אלקטרואופטיקה כלליים כגון: אופטו-מכניקה, תכנון אופטי לדימות, תכנון אופטי לריכוז עצמה באנרגיה סולרית והתפשטות גלים א"מ בתווך ביולוגי. המגוון הרחב של המקצועות מיועד לאפשר לבוגרי תוכניות אלו להשתלב בתעשייה המתפתחת בארץ. לבוגרי תואר שני באלקטרואופטיקה קיימת אפשרות ללמוד תואר שלישי (Ph.D) בתחומי לימוד מתאימים⁴⁵.

באוניברסיטת תל אביב ניתן ללמוד הנדסת חשמל ופיזיקה (תואר כפול) – משך הלימודים ארבע שנים לתואר ראשון (B.Sc.) בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה ופיזיקה. תוכנית הלימודים בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה ובפיזיקה מופעלת במשותף ע"י הפקולטה להנדסה – בית הספר להנדסת חשמל וע"י הפקולטה למדעים מדויקים - ביה"ס לפיזיקה. מטרת השילוב להכשיר עתודת חוקרים ומהנדסים, אשר חלקה ימשיך בלימודים לתארים גבוהים ואשר תוכל לתפוס תפקיד חשוב, הן במחקר האקדמי המדעי והן בפיתוח והנהגה של התעשייה עתירת הטכנולוגיה בארץ. כמו כן ניתן ללמוד במסגרת הנדסת חשמל לתואר שני את תחומי האלקטרואופטיקה ותחומי מחקר בנושא אלקטרוניקה פיזיקלית.

באוניברסיטת בר-אילן ניתן ללמוד תואר משולב בהנדסת חשמל ופיסיקה – תוכנית לימודים זו מיועדת לסטודנטים מצטיינים המעוניינים ללמוד תואר משולב בהנדסת חשמל (מקצוע חד-חוגי) ובפיסיקה (חוג אחרי התואר). בתוכנית זו הסטודנטים רוכשים השכלה מדעית מעמיקה ורחבה בפיסיקה המשולבת בידע מדעי - טכנולוגי בתחומי האלקטרוניקה, המחשבים והתקשורת, הנרכש במסגרת הלימודים. תוכנית זו היא 4 שנתית ומיועדת למועמדים בעלי נתוני קבלה גבוהים

באוניברסיטה העברית – בחוג להנדסת חשמל ופיזיקה יישומית – תואר ראשון – מכשירים סטודנטים בעלי רקע ועניין פיזיקלי-מתמטי לעיסוק במחקר ופיתוח בחזית היצירה של טכנולוגיות בראשיתיות בתחומי האופטואלקטרוניקה (לייזרים, חיישנים, מערכות דימות), המיקרואלקטרוניקה (רכיבי עיבוד מידע, מיתוג, תקשוב, זיכרונות), הננוטכנולוגיה (תופעות פיזיקליות בגבול הננומטרי, עולם הקוונטים) ושילובם במערכות מתקדמות (תקשורת, מחשוב, חישה, ועוד). התוכנית מיועדת לסטודנטים השואפים לעסוק בפעילויות מ"פ המשלבות הנדסה, מחקר מדעי וכושר המצאה בתעשיית ההיי-טק המבוססת או בחברות הזנק, הבטחון, או כקרב קפיצה למחקר מתקדם. בשנה השלישית ללימודים על הסטודנטים לבחור באחד ממסלולי ההתמחות הבאים: אופטואלקטרוניקה: תחום ההתמחות המשלב אור כנשא אינפורמציה עם מערכות מידע. דוגמה לקורסים הניתנים במסלול: פיזיקת הלייזרים, תקשורת אופטית וקוונטית, התקנים אופטואלקטרוניים וננופוטוניקה.

⁴⁵ <https://in.bgu.ac.il/engn/electrop/Pages/About.aspx>
<https://in.bgu.ac.il/engn/Documents/YearBooks/2019/377-2019.pdf>

באוניברסיטת אריאל קיימות התמחויות לתואר ראשון במחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה – בתחום האלקטרואופטיקה (פרופ' שמואל שטרנקלר, פרופ' אראל גרנות וד"ר דוד אבוקסיס) ובתחום המיקרו-אלקטרוניקה (פרופ' יוסף ברנשטיין).

קיימות גם התמחויות לתואר שני במחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה: **באלקטרואופטיקה** - המסלול מקנה לסטודנט ידע רחב בנושאים שונים הקשורים לתחום, כגון: מקורות וגלאים, לייזרים, מערכות אופטיות, שילוב אופטיקה ברפואה וביולוגיה, תקשורת אופטית, אופטיקה-לא-לנארית, חיישנים ואפיון חומרים. **במיקרואלקטרוניקה והתקנים אלקטרוניים** – במסלול זה הסטודנט רוכש ידע בטכנולוגיות של מזעור אלקטרוניקה מודרנית, פיזיקה וטכנולוגיה של מוליכים למחצה ומוליכי-על, מיקרומוליכים וננומוליכים ותהליכים קוונטים ברכיבים אלקטרוניים.

מכללת אורט בראודה - התואר הראשון **בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה** כולל קורסים באלקטרו-אופטיקה. כמו כן במכללה תוכנית חדשה שהחלה לפעול בשנת תשע"א בהנדסה אופטית: המקנה תואר בוגר במדעים (B.Sc.). התוכנית המוצעת מקנה את הרקע והכלים בפיזיקה, באופטיקה, בתכנות, באלקטרוניקה ובמכונות ומקנה הכשרה הנדסית מספיק רחבה אשר תאפשר לבוגריה להשתלב בתעשייה עתירת הטכנולוגיה ולתרום לפיתוחה. התוכנית מציעה שלוש מגמות התמחות: מגמת אלקטרו-אופטיקה אשר תכשיר מהנדס בגישה מערכתית ובעל רקע בהנדסת חשמל; מגמת מכנו-אופטיקה אשר תכשיר מהנדס בגישה מערכתית ובעל רקע בהנדסת מכונות; ותוכנית לתואר כפול: **הנדסה אופטית – הנדסת חשמל**.

במכללת עזריאלי להנדסה – תוכנית הלימודים **במסגרת תואר ראשון בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה** כוללת קורסים באלקטרו-אופטיקה כגון אופטיקה מודרנית ולייזרים, עיבוד אופטי של תמונות ותקשורת אופטית.

במכללת אפקה – בתואר ראשון בהנדסת חשמל במסגרת מסלול התמחות בתקשורת, נלמדים קורסים באלקטרואופטיקה - מבוא להנדסה אלקטרו אופטית ותקשורת אלקטרו אופטית.

במכון הטכנולוגי חולון – במסגרת תואר ראשון בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה קיים מסלול **התמחות באלקטרו-אופטיקה ומיקרואלקטרוניקה**. גם במסגרת התואר שני בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה קיים מסלול התמחות בנושא אלקטרואופטיקה.

במכללת מכללת סמי שמעון – קיימים לימודי תואר ראשון **בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה** אך אין מסלול התמחות באלקטרואופטיקה. במכללה קיים **מרכז מחקר לאלקטרואופטיקה, פיתוח טכנולוגיות לייזרים ויישומיהם**. מרכז המחקר לפיתוח טכנולוגיות לייזר ויישומיהם שם דגש על תחום הרפואה, זהו מרכז מולטי-דיסציפלינרי שעוסק בענפים השונים של תחום הפוטוניקה, **אלקטרואופטיקה** והלייזרים. מרכז המחקר יקדם פיתוח של שיטות אופטיות ליישומים רפואיים. המחקר יתמקד בניתוח אופטי, הדמיה במספר אופנים והשילוב ביניהם, בכדי להשיג כושר טיפול ברקמות ביולוגיות באופן פחות חודרני, יותר מדויק ובעל זמן החלמה קצר יותר.

איגוד תעשיות הפוטוניקה שלקח על עצמו (בשיתוף אגודת המהנדסים) את קידום נושא הפוטוניקה - כולל יוזמה לקורס בפוטוניקה לעובדים בתעשייה.

הגידול של חברות העוסקות בתחום הפוטוניקה בארץ מוגבל כיום עקב המחסור באנשי ייצור, בטכנאים, הנדסאים ובמהנדסי פיתוח. בנוסף, יש צורך בהכשרת כוח האדם הקיים בנושאים מתקדמים.

הפערים המרכזיים הינם בשלושה תחומים:

א. הנדסת מערכת אלקטרו-אופטית – חסרה הכשרת מהנדסים כמהנדסי מערכת לתחום האלקטרואופטיקה, המצריך הבנה מערכתית בתחומים רבים שתורמים לתכן המערכת. נדרשת הכשרה בסיסית להנדסת מערכת ו/או הכשרה משמעותית יותר לממשק עם דיסציפלינות אחרות.

ב. גם במסגרת ההכשרה של מהנדס בדיסציפלינה מסוימת, חסרה הכשרה בסיסית לדיסציפלינות "שכנות" בתחומי האלקטרואופטיקה. למשל, מהנדסי מכונות לא מספיק מכירים הנדסת חומרים והנדסת אופטיקה, מהנדסי אלקט' לא מספיק מכירים שיקולי חום, מהנדסי תוכנה מגיעים עם הבנה בסיסית (מדי) בתשתית העיבוד (אלקט') וכו'.

ג. אין הכשרה מספקת לכ"א שעוסק בייצור / אינטגרציה / בדיקות של מערכת אלקטרו-אופטיות. זה מתחבר לחוסר כללי בהנדסאים / טכנאים.

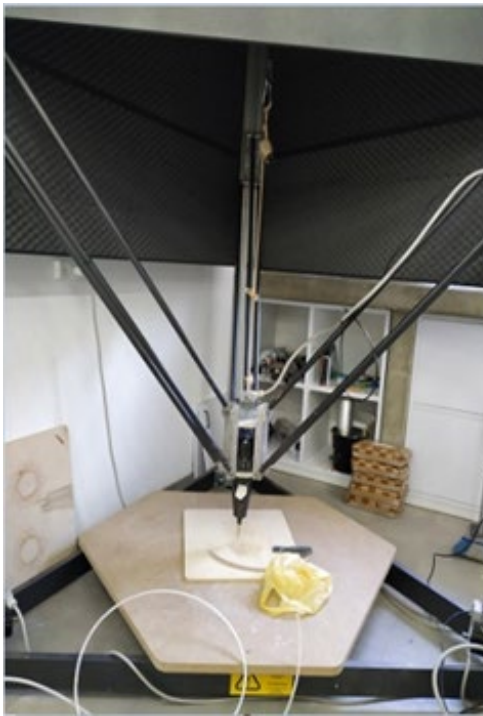
בעתיד צפוי גידול בעיסוק בתחומי הפוטוניקה ולכן הפערים המתוארים לעיל אף צפויים לגדול.

- לפי חיים רוסו אין כיום מענה בכוח אדם אפילו לא למינימום המעורבות של התעשייה הישראלית.
- צרכי כ"א בתחום הפוטוניקה והפוטוניקה האינטגרטיבית בישראל תלויים באופציה שבה תבחר לעסוק בעתיד התעשייה בישראל:
1. אופציית יישום-התעשייה תישם רכיבים קנויים במערכותיה או תזמין פיתוח רכיבים מחו"ל- יתקיים בוודאות.
 2. אופציית פיתוח-התעשייה בארץ תפתח רכיבים (Fables) ואולי תפתח מערכות פריפריאליות כגון מערכי בדיקה . סיכוי בינוני שיתקיים בארץ.
 3. אופציית ייצור – הקמת FAB בארץ על ידי גורם בינלאומי כדוגמת המפעל של אינטל בקרית גת.
- בכל מקרה תידרש אוכלוסייה של מתכננים שכמעט ואינם קיימים היום: שילוב של מהנדסים השולטים במיקרו-אלקטרוניקה ובאלקטרואופטיקה. זו לא בהכרח הכשרה בסיסית חדשה, זו יכולה להיות הכשרה משלימה לאנשי מיקרואלקטרוניקה או אנשי אלקטרואופטיקה. יידרש בהיקף של לפחות מאות בודדות.
 - בכל מקרה תידרש העמקה של הכשרת מפתחי אלקטרואופטיקה בעקבות הדחיפה שיקבל התחום. ההכשרה הקיימת בארץ די חסרה.
 - מימוש אופציית הפיתוח יחייב בהגדלה משמעותית בשתי האוכלוסיות שצוינו לעיל.
 - מימוש אופציית הייצור יחייב באופן בסיסי עובדים מסוג אלו העובדים באינטל קרית גת. בהנחה שמפעלי אינטל ימשיכו להתפתח בארץ תידרש כאן הכשרה של מאות עובדים.
- יש לפתח הכשרות משלימות לבוגרים קיימים ובמקביל לחשוב על הכשרה מראש לתחומי המיקרופוטוניקה.

4 סיכום והמלצות- צורכי כוח אדם לתחום הפוטוניקה והפוטוניקה האינטגרטיבית

- האופטיקה והפוטוניקה הם תת תחום של פיזיקה ותת תחום בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה, כימיה והנדסת חומרים. התקנים אופטיים משמשים בתחומים כמו ביולוגיה, אסטרונומיה, רפואה והנדסה. בגלל אופיו של התחום הוא אינו נלמד בד"כ בפקולטות לאופטיקה, אלא בפקולטות של התחומים בהם הוא מהווה תת תחום.
- רק בית הספר הגבוה לטכנולוגיה בירושלים (המרכז האקדמי לב) ומכללת אורט בראודה מציעים מסלולים לתואר ראשון בהנדסה אופטית. בישראל יש ידע רב בפריפריה של האופטיקה, בתחומים כמו ננו פוטוניקה ועיבוד תמונה.
- בסדנה שנערכה בינואר 2018, בנושא תחזיות טכנולוגיות לצורכי כוח אדם מדעי וטכנולוגי בתחום הפוטוניקה בישראל, המומחים שהשתתפו בסדנה התבקשו להצביע על הפערים העיקריים הקיימים מבחינת ההון האנושי הנדרש לתחום הפוטוניקה בישראל. התובנות העיקריות שעלו מחלק זה של הסדנה היו:
- לתחום הפוטוניקה אין הכשרה באוניברסיטאות. אנשי הפוטוניקה הם לרוב פיזיקאים שמקבלים הכשרה במקום העבודה.
 - יש לחזק משמעותית את לימודי הפיזיקה במערכת החינוך.
 - קיים מחסור כללי בעובדים לתחום, שנובע בין היתר ממחסור במוסדות המכשירים עובדים לשוק הפוטוניקה.
 - המחסור בכוח אדם לתחום הפוטוניקה צפוי לגדול בשל הצמיחה הצפויה בשוק בעולם והגידול וההתפתחות של חברות ההזנק בישראל.
 - קיים מחסור באנשי מו"פ עם הבנה מולטי-דיסציפלינרית. כל תחומי הצמיחה של התחום מחייבים הכשרה כזו (פיזיקה/ביולוגיה, פיזיקה/ חקלאות, פיזיקה /רפואה ועוד).
 - יש לחזק לימודי טכנאים/ הנדסאים/מכשירנים במסגרת המכללות הטכנולוגיות בישראל.

הדפסה תלת ממדית של חומרים מתקדמים, טכנולוגיות ויישומים



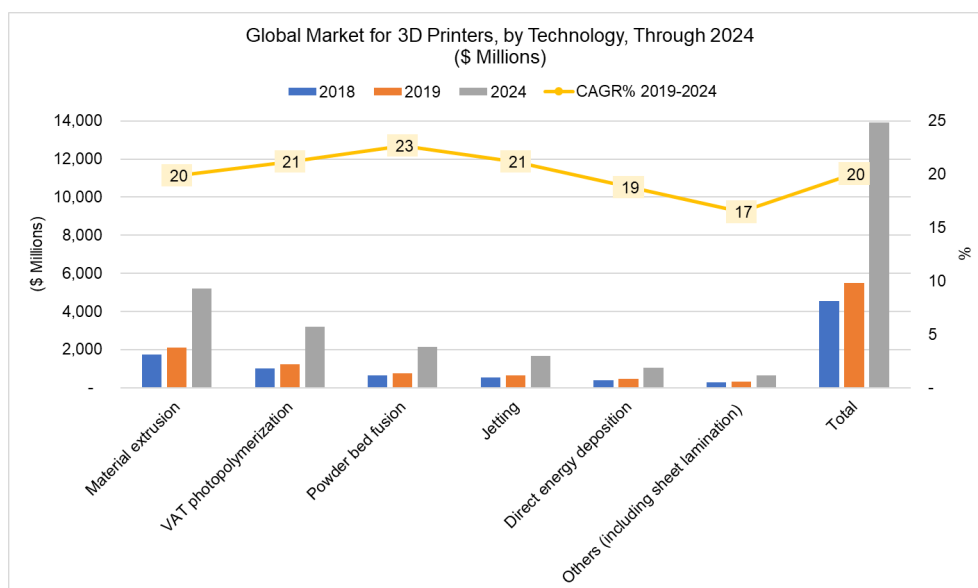
הדפסת תלת ממד 3D Printing, המכונה גם Additive manufacturing, היא תהליך יצירת מוצק תלת ממדי מדגם דיגיטלי, על-ידי הנחת שכבות חומר רציפות, בצורות שונות.

חשיבותו של תחום הדפסת התלת ממד 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. מחקר של BCC⁴⁶ העריך את השוק העולמי הכולל חומרי הדפסת תלת ממד ב-10.2 מיליארד דולר בשנת 2019, כשהצפי הוא שנתון זה יעלה לכ-27.5 מיליארד דולר ב-2024, בהתבסס על קצב צמיחה שנתי (CAGR) של 22% בשנים 2019-2024 (איור 22).

מדינות רבות הכירו בחשיבות של הדפסת תלת ממד ובצורך בהשקעה לאומית בתחום וכן פעילויות מו"פ הממומנות ע"י ה-EU בתחום 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 התוכנית, בסכום כולל של לפחות 95 מיליון יורו. אין כיום מדינה בעולם שלא עושה מאמצים בתחום.

הדפסת התלת ממד 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 ובתעשיות ביטחון אחרות.

איור 22: השוק העולמי להדפסת תלת ממד לשנים 2018-19 ותחזית לשנת 2024



מקור: BCC (2019), Global Markets for 3D Printing

מחקר ופיתוח משמעותי נעשה בתחום של סוגי החומרים המשמשים לתעשייה זו. במהלך 30 השנים האחרונות, נעשה אפיון של מגוון רחב של חומרים להדפסת תלת ממד. עם זאת, רק סוגים מסוימים של חומרים ניתנים לעיבוד בסוגים מסוימים של מדפסות תלת ממד.

1.1 סוגי חומרים להדפסת תלת ממד

1.1.1 פלסטיקה ופולימרים

פלסטיקה היא הסוג הנפוץ ביותר של חומרי הדפסת תלת ממד. חומרים אלה מתחלקים לשתי קטגוריות רחבות, תרמופלסטים (Thermoplastics) ופולימרים ופוטופולימרים (Polymers and Photopolymers).

BCC Research. (2018). Advanced Materials for 3D Printing: Technologies and Global Markets. Report Code: 46 AVM101C

• תרמופלסטים ופולימרים Thermoplastics and Polymers

תרמופלסטים הם פולימרים שהופכים להיות גמישים או מעוצבים כאשר הם מחוממים מעל טמפרטורות מסוימות וחוזרים למצב מוצק כאשר הם מקוררים מתחת לטמפרטורת אלה. בין הפולימרים התרמופלסטיים השונים המיועדים ליישומי הדפסת תלת ממד, השימוש הנפוץ ביותר הוא בחומרים הבאים: poly(lactic acid) (PLA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), poly(vinyl alcohol) (PVA), polyamides or nylons, polycarbonate and polyetherimide. יישומי תרמופלסטים נעשה בתחומים: תעופה וחלל, ארכיטקטורה, תעשיית הרכב ומכשירי חשמל.

• פוטופולימרים (Photopolymers)

פוטופולימר הוא פולימר הנוצר מ- monomers או oligomer molecules בחשיפה לאור בדרך כלל באורכי גל UV. monomers המשמשים להדפסת תלת ממד בדרך כלל כוללים acrylate and methacrylate בשילוב עם רכיב לא פולימרי להפחתת הצטמקות הנפח. קיימים גם סוגים מיוחדים אחרים של חומרי הדפסת תלת ממד פוטופולימרים בעלי קשיחות, עמידות ותכונות אחרות, שאינם נמצאים בפוטופולימרים קונבנציונליים.

מחוץ לתחום הרפואה ורפואת השיניים, פוטופולימרים מודפסים בתלת ממד משמשים בעיקר לבניית אבי טיפוס ודגמים. מצב זה צפוי להשתנות, היות שפוטופולימרים מודפסים בתלת ממד משמשים למספר גדל והולך של יישומי קצה בחלקי רכב ובסוגים אחרים של מוצרים. יישומי פוטופולימרים נעשים בתחומי הרכב, רפואה ושיניים ומיקרו-פלוואידים (Microfluidics).

1.1.2 קרמיקה (Ceramics)

ניתן לסווג חומרי הדפסת תלת ממד קרמיים לפי מאפייניהם הכימיים או העיקרון המעצב שלהם (Formative principle). השוק לחפצי קרמיקה מודפסים בתלת ממד נמצא עדיין בשלבי פיתוח מוקדמים. נכון לעכשיו, מרבית חפצי הקרמיקה המיוצרים הם אב טיפוס של פריטים שיוצרו באופן מסחרי, אם בכלל, בטכנולוגיות ייצור אחרות של קרמיקה. קיים מספר קטן יחסית של יישומי משתמש קצה עבור חפצי קרמיקה מודפסים בתלת ממד. יישומי קרמיקה בתלת ממד נעשים בתחומים תעופה וחלל, חומרי בנייה, רפואה ורפואת שיניים.

1.1.3 מתכות

אבקות מתכת ליישומי הדפסת תלת ממד הן תת-משנה של שוק אבקות המתכת הגדול. חומרי הדפסת תלת ממד מתכתיים מאופיינים בדרך כלל על-ידי מורפולוגיה של כדור וצפיפות אריזה גבוהה, המעניקים להם תכונות זרימה טובה. תכונות אלו חיוניות כדי להבטיח בניית חלקים אחידה ועקבית.

אבקות מתכת להדפסת תלת ממד מגיעות בגודל חלקיקים המותאם למערכת ההדפסה שבה נעשה שימוש. ניתן גם להתאים אותן לדרישות היישום לשימוש הסופי מבחינת ביצועים מכניים וגימור פני השטח. הדפסת תלת ממד משמשת לייצור תכשיטים ופריטים אחרים, אך עבור יישומים אלה, תפקידה של מדפסת התלת ממד מוגבל להדפסת השעווה או התבנית המשמשת לאחר מכן לאובייקט ממתכת מותכת.

טכנולוגיות להדפסת תלת ממד באמצעות מתכות

דפוס רב-מתכתי Multi-metal Printing: NVBOTS Boston, Mass. פיתחה טכנולוגיה להדפסת תלת ממד של אובייקטים באמצעות מתכות מרובות (multiple metals). לטענת החברה, הטכנולוגיה יכולה לפעול באופן פוטנציאלי כמעט עם כל חומר מתכתי, להשתמש במתכות מרובות לאורך כל הבנייה, ולייצר חלקים מוגמרים בזמן מהיר פי עשר מ- selective laser sintering (SLS).

הדפסת דיו מתכת Metal Inkjet Printing: צוות אוניברסיטת נורת'וסטרן יצר דיו נוזלי מאבקות מתכת, ממיסים ומכיל אלסטומר שניתן להדפיס דרך זרבובית באותה דרך כמו במדפסות תלת ממד מבוססות פלסטיק. לאחר מכן מסננים את המבנים המודפסים, תהליך בו הם מחוממים בכבשן כדי לאפשר לאבקות להתמזג יחד מבלי להינמס. ניתן להשתמש בתהליך גם להדפסת תחמוצות מתכת שהן זולות יותר, בטוחות ויציבות יותר מכמה אבקות מתכת טהורות.

חברת Xjet הישראלית פיתחה טכנולוגיה להדפסת דיו של חלקיקים מתכתיים. דיו מתכתי, שהוא בעצם תערובת של חלקיקי ננו-מתכת בנוזל, מוזרק דרך ראשי הדפסת פייזו (piezo-print heads), כמו בטכנולוגיות jetting

אחרות. אחד היתרונות של טכנולוגיה זו הוא בכך שהיא יכולה להשתמש בחלקיקים בגדלים שונים. החלקיקים מסדרים את עצמם ליצירת מבנה צפוף לחלוטין, אפילו יותר מאשר אבקת מתכת מיקרוסקופית רגילה.

היישומים העיקריים עבור חומרי הדפסת מתכת בתלת ממד הינם כיום בתעופה וחלל (למשל, מטוסים צבאיים) ובמוצרי רפואה ורפואת שיניים. השימוש בחומרים אלה בתעשייה הקשורה לתחום הרכב וההגנה, למעט כלי טיס, צפויה להתפתח במהלך השנים לקראת 2021.

1.1.4 חומרים אחרים

קיימות מספר מגבלות לגבי סוגי החומרים שניתן להשתמש בהם להדפסת תלת ממד. דוגמאות לחומרים בעלי פוטנציאל הן: נייר, טיח, אבן, זכוכית, עץ, רקמות אנושיות ושל בעלי חיים ומזון.

חומרי שעווה מודפסים בתלת ממד משמשים במחקר ופיתוח מתקדם, רפואת שיניים, עיצוב תכשיטים ומתכת, אומנות, אנימציה, סדנאות יציקה.

1.2 טכנולוגיות המשמשות להדפסת תלת ממד והחומרים המשמשים להדפסה

קיימות טכנולוגיות שונות בשימוש בהדפסת תלת ממד: Thermoplastic Extrusion הינה הטכנולוגיה הנפוצה ביותר להדפסת תלת ממד בתרמופלסטים. טכנולוגיות אחרות בשימוש הן: Selective laser sintering (SLS), Direct Metal Laser, 3D Inkjet Printing, Stereolithography Digital Light Processing (DLP), (DMLS), Selective Laser Melting (SLM) ו-4D Printing טכנולוגיה המפותחת במשותף על ידי Stratasys and MIT's Self-Assembly Lab. טכנולוגיה זו מייצרת עצמים שיכולים לשנות את עצמם ע"י תכנות מראש בתגובה לגירוי מסוים.

1.3 דינמיקת השוק של חומרים מתקדמים לשוק הדפסת התלת ממד

גורמים המניעים את צמיחת החומרים המתקדמים לשוק הדפסת התלת ממד

כיום טכנולוגיית הדפסת תלת ממד, נמצאת בשימוש נרחב ביישומי תעופה וחלל, רכב ורפואה. ההתקדמות המתמשכת בטכנולוגיות הדפסת תלת ממד שינתה את הדרכים הפוטנציאליות בהן מוצרים מתוכננים, מפותחים, מיוצרים ומופצים. עבור תעשיית הרכב, ההתקדמות הזו פתחה דלתות לעיצובים חדשים יותר, זמני הובלה קצרים יותר, עלויות נמוכות יותר, ומוצרים נקיים, קלים ובטוחים יותר. בעוד שיצרני ציוד מקורי לרכב וספקים משתמשים ב-AM בעיקר לייצור אב-טיפוס, המסלול הטכני של AM מוביל לשימוש בחדשנות במוצרים וייצור ישיר בנפח גבוה בעתיד.

היישומים הרפואיים של AM מתרחבים במהירות וצפויים לחולל מהפכה בתעשיית הבריאות. ניתן לארגן את השימושים הרפואיים הנוכחיים בהדפסת תלת ממד למספר קטגוריות רחבות: ייצור רקמות ואיברים, יצירת תותבות, שתלים ומודלים אנטומיים ומחקר תרופות בנושא גילוי, משלוח ומינון תרופות. כל הגורמים הללו תורמים בסופו של דבר לצמיחת שוק החומרים המתקדמים להדפסת תלת ממד.

הדפסת תלת ממד היא אחת הטכנולוגיות שמאפשרות כיום התאמה אישית ללא עלויות נוספות. מוצרים אלה כוללים שיניים, דגמים אורתודנטיים, כתרים, גשרים, תותבות ואפילו כלים כירורגיים.

גורמים המגבילים את צמיחת החומרים המתקדמים לשוק הדפסת התלת ממד

עלות חומר גבוהה: בענף הדפסת התלת ממד, היצרנים גובים על פי כמות וסוג החומר הדרוש לבניית החלק. עלויות החומר משתנות בהתאם לתכונות המכניות של החומרים ובהתאם לקלות ולמהירות של הייצור שלהם. למחירי חומרי הגלם בתעשיית הדפסת התלת ממד יש השפעה שלילית לא רק על העלות של בעל הקניין אלא גם על העיכוב באימוץ רחב יותר של הטכנולוגיה. מחיר החומרים מעלה את רף הכדאיות ומטה את ההבדל בעלויות בין ייצור בשיטת ה-AM לייצור קונבנציונאלי.

ניתוח פטנטים

מחקר של BCC זיהה לפחות 90 פטנטים הרשומים בארה"ב הקשורים ישירות לחומרים המשמשים להדפסת תלת ממד (USPTO).

פוטופולימר היווה את רוב הפטנטים (52 פטנטים, 58%), ואחריהם תרמופלסטיים ופולימרים (19 פטנטים, 21%) ומתכות (16 פטנטים, 18%).

Patent Portfolios: Ciba Chemicals (כיום חלק מ-BASF) ו-DTM (כיום חלק ממערכות תלת ממד) הם הגופים שהגישו את המספר הרב ביותר של בקשות לפטנטים, הקשורים לחומרי הדפסת תלת ממד, עם 10 פטנטים כל אחד (9.6%). גופים אחרים עם שלושה פטנטים או יותר כוללים את 3D SYSTEMS (7 פטנטים, 6.7%); אוניברסיטת קווינסלנד, אוסטרליה (6 פטנטים, 5.8%); Stratasys (5 פטנטים, 4.8%); טייג'ין סייקי (4 פטנטים, 3.8%); ו-Degussa/Evonik and CMET Bayer (3 פטנטים, 2.9% כל אחד).

ניתוח השוק

ענף החומרים להדפסת תלת ממד מרוכז מאוד. רק ארבע חברות: Arcam, ExOne, 3D SYSTEMS ו-Stratasys שולטות בכ- 75% מכלל השוק. כ- 71 חברות סה"כ מייצרות את עיקר החומרים להדפסה תלת-ממד, שהיו בשימוש ברחבי העולם בשנת 2017. ענף חומרי ההדפסה התלת ממדיים מרוכז מאוד, כאשר רק ארבע חברות חולשות על כ- 75% מהשוק. מובילי השוק הגנו והרחיבו את עמדות השוק שלהם באמצעות שורה של מיזוגים ורכישות.

מרבית החברות מייצרות חומרי הדפסה תלת ממדיים כחלק מקו מוצרים רחב יותר להדפסת תלת ממד הכולל מדפסות ו/או שירותי דפוס (35%), או שהן חברות מגוונות אשר קווי המוצרים שלהן כוללים חומרי הדפסת תלת ממד (36%). 29% הנתרים הם בעלי מומחיות לחומרי הדפסת תלת ממד.

פוטופולימרים היו את נתח השוק הגדול ביותר (55.9%) ב-2017, אך הצמיחה שלהם הינה האיטית ביותר. כתוצאה מכך, נתח השוק של מגזר זה אמור לרדת והצפי הוא שתרמו-פלסטיקה תישאר המגזר השני בגודלו. קרמיקה מהווה פחות מ- 0.6% מהשוק. חלק השוק של מתכות צפוי לעלות עד 2023 וכך גם נתח השוק של חומרים אחרים (בעיקר שעווה בשנת 2017, אך גם graphene ו-bio-inks).

צפון אמריקה מהווה את השוק הגאוגרפי הגדול ביותר עבור חומרי הדפסת תלת ממד בעוד אזור אסיה-פסיפיק הוא השוק הצומח במהירות הרבה ביותר. כתוצאה מכך, נתח השוק של אסיה-פסיפיק צפוי לעלות מ- 32.7% לכמעט 37.2% בין 2017 ל-2023.

היישומים הגדולים ביותר של חומרי הדפסת תלת ממד הם במגזר הרפואה ורפואת השיניים, שמהווה 26.8% מכלל הצריכה העולמית בשנת 2017 כשהצפי הוא ל- 29.8% בשנת 2023. ענף הרכב נמצא במקום השני, עם נתח של 19.5% והצפי הוא שב-2023 מוצרי צריכה יגיעו למקום השני עם נתח שוק של 21.4%.

1.4 השכלה ומיומנויות

ההצלחה של הייצור המתקדם באירופה נשענת על שילוב בין ידע הנדסי מוצק לעובדים מקצועיים. עם זאת, חברות יותר ויותר מדברות על מחסור במיומנויות שמתעורר בהקשר של הדפסת תלת ממד. CECIMO היא האיגוד האירופי שמייצג את האינטרסים המשותפים של ה-Machine Tool Industries ברחבי העולם ברמה של האיחוד האירופי. ל-CECIMO יש תפקיד מרכזי בקביעת הכיוון האסטרטגי של תעשיית כלי מכונה אירופאים והיא מקדמת את הפיתוח של המגזר בתחומי הכלכלה, הטכנולוגיה והמדע. ניתוחי המצב בהובלת CECIMO הראה שככל שהדפסת התלת ממד מתקרבת לייצור סדרתי, כוח האדם שעובד על מכונות קונבנציונאליות יצטרך לפתח מיומנויות חדשות. מערכת המיומנות שלו תהיה בהדרגה היברידית, כך שיכולות subtractive manufacturing יוצמדו למיומנויות חדשות ספציפיות לתהליך הייצור עם מכונות additive. טכנאים ומפעילים עם מיומנויות אלה יהיו בעלי חשיבות עליונה על מנת להימנע מהאטה בהדפסת תלת ממד תעשייתית.

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

ההמלצות שניתנות בדוח CECIMO (2017) הן:

- מעורבות רבה יותר של הסקטור הפרטי. הכנסת פרוצדורות של additive system לתוכניות הלימודים, כך שהמחנכים יהיו מעודכנים בהתפתחויות האחרונות.
- טיפוח חוזקות משלימות על-ידי מעבדות יצור ברחבי אירופה.

- 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.
- קידום של השימוש בכלים הקיימים להתאמה לעבודה המבוססת על מיומנויות, כגון EURES Job Mobility Portal על מנת להתמודד עם מחסור במיומנויות בטווח הקצר.
- מציאת אפשרויות מימון לבתי ספר ולאוניברסיטאות לגישה לציוד AM.

סקר שנערך ב-2016 על ידי חברת פתרונות ניהול הדפסה, הראה שב-87% מבתי הספר ברחבי העולם יש גישה מוגבלת של התלמידים להדפסת תלת ממד. שלושת הסיבות העיקריות לכך הן חוסר יכולת של המחנכים לנהל ולשלוט בגישה למדפסת התלת-ממד בבית הספר, חוסר יכולתם לנהל את זמן ההדפסה ואת עלות החומרים והיעדר הדרכה לגבי הוספת הדפסת תלת-ממד לתוכניות הלימודים. מעורבות רבה יותר של התעשייה בחינוך תסייע בהתמודדות עם חלק מהקשיים האלה.

1.5 מימון מו"פ בתחום הדפסת תלת ממד

פעילויות מו"פ הממומנות ע"י ה-EU בתחום הדפסת תלת ממד גדלו בהדרגה בשלושת העשורים האחרונים. הזדמנויות למימון הדפסת תלת ממד אינן מגיעות רק ממענקים. קובעי מדיניות ב-EU קידמו יישום שותפויות פרטיות-ציבוריות (Public Private Partnerships-PPP) על מנת לקדם פיתוחים טכנולוגיים של הדפסת תלת ממד.

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), הינו מודל מימון מעורב עבור מו"פ ספציפי בהדפסת תלת ממד. Horizon 2020 מימן מעל 21 פרויקטים במהלך השנתיים הראשונות של התוכנית, בסכום כולל של לפחות 95 מיליון יורו.

2 תחום הדפסת תלת ממד וחומרים מורכבים להדפסת תלת ממד בישראל

2.1 תעשייה

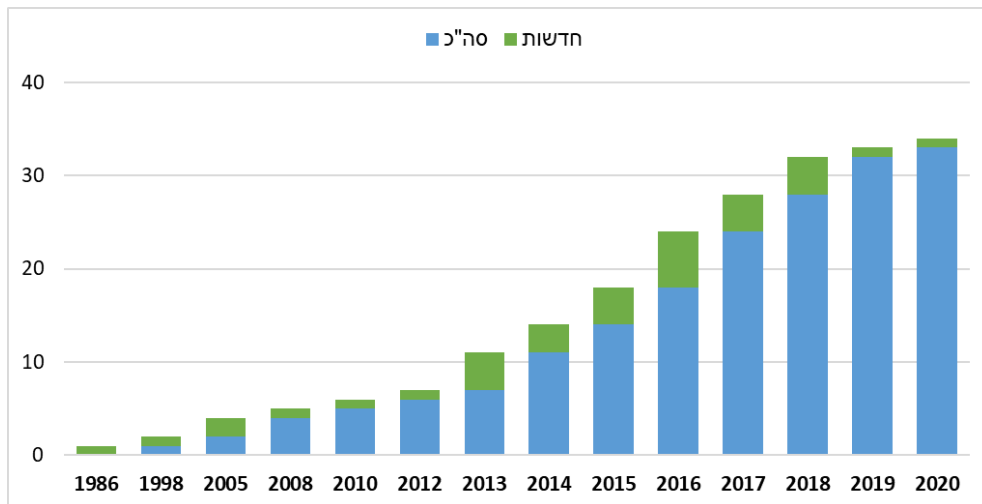
חברות בתחום הדפסת תלת ממד

נכון לחודש ספטמבר 2020, היו בישראל 34 חברות טכנולוגיה שתויגו במאגר ה-Startup Nation Central ⁴⁷ Finder לפי התגית additive-manufacturing. ניתן לראות שהחל משנת 2013 חל גידול מסוים במספר החברות החדשות שהוקמו בתחום מידי שנה ⁴⁸ (איור 23).

⁴⁷ קישור לאתר: <https://finder.startupnationcentral.org>

⁴⁸ אם לא צוין אחרת מקור הנתונים בתת פרק זה הינם עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder, נכון ליום 17/9/2020.

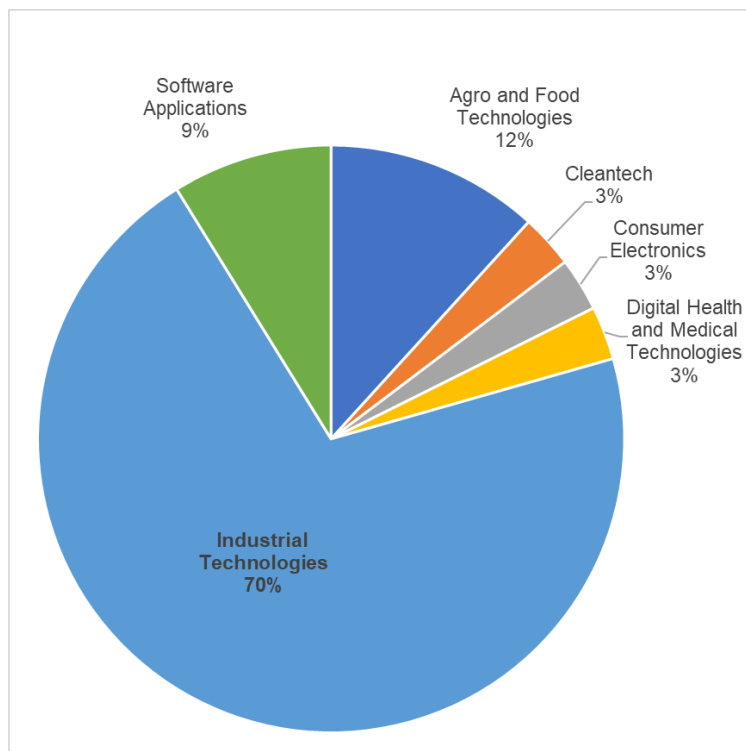
איור 23: חברות בתחום התלת ממד בישראל לפי שנת הקמה



בפילוח על פי סקטור, רוב החברות בתחום התלת ממד בישראל (70%) עוסקות בטכנולוגיות תעשייתיות (Industrial technologies) שני תחומים נוספים שנוספו בחמש השנים האחרונות הם טכנולוגיות אגרו-טק ומזון ויישומי תוכנה המהווים 12% ו-9% מהחברות בהתאמה (איור 24).

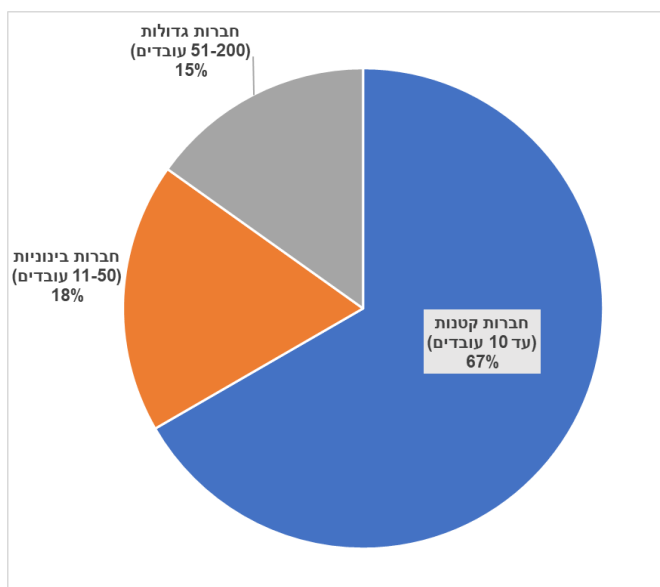
34% (11 חברות) מהחברות בתלת ממד הן חברות עוסקות בפיתוח ומכירה של חומרים מורכבים בתעשייה זו.

איור 24: חברות תלת ממד לפי סקטור



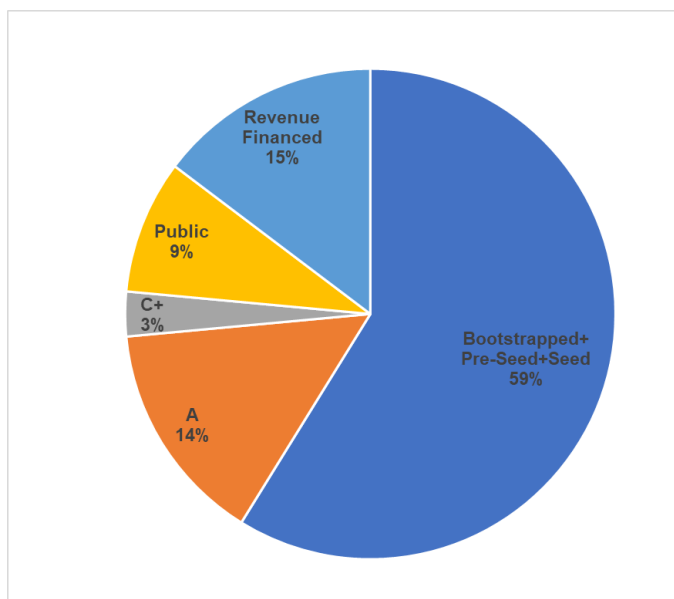
רוב החברות 85%, הן חברות קטנות שיש בהן עד 50 עובדים (ברוב החברות עובדים עד עשרה עובדים). 15% מהחברות הן חברות גדולות המונות בין 50 ל-200 עובדים ורק 3% הן חברות גדולות המעסיקות למעלה מ-500 עובדים.

איור 25: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה



נתוני עובדים אלה מסבירים את העובדה כי חלק גדול מהחברות נמצא בשלבים התחלתיים. 59% מהחברות נמצאות בשלבים הראשונים של המימון (מימון עצמי, SEED-Pre ו-SEED), 14% נמצאים בסבבי גיוס A ורק 3% בשלבי C+.

איור 26: חברות בתחום התלת ממד לפי Funding Stage (2018)



2.2 גיוסי הון

11 מתוך 34 החברות גייסו הון בסך של כ-289.5 מיליון דולר. כאשר מעל 90% גייסו על ידי שתי חברות XJet ו-Nano Dimension. חברת XJet גייסה 139 מיליון דולר החל משנת 2014 ב-5 סבבים שכללו 9 משקיעים. הסכום הגבוה ביותר - 45 מיליון דולר גייס בספטמבר 2019. חברת Nano Dimension גייסה 127 מיליון דולר ב-10 סבבים עם 4 משקיעים. בסבב האחרון בשנת 2020 גייסו 35.9 מיליון דולר.

2.3 חברות מובילות בתחום

חברת XJet: פיתחה טכנולוגיית ננו להדפסת תלת ממד במתכת ובחומרים קרמיים, שמבטיחה לשנות את תהליכי הייצור בתעשיות רבות. החברה הקימה בפארק המדע ברחובות, מרכז להדפסות תלת ממד במתכת וקרמיקה בטכנולוגיה שפיתחה NanoParticle Jetting המשתמשת בננו-חלקיקים בתרחיף נוזלי, לצורך "הדפסת" מוצרים תלת ממדיים ממתכת ומחומרים קרמיים בהזרקה בניגוד למערכות הדפסה אחרות המבוססות על שימוש באבקה. הטכנולוגיה מהווה פריצת דרך בהדפסת תלת ממד במתכת ובקרמיקה, ומאפשרת ייצור מדויק של חלקים מורכבים מאוד ובעלי פרטים קטנים. 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.

חברת Nano Dimension: החברה הוקמה בשנת 2012 (בשם היירקס טכנולוגיות), עוסקת במחקר ופיתוח של טכנולוגיות הדפסת תלת ממד למכשירים אלקטרוניים הדורשים תכונות מתחכמות. המוצרים והשירותים של החברה עוזרים לייצור במהירות אבי טיפוס המתאימים למגוון רחב של תעשיות, כולל מוצרי אלקטרוניקה, מכשירים רפואיים, ביטחון, תעופה וחלל, רכב, האינטרנט של הדברים וטלקומוניקציה. בנוסף, החברה מפתחת מוצרי דיו מבוססי ננוטכנולוגיה, שהם מוצרים משלימים למדפסות תלת ממד⁴⁹. במחצית השנייה של 2019 השיקה החברה דגם חדש של המדפסת, המדפסת החדשה חורגת מעולם אבות הטיפוס, ומאפשרת ייצור אמיתי של סדרות קצרות⁵⁰

חברת Stratasys: 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 ממד), וכן משירותי תמיכה ותחזוקה למכונות.

סטרטסיס פועלת במתכונת של חברה דו-לאומית עם הנהלה ברחובות והנהלה נוספת במיניאפוליס, ארה"ב. הצד הישראלי אחראי על פיתוח וייצור מדפסות תלת-ממד בטכנולוגיית PolyJet 3D המיוצרות במפעל הייצור הישראלי בקרית גת. הצד האמריקאי אחראי על פיתוח וייצור מדפסות FDM בארצות הברית.

בסך הכל, החברה מעסיקה כ-2,230 עובדים, מהם כ-520 עובדים בישראל, 1,350 עובדים בארה"ב, והשאר (360 עובדים) באירופה ובאסיה, בעיקר במכירות ובתמיכה. בדו"ח הרבעוני האחרון שלה היא העריכה ששנת 2019 תהיה שנה של צמיחה מתונה מאוד, ופירסמה תחזית מכירות של 700-670 מיליון דולר לשנת 2019 כולה.⁵¹ ב-2/2020 מונה אורן זייף למנכ"ל והוא מוביל תהליך לגיבוש אסטרטגיה עסקית חדשה המיועדת להחזיר את סטרטסיס למסלול צמיחה באמצעות התמקדות בטכנולוגיות פולימרות ובשוק הייצור התעשייתי.⁵²

2.4 אקדמיה ומכוני מחקר

מניתוח מדדים ביביליומטריים ומענקי המחקר בתחום, אין עדות למחקר משמעותי בהיקפו באוניברסיטאות בישראל בתחום 'חומרים מורכבים חכמים להדפסת תלת ממד' בהשוואה למדינות אחרות בעולם. ניתן לשער שהמחקר בתחום זה מתבצע במידה רבה בתעשייה, דבר הניכר גם בניתוח הפטנטים שערכנו וכן בשל אופיו האפליקטיבי.

מכון המתכות הישראלי

לפני כארבע שנים הוקם במכון המתכות שבטכניון, מרכז לקידום ופיתוח של טכנולוגיות הייצור בתלת ממד. לצורך קידום פעילות זו מופעלות במכון שתי מערכות ייצור מתקדמות למוצרי מתכת, הראשונה מבוססת על התכה בקרן אלקטרוניים והשנייה מבוססת על התכה בקרן לייזר. במסגרת הרחבת הפעילות בתחום הייצור בתלת ממד הצטייד מכון המתכות בסיוע רשות החדשנות, במערכת המיועדת לייצור בתלת ממד של מוצרים קרמיים ושל רכיבים מתקדמים מחומרים מורכבים (מבוססים על מערכת מתכת/קרמיקה).

⁴⁹<https://www.themarket.com/markets/1.2325469>

⁵⁰<https://techttime.co.il/2020/02/03/nano-dimension-58/>

⁵¹<https://techttime.co.il/2019/12/17/stratasys-21/>

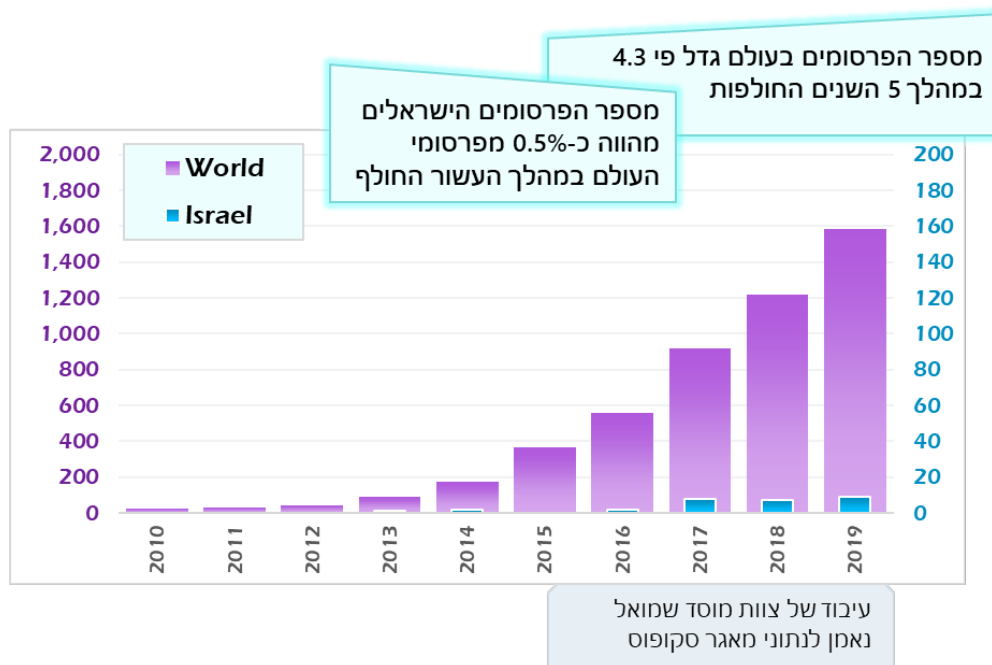
⁵²<https://techttime.co.il/2020/08/06/stratasys-24/>

המאגד הוקם בשנת 2015 בתמיכת רשות החדשנות, במטרה לפתח טכנולוגיות מתקדמות לעיצוב והדפסה תלת ממד של מבני אויר מורכבים עשויים מסגסוגות טיטניום. המאגד כולל חברות מובילות כגון: התעשייה האווירית, אלביט מערכות-ציקלון, תע"ש, אורביט, אלגת ו- CAS לצד קבוצות מחקר מהטכניון, אוניברסיטת תל אביב, אוניברסיטת בן גוריון ומכללת אפקה להנדסה. הטכנולוגיות השונות בהן עסק המאגד כוללות טכנולוגיות תכנון מבנים, חומרים, הדפסה וחיבור של חלקים מודפסים.

2.5 מדדים ביבליומטריים

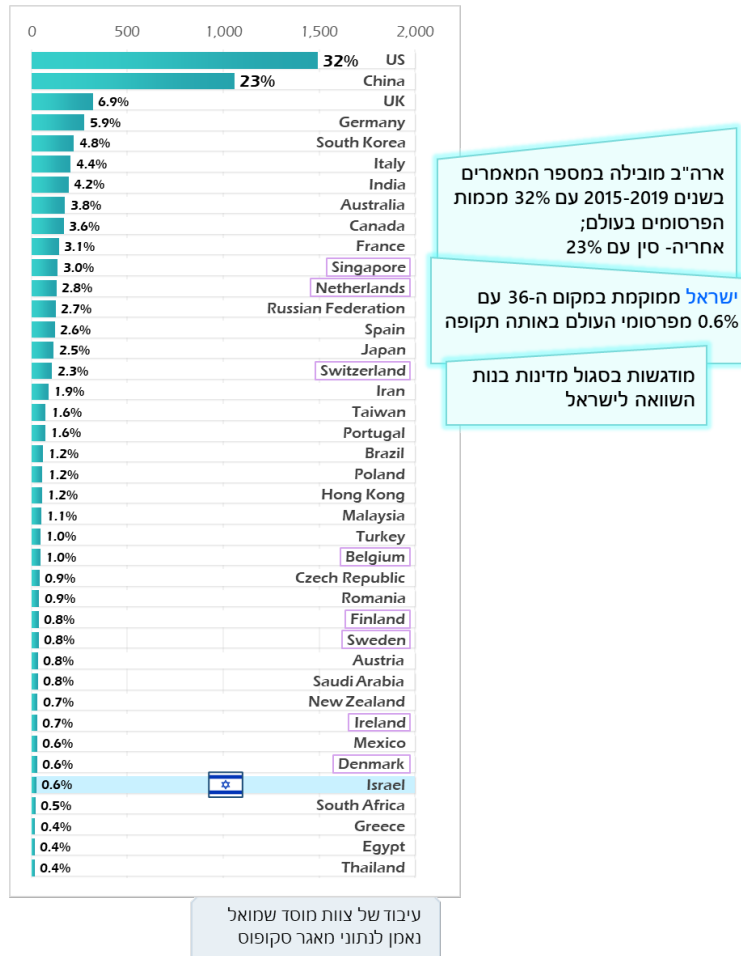
מספר הפרסומים בתחום חומרים מורכבים חכמים להדפסת תלת ממד בעולם, גדל פי 4.3 במהלך 5 השנים החולפות. מספר המאמרים הישראליים בתחום מהווה במוצק כ-0.5% מפרסומי העולם באותה התקופה.

איור 27: השינוי במספר הפרסומים בתחום חומרים מורכבים להדפסת תלת ממד בישראל יחסית לעולם



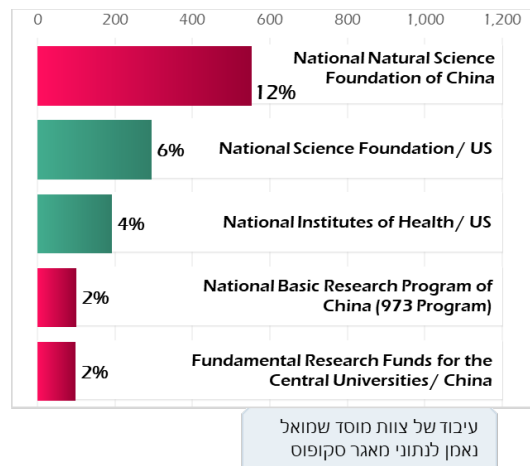
ארה"ב, מובילה עם 32% מכמות הפרסומים בעולם בשנים 2015-2019; סין מדורגת במקום השני עם 23% מפרסומי העולם בתחום. ישראל ממוקמת במקום ה-36.

איור 28: דירוג המדינות בתחום חומרים מורכבים להדפסת תלת ממד, לפי מספר פרסומים, בשנים 2015-2019



הגרף הבא מציג את גופי המימון העיקריים שהופיעו ברשימות הספונסרים של הפרסומים המדעיים⁵⁴ בתחום חומרים מורכבים להדפסת תלת ממד במהלך השנים 2015-2019. הקרן הלאומית הסינית למדע (National Natural Science Foundation of China) בולטת במספר המאמרים הממומנים עם 12% מסך המאמרים בעולם בתחום בתקופה שנבדקה. אחריה ה-NSF האמריקאי עם 6% מהפרסומים.

איור 29: גופי המימון העיקריים שהופיעו ברשימות הספונסרים של הפרסומים המדעיים⁵⁴ בתחום חומרים מורכבים להדפסת תלת ממד במהלך השנים 2015-2019

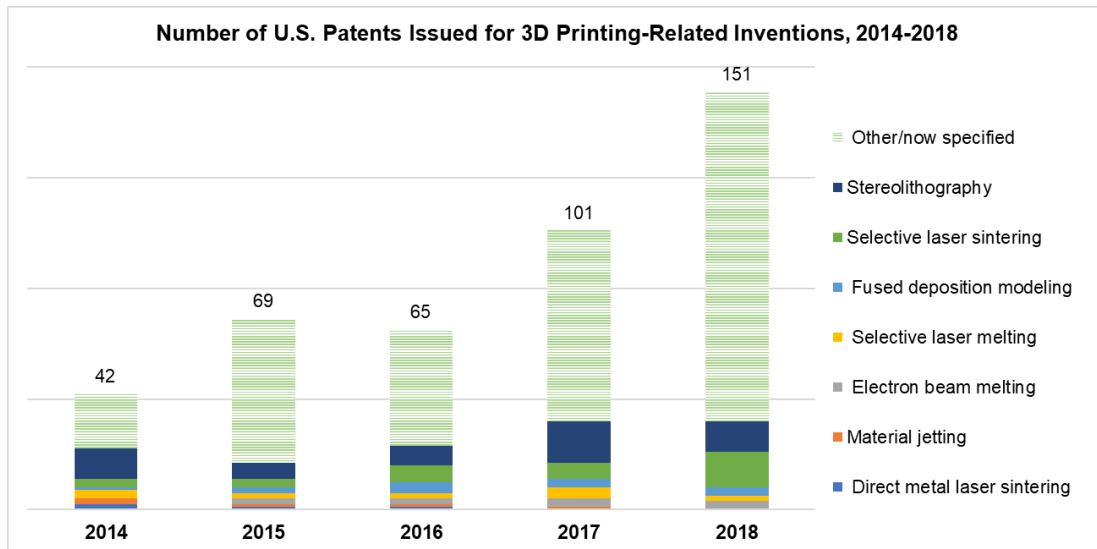


⁵⁴ התפלגות לפי מספר פרסומים לא בהכרח משקפת את התפלגות ההשקעות

2.6 בקשות לפטנטים

על פי דוח של ה-BCC, מספר הפטנטים האמריקניים שאושרו מדי שנה בגין המצאות הקשורות להדפסה בתלת ממד גדל פי ארבעה בחמש השנים האחרונות (2014-2018). בשנת 2014 מספר הפטנטים הקשורים להדפסת תלת ממד עמד על 42 ועד שנת 2018 המספר עלה ל-151 – גידול של יותר מ-250% בחמש שנים. עובדה שיכולה להצביע על גידול במספר האנשים העוסקים בתחום זה.

איור 30: מספר הפטנטים שנרשמו ב USPTO בשנים 2014-2018



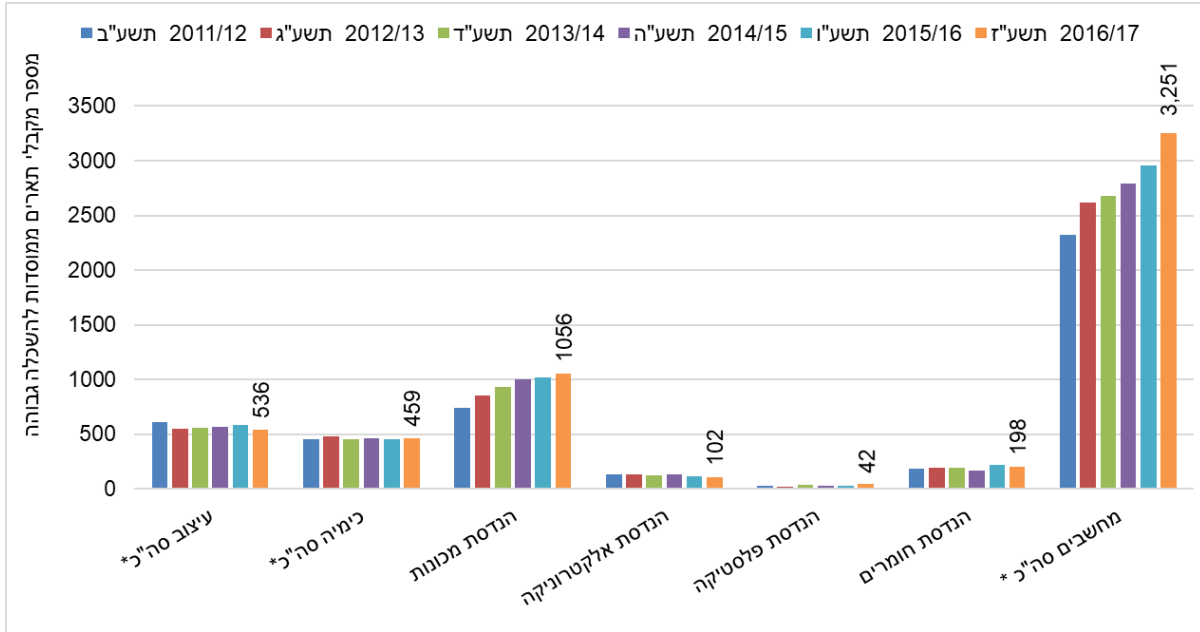
מקור: BCC, Global Markets for 3D Printing (2019)

בישראל, בשנים 2014-2019 הוגשו ב-USPTO 6 בקשות לפטנטים בתחום החומרים המורכבים בהדפסת תלת ממד על ידי מגישים ישראלים. המגישים המובילים הם חברת XJET עם 3 בקשות לפטנט והחברות Nano Dimension, Polymertal ו-Nano Cell עם בקשה אחת לפטנט כל אחת. כמו כן, בין השנים 2014-2019 הוגשו 8 בקשות PCT בתחום זה, כאשר המגישים המובילים היו Nano Dimension עם 5 בקשות לפטנט IO Tech Group עם שתי בקשות ו-Melodea עם בקשה אחת. שתי בקשות נוספות לפטנט הוגשו בשנת 2016 על ידי חברות ישראליות ברשות הפטנטים הישראלית. שתיהן של חברת Melodea. אחד הפטנטים הוא בקשה משותפת עם האוניברסיטה העברית. אין עדיין פטנטים רשומים של חברות ישראליות בתחום.

2.7 אקדמיה

בגרף הבא מוצגים מקבלי תארים מהאוניברסיטאות בדיסציפלינות הרלבנטיות לתחום הדפסת תלת ממד בשנים 2012-2017. מספר מקבלי התארים במחשבים עמד על 3,251 ובהנדסת מכונות עמד על 1056 בוגרים בשנת 2017. 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 כמעט ללא שינוי בשנים האחרונות. מספר הבוגרים בהנדסת חומרים ובהנדסת אלקטרוניקה נשאר, אף הוא, ללא שינוי בחמש השנים האחרונות והוא נמוך מאוד בהשוואה לשאר התחומים הנדרשים להדפסת תלת ממד. גם תחום הנדסת הפלסטיקה – תחום הנדרש מאוד למחקר ופיתוח בתחום הדפסת תלת ממד. עד שנת 2016 (23 בוגרים בשנת 2016) היה נמוך וללא שינוי. אך, בשנת 2017 עלה מספר הבוגרים ל-42 בוגרים – לכאורה שינוי משמעותי (עליה של 86% בהשוואה לשנת 2016) – אך עדיין עומד על עשרות בודדות.

איור 31: מקבלי תארים מהאוניברסיטאות בתחומים אלה בשנים 2012-2017



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 ממד באקדמיה נעשתה באמצעות סקירת אתרי האינטרנט של המוסדות האקדמיים וראיונות עם אנשי אקדמיה בתחום הדפסת תלת ממד.

הכשרה לתואר ראשון בהדפסת תלת ממד קיימת רק במכללת שנקר. לימודי הנדסת פלסטיקה בהתמחות חומרים והדפסת תלת ממד לתואר BSc.

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

באוניברסיטת תל-אביב

במסגרת תואר ראשון בהנדסה מכנית, מדעי הטבע- כימיה.

שם הקורס: הדפסת תלת ממד ותכן חלקי פלסטיקה - 3D printing and design of plastic parts
מטרת הקורס: לימוד הטכנולוגיות להדפסה תלת ממדית, 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 ממדיות.

נושאי הלימוד: לימוד הטכנולוגיות להדפסה תלת ממדית והיישומים המפותחים כיום, לימוד הטכנולוגיות ותכן חלקי הפלסטיקה, שיקולים, חומרים, מידול, חישובים ואנליזות והתנסות בתכן ובהדפסה תלת ממדית של חלקי פלסטיקה.

בטכניון

1. במסגרת לימודי חוץ מתקיים בקמפוס הטכניון בשרונה ת"א, קורס שנקרא: הדפסת בתלת ממד **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 ממד. מטרת תוכנית הלימוד 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 ממדית**.

באוניברסיטה העברית

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

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

באוניברסיטת בן גוריון

קורס: "ריבוד והדפסה תלת ממדית במתכות" במחלקה להנדסת ביוטכנולוגיה.

באוניברסיטת חיפה

קורס: **הדפסה בתלת ממד כפרדיגמה ללימוד עיצוב** – חוג לריפוי בעיסוק⁵⁵.

באריאל

קורסים של הנדסאים: **עיצוב תלת-ממד והדמייה - 3 DMAX** הכולל שירותי הדפסת תלת ממד⁵⁷.

2.8 הכשרה במכללות

האקדמיה לאומנות ועיצוב בצלאל

במסגרת לימודי עיצוב קרמי זכוכית ניתן הקורס: **מבוא לטכנולוגיות תלת ממד**. 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 ממד BSc.

הלימודים מקנים לסטודנטים ידע בסיסי וכלים תכנוניים לתכנון אינטראקטיבי של מוצרי תלת ממד. הסטודנטים לומדים סוגיות יסוד במדעים, בהנדסה, ובהנדסת פלסטיקה ופולימרים כמו כימיה אורגנית, שימושי מחשב, חומרים מרוכבים, מכניקה של חומרים פלסטיים וזרימה ומעברי חום. בהתמחות בהדפסת תלת ממד 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 ממד מחומרים שונים. תוכנית הלימודים מתמקדת בנושאים מכניים הנדסיים בשילוב אסטרטגיות לבחירת חומרים ותהליכי עיבוד בעזרת תוכנות מודולריות.

מכללת רמת גן

⁵⁵ <https://studapps.haifa.ac.il/catalog/#/course/51546640/001>

⁵⁶ <http://www.ariel.ac.il/handasaim/certificate/design-and-drafting-software/3d>

⁵⁷ <https://www.ariel.ac.il/newsletter/9497>

קורס הדפסה בתלת ממד

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 ממד 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.

2.9 קורסים במסגרת מוסדות שאינם אקדמיים

מכללת עתיד (פרישה ארצית): עתיד היא רשת מכללות שפועלת בפריסה ארצית. ברשת זו אפשר ללמוד בקורס תלת ממד, שבו לומדים על טכנולוגיות הדפסה מתקדמות. היקף התוכנית 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 ממד מתקיים במתכונת קורס קצר, בן חמישה מפגשים שבועיים, ומתמקד בהפעלת תוכנת SKETCHUP להדפסה במדפסות ביתיות.

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

3 הכשרת כוח אדם מדעי וטכנולוגי לעבודה בתחום הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים, טכנולוגיות ויישומים

במסגרת העבודה ערכנו ראיונות עם מומחים בתחום⁵⁸ והעבר שאלון⁵⁹ ונסקרו מקורות מידע. התמונה שעולה הינה שלא קיים כיום מענה לצרכי כוח האדם הנדרש בתחום בישראל. קיים מחסור בולט של כוח אדם מקצועי (מהנדסים והנדסאים) בתחום הדפסה תלת-ממדית של חומרים מתקדמים. נדרש כוח אדם מיומן בתחומי פיתוח ויישום חומרים להדפסה תלת ממד, לתכנון מוצרים ותהליכים ליצור בתלת ממד ולתפעול ותחזוקת ציוד הייצור בתחום. כמו כן נדרש תגבור של החוקרים בתחומים השונים: חומרים, כימאים עם רקע בפולימרים, מטלוגים בעלי ניסיון, תכן מוצרים ובדיקות מוצרים שיוצרו בטכנולוגיות הדפסת תלת ממד. ישנו מחסור בכוח אדם שמכיר היטב את התהליכים, מגבלותיהם, והפיכתם למוצרים.

⁵⁸ רשימת המרואיינים:

(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 (9) חיים רוזנזון – מנהל מכון המתכות.

⁵⁹ פרופיל העונים לשאלון (חברה ותפקיד): על שאלון המחקר ענו 24 חברות העוסקות בתחום הדפסת התלת ממד. החברות שענו על השאלון עוסקות במגוון היבטים של תחום הדפסת התלת ממד: פיתוח תוכנה לייעול תהליך הדפוס ושליטה מרחוק במדפסות תלת ממדיות, פיתוח טכנולוגיה להדפסה תלת ממדית פונקציונאלית לקבלת מבנים תלת ממדים, פיתוח ויצור מדפסות תלת ממד, פיתוח פלטפורמה אינטרנטית לעיצוב בתלת ממד, פיתוח שירות ענן להגנה על קבצים המיועדים ליצור בהדפסת תלת ממד, הגנה על IP בהדפסת תלת ממד, הדפסת תבניות עבור מכלולים תעופתיים, פיתוח מדפסת וחומרים להדפסה תלת ממדית בתחום ה micro manufacturing ועוד.

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

קיים ידע רב בהכנת הסגסוגות. הבעיה העיקרית הינה מחסור במהנדסים בחברות שישמו את הידע ויפתחו יישומים על בסיס זה בתעשיית הייצור. כמו כן יש מחסור באנשי מו"פ שידעו לבצע שילוב של חומרים אורגנים וחומרים אנאורגנים.

רוב ההכשרות בתחום מתבצעות בחברות. זה לא מספק את הדרישות לשנים הבאות. נדרשת תוכנית הכשרות שצופה את פני העתיד בתחומים אלו. עם התפתחות הנושא בתעשייה ובשוק תגבר הדרישה למומחים בנושא בכל תתי ההתמחויות. נושא כ"א יכול להפוך לצואר בקבוק להתפתחות התחום בישראל. נדרשת הערכות לאומית להכשרות בנושא. גורמים שיכולים להוביל הכשרות אלו הם המכללות הטכנולוגיות וגורמים פרטיים המשלבים יכולות טכנולוגיות עם יכולות הכשרה.

הדיסציפלינות הנדרשות לתחום התלת ממד הם: תוכנה, הנדסת חומרים, הנדסת פלסטיקה, הנדסת אלקטרוניקה, הנדסת מכונות, כימיה ועיצוב. בכל אחת מהן נדרשת הכשרה ספציפית לתחום התלת ממד.

במרבית פקולטות ההנדסה לא מועברים קורסים בנושאים אלו, לא במתכות ולא בפולימרים. סטודנטים המסיימים את לימודיהם במרבית המקרים מכירים את הנושאים כתוצאה מעניין אישי ולא מלימוד מסודר. זה המצב גם בלימודי מוסמכים, מרבית הנושאים בהם נושא המחקר משולב עם הדפסה תלת ממדית נובעים מצורך או עניין בתעשייה ולא תמיד ניתן למצוא מנחים אקדמיים לשינוף פעולה. בנוסף, תעשיית התלת ממד מתחרה על ההעסקה של בוגרי הפקולטות הרלוונטיות עם תחומים רבים אחרים.

פרופ' עזרי תרזי הוסיף שהתהליך של המעבר של התעשיות המסורתיות לתהליכים פרמטרים ודיגיטליים בתכנון וייצור איננו מתקדם בקצב הנדרש. בעוד שבישראל נולדו חברות הי טק שהמציאו מדפסות (אובג'קט ומסיבית), בתעשייה המסורתית תהליכים אלה לא התרחשו. יש פער גדול בין היכולות של התעשייה בתחום של הדפסה תלת ממדית. כך שהדרישה לכוח אדם המיומן בהדפסה קיימת בעיקר במרכזי מחקר של פיתוח ציוד רפואי או רפואה, ציוד צבאי והי-טק. לעומת זאת, התעשייה המסורתית לא עברה את המשוכה הזאת ולכן אין דרישה למיומנויות אלה. לדבריו הדפסה תלת ממדית דורשת שלושה סוגי מיומנויות:

א. עיצוב ותכנון תלת ממדי המתחשב בסוג האילוצים של כל מדפסת ושיטת הדפסה כולל עיצוב פרמטרי וגנרטיבי.

ב. הבנה מעמיקה של תהליכי ההדפסה השונים והתאמת ההדפסה והמדפסת לחלק הנדרש, על פי דרישות התפקוד והעמידות ועל פי דרישות כמות הייצור, כולל חומרי הדפסה שונים ותכונות החומרים לאחר ההדפסה.

ג. תפעול המדפסת והבנה מעמיקה של שיטות ישירות ועקיפות להשגת המטרה.

נדרשת הכשרה לעובדים בתחום מעבר לרקע איתו הם מגיעים לחברה. ההכשרה הנוספת שנדרשת היא:

- לימוד נרחב של התעשייה והטכנולוגיות הנפוצות.
- הכרות עם עולם המושגים, הכרת טכנולוגיות תעשייתיות/ביתיות.
- הבנה של שפה חדשה. מחשבה על ייצור תלת ממדי והטכנולוגיה.
- ידע בשיטות הדפסה, שמירה על הפרמטרים של הדפסה ותהליכים משלימים לאחר הדפסה.
- טכנאים מולטי-דיסציפלינריים 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
- עיצוב בתלת ממד ממשק משתמש, עיצוב פולימרים.
- היכרות עם תהליכי ייצור של חלקים. ספציפי לתחום של ייצור (לא prototype) ב-Additive Manufacturing
- הכשרה בפיתוח: חומרים, מכונות, תוכנה.

בהסתכלות קדימה, ההכשרות החדשות שידרשו לעובדים בתחום הן:

- הכשרה יסודית בהבנת תהליכי הייצור, מגבלותיהם ותהליכי עיבוד משלים.
- הרחבה והעשרה בתהליכים, חומרים (בעיקר במתכות מנגנוני ההתמצקות שונים מתהליכים מוכרים דוגמת יציקות וחישולים), אנליזות טופולוגיות ותרמיות לחישוב מאמצים שיריים ועיבויים משלימים.
- תוכנה בעיקר בתחום הגרפיקה, עיצוב תעשייתי UI/UX, עיצוב בתוכנות תלת ממד.
- כימיה מתקדמת.

- התמחות בתהליכי הדפסה מתקדמים, טכנולוגיות הדפסה חדשות, הכרות מעמיקה עם פורמטים של קבצי הדפסה. הכרת המגבלות של הדפסת תלת ממד מול שיטות ייצור מסורתיות. תכנון להדפסה בשימוש בתלת ממד.
- הבנה עסקית, ניהול פרויקטים מולטי-דיסציפלינריים.
- בדיקות
- עיבוד תמונה AI
- בעולם בו ניתן יהיה להדפיס חלקים צבעוניים תידרש הכשרה מיוחדת גם לעולמות הצבע.
- התאמה לטכנולוגיה ספציפית. אם רוצים לתכנן כלי מודפס לשימוש בניית ספציפי, זה דורש הבנה גם במכונות (חוזק, תכן וכו'), גם במדפסות תלת ממד 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.

המלצות למדיניות הכשרה בתחום:

- לימודים יותר מעשיים. קורסים שמשלבים אקדמיה עם ניסיון תעשייתי. שילוב של מובילי תעשייה בתחום בנקודות השקה. לשלב מרצים מחברות בתחום להעשרה בקורסים לסטודנטים בתחום הנדסה וכימיה. בארץ יש גופי ידע אדירים בסטרטסיס, ב HP, XJET, NNO DIMENSION וכו' - שבוע הכשרה, כולל שילוב סטודנטים בעבודה בחברות אלו.
- דגש על פיתוח web ועל יישומים וכלי עיצוב שימושיים בתלת ממד. עיצוב בתוכנות תלת ממד. קורס בגופים תלת ממדים - משטחים, סוגי קבצים, מגוון תוכנות ויישומן, CNC הבנה ותפעול.
- בתחום המכונות והעיצוב התעשייתי ללמד את עולם הצבע.
- תכנים בכימיה תעשייתית ייחודית, פיתוח חומרים. בהנדסה חשיפה לתחום הדפסת תלת ממד ותכנון.
- לשלב Industry 4.0 ו-AM, ללמד שיטות ל-repeatability ו-consistency. DFAM
- ללמד תיכון עבור מדפסות, טיפולים תרמיים, חומרי גלם, איכות ובקרת חלקים, פיתוח חומרים חדשים.
- ללמד סולידורקס, לפתוח FABLAB כדי שהסטודנטים יתנסו בהדפסה - עדיף מדפסות ממספר טכנולוגיות שונות, לרכוש סורקים כדי שיתנסו גם בסריקות.
- מהנדסים מולטי-דיסציפלינריים.
- מכון המתכות גיבש תוכנית מפורטת בתחום זה. התוכנית עונה על צרכי ההכשרה לתחומי הדפסה של חומרים מתקדמים לשנים הקרובות בשילוב עם רשות החדשנות ושיתופי פעולה עם יצרניות מדפסות בין-לאומיות.
- במסגרת לשכת המהנדסים הוקם איגוד להדפסה תלת ממדית שחזונו להרחיב את הידע בתחום לקהילת המהנדסים. המשך פעילותו.
- הוספת/חיידוד התכנים הנ"ל לתוכניות הלימוד. מסלולי העשרה והכשרה באוניברסיטאות, מכללות וארגוני המהנדסים וההנדסאים.

4 סיכום צורכי כוח אדם לתחום חומרים מורכבים חכמים להדפסת תלת ממד והמלצות

כפי שתואר בדו"ח, הדפסת התלת ממד 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 ממד הוא תחום מולטי-דיסציפלינרי הן בהיבט הפיתוח והן בהיבט היישום. בישראל פועלות 11 חברות שעוסקות בתחום של חומרים מורכבים להדפסת תלת ממד. שבע מתוך 11 החברות גייסו הון בסך של כ- 145.5 מיליון דולר. כמה מהחברות האלה בעלות שם עולמי כדוגמת Xjet, Stratasy, וחברת Nano Dimension. נראה שהמחקר בתחום מתרכז יותר בתעשייה ופחות באקדמיה וקיים פוטנציאל בתעשייה להצלחה בתחום.

האנשים שעוסקים בתחום מגיעים מדיסציפלינות שונות. על מנת שתחום הדפסת תלת ממד יוכל לפרוח ולשגשג יש צורך 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. צפוי גידול עצום לתחום בגלל צרכי

הפרסונליזציה במוצרים, הירידה בעלויות חומרי הגלם והמכונות והקפיצה ביכולות הטכנולוגיות ובשיפור הפונקציונליות של חומרים.

המלצות למדיניות מבחינת כוח האדם הנדרש לתחום:

1. יש לדאוג לכך שהדפסת תלת ממד תיכנס לתוכנית הלימודים לבתי ספר תיכוניים. שבכל בית ספר תהיה מדפסת תלת ממד והחומרים הנדרשים, בצורה שתאפשר לתלמידים להיחשף לתחום זה. לשם כך יש להכשיר מורים למקצועות השונים (מחשבים, עיצוב, מכניקה, כימיה ועוד).
2. מספר הבוגרים בפקולטות להנדסת חומרים, הנדסת פלסטיקה והנדסת אלקטרוניקה אינו גבוה ובנוסף, תעשיית התלת ממד מתחרה על ההעסקה של בוגרי הפקולטות הרלוונטיות עם תחומים רבים אחרים. לכן יש לבחון דרכים להעלאת מספר הבוגרים בתחומים אלה.
3. יש להכניס מסלול לימודי הדפסת תלת ממד בפקולטות מכונות, כימיה, תוכנה וחומרים. לבנות קורסים ייעודיים להדפסת תלת ממד שיהיו חלק מתוכנית הלימודים בפקולטות אלה.
4. לפעול להכשרת מהנדסים מולטי-דיסציפלינריים לתחום התלת ממד. תואר ראשון בעיצוב הנדסי דיגיטלי, מסלול מולטי-דיסציפלינרי 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, או לחילופין קורסים מולטי-דיסציפלינריים שמשלבים בין עיצוב לחומרים.
5. פיתוח כוח אדם ולימודי המשך (Life long learning) בצורה ממוסדת בתעשייה - אחת הבעיות העיקריות של התעשיית היא שהעשייה היום יומית לא משאירה זמן ללימודי העשרה והתמקצעות של עובדים בארגונים תעשייתיים באמצעות הרצאות וכנסים בארץ ובעולם, הרצאות של אנשי תעשייה.
6. הקמת מרכז ידע שיספק תשתית מחקרית נרחבת לגבי ההיבטים השונים הקשורים להדפסת תלת ממד. הידע שייאסף במרכז יעמוד לרשות כל החוקרים בתחום מהאקדמיה ומהתעשייה.
7. שיתופי פעולה בין האקדמיה לתעשייה: יש פער גדול בתחום בין האקדמיה לתעשייה ושת"פ הינו הכרחי לצמצום פערי ידע וניסיון. הרבה מהידע נמצא בתעשייה. יש מקום להתמחויות והנחיית פרויקטים, התנסות בעבודה כסטודנטים לצורך רכישת ידע וניסיון רלוונטי. צריך להקנות למהנדסים אוריינטציה מחשבתית לעולם ההדפסה התלת ממדית. יש צורך בתמיכה של התעשייה באקדמיה בהיבט הידע, סילבוס, דוגמאות, ביקורים וכד'.
8. לתת את הדעת איך וכיצד מאשרים גופים שיוצרו בתלת ממד ובפרט שהתקינה עדיין בהתהוות ולא סגורה.

רפואה מדייקת וגנומיקה



"רפואה מותאמת אישית", הופכת למציאות במחלות מסוימות ובתחומי רפואה לא מעטים. מערכות הבריאות בעולם נדרשות לשינויים ופעולות על מנת להתאים טיפול או תרופה למטופל על פי המאפיינים הגנטיים והביולוגיים הייחודיים שלו ושל מחלתו. זוהי רפואה מודרנית הנתפרת למידות החולה ונותנת מענה ממוקד מטרה, והיא אף עשויה לחסוך עלויות כבדות למערכת הבריאות.

רפואה מדייקת מבטיחה שינוי פרדיגמה בטיפול הרפואי. גישה זו מצמצמת את הצורך באבחנות משתנות ואסטרטגיות טיפול המבוססות על דמוגרפיה כללית היא מאפשרות מבט הוליסטי יותר על המטופל. גישות של רפואה מותאמת אישית מבוססות על מינוף של נתונים ממקורות ישירים ועקיפים. יישום של גישות הרפואה המדייקת, מבוסס על תהליך של אבחון דיפרנציאלי ומאפשר צמצום של חוסר יעילות שמתבטא בטעויות באבחון, במתן טיפולים מיותרים, מינון יתר או חסר של תרופות וכדומה.

הרפואה המדייקת מבוססת על מגוון רחב של תחומים מדעיים וטכנולוגיות. התחום כולל נושאים רבים שפעמים רבות נושקים זה לזה כגון: פיתוח טכנולוגיות לניתוח נתונים מתחומי הביולוגיה כגון גנומיקה, פרוטאומיקה או מטבולומיזם, גנומיקה שקשורה למחלות הסרטן ומניעתו, נושאים הקשורים לביובנק ודיאגנוסטיקה מולקולארית, הדמיה ועוד.

על פי ד"ר בני זאבי (מנהל שותף בקרן Tel Aviv Venture Partners) בשנת 2018, ההוצאה על בריאות בארה"ב עמדה על סך של 3.7 טריליון דולר והצפי הוא כי היא תמשיך לעלות עד שנת 2026 בקצב ממוצע של 5.5% לשנה. ההשקעות בתחום זה לא מגיעות רק מהממשלה ומחברות התרופות או חברות העוסקות בתחום. חברות רבות ובעיקר ענקיות טכנולוגיה כגון: אפל, מיקרוסופט, גוגל, אמזון ואחרות, שבידיהן פלטפורמות לאיסוף מידע ממיליארדי צרכנים (כגון: טלפונים ניידים, דואר אלקטרוני, שעונים) רואות בתחום הבריאות מנוע צמיחה. ב-2017 עשר חברות הטכנולוגיה המובילות השקיעו סך של כ-2.7 מיליארד דולר בחברות מתחום הבריאות. ניתן לראות את התפוקה של ההשקעה הזו גם בגידול שחל ברישום עשרות ומאות פטנטים בתחום הבריאות⁶⁰.

בשנת 2003 הצליחה קבוצה של חוקרים ממרכזים שונים בעולם להרכיב את רצף הדנ"א של אדם. מאז פותחו טכנולוגיות רבות לריצוף דנ"א המאפשרות לבנות מטען גנטי בזמן קצר מאוד. בעקבות גילויים אלה התפתח תחום הידע "פרמקוגנומיקה", העוסק בהתאמת תרופות על פי גנום של אדם ספציפי. לחברות התרופות הגדולות יש אינטרס בהתפתחותו של תחום זה והן משקיעות במחקרים אלה סכומים הולכים וגדלים. כיום, כאשר השכיחות למחלת הסרטן עולה, עיקר המחקר עוסק בהתאמת תרופות לאונקולוגיה על ידי ניתוח המטען הגנטי והשינויים שחלים בו בעקבות מחלת הסרטן. בשנים האחרונות, חל שינוי בטיפול שניתן לחולים אונקולוגים, מטיפול שנקבע בעיקר על פי סוג הסרטן, לביצוע אבחונים מתקדמים על בסיס רצף הדנ"א של הגידול עצמו, שמאפשרים אבחון מדויק יותר של סוג הסרטן והתאמה של תרופה מדויקת יותר – מותאמת אישית.

במהלך השנים האחרונות מחירן של הבדיקות ירד, דבר שהביא לפריחה של חברות המציעות בדיקות גנטיות כלליות לקהל למיפוי הגנום האישי. בדיקות אלה הפכו לטרנד. אנשים משתמשים במיפוי הגנום לא רק לצרכים רפואיים אלא גם על מנת לגלות את המוצא הקדום של משפחתם, לאתר קרובים אבודים, לאבחן גורמי סיכון בריאותיים ואף להתאים תזונה מותאמת אישית⁶¹.

בדיקות אלה ובדיקות נוספות יוצרות מאגר עצום של מידע ולמדיניות של "מדע פתוח" (open science) שיכולה להיות לו השפעה משמעותית על תהליך המחקר והפיתוח של תחום הרפואה המדייקת. רפואה מדייקת מהווה הזדמנות ייחודית לשפר את בריאות האוכלוסייה ולשפר טיפולים למניעת מחלות ובמקביל להקטין את הוצאות הבריאות. עם זאת, פיתוח של רפואה מדייקת מביא אתגרים כלכליים, כגון: פיתוח יקר, שיעורי כישלון גבוהים וגודל שוק קטן יותר בהשוואה למודל המסורתי. "המדע הפתוח", המאופיין בעקרונות של שיתוף מידע פתוח, הפצה וחלחול מהיר של ידע, מאגרי מידע של מחקר בתחום ושיתופי פעולה⁶². הרפואה עוברת מגישה בה טיפול אחד מתאים לכולם ("one size fit all"). גישה לפיה לכל החולים באותה מחלה ניתן טיפול זהה. במצב זה

⁶⁰ ד"ר בני זאבי, תנו לטים קוק וג'ף בזוס לטפל במערכת הבריאות, גלובס 30/1/2019

⁶¹ הרפואה הבלתי נמנעת, ד"ר נועם שומרון מתוך גיליון 23 אודיסאה <https://www.teva.co.il/globalassets/teva-il/articles-migration/teacher/odyssey/odyssey-23.pdf>

⁶² <http://www.facetsjournal.com/doi/full/10.1139/facets-2018-0034>

קיימות שלוש אפשרויות של תגובה: אפשרות בה החולים חווים השפעות שליליות הכוללות תופעות לוואי, אפשרות בה החולים כלל לא מגיבים לטיפול ואפשרות בה הטיפול מתאים וחל שיפור. הרפואה כיום עוברת לשלב ביניים, ל"רפואה מרובדת", שבה על מנת לתת טיפול לחולים, הם מסווגים לקבוצות על פי תת סוגי המחלה, פרופיל הסיכון האישי, דמוגרפיות, סוציאוקומויות, מדדים קליניים, ביו מרקרים ועוד. הטיפול ניתן על פי קבוצת השייכות. העתיד הוא להגיע לרפואה מדייקת בה כל אדם יקבל טיפול המותאם לו על פי הנתונים האישיים שלו כגון: גנומיקה, סגנון חיים, היסטוריה רפואית, רשומות רפואיות, העדפות וכדומה.

בישראל, לא קיימת מדיניות ברורה בנושא רפואה מותאמת אישית. יש צורך בקידום הנושא בין היתר על ידי קביעת מדיניות, שינויים רגולטורים, התאמות בעשייה הקלינית, מציאת דרכים למימון תרופות מותאמות אישית ובדיקות גנטיות ואפיון מולקולרי שיאפשר מיפוי מדויק של כל השינויים הגנומיים ב-DNA של החולה ויביא להתאמת טיפול אישי לכל חולה.⁶³

אחד מתחומי הידע העיקריים שיש בהם צורך על מנת שתחום הרפואה המותאמת אישית יתפתח הוא תחום הביואינפורמטיקה, המשמש כמדע נרחב להעמקת בסיס הידע הביולוגי. בתחום זה טמון פוטנציאל לשיפור בטיפול קליני: בגילוי ואבחון מחלות גנטיות מולדות, באבחון מוקדם של מחלות נרכשות עם בסיס גנטי מובהק כדוגמת הסרטן ואף בפיתוח תרופות. איגודים ורשויות רגולטוריים בעולם מדגישים את חשיבות המיפוי והאפיון המולקולרי במחלות שונות כאשר הנושא בא לידי ביטוי בולט בתחום האונקולוגי וההמטולוגי.

כפי שתואר לעיל תחום ה-"גנומיקה" והתחומים הקשורים אליו, כגון אפיגנומיקה, הם מאבני היסוד להתפתחות של תחום הרפואה המותאמת אישית. גנומיקה בוחנת את מערך הדנ"א המלא בגנום ומנסה לזהות שינויים אפיגנטיים ברמה הגלובלית. Epigenomics הינו תחום מחקר בגנומיקה. כאשר, הגנומיקה משתמשת בדנ"א רקומביננטי, בשיטות של רצף דנ"א וביו-אינפורמטיקה כדי לרצף, להרכיב ולנתח את הפונקציה והמבנה של הגנום ואילו האפיגנומיקה היא מחקר המנתח את מערכת השינויים האפיגנטיים בחומר הגנטי של התא שאינו משנה את הרצף הגנטי. בעבר רווחה האמונה שתכונות שעברו בתורשה הן בשל שינויים בקוד הגנטי של הפרט. אפיגנטיקה בוחנת שינויים תורשתיים שאינם משנים את הקוד הגנטי.

השוק האפיגנומי העולמי הוערך ב-1.1 מיליארד דולר בשנת 2018 וצפוי להגיע ל-2.83 מיליארד דולר עד 2025 עם גידול שנתי ממוצע (CAGR) של 14.5% על פני תקופת התחזית.⁶⁴ השוק האפיגנומי מאופיין בהשקעה בקנה מידה גדול במו"פ, שמלווה בביקוש גובר לתרופות אפיגנומיות בכל תחומי היישום השונים. בנוסף, נוכחותן של חברות תרופות וחברות ביו-אינפורמטיות, בעיקר בצפון אמריקה ובאירופה, הובילה להתקדמות בטכנולוגיות באפיגנומיקה וללימודים הקשורים אליה. רפואה מותאמת אישית אפיגנטית לטיפול בסרטן היוותה נתח משמעותי של השוק האפיגנומי העולמי. סרטן הריאות מהווה את החלק הגדול ביותר של הטיפול בסרטן (יותר מ-24% מהשוק). הפופולריות הגדלה של ה-biomarker segment צפויה להשפיע באופן חיובי על הצמיחה בשוק האפיגנומי. DNA methylation לאבחון סרטן היווה את הנתח הגדול ביותר בעוד ש-chromatin remodeling צפוי להיות בעל הצמיחה הגבוהה ביותר.

אפיגנטיקה משפיעה על תחומי מפתח של ביו-רפואה, כולל תרפיה גנטית סומטית (somatic gene therapy), הטבעה גנומית (genomic imprinting), ביולוגיה התפתחותית ושיבוט. בנוסף, במחקרים שונים בתחום האפיגנטיקה נמצאו מחלות רבות שנגרמו על ידי פגמים אפיגנטיים ולא פגמים גנטיים. כתוצאה מכך, השימוש בתרופות אפיגנטיות בטיפול בפגמים אלה צפוי להניע גידול בשוק. יתר על כן, שימוש גובר בתרופות אפיגנטיות בטיפול בסוגים שונים של סרטן עשוי לקדם ביקוש.

תחום נוסף הוא טיפול בפגמים אפיגנטיים באמצעות תרופות. טיפול אפיגנטי הוא אחד התחומים הצומחים במהירות הרבה ביותר בשוק הפרמקולוגיה העולמי. הגידול בשימוש בתרופות אפיגנטיות בטיפולים שונים בסרטן, בשילוב עם מחקר נרחב המזהה פגמים אפיגנטיים מורכבים, צפוי לקדם פיתוח של תרופות חדשות ומשופרות. לאור זאת, בדיקות מותאמות אישית נועדו להתאים את הטיפול לחולה ולגידול הספציפי שלו, במקום לתת טיפול אחיד לכל החולים הסובלים מאותה מחלה ממאירה. טיפולים כאלה כבר נכנסו לשימוש נרחב בסרטן

⁶³ <https://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-4931375,00.html>

⁶⁴ <https://www.marketwatch.com/press-release/at-cagr-of-145-epigenetics-market-share-to-cross-usd-283-billion-in-2020-to-2025-2020-08-24>

השד, סרטן המעי הגס וסרטן הערמונית. מיפוי של כמה עשרות גנים הקשורים לדרגת הממאירות מאפשר חיזוי של התועלת של טיפול כימי משלים שניתן לחולים, למשל לאחר ניתוח להסרת הגידול. בדיקות אחרות מאפשרות חיזוי של תגובת הטיפול לתכשירים כימותרפיים ספציפיים ולתרופות ביולוגיות, הפועלות כנגד אתרים ושינויים ממוקדים בגידול.

רפואה מותאמת אישית יכולה להועיל גם להתאמת תרופות לחולים, על בסיס הגנטיקה האישית שלהם. תרופות רבות מתפרקות באופן שונה בגופם של החולים, כתוצאה מפעילות שונה של מערכות אנזימטיות בכבד ובשאר הרקמות. זיהוי של חולים שבגופם התרופה מתפרקת באופן מהיר יותר יכול לאפשר מתן מינונים גבוהים עם יעילות רבה יותר של התרופה ולהיפך, חולים שבגופם התרופה מתפרקת באופן איטי, יוכלו לקבל מינון נמוך ולהקטין בכך את הסיכון לתופעות לוואי רעילות של התרופה⁶⁵.

ניבוי של גורמי סיכון הוא דוגמה חדשה אחרת ליכולת הנוכחיות והעתידיות של הרפואה הגנטית. הטיפול בחולים תלוי במקרים רבים במידת הסיכון שיש להם לחלות במחלה מסוימת. טיפול אגרסיבי יותר יינתן לחולים עם סיכון מוגבר, בעוד שלחולים עם סיכון מועט ניתן להסתפק במעקב או בטיפול קל.

הגדרה טובה של רמת הסיכון יכולה להתבסס על סימנים גנטיים שונים. גנים הקשורים לסיכון לסוכרת למשל, יכולים להיות ממופים עוד לפני הופעת המחלה, תוך המלצה על משטר מניעתי אגרסיבי יותר (ואולי אפילו טיפול תרופתי) לנשאים של שינויים גנטיים הכרוכים בסיכון זה.

למרות ההתקדמות המבטיחה והפוטנציאל הרב העומד בבסיס הרפואה המותאמת אישית, עדיין עומדים מספר קשיים המונעים התרחבות מהירה יותר של שיטות אלו ברפואה יום יומית. הבדיקות הגנטיות עדיין יקרות למדי, דורשות מכשור וכוח אדם מיומן ואינן ניתנות לביצוע באופן מהיר לכל דורש. כדי להפוך את שיטות הבדיקה האלו לזמינות לכל נפש יש צורך בהוזלה משמעותית נוספת של הבדיקות. בנוסף, עדיין חסר מידע רב אודות הקשר בין גנים ושינויים בגנים לבין המשמעות הרפואית המעשית של שינויים אלו. אילו שינויים קשורים לאילו מחלות? מתי שינוי בגן משפיע על פעילותה של תרופה בגוף? שאלות אלו קיבלו עד כה תשובות חלקיות בלבד.

1.1 מערכות תומכות החלטות רפואיות המבוססות על Big Data⁶⁶

אחד השימושים בתחומי הבינה המלאכותית נוגע לניצול מידע רפואי רב לטובת מערכות תומכות החלטות רפואיות בזמן אמת (Roosan, Samore, Jones, Livnat, & Clutter, 2016). מידע רפואי רב נשמר בתצורות שונות לדוגמה, במאגרי המידע של בתי חולים או מרפאות באופן אלקטרוני כ-Electronic Health Records (Lee & Yoon, 2017) ומשמש לבניית בסיסי מידע גדולים עליהם ניתן לבצע אנליזות ופרדיקציות שונות לטובת סיוע לרופאים בזמן אמת. מערכות מסוג זה מפותחות, בין היתר, בחברות גדולות (כגון IBM) (Kohn et al., 2014) ועושות שימוש בכלים שונים של בינה מלאכותית כגון Natural Language Processing (NLP) (Janakiram, 2017) כשמטרתן לסייע לרופא בהערכה ובאבחון, כמו גם בביצוע תחזיות (פרדיקציות) לאופן התפתחות מצבים רפואיים או מצבי סיכון (Glider, 2017), המהווים נדבך חשוב בשימושי ה-Big Data למטרות רפואיות (Sahoo, Mohapatra, & Wu, 2016).

ל-Big Data יתרון בניתוח מידע רב, המשמש לרפואה מותאמת אישית (Broes, Lacombe, Verlinden, & Huys, 2018). פיתוחים שונים מאפשרים כיום, בהסתמך על מידע רפואי גנומי נרחב ומידע מהספרות הרפואית, להציע טיפול תרופתי ספציפי לחולה סרטן, בהסתמך על הפרופיל הגנטי-מולקולארי שלו (IBM Watson Health). פיתוחים אחרים בתחום הבינה המלאכותית וה-Big Data נוגעים לניטור בזמן אמת וחישה של נתונים רפואיים אישיים במסגרת הקהילה, על מנת לצפות מראש ובזמן אמת אפשרויות של שינוי במצב הרפואי הדורש התערבות (Jiang et al., 2017; Villar, González, Sedano, Chira, & Trejo-Gabriel-Galan, 2015) או בעיות לב (Hsieh, Li, & Yang, 2013).

שימוש נוסף ב-Big Data נעשה בתחום הקליני ובפיתוח תרופות. שימושים אלו כוללים לדוגמה, זיהוי של סימנים ביולוגיים (Biomarkers) המשויכים למחלות מסוימות, זיהוי קשר בין מחלות בהסתמך על מספר רב של נתונים

⁶⁵ דוגמה לתרופות שבהן נעשה ניסיון לשימוש ראשוני בהתאמה גנטית הם תרופות ממשפחת חוסמי הביתא (Beta blockers – תרופות המשמשות לטיפול ביתר לחץ דם), וקומדין (Coumadin – תרופה נפוצה מאוד כנגד קרישת דם).

⁶⁶ חלק זה של העבודה לקוח מתוך מחקר של מוסד שמואל נאמן בנושא בינה מלאכותית, מדעי הנתונים ורובוטיקה חכמה: ג'ן. ד, כץ שחם. א, קליין, ר. צזנה, ר. רוזנברג, ש. ואחרים (2018). בינה מלאכותית, מדעי הנתונים ורובוטיקה חכמה: דו"ח ראשון - שלב ב'. חיפה: מוסד שמואל נאמן.

רפואיים וזיהוי מסלולים גנטיים ומולקולריים הגורמים לפתולוגיות שונות. זיהוי מסלולים אלו עשוי לשפר את ההבנה של הגורם למחלה ולאפשר פיתוח ממוקד יותר של תרופות (Hamada, Keum, Nishihara, & Ogino, 2017; Singh, Schulthess, Hughes, Vannieuwenhuysse, & Kalra, 2017).

גם בתחום המחקר הבסיסי במדעי החיים, קיימת חשיבות רבה לשימושים של Big Data בהבנה של אינטראקציות גנטיות והקשר שבין הגנוטיפ לפנוטיפ בתהליכים פתולוגיים שונים. יצירת קורלציות אלו ברמה סטטיסטית מספקת מתאפשרת באמצעות שימוש ב Big Data (מאות אלפי עד מיליוני פריטי מידע) ובאמצעות שיתוף מידע ממקורות מגוונים (Paten et al., 2015). היבטים נוספים של שימושי ה-Big Data במחקר הגנטי הינם יצירה של ספריות גדולות המציגות מידע גנטי באופן שיטתי בתחומים שונים (Winter, 2018) כגון אימונולוגיה (Heng et al., 2008) ואפי-גנטיקה (Martens & Stunnenberg, 2013), שמסייע למחקר בתחומים אלה. שיטות נוספות של למידת מכונה מסייעות כיום לריצוף גנומי מהיר ומדויק (DePristo Mark & Poptin Ryan, n.d.).

1.2 פוטנציאל השוק של אפיגנומיקה והרפואה המותאמת אישית

אפיגנומיקה היא תחום בעל פוטנציאל צמיחה עצום. עם שיעור גידול של 14.5% לשנה. הקצב ההולך וגדל של החדשנות והעלייה בשכיחות מחלות הסרטן הם המניעים את השוק האפיגנומי. קיימת עלייה בהוצאות על בריאות של ממשלות ושל יחידים, דבר שצפוי להגדיל את השוק האפיגנומי. תשתיות טובות יותר בכלכלות בצמיחה, יותר מודעות, הכנסה פנויה גבוהה והגדלת החזר רפואי יסייעו לשוק לצמוח. מוסדות אקדמיים וביוטכנולוגיים משתפים פעולה עם חברות תרופות כדי לספק תובנות חדשות בתחום זה. יש גידול בהשקעה במו"פ ובכלי סינון מתקדמים שיסייעו להגדלת פוטנציאל השוק האפיגנומי.

לתעשייה האפיגנומית קיים פוטנציאל רב לצמיחה עקב המניעים בשוק, כמו הגידול במספר מקרי הסרטן, אוכלוסיות מזדקנות, יותר השקעות במו"פ ומודעות רבה יותר לגבי טכנולוגיות חדשות. השימוש הרב ביותר בטכנולוגיה אפיגנומית מתבצע בדרום אמריקה בשל תשתית טובה, הגדלת ההוצאות על בריאות ושיעור גבוה של מקרי סרטן. הצפי הוא שאזור אסיה יירשום את הצמיחה הגבוהה ביותר בשנים הקרובות בשל המספר הגדל והולך של מקרי סרטן ויותר השקעה במו"פ של הממשלות והארגונים הפרטיים.

ההתקדמות בתחום הרפואה המותאמת אישית צפוי שתבוא לידי ביטוי בכך שהשימוש באבחון מתקדם לטיפול יגדל באופן אקספוננציאלי, במספר התרופות האישיות שצפוי להראות גידול של פי שניים עד פי שלושה בעתיד הקרוב וההתקדמות במידע ובטכנולוגיה הדיגיטלית שתסייע להפיץ את הרפואה המותאמת אישית. על פי דו"ח של חברת BIS Research בנושא Global Precision Medicine Market – Analysis and Forecast עולה, כי נכון להיום שוק הרפואה המדייקת בעולם נשלט על ידי תחום האונקולוגיה. השוק האונקולוגי צפוי לגדול עם גידול שנתי ממוצע (CAGR) של 10.4% מ-2017 עד 2026. העלייה במספר מקרי הסרטן הגדילה משמעותית את הנטל הכלכלי העולמי שצפוי לגדול ולהגיע להוצאה של כ-4 טריליון דולר בשנת 2025. מדינות מפותחות כדוגמת ארה"ב, בריטניה, גרמניה, צרפת וקנדה כבר נוקטות במאמצים על מנת לפתח אמצעים להקטנת שיעורי התחלואה והוצאות הטיפול באוכלוסייה. שיעור הגידול השנתי הממוצע של תחום האימונולוגיה צפוי להגיע ל-11.27 מיליארד דולר בשנת 2026. בשנת 2016, תת התחום הדומיננטי ברפואה מדייקת היה "אבחון נלווה"⁶⁷ (companion diagnostics). בין השנים 2017 ל-2026, תחום זה צפוי לגדול בשיעור גידול שנתי ממוצע של 11.56%. כיום, מתבצע מחקר משמעותי על-ידי חברות טכנולוגיה שעושות שימוש בטכנולוגית כגון big data analytics וביו-אינפורמטיקה. בנוסף, עולה מהדו"ח כי ב-2016, שוק התרופות המותאמות אישית בעולם ישלט על ידי אזור צפון אמריקה. שוק התרופות המותאמות אישית צפוי לגידול שנתי ממוצע של 9.66% בשנים 2017 עד 2026. ארה"ב וקנדה הן שחקניות מפתח בתחום זה. ההכרזה על פרויקט Precision Medicine Initiative (PMI) על ידי נשיא ארה"ב דאז, ברק אובמה בשנת 2015, הפכה את ארה"ב לשחקן דומיננטי בשוק זה⁶⁸.

⁶⁷ אבחון נלווה (CDX) הוא אבחון הנלווה לתרופה טיפולית כדי לקבוע את תחולתו לאדם מסוים. אבחון נלווה מפותח בשיתוף עם חברות תרופות כדי לסייע בבחירה או אי-הכללה של קבוצות מטופלים לטיפול בתרופה מסוימת זו על בסיס המאפיינים הביולוגיים שלהם, אבחון זה מסייע לחזות האם החולה יגיב תגובה סבירה או רעילות חמורה.

⁶⁸ <https://bisresearch.com/industry-report/global-precision-medicine-market-2026.html>

LARGE-SCALE REGIONAL EPIGENOMIC PROJECTS בקנה מידה גדול

המחקר האפיגנומי השתנה באופן דרסטי במהלך עשר השנים האחרונות. פותחו טכניקות חדשות שמאפשרות חקירה של אזורים גנומיים גדולים (larger genomic regions). האבולוציה המחקרית האפיגנומית החלה משילוב של loci⁶⁹ יחיד והכלאה של דנ"א. טכניקות אלה שיחקו תפקיד חשוב בהבנה וניתוח של אפיגנומיקה, אבל הם סיפקו רזולוציה נמוכה מאוד וכיסויו לכל ה-microarray. עד מהרה הפכו המאמצים האפיגנומיים בקנה מידה קטן לפרויקטים רחבי היקף. מיפוי אפיגנומי יכול להיעשות כיום ברזולוציה יוצאת דופן באמצעות טכניקות next-generation sequencing (NGS).

פרויקטים רבים בקנה מידה גדול נוצרו לצורך הבנת תופעות אפיגנומיות בקנה מידה רחב. לפרויקטים אלה יכולת ליצור מספר רב של datasets ולאחסן ולנתח את הנתונים והם מספקים תובנות לגבי הארגון של אפיגנומיקה והדרך שבה המידע נמצא באינטראקציה עם genetic polymorphism.

הקונסורציום הבינלאומי לאפיגנום האנושי (The International Human Epigenome Consortium (IHEC) הוקם מתוך יוזמות אפיגנומיות לאומיות רבות בצפון אמריקה ובאירופה. מטרתו העיקרית הינה להבין את המידה שבה האפיגנום השפיע ושינה את האוכלוסייה האנושית במשך דורות, תוך לקיחה בחשבון של הגורמים הסביבתיים. IHEC ניהל את הייצור של כ-1000 פיתוחים הקשורים לאפיגנומיות החל מתאים בריאים וחולים למודלים של אורגניזמים רבים. פיתוחים אלה יכולים לשמש למחקר מפורט יותר על בריאות האדם ועל מחלות. מאפיין חשוב בפרויקט זה הוא שהנתונים המתקבלים נעשים זמינים במהירות לקהילות המחקר הגדולות.

מפת הדרכים של המכונים הלאומיים לבריאות פרויקט אפיגנומי

מפת הדרכים של (National Institutes of Health) NIH פרויקט מיפוי אפיגנומי, הושקה ב-2008. היא נועדה לייצר משאבים ציבוריים של נתונים אפיגנומיים אנושיים לקידום מחקר ביולוגי שמכוון למחלות. NIH מבקש ליצור סדרה של מפות ללימוד המנגנונים האפיגנומיים, לפיתוחים אפיגנומיים חדשים ולייצור בסיס נתונים לתועלת ארוכת טווח. הפרויקט מתוכנן לחמש שנים במימון כולל של 190 מיליון דולר. פרויקט מפת הדרכים האפיגנומית מבצע מיפוי אפיגנומי מעמיק של מספר סוגים של תאים אנושיים בעלי עדיפות גבוהה. הקונסורציום מתכוון למפות יותר מ-100 סוגי תאים ורקמות אנושיות. הוא מתמקד בפיתוח סטנדרטים גבוהים ושיטות עבודה מומלצות למחקר אפיגנומי, צמצום הפער בין הפקת נתונים והפצה ציבורית שלהם על-ידי שחרור מהיר של נתונים הקשורים למאפיינים אפיגנומיים. היבטים חשובים אחרים של תוכנית זו כוללים פיתוח טכנולוגיה חדשה עבור הדמיה אפיגנומית, זיהוי שינויים אפיגנומיים חדשים וחקירת התפקידים של האפיגנום האנושי בפיתוח מחלות שונות והשפעות סביבתיות.

מפת דרכים של שוויץ שנערכה על ידי EPFL International Risk Governance Center (IRGC)⁷⁰

מפת הדרכים של שוויץ נועדה לתמוך ולקדם את התחום של הרפואה המדויקת. במפת הדרכים נדונו מספר שאלות: מהו החזון לרפואה מדייקת? מהן ההשפעות והאתגרים הצפויים? כיצד להניע את תהליך החדשנות? כיצד ניתן להתאים את מערכות הביטוח לטכנולוגיות החדשנות? כיצד להימנע, למנוע או להקטין את ההשלכות השליליות השונות האפשריות? כיצד להתאים את הרגולציה? המטרה הייתה לבנות מפת דרכים הכוללת תהליך מובנה, שארגונים יוכלו לבצע אותו לקראת התפתחות הרפואה המדייקת. על פי מפת הדרכים, על מנת להתמודד עם האתגרים העיקריים לפיתוח רפואה מדייקת, יש להשתמש בגישה מובנית ומקיפה, שמונחית על בסיס תכליתי ואובייקטיבי.

מפת הדרכים כוללת ארבעה היבטים. ההיבט הראשון הוא של יצירת תנאי סביבה שיאפשרו פיתוח של התחום. כלומר, לייצר דיאלוג פורה בין בעלי עניין שיש להם חזון משותף ארוך טווח של רפואה מדייקת. זה דורש מקובעי המדיניות לאגד בין מדענים, אנשי ענף הבריאות (רפואי וקליני), חולים ואזרחים, רגולטורים, משקיעים ותעשייה. המטרה היא להקים קהילה חברתית, המבוססת על שותפויות אמינות. השלב השני, כולל שלושה היבטים.

- 1) הטמעת תחום הרפואה המותאמת אישית – הפעילות העיקרית בשלב זה היא איסוף, שיתוף וניתוח נתונים.
- 2) נושאים הקשורים לנתונים כגון: סוג ואיכות הנתונים, פרטיות וסודיות, שיתוף נתונים ונושאי קניין רוחני.
- 3) רפורמה ברגולציה ובשיטת התשלומים של רפואה מותאמת אישית כגון, רגולציה מותאמת, חקיקה בנושא הסדרת התשלומים עבור אבחון וניתוח נתונים ומעקב אחר התפתחות השוק.

⁶⁹ A locus (plural loci) in genetics is a fixed position on a chromosome, like the position of a gene or a marker (genetic marker)

⁷⁰ Florin, M.-V., & Escher, G. (2017). *A roadmap for the development of precision medicine*. Lausanne: EPFL International Risk Governance Center (IRGC).

2 תעשיית הגנומיקה והרפואה המותאמת אישית בישראל

בישראל שיעור ההוצאה הלאומית למו"פ כאחוז מהתמ"ג הוא הגבוה ביותר בהשוואה בינלאומית בעשרים השנה האחרונות והוא מתקרב ל-5% מהתמ"ג. אך רוב המימון והביצוע של המו"פ מתבצע במגזר העסקי. תחומי הבריאות בישראל נעדרות השקעות הן ממשלתיות והן מגורמים בינלאומיים. בהשוואה למדינות ה-OECD, ישראל נמצאת בתחתית הרשימה בתמיכה הממשלתית במחקר בתחומי הבריאות. מנתוני הלמ"ס עולה כי בעוד שהוצאות משרדי הממשלה למו"פ אזרחי הסתכמו בשנת 2018 ב-8.2 מיליארד ש"ח, ההשקעה הממשלתית במו"פ בריאותי בעשור האחרון לא עלתה על כ-200 מיליון ש"ח לשנה (פחות מאחוז).

בישראל, על פי הדו"ח של רשות החדשנות לשנת 2018-2019,⁷¹ שינויים טכנולוגיים משמעותיים בעשור האחרון מהווים נקודת מפנה של תעשיית הביופארמה העולמית ומהווים עבור ישראל הזדמנות לפתח את תחום הרפואה המותאמת אישית בארץ ולהשתלב בתעשייה העולמית.

תעשיית הביופארמה (שרפואה מותאמת אישית מהווה חלק ממנה) בישראל מאופיינת במחקר שנעשה בארץ אך שהפיתוח שלה נעשה בחו"ל על ידי חברות זרות. הטענה היא כי ישראל לא מימשה את הפוטנציאל המדעי הגדול שלה ושהמשק הישראלי הפסיד מכך. הדוגמה שניתנת בדו"ח היא של האקזיט הענק שביצעה חברת Kite Pharma ב-2017, בסך כ-12 מיליארד דולר. מוצרי החברה מבוססים על מו"פ מדעי במכון וייצמן והעומד בראשה הוא ישראלי לשעבר, אולם כל פעילותה מתנהלת בארצות הברית.

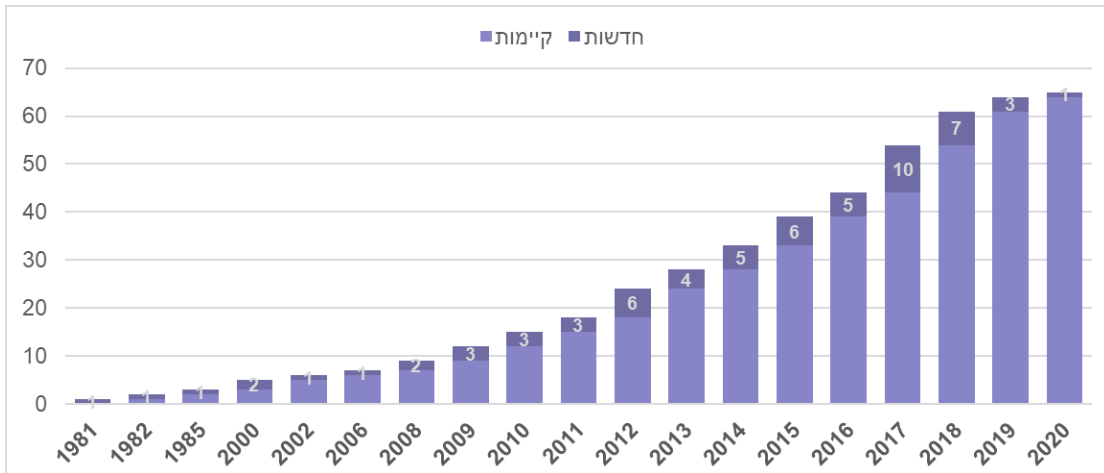
על פי הדו"ח, לישראל יש מספר יתרונות שאותם היא צריכה למנף על מנת לקדם את תחום הרפואה המותאמת אישית:

- מצוינות אקדמית מדעית. קהיליית המדע בישראל מצטיינת בחקר הסרטן, באימונולוגיה ובחקר מחלות ניווניות, תחומים שנמצאים כיום במוקד פיתוח טיפולים בגישת הרפואה המותאמת אישית.
 - קיים בישראל מידע רפואי וגנומי ייחודי שנובע מכך שהאוכלוסייה בישראל מאופיינת בקבוצות ייחודיות בשטח גאוגרפי קטן. עובדה זו הופכת את ישראל ל"מכרה זהב" גנומי.
 - הודות למערכת הבריאות הריכוזית בישראל (אזרחי ישראל מבוטחים בארבע קופות חולים שפועלות כיום בישראל: כללית, מכבי, מאוחדת ולאומית) והרשומות הרפואיות האלקטרוניות (EHR), שקיימות כבר משנות ה-80, מכסות את רובה המוחלט של האוכלוסייה.
 - ישראל מובילה בתחומי היי-טק בנושאים כגון: טכנולוגיות המידע, big data וחישוביות המאפשרים שימוש במידע רפואי וגנומי לטובת פיתוחים בתחומים של רפואה מותאמת אישית.
- בחיפוש שנעשה באתר ⁷²Start-Up Nation Finder נמצאו 65 חברות, שתויגו עם לפחות אחת מהמילים: genomics או personalized-medicine (נכון לתאריך 26/10/2020).

האיור הבא מציג את הדינמיקה של הקמת חברות בתחום רפואה מותאמת אישית וגנומיקה. החל משנת 2012 חל גידול במספר החברות החדשות שמוקמות בכל שנה בתחום. החל משנה זו הוקמו יותר מ-70% מהחברות כשהשיא היה בשנת 2017 בה הוקמו כעשר חברות בתחום.

⁷¹ דו"ח רשות החדשנות 2018-2019: רפואה מותאמת אישית
<https://innovationisrael.org.il/InnovationRapport18/BiopharmaIndustry#5>
⁷² <https://finder.startupnationcentral.org> /אוחזר בתאריך 11/8/2018

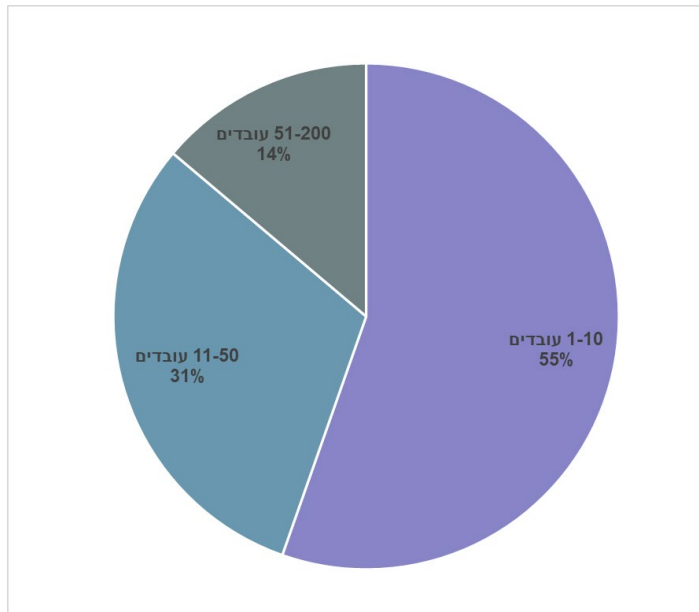
איור 32: חברות בתחום הרפואה המותאמת אישית והגנומיקה בישראל בשנים 1981-2020



עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

יותר ממחצית מהחברות הן חברות קטנות שיש בהן עד 10 עובדים. 31% מהחברות מונות בין 11 ל-50 עובדים, ו-14% הן חברות גדולות המעסיקות 50 עד 200 עובדים. לא נמצאו חברות ענק בתחום זה שמעסיקות מעל 200 עובדים (איור 33).

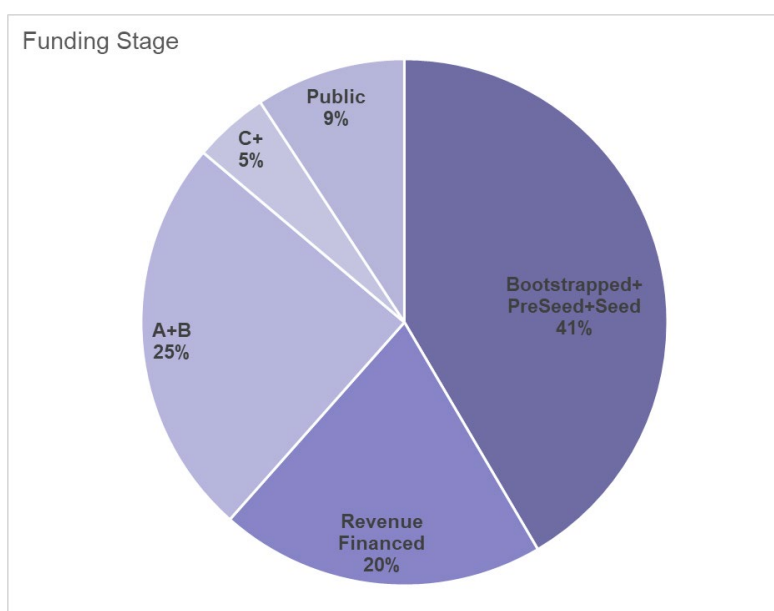
איור 33: גודל החברות בתחום רפואה מותאמת אישית וגנומיקה לפי מספר העובדים בחברה



מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

מטבע הדברים חלק גדול מהחברות נמצא בשלבים התחלתיים. 41% מהחברות נמצאות בשלבים התחלתיים של גיוס. רבע מהחברות נמצאות בשלבי גיוס B+A, 12% ו-5% בשלב גיוס C+ (איור 34).

איור 34: חברות בתחום רפואה מותאמת אישית וגנומיקה לפי Funding Stage (2018)



מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

גיוסי הון

- 34 מתוך 65 החברות גייסו הון בסך של כ-663.65 מיליון דולר. כאשר מעל 70% גוייסו על ידי חמש חברות:
- MeMed Diagnostics - הוקמה בשנת 2009 ומונה 200-51 עובדים. גייסה סה"כ 130.4 מיליון דולר כאשר הגיוס המשמעותי של 70 מיליון דולר היה לפני שנתיים (9/2018).
 - K Health – הוקמה בשנת 2016 ומונה 200-51 עובדים. גייסה עד היום 100.8 מיליון דולר בארבע סבבים. האחרון 48 מיליון דולר גויסו ב- 2/2020.
 - Novellus הוקמה בשנת 2011 ומונה 50-11 עובדים. גייסה 84.5 מיליון דולר בשלושה סבבים. 57 מיליון דולר גויסו השנה בספטמבר.
 - Emendo Biotherapeutics – נוסדה בשנת 2015 ומונה 200-51 עובדים. גייסה השנה בסבב אחד 61 מיליון דולר על ידי 3 משקיעים.
 - BiomX – החברה הוקמה בשנת 2015 מונה 200-51 עובדים. גייסה עד היום 56 מיליון דולר בחמישה סבבים על ידי 13 משקיעים.

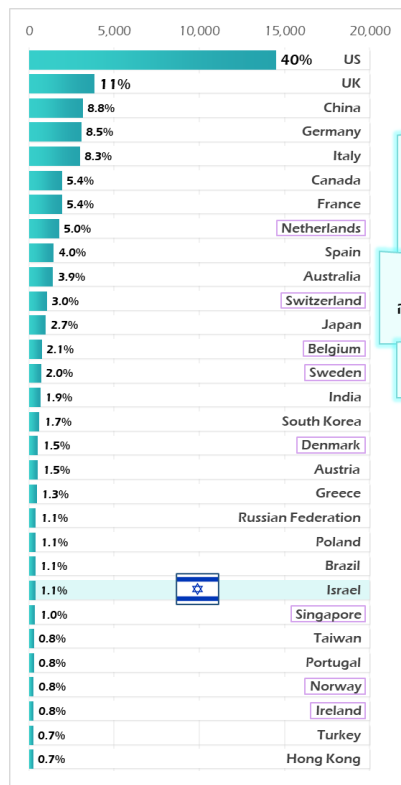
3 פרסומים בנושאי רפואה מותאמת אישית

איור 35 מציג את 30 המדינות המובילות במספר הפרסומים המדעיים בנושאי רפואה מותאמת אישית⁷³ במהלך השנים 2015-2019. האחוזים מציינים את שיעור הפרסומים של כל מדינה מכלל הפרסומים בעולם בתחום. ארה"ב מובילה את הדירוג עם 40% מפרסומי העולם בתחום; בריטניה במקום השני עם 11%; סין, גרמניה ואיטליה – עם למעלה מ-8% לכל אחת. באיור מודגשות בסגול מדינות ברות השוואה לישראל (מבחינת גודל האוכלוסייה ומספר הפרסומים המדעיים). ישראל מדורגת במקום ה-23 עם 1.1% מפרסומי העולם בתחום. מספר הפרסומים הישראליים בתחום עלה פי 5 במהלך העשור החולף; מספר הפרסומים בעולם עלה בשיעור דומה (איור 35).

⁷³ החיפוש התבצע על בסיס השאלתה המתוארת במאמר:

Sohn, E., Noh, K. R., Lee, B., & Kwon, O. J. (2018, August). Bibliometric network analysis and visualization of research and development trends in precision medicine. In 2018 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM) (pp. 727-730). IEEE

איור 35: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בנושאי רפואה מותאמת אישית בשנים 2015-2019



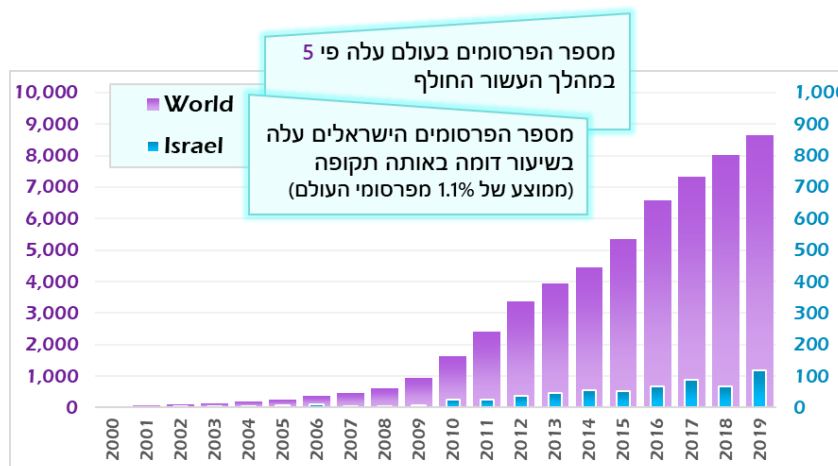
ארה"ב מובילה במספר המאמרים הפרסומיים בעולם; במקום השני - בריטניה עם 11%; סין, גרמניה ואיטליה - למעלה מ-8%

ישראל ממוקמת במקום ה-23 עם 1.1% מפרסומי העולם באותה תקופה

מודגשות בסגול מדינות בנות השוואה לישראל

עיבוד של צוות מוסד שמואל נאמן לנתוני מאגר סקופוס

איור 36: השינוי במספר הפרסומים הישראליים בנושאי רפואה מותאמת אישית ושיעורם מפרסומי העולם בתחום, 2000-2019



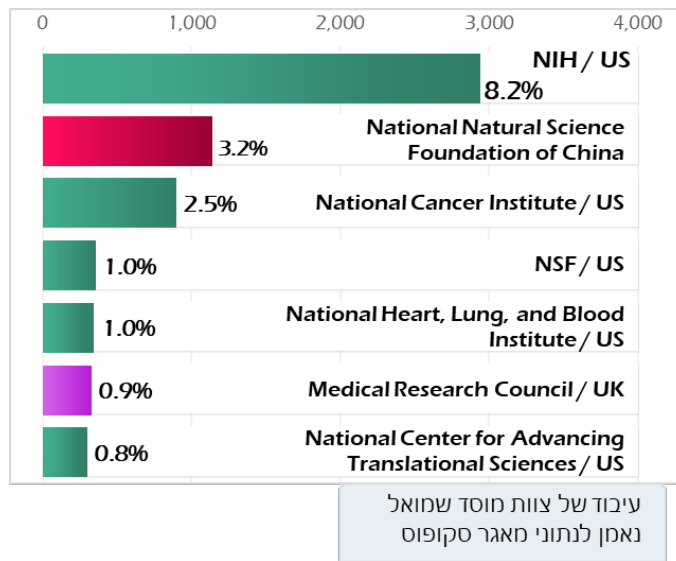
מספר הפרסומים בעולם עלה פי 5 במהלך העשור החולף

מספר הפרסומים הישראליים עלה בשיעור דומה באותה תקופה (ממוצע של 1.1% מפרסומי העולם)

עיבוד של צוות מוסד שמואל נאמן לנתוני מאגר סקופוס

איור 37 מציג את דירוג גופי המימון העיקריים שמופיעים ברשימות הספונסרים של הפרסומים בנושאי רפואה מותאמת אישית⁷³ בשנים 2015-2019. ה-NIH האמריקאי מוביל את הרשימה עם 8.2% מהפרסומים. אחריו הקרן הלאומית הסינית למחקר בסיסי וה-NCI האמריקאי.

איור 37: גופי המימון העיקריים שמופיעים ברשימות הספונסרים⁷⁴ של פרסומים בנושאי רפואה מותאמת אישית בשנים 2015-2019



3.1.1 בקשות לפטנטים

באיור הבא ניתן לראות שלפי נתוני PatBase, מספר משפחות הפטנטים בנושאי רפואה מותאמת אישית⁷³ עלה פי 5 במהלך העשור החולף.

איור 38: השינוי במספר משפחות הפטנטים ב-PatBase בנושאי רפואה מותאמת אישית



4 תשתיות בתחום רפואה מותאמת אישית

בשנים האחרונות הממשלה נוקטת במדיניות תמיכה ועידוד לתחום הגנומיקה והרפואה המותאמת אישית. בשנת 2018 אישרה הממשלה את "התוכנית הלאומית לבריאות דיגיטלית"⁷⁵. התוכנית מתקצבת בסכום של 922 מיליון שקלים לחמש שנים והיא כוללת פיתוח טכנולוגיות, קידום שיתופי פעולה בינלאומיים, ריכוז מאמץ אקדמי

⁷⁴ התפלגות גופי המימון על בסיס מספר הפרסומים לא בהכרח משקפת את התפלגות ההשקעות ⁷⁵ <https://www.health.gov.il/About/projects/DigitalHealth/Pages/default.aspx>

ותעשיית, ועידוד מחקר ב-Data⁷⁶. מטרת התוכנית הלאומית לבריאות דיגיטלית, כפי שמופיע באתר משרד הבריאות, היא לקדם את שירותי הבריאות לציבור הרחב, בשיתוף עם מיזם ישראל דיגיטלית⁷⁷. חזון התוכנית לבריאות דיגיטלית: "להביא לקפיצת מדרגה במערכת הבריאות שתאפשר הפיכתה לבת קיימא, מתקדמת, חדשנית, מתחדשת ומשתפרת באופן מתמיד, זאת על ידי מינוף מיטבי של טכנולוגיות המידע והתקשורת העומדים לרשותה, למען שיפור הבריאות לכלל אוכלוסיית ישראל."

במשרד הבריאות מאמינים כי הקמת תשתיות ארגוניות, תהליכיות וטכנולוגיות והטמעת מדיניות של קידום חדשנות מערכתית יביאו לטיפול מותאם אישית על ידי קידום מחקר, פיתוח והטמעה של כלים המאפשרים להתאים למטופל את הטיפול המיטבי עבורו; לקידום בריאות ומניעת חולי על ידי קידום השימוש בכלים דיגיטליים באופן המעביר את המיקוד מהטיפול בחולי לרפואה מונעת; לבריאות בת קיימא על ידי קידום הפיתוח וההטמעה של מערכות המגבירות את האפקטיביות התפעולית והניהולית במערכת הבריאות, באופן המאפשר להפיק יותר מהמשאבים הקיימים; ולבריאות זמינה על ידי פיתוח והטמעה של כלים דיגיטליים המשפרים ומיעלים את התקשורת בין משרד הבריאות לגורמים המקבלים ממנו שירותים.⁷⁸ מיזם פסיפס. הוא חלק מתוכנית זו.

מיזם פסיפס⁷⁹ - תשתית מידע לאומית למחקרי בריאות בתחום הגנטיקה והמידע הרפואי עבור פיתוח פתרונות של רפואה מותאמת אישית. הגישה מאפשרת להתאים לכל חולה את הטיפול האפקטיבי ביותר עבורו, קיבוץ מידע על מחלות שונות בהרכבי אוכלוסייה מיוחדים, באמצעות ניתוח מעמיק של נתוני עתק (Big Data), למניעה ולטיפול במחלות והקמת בנק דגימות לצרכי טיפול ומחקר. המיזם הינו חלק מהתוכנית הלאומית "בריאות דיגיטלית" והוא פועל בשלושה מישורים עיקריים: המדעי, הרפואי והתעשייתי וכולל מידע גנומי קליני, קהילתי חוקרים ותשתית מידע וכלים למחקר.

במסגרת המיזם תוקם תשתית מחקר ראשונה מסוגה, אשר תתבסס על קהילת מתנדבים שותפים, שיייעו יחד לפתח טיפולים רפואיים חדשים המותאמים למגוון הקהילות המרכיבות את החברה הישראלית ולממש את חזון הרפואה המותאמת אישית. בהיבט הלאומי מימוש המיזם יוכל להוות מנוף לצמיחה במשק, לאפשר לפתח יזמות חדשות וכפועל יוצא גם ליצור מקומות עבודה חדשים. בהיבט הבינלאומי צפויה עלייה בשיתופי פעולה, הנובעת מהמגוון הגנטי של האוכלוסייה (קיבוץ גלויות), איכות והיסטוריית המידע הקליני ומאיכות ורמת המחקר הרפואי והחישובי בארץ. מיזם פסיפס ימקם את ישראל בשורה אחת עם המדינות המובילות את מהפיכת הרפואה המותאמת אישית. שמירת דגימות ביולוגיות של המטופל תאפשר לחקור את השונות של תוצאות הטיפולים לפי מאפיינים ביולוגיים שונים ועל ידי כך לאבחן ולטפל במטופלים בצורה מדויקת יותר. אחת הסיבות לחסמים שבהם נתקלת הרפואה המותאמת אישית: היעדר מנגנונים רגולטורים, לוגיסטיים ופיסיים שיאפשרו שיתוף מידע בין כלל הגורמים. ב-2018 פרסמה ות"ת החלטה בה מאושר העברת 24 מיליון ₪ (חלקו של משרד האוצר במיזם פסיפס) באמצעות ות"ת.

גם רשות החדשנות משקיעה ומעודדת את תחום הרפואה המותאמת אישית. בדו"ח של רשות החדשנות לשנת 2018-2019 צוין כי רשות החדשנות, במימון משותף עם מטה ישראל דיגיטלית במשרד לשוויון חברתי, פועלת להקמת איגוד משתמשים לבריאות דיגיטלית. המטרה שישתתפו באיגוד חברות הזנק, חברות בינוניות וגדולות וחברות רב-לאומיות, והוא ישמש להקמת מערך לשיתוף מידע רפואי קיים וחדש ויגבש תשתית רגולציה ואבטחת מידע. רשות החדשנות מאמינה כי מדיניות זו צפויה להביא לקפיצת מדרגה בתחום המידע הרפואי בישראל.

4.1 המרכז הישראלי הלאומי לרפואה מותאמת אישית על-שם ננסי וסטיבן גרנד (G-INCPM)⁸⁰ במכון ויצמן

בשנת 2012 הוקם במכון ויצמן המרכז הישראלי הלאומי לרפואה מותאמת אישית. המרכז שואף לקדם את תחום הרפואה המותאמת אישית. במרכז מאוגדים תחת קורת גג אחת צוות מחקר מיומן ותשתיות מתקדמות

⁷⁶ <https://www.calcalist.co.il/articles/0,7340,L-3735105,00.html>

⁷⁷ "ישראל דיגיטלית" - הינו מיזם ממשלתי השואף לרתום ולמנף את ההזדמנות הטמונה במהפכה הדיגיטלית ובהתקדמות טכנולוגיות המידע והתקשורת לטובת צמיחה כלכלית מואצת, צמצום פערים והפיכת הממשל לחכם, מהיר, ידידותי לאזרחים ומוביל עולמי בתחום הדיגיטלי.

⁷⁸ מתוך האתר של משרד הבריאות <https://www.health.gov.il/About/projects/DigitalHealth/Pages/default.aspx>

⁷⁹ הנתונים לגבי התשתית התקבלו: מאילן פלד, ד"ר אביב זאבי, ד"ר אמירם פורת, זירת תשתיות טכנולוגיות רשות החדשנות, משרד הכלכלה. מד"ר אורה דר, יועצת של הרשות לחדשנות במשרד הכלכלה, הערוץ לתשתיות.

⁸⁰ <http://q-incpm.weizmann.ac.il/genomics/crown-institute-genomics>

שמשמשים מדענים לביצוע מחקרים רחבי היקף של הגנום ואוכלוסיית החלבונים התאית. מחקרים אלה מספקים מידע רב על מחלות ועל הגורמים התורמים להתפתחותן. המכון מספק שירותי רצף של הדור הבא (NGS) באמצעות פלטפורמת הטכנולוגיה של Illumina והכנת מדגם תוך שימוש בפרוטוקולים פנימיים ופרויקטים מסחריים שונים. המכון מציע שירות מודולרי "בשיטת הכל כלול". החל מעיצוב הפרויקט, התייעצות על סוג הכנת המדגם, רצף וניתוח נתונים בפלטפורמת הביו-אינפורמטיקה.

מרכיב מרכזי במכון מוקדש לפיתוח פרוטוקולים חדשים וליישום פרוטוקולים של חוקרים אחרים במכון ויצמן וביצוע שיתופי פעולה ברחבי העולם. בנוסף, המרכז מספק לכלל המשתמשים: חוקרים מהאקדמיה, מברי החולים ומתעשיות הביוטכנולוגיה והפרמה בישראל, את הכלים הנדרשים לסריקת ספריות כימיקלים למציאת חומרים בעלי השפעה על פעילותן של מולקולות (כגון חלבונים) או מנגנונים ביולוגיים, תחום מחקר שבמקרים רבים מוביל לפיתוח תרופות חדשות. מטרת המכון להפוך למרכז גנום מוביל המשתמש בטכנולוגיות מתקדמות ובשיטות חדשניות לקידום מחקר רפואי בסיסי ומתקדם בישראל באמצעות שיתופי פעולה מדעיים שונים.

4.2 ות"ת

ב30/1/2018 פרסמה ות"ת החלטה בדבר מענקי מחקר בתחום מותאמת אישית והחליטה ות"ת להקצות מאמצים ומשאבים לפיתוח המחקר בתחום הרפואה המותאמת אישית (רמ"א), לאור הצורך הלאומי לקידום הנושא ולאור הפוטנציאל הגבוה במיוחד של מחקר עתיר טכנולוגיה ורב-תחומי זה בישראל. על פי החלטה זו ות"ת מעניקה מענקי מחקר, על בסיס מצוינות מדעית ושיפוט תחרותי, לחוקרים הבאים ממוסדות להשכלה גבוהה וממוסדות אשר זכאים להגיש בקשות מענק לקרן הלאומית למדע. פרויקטי המחקר צקיכים להתבסס, במידה רבה, על חיבור בין מחקרים מעמיקים בתחומים מגוונים של רפואת האדם, לבין נתונים רפואיים אשר נאגרים בקופות החולים ובבתי החולים, תוך יצירת תשתית רחבה ומעמיקה של מידע גנומי-קליני⁸¹. לצורך התוכנית שוריי תקציב של עד 10 מיליון דולר (כ-35 מיליון ₪) במהלך השנים תשע"ח-תשפ"ב.

4.2.1 הקרן הלאומית למדע

גישות לתשתיות המרכז לרפואה - מותאמת אישית - INCPM⁸²

הקרן הלאומית למדע הקימה בשנת 2015 תוכנית משותפת לקרן הלאומית למדע, למרכז לרפואה מותאמת אישית במכון ויצמן ולטכניון ("יד הנדיב" תרמו תרומה ייעודית לתוכנית זו). התוכנית נפתחה כחלק מפעילות הקרן לחיזוק, לתגבור ולהנגשה של תשתיות מחקר חיוניות לחוקרים בקהילייה האקדמית בארץ. התוכנית ותרומתה הצפויה נבדקו ואושרו על ידי הקרן ונידונו עם הנהלת הות"ת. התוכנית מיועדת לחוקרים בעלי מענקי מחקר פעילים באחת מתוכניות הקרן, המבקשים לקבל שירותים מהמרכז הישראלי הלאומי לרפואה מותאמת אישית (INCPM). השירותים שיינתנו במסגרת תוכנית זאת מתבססים על 4 פלטפורמות טכנולוגיות שכולן זמינות במישרין ב INCPM (גנומיקה, ביואינפורמטיקה, פרוטאומיקה וסריקות) ואחת הפלטפורמות (פרוטאומיקה, בתחומים משלימים, בחלקם לאלה שניתנים ב INCPM) ניתנת גם על ידי מרכז סמולר בטכניון.

רפואה ממוקדת אישית (רמ"א)⁸³

רפואה ממוקדת אישית הינה תוכנית נוספת של הקרן הלאומית למדע שמטרתה לקדם מחקר חדשני ופורץ דרך בישראל, שיביא להבנה מעמיקה של ביולוגיה של האדם ושל מנגנונים המעורבים במחלות אנושיות. התוכנית מתמקדת במחקר ישיר של הביולוגיה והרפואה של האדם, שעניינו שונות ביולוגית שכוללת הבדלים מולקולריים ואחרים, עיבוד מידע רפואי ודגימות רפואיות, ושלתוצאותיו פוטנציאל להשפיע על בריאות וחולי. התוכנית כוללת היבטים כגון זיהוי גורמי סיכון למחלה, אבחון מחלות, טיפול, רפואה מונעת ועוד, ומעודדת פיתוח טכנולוגיות רלבנטיות. על תוכניות המחקר להציג שילוב של מצוינות מדעית ורלבנטיות ישירה לביו-רפואה.

התוכנית באה לקדם מחקר בתחום הרפואה הממוקדת אישית בישראל, לעודד שיתוף פעולה בין חוקרים ממוסדות להשכלה גבוהה בארץ, רופאים מתחומי ידע והתמחות מגוונים וארגוני הבריאות השונים בארץ, לעודד

⁸¹ <https://che.org.il/?decision=%D7%9E%D7%A2%D7%A0%D7%A7%D7%99-%D7%9E%D7%97%D7%A7%D7%A8-%D7%91%D7%AA%D7%97%D7%95%D7%9D-%D7%A8%D7%A4%D7%95%D7%90%D7%94-%D7%9E%D7%95%D7%AA%D7%90%D7%9E%D7%AA-%D7%90%D7%99%D7%A9%D7%99%D7%AA>

⁸² מתוך הדוח השנתי של הקרן הלאומית למדע לשנת 2017/2018
https://www.isf.org.il/Files/AnnualReports/pdf/keren_2017_26.pdf

⁸³ <https://www.isf.org.il/#/support-channels/46/10>

שיתופי פעולה רב-תחומיים (למשל בין חוקרים העוסקים בביו-רפואה ניסויית ותאורטיקנים, ביולוגים חישוביים, אנשי מדעי המחשב ומדעי הנתונים, מהנדסים, פיסיקאים, כימאים, סטטיסטיקאים, אפידמיולוגים, גנטיקאים ואחרים) ופיתוח ושכלול גישות ושיטות ניתוחיות (אנליטיות) וחישוביות חדשניות לקידום המחקר בתחום הרפואה הממוקדת אישית. התוכנית מבוססת על איגום משאבים של הוועדה לתכנון ותקצוב (ות"ת), ישראל דיגיטלית, והגופים הפילנתרופיים: יד הנדיב וקרן משפחת קלרמן. יוענקו מענקים בסכומים של 7,000,000 ₪ לתקופה של עד ארבע שנים לפרויקטים עתירי מידע רפואי. תקרת המימון של פרויקטים המתמקדים בפיתוח טכנולוגיות מחקר היא עד 1,750,000 ₪ לתקופה של עד ארבע שנים.

4.3 משרד הבריאות

ב-2019 פרסמה לשכת המדען הראשי במשרד הבריאות כי היא שותפה בתוכנית PerMed⁸⁴ שהיא חלק מהרשת האירופאית למחקר ERA. במסגרת תוכנית זו פורסם קול קורא שני בנושא: PERSONALISED MEDICINE: Multidisciplinary research towards implementation. זהו קול קורא להגשת בקשות למימון מחקרים משותפים עם מדענים באירופה מטעם קרן המחקר של משרד הבריאות בישראל ורשת ERA PerMed. התוכנית תממן עד שני מחקרים בסכום שקלי שווה-ערך לעד €140,000 למחקר, לתקופה של שלוש שנים. חוקר ישראלי שיתפקד כקואורדינטור של הפרויקט זכאי לתוספת בסכום שקלי שווה-ערך של עד כ-€20,000 למחקר. תוכנית זו פותחת בפני חוקרים ישראליים אפשרות לשיתופי פעולה עם מרכזי מחקר מתקדמים באירופה⁸⁵.

5 הכשרת כוח אדם לעבודה בתחום רפואה מדייקת

מהראיונות⁸⁶, השאלונים⁸⁷ וסקירת הספרות שביצענו עולה שאין כיום מענה מספק לצרכי כוח האדם הנדרש בישראל לתחום הרפואה המדויקת והגנומיקה. התחום הפך לרב תחומי יותר מבעבר ודורש מיומנות רחבה יותר. נדרש ידע חישובי, הבנה בביולוגיה ורפואה, בפרוטיאומיקה, טרנסקריפטומיקה, ומטבולומיקה, ובתחומים נוספים. כלומר ידע רב תחומי וידע חישובי, ביולוגי, פיסיקאלי, ביוכימי, כימי, פרמקולוגי, ועוד. ההכשרה בארץ היא צרה מדי בכדי לענות לצרכים של פעילות שהיא רב תחומית בעיקרה. למשל, מעט מאוד מהעוסקים במדעי החיים או הרפואה הם בעלי יכולת תכנותית או חישובית, הידע של רוב הבוגרים בסטטיסטיקה אינו מספק, וההבנה של הכלים הטכנולוגיים לא מספיק עמוקה. לכן הרבה מהעוסקים בתחום אינם מבינים את מהות התוצאות או את מידה חוסר הדיוק המובנים בהם. בנוסף, לא מספיק רופאים נחשפים לנושא בלימודיהם.

הדרישה גוברת. האקדמיה, התעשייה, הרפואה והחקלאות מתקדמים בקצב מהיר מאוד וכוח האדם המיומן נדיר וקשה להשגה. נדרשת הכשרה רבה לאחר שכירת העובדים וזה נטל לא קטן על מקומות העבודה. יש צורך לשנות ולהתאים את מערך ההכשרה המקצועית לגמרי, ולשבור את המוסכמות הישנות כדי שהבוגרים יהיו מוכשרים להתמודד עם אתגרי העתיד.

כיום הנושא נכלל בטכניון בפקולטה למדעי המחשב, בירושלים במדעי המוח, באוניברסיטת ת"א יש מסלול ייעודי לתחום. הדיסציפלינות הנדרשות לתחום הרפואה המותאמת אישית הן: **הנדסה ומדעי המחשב, רפואה, מדעי**

⁸⁴ [/http://www.erapermed.eu/joint-transnational-call-2019](http://www.erapermed.eu/joint-transnational-call-2019)

⁸⁵ <https://www.health.gov.il/Subjects/research/Pages/JTC2019.aspx>

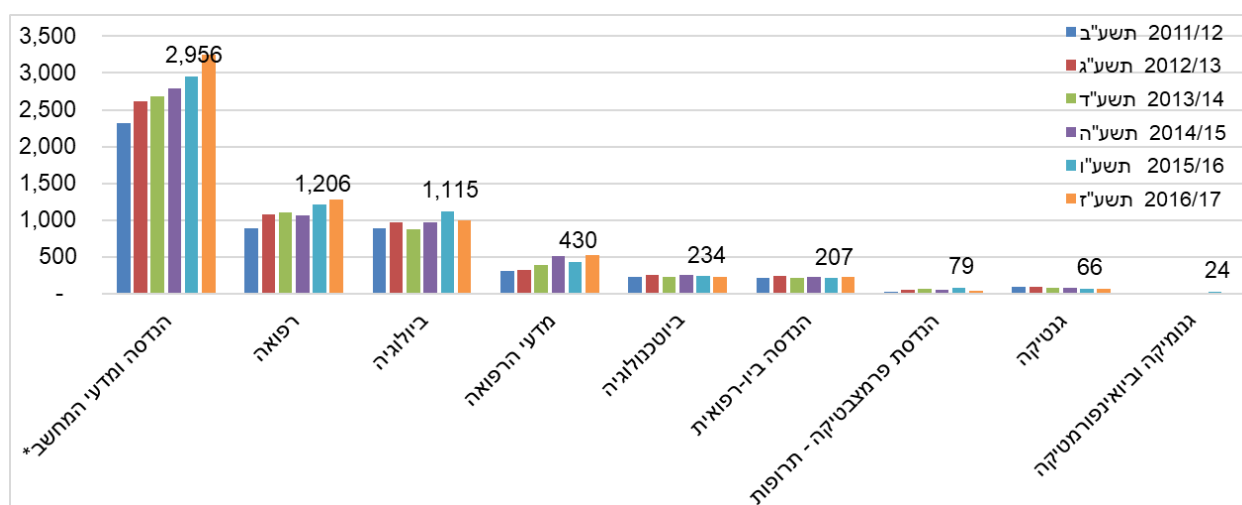
⁸⁶ במסגרת המחקר נערכו תשעה ראיונות. רואיינו אנשים ממגזרים שונים, מנהלי מחלקות בבית חולים, דיקני הפקולטות לרפואה, מנהלי מעבדות, ראשי חברות, מנהלי מרכזים רפואיים:

1. פרופ' אריה אדמון - מנהל מרכז סמולר לפרטאומיקה בטכניון.
2. פרופ' אליעזר שלו - דיקאן לשעבר של הפקולטה לרפואה בטכניון.
3. פרופ' ישי אופרן - מנהל אשפוז המטולוגי ומנהל שירות טיפול בלוקמיות במערך ההמטולוגי ברמב"ם
4. פרופ' ניר פרידמן - חוקר במחלקה לאימונולוגיה במכון ויצמן
5. פרופ' גדי רנרט - מנהל המרכז הארצי לבקרת סרטן והתוכנית לרפואה מותאמת אישית בכללית
6. פרופ' רון שמיר - מקימיי מרכז ספרא לביו-אינפורמטיקה בת"א
7. פרופ' דני ברקוביץ - ראש התוכנית לתואר שני בביוטכנולוגיה במכללה האקדמית תל חי
8. פרופ' שי שן-אור - המייסד והמדען הראשי של CytoReason ופרופסור בפקולטה לרפואה בטכניון
9. פרופ' קרל סקורצ'קי - דיקן של הפקולטה לרפואה ע"ש עזריאלי באוניברסיטת בר-אילן (בצפת)
- ⁸⁷ ענו על השאלונים: פרופ' אריה אדמון, פרופ' רון שמיר, פרופ' ישי אופרן, פרופ' אליעזר שלו ופרופ' שי שן-אור

הרפואה, הנדסה ביו-רפואית, גנטיקה, ביולוגיה, ביוטכנולוגיה, הנדסת פרמצבטיקה – תרופות, גנומיקה וביואינפורמטיקה.

בגרף הבא מוצגים מקבלי תארים מהאוניברסיטאות בתחומים שעלו ככאלה שנחוצה בהם הכשרה לתחום הרפואה המותאמת אישית. בשנת 2017 מספר מקבלי התארים עמד על כ-3000 בהנדסה ומדעי המחשב, 1200 בוגרים ברפואה, וכ-1000 בוגרים בביולוגיה. מספר מקבלי התארים בהנדסה ומדעי המחשב מדי שנה הוא גבוה ביחס לשאר התחומים ונמצא במגמת עלייה בחמש השנים האחרונות. בשאר התחומים הקשורים לתחומי הרפואה המותאמת אישית המספרים נמוכים יותר. במדעי הרפואה (430), הנדסה ביו-רפואית (207) וביוטכנולוגיה (234). מספר הבוגרים במקצועות אלה נשאר ללא שינויים משמעותיים בשנים האחרונות. בתחומי הלימוד: הנדסת פרמצבטיקה – תרופות, גנומיקה וביואינפורמטיקה וגנטיקה – מספר הבוגרים עומד על עשרות בודדות.

איור 39: מקבלי תארים מהאוניברסיטאות בתחומי רפואה מדייקת בשנים 2011-2017



מקור: עיבוד מוסד נאמן לנתוני למ"ס (לוח 3.3 - מקבלי תארים מהאוניברסיטאות) הערות: *הנדסה ומדעי המחשב כולל: מדעי המחשב, הנדסת מחשבים-מדעי המחשב ומתמטיקה-מדעי המחשב.

מסקנות ותובנות לגבי צרכי כוח אדם לרפואה מותאמת אישית וגנומיקה

מהעבודה עולה שאין מענה מספיק לצרכי כוח האדם הנדרש בישראל לתחום הרפואה המדויקת והגנומיקה. התחום הפך להיות רב תחומי יותר מבעבר ודורש מיומנות רחבה יותר כדי לפעול בתחום. הגנומיקה היא רק ניתוח של רצף, נדרש ידע חישובי, הבנה בביולוגיה ורפואה, הבנה בפרוטיאומיקה, טרנסקריפטומיקה, ומטבולומיקה, ותחומים נוספים. כלומר ידע רב תחומי וידע חישובי, ביולוגי, פסיקאלי, ביוכימי, כימי, פרמקולוגי, ועוד. הנטייה בארץ ללמד ולהכשיר אנשים היא צרה מדי בכדי לענות לצרכים.

כוח האדם הנדרש לתחום רפואה מותאמת אישית הוא מולטי-דיסציפלינרי וכולל ממגוון מקצועות: ביולוגים, רופאים, אנשי מחשבים, ובתוך כל אלה תתי התמחויות. הנדסה ומדעי המחשב, רפואה, מדעי הרפואה, הנדסה ביו-רפואית, גנטיקה, ביולוגיה, ביוטכנולוגיה, פרמצבטיקה, גנומיקה, פרוטאומיקה, ביואינפורמטיקה, ביג-דאטה, סטטיסטיקה, חישוביות.

- צוואר הבקבוק הוא בכוח אדם בעל מיומנויות מולטי-דיסציפלינריות לתחום רפואה מותאמת אישית. חסרים אנשים שיש להם ידע גם במדעי החיים וגם חשיבה כמותית.
- קיים מחסור באנשי ביואינפורמטיקה לצורך למחקר וניתוח נתונים רפואיים.
- התחום מתבסס במידה רבה על ניתוח נתוני עתק רפואיים (ביג-דאטה). למרות היתרון הרב של מאגרי המידע הרפואיים בישראל, עדיין חסרים נתונים רבים שכלל אינם נאספים ע"י הרופאים או שנאספים באופן שאינו מאפשר להשתמש בהם לצרכי המחקר בתחום. תשתית פסיפס (מאגרי המידע הרפואיים) לא מגיעה לכלל יישום למרות החלטות ממשלה ותקציבים רבים שהושקעו בה.
- חסר לרופאים המטפלים כיום ידע כיצד להשתמש במידע רפואי שכבר קיים בתחום.
- קיים עומס רב מאוד על רופאים שלא מאפשר להם לעסוק במחקר.

- חסר בישראל גוף שמקביל ל-ISF שיעניק לרופאים גרנטים למחקרים בנושא. אין בישראל גוף שעושה מחקרים קליניים כדוגמת NIH בארה"ב.

כיווני חשיבה והמלצות מכל האמור לעיל:

1. התחום של רפואה מדייקת וגנומיקה נופל בין מספר כסאות ואין למעשה גוף מקצועי המקדם את הידע הנדרש בגנטיקה, המטולוגיה ואונקולוגיה טכנולוגית מעבדה והנגזרות שיש לעניין בתחום בריאות הציבור. חסרה הכרה בתחום ככזה שנדרשת בו הכשרה מיוחדת, מקום מקצועי בו יפגשו מומחים מכל התחומים לקביעת הנחיות ודרכי פעולה עדיפות ולייצור תוכניות העשרה והכשרה מקצועית להמטולוגים ואונקולוגים.

התחום נוגע גם בתחומים בהם יש גם ממצאים גנטיים מולדים אשר בהגדרה נמצאים תחת המסגרת של ההתמחות בגנטיקה אבל חשוב מאד לציין ולהפריד בין גנטיקה מולדת ובין ניתוח הפרעות בדנ"א וברנ"א של גידולים ממאירים שאינה מורשת ומשתנה לאורך התקדמות המחלה אצל החולה ועיקר המשמעות שלה הינה בבחירת הטיפול לחולה אשר חורגת הרבה מאד מתחום ההתמחות הטבעי של גנטיקאים.

צפויה דרישה נרחבת למומחים בתחום זה. הדרישה הראשונה תגיע דווקא מהמטולוגים אשר נמצאים שני צעדים לפני האונקולוגים באינטנסיביות של שימוש בגנטיקה בעת קבלת החלטות קליניות אך אין ספק שגם באונקולוגיה בעוד מספר שנים בכל מחלקה ישב מומחה לרפואה מכוונת אישית.

כאמור אין תוכנית הכשרה בתחום וקיים צורך בבניית תוכנית המיועדת להכשרת המטולוגים ואונקולוגים אשר חלק מההכשרה תעשה גם בשיתוף עם מומחים לגנטיקה ומומחים לאבחנה מעבדתית וכו".
2. נדרשת הכשרה בין תחומית בביואינפורמטיקה, AI והכרת עולם הרפואה המעשי, שתביא ליותר הבנה של היכולות והמגבלות של היכולות החישוביות עבור תלמידי רפואה ולרופאים בקליניקות ובבתי החולים ויותר דגשים על הצד הרפואי בלימודי ביואינפורמטיקה.
3. הכשרת אנשים בעלי ידע מולטי-דיסציפלינרי לתחום. ההכשרה דורשת גם מדעים מדויקים וגם מדעי החיים (כולל רפואה) לפחות ברמה של דוקטורט ובתר דוקטורנט. הכנסת חשיבה כמותית לתוכניות לימודים בביולוגיה ורפואה וגם בחשיפת סטודנטים לביו-רפואה למקצועות ההנדסיים. התאמות אלה יששירו דור חדש שידע לתכנת, לשאול את השאלות המתאימות, להציע רעיונות חדשניים, לאסוף ולנתח את הנתונים. ניתן ללמוד מתוכניות הלימודים של מוסדות אקדמיים בארה"ב שהכניסו תוכניות כאלה כדוגמת סטנפורד.
4. יש לאפשר לתלמידי תיכון ללמוד את השילוב של מתמטיקה, פיסיקה, כימיה וביולוגיה ולא כפי שקיים כיום שהם צריכים לבחור ביניהם. אלה ארבעת המקצועות הקריטיים. מערכת החינוך צריכה לעבור ממערכת חינוך מובנית למערכת חינוך שמאפשרת לתלמיד שמתעניין ללמוד איזה צירופי מקצועות שבהם הוא מעוניין, על מנת ליצור הבנה אינטגרטיבית. צריך ליצור חינוך רחב-הוליסטי מעורר עניין והתלהבות.
5. קביעת מדיניות ורגולציה בנוגע לאופן איסוף הנתונים הנדרש על-ידי הרופאים ובניית התשתיות המתאימות לאיסוף הנתונים (יישום פסיפס)
6. בניית תוכניות הכשרה לרופאים Life Long Learning, שתכלול העשרה בתחומי הרפואה המותאמת אישית. התחום מתקדם ומתפתח ויש צורך בהעשרת הידע של הרופאים בכל החידושים בתחום. למשל התמחות ב-Medical Information להתמחות בשאלות של מסדי נתונים רפואיים.
7. קביעת מדיניות שתאפשר לרופאים לפנות זמן ולקבל משאבים על מנת לעסוק במחקר בסוגיות של רפואה מותאמת אישית בבתי החולים.
8. רוב המצטיינים בתחום מעדיפים ללכת למוסדות מחקר בחו"ל – גם בשל חוסר בתקנים ומשרות פנויות באקדמיה בארץ.

- Broes, S., Lacombe, D., Verlinden, M., & Huys, I. (2018). Toward a Tiered Model to Share Clinical Trial Data and Samples in Precision Oncology. *Frontiers in Medicine*, 5, 6. <https://doi.org/10.3389/fmed.2018.00006>
- DePristo Mark, & Poplin Ryan. (n.d.). Research Blog: DeepVariant: Highly Accurate Genomes With Deep Neural Networks.
- Dilsizian, S. E., & Siegel, E. L. (2014). Artificial Intelligence in Medicine and Cardiac Imaging: Harnessing Big Data and Advanced Computing to Provide Personalized Medical Diagnosis and Treatment. *Current Cardiology Reports*, 16(1), 441. <https://doi.org/10.1007/s11886-013-0441-8>
- Hamada, T., Keum, N., Nishihara, R., & Ogino, S. (2017). Molecular pathological epidemiology: new developing frontiers of big data science to study etiologies and pathogenesis. *Journal of Gastroenterology*, 52(3), 265–275. <https://doi.org/10.1007/s00535-016-1272-3>
- Heng, T. S. P., Painter, M. W., Elpek, K., Lukacs-Kornek, V., Mauermann, N., Turley, S. J., ... Kang, J. (2008). The Immunological Genome Project: networks of gene expression in immune cells. *Nature Immunology*, 9(10), 1091–1094. <https://doi.org/10.1038/ni1008-1091>
- How IBM And Microsoft Are Disrupting The Healthcare Industry With Cognitive Computing. (n.d.).
- Hsieh, J.-C., Li, A.-H., & Yang, C.-C. (2013). Mobile, Cloud, and Big Data Computing: Contributions, Challenges, and New Directions in Telecardiology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(12), 6131–6153. <https://doi.org/10.3390/ijerph10116131>
- Jiang, F., Jiang, Y., Zhi, H., Dong, Y., Li, H., Ma, S., ... Wang, Y. (2017). Artificial intelligence in healthcare: past, present and future. *Stroke and Vascular Neurology*, 2(4), 230–243. <https://doi.org/10.1136/svn-2017-000101>
- Lee, C. H., & Yoon, H.-J. (2017). Medical big data: promise and challenges. *Kidney Research and Clinical Practice*, 36(1), 3–11. <https://doi.org/10.23876/j.krccp.2017.36.1.3>
- Martens, J. H. A., & Stunnenberg, H. G. (2013). BLUEPRINT: mapping human blood cell epigenomes. *Haematologica*, 98(10), 1487–9. <https://doi.org/10.3324/haematol.2013.094243>
- Paten, B., Diekhans, M., Druker, B. J., Friend, S., Guinney, J., Gassner, N., ... Haussler, D. (2015). The NIH BD2K center for big data in translational genomics. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 22(6), 1143–1147. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocv047>
- Roosan, D., Samore, M., Jones, M., Livnat, Y., & Clutter, J. (2016). Big-Data Based Decision-Support Systems to Improve Clinicians' Cognition. In *2016 IEEE International Conference on Healthcare Informatics (ICHI)* (Vol. 2016, pp. 285–288). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICHI.2016.39>
- Sahoo, P. K., Mohapatra, S. K., & Wu, S.-L. (2016). Analyzing Healthcare Big Data With Prediction for Future Health Condition. *IEEE Access*, 4, 9786–9799.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2647619>

Singh, G., Schulthess, D., Hughes, N., Vannieuwenhuysse, B., & Kalra, D. (2017). Real world big data for clinical research and drug development. *Drug Discovery Today*.

<https://doi.org/10.1016/J.DRUDIS.2017.12.002>

Value-Based Healthcare: Using Predictive Analytics to Forecast Risk and Outcomes - Watson Health Perspectives. (n.d.).

Villar, J. R., González, S., Sedano, J., Chira, C., & Trejo-Gabriel-Galan, J. M. (2015). Improving Human Activity Recognition and its Application in Early Stroke Diagnosis.

International Journal of Neural Systems, 12(4).

<https://doi.org/10.1142/S0129065714500361>

Winter, D. R. (2018). Thinking BIG rheumatology: how to make functional genomics data work for you. *Arthritis Research & Therapy*, 20(1), 29. <https://doi.org/10.1186/s13075-017-1504-9>

אגירת אנרגיה



אגירת אנרגיה מתארת תהליכים שונים שנועדו לאגור אנרגיה ולהמיר אותה כך שיהיה ניתן להשתמש בה לצרכים השונים בנקודות זמן שונות. נושא אגירת אנרגיה חשוב לניצול יעיל של רשת החשמל ולשילוב של אנרגיות מתחדשות ליצירת חשמל, קידום תחבורה היברידיית וחשמלית ועוד. האגירה יוצרת איזון בייצור החשמל ותורמת לביטחון באספקה שוטפת של חשמל. שוק מערכות אגירת האנרגיה הוערך בשווי של 340 מיליארד דולר בשנת 2018 והוא צפוי להתרחב ביותר מ-6% עד שנת 2025 (Global Market Insights Inc., 2018) במקביל להתפתחות המתמשכת של מערכות אגירת אנרגיה למשאבי אנרגיה מתחדשים. הנטייה בעולם הינה לעבור לפרויקטים המשלבים הפקת אנרגיות מתחדשות עם מתקני אגירת אנרגיה, בעיקר בסין, ארה"ב ואירופה (iea, 2019). המיקוד המתמשך ביצור של אנרגיה מתחדשת נובע בעיקר מהגידול בצריכת האנרגיה בעולם ותופס תאוצה בשל השקעות נרחבות של הסקטור הפרטי והסקטור הציבורי בטכנולוגיות של אנרגיה מתחדשת. דוגמאות לכך הן שוק אגירת האנרגיה בסין שהוערך ביותר מ-700 מיליון דולר ב-2017, ופריסת הקיבולת המצטברת בסין צפויה לעבור את ה-4,000MW⁸⁸ עד 2024. שוק אגירת האנרגיה בארה"ב, שהוערך ביותר מ-400 מיליון דולר בשנת 2017, צפוי לגדול אל מעבר ל-3,000MW⁶⁵ לשנה עד 2024 (Global Market Insights Inc., 2018). גידול משמעותי חל גם בשוק אגירת האנרגיה באירופה שגדל בשנת 2017 ב-50% לעומת 2016 (EASE, 2019).

טכנולוגיית אגירת אנרגיה הינה מערכת הקולטת אנרגיה ומאחסנת אותה לפרק זמן מסוים לפני שחרורה הלאה על פי דרישה לאספקת אנרגיה או שירותי חשמל. הטכנולוגיה הפכה לנפוצה יותר ולנדרשת יותר, בעיקר בתעשיית החשמל, יחד עם הדרישה לאנרגיה נקייה ושימוש באנרגיות מתחדשות (כגון, קרינת השמש, גאות ושפל, גלי ים, רוח, ביומסה, הידרואלקטרית, גיאותרמית) והירידה בעקומת העלות של אנרגיות אלו. טכנולוגיית האגירה הינה בעלת פוטנציאל כלכלי משמעותי, היות שמערכות אלו מייעלות את התשתיות ליצירת אנרגיה ומוזילות את העלויות עבור הצרכנים.

ניתן לנתח את שוק הטכנולוגיה של מערכות אגירת האנרגיה בעולם לפי סוגי הטכנולוגיה לאגירה, לפי המשתמש הסופי (בית מגורים, שירותי ציבורי) ולפי סוג היישום (רשת חשמל, תחבורה).

סוגי הטכנולוגיות השונות מבוססות על גישות של אגירת אנרגיה כימית, אנרגיה תרמית, אנרגיה מכנית, אנרגית מימן ואנרגית מים. גישות אלו מחולקות לחמש קטגוריות עיקריות (ESA, 2019):

1. **Batteries Storage** - אגירת אנרגיה בסוללה באמצעות המרה של אנרגיה כימית.
2. **Thermal Energy Storage** - אגירת אנרגיה תרמית.
3. **Mechanical Storage** - מערכות אגירת אנרגיה מכניות.
4. **Hydrogen Energy Storage** - המרה של עודפי ייצור חשמל למימן באמצעות אלקטרוליזה.
5. **Pumped Hydropower Storage** - אגירת אנרגיה הידרואלקטרית בקנה מידה גדול באמצעות מאגרי מים.

המערכות לאגירת אנרגיה עוברות מהפכה טכנולוגית מתמשכת כך שיוכלו לאגור אנרגיה ביעילות ובנחות ולהתגבר על המחסומים המסורתיים של אספקת אנרגיה רציפה. המגמות להתפתחות הטכנולוגיות בתחום נובעות מאימוץ של מערכות אגירה לרשת החשמל ולתחבורה, אימוץ של טכנולוגיות לאנרגיות מתחדשות ומהצורך לשילוב של תוכנה לניהול יעיל של מערכות האנרגיה (AESO, 2018).

1.1 פוטנציאל שוק אגירת האנרגיה בעולם

שוק האנרגיה הסולארית הפך לאחת התעשיות בעלות הצמיחה המהירה ביותר בשנים האחרונות. הצמיחה של אנרגיה סולארית הינה אחת הטכנולוגיות המובילות כמענה לביקוש למערכת אחסון האנרגיה. בשנת 2016, ההשקעה העולמית בתחומים אלה הייתה 113.7 מיליארד דולר, כאשר אסיה מובילה את השוק. גרמניה היא אחת המדינות המובילות בתחום אחסון אנרגיה עבור מערכת אנרגיה מתחדשת.

⁸⁸ מגה-ואט (MW) שווה ל-1,000,000 ואט; ג'יגה-ואט-שעה (GWh) שווה למיליארד ואט-שעה; קילוואט-שעה (קוט"ש) (kWh), שווה ל-1000 ואט-שעה

בשנת 2017, בוצעו ברחבי העולם, כ-1,315 פרויקטים באמצעות טכנולוגיות אחסון אנרגיה ו-14 פרויקטים עדיין בשלבי הקמה. כיום השוק מרוכז מאוד במדינות ארצות הברית, גרמניה, יפן ואוסטרליה. סוללות ליתיום יון צפויות להיות מערכות אחסון האנרגיה המהירות ביותר, הודות לעוצמתן הגבוהה ולצפיפות האנרגיה הגבוהה שלהן. בהנחה שהשקעות המו"פ בתחומים אלה ימשיכו לגדול, טכנולוגיות האחסון צפויות להיות יעילות יותר מבחינה כלכלית. השוק צפוי להמשיך ולגדול בשל הדרישה הקיימת לאספקת חשמל איכותית ויעילה הדורשת פיתוח של תשתיות של רשת חכמה.

1.2 אגירת אנרגיה בישראל

הפעילות הקיימת בישראל בתחום הינה של משרדי ממשלה (משרד האנרגיה והמשרד להגנת הסביבה), הרשות לחדשנות, רשות החשמל וחברות בתחום האנרגיה והסביבה כולל בתחום אגירת אנרגיה, שבמסגרתה נבחנות אפשרויות של אגירה וקצירה של אנרגיה בהקשרים שונים. בין תחומי הפעילות של משרד האנרגיה, שדירוג של רשת החשמל הקיימת לרשת חכמה⁸⁹ (Smart Grid), שכרוך באתגרים משמעותיים הן בתשתית הפיזית והן בטכנולוגיות המידע. הרשת תידרש לנהל בעילות אלפי יצרנים בעלי תפוקות משתנות, ולפתח טכנולוגיות אגירה לטווחים שונים. טכנולוגיות מידע מתקדמות יישמו לצורך איסוף וניתוח כמויות מידע גדולות בזמן אמת באמצעות מערכות שליטה ובקרה בנקודות רבות על פני הרשת.

1.3 היתרונות והחסמים של ישראל בתחום

על בסיס הראיונות שקיימנו⁹⁰ וסקר הספרות שערכנו, מסוכמים להלן היתרונות והחסמים להתפתחות תחום אגירת האנרגיה בישראל.

הפרמטרים הבאים מאפשרים לישראל את היכולת להוביל בנושא אגירת אנרגיה:

- **שמש כמשאב טבעי.** לפי הבנק העולמי, במדינות רבות בעולם שהן מדינות שטופות שמש, ישנה כדאיות גבוהה לשימוש השילוב של מערכות סולאריות ואגירה והחזר ההשקעה של מתקן כזה הוא 4-5 שנים⁹¹. מדינת ישראל היא מדינה מוצפת שמש וניתן לנצל אותה לטובת הפקת חשמל. ישראל רוויה בקרינה סולארית, ועלות הייצור מאנרגיה סולארית נמוכה בה מעלות הייצור הקונבנציונלית⁹². על פי דוח משרד האנרגיה (אוקטובר 2018)⁹³ בנושא "יעדי משק האנרגיה לשנת 2030", רובה המכריע של האנרגיה המתחדשת בישראל צפויה להתקבל ממערכות סולריות המבוססות על אנרגית שמש. מערכות אלו אינן מספקות אנרגיה יציבה על פני שעות היממה, דבר היוצר חסם ליישום אנרגיה מתחדשת בהיקפים מספקים. פתרון לחסם זה מבוסס על התפתחות טכנולוגית, בעיקר בתחום **אגירת אנרגיה. אנרגיה למגורים ולצריכה עצמית.** בישראל מלאי מבני מגורים בעלי שטחי גג פוטנציאליים משמעותי אך מנוצל באופן מזערי, וזאת על אף היתרונות הרבים הגלומים בייצור חשמל על גבי גגות, הן בהיבטים סביבתיים והן בהיבטים כלכליים וחברתיים. לניצול יתרון זה דרושים פתרונות שיאפשרו התקנת מערכות קטנות, ובפרט על גבי מבני מגורים

⁸⁹https://www.gov.il/he/Departments/Guides/projects_science?chapterIndex=2

⁹⁰ רשימת המרואיינים:

- מתיו סאס – ראש המעבדה לאנרגיה אלקטרוכימית ומים בטכניון
- ד"ר נורית גל – סמנ"כלית חשמל ורגולציה, רשות החשמל
- פרופ' דורון אורבך מהמחלקה לכימיה והמכון לננוטכנולוגיה זכה בפרס ראש הממשלה ע"ש סמסון לחדשנות בתחום תחליפי נפט לתחבורה.
- פרופ' גרשון גרוסמן - עמית מחקר בכיר במוסד שמואל נאמן, ראש פרויקט פורום אנרגיה וחבר בפקולטה להנדסת מכונות בטכניון
- ברק עידן – ראש תחום טכנולוגיות בקבוצת אגירת האנרגיה של חברת אורמת וד"ר יוסי אליה, ראש תחום הנדסה
- עידן ליבס ונעמה שפירא, מוסד שמואל נאמן
- עופר גולדהירש, הרשות לחדשנות

⁹¹ [https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/30349/110879-BRI-EM-Compass-Note-23-](https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/30349/110879-BRI-EM-Compass-Note-23-Energy-Storage-11-16-PUBLIC.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

⁹² <http://www.sviva.gov.il/subjectsenv/greenbuilding/producing-energy-in-buildings/documents/solar-energy-nir>

lotan.pdf

⁹³ https://www.gov.il/BlobFolder/news/plan_2030/he/2030summary.pdf

משותפים בפריפריה⁹⁴. על מנת שיתרון זה ינוצל באופן המיטבי, פתרונות לאגירת האנרגיה משעות היום שיאפשרו צריכת אנרגיה פרטית גם בשעות הערב, בהן יש ביקוש שיא לחשמל⁷¹ (פורום אנרגיה, 2019).

- **פעילות מו"פ של חברות סטארט אפ לצד פעילות תעשייתית של חברות תעשייתיות ותיקות.** בישראל קיימות תשתית של חברות ותיקות גדולות לצד חברות סטארט-אפ העוסקות בתחומי האנרגיות המתחדשות, קלינטק, אגירת אנרגיה והתייעלות אנרגטית. חברות סטארט אפ רבות עוסקות באנרגיה נקייה ואנרגיות מתחדשות, נושא המשתלב במהותו עם נושא אגירת אנרגיה. שני תחומים אלו פועלים יחדיו כדי ליצור תועלתיות בייצור וצריכת אנרגיה.
- **טכנולוגיות לניהול רשת למיקסום יעילות השימוש במערכות לאגירת אנרגיה.** בנושא זה ישנה התחלה של פעילות פיתוח תוכנה לניהול רשת. בישראל ישנה פעילות רבה של חברות הייטק וסטארט-אפים בתחומי פיתוח תוכנה, פיתוח בסיסי נתונים ו-big data, לכן גם פוטנציאל עצום להפנות אלול לפיתוח מערכות ניהול המשלבות מגוון מקורות כגון אגירה חכמה.
- **כוח אדם למחקר בנושא אגירת אנרגיה.** ישנם בארץ מרכזי מחקר מתקדמים העוסקים בתחום האנרגיה בכלל ואגירת אנרגיה בפרט. לצד מרכזי המחקר, חוקרים באוניברסיטאות עוסקים ומפרסמים מחקרים בתחום.

חסמים לתחום אגירת האנרגיה בישראל:

- **רגולציה ותקינה.** עיקר הכשלים מתמקדים בנושא הרגולציה והתקינה. רשות החשמל פרסמה טיוטה של מפת דרכים לפיתוח מקטע הייצור במשק החשמל⁹⁵ תוך התייחסות לנושא של אגירת אנרגיה. הטיוטה מתייחסת לצורך להתוות כיוונים לשילוב אגירת אנרגיה ברשת החשמל: שימוש באגירה למענה מהיר בשעות העומס, שימוש באגירה להחלפת הספק קובנציונלי (שימוש באגירה כתחליף הספק קובנציונלי מחייבת יכולת אנרגיה למספר שעות רצופות), שימוש באגירה לדחיית השקעות ברשת, וצמצום השלת מתקני אנרגיה מתחדשת בשעות בהן עומס הביקוש נמוך.

יש להניע את שוק האנרגיה יותר לכיוון של אנרגיה ירוקה והורדת חסמים. הכשל המתמשך בשוק האנרגיה הוא במעבר לאנרגיה ירוקה. בתחום זה יש חסמים שנוצרו ע"י חברת החשמל השואפת לשמור על מעמדה המונופוליסטי ולעיתים התנגדות של ארגונים ירוקים הדואגים לרווחת האדם, הטבע והנוף. ניתן להתמודד עם אתגרים אלה תוך פגיעה מינימאלית בסביבה⁷¹.

אגירת אנרגיה של מערכות PV קטנות במצברים בבתיים היא שיטה המתפתחת אצל יצרנים פרטיים קטנים השואפים למקסם את ערך האנרגיה שהם מיצרים. בדרך כלל לשימוש עצמי וייתכן גם למכירה לרשת. נושא זה עדיין לא מוסדר מבחינת הרגולציה בארץ. היצרנים הביתיים מוכרים כיום את האנרגיה לרשת במחיר אחיד⁷¹.

בפורום אנרגיה שנערך במוסד שמואל נאמן הומלץ לבנות רגולציה המעודדת אגירה. חסר כיום הסדר במספר נושאים: יש לבנות מנגנון ורגולציה מתאימה לטיפול בסוללות שיצאו משימוש; רגולציה לטעינה ופריקה של סוללות המחוברות לרשת; רגולציה לתחנות וירטואליות הכוללת בין היתר הזנת אנרגיה לרשת, קניית חשמל בתעריף עודף ועוד; תקנות בנושא אבטחת סייבר (פורום אנרגיה, 2019). מפת הדרכים של רשות החשמל מציינת כי אגירת אנרגיה צפויה לתפוס מקום משמעותי בפיתוח הייצור לאורך העשור הבא. אגירה באמצעות סוללות הינה דומיננטית וחשובה ולכן, יש להיערך למלוא ההיבטים התכנוניים, החשמליים והסביבתיים הנוגעים לשילוב נרחב של סוללות.

המגמה העולמית היא ייצור מבוזר של חשמל באמצעות מערכות קטנות לייצור חשמל + מערכות אגירה בדוח שפורסם על ידי משרד האנרגיה באוקטובר 2018 בנושא "יעדי משק האנרגיה לשנת 2030" נכתב כי העמידה ביעד ייצור של 17% מאנרגיה מתחדשת ב-2030 מחייבת מתן מענה לאתגרים הקשורים לניהול רשת חשמל מבוזרת. רובה המכריע של האנרגיה המתחדשת בישראל צפויה להתקבל ממערכות סולריות

⁹⁴ הרחבת ייצור האנרגיה הסולארית על גבי מבני מגורים, מכון ירושלים לחקר ישראל והמשרד להגנת הסביבה
⁹⁵ מפת דרכים לפיתוח מקטע הייצור במשק החשמל 2018-2030

המבוססות על אנרגיית שמש. מערכות אלו אינן מספקות, כשלעצמן אנרגיה יציבה על פני שעות היממה ובכך נוצר חסם ליישום אנרגיה מתחדשת שניתן להסירו בעיקר על ידי אגירת אנרגיה (משרד האנרגיה, 2018). ברפורמה של משק החשמל, שפורסמה ביוני 2018 (מספר החלטה 3859⁹⁶) ישנם שני סעיפים המבהירים את נושא אגירת אנרגיה. על פי סעיף י' בהחלטה, "חברת החשמל לא תפרוס רשת חלוקה חדשה במקום בו קיימת רשת פרטית ערב תיקון החוק. מקום זה ייראו אותו כצרכן, אלא אם רשות החשמל תורה אחרת. במקרים שבהם יוקמו מיקרו גנרציה או מתקן אגירת חשמל, שאינם בשטח פרטי, שיצריכו העברת אנרגיה לרשת ולצרכנים שונים, למעט מתקנים בחצר צרכן, הרשת המחברת אותם לשאר הצרכנים תוקם ותתופעל על ידי חברת החשמל כספק שירות חיוני או על ידי מחלק בשטחו". בנוסף, על פי סעיף טז' בהחלטה, "חברת החשמל תהיה רשאית להקים ולתפעל מתקני אגירה אך ורק בתוך התשתית הפיסית של רשת ההולכה. האגירה בתשתית הפיסית כאמור תיקבע בתוכנית הפיתוח שיכין בעל רישיון ניהול המערכת. חברת החשמל תהיה רשאית לתכנן, להקים ולתפעל מתקני אגירה אך ורק בתוך התשתית הפיסית של רשת החלוקה והכל לפי עקרונות שתקבע רשות החשמל לשילוב מתקני אגירה ברשת החלוקה."

על מנת ליישם ביעילות ייצור חשמל ממקורות מבוזרים יש צורך בתקינה מסודרת. בפורום אנרגיה בייצור חשמל (פורום אנרגיה מספר 35, 2015) הומלץ לגבש תוכנית אב למשק החשמל הישראלי גם בנושא האגירה כולל טיפול באתגרים הקשורים לאגירה כמכלול, תוך דגש על האגירה המבוזרת, באמצעות מתקני ייצור הכוללים יכולת אגירה מקומית.

- **מחסור בתמריץ כלכלי.** אין תמריצים לשימוש יעיל ומתאים לצרכי רשת החשמל ואין תמריצים כלכליים לפיתוח נושא האגירה. הפתרון הקל הינו להרחיב ולהקים רשתות חשמל קונבנציונליות נוספות ולכן יש לעודד תמיכה ממשלתית בפתרונות לאגירת אנרגיה על מנת ליצור משק יעיל של אספקה וייצור אנרגיה (פורום אנרגיה, 2019). לצרכן הפרטי אין היום עדיפות כלכלית לצורך בעצמו את כמות החשמל הנאגרת אלא עדיף לו למכור לרשת החשמל⁹⁷.

יש לאפשר למתקנים המשלבים מערכות סולאריות ואגירה ליהנות מהטבה של Net Metering, כך שבעלי מתקנים אלו יוכלו להזין אנרגיה לרשת ולקבל קרדיט על כולה (היום בישראל עדיין לא ניתן לקבל היתר לסוללות להזין חשמל לרשת) (פורום אנרגיה, 2019).

אנרגיה שאובה. דרך לשמור אנרגיה במאגר מים גבוה, בזמן עודף באנרגיה. כיום נבנה פרויקט כזה באתר ליד בקיבוץ מעלה הגלבע. כיום, אין ניצול של המשאבים הקיימים: הים התיכון והכנרת וניצול הפרש הגבהים ביניהם. "תעלת הימים" התימרה לתת ערך רב בגלל הפרש הגבהים בין הים התיכון לעמק הירדן⁷¹.

2 תעשיית אגירת אנרגיה בישראל

2.1 מיפוי חברות בתחום אגירת אנרגיה⁹⁸

בישראל פועלות 34 חברות העוסקות באגירת אנרגיה בשלושה סקטורים עיקריים שתיוגו במאגר ה-Startup Nation Central Finder⁹⁹ תחת התיוג: Energy-storage¹⁰⁰. בעשור האחרון חלה עליה במספר החברות הפועלות בתחום אגירת אנרגיה בישראל מ-9 חברות בשנת 2009 ל-34 חברות ב-2019.

26 חברות פועלות בתחום הקלינטק. בשנים 2010-2019 הוקמו 20 חברות בתחום זה (איור 40). נתון זה מעיד על גידול בתעשיית הקלינטק שמיועדת, בין היתר, גם לפיתוח מערכות לאגירת אנרגיה. הגידול נובע מהצורך בהתמודדות עם זיהום האוויר והכנסת אנרגיה נקייה לשימושים של אנרגיות מתחדשות ואגירת אנרגיה לתחום.

⁹⁶ https://www.gov.il/he/Departments/policies/dec3859_2018

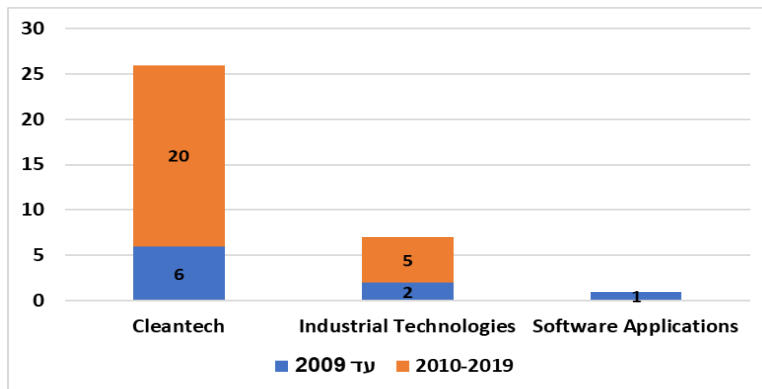
⁹⁷ מתוך הריאיון עם פרופ' גרשון גרוסמן

⁹⁸ הנתונים בתת פרק זה הינם עיבוד של מוסד נאמן לנתוני המאגר Startup Nation Central Finder אלא אם צוין אחרת.

⁹⁹ <https://finder.startupnationcentral.org/>

¹⁰⁰ החברות המופיעות במאגר ה-Startup Nation Central Finder הן חברות בעלות תיוג של Energy-storage ומופיעות כפעילות במאגר זה, נכון לדצמבר 2019.

איור 40: הגידול במספר החברות בשנים 2010-2019 לפי סקטור



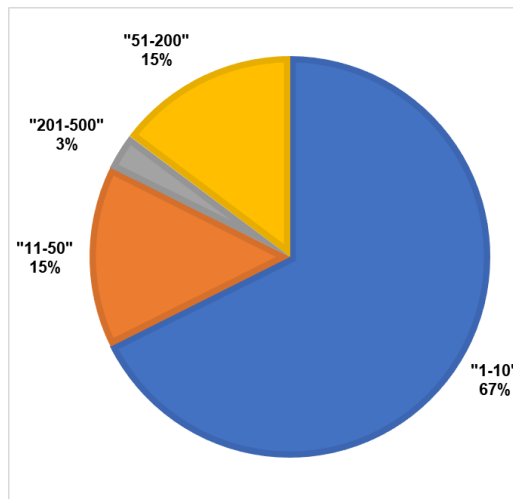
מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

שלב פיתוח המוצר: 41% מהחברות נמצאות בשלב Released של המוצר וכשליש מהן (32%) נמצאות בשלב המו"פ (R&D) של המוצר. שאר החברות נמצאות בשלבי Alpha ו- Beta של המוצר. לדוגמא, חברת ETV Energy נמצאת בשלב ה- Released של המוצר ומפתחת סוללת ליתיום-יון לשוק הרכב. סוללה חדשה המבוססת על קתודת מתח-גבוהה והמעבירה רמת אנרגיה ספציפית של 220-250 kg/Wh¹⁰¹.

שלב המימון: 41% מהחברות נמצאות בשלב מימון Pre-seed או Seed. 21% מהחברות נמצאות בשלב Revenue Financed. 15% מהחברות נמצאות בסבבי מימון A, B או C+.

גודל החברות: מתוך 34 החברות שנסקרו, 23 (67%) הן חברות קטנות של עד 10 עובדים לחברה, רובן בתחום הקלינטק. 15% מהחברות הן חברות של עד 50 עובדים, 14% מהחברות הן בינוניות ומונות בין 50 ל-200 עובדים ורק 3% הן חברות גדולות המעסיקות למעלה מ-500 עובדים. נתונים אלה מחזקים את העובדה כי זהו תחום מתפתח ורוב החברות נמצאות בתחילת דרכן.

איור 41: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה



מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

2.2 משקיעים

נכון לנובמבר 2019, 18 חברות מתוך 34 החברות שנסקרו ממאגר Startup Nation Central Finder גייסו הון בסך כולל של 1.016 מיליארד. 98% מגיוסי ההון שייכים לחמש חברות בלבד (טבלה 4).

¹⁰¹<http://www.etvenergy.com/>

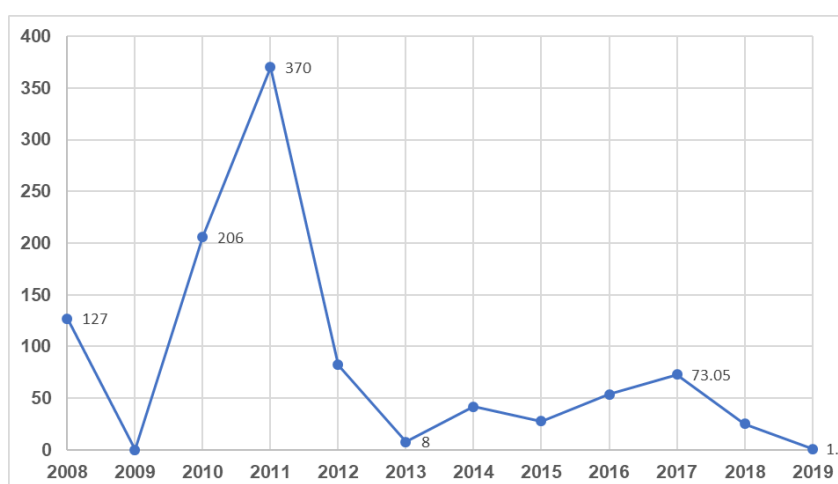
טבלה 4: היקף גיוס ההון שבוצע בחברות בתחום אגירת אנרגיה

שם החברה	סכום הגיוס במיליוני דולרים (M\$)
BrightSource	771.0
StoreDot	130.0
Phinergy	50.0
mPrest	36.0
ETV Energy	12.0
סה"כ	999.0

מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder (נובמבר 2019)

בשנת 2011 היה שיא בגיוס הון, כשלאחריו החל משנת 2012 חלה ירידה בגיוס ההון (מתוך מאגר Startup Nation Central). נכון לנובמבר 2019, סך גיוס ההון בשנה זו נמוך ועומד על 1.2 מיליון דולרים (איור 42). יחד עם זאת, בשנים בהן היו גיוסי הון גבוהים (2010 ו-2011), כל הגיוס הכספי נעשה על ידי חברה אחת (BrightSource Industries¹⁰²), לעומת גיוסי הון בשנים 2016-2018, שנעשו על-ידי מספר חברות.

איור 42: סך גיוס ההון (במיליוני \$) של חברות בישראל בתחום אגירת אנרגיה בשנים 2008-2019



מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder (נובמבר 2019)

החברות הישראליות משכו מימון מכ-40 משקיעים שונים, ישראלים וזרים. בין המשקיעים הישראלים נמנים משרד האנרגיה (הושקעו כ-1.5 מיליון דולר בחברות Mada Analytics, Nostromo Energy, NrgStorEdge ו-Brenmiller Energy), הרשות לחדשנות/המדען הראשי (הושקעו 2 מיליון דולר בחברות Vollspark ו-NrgStorEdge), קרן הון סיכון, חברת השקעות המפעילה חממה טכנולוגית פלטפורמת השקעות עולמית (מימון המונים). בין המשקיעים הזרים נמנים חברות השקעה, קרנות הון סיכון, חברות טכנולוגיה, אנרגיה וגז, קרן מחקר. בנוסף, היו השקעות של Horizon 2020 (הושקעו 1.55 מיליון דולר בחברות Vollspark ו-Electriq~Global) ושל משרד האנרגיה בארה"ב.

2.3 חברות מובילות בתחום

בנובמבר 2019, שלוש חברות, מתוך 34, דורגו בין 43 חברות הסטארט-אפ המובילות בעולם: Brenmiller Energy דורגה במקום החמישי, Nostromo Energy במקום ה-23 ו-H2 Energy Now במקום ה-34 (EnergyStartups, 2019).

בישראל קיימת פעילות בתחום אגירת האנרגיה גם של חברות גדולות וותיקות כדוגמת:

¹⁰²<http://www.brightsourceenergy.com/> החברה מתכננת, מפתחת ופורסת טכנולוגיה תרמית סולארית לייצור חשמל וקוטור לשוקי חשמל, נפט ותעשייה ברחבי העולם

Ormat Technologies - חברה בינלאומית בתחום האנרגיה והחשמל העוסקת בהקמה ותפעול של תחנות כוח הפועלות על אנרגיה חלופית, בעיקר אנרגיה גיאותרמית, ייצור ציוד לייצור חשמל וציוד עזר. החברה מציעה פתרונות תעשייתיים בנושא אגירת אנרגיה: הפעלת שוק של משאבי טעינה או אחסון מבוזרים, סוללות אגירה כשירות, הנדסה ואינטגרציה של מתקנים לאגירת אנרגיה¹⁰³.

שיכון ובינוי אנרגיה - חברת בת של שיכון ובינוי. החברה פועלת במספר פרויקטים לבניית תחנות לאגירת אנרגיה¹⁰⁴: **אשלים** - פרויקט אנרגיה מתחדשת הכולל תחנת כוח תרמו-סולארית בהספק של 121 מגה-וואט. הפרויקט מוקם מכוח הסכם זיכיון עם מדינת ישראל בשיטת B.O.T (Build Operate Transfer) לתקופה של 28 שנה. התחנה משתרעת על פני שטח של 3,900 דונם ותספק חשמל לכ-60 אלף משקי בית. עד שנת 2020 התחנה מתוכננת לייצר 10% מהחשמל באמצעות אנרגיות מתחדשות. **שיבולים** - תחנת כוח סולארית פוטו-וולטאית (PV) בהספק 12.46 מגה-וואט. **עין השלושה** - תחנת כוח סולארית פוטו-וולטאית (PV) בהספק 5 מגה-וואט. **נבטים** - תחנת כוח סולארית פוטו-וולטאית (PV) בהספק 18 מגה-וואט. **ברוש** - תחנת כוח סולארית פוטו-וולטאית (PV) בהספק 9.632 מגה-וואט. **שחר** - תחנת כוח סולארית פוטו-וולטאית (PV) בהספק 9.1 מגה-וואט. **שניאור צאליים** - תחנת כוח סולארית פוטו-וולטאית (PV) לתכנון, מימון, הקמה ותפעול של תחנת כוח סולארית בהספק של כ-120 מגה-וואט⁶⁵.

חברת כי"ל (כימיקלים לישראל) - מתוך כלל פעילויות המו"פ של החברה, אגירת אנרגיה היא אחת מפעילויות המו"פ שכי"ל מתמקדת בהן: המשך פיתוח פתרונות אגירת אנרגיה מבוססי ברז, עבור חברות סוללות ברז (Br-Battery) תוך שימוש במגוון תרכובות¹⁰⁵.

האבים (hubs) בתחום אגירת אנרגיה

בנוסף לחברות העוסקות בתחום אגירת אנרגיה, פועלים בישראל גם **ארבע האבים (hubs)** שתויגו במאגר ה-Startup Nation Central Finder תחת התיג: Energy-storage:

Johnson Controls Open Innovation - hub ממוקם בתל אביב ומציע לסטארט-אפים הזדמנות לשתף פעולה עם מיזם בשווי 30 מיליארד דולר הפועל בין היתר בתחומי ההתייעלות האנרגית ואגירת אנרגיה.

Horizon GreenTech Ventures - hub ממוקם בדימונה. נוסד על ידי תאגיד אלסטום, רותם תעשיות וגפן ביומד השקעות. ההאב ממנף מומחיות מדעית, טכנולוגית, תעשייתית ועסקית סינרגטית בין היתר בתחומי האנרגיה הירוקה ואגירת אנרגיה.

ENEL Innovation Hub - hub ממוקם בתל אביב. מציע הזדמנות עסקית ממוקדת לסטארט-אפים ישראלים להיכנס ולמלא תפקיד משמעותי בשוק האנרגיה העולמי העצום. למשל, חברת Brenmiller לאגירה של חשמל סולארי באמצעות אגירה תרמית.

Karat - hub ממוקם בחיפה. מהווה יחידת מחיזם פנימית של חברת חשמל, המספקת מסגרת של שירותי השקעה ותמיכה המיועדים לפיתוח, קידום ומסחר של רעיונות חדשניים בתחומים הקשורים לאנרגיה: פתרונות בתחומי האנרגיה החשמלית הירוקה, עלויות אנרגיה נמוכות, ויעילות מערכת גבוהה יותר, במטרה לצמצם את התלות העולמית בדלקים פחמניים. למשל, חברת SSG Synergy solutions LTD הנותנת בין היתר פתרונות לאגירת אנרגיה לרשת החשמל.

2.4 חממות טכנולוגיות

בישראל קיימות שלוש חממות טכנולוגיות שתומכות בחברות הפועלות בין היתר בנושא אגירת אנרגיה:

חממה טכנולוגית "הון הטבע"¹⁰⁶ החברה לאנרגיה מתחדשת אילת-אילות (חברה ללא מטרות רווח, שמטרתה לפתח את תחום האנרגיה המתחדשת כמנוף לפיתוח אזורי בעיר אילת ומועצה אזורית חבל אילות) הקימה יחד עם המדינה וחברות פרטיות את חממת "הון הטבע" - חממה טכנולוגית וקרן השקעות לאנרגיות מתחדשות. הון הטבע מתמקדת בחדשנות קלינטק. החממה עוסקת במימון מאיץ למיזמים בשלבים מוקדמים בתחום של אנרגיה

¹⁰³<https://www.ormat.com/en/renewables/storage/view/?ContentID=233>

¹⁰⁴<https://www.shikunbinui.com/he-IL/energy>

¹⁰⁵<http://icl-group-sustainability.co.il/reports/continuous-innovation/>

¹⁰⁶<http://www.eilateilot.org/he/> קפיטל-ניצור

מתחדשת וקלינטק. החממה מקדמת, בין היתר, את נושא אגירת האנרגיה בהיבט הטכנולוגי והרגולטיבי על מנת לאפשר אספקת חשמל סולארי לאזור בכל שעות היממה.

בחממת "הון טבע" פועלות שתי חברות בתחום אגירת אנרגיה: חברת Chakratec המפתחת מערכת לאגירת אנרגיה בגלגלי תנופה כמענה על דרישת השוק התעשייתי והמסחרי. חברת AUGWIND. חברה שהטכנולוגיה שלה משלבת מערכת אגירת אנרגיה בתצורת אוויר דחוס, אשר מספקת חשמל בהתאם לצריכה המבוקשת, ומאוחסנת במיכל מוגן בפטנט.

חממה טכנולוגית ¹⁰⁷ **Kinrot Ventures LP** חממת כינרות ונצ'רס הוקמה ב-1997, וב-2012 נרכשה על ידי Hatchison Water חטיבת המים של התאגיד הציבורי בהונג-קונג. החממה ממוקמת בנתניה, ומשקיעה בחברות Seed המפתחות פתרונות מתקדמים בתחומים שונים ביניהם תחום הקלינטק ואגירת אנרגיה.

חממה טכנולוגית ¹⁰⁸ **Terralab Ventures** חממת סטארט אפ הממוקמת ביוקנעם. את החממה מפעילה קרן הון הסיכון Terra שהוקמה ב-2013 על ידי אנשי תעשייה ותיקים. החממה משקיעה במיזמי Early Stage המפתחים טכנולוגיות שמשפרות את העולם ואת איכות החיים, בין היתר, בתחום אגירת אנרגיה. לדוגמה, חברת 3dbattery הפועלת במסגרת החממה, מפתחת טכנולוגיה לשיפור הביצועים והמחיר של מיקרו-סוללות ליתיום-יון נטענות לאגירת אנרגיה.

3 תשתית אקדמית בתחום אגירת אנרגיה

3.1 מרכזי מחקר אקדמיים בתחום אגירת אנרגיה

בישראל פועלים מספר מרכזי מחקר אקדמיים בתחום אגירת אנרגיה:

- **המרכז למחקר הנעה אלקטרוכימית בישראל** ¹⁰⁹ **Israel National Research center for Electrochemical propulsion (INREP)**. נושא האנרגיה האלקטרו-כימית באקדמיה נעשה כיום בישראל במרכז זה. מוביל המרכז הינו פרופ' דרון אורבך, אוניברסיטת בר אילן. המרכז כולל 24 קבוצות מחקר משבע אוניברסיטאות (בר אילן, הטכניון, תל אביב, בן גוריון, מכון ויצמן, אריאל והאוניברסיטה העברית). למרכז שיתופי פעולה עם גורמי חוץ ועם התעשייה. הרעיון להקמת המרכז נבע מהחזון של מדינת ישראל להסרת התלות העולמית בנפט. המימון למרכז מגיע ממנהלת תחליפי דלקים במשרד ראש הממשלה, מהמל"ג-ומות"ת. בין הנושאים בהם עוסק המרכז הוא נושא אגירת אנרגיה, כתמיכה באנרגיות מתחדשות (פורום אנרגיה, 2019).
- **תוכנית האנרגיה על שם גרנד בטכניון** ¹¹⁰. במרכז מתבצע מחקר בנושא אגירה והמרה של אנרגיה (סוללות ותאי דלק) ובנושאים נוספים כגון דלקים חלופיים, אנרגיות מתחדשות ושימור אנרגיה. בין החוקרים המובילים במרכז בנושא אגירת אנרגיה: פרופ' יאיר עין-אלי, בין מחקריו בנושא משטחי אלומיניום באלקטרוליטים אורגניים עבור סוללות אלומיניום-אוויר.
- **המרכז לאנרגיה מתחדשת באוניברסיטת תל אביב** ¹¹¹. מונה מעל 300 חוקרים משבע פקולטות שונות ופועל להקמת מעבדות מתקדמות, בין היתר, בנושא של אגירת אנרגיה בתאי דלק ובסוללות זעירות. בין החוקרים במרכז פרופ' דיאנה גולודניצקי שפעילותה המחקרית מתמקדת בסינתזה, אפיון חומרים ותופעת מעבר יונים בננו-מבנים של אלקטרודות ואלקטרוליטים מוצקים עבור התקני אחסון אנרגיה.
- **המרכז לננו טכנולוגיה וחומרים מתקדמים באוניברסיטת בר אילן** ¹¹². המרכז עוסק בפיתוח אמצעים לאנרגיה מתחדשת: תאים פוטו-וולטאיים, אגירת אנרגיה, אנרגיה סולרית תרמית ושימור אנרגיה. בין החוקרים במרכז, פרופ' דרון אורבך מהמחלקה לכימיה הפועל לפיתוח סוללות לאגירה. פרופ' אורבך זכה בפרס ראש הממשלה ע"ש סמסון לחדשנות בתחום תחליפי נפט לתחבורה בשנת 2019. פרופ' דרון אורבך זכה בפרס על תרומתו פורצת הדרך לפיתוח סוללות מסוג חדש, בהן סוללה חדשנית מבוססת מגנזיום.

¹⁰⁷ <https://hutchisonkinrot.com/>

¹⁰⁸ <http://www.terralb.com/>

¹⁰⁹ <http://inrep.org.il/>

¹¹⁰ <https://gtep.technion.ac.il/he/>

¹¹¹ <https://www.tau.ac.il/renewable-energy/>

¹¹² <https://nano.biu.ac.il/he/research-centers/energy/>

למחקריו פוטנציאל גדול להביא לפיתוח סוללות חדשניות להנעת מכונות חשמליות ובכך להוות תחליף לדלק פוסילי-נוזלי.¹¹³

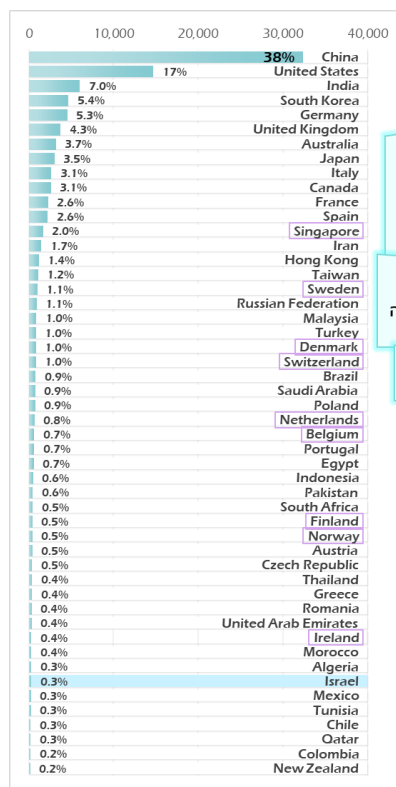
- המרכז הלאומי לאנרגיה שמש שדה בוקר באוניברסיטת בן גוריון¹¹⁴. המרכז מוקדש לביצוע מחקרים בנושא האנרגיה המתחדשת. היקף המחקר נע מקצירת אנרגיה סולארית לאגירת אנרגיה, מדעי חומרים, אופטיקה ופיזיקת שטח, כגון פוטו-וולטאיקה בריכוז גבוה, פיזיקה של תאים סולאריים בעילות גבוהה מאוד, פוטו-וולטאיקה אורגנית, אלקטרוליטים מרוכזים מאוד לקבלים-על וסוללות, אור- מטא-חומרים תגובתיים ומשטחים אלקטרו-מולקולריים.
- המרכז לחקר האנרגיה אוניברסיטת אריאל¹¹⁵. אגירת אנרגיה כימית הינה בין הנושאים הנחקרים במרכז. בין חוקרי המרכז ד"ר משה אברבוך, ראש המעבדה למערכות אגירה חשמליות.

3.2 מדדים ביבליומטריים

האיור הבא מציג את 50 המדינות המובילות במספר הפרסומים המדעיים בתחום Energy storage במהלך השנים 2015-2019. האחוזים מציינים את שיעור הפרסומים של כל מדינה מכלל הפרסומים בעולם בנושא¹¹⁶. סין מובילה את הדירוג עם למעלה משליש מפרסומי העולם בתחום (38%) וארה"ב במקום השני עם כ-17%.

באיור מודגשות בסגול מדינות ברות השוואה לישראל מבחינת גודל האוכלוסייה¹¹⁷. הדירוג של ישראל בתחום נמוך והיא נמצאת במקום ה-44 עם 0.3% מפרסומי העולם. יחד עם זאת, מספר הפרסומים הישראליים עלה פי 4 במהלך העשור החולף כשלאוניברסיטאות השונות בארץ יש פרסומים בשנים אלו (אוניברסיטת בר אילן, הטכניון, אוניברסיטת תל אביב, אוניברסיטת בן גוריון, האוניברסיטה העברית, מכון ויצמן ואוניברסיטת אריאל).

איור 43: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בשנים 2015-2019



סין מובילה במספר המאמרים בשנים 2014-2018 עם 38% מכמות הפרסומים בעולם; אחריה ארה"ב עם 17%; הודו - 7%; דרום קוריאה וגרמניה: כ-5%

ישראל ממוקמת במקום ה-44 עם 0.3% מפרסומי העולם באותה תקופה

מודגשות בסגול מדינות בנות השוואה לישראל

עיבוד של צוות חוסד שמואל
נאמן לנתוני מאגר סקופוס

¹¹³ <https://www1.biu.ac.il/index.php?id=3&pt=20&pid=3&level=2&cPath=3&type=1&news=3226>

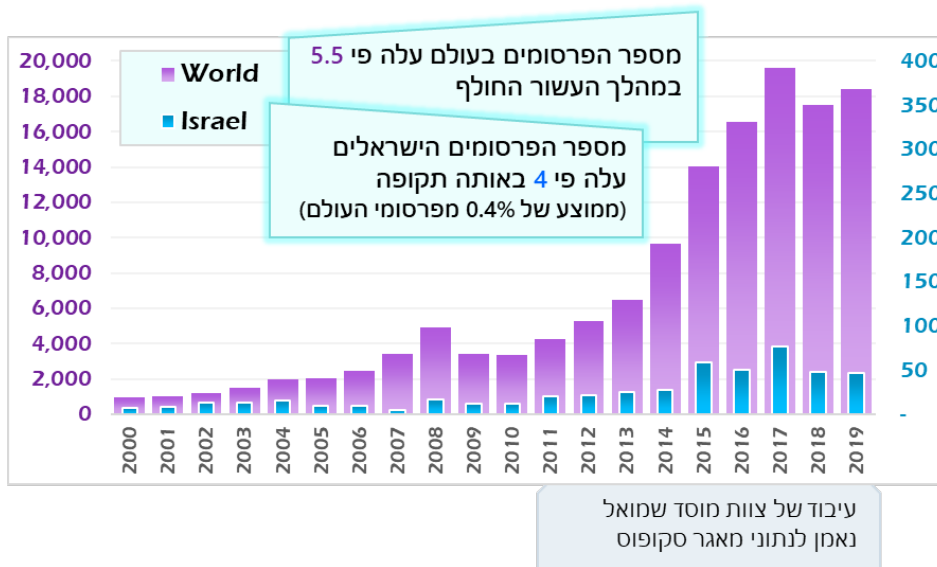
¹¹⁴ <https://in.bgu.ac.il/en/solar/Pages/default.aspx>

¹¹⁵ <https://www.ariel.ac.il/wp/energy-research-center/>

¹¹⁶ פרסומים שנכתבו בשיתוף פעולה של חוקרים ממספר מדינות נספרים עבור כל אחת מהמדינות ולכן סה"כ גדול מ-100%

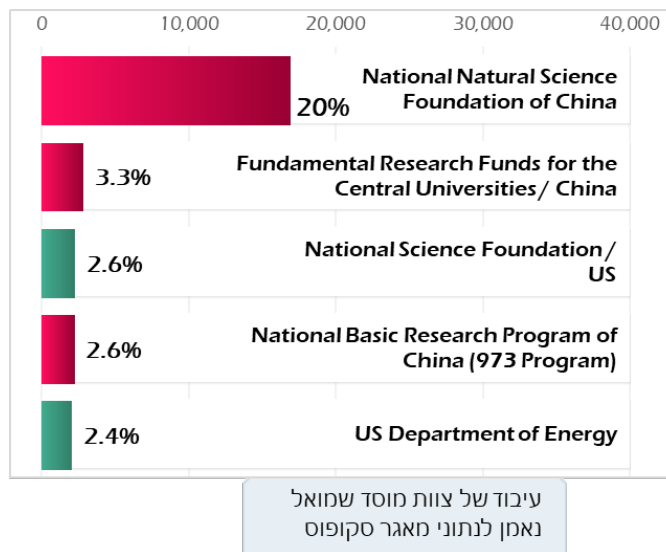
¹¹⁷ לרשימת המדינות בנות-השוואה נבחרו מדינות שדומות למדינת ישראל מבחינת גודל האוכלוסייה ומספר הפרסומים. השיקולים לבחירת המדינות מפורטים בפרק "השוואת ישראל למדינות נבחרות במדדים שונים" בדו"ח שפורסם בנושא "תפוקות מו"פ בישראל: פרסומים מדעיים בהשוואה בינלאומית, 2017"

איור 44: השינוי במספר הפרסומים בתחום אגירת אנרגיה בישראל יחסית לעולם בשנים 2000-2019



האיור הבא מציג את דירוג גופי המימון המובילים לפי מספר הפרסומים בשנים 2015-2019. על פי האיור מתוך חמישה גופי מימון, הקרן הלאומית למדעי הטבע של סין (National Natural Science Foundation of china) מובילה עם 20% מהפרסומים¹¹⁸.

איור 45: דירוג גופי המימון המובילים לפי מספר הפרסומים בשנים 2015-2019



3.3 בקשות לפטנטים

בשנים 2015-2019 הוגשו תשע בקשות לפטנטים בנושא של אגירת אנרגיה. הבקשות לפטנטים הוגשו ב-USPTO על ידי ממצאים ישראלים (פירוט הבקשות לפטנטים מופיע בנספח ג). שלוש מהבקשות הוגשו על ידי חוקרים וחמש בקשות הוגשו על ידי חברות. החברות שהגישו את הבקשות לפטנטים עוסקות בנושאים של אנרגיה מתחדשת, אנרגיה סולארית נקייה ופתרונות לאגירת אנרגיה.

¹¹⁸ ההתפלגות לפי מספר מאמרים לא בהכרח משקפת את ההתפלגות של ההשקעות בתחום.

3.4 מענקי מחקר

מענקי המחקר בתחום אגירת אנרגיה ניתנו לחוקרים ישראלים: ERC, BARD, GIF, BSF BIRD ו-ISF (טבלה 5).

טבלה 5: מענקי מחקר בתחום אגירת אנרגיה

Foundation	For Years	No. of relevant Grants
ERC**	2007 - 2019	5
BIRD	1988 - 2019	8
ISF	1991 - 2019	3
BSF	1997 - 2019	38
Total		54

** מענקי ERC הם חלק מ- horizon 2020

מספר המענקים הגדול ביותר בתחום בשנים האחרונות, ניתן על ידי קרן BSF, הקרן הדו-לאומית למדע ארצות הברית-ישראל התומכת בפרויקטים מחקריים שיתופיים במגוון רחב של תחומים מדעיים בסיסיים ויישומיים. מקורות נוספים למימון מחקרים בתחומי האנרגיה:

קרן הלמזלי (*The Leona M. and Harry B. Helmsley Charitable Trust*). הקרן העניקה לטכניון מענק בסך חמישה מיליון דולר להמשך פיתוח סוללת חשמל קלה, ידידותית, בעלת תוחלת חיים ארוכה. (המענק הגיע בתיווכו של פרופ' גדעון גרייזר. החוקר הראשי: הוא יאיר עין אלי מהפקולטה למדע והנדסה של חומרים). משרד האנרגיה¹¹⁹ מדיניות התמיכה במחקר ופיתוח של משרד האנרגיה בתחומי האחריות של המשרד. ועדת האנרגיה מטעם המועצה הלאומית למחקר ופיתוח פרסמה את הדוח¹²⁰: "מחקר אנרגיה באקדמיה בישראל 2014", המציג ניתוח חשוב של מחקר האנרגיה בישראל.

4 הכשרת כוח אדם לעבודה בתחום אגירת אנרגיה

באגירת אנרגיה צריך את השילוב של הנדסת אלקטרוניקה, חשמל ו-data science. הקורסים שניתנים במוסדות האקדמיים הם בעיקר באלקטרוניקה, מקורות כוח ומדע חומרים נותנים את ההכשרה הבסיסית הנדרשת לתחום. הכשרת כוח אדם לתחום נעשית בלימודים אקדמיים של המקצועות הבאים: **הנדסת חומרים, כימיה, מהנדסי כימיה, מהנדסי מכונות, מהנדסי חשמל, מהנדסי אנרגיה ומהנדסי איכות הסביבה ומשאבי טבע.**

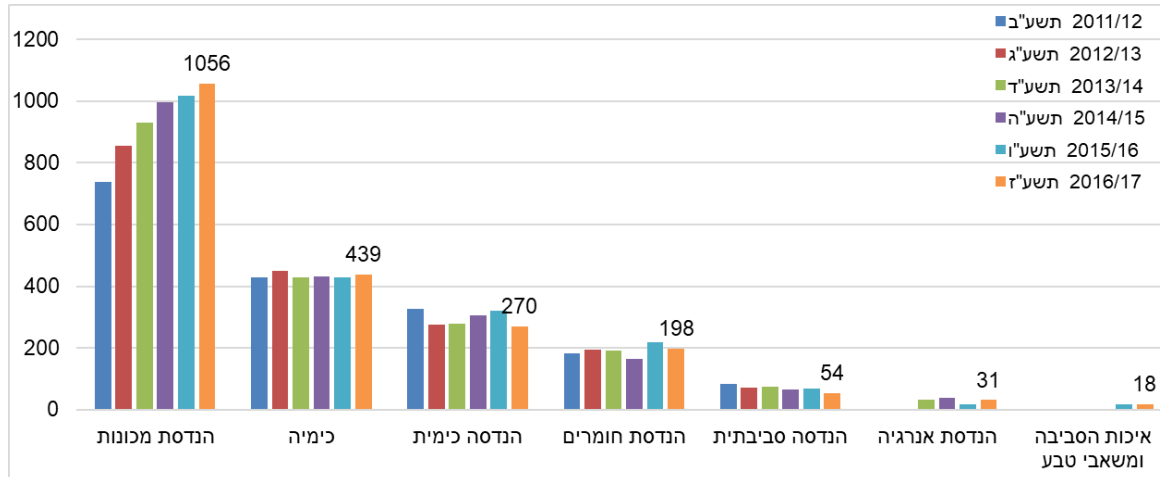
המוסדות האקדמיים שבהם ניתן ללמוד את המקצועות האלה: הטכניון, אוניברסיטת בן גוריון, אוניברסיטת אריאל, אוניברסיטת תל אביב, אוניברסיטה העברית, מכון ויצמן וכן במכללות שונות כגון: מכללת בראודה, סמי שמעון ותל חי.

באזור הבא ניתן לראות את מקבלי התארים בפקולטות הרלבנטיות לתחום אגירת אנרגיה במוסדות להשכלה גבוהה. בוגרים אלה מהווים עתודה אפשרית לעבודה בתחום.

בשנת הלימודים 2016/17 מספר מקבלי התארים בהנדסת מכונות עמד על 1056 בוגרים ונמצא במגמת עליה בשנים 2012-2017 של יותר מ-40%. בשאר המקצועות מספר הבוגרים קטן בהרבה ללא שינוי משמעותי במספר הבוגרים בשנים אלה.

¹¹⁹https://www.gov.il/BlobFolder/guide/rd_grants/he/rd_support.pdf
¹²⁰https://www.gov.il/BlobFolder/generalpage/molmop_reports_2014/he/ מחקר אנרגיה באקדמיה בישראל pdf10

איור 46: מקבלי תארים ממוסדות ההשכלה הגבוהה בתחומי אגירת אנרגיה בשנים 2012-2017



מקור: עיבוד מוסד נאמן לנתוני למ"ס

מסקירה של מסלולי הלימוד של מסלולי הלימוד בהנדסת אנרגיה, להלן מספר דוגמאות של תוכניות הכשרה לתחום:

- במכללת כנרת: לימודי הנדסת אנרגיה וגז טבעי¹²¹
- במכללת אפקה: לימודי הנדסת אנרגיה לתואר שני¹²²
- המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון: לימודי הנדסת כימיה בהתמחות אנרגיה SCE¹²³; לימודי הנדסת מכונות ומערכות אנרגיה SCE¹²⁴
- באוניברסיטת בן גוריון: לימודי הנדסת כימיה בהתמחות סביבה ואנרגיה¹²⁵; לימודי הנדסת מכונות בהתמחות אנרגיה גרעינית¹²⁶; תואר שני בהנדסת אנרגיה¹²⁷; תואר שני בלימודי מדבר בהתמחות אנרגיה סולרית¹²⁸
- באוניברסיטת חיפה: תואר שני בניהול ומדיניות אנרגיה¹²⁹

מסקירת ההכשרות עולה כי קיימת מגמה של גידול במספר התוכניות והקורסים. נתונים על מספר הבוגרים בהנדסת אנרגיה קיימים רק החל משנת 2014. מספר הבוגרים הממוצע לשנים 2012-2017 הוא 30 בוגרים. גם מקצוע איכות הסביבה ומשאבי טבע הכולל בתוכו הכשרה בתחום אגירת אנרגיה, הוא מקצוע שנמדד רק בשנתיים האחרונות (החל משנת 2016). מספר הבוגרים בו עומד על 18 בוגרים.

בגרף הבא מוצגים מקבלי תארים מהאוניברסיטאות בתחומים שעלו ככאלה שנחוצה בהם הכשרה לתחום אגירת אנרגיה.

¹²¹ <https://www.universities-colleges.org.il/%D7%94%D7%A0%D7%93%D7%A1%D7%AA-%D7%9E%D7%A2%D7%A8%D7%9B%D7%95%D7%AA-%D7%9E%D7%99%D7%93%D7%A2-%D7%9B%D7%A0%D7%A8%D7%AA/>

¹²² <https://www.universities-colleges.org.il/%D7%AA%D7%95%D7%90%D7%A8-%D7%A9%D7%A0%D7%99-%D7%91%D7%94%D7%A0%D7%93%D7%A1%D7%AA-%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92%D7%99%D7%94-%D7%9E%D7%9B%D7%9C%D7%9C%D7%AA-%D7%90%D7%A4%D7%A7%D7%94/>

¹²³ <https://www.universities-colleges.org.il/P41968/>

¹²⁴ <https://www.universities-colleges.org.il/P45165/>

¹²⁵ <https://www.universities-colleges.org.il/P42043/>

¹²⁶ <https://www.universities-colleges.org.il/P45137/>

¹²⁷ <https://www.universities-colleges.org.il/%D7%AA%D7%95%D7%90%D7%A8-%D7%A9%D7%A0%D7%99-%D7%94%D7%A0%D7%93%D7%A1%D7%AA-%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92%D7%99%D7%94-%D7%91%D7%9F-%D7%92%D7%95%D7%A8%D7%99%D7%95%D7%9F/>

¹²⁸ <https://www.universities-colleges.org.il/P45135/>

¹²⁹ <https://www.universities-colleges.org.il/%D7%A9%D7%A0%D7%99-%D7%A0%D7%99%D7%94%D7%95%D7%9C-%D7%9E%D7%93%D7%99%D7%A0%D7%99%D7%95%D7%AA-%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92%D7%99%D7%94-%D7%90%D7%95%D7%A0%D7%99-%D7%97%D7%99%D7%A4%D7%94/>

הקורסים שניתנים במוסדות האקדמיים בעיקר באלקטרוכימיה, מקורות כוח, מדע חומרים נותנים את ההכשרה הבסיסית הנדרשת ויש גם קורסים בתארים מתקדמים. בראיונות נאמר שהכשרה טובה נעשית גם בתאגיד מחקר – עשרות סטודנטים, דוקטורנטים ופוסט דוקטורנטים שעושים עבודות מחקר. המחסור בתחום הוא בעוזרי מחקר ומנהלי מעבדות שיכשירו את דור הסטודנטים הבא. כדי שתחום זה יפרוץ ויתפתח קיים חסר בארץ במעבדות ובהכשרה מעשית לסטודנטים של תואר ראשון ושני שיאפשרו לחשוף את הסטודנטים לתחום. מקצועות כמו חומרים והנדסה כימית הם מקצועות מפתח לתחום אגירת אנרגיה. מספר הסטודנטים הלומדים מקצועות אלה שמהווים עתודה גם לתחומים רבים אחרים הינו נמוך ביותר.

5 מסקנות ותובנות לגבי צורכי כוח אדם לתחום אגירת אנרגיה

שוק האנרגיה הסולארית הפך לאחת התעשיות בעלות הצמיחה המהירה ביותר בשנים האחרונות. הצמיחה של אנרגיה סולארית הינה אחת הטכנולוגיות המובילות כמענה לביקוש למערכת אחסון האנרגיה.

למדינת ישראל יתרונות רבים בתחום אגירת האנרגיה. המרכזיים שבהם הינם שמדינת ישראל היא מדינה מוצפת שמש וניתן לנצל אותה לטובת הפקת חשמל. ישראל רוויה בקרינה סולארית, ועלות הייצור מאנרגיה סולארית נמוכה בה מעלות הייצור הקונבנציונלית¹³⁰. יתרונותיה של ישראל כתובות Startup nation מאפשרים אקו-סיסטם של חדשנות פורצת דרך בתחום אגירת אנרגיה ליצירת סביבה הנקייה מזיהום ופליטה¹³¹. בישראל חברות ותיקות גדולות לצד חברות סטארט-אפ העוסקות בתחומי האנרגיות המתחדשות, קלינטק, אגירת אנרגיה והתייעלות אנרגטית. חברות סטארט אפ רבות עוסקות באנרגיה נקייה ואנרגיות מתחדשות, נושא המשתלב במהותו עם נושא אגירת אנרגיה. שני תחומים אלו פועלים יחדיו כדי ליצור תועלתיות בייצור וצריכת אנרגיה. החברות העוסקות באגירת אנרגיה וקלינטק, עוסקות בתחום באופן ישיר או כחלק מאפליקציה ספציפית שלהן. בנוסף, בישראל ישנה פעילות רבה של חברות הייטק וסטארט-אפים בתחומי פיתוח תוכנה, פיתוח בסיסי נתונים ו-big data, שגם הוא מהווה פוטנציאל להפניית יכולות אלה לפיתוח מערכות ניהול המשלבות מגוון מקורות כגון אגירה חכמה. ישנם בארץ מרכזי מחקר מתקדמים העוסקים בתחום האנרגיה בכלל ובאגירת אנרגיה בפרט, כפי שפורטו במסמך ולצד מרכזי המחקר, חוקרים באוניברסיטאות עוסקים ומפרסמים מחקרים בתחום.

במסגרת העבודה נערכו ראיונות עם מומחים בתחום¹³², מולאו שאלונים¹³³ ונסקרו מקורות מידע. רוב המומחים טוענים שאין כיום מענה לצורכי כוח האדם הנדרש בתחום. זה תחום חדש יחסית בעולם שכולל טכנולוגיות שונות שמרבית האוניברסיטאות והמכללות להנדסה עדיין לא כוללים בתוכנית הלימודים. לכל טכנולוגיה של אגירת אנרגיה דרושה הכשרה שונה: לאגירת אנרגיה חשמלית (BESS) דרושה הכשרה במערכות כוח תלת פאזיות במתח נמוך, בינוני וגבוה (שנאים, ממירים, הגנות, חישובי כבלים ורשת), מערכות זרם ישר במתחים עד VDC1500 (מצברים) ואלקטרו כימיה. בטכנולוגיות אגירה אחרות כגון תרמו-סולארי נדרשת הכשרה בהנדסת חומרים ותרמו דינמיקה. קיימות עוד טכנולוגיות רבות לאגירה שכל אחת דורשת את ההתמחות שלה: אנרגיה גרביטציונית – אנרגיה שאובה, אנרגיה קינטית (גלגלי תנופה), אנרגיית לחץ (אוויר דחוס).

<http://www.sviva.gov.il/subjectsenv/greenbuilding/producing-energy-in-buildings/documents/solar-energy-nir-130>
lotan.pdf

https://www.neaman.org.il/Files/6-446_20170424122145.014.pdf¹³¹

¹³² רשימת המראיינים:

פרופ' מ' מתיו סאס – ראש המעבדה לאנרגיה אלקטרוכימית ומים בטכניון

ד"ר נורית גל – סמנ"כלית חשמל ורגולציה, רשות החשמל

פרופ' דורון אורבך מהמחלקה לכימיה והמכון לננוטכנולוגיה זכה בפרס ראש הממשלה ע"ש סמסון לחדשנות בתחום תחליפי נפט לתחבורה.

פרופ' גרשון גרוסמן - עמית מחקר בכיר במוסד שמואל נאמן, ראש פרויקט פורום אנרגיה וחבר בפקולטה להנדסת מכונות בטכניון ברק עידן – ראש תחום טכנולוגיות בקבוצת אגירת אנרגיה אורמת וד"ר יוסי אליה, ראש תחום הנדסה

עידן ליבס ונעמה שפירא, מוסד שמואל נאמן

עופר גולדהירש, הרשות לחדשנות

¹³³ העונים על שאלוני המחקר: פרופ' דורון אורבך, עידן ברק, עידן ליבס וד"ר גיא אנקונינה.

כיווני חשיבה והמלצות מכל האמור לעיל:

- על מנת לענות על הצורך בהכשרה מעשית וחשיפה של סטודנטים וחוקרים צעירים לעסוק בתחום, יש צורך במעבדות בנושא לסטודנטים לתואר ראשון ושני.
- בתקופה זו מתפרסמים מכרזים רבים בארץ לתחנות "ירוקות" הכוללות אגירה (בעקבות הכרזת ממשלת ישראל על אנרגיה נקיה 30% עד 2022). קיימים יזמים אך חסר כ"א מקצועי לנושא האגירה. בנוסף, קיימת תחרות על כוח האדם בין חברות הפועלות להקמת פרויקטים בישראל אל מול חברות העוסקות בפרויקטים בינלאומיים. נדרשת היערכות למענה על צרכי כוח האדם בתחום. התאגדות מהנדסי החשמל ו חלק מהמוסדות האקדמיים להנדסה מנסים להיערך לכך. יש צורך לשלב בתוכנית הלימודים קורסים באנרגיה מתחדשת ובאגירת אנרגיה. המלצה לשנות את חוק החשמל שיחייב את המוסדות להשכלה גבוהה לבצע שינויים בתוכניות הלימוד ובהכשרות כך שיכללו גם תחומים חדשים בתחום כמו אגירת אנרגיה ושילובם ברשת החשמל.
- הגדלת מספר תוכניות הלימודים הייעודיות לתחום.
- מספר הסטודנטים הלומדים חומרים והנדסה כימית נמוך. יש צורך בהעלאת מספר הסטודנטים במקצועות אלה על מנת שהתחום יתפתח.
- קיים מחסור בהשקעות בתשתיות ומעבדות לצורך מחקר בתחום הזה.
- נדרש להקים מכון אנרגיה לאומי שימצה את יכולותיה הטובות של ישראל בנושא.

ערים חכמות



מרבית אוכלוסיית העולם כיום מתגוררת בערים. עד שנת 2030, צפויה האוכלוסייה בערי העולם לגדול מ-3.3 מיליארד לכ-5 מיליארד בני אדם. בישראל חיים כ-6 מיליון תושבים בישובים עירוניים.

בשל מגבלות המשאבים, תהיה בעתיד בעיה לספק לתושבים את כל השירותים. על מנת להמשיך לשרת ולשפר את רמת החיים של האוכלוסייה ההולכת וגדלה יש צורך בפיתוח ערים חכמות. עיר חכמה שואפת לניצול אופטימלי ובר-קיימא של כלל המשאבים, תוך שמירת איזון הולם בין עלויות חברתיות, סביבתיות וכלכליות. בעיר החכמה נעשה שימוש מרבי בטכנולוגיות מידע ותקשורת לשיפור התפקוד, הניהול והפיקוח על מגוון מערכות ושירותים בדגש על חיסכון באנרגיה, מים, קרקע ומשאבי טבע אחרים.

אין עדיין הגדרה בין-לאומית ברורה, אחידה ומחייבת ל"עיר חכמה". הקטגוריות המרכזיות להגדרת ערים חכמות הן: אנרגיה, איכות סביבה, מים ושפכים, תחבורה ותעבורה, מערכות מידע ותקשורת, איכות חיים, ממשל, כלכלה, משאבי אנוש, דיור ושימושי קרקע, ביטחון פנים, והיערכות לשעת חירום. יש כמובן לקחת בחשבון גם את מידת מוכנות של העיר במצב של קריסת המערכות העירוניות, בין אם הן נובעות ממצב ביטחוני או מאסונות טבע.

למונח 'עיר חכמה' יש טווח הגדרות רחב, אך עיקר התפישה מתמקד בשימוש במידע ותקשורת ככלי להשגת מטרות חברתיות וכלכליות בעיר. זו תפישת ניהול עיר ששואפת להשיג שימוש יעיל במשאבי העיר ושליטה ובקרה על הפעילויות בעיר לטובת רווחת התושבים, איכות החיים שלהם וביטחונם, לצורך הגדלת היעילות והאפקטיביות של פעילות גופי העירייה והרשויות הפועלות בעיר, הגברת השגשוג והצמיחה הכלכלית ואיכות סביבה וקיימות.

לעיר החכמה מטרות נוספות כמו חיסכון בהוצאות, ניצול משאבים מיטבי ואספקת שירותים טובים יותר לתושבים. על אף היתרונות הרבים שגלומים בעיר החכמה, קיימים אתגרים וסיכונים לפרטיות התושבים שמתגוררים בהן.

החזון של הערים החכמות הינו של ערים, שהדיגיטציה והטכנולוגיות החדשות בהן יוטמעו על מנת לייעל את תהליכי הניהול של העיר ומערכותיה, במטרה לשפר את איכות החיים של התושבים שחיים בה. ערים שבהן יותקנו מצלמות וחיישנים שונים ומגוונים- מפחי אשפה, חניות וכבישים ועד פארקים ציבוריים, שימוש במים ותאורת רחוב, שינטרו את ההרגלים והצרכים של התושבים למטרות שונות כגון: ביטחון, תחבורה, חיסכון באנרגיה ועוד. בנוסף, שירותים רבים יהפכו לאפליקציות שיאפשרו דיווח לעירייה, רישום לגנים ולבתי ספר ועוד.

מקובל למנות שלושה שלבים באבולוציה של ערים חכמות בעולם, שבעיקרם מתארים מעבר מהתרכזות בטכנולוגיה להתרכזות בתושבי הערים. הטכנולוגיה שבעבר נתפשה כלב העיסוק בעיר החכמה, נתפשת כיום כמאפשרת שיפור איכות החיים של התושבים:

עיר חכמה 1.0 (Technology Driven): ערים שמבקשות למקסם את השימוש בטכנולוגיה לטובת מינוף כלכלי והגברת יעילות ושליטה במתרחש בעיר. הובלת שינוי מסוג זה נעשתה לרוב על-ידי ספקיות ענק מעולם הטכנולוגיה והטלקום ולא הרשויות המוניציפליות.

עיר חכמה 2.0 (Technology Enabled City-Led): הובלת שינוי על-ידי הרשות המוניציפלית ויצירה של פתרונות טכנולוגיים בעיר חכמה כאמצעי לשיפור חיי התושבים.

עיר חכמה 3.0 (Citizen Co-Creation): שלב זה תופס תאוצה כיום כשערים חכמות מובילות בעולם כדוגמת וינה, ברצלונה, מדיין בקולומביה ועוד, מאמצות מודלים ליצירה משותפת עם תושביהן. מדובר ביוזמות של יצירת והטמעת פתרונות טכנולוגיים לטובת התושבים, שמתחילות מהתושבים ועולות למעלה, תוך מתן דגש לממד הקהילתי, לשוויון והכלה חברתית ולכלכלה מקומית¹³⁴.

בערים חכמות ניתן למצוא מאות מיזמים מסוגים שונים, באמצעים טכנולוגיים שונים ובנושאים שונים, החל מפרישת מצלמות וחיישנים בעיר למטרות ניטור שונות כמו תחבורה, ביטחון, חיסכון באנרגיה וקיימות, דרך אפליקציות ופלטפורמות שמטרתן לעודד תיירות או צמיחת תעסוקה מקומית ועד פלטפורמות שמטרתן לעודד שיתוף במידע עירוני, כלי רכב, ציוד וכדו'. במסגרת עבודה בנושא ערים חכמות שבוצעה ב-2018 על-ידי הרשות להגנת הפרטיות במשרד המשפטים, בוצע מיפוי של המיזמים והנושאים הרבים שבהם עוסקות ערים חכמות בעולם ובישראל שעל בסיסה הוגדרו שישה עולמות תוכן מובהקים שבהן מתמקדות ערים חכמות: חינוך,

¹³⁴ הרשות להגנת הפרטיות במשרד המשפטים. (2018). מדריך להגנת הפרטיות לעיר החכמה.

מחקרים הראו שהמחקר והפיתוח בהקשר של ערים חכמות התמקד עד כה בטכנולוגיה יותר מאשר בצרכי התושבים¹³⁵. תהליכי הדיגיטציה משפיעים על כל עיר בצורה שונה. השונות מושפעת מפרופיל התושבים, מצורכייהם ומאורח החיים בעיר. לכן ההטמעה של מיזמים דיגיטליים מחייבת היכרות של קובעי המדיניות ושל המתכננים עם מושגי יסוד בתחום הדיגיטלי, וכן הבנת ההזדמנויות כמו גם הסיכונים שכרוכים במהפכה הטכנולוגית¹³⁶.

הטכנולוגיות בעיר הדיגיטלית מבוססות על מערכות המזרימות מידע דרך רשת תקשורת ועל מערכות לקבלת החלטות הפועלות על פי מידע זה. טכנולוגיות עכשוויות בעיר כוללות מגוון רחב מאוד של מערכות, החל ביישומים לחיסכון במים, דרך מערכות לניהול מידע הנדסי ותכנוני וכלה ביישומים לתושבים בטלפון החכם.

בטבלה שלהלן, מוצגות קטגוריות של מערכות טכנולוגיות הנפוצות בערים כיום.

טבלה 6: שטחי יישום של טכנולוגיות דיגיטליות נפוצות בערים עכשוויות

תחום	יישומים טכנולוגיים	דוגמאות
תחבורה ותנועה	שיפור אמצעי תחבורה שונים והקטנת העלות שלהם	יישומים לארגון תחבורה ציבורית, לארגון הסעות בין תושבים (ride sharing) לניהול משאבים כגן חנייה וכבישים וכד'.
רחובות ובניינים חכמים	העשרה של הסביבה הפיזית בטכנולוגיה במטרה להפוך אותה ליעילה, לאפקטיבית ולזולה יותר.	ניהול תאורת רחוב. עמדות תצוגה בעיר, מערכות לניהול בנייני מגורים.
סביבה, מים ופסולת	ייעול הטיפול במשאבים בסיסיים בעיר כגון מים וטיפול בפסולת - הן בחיסכון בהקצאת המשאבים והן בזיהוי של זיהומים ושל מפגעים ובטיפול בהם.	השקיה דיגיטלית, חלוקת מים, זיהוי נזילות ממערכות להובלת מים, טיפול במי קולחים, זיהוי זיהומים במים ובאדמה, זיהוי כמות הפסולת בפחים, ניהול של מערך פינוי פסולת, בקרה על זיהומים תעשייתיים.
אנרגיה	ייעול של מערכות ייצור, הולכת אנרגיה והשימוש בה וניהולן של מערכות אלו	ניתוח ובקרה של רשתות חשמל, ייצור אנרגיית שמש ואחסונה, מערכות לניהול פאנלים סולריים במרקם העירוני, ניהול צריכת חשמל של צרכנים פרטיים ועסקיים.
טיפול במצבי חירום	שימוש בטכנולוגיה כדי לשפר ולהגיב טוב יותר למצבי חירום שונים.	מערכות לאיתור ולטיפול במצבי מצוקה, לניהול כוח אדם המגיב למצב ולזיהוי אוטומטי של רעידות אדמה, של שיטפונות ושל מצבי חירום נוספים.
אבטחה ומעקב	מעקב ואבטחה של אזורים רחבים.	פריסה של מצלמות מעקב וחיישנים שונים, ניתוח אוטומטי של וידאו.
ממשק עם תושבים בינם לבין עצמם	מערכות המאפשרות תקשורת ואינטראקציה בין הרשות לבין התושבים או בין התושבים לבין עצמם.	מערכות שונות כגון רשתות חברתיות עירוניות, שיתוף הציבור בתכנון עירני, מעקב אחר פעולות תושבים ברשתות החברתיות.

מקור: מחקר סיכונים לפרטיות בעיר החכמה 2018, הרשות להגנת הפרטיות, משרד המשפטים

המאפיין של החברות הפרטיות בתחום הטכנולוגי הוא הצורך והאינטרס להשתלב בזירה העירונית, שמתבטא בהפעלת לחצים על השלטון המקומי ליישום ולהטמעה של הטכנולוגיה שלהן. החיבור בין המגזר הפרטי לשלטון המקומי משפיע על תהליך העבודה ומעורר קונפליקטים וסוגיות מורכבות. אחד המאפיינים המרכזיים של התהליך, הוא פנייה ישירה של החברות הפרטיות לראשי רשויות במטרה לקדם את האינטרס העסקי שלהן. לרוב החברות כגופים מסחריים מעוניינות לקדם פרויקטים בעיר. המעורבות של חברות פרטיות בחזון היא מודל עבודה חדש עבור העיר, שעד היום הגדירה את החזון בעצמה באמצעות אנשי מקצוע שבחנו את האינטרס הציבורי, ולא באמצעות חברות פרטיות שיש להן אינטרס מסחרי.

¹³⁵ ובר, מ.א. (2018). ערים חכמות הופכות אשפה למשאב. הידען.

¹³⁶ חתוקה, ט., טוך, ע., בירנהק, מ., צור, ה. (2018). העיר בעידן הדיגיטלי: תכנון, טכנולוגיה, פרטיות ואי שיוויון. אוניברסיטת תל אביב

בכל הערים ניכר חוסר המוכנות לעידן הדיגיטלי. במקרים רבים היוזמות מגיעות מהחברות הפרטיות, והדמויות המובילות את סדר היום הם ראש העירייה, המנמ"ר (מנהל מערכות מידע ראשי) וראשי אגפים רלוונטיים. מעט רשויות הקימו צוות ייעודי לבחינה הוליסטית ורוחבית של המיזמים הדיגיטלים, הכולל אנשי מקצוע אשר עשויים להעריך את ההשפעה של המיזמים על העיר מפרספקטיבה כלכלית, תכנונית וחברתית. תהליכי דיגיטציה יוצרים הזדמנויות רבות ומגוונות, אולם רשויות רבות מתקשות לתעדף ביניהן. התעדוף של הפרויקטים הדיגיטליים מושפע משלושה ממדים עיקריים: הגדרת מטרות, תקציב וסיכון כלכלי-חברתי וקנה המידה של הפרויקט. ערים רבות מנסות פרויקטים בקנה מידה קטן, אך מתקשות ליישם אותם בקנה מידה עירוני.

מדינת ישראל קבעה יעד לפיו כל רשות מקומית בישראל תהיה חכמה ובעלת תשתיות לפלטפורמות דיגיטליות, בין אם היא עיר, מועצה מקומית או מועצה אזורית. טכנולוגיות רבות מתחילות להיות מיושמות בערים במדינת ישראל. בשנים האחרונות קיימים יותר ויותר מיזמים בתחום ערים חכמות שנכנסים לערים בישראל (תל אביב יפו, ירושלים, חיפה, רמת גן, ראשן לציון, כפר סבא, אשדוד, אילת ועוד). בהמשך למגמת צמיחה זו, החליטה הממשלה על קידום התפישה של עיר חכמה והטילה את הובלת התחום בהיבט הדיגיטלי על המשרד לשוויון חברתי וישראל דיגיטלית ועל משרד הפנים (החלטת ממשלה 2733 מה-11.6.2017). בהמשך, משרד הכלכלה, משרד הפנים והמשרד לשוויון חברתי, בשיתוף אוניברסיטת ת"א, קריית עתידים ומרכז פרס לשלום ולחדשנות, יצאו ב-2018 עם תוכנית לאומית חדשה לקידום טכנולוגיות בתחום ערים חכמות. 'CITYZOOM ערים חכמות בישראל'.

CITYZOOM קמה בהמשך לקהילות נוספות שקמו שהיוו סיפורי הצלחה כמו 'אקומושן' (תחבורה חכמה) וקהילת טכנולוגיות בנייה. ייחודה של התוכנית שלארשונה נעשה שילוב בין מגזרי (ממשלה, אקדמיה, חברות טכנולוגיה ומגזר שלישי) עם מדיניות ברורה שתביא ליצירת אקלים תוסס לערים חכמות בישראל. קהילה שתנגיש לרשויות בישראל ובעולם חברות סטארטאפ שיכולות לפתור בעיות במרחב העירוני. התוכנית יועדה לכלול:

- מיפוי צרכי רשויות מקומיות בארץ ובעולם, הקמת בסיס נתונים לשיתוף פעולה למציאת פתרונות יחד עם החברות הרב לאומיות היושבות בישראל.
- תוכנית עידוד רשויות מקומיות להחדרת סטארטאפים לעבודה השוטפת של העירייה, הכשרות מנהלים ברשויות וביצוע פיילוטם לבדיקת מוצרים חדשים.
- עידוד יזמים טכנולוגים להטמעת מוצרים ברשויות בישראל בטרם יציאתם לשוק העולמי, יצירת ערי ניסוי בדגש על פריפריה גיאוגרפית וחברתית.
- הקמת פורום אקדמי מחקרי בין אוניברסיטאי בהובלת המכון לחקר שלטון מקומי באוניברסיטת תל אביב שיעודד חוקרים לעסוק בפתרונות עירוניים. הפורום החל בשיתוף פעולה ייחודי עם אוניברסיטת סטנפורד.

במסגרת התוכנית יוקם מאגר מידע של בעיות וצרכים עירוניים אליו תוכל לפנות כל רשות מקומית ולחפש סטארטאפים טכנולוגיים. המאגר יתעדכן גם מערים מובילות בעולם (שיקגו, לונדון, ניו יורק וברצלונה) וגם ממחקרים אקדמיים מובילים. היוזמה תפעל להגדלת מספר החברות הישראליות בתחומים של מערכות ניהול עיר מבוססות ביג דאטה, הגנה על תשתיות עירוניות ממתקפות סייבר, תשתיות WIFI, מערכות ניטור לשעת חירום, תחבורה וחניה חכמה, שירותים לתושב, פתרונות לגיל השלישי ועד חקלאות מדייקת לשטחים ציבוריים. במטרה להגדיל את היצע החברות העוסקות בתחום ולספק מענה טכנולוגי וחדשני לאתגרי הרשויות המקומיות-בקשר עם התושב, בשירותים מקוונים, שיפור פני העיר, תחבורה וחניה, רווחה ועוד. המגזר היזמי אינו מכיר מספיק טוב את הרשויות המקומיות בישראל וקיים כאן פוטנציאל פיתוח כלכלי גם לחברות וליזמים וגם לרשויות המקומיות, יחד עם הזדמנות לצמצום פערים ואי שוויון.

תחום ערים חכמות בישראל עדיין לא מימש את הפוטנציאל הגלום בו, הסיבות נעוצות בעובדה כי הרשויות המקומיות בישראל מהוות שוק קטן מדי ליזמי טכנולוגיה, אך גם בשל ריבוי הרשויות המקומיות (255) והקושי ליישם מדיניות ארוכת טווח בנושאים מוניציפאליים הקשורים למשרדי ממשלה רבים. חוסר נגישות ועודף בירוקרטיה מביאים לכך שטכנולוגיות "בורחות" מישראל. שינוי תקנות הבנייה והשקעה ביעילות אנרגטית הם למשל שתי דרכי פעולה שראשי ערים רבים אמרו שביכולתם ליישם מהר יותר מהמשלולת הלאומיות.

אוניברסיטת ת"א חנכה את יוזמת ערים חכמות בשיתוף אוניברסיטת סטנפורד, ואת מכון שמלצר לתחבורה חכמה.

פורום ערים חכמות הוקם באוניברסיטת תל אביב במטרה לבחון את ההיבטים השונים, הטכנולוגיים והחברתיים, של ערים חכמות. הפורום מהווה מוקד של מחקר וחוקרים באוניברסיטה העוסקים בנושאים אלו

במגזר האזרחי, הפרטי והציבורי. הפורום הוא חלק מהפעילות בנושאי העיר שקיימת באוניברסיטת תל אביב: מרכז העיר—המרכז לחקר ערים ועירוניות, המכון לשלטון מקומי והמכון לתחבורה חכמה על שם שמלצר. הפורום מתכנס כשלוש עד ארבע פעמים בשנה, כאשר בכל פגישה הדיון מתמקד בהיבט מסוים של ערים חכמות ובסוף כל מפגש מפורסם נייר עמדה.

המיזם הלאומי 265 לפיתוח ושיתוף ידע לקידום דיגיטציה ברשויות המקומיות – המיזם מתבצע בשיתוף פעולה של משרד הפנים באמצעות מפעם עמק יזרעאל והמשרד לשוויון חברתי- מטה ישראל דיגיטלית. מטרת המיזם להרחיב ולהנגיש שירותים דיגיטליים לתושבי הרשויות המקומיות ולצמצם פערים בין הרשויות המקומיות באמצעות כלים דיגיטליים. המיזם עוסק בהקמת מערך תשתיתי, מקצועי ואובייקטיבי (ממלכתי, ללא כוונת רווח), המספק לרשויות המקומיות תשתית ידע, פלטפורמה להיוועצות ותמיכה בתהליך הטרנספורמציה הדיגיטלית, ומסייע להן בפיתוח וקידום השירות הדיגיטלי לתושב. הצירים המרכזיים של הפרויקט הם: מתווים מקצועיים, שיתוף בידע, מאגר פרויקטים ברשויות, מדריך לערים חכמות. העקרונות עליהם מתבסס הפרויקט הינם: דיאלוג ושיתוף מלא של הרשויות, שיתוף בידע וסיוע הדדי בין רשויות, מתן כלים אופרטיביים להובלת תהליכים לקידום הדיגיטציה ותהליכי הדרכה והטמעה ברשויות.

מדד הבינתחומי לערים חכמות ומקיימות בישראל

המרכז הבינתחומי הרצליה, בהובלת בית הספר לקיימות, פיתח כלי מדידה ישראלי ראשון לערים חכמות ומקיימות, אשר מאפשר להעריך את העשייה העירונית הישראלית בתחום ערים חכמות. מטרת המדד לאפשר לרשויות ולתושבים להעריך את מידת התקדמותן בהיבטים של חדשנות עירונית, קיימות, ממשל פתוח ושיתופי, חינוך ופיתוח כלכלי ועוד. המדד הוא מהבודדים בעולם שבוחן את השילוב של ניהול, אסטרטגיה וקיימות עירונית תוך בחינת התאמתן של ערים לעולם של חדשנות וטכנולוגיה והתייחסות ליעדי הפיתוח הגלובליים של האו"ם. עפ"י נתוני המדד: תל אביב נמצאת במקום הראשון במדד הבינתחומי לערים חכמות ומקיימות. מיד אחריה, אילת וירושלים, כשלשתיהן ציון זהה. אחריהן בערים המובילות הגיעו אשדוד, רעננה, נתניה ובאר שבע. המדד מציב בלב המושג "עיר חכמה" את פיתוח המדיניות ואת גיבוש התהליכים החכמים, ולא את עצם השימוש בטכנולוגיה. לפי תפישה זו, העיר נמדדת לפי האופן שבו היא עושה שימוש בטכנולוגיה, ובערכים שהיא מצליחה לממש בזכותה. הטכנולוגיה היא רק כלי. המדד אמור להיות כלי שיתפתח וישתפר עם הזמן במקביל לניסיון שייצבר בשטח. המדד הבינתחומי חותר ליצור איזון נכון בין טכנולוגיה וסביבה, בין תועלות כלכליות לערכים חברתיים וסביבתיים ובין מצב קיים השונה בין עיר לעיר, לבין הפוטנציאל של תהליכי חדשנות, אסטרטגיות דינאמיות וחכמות ושימוש נכון ומותאם בטכנולוגיות ומערכות מידע לשיפור איכות חיים, חוסן וקיימות עירונית. המדד מחייב את הרשות לבנות אסטרטגיה המבוססת על אתגרים הייחודיים לה ובוחן את המענה לאתגרים אלו באמצעות שילוב של חדשנות תהליכית, שותפות בין בעלי עניין ומערכות מידע וטכנולוגיה. זהו כלי עבודה שאמור לסייע לעיר להיות חכמה יותר ומקיימת יותר.

המדד בנוי כתהליך סדור, החל מאסטרטגיה (מה אנחנו רוצים לפתור ואיך), דרך ניהול (באיזה כלים נשתמש על מנת לספק מענה לאתגרים ואיך נוודא שזה קורה) וכלה בפעולות עצמן (בתחומי תשתיות, שרותים וקיימות מרחבית).

מרכיבי המדד: המדד מורכב מארבע חלקים, שעוקבים אחרי תהליכי החשיבה, התכנון והביצוע של פעולות ותהליכים עירוניים חכמים: אסטרטגיה עירונית לעיר חכמה ומקיימת, ניהול עירוני חכם ומבוסס מידע, בינוי, קיימות ותשתיות חכמות וחדשנות, חינוך וכלכלה מקומית.

נמצא כי תחומי הפעילות המובילים של העיריות בנושאי טכנולוגיות לעיר חכמה, הם בטחון אישי, תחבורה ואנרגיה.

המדד הדיגיטלי של הרשות המקומית – מדר"ם – המדר"ם הוא כלי המודד את רמת הבגרות הדיגיטלית של רשות מקומית. כלומר, את המוכנות הארגונית ואת רמת השימוש וההטמעה של טכנולוגיות דיגיטליות בתהליכים הארגוניים, הפנימיים והחיצוניים, של הרשות מול כל סוגי לקוחותיה: תושבים, בעלי עסקים, תיירים

ועוד. המדד מאפשר לכל רשות לבחון את מצבה העכשווי על פני ציר מדידה אחיד, יחסית לעצמה וכן יחסית לרשויות מקומיות אחרות - וכן להכיר ולהבין את השלבים הנדרשים ממנה להתקדמות דיגיטלית¹³⁷. המדד כלל קבוצה של ערים, הפעילות בתחום "ערים חכמות", אשר העמידו עצמן למדידה, על מנת לקבל הערכה ומשוב.

צוותי בלומברג i-teams - צוות חדשנות עירונית ירושלים שנוסד וממומן על ידי קרן בלומברג משמש כצוות ייעוץ-מחקר עבור ראש העיר ופועל לפתרון סוגיות עירוניות מורכבות בתחומים שנבחרו: נוער בסיכון, עידוד הזדמנויות עסקיות, מרחב ציבורי יצירתי, חינוך ובניית קהילות פעילות. לצוות מעמד היברידי פנימי-חיצוני אשר עוזר לו להתגבר על חסמים ביורוקרטיים ולגשר בין אגפים וארגונים לטובת הכלל. עבודת הצוות מבוססת על מחקר ונתונים, בניית תהליכים קצרים בעלי השפעה מרבית וחדשנות בתוך הקיים. הצוות עובד לשינוי הדרך שבה נבנים תהליכי חשיבה ותכנון חדשניים בעבודה השוטפת של העירייה בכל הרמות. הרשת הבינלאומית של צוותי החדשנות של בלומברג, המונה 25 צוותים ברחבי העולם, מאפשרת ללמוד מהצלחות וכישלונות בערים אחרות ולהתוודע לנעשה בצוותים אחרים בעולם. פורסם שעיריית באר שבע קיבלה מימון בסך 500,000 דולר לכל שנה במשך שנתיים, על מנת לגייס צוותי חדשנות שיעבדו בשיתוף עם אגפי ויחידות העירייה.

2 הכשרת כוח אדם לעבודה בתחום ערים חכמות

תוכנית "מאיצים דיגיטליים בשלטון המקומי" - התוכנית נועדה לקידום הדיגיטציה ברשויות המקומיות בישראל, ומתקיימת בשיתוף פעולה בין מטה ישראל דיגיטלית במשרד לשוויון חברתי ומשרד הפנים באמצעות מפעם עמק יזרעאל. מטרת התוכנית הינה הכשרה של מובילי שינוי המקדמים חדשנות דיגיטלית ברשויות המקומיות, משפרים תהליכי עבודה ושירותים באמצעות טכנולוגיה, ומהווים חלק מקהילה היוצרת את תהליך הטרנספורמציה הדיגיטלית בישראל. קול קורא לרשויות המקומיות¹³⁸. תנאי סף להשתתפות בהכשרה הינו הגשת מועמדות קבוצתית בלבד (צוות המונה שני נציגים או שלושה מאותה רשות) מקרב עובדי השלטון המקומי. על הרשות להקים ועדת היגוי לליווי ופיתוח התחום הדיגיטלי לאחר קבלת המועמדים לתוכנית.

באוניברסיטת תל אביב - קורס ערים חכמות - הקורס ניתן במסגרת פעילות המרכז לחקר העיר והעירוניות באוניברסיטת תל אביב, "מרכז העיר". הקורס ניתן לראשונה ב-1918 ויערך שוב בקיץ 2019 ומיועד לסטודנטים מחו"ל, אך פתוח גם לסטודנטים מאוניברסיטת תל אביב¹³⁹.

באוניברסיטת בר אילן - הקורס פתוח לסטודנטים לתואר ראשון החל משנה ב' ולסטודנטים לתארים מתקדמים בבית הספר למנהל עסקים. מטרת הקורס היא להקנות לסטודנטים ידע, הכרות וכלים לבחינה של מורכבויות ואתגרי העיר במאה ה-21 בעולם המפותח והמתפתח כאחד, וזאת תוך בחינה ביקורתית של המרכיבים, הכלים והמאפיינים של ערים חכמות, ותוך התנסות מבוקרת של איתור לוקאלי של אתגרים, בעיות והצעות למענה בהתאם לסוגי ומאפייני עיור מגוונים. הקורס נערך במתכונת של סדנה, הכוללת הרצאות נושאיות, דיון ביקורתי והצגת מקרי מבחן. כמו כן קיים קורס המשך שבמרכזו אפיון ופיתוח מתקדמים של מיזמים בערים והישובים במרחב.

3 פרסומים בתחום ערים חכמות

¹³⁷ <https://www.265.org.il/database/%d7%94%d7%9e%d7%93%d7%93-%d7%94%d7%93%d7%99%d7%92%d7%99%d7%98%d7%9c%d7%99-%d7%a9%d7%9c-%d7%94%d7%a8%d7%a9%d7%95%d7%aa-%d7%94%d7%9e%d7%a7%d7%95%d7%9e%d7%99-%d7%9e%d7%93%d7%a8%d7%9d/>
¹³⁸ <https://www.meitzimdigitalim.com/kolkore>
¹³⁹ https://urban.tau.ac.il/sites/urban.tau.ac.il/files/TAU-SmartCities-SummerCourse-2019-Description_0.pdf

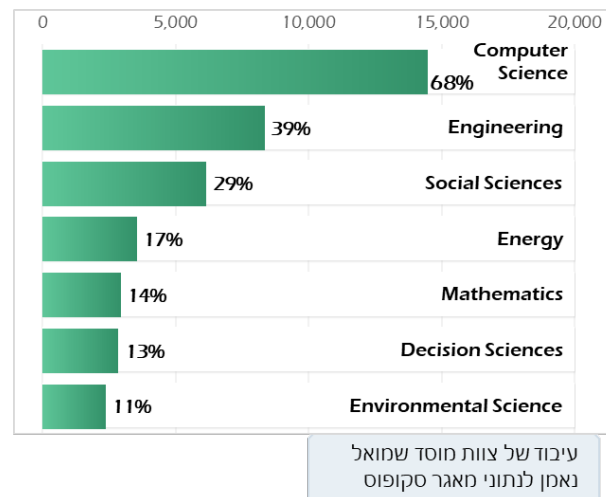
ניתן לראות את ההתפתחות בתחום ערים חכמות באמצעות הגידול במספר הפרסומים בנושא. הגרף הבא מציג את השינוי במספר הפרסומים בעולם בנושא Smart City במהלך השנים 2000-2019. במהלך חמש השנים האחרונות (2015-2019) מספר הפרסומים בעולם בתחום זה, עלה כמעט פי 5. מספר הפרסומים בישראל בתחום זה נמוך יחסית ועומד על ממוצע של כ-0.4% מפרסומי העולם במהלך העשור החולף.

איור 49: השינוי במספר הפרסומים בעולם בנושא Smart City במהלך השנים 2000-2019



הגרף הבא מציג את תחומי המחקר* המובילים בעולם במספר הפרסומים בנושא Smart City במהלך השנים 2015-2019. האחוזים מציינים את שיעור הפרסומים בתחום מכלל פרסומי העולם בנושא Smart City בתקופה שנבדקה. קטגוריית מדעי המחשב מובילה את הדירוג עם 68% מהפרסומים, אחריה – קטגוריית הנדסה עם 39% מהפרסומים. חלק ניכר מהחוקרים בתחום פועל במסגרת מחלקות של Information Engineering בפקולטות למדעי המחשב, הנדסה, תעשייה וניהול, הנדסה אזרחית ועוד. כ-29% מהפרסומים קשורים לקטגוריית מדעי החברה.

איור 50: תחומי המחקר 140 המובילים בעולם במספר הפרסומים בנושא Smart City במהלך השנים 2015-2019

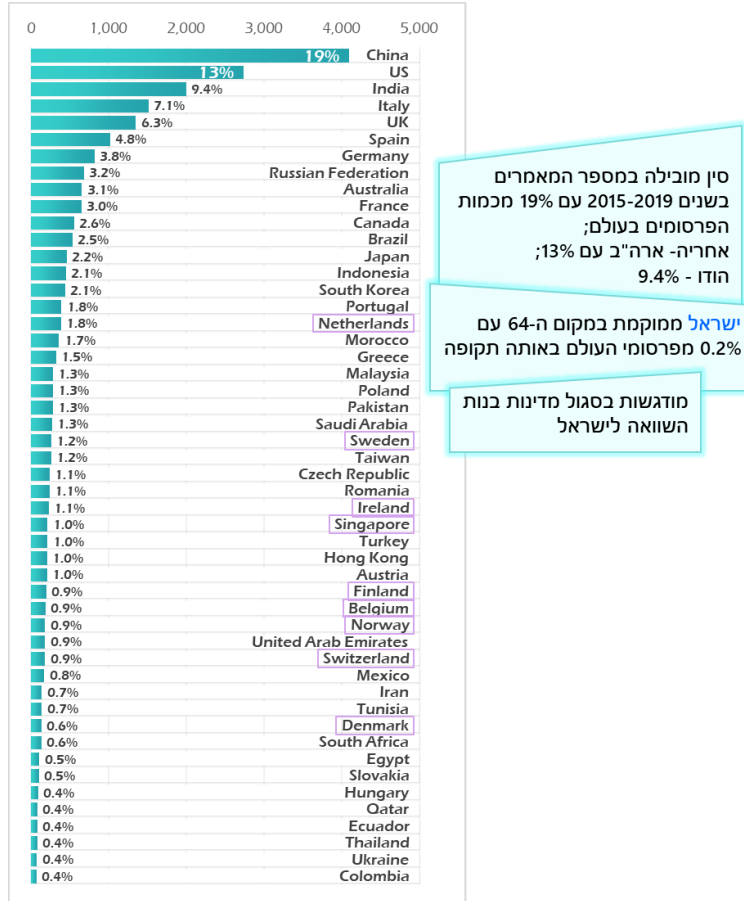


הגרף הבא מציג את 50 המדינות המובילות במספר הפרסומים בנושא Smart City במהלך השנים 2015-2019. האחוזים מציינים את שיעור הפרסומים של כל מדינה מכלל הפרסומים בעולם בנושא זה בתקופה שנבדקה¹⁴¹. ניתן לראות שסין מובילה את הדירוג עם 19% מפרסומי העולם בתחום. ארה"ב במקום השני עם 13%, הודו – 9.4%, איטליה- 7.1%. הדירוג של ישראל בתחום נמוך יחסית והיא איננה מדורגת בין 50 המדינות המובילות במספר הפרסומים בתחום. מספר המאמרים של ישראל מהווה כ-0.2% מפרסומי העולם בתחום זה בתקופה שנבדקה.

¹⁴⁰ במאגר Scopus תחומי המחקר נקבעים עפ"י הנושא של כתב-העת בו פורסם המאמר. מאמרים שמתפרסמים בכתב-עת שסווגו למספר תחומים - נספרים עבור כל אחד מהתחומים, ולכן סכום האחוזים גדול מ-100%
¹⁴¹ פרסומים שנכתבו בשיתוף פעולה של חוקרים ממספר מדינות נספרים עבור כל אחת מהמדינות ולכן סכום האחוזים גדול מ-100%

בגרף מודגשות בסגול מדינות בנות השוואה לישראל מבחינת גודל האוכלוסייה¹⁴². ניתן לראות שהולנד, שוודיה, אירלנד וסינגפור מדורגות בין 30 המדינות המובילות במספר הפרסומים בתחום Smart cities.

איור 51: המדינות המובילות 141 במספר הפרסומים המדעיים בנושא Smart City במהלך השנים 2015-2019



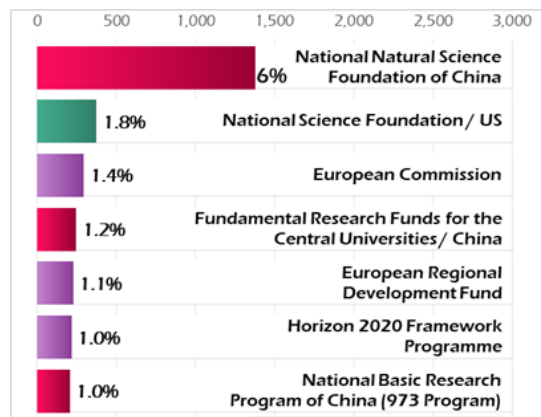
סין מובילה במספר המאמרים בשנים 2015-2019 עם 19% מכמות הפרסומים בעולם; אחריה- ארה"ב עם 13%; הודו - 9.4%

ישראל מחוקמת במקום ה-64 עם 0.2% מפרסומי העולם באותה תקופה

מודגשות בסגול מדינות בנות השוואה לישראל

עיבוד של צוות מוסד שמואל נאמן לנתוני מאגר סקופוס

איור 52: גופי המימון העיקריים שהופיעו ברשימות הספונסרים של הפרסומים המדעיים 143 בנושא ערים חכמות 2015-2019



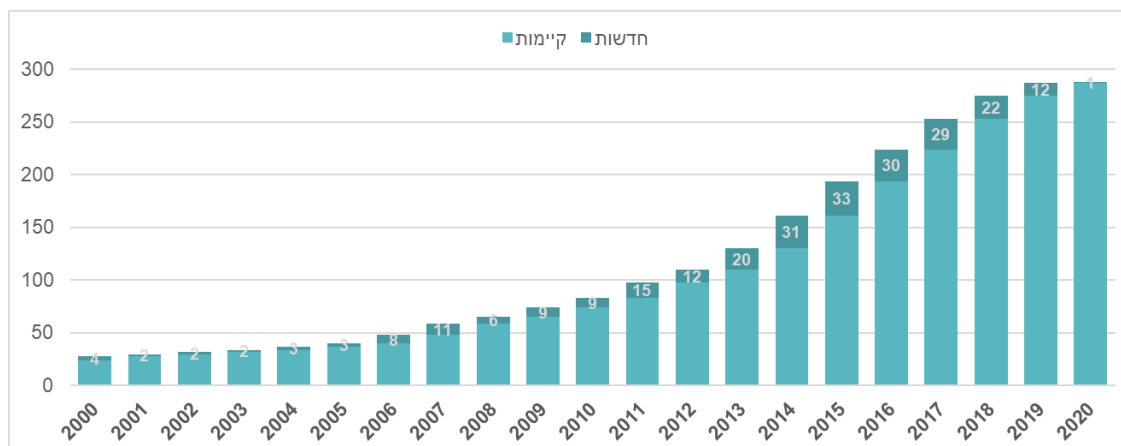
עיבוד של צוות מוסד שמואל נאמן לנתוני מאגר סקופוס

¹⁴² לרשימת המדינות בנות-השוואה נבחרו מדינות שדומות לישראל מבחינת גודל האוכלוסייה ומספר הפרסומים
¹⁴³ התפלגות לפי מספר פרסומים לא בהכרח משקפת את התפלגות ההשקעות

4 מיפוי חברות בתחום ערים חכמות בישראל

נכון לחודש ספטמבר 2020, היו בישראל 288 חברות שתויגו במאגר ה- Startup Nation Central Finder¹⁴⁴ תחת תגית Smart cities. ניתן לראות שהחל מ-2007 החל גידול במספר החברות החדשות המוקמות בתחום מידי שנה ומספר זה נמצא במגמת עלייה.

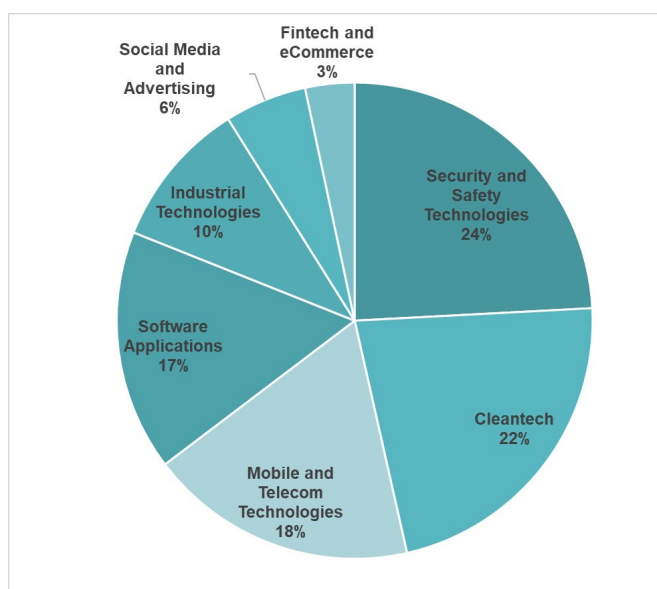
איור 53: חברות בתחום ערים חכמות בישראל בשנים 2000-2020



עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

השיעור הגדול ביותר של החברות שעוסקות בנושא ערים חכמות בישראל, עוסקות ב- Security and Safety technologies -23% וב-Cleantech -21%. 18% ב-Mobile and Telecom Technologies ו-16% ביישומי תוכנה.

איור 54: חברות בתחום ערים חכמות לפי סקטור



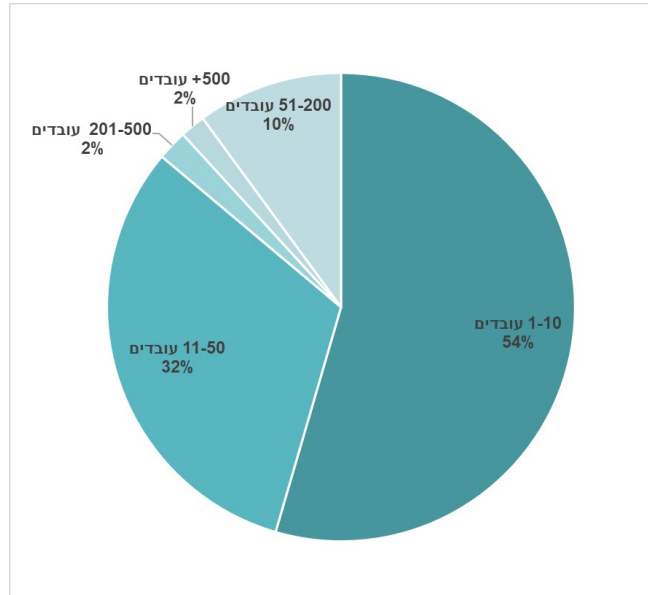
מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

הסקטור others כולל את הסקטורים הבאים: Agro and Food ,Consumer Electronics ,Enterprise Solutions ,Technologies ,Digital Health and Medical Technologies ,Education and Knowledge Technologies ,Technologies

¹⁴⁴ קישור לאתר: <https://finder.startupnationcentral.org>

רוב החברות 86%, הן חברות קטנות שיש בהן עד 50 עובדים (ברוב החברות (54%) עובדים עד עשרה עובדים). 10% מהחברות בינוניות ומונות בין 51 ל-200 עובדים ורק 4% הן חברות גדולות המעסיקות למעלה מ-200 עובדים. נתונים אלה מחזקים את העובדה כי זהו תחום מתפתח ורוב החברות הן בתחילת הדרך כפי שניתן לראות גם בגרף

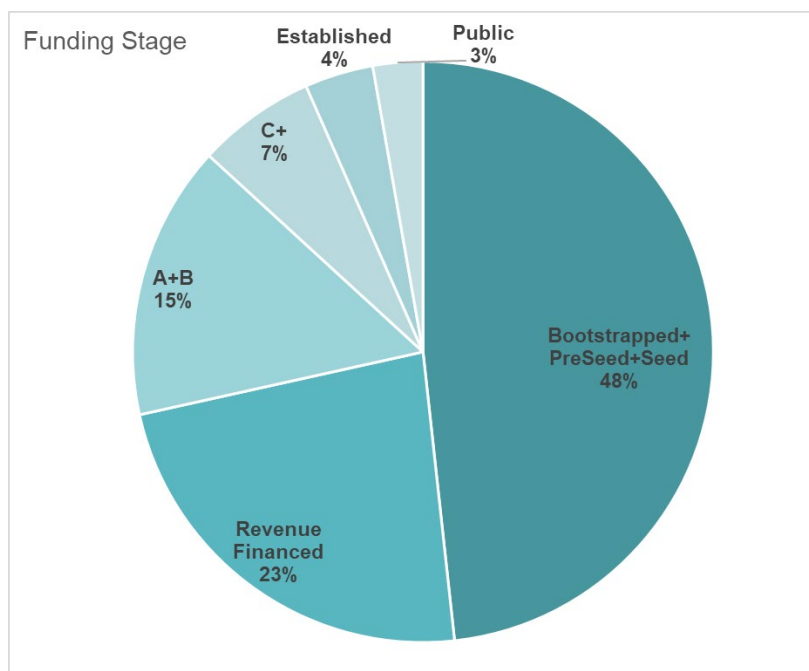
איור 55: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה



מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

מטבע הדברים חלק גדול מהחברות נמצא בשלבים התחלתיים. האיור הבא מציג את התפלגות החברות לפי Funding Stage. מבחינת שלב המימון: 48% מהחברות בתחום נמצאות בשלבים ההתחלתיים של Seed, Pre-Seed, Bootstrapped ו-Seed. 22% נמצאים בסבבי גיוס שונים B+A (15%) ו-C (7%). 23% נמצאים בשלב Revenue Financed – דבר שיכול להצביע גם על קיומן של חברות בוגרות יותר.

איור 56: התפלגות חברות לפי Funding Stage (2018)



עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

5 מסקנות ותובנות לגבי צרכי כוח אדם לתחום ערים חכמות

החזון של הערים החכמות הינו ערים, שהדיגיטציה והטכנולוגיות החדשות בהן יוטמעו על מנת לייעל את תהליכי הניהול של העיר ומערכותיה, במטרה לשפר את איכות החיים של התושבים שחיים בהן. ישנם יתרונות רבים מבחינת התועלת הלאומית בקידום ערים חכמות: יצירת תחרותיות, קידום המגזר העסקי, שיפור רמת החיים, שמירה על איכות הסביבה, ניצול נכון של משאבים וכדומה. קיימות דוגמאות לערים חכמות בעולם, וניתן ללמוד רבות מניסיוןן ומהישגיהן. בישראל קיימים תנאים ייחודיים, הכוללים: אוכלוסייה משכילה, שימוש נרחב במערכות מידע וערים שאינן גדולות מאוד. עם זאת, בישראל ישנם גם אתגרים לא פשוטים, כגון מחסור חמור בקרקע, מצב ביטחוני בעייתי וריכוזיות יתר.

להלן התובנות העיקריות שעלו מהעבודה שכללה ראיונות¹⁴⁵, שאלונים¹⁴⁶ וסקירת מקורות מידע לגבי כוח אדם נדרש לקידום והתפתחות תחום הערים החכמות בישראל:

- החשיבה האסטרטגית העירונית לעיר חכמה בערים רבות לוקה בחסר ואין מספיק כוח אדם בעל הכישורים המתאימים בתכנון אסטרטגי העירוני השותפים לתהליכי קבלת החלטות.
- עיריות מעוניינות לקחת חלק ולהיחשב לערים חכמות, אך חסרה להן ההבנה איזה שינויים ומהלכים עליהן לעשות על מנת להתמודד עם אתגרי המאה ה-21 שהם בעיקר: אי ודאות ניהולית, משבר תשתיות, משבר דיור וכו'. יש לשנות את התפיסה שמגדירה עיר חכמה כעיר בעלת טכנולוגיה מתקדמת לתפיסה שעיר חכמה זו תפיסה אסטרטגית וניהולית אחרת המבוססת על טכנולוגיות חדשות.
- הגופים שעוסקים כיום ביישום ערים חכמות הן חברות שעוסקות בפיתוח מערכות טכנולוגיות. ככאלה יש להן אינטרס עסקי להטמיע את הטכנולוגיה שלהם בערים ולא חשיבה על הצרכים והאמצעים הכלכליים של העיר.
- הטמעת מערכות טכנולוגיות יוצרת דרישה למשאבים וכוח אדם. לדוגמה, בעיריות שהתקינו מצלמות בעיר או אפליקציה לדיווח תקלות יש צורך בכ"א שיסתכל במצלמות, יקבל את הדיווחים ויגיב בהתאם. כיום, כמעט ולא קיימת הגדרת תפקיד או חשיבה לטיפול ומענה במידע המתקבל ונצבר.
- הטמעת הטכנולוגיות השונות יצרה מאגרי מידע רגישים הכוללים מידע על התושבים והעיר ולכן לעיריות יש צורך בתפקיד שלא קיים כיום של קצין אבטחת מידע. יש מעט עיריות שקבעו מדיניות אבטחת מידע ובפועל יש הרבה אתגרים ובעיות בתחום זה.
- על מנת שיעיר תוכל להיות עיר חכמה היא צריכה מנמ"ר (מנהל מערכות מידע) ואיש חדשנות שבודק לאן העיר רוצה להתפתח, לאן העולם הולך ולקבוע מדיניות.
- יש צורך לייצר צוותי חדשנות ברשויות המקומיות, שינהלו את תהליכי החדשנות בכל עירייה. יש כיום הכשרה של קרן בלומברג, שמכשירה צוותי חדשנות ייעודיים שפועלים בכפוף לראש העיר. תפקיד הצוות לטפל באתגרים עירוניים, בד"כ רב מחלקתיים ולייצר להם תהליכי עבודה ופתרונות. כיום יש צוותים כאלה בת"א, ירושלים ובאר שבע. הבעיה היא דווקא ברשויות קטנות שבהן יש אתגרים גדולים אך משאבים מצומצמים. יש צורך בצוות כזה בכל רשות, גם אם הוא מורכב מאדם אחד שמנהל את החדשנות העירונית וידע לחשוב לא רק על הרובד הטכנולוגי אלא גם על הרובד העירוני.
- הטמעת הטכנולוגיות השונות יצרה מאגרי מידע גדולים Big data, הכוללים נתונים שונים ומגוונים. חסר החיבור/הממשק בין הטכנולוגיה והמידע שהוא מייצר לבין האפשרויות וצרכי היישום. נתונים של תחום אחד

¹⁴⁵ במסגרת העבודה נערכו שלושה ראיונות בכל אחד מהמגזרים:

1. אקדמיה – פרופ' פנינה פלאוט - פקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים בטכניון, ועמיתת מחקר בכירה במרכז לחקר העיר והאזור בפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים בטכניון.

2. ממשלה – עוז שנהב - מנהל מחלקת חדשנות ופיתוח מדיניות ברשות להגנת הפרטיות במשרד המשפטים.

3. עסקי – אדריכל רפי רייש - (מומחה לערים חכמות). ניהל את הפרויקט דניאל רענני, בוגר בית הספר לקיימות בבינתחומי ובעל חברה לייעוץ בתחום ערים חכמות.

¹⁴⁶ ענו על השאלונים: עוז שנהב- מנהל מחלקת חדשנות ופיתוח מדיניות ברשות להגנת הפרטיות במשרד המשפטים.

פרופ' פנינה פלאוט ורפי רייש- מנכ"ל Suits.

יכולים לשמש לתחום אחר או לקבלת החלטות. הטיפול בנתונים הוא תחום שאינו מוסדר כלל. המדינה מטפלת בנושא בהיבט המשפטי אבל יש צורך לטפל בזה גם בהיבט הציבורי.

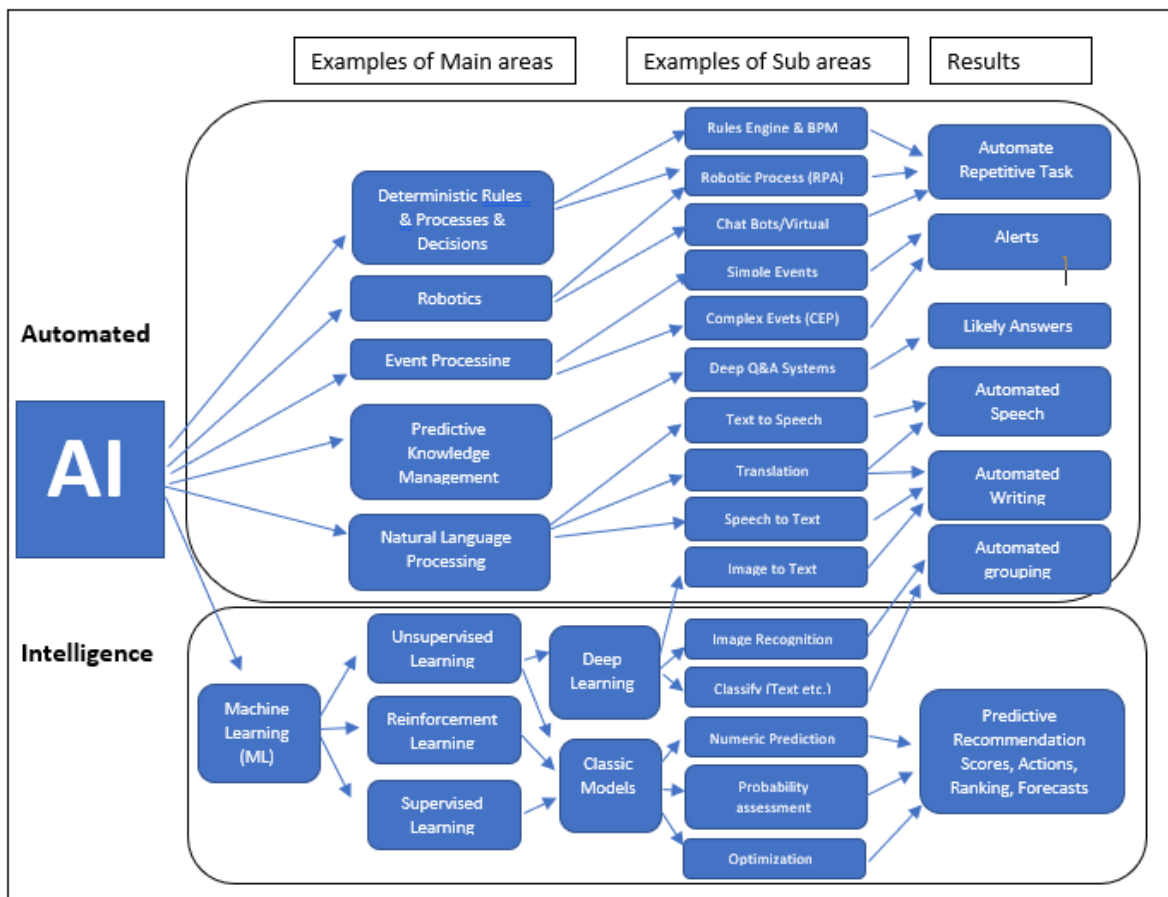
- ארבע המוסדות בישראל שמלמדים את תחום הערים החכמות הם: אוניברסיטת בר אילן, המרכז הבינתחומי בהרצליה, הטכניון ואוניברסיטת ת"א. קיימת כיום בארץ בעיקר הכשרה למסלולים דיגיטליים של הנושא, אבל יש צורך גם בהכשרה נוספת שפורטה במסמך, היות שהכשרה במסלול דיגיטלי בלבד ומתמקדת בטכנולוגיה. ההכשרה יכולה להתקיים בפקולטות: תכנון ערים, תעשייה וניהול או מנהל עסקים והיא צריכה לכלול: קיימות ותכנון, מדיניות ציבורית וייזמות וחדשנות. יש צורך בפתיחת תוכניות מולטי-דיסציפלינריות בנושא ערים חכמות.

פרק זה לקוח מתוך עבודה שנעשתה במוסד נאמן בנושא בינה מלאכותית, מדעי הנתונים ורובוטיקה חכמה: גץ דפנה, כץ-שחם אושרת, קליין רינת, צזנה רועי, רוזנברג שלמה, שהם אבידע, ברזני אלה, לק ערן, ציפרפל סימה. בינה מלאכותית, מדעי הנתונים ורובוטיקה חכמה- דו"ח ראשון חיפה, ישראל, מוסד שמואל נאמן, 2018. דו"ח זה עוסק בשלושה תחומי מחקר נרחבים הקשורים זה לזה: בינה מלאכותית (Artificial Intelligence), מדעי הנתונים (Data Science) ורובוטיקה חכמה (Smart Robotics).

בינה מלאכותית מוגדרת בצורה רחבה כ: "כל שיטה לתכנות מחשבים המאפשרת להם להוציא לפועל מטלות או דרכי התנהגות שהיו מחייבות אינטליגנציה אילו היו מבוצעות על-ידי בני-אדם" (National Academy of Sciences, 2018).

האיור הבא מדגים חלק מהתחומים העיקריים בבינה מלאכותית:

איור 57: דוגמאות לתחומי ותת תחומי הבינה המלאכותית



מקור: (vincejeffs.com, 2017)

הטכנולוגיות הרלוונטיות לתחום מדעי הנתונים הן:

- » **טכנולוגיות לאיסוף מידע:** טכנולוגיות האוספות מידע לשימושים שונים, כגון האינטרנט של הדברים.
 - » **טכנולוגיות לעיבוד וניתוח מידע:** טכנולוגיות לכריית מידע (data mining), ויזואליזציה של המידע, חיזוי אנליטי (predictive analytics) ופענוח משמעויות.
 - » **טכנולוגיות מבוססות-בלוקצ'יין:** טכנולוגיות בלוקצ'יין ליצירת אלגוריתמים אוטונומיים וחוזים חכמים.
- המונח 'רובוטיקה חכמה' מצביע על קשר בין רובוטים או מפעילים (אקטואטורים) בעולם הפיזי לבין בינה מלאכותית. האיחוד האירופי מייחס את התכונות הבאות ל'רובוט אוטונומי חכם

(Nevejans, 2017) Autonomous Smart Robot:

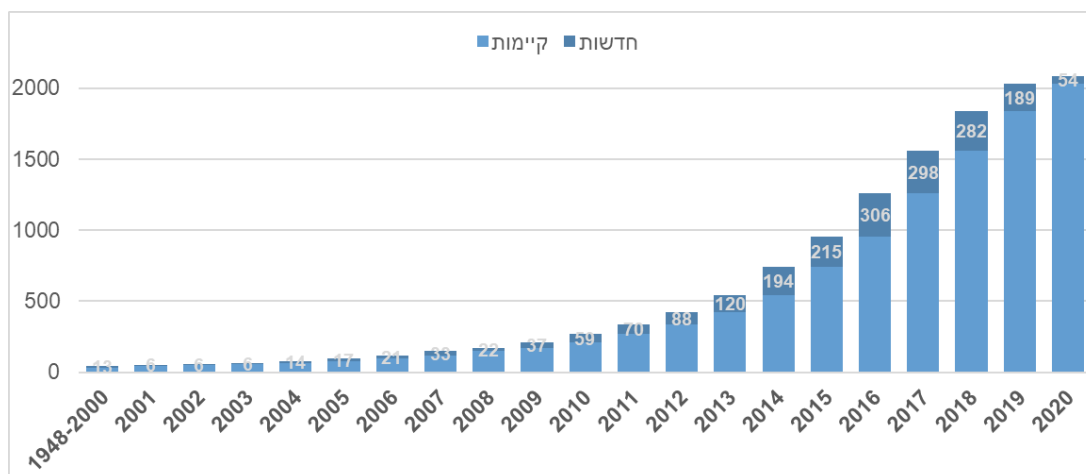
- הוכש אוטונומיה באמצעות חיישנים ו / או על ידי חילופי נתונים עם הסביבה שלו וסחר וניתוח נתונים.
- בעל למידה עצמית (קריטריון אופציונלי).
- בעל תמיכה פיזית.
- מתאים את התנהגותו ופעולותיו לסביבתו.

2 תעשיית הבינה המלאכותית בישראל

2.1 חברות בתחום הבינה המלאכותית בישראל

נכון ל-10/2020 היו בישראל 2048 חברות טכנולוגיה שתויגו במאגר ה-Startup Nation Central Finder. מעל בלפחות אחת מהתגיות הבאות: Artificial-intelligence, machine-learning, big-data-analytics. מעל 65% מחברות אלו הוקמו ב-6 השנים האחרונות (1344 חברות). בשנת שיא – 2016, הוקמו 306 חברות. עשר חברות הוקמו בשנות התשעים, חברות שהן וותיקות בתחום ומעסיקות ברובן מעל 200 עובדים – NICE, RADCOM, Essence, G-STAT, Mobileye ועוד. האיור הבא מתאר את מספר החברות שהוקמו בשנים 2000-2020 ואת מספר החברות החדשות מדי שנה.

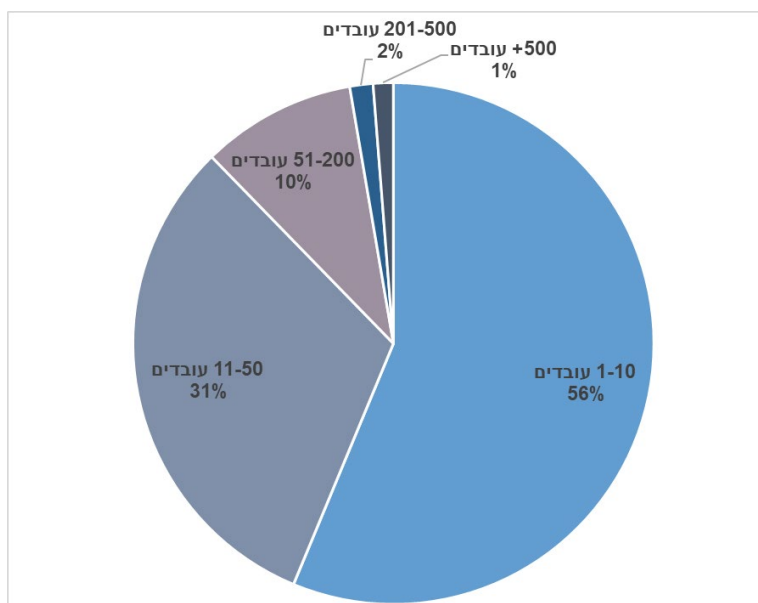
איור 58: חברות בתחום הבינה המלאכותית לפי שנת הקמה



עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

כיותר ממחצית מהחברות הן חברות קטנות שיש בהן עד 10 עובדים. 31% מהחברות מונות בין 11 ל-50 עובדים, 10% הן חברות גדולות המעסיקות 50 עד 200 עובדים. אחוז החברות המעסיקות מעל 200 עובדים נמוך מאוד ועומד על כ-3%.

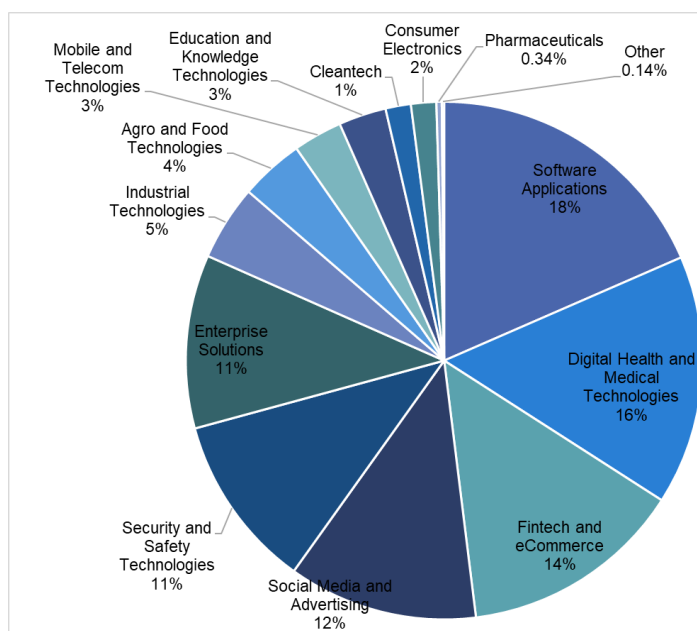
איור 59: חברות בתחום הבינה המלאכותית לפי מספר עובדים:



עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

חברות אלו פועלות בסקטורים מגוונים. ארבעת הסקטורים המובילים שביחד מהווים יותר מ-60% ממספר החברות הם: Fintech and eCommerce, Digital Health and Medical Technologies, Software Application, Social Media and Advertising. האיור הבא מציג את התפלגות החברות לפי סקטורים:

איור 60: חברות בתחום הבינה המלאכותית לפי סקטורים

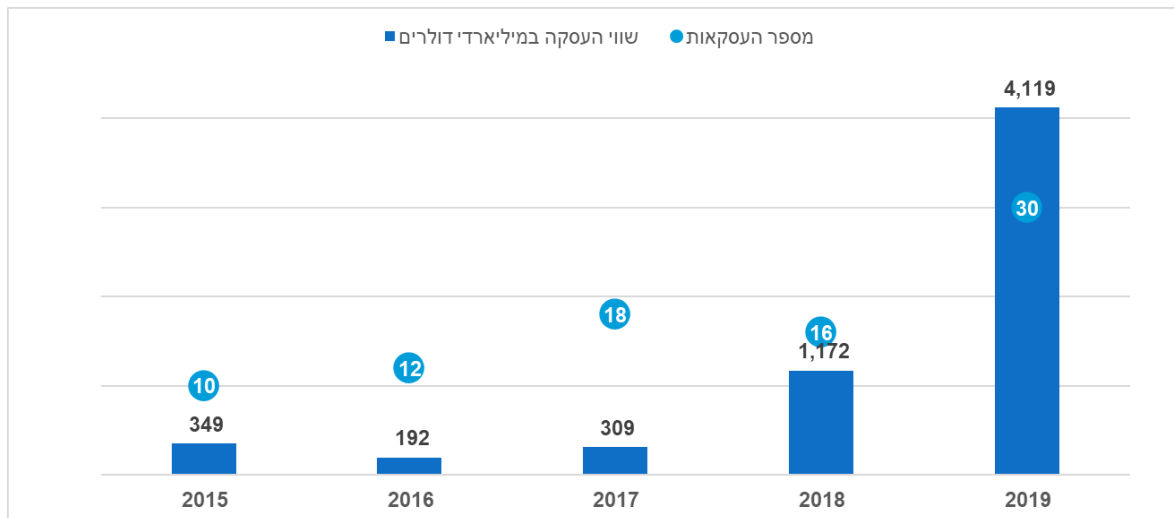


עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

2.2 גיוסי הון

צמיחתן של טכנולוגיות הבינה המלאכותית ניכרת בהשקעות בתחום. על פי נתוני IVC בשנים 2015-2019 ההשקעות בתחום הבינה המלאכותית בהיי-טק הישראלי צמחו מכ-349 מיליון דולר ל-4,119 מיליון דולר – עליה של 1000% בסך ההשקעות בתחום. יש לציין שעיקר השינוי התבצע בשנתיים האחרונות – מאחרונה-מ-309 מיליון דולר בשנת 2017 ל-1,172 מיליון דולר בשנת 2018 (שינוי של 280%) ול-4,119 מיליון דולר בשנת 2019.

איור 61: השקעות בתחום הבינה המלאכותית, מספר העסקאות ושוויין, 2015-2019



3 תפוקות מחקר

3.1 מדדים ביבליומטריים¹⁴⁷

בשל הרכב המקורות ומגוון המתודולוגיות המשמשות להגדרת הפרסומים המדעיים בתחום הבינה המלאכותית, לא קיימת דרך לקביעת כלל הפרסומים בתחום; הנתונים המתוארים בפרק זה מהווים מדגם שאמור לשקף את המיקום היחסי של מדינת ישראל בזירת המחקר הבינלאומית של בינה מלאכותית. סין וארה"ב אחראיות למעל 36% מכלל הפרסומים המדעיים בשנים 2013-2017 בקטגוריות שהוגדרו כרלוונטיות לתחום המחקר. ישראל ממוקמת במקום ה-34 בסך הפרסומים בשנים אלו בקטגוריות אלו ובמקום ה-18 בפרסומים לנפש (המובילות בפרסומים לנפש הן סינגפור, פינלנד, שוויץ ואוסטרליה). למרות הגידול בסך הפרסומים של ישראל בין השנים 2000-2017 (עלייה של 229%) שיעור הגידול במדינות כמו סינגפור, הולנד ושוויץ היה גבוה יותר (630%, 279% ו-351% בהתאמה). גם שיעור הגידול בפרסומי מדינות ה-OECD היה גדול משל ישראל בתקופה הנדונה, ועמד על 409%. שיעור הצמיחה הגבוה בשיתוף הפעולה הבינלאומי בין חוקרים תורם לשיתוף הידע ולקידום המדע. מספר הפרסומים המשותפים של ישראל עלה ב-63% בשנים 2008-2017, אך שיעור העלייה נמוך יחסית למדינות ברות ההשוואה כגון סינגפור, עם עלייה של 224% בפרסומים משותפים. מספר הציטוטים של מאמר משמש כמדד עיקרי באקדמיה להערכת ההשפעה המדעית של המחקר. במספר הפרסומים שנכללים בקבוצה של 10% המאמרים המצוטטים ביותר בקטגוריית בינה מלאכותית, סינגפור מובילה בשיעור הצמיחה עם 252% בתקופה שנבדקה, כאשר ישראל

¹⁴⁷ במחקר זה נעשה שימוש במאגר סקופוס. במאגר הקטגוריה של Computer Science כוללת מאמרים שפורסמו בכתבי-עת המסווגים לתחום מדעי המחשב. קטגוריה זו כוללת 3 תתי-קטגוריות שזיהינו כרלוונטיות לתחום המחקר הנוכחי: Artificial - AI; Intelligence - HC; Human-Computer Interaction - HC; Computer Vision and Pattern Recognition - CV. ישנם כתבי-עת שמסווגים ליותר מתת-קטגוריה אחת¹⁴⁷, אך כל מאמר נספר פעם אחת בלבד.

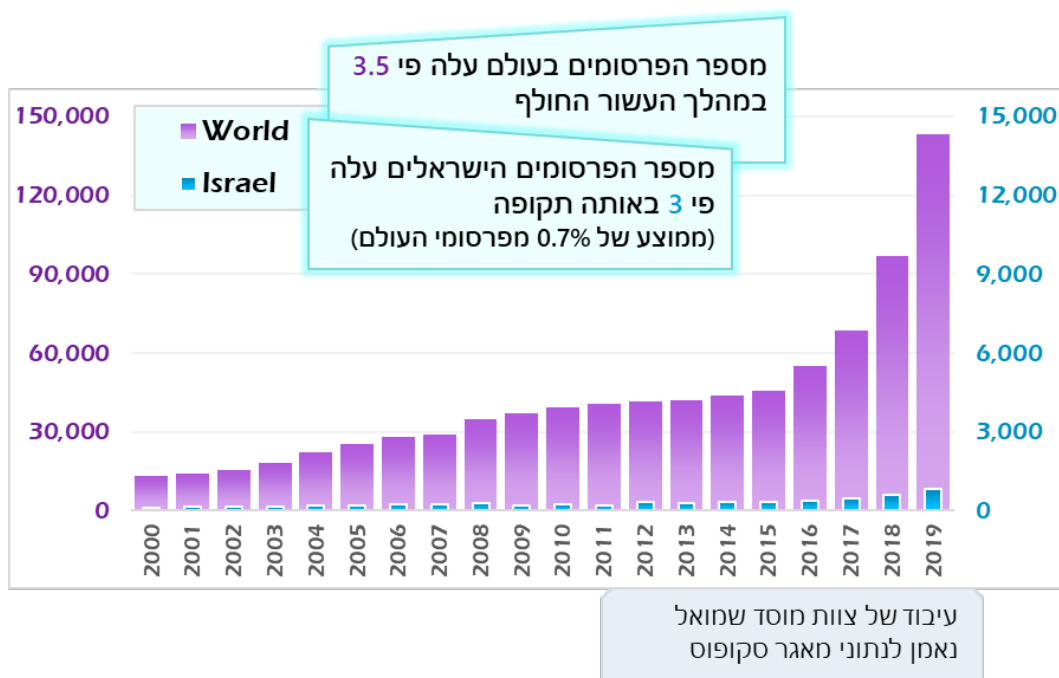
מציגה עלייה מתונה בלבד במדד זה. בדירוג לפי מספר הפטנטים שמצטטים מאמרים בקטגוריית הבינה המלאכותית - ישראל ממוקמת במקום השני אחרי שווייץ (בדירוג של ישראל ביחס למדינות ברות-השוואה).

יש לציין, כי מספר החוקרים הבולטים, שפרסמו מעל לחמישה מאמרים בחמש השנים האחרונות בתחום הבינה המלאכותית במדינות כגון סינגפור, הולנד ובלגיה גבוה במידה ניכרת ממספר החוקרים הבולטים בתחום בישראל. עם זאת, החוקרים הישראלים אינם נופלים מחוקרים במדינות ברות השוואה מבחינת הפריון, ואף עולים עליהם בחלק מהמקרים.

חוקרים ישראלים זכו בסך של 483 מענקי ERC, כאשר רק חמש מדינות מתוך המדינות החברות באיחוד האירופי ומדינה אחת מתוך המדינות הנלוות מקדימות אותה במספר המענקים. יותר מ- 5% (לפחות 26 מענקים) ממענקי ERC שקיבלו חוקרים מאוניברסיטאות בישראל היו בתחומים הנושקים לבינה המלאכותית, מדעי הנתונים ורובוטיקה חכמה.

איור 62 מתאר את השינוי במספר הפרסומים הישראלים בתחום הבינה המלאכותית בהשוואה למספר הפרסומים בעולם. מספר הפרסומים בעולם בנושאי ה-AI עלה פי 3.5 במהלך העשור החולף, עם זינוק של קרוב ל-50% בין השנים 2018/2019. מספר הפרסומים הישראלים עלה פי 3 באותה התקופה, ועומד על ממוצע של 0.7% מפרסומי העולם במהלך העשור.

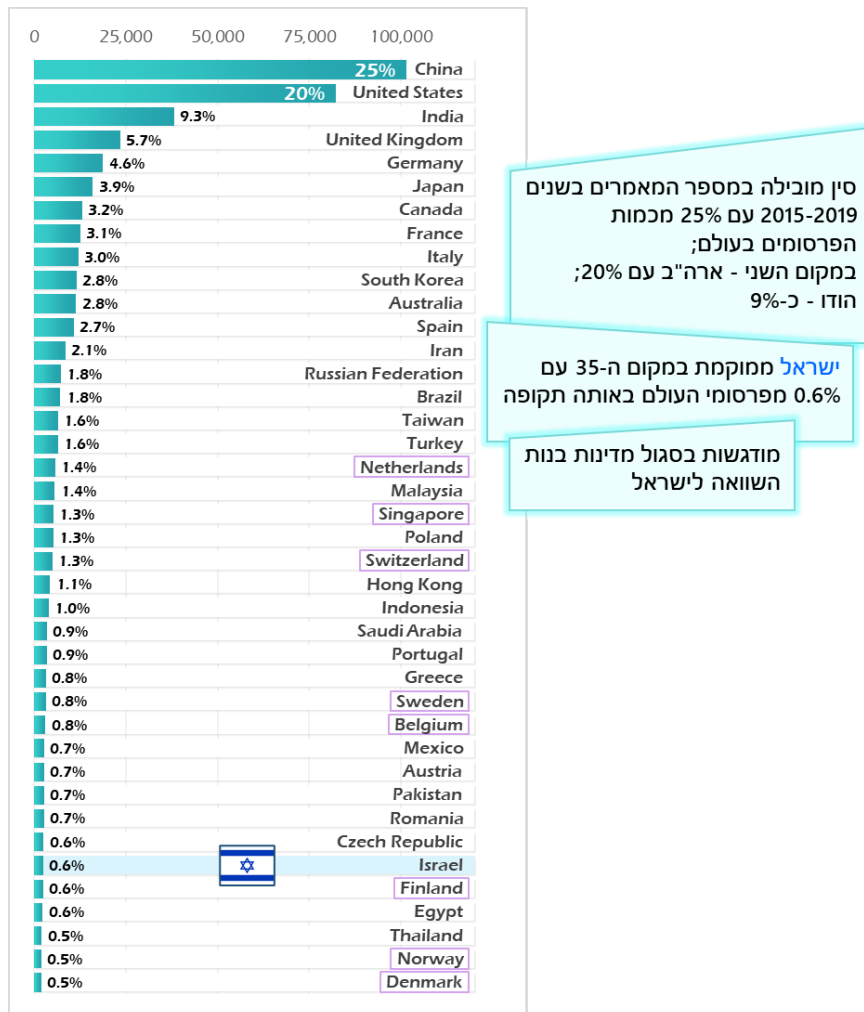
איור 62: השינוי במספר הפרסומים הישראלים בנושאי הבינה המלאכותית¹⁴⁸ ושיעורם מפרסומי העולם, 2000-2019



איור 63 מציג את 40 המדינות המובילות במספר הפרסומים המדעיים בנושאי AI במהלך השנים 2015-2019. האחוזים מציינים את שיעור הפרסומים של כל מדינה מכלל הפרסומים בעולם בתחום. סין מובילה את הדירוג עם 25% מפרסומי העולם בתחום; ארה"ב במקום השני עם 20%; הודו – כ-9%. באיור מודגשות בסגול מדינות ברות השוואה לישראל (מבחינת גודל האוכלוסייה ומספר הפרסומים המדעיים). ישראל ממוקמת במקום ה-35 עם 0.6% מפרסומי העולם בתחום.

¹⁴⁸ השאילתה נוסחה על בסיס מילות המפתח המופיעות בדוח של Elsevier: de Kleijn, M., Siebert, M., & Huggett, S. (2017). Artificial Intelligence: how knowledge is created, transferred and used.

איור 63: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בנושאי AI בשנים 2015-2019



סין מובילה במספר המאמרים בשנים 2015-2019 עם 25% מכמות הפרסומים בעולם; במקום השני - ארה"ב עם 20%; הודו - כ-9%

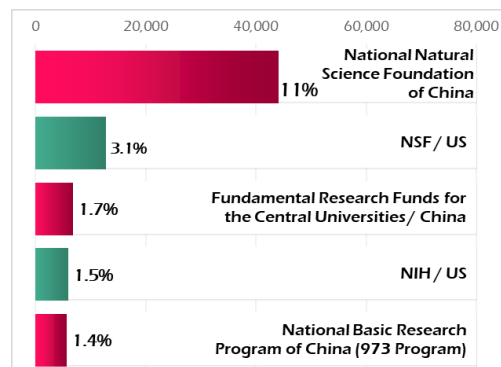
ישראל חמוקמת במקום ה-35 עם 0.6% מפרסומי העולם באותה תקופה

מודגשות בסגול מדינות בנות השוואה לישראל

עיבוד של צוות מוסד שמואל נאמן לנתוני מאגר סקופוס

איור 64 מציג את דירוג גופי המימון העיקריים שמופיעים ברשימות הספונסרים של הפרסומים בנושאי AI¹⁴⁸ בשנים 2015-2019. הקרן הלאומית הסינית למחקר בסיסי מובילה את הרשימה עם 11% מהמאמרים בתחום; אחריה ה-NIH האמריקאי עם 3.1%.

איור 64: גופי המימון העיקריים שמופיעים ברשימות הספונסרים¹⁴⁹ של פרסומים בנושאי AI בשנים 2015-2019



עיבוד של צוות מוסד שמואל נאמן לנתוני מאגר סקופוס

¹⁴⁹ התפלגות גופי המימון על בסיס מספר הפרסומים לא בהכרח משקפת את התפלגות ההשקעות הכספיות

3.2 בקשות לפטנטים

באיור 65 ניתן לראות שלפי נתוני PatBase, מספר משפחות הפטנטים בנושאי AI¹⁴⁸ עלה פי 13 במהלך העשור החולף, עם זינוק של 80% בין השנים 2018/2019.

איור 65: השינוי במספר משפחות הפטנטים ב-PatBase בנושאי AI



4 תשתיות בתחום הבינה המלאכותית

תשתיות דאטה

הדאטה עומד בבסיס הבינה המלאכותית ומדעי הנתונים. מחסור בדאטה מהווה את אחד החסמים המשמעותיים ביותר לפיתוח התחום.

ישנם שני מקורות בולטים לדאטה: התעשייה (גופים כמו גוגל, פייסבוק, אמאזון ואחרים) וגופי הממשל. ישנה הסכמה גורפת בקרב המרוויינים שהזכירו את נושא הדאטה לכך שנדרשת התערבות ממשלתית בכל הנוגע להעמדת נתונים ממשלתיים לרשות ציבור החוקרים באקדמיה וחברות ההזנק.

המלצות:

1: נדרש להסדיר פתיחת מאגרי מידע ממשלתיים וציבוריים תוך בניית תשתית טכנולוגית מתאימה, קביעת מודלים לשימוש במאגרי המידע והתייחסות לסוגיות של פרטיות המידע ושקיפותו.

2: עידוד שת"פ אקדמיה-תעשייה שחלק ממנו הוא נושא העברת דאטה מהתעשייה לאקדמיה ו/או לחברות הזנק. בין הנושאים אותם נדרש לבדוק: פישוט סוגיות קניין רוחני, תעדוף בקשות לתמיכה שבהן שהדאטה מהווה מרכיב משמעותי ועוד.

תשתיות מחשוב

קיימים שני מודלים עיקריים של חומרה: שימוש לוקלי במחשבים עם Graphic Processing unit (GPU), ושימוש מבוזר בשרתים של חברות המציעות שירותי ענן כמו אמאזון.

חלק מהמרוויינים מהאקדמיה סבור שלא קיימת בעיה משמעותית של מחסור בכוח מחשוב בכל הנוגע למחקר באוניברסיטאות. אחרים חושבים שניהול מרוכז של משאבי ענן יכולה לייעל את השימוש, בעיקר בגלל המודל של תשלום קבוע (חודשי) מול שימוש משתנה בפועל (תשלום פר שעת שימוש).

קיים מחסור גובר בכוח מחשוב עבור הכשרות באוניברסיטאות.

עלויות כוח המחשוב עלולות להוות חסם לחברות הזנק וגם לאנשים שמעוניינים להיכנס לתחום באופן עצמאי.

המלצות:

1: נדרשת בדיקה מעמיקה של צרכי כוח המחשוב באוניברסיטאות בפקולטות בהן מתבצעים מחקר והכשרה בנושא בינה מלאכותית, מדעי הנתונים ורובוטיקה חכמה במטרה לוודא שצרכי המחשוב עומדים בסטנדרט הנדרש עבור מחקר והכשרה בתחומי החזק של ישראל.

2: נדרשת בדיקה של צרכי כוח המחשוב בתעשייה הישראלית בדגש על חברות קטנות ובינוניות, במטרה לבדוק האם כוח המחשוב מהווה חסם שיש להנמיכו תשתיות בתחום הרובוטיקה החכמה

תשתיות רובוטיקה

יש בישראל כוח אדם איכותי בתחום הרובוטיקה, ומספר חברות מצליחות בנישות מסוימות. אבל ההשקעה הגדולה הנדרשת לצורך יצירת תשתית לשימוש האקדמי והתעשייה בתחום הרובוטיקה מהווה מכשול להתפתחות המחקר והתעשייה.

חסרה תשתית אנושית וטכנולוגית מכנית הנדסית, והשילוב ביניהם תוכנה ליישומים רובוטיים.

המלצה: נדרשת החלטה ממשלתית במידה ומדינת ישראל רואה בנושא של רובוטיקה חכמה תחום של עדיפות לאומית. יש לקחת בחשבון משמעותה של החלטה כזו היא השקעה כספית משמעותית בתשתיות מחקר ופיתוח.

5 חוקרים והכשרה באקדמיה

5.1 חוקרים באקדמיה

מיפוי החוקרים בוצע על ידי חיפוש ביטויי מפתח רלוונטיים לתחום בתוך תחומי העניין של כל החוקרים בפקולטות הרלוונטיות בכל האוניברסיטאות והמכללות בישראל^{150, 151}.

נמצאו 271 חוקרים, מהם 233 באוניברסיטאות ו-38 במכללות. כמחצית מהחוקרים באוניברסיטאות הם מהטכניון או מאוניברסיטת בן גוריון. כמחצית מהחוקרים במכללות הם מהמרכז הבין תחומי בהרצליה, המכון טכנולוגי חולון והמכללה האקדמית על שם סמי שמעון.

מרבית החוקרים באוניברסיטאות המובילות במספר החוקרים הם מהפקולטות/מחלקות למדעי המחשב/הנדסת תוכנה, הנדסת חשמל והנדסת תעשייה וניהול/מערכות מידע. ישנם חוקרים בתחומים הרלוונטיים גם בפקולטות/מחלקות להנדסת אווירונאוטיקה וחלל, הנדסת מכונות, הנדסה אזרחית וניהול. בפקולטות אחרות כמו ביולוגיה או מדעי החברה והרוח ישנם חוקרים בודדים.

נמצא כי תחומי העניין המובילים אצל החוקרים במיפוי הם: Artificial Intelligence ;Machine Learning ;Autonomous Systems & Smart Robotics

תחומי עניין נוספים הם Computer- ,Natural Language processing ,Human-Computer Interaction ,Neural ,Multi-Agent Systems ,Big Data ,Distributed Systems/Computing ,Data Mining ,Vision ,Reinforcement Learning- i Networks.

¹⁵⁰ **המוסדות שנסקרו:** אוניברסיטת אריאל, אוניברסיטת בן גוריון, אוניברסיטת חיפה, אוניברסיטת תל אביב, אוניברסיטת בר אילן, אוניברסיטה העברית, הטכניון, מכון ויצמן למדע, האוניברסיטה הפתוחה, בית הספר הגבוה לטכנולוגיה, מכון לב, האקדמית עמק יזרעאל, המכון הוולקני, המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון, המכללה האקדמית תל אביב-יפו, המרכז האקדמי רופין, המרכז הבינתחומי הרצליה, המכון הטכנולוגי חולון, מכללת אורט בראודה, מכללת אפקה, מכללת תל חי.

¹⁵¹ **פקולטות, יחידות ותחומים שנסקרו:** ביולוגיה (כולל גנטיקה, ביולוגיה מולקולרית, ביוטכנולוגיה ונירוביולוגיה), הוראת מדעים, הנדסה אזרחית וסביבתית, הנדסה ביו רפואית, הנדסה חקלאית, הנדסת אווירונאוטיקה וחלל, הנדסת חשמל (ומחשבים), הנדסת ידע ורובוטיקה, הנדסת מכונות, הנדסת תוכנה, הנדסת תעשייה וניהול, חקר המח, מדעי המחשב, מדעי הקוגניציה והמוח, מנהל עסקים, מערכות מידע, משפטים, מתמטיקה, ניהול טכנולוגיה, סטטיסטיקה, פיזיקה, פילוסופיה, רפואה ותקשורת.

5.2 מסלולי הכשרה באקדמיה

המסלולים האקדמיים סווגו לפי שבע קטגוריות עיקריות:

1. מערכות מידע/מדעי הנתונים
2. בינה מלאכותית/ למידת מכונה/מע' נבונות/ מע' מבוזרות
3. ביו-אינפורמטיקה / קוגניציה / פסיכולוגיה בדגש לימודי מידע
4. מסלול משולב מע' נבונות/לומדות ומדעי המידע
5. רובוטיקה/מע' אוטונומיות
6. מסלולים כלליים ללא התמחות - מגוון קורסים
7. מסלולים כלליים - קורסים בודדים

1. מערכות מידע / מדעי הנתונים

הסיווג ניתן במידה והמסלול הוגדר כתואר בהנדסת נתונים ומידע, תואר במערכות מידע או כמגמה / התמחות / מקבץ / הקבץ / אשכול / מסלול בתחום לימודי המידע.

בין הקורסים הנפוצים בסיווג זה: מבוא להנדסת נתונים ומידע, ניהול מידע מבוזר, אחזור מידע, כריית מידע, ביג דאטה, מדעי הנתונים ובינה עסקית, בסיסי נתונים, מבוא למדעי המידע, ניהול מערכות מידע ועוד.

יש לציין, כי בסיווג זה, בנוסף על קורסים הקשורים ללימודי המידע, ניתנים גם מגוון קורסים בבינה מלאכותית, למידת מכונה, אלגוריתמים מבוזרים ועוד, גם אם ברמת המבוא. כמו כן, ניתן דגש על לימודי סטטיסטיקה, מתמטיקה ותכנות.

עיקר המסלולים ניתנים בפקולטות להנדסת תעשייה וניהול/ מערכות מידע, ניהול ומדעי המחשב.

2. בינה מלאכותית / למידת מכונה / מע' נבונות / מע' מבוזרות

הסיווג ניתן במידה והמסלול הוגדר כמגמה/ התמחות/ מקבץ/ הקבץ/ אשכול/ מסלול בלמידה ובינה מלאכותית/ מערכות מבוזרות/ ראייה ממוחשבת/ למידה ממוחשבת וכל התמחות אחרת הנושקת לתחום בינה מלאכותית. בין הקורסים הנפוצים בסיווג זה: מבוא לבינה מלאכותית, מבוא למערכות לומדות, למידה חישובית, עיבוד שפות טבעיות, ראייה ממוחשבת, מבוא לרשתות עצביות, למידה ממוכנת, למידה עמוקה, מערכות נבונות ועוד.

יש לציין כי בסיווג זה, בנוסף לקורסים הקשורים ללימוד מכונה, בינה מלאכותי וראייה ממוחשבת, ניתנים מגוון קורסים בלימודי מידע, ממשק אדם-מכונה, רובוטיקה וכן ניתן דגש על קורסי מתמטיקה ותכנות ברמה גבוהה.

עיקר המסלולים ניתנים בפקולטות למדעי המחשב, הנדסת חשמל וניהול.

3. ביו-אינפורמטיקה / קוגניציה / פסיכולוגיה בדגש לימודי מידע

הסיווג ניתן למסלולים, המוגדרים כתואר בביו-אינפורמטיקה/ ביולוגיה חישובית או שילוב של ביולוגיה/ מדעי המוח/ פסיכולוגיה עם מדעי המחשב.

בין הקורסים הנפוצים בסיווג זה: מבוא לביו-אינפורמטיקה, חישוביות וקוגניציה, אלגוריתמים בביולוגיה חישובית, מבוא לממשק אדם מחשב, בסיסי נתונים בביו-אינפורמטיקה, רשתות עצביות ועוד.

חלק גדול מהמסלולים הנם מסלולים משותפים לשתי פקולטות – פקולטה מדעית ומדעי המחשב.

4. מסלול משולב מע' נבונות / לומדות ומדעי המידע

סיווג זה משלב את ההתמחות הן בבינה מלאכותית/למידת מכונה והן את לימודי המידע. מסלולים כגון: "אשכול מערכות נבונות ומדע המידע", "תואר שני עם התמחות בבינה מלאכותית (כולל אחזור מידע ורובוטיקה)", "חטיבת לימודים בעיבוד אותות ולמידה חישובית" ועוד, משולבים בתוך הסיווג מכיוון שהתפלגות הקורסים בשני הנושאים היא כמעט שווה.

מסלולים כאלה קיימים במספר פקולטות למדעי המחשב בתואר ראשון ונפוצים יותר בתארים מתקדמים, שם הם קיימים בפקולטות להנדסת תעשייה וניהול, פקולטות להנדסה ומדעי המחשב.

5. רובטיקה / מע' אוטונומיות

סיווג זה משלב קבוצות התמחות ברובטיקה/ מערכות אוטונומיות ונפוץ בעיקר בפקולטות להנדסת מכונות, הנדסת אווירונאוטיקה וחלל, הנדסת חשמל והנדסה אזרחית וסביבתית.

בין הקורסים הקשורים ל"רובטיקה חכמה" ניתן למצוא: למידה ותכנון במערכות דינמיות, מבוא לרובטיקה, בקרה אוטומטית של כלי טיס, מערכות חלל מבוזרות, קינמטיקה, דינמיקה ובקרה של רובוטים, ממשק אדם-מחשב ועוד.

יש לציין, כי נוסף על הקורסים בתחום רובטיקה ומערכות אוטונומיות, במסלולים הללו נלמדים קורסים הקשורים לבינה מלאכותית, למידת מכונה וראייה ממוחשבת.

6. מסלולים כלליים ללא התמחות - מגוון קורסים

בסיווג זה נכללים מסלולים כלליים, בדרך כלל בפקולטות למדעי המחשב או בפקולטות להנדסה, כאשר לא קיים מסלול התמחות מוגדר, אך מוצע מגוון גדול של קורסים בנושא בינה מלאכותית, למידת מכונה, ראייה ממוחשבת, מדעי הנתונים, ממשק אדם-מכונה ועוד. בנוסף לקורסים, מוצעים מגוון סמינרים ופרויקטים בתחומי הלימוד הללו.

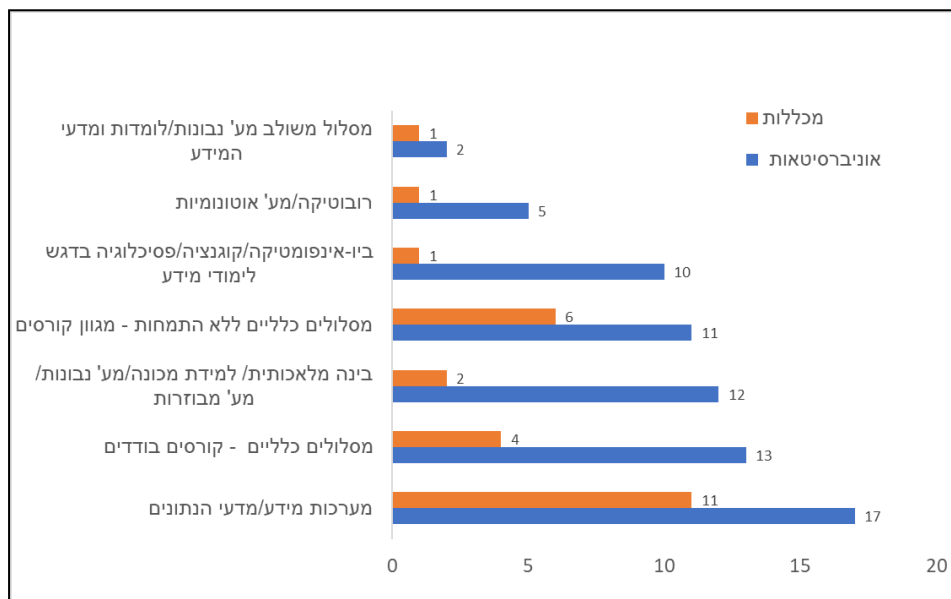
7. מסלולים כלליים - קורסים בודדים

בסיווג זה נכללות פקולטות, המציעות קורס אחד או שניים בנושא הנושק לבינה מלאכותית ומדעי הנתונים. בין השאר מדובר בפקולטות למדעי חברה והרוח, מדעים, מתמטיקה, אך גם בפקולטות להנדסה.

בין הקורסים המוצעים, ניתן לכלול את נושאים מתקדמים בניתוח נתונים ברפואה ובריאות הציבור, מבוא לביג דאטה (Big Data) גיאומטריים, מבוא לבלשנות חישובית, מהפכת ה-Big Data במבט ביקורתי, יסודות מתמטיים ללמידה מכונה, ראייה ממוחשבת - יישומים ברפואה ועוד.

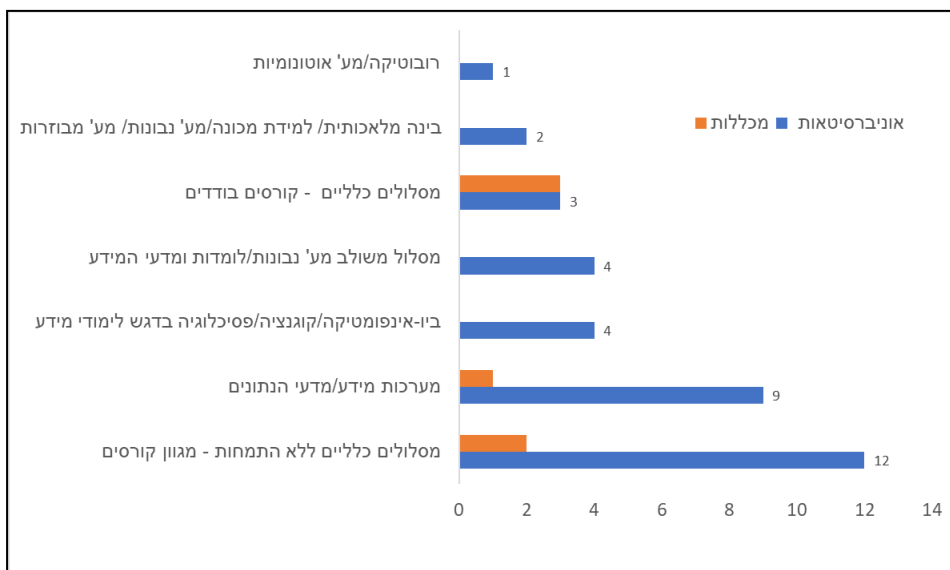
הגרפים הבאים מציגים התפלגות קורסים ומסלולי הכשרה באוניברסיטאות ובמכללות נכון לשנת הלימודים תשע"ח.

איור 66: התפלגות מסלולים לפי סיווג - תואר ראשון



מקור: מוסד שמואל נאמן

איור 67: התפלגות מסלולים לפי סיווג - תארים מתקדמים

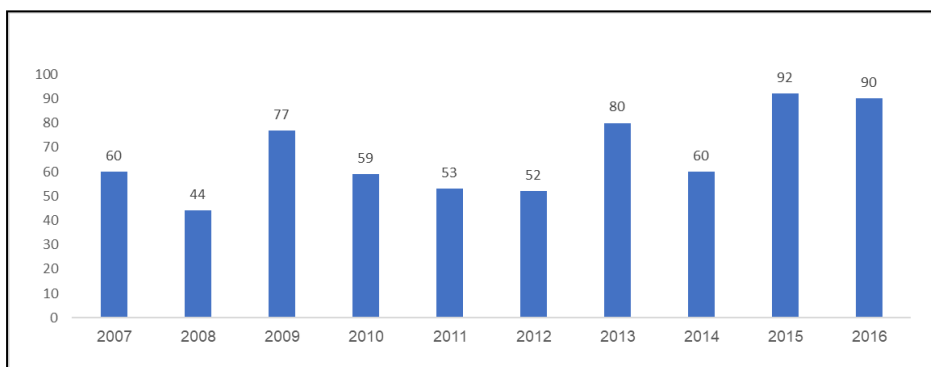


מקור: מוסד שמואל נאמן

5.3 מיפוי תזות

בקטלוג המאוחד הישראלי (Israel Union List-ULI) של הספרייה הלאומית¹⁵² ניתן למצוא נתונים לגבי תזות לתואר שני ושלישי באוניברסיטאות בישראל. החיפוש במאגר התזות נעשה לפי ביטויי מפתח רלוונטים בכל מקום בתזה, בין השנים 2007-2016. נמצאו 694 תזות לתארים שני ושלישי בתקופה שנבדקה. האיור הבא מציג את התפלגות התזות לתארים שני ושלישי לפי שנים:

איור 68: תזות לתארים שני ושלישי לפי שנים, 2007-2016



מקור: עיבוד של מוסד שמואל נאמן לנתוני ULI - קטלוג מאוחד ישראלי

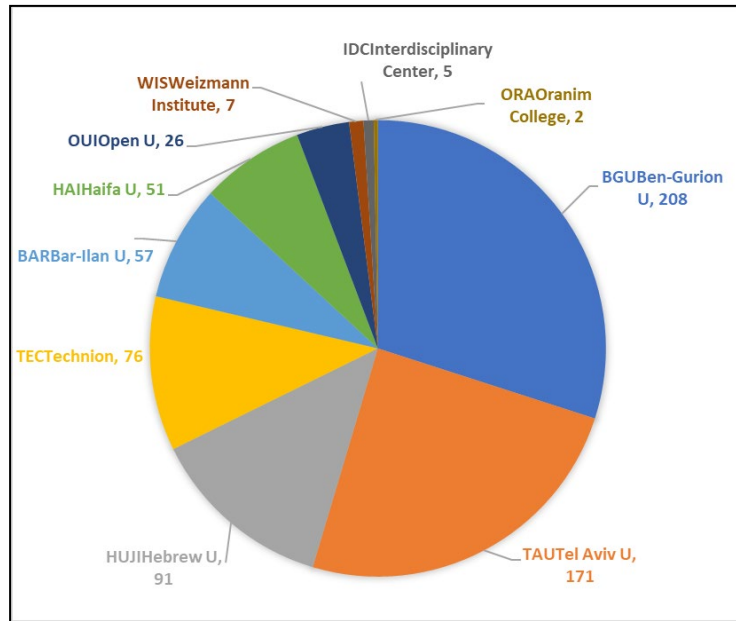
מספר התזות הממוצע לשנה עלה מכ-59 תזות בחמש השנים הראשונות בעשור שנבדק לכ-75 תזות בחמש השנים האחרונות של העשור, כאשר עיקר הגידול התרחש בשנים 2015 ו-2016 (92 ו-90 תזות בהתאמה).

איור 69 מציג את התפלגות התזות לפי מוסדות מחקר. כ-55% מכלל התזות בוצעו באוניברסיטת בן גוריון ואוניברסיטת תל-אביב¹⁵³.

¹⁵² http://primo.nli.org.il/primo_library/libweb/action/search.do?&vid=ULI&_ga=2.128496718.339808174.1521627512-1265825093.1521627511

¹⁵³ ביטויי המפתח הנפוצים ביותר המופיעות בתזות הן Computer Vision, Machine Learning, Computer Vision, human-Computer Interface ו-Data Mining. ביטויים נוספים המופיעים בתזות הם Artificial Intelligence, Natural Language Processing, Autonomous, Distributed systems, Robotics, Big Data ואחרים.

איור 69: תזות לתארים שני ושלישי לפי מוסדות מחקר, 2017-2007



מקור: עיבוד של מוסד שמואל נאמן לנתוני ULI - קטלוג מאוחד ישראלי

התפלגות התזות לפי נושאים על פני השנים משקפת את מידת הפופולריות של הנושאים בתקופות מסוימות. כך למשל המספר הגבוה ביותר של תזות שיש בהן את ביטוי המפתח 'Artificial Intelligence' נמצא בשנים 2007 ו-2016, בעוד מספר התזות שיש בהן את ביטוי המפתח 'Machine Learning' נמצא בעלייה מתמדת לאורך העשור.

6 מסקנות ותובנות לגבי צורכי כוח אדם לתחום AI

בכדי לענות לצורכי כוח אדם בתחום AI יש צורך גם בבוגרי תואר ראשון וגם בבוגרים לתארים מתקדמים הכוללים מחקר. בתחום מדעי הנתונים יש ביקוש הולך וגובר לבוגרי תואר ראשון עם ידע בתחום. הביקוש לבוגרים צפוי לגדול משמעותית. בין התפקידים להם צפוי ביקוש הם: הנדסת נתונים, תכנון, טיפול ובקרת נתונים (טיוב, תיוג וכו'), אנליזת נתונים וויזואליזציה שלהם. גם בתחום הבינה המלאכותית ולמידת מכונה יש ביקוש לבוגרי תואר ראשון בעלי הבנה בסיסית בבינה מלאכותית וידע בכלים שימושיים לתפקידי פיתוח (שאינם תפקידי מחקר).

בתעשייה קיים ביקוש גדל לבוגרי תארים מתקדמים בתחומי הבינה המלאכותית. מדובר בנושאים שהמחקר בהם דורש בסיס מדעי רחב. כמענה לביקוש, מספר הסטודנטים המבקשים כיום ללמוד תארים מתקדמים את תחומי ה-AI עולה. זוהי קושי של מנחים ביכולתם לקבל סטודנטים למחקר, בעיקר בתחומי הבינה המלאכותית. חברות בינלאומיות גדולות מעוניינות להעסיק חוקרים מובילים. בארה"ב ובמקומות אחרים בעולם ידוע על תחרות בין האקדמיה לתעשייה, כאשר התעשייה מציעה תנאים מפליגים לחוקרים בכירים והאקדמיה מתקשה להתמודד ולהשאיר בתחומיה סגל איכותי שעוסק במחקר מוביל בתחום. לא מן הנמנע שמצב כזה יתרחש גם בישראל.

המלצות:

הגדלת מספר הסטודנטים - יש צורך במדיניות להגדלת מספר הסטודנטים למחקר בתחום ה-AI ביחוד את תחום מדעי הנתונים והבינה המלאכותית על מנת לתת מענה לצרכי התעשייה ולייצר את הדורות הבאים של חוקרים באקדמיה. לאור התחרות עם התעשייה ועם אוניברסיטאות בחו"ל עלו מספר אסטרטגיות עיקריות להתמודדות:

- הדגשת היתרונות שבאקדמיה ובהן קביעות ובטחון תעסוקתי, אפשרות לבצע מחקר משמעותי וחופש אקדמי (לאנשי סגל), ואפשרות 'לשדרג' את המעמד בשוק העבודה (לסטודנטים).
- שיפור משמעותי בנגישות לדאטה, כולל דאטה שקיים רק באקדמיה.

- מציאת דרך לבצע בידול במלגות לסטודנטים ובשכר לסגל במקצועות בהן קיימת תחרות עזה עם התעשייה ועם אוניברסיטאות בחו"ל. בין הדרכים שהוצעו: מתן מלגות מחייה לפוסט-דוקטורנטים במטרה להשיב אותם לישראל בתום ההשתלמות והאצת מסלול הקידום לחוקרים.

- בחינת המודל הנכון לעבודת חוקרים מהאוניברסיטאות בתעשייה. דוגמאות למודלים עבודה בתעשייה יום אחד בשבוע (מאפשר לחוקר להיחשף לבעיות אמיתיות בתעשייה); עבודה במשרה מלאה באקדמיה ומשרה מלאה בתעשייה; לקיחת חל"ת לצורך עבודה בתעשייה לזמן מוגדר.

הכשרות חוץ אקדמיות - בתנאי השוק הקיימים יש מקום להכשרות חוץ אקדמיות. הכשרות חוץ אקדמיות מתאימות להכשרת מפעילי כלי AI ברמת הטכנאות, הכשרת בוגרי הנדסה או מדעים מדויקים שעברו קורסים מקצועיים לתפקידים התחלתיים.

קורסים תשתיתיים בפקולטות להנדסה ומדעים מדויקים – לאור הביקוש העולה פקולטות הנדסיות ומדעיות שוקלות לתת לסטודנטים קורסי בסיס או הכרות עם בינה מלאכותית ומדעי הנתונים. נדרש לבחון אפשרות לזרז מתן אישורים לפתיחת קורסים בתחומי ה-AI כדי לא לעכב את פיתחת הקורסים והקניית ידע בתחום בהקדם.

הכשרה בפקולטות למדעי החברה והרוח - מדעי הנתונים הופכים להיות שיטת מחקר מרכזית גם במדעי החברה והרוח. הבנה בסיסית של המונחים והאפשרויות הגלומות ב-Big Data הם חלק מהאוריינות הדיגיטלית/מדעית הנדרשת אצל בוגרי אוניברסיטאות. בוגרי מדעי החברה והרוח יזדקקו לידע והכשרה בסיסית בתחום על מנת להשתלב בעולם העבודה והמחקר העתידיים.

מקורות מזון אלטרנטיביים



נושא פרק זה הוא מקורות מזון חדשים אשר טרם משמשים כיום באופן נרחב או בכלל כחומרי גלם לצריכה ולתעשייה.

1.1 הגדרות

תהליכי גידול של אוכלוסיית העולם מביאים לכך ששיטות חקלאיות סטנדרטיות אינן מספיקות עוד כדי לספק את צרכי האוכלוסייה מבלי לדלדל מקורות טבעיים ולגרום לנזק סביבתי קשה. בנוסף לכך, הדרישה לאוכל בריא יותר עולה בקרב אוכלוסיות רבות (בעיקר במערב), וכמוה גם המודעות לנושאים מוסריים המתקשרים לתעשיית ייצור המזון (Holban & Grumezescu, 2018). הסקטור שעוסק במתן מענים טכנולוגיים לאתגרים אלו הוא ה-Food-Tech (או AgriFood-Tech). מנעד המענים רחב מאוד ונע לאורך כל שרשרת האספקה, החל מייצור התשומות וחומרי הגלם וכלה ברכישה וצריכה על ידי הצרכנים הסופיים.

מקורות מזון אלטרנטיביים הם תחום ייחודי בתוך סקטור ה-Food-Tech. המונח מתייחס למזונות, חומרים מזינים וחלבונים שמקורם במקורות לא שגרתיים, כמו צמחים עתירי חלבון, חרקים, בשר שגדל במעבדה ועוד (Rausnitz, 2019). להלן פירוט מקורות מזון חדשים אשר טרם משמשים כיום באופן נרחב או בכלל כחומרי גלם לצריכה ולתעשייה:

בשר מתורבת (Cultured meat), נקרא גם בשר סינטטי, בשר מבוסס תאים, בשר במעבדה, in-Vitro meat, בשר נקי ושמות נוספים):

בשר מתורבת מיוצר בטכנולוגיית תרבית רקמות (התהליך באמצעותו מתחדשים/מתרבים תאים מן החי באמצעות תאים בודדים כמקור) תהליך זה יוצר רקמה המחקה רקמת בעלי חיים. (Bashi, McCullough, Ong, & Ramirez, 2019)

מזון מבוסס אצות וצמחי מים

- **מאקרו-אצות (Macroalgae, Seaweed):** אצות מקרוסקופיות, רב-תאיות, ימיות, החיות בסמוך לקרקעית הים. המונח כולל כמה מחברי האצות האדומות, החומות והירוקות. מראה אצות הים דומה לצמחים יבשתיים שאינם עצים (non-arboreal) (Suganya, Varman, Masjuki, & Renganathan, 2016).
 - **מיקרו-אצות (Microalgae, Microphytes):** אצות מיקרוסקופיות, הנמצאות במים מתוקים ומי ים. הם מינים חד-תאיים הקיימים באופן פרטני, בשרשראות או בקבוצות. גודלם יכול לנוע בין כמה מיקרומטר למספר מאות מיקרומטר. שלא כמו צמחים גבוהים יותר, למיקרו-אצות אין שורשים, גבעולים ועלים. מיקרו-אצות המסוגלות לבצע פוטוסינתזה: הן מייצרות כמחצית מהחמצן האטמוספרי ומשתמשות בו זמנית בפחמן דו חמצני. המגוון הביולוגי של המיקרו-אצות הוא עצום והן נחשבות למשאב כמעט בלתי מנוצל. ההערכה היא שכ- 20,000-800,000 מינים קיימים שמתוכם רק כ- 40-50,000 מינים ידועים כיום (Suganya et al., 2016).
 - **צמחי מים זעירים (למשל כדרוריות מים wolfia):** אחד ממקורות החלבון החדשים הקיימים הוא כדרורית המים. המנקאי הוא זן מעובד של כדרורית המים, והוא מכיל מעל 45% חלבון (Kaplan et al., 2019).
- אצות משמשות למזון לבני אדם ולבעלי חיים יבשתיים וימיים (למשל מקרו-אצות כמו Nori, Wakame, Kombu ו-Dulse ומיקרו-אצות כמו Chlorella). קיימים יישומים נוספים רבים לאצות ובהם שימוש כחומרי גלם לתעשיות התרופות, צבעי מאכל, דשנים, דלקים, קוסמטיקה וכימיקליים. עם זאת שימוש באצות ליישומים שונים הוא תחום שעדיין עומד בפני אתגרים רבים (Griffiths, Harrison, Smit, & Maharajh, 2016).

חרקים

חרקים אכילים מכילים חלבון, ויטמינים וחומצות אמינו באיכות גבוהה. לחרקים שיעור המרת מזון גבוהה: צרצרים, למשל, זקוקים לכמות מזון נמוכה פי שש מאשר בקר, פי ארבעה מאשר כבשים, ופי שתיים מאשר חזירים ותרנגולות, כדי להפיק את אותה כמות חלבון. חרקים פולטים פחות גזי חממה ואמוניה מאשר בעלי חיים

¹⁵⁴ תודתנו לד"ר עפרה לוטן וד"ר יאיר בזמן על הערותיהם ועל עזרתם במיקוד הסקירה.

קונבנציונליים, וניתן לגדל אותם על מצע פסולת אורגנית. לכן, חרקים הם מקור פוטנציאלי לייצור של חלבון לצריכה ישירה של בני אדם, כחומר גלם לייצור מזון וכמקור חלבון לתערובות מזון לבעלי חיים (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019)

חלבון ומזון המיוצרים על ידי מערכות מיקרואורגניזמים

תאים של מיקרואורגניזמים (אצות, חיידקים, פטריות ושמרים) משמשים כתוספים עשירים בחלבון למזון בני אדם ובעלי חיים. חלבון מיקרוביאלי נחשב כיום כמקור חלופי לחלבון מן החי או מהצומח. חלבונים חד-תאיים הם בדרך כלל הבימסה המיקרוביאלית¹⁵⁵ או תמצית החלבון. הטבלה הבאה מציגה מספר פרמטרים המאפיינים חלבון-מיקרוביאלי (Ranghar, Agrawal, & Agrawal, 2019)

מזון מהצומח

מרבית רכיבי החלבון הצמחיים הקיימים כיום בשוק מבוססים על 2% מתוך כ-150 סוגי צמחים עיקריים שמשמשים בתעשיית המזון. קיים מאגר פוטנציאלי רחב של מקורות חלבון צמחיים שטרם נחקרו, וזאת מבלי לקחת בחשבון מאות אלפי צמחים שאינם משמשים היום בתעשיית המזון. החדשנות בתחום נובעת הן מהרחבת גיוון המקורות הצמחיים להפקת חלבון, הן מתהליכי הפקת החלבון והן מהפיכת חומרי הגלם למוצרים סופיים (Lagally, Rees Clayton, & Specht, 2017).

ה-Good Food Institute מתאר את סוגי חלבון אלטרנטיביים בטבלה הבאה:

טבלה 7: קטגוריות של מקורות חלבון חדשניים

Plant proteins	Non-animal cell culture	Recombinant proteins	Animal cell culture
Proteins derived from plant ingredients. "Plant" defined by the ;domain Eukarya .kingdom Plantae	Ingredients encompassing anything but animal cells (including plant, fungi, algae, and bacteria sources) that (1) are produced using cultured methods, and (2) yield cells that are themselves the product (distinct from recombinant sources where just one component, such as protein, is desired).	Proteins derived from fast-growing, highly efficient host microorganisms. Microorganisms are introduced to genes encoding desired proteins, which populate (grow in controlled environments) and express the desired protein. Proteins are then extracted from the host and purified.	Food matrix derived from animal cells that are cultured through a variety of methods and combinations (including recombinant protein production and the use of bioreactors).
Examples: Whole and fractionated forms of legume and .cereal flours	Examples: Whole forms of algae and fungi in dry, fresh, or paste forms.	Examples: Individual proteins found in dairy and eggs.	Examples: Meat ("meat" defined as animal tissue/composed of animal cells derived from red meat, poultry, seafood).

1.2 השוק העולמי למקורות מזון חדשים

שוק הבשר המתורבת (בשר מבוסס תאים):

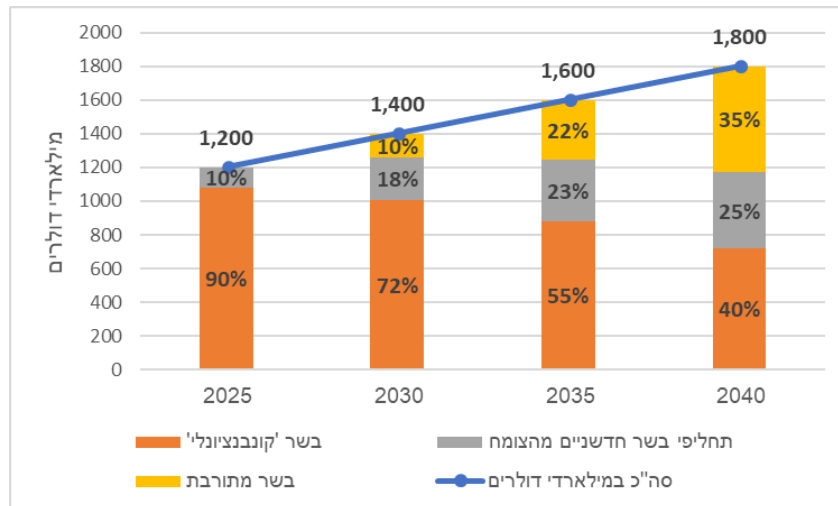
נכון לשנת 2019 עדיין לא ניתן להשיג בשר מתורבת בשוק. אומנם החוקר ההולנדי פרופ' מרק פוסט הוכיח כבר בשנת 2013 התכנות ייצור המבורגר מבוסס תאים, ומספר חברות בעולם כבר סיימו לפתח אב טיפוס, אך עדיין אין תהליך ייצור תעשייתי ולא נוצרה התכנות כלכלית לייצור בקנה מידה גדול. החברות המובילות בעולם בתחום

¹⁵⁵ המסה הכוללת של כל המקרובים באזור ובזמן מסוים

Memphis Meats, CUBIQ Foods ו-Mosa Mea) הביעו בטחון בטכנולוגיות הקיימות, והודיעו שהן מצפות להתחיל לייצר מוצרים לשוק כבר בשנת 2021 (Cameron & Shannon, 2019). יש לציין שההשקעה הראשונה בחברת מוצרים מבוססי תאים, נרשמה בארה"ב רק בשנת 2015. בין השנים 2015-2018 הושקעו בחברות בתחום זה בארה"ב כ- 73.3 מיליוני דולרים, כאשר היקף ההשקעות גדל בכ-170% בין השנים 2017 ל-2018 (McCracken, 2018, Cameron et al., 2019).

מרבית התחזיות חוזות גידול משמעותי בשוק הבשר המתורבת לצד גידול בשוק תחליפי בשר חדשניים מהצומח וקיסון בצריכת בשר 'קונבנציונלי'.

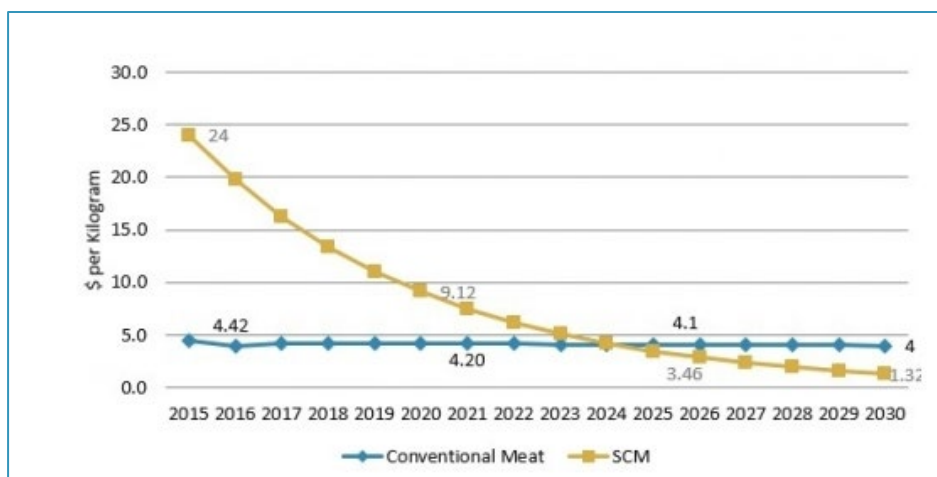
איור 70: צריכת בשר ותחליפי בשר בשוק העולמי במילארדי דולרים, 2025-2040 וחלקם של בשר 'קונבנציונלי', תחליפי בשר חדשניים מהצומח ובשר מתורבת באחוזים.



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל-(Gerhardt et al., 2018)

במקביל חוזה חברת מחקרי השוק BCC Research ירידה חדה במחיר הבשר המתורבת בשנים הקרובות:

איור 71: תחזית למחיר ממוצע לבשר מתורבת ובשר קונבנציונלי, 2015-2030



מקור: (Laxmi, 2019) (SCM=Synthetic (Cultured) Meat)

שוק חלבון מבוסס צמחים

לפי חברת המחקר BCC Research ערך שוק חלבון המזון מהצומח (סויה, חיטה, אפונים (כולל חמוס)), קנולה, אורז, תפוחי אדמה ואחרים) העולמי עמד על כ-9.1 מיליארדי דולרים בשנת 2018 וצפוי לגדול לכ-13.9 מיליארדי דולרים בשנת 2023, גידול של קרוב ל-9% בתקופה. הטבלה הבאה מפרטת את הגידול הצפוי לפי סוגי חלבון.

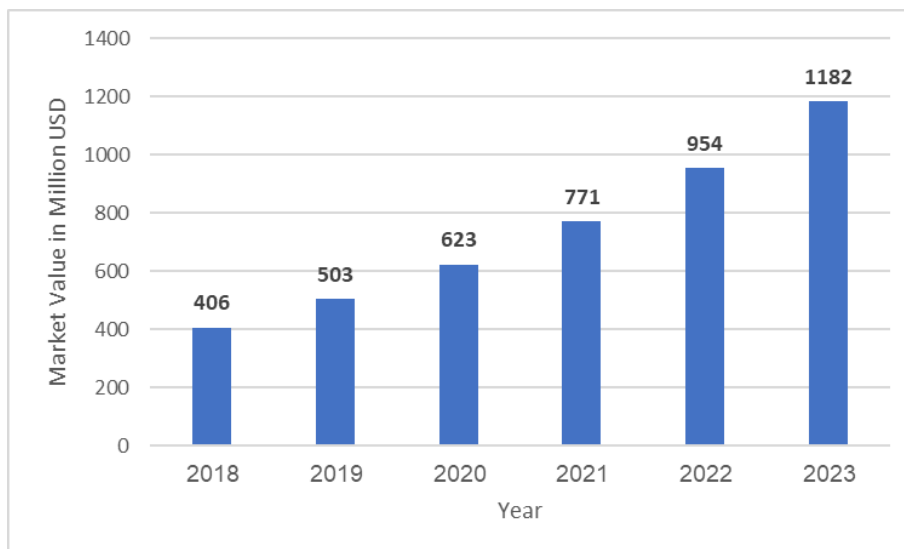
טבלה 8: גידול צפוי לפי סוגי חלבון

Product	2017	2018	2023	CAGR% 2018-2023
Soy Protein Concentrates	5,558.9	6,044.3	9,330.7	9.1
Wheat	2,063.0	2,230.6	3,348.4	8.5
Pea Protein	148.9	162.4	256.0	9.5
Canola Protein	126.9	138.0	215.0	9.3
Potato Protein	111.9	120.6	176.7	7.9
Rice Protein	107.6	115.6	166.9	7.6
Others	298.3	318.4	443.5	6.9
Total	8,415.5	9,129.9	13,937.2	8.8

מקור: (Laxmi, 2020)

שוק החרקים האכילים - חרקים אכילים הינם מקור מזון בעל ערכים תזונתיים גבוהים, הן בעבור האדם והן כמזון לבע"ח, עוף ודגים. על-פי הערכות, לפחות 2 מיליארד איש צורכים חרקים כמזון באופן סדיר, חלקם הניכר בעולם המתפתח. בחלקים נרחבים באפריקה, אסיה ודרום-אמריקה אכילת חרקים (הניצודים מהטבע) הינה חלק מהתזונה הסדירה ואף נחשבת למעדן, ולא על רקע של מחסור בזמינותם של בשר בקר, עוף, דגים וכיו"ב. עם זאת, בתרבות המערבית (שבה מתבצעת פעילות ענפה של תרבות יצור חרקים) אכילת חרקים לרוב נחשבת כטאבו (פורטונה, ליבס, & פרוינד קורן, 2016).

איור 72: גידול צפוי בשוק החרקים האכילים



מקור: (Yeshua, 2019)

השקעות של ממשלות בעולם בתחום המזון האלטרנטיבי

הגידול הצפוי בשוק המזון האלטרנטיבי מביא ל"מרוץ לנתח שוק" (ראו למשל (Bashi et al., 2019)). תופעה זו מתגברת לאור העובדה שקצב החדירה לשוק הסיני, שהוא השוק הגדול בעולם בתחום, עדיין נמוך. בשוק ענק זה ישנה פתיחות גדולה למזון אלטרנטיבי, אולם איכות המוצרים מתוצרת מקומית וצורת השיווק שלהם לא השתנו מזה מספר עשורים. מצב זה מציב הזדמנויות רבות לחברות חדשניות בשוק שהוא כרגע עדיין פתוח לחלוטין (Barrett, 2019). מספר ממשלות בעולם זיהו את הפוטנציאל הכלכלי והקימו תוכניות תמיכה בתחום (King & Lawrence, 2019):

- ממשלת קנדה השקיעה 153 מיליון דולר ב-Protein Industries Supercluster בכדי לפתח אלטרנטיבות מבוססות צמחים שיענו על הביקוש הגובר לחלבון שאינו מהחי. ההערכה היא כי המימון ייצר למעלה מ-4,500 משרות חדשות במהלך 10 השנים הבאות ויוסיף 4.5 מיליארד דולר לתמ"ג בתקופה זו.
- האיחוד האירופי הכריז על ה-1.1.2020 כעל תאריך תחילתו של פרויקט "SMART PROTEIN" למציאת חלבון אלטרנטיבי בהשקעה של כ-9.6 מיליון יורו (European Commission, 2019)

- ממשלת גרמניה השקיעה \$M 780 למחקר באוניברסיטה הטכנית של ברלין ובמכון הטכנולוגי של קרלסרוה (Karlsruhe) בכדי לשפר את המרקם של חלופות בשר מבוססות צמחים.
- ממשלת הודו תהיה שותפה לשני מכוני מחקר חדשים שיעסקו בבשר מבוסס תאים: המכון הראשון יהיה מרכז מצוינות בתחום החקלאות התאית (Centre of Excellence in Cellular Agriculture). המכון הוא שותפות בין המכון לטכנולוגיה כימית במומבאי (מכון ממשלתי) לבין ה-Good Food Institute. המכון השני יקרא המרכז לביולוגיה סולרית ומולקולרית ומרכז החקר הארצי בנושא בשר, במימון של \$K640 מהמשרד ההודי לביוטכנולוגיה¹⁵⁶ (Siegener, 2019).

1.3 רגולציה

מזון ממקור צמחי

האיחוד האירופי

החל מה 1- בינואר 2018, חלה באירופה תקנה חדשה לגבי "מזון חדש" (Novel Food legislation). מטרת התקנה החדשה היא שמירה על רמה גבוהה של בטיחות מזון לצרכנים האירופים (European Commission, 2018).

ארה"ב

ה-FDA פרסם הנחיות לתעשייה למזון שמקורם בזנים חדשים של צמחים להערכת הבטיחות של החלבון (Laxmi, 2020).

בשר מתורבת

תחום הבשר המתורבת רק התחיל את תהליך אישורו ברוב גופי הרגולציה הרלוונטיים בעולם. בארה"ב, למשל בשר מתורבת נדרש נכון להיום לעמוד במספר לא מבוטל של תקנות.

בנובמבר 2018 מחלקת החקלאות האמריקאית (USDA) וה-FDA הסכימו לבחון במשותף את התחום הרגולטורי בנושא בשר מתורבת בדרך למציאת המסגרת החוקית שתאפשר הפצה מסחרית של מוצרים בטכנולוגיה זו, (Gerhardt et al., 2019).

1.4 אתגרי שוק

(van der Weele, Feindt, Jan van der Goot, van Mierlo, & van Boekel, ואחרים, 2019) ריכזו את הפרמטרים לגבי מצב השוק כיום ומצב השוק הצפוי בעתיד. ניתן לחלק את האתגרים לאתגרים טכנולוגיים ואתגרים חברתיים-מוסדיים/חוקיים.

2 תחום מקורות המזון האלטרנטיביים בישראל

תרבות החדשנות, קיומן של תשתיות מחקר קריטיות ועלייה בביקוש למזון מהצומח מביאים את ישראל לעמדה שבה היא יכולה לשמש זרז לקידום שווקי המזון מהצומח והבשר המתורבת העולמיים (Benjamin, 2018). חברות ישראליות נמצאות בחזית הטכנולוגיה ומציגות גיוסי הון משמעותיים גם ברמה הבינלאומית. חברות ישראליות בתחומים כמו בשר מתורבת, הפקת חלבונים מחומס, טיפוח זני צמחים עשירים בחלבונים, ייצור כדוריות מים למאכל ועוד נחשבות לפורצות דרך ומובילות במחקר ברמה עולמית, וההשקעה הממשלתית בתחום "עולה רמה" בימים אלו עם ההקמה של החממה הטכנולוגית בתחום המזון בנפת צפת, שתקציבה צפוי לעמוד על כ-100 מיליון ש"ח.

¹⁵⁶<http://dbtindia.gov.in/>

2.1 תמיכה ממשלתית בתחום

חממה טכנולוגית בתחום המזון בנפת צפת

בחדש יוני 2019 הודיעה רשות החדשנות כי בחרה ב-Fresh Start (לשעבר ספארקס פוד-טק), בבעלות תאגידי המזון והמשקאות תנובה וטמפו וקרנות ההשקעה OurCrowd ו-Finistere האמריקאיות, כזוכה בהליך להקמת והפעלת חממה טכנולוגית בתחום המזון בנפת צפת שתכלול מתחם מיקרו תעשייה, מכון מחקר וחדשנות מזון וקהילות חדשנות. החממה תקלוט ותקדם חברות הזנק בתחום טכנולוגיות המזון לכל אורך שרשרת הערך והאספקה של מזון ומשקאות הכולל את הדור הבא של מזון ומשקאות, יעילות גידולים חקלאיים, שמירה על טריות מזון ומשקאות, עיבוד מזון ומשקאות, ייצור מזון ומשקאות, בטיחות מזון ומשקאות, התאמה לצרכני מזון ומשקאות, פלטפורמות אספקה ומכירות מזון ומשקאות לצרכנים (רשות החדשנות, 2019). במהלך תקופת הזיכיון, ישקיעו חברות התאגיד בחברות הזנק חדשות על-ידי מינוף השקעתם באמצעות מענק של רשות החדשנות בשיעור 85% לכל חברה ועד לסכום מצטבר של כ-6 מיליון ₪ לכל חברה לתקופה של 3 שנים (רשות החדשנות, 2019a). סה"כ צפויה ההשקעה ביוזמה להגיע לכ-100 מיליון ₪.

¹⁵⁷The Kitchen- FoodTech hub

החממה הוקמה באשדוד ב-2015, ביוזמת רשות החדשנות וחברת שטראוס. בין הפיתוחים שנבחרו לפיתוח וקידום בחממה: יוגורט טבעי ללא חלב, שבב חדשני שמזהה נוכחות חיידקים במזון וחלבון עשיר שעשוי מזחלי זבוב (רשות החדשנות, 2017). בין החברות שקיבלו תמיכה במסגרת החממה ניתן למצוא את: Aleph Farms (גידול רקמות בשר מתאים), Zero Egg (תחליף ביצה צמחי), Yofix Probiotics (תחליף יוגורט טבעוני), Rilbite (תחליף בשר טבעוני, גייסו כ-\$540K מהחממה ומרשות החדשנות), Amai Proteins (תחליפי סוכר מבוססי חלבון טבעי, גייסו כ-\$850K מהחממה ומרשות החדשנות) ו-Flying SpArk (חלבון מבוסס זבובי פירות, גייסו כ-\$500K במסגרת החממה).

מעבדת חדשנות ¹⁵⁸FoodNxt

מסלול מעבדות לחדשנות טכנולוגית של רשות החדשנות מיועד ליזמים בראשית דרכם הזקוקים לתשתיות ולמומחיות ייחודיים לצורך הוכחת היתכנות של רעיון טכנולוגי ולתאגידי המעוניינים לשתף פעולה עם סטארטפים בישראל. הסיוע ניתן באמצעות מעבדות לחדשנות שמופעלות על ידי תאגידי מובילים בתחום, במודל של חדשנות פתוחה. חברת פרוטרם מובילה את מעבדת חדשנות FoodNxt בתחום ה-FoodTech. לאחרונה, נכנסה חברת Nutrilees לפרוטופוליו של FoodNxt במסגרת מסלול מעבדות חדשנות של רשות החדשנות. Nutrilees מפתחת תהליך להפקת חלבון מבוצת השמרים של תעשיית היין והבירה המהוות כיום פסולת ומפגע סביבתי, כמקור מזון חדש.

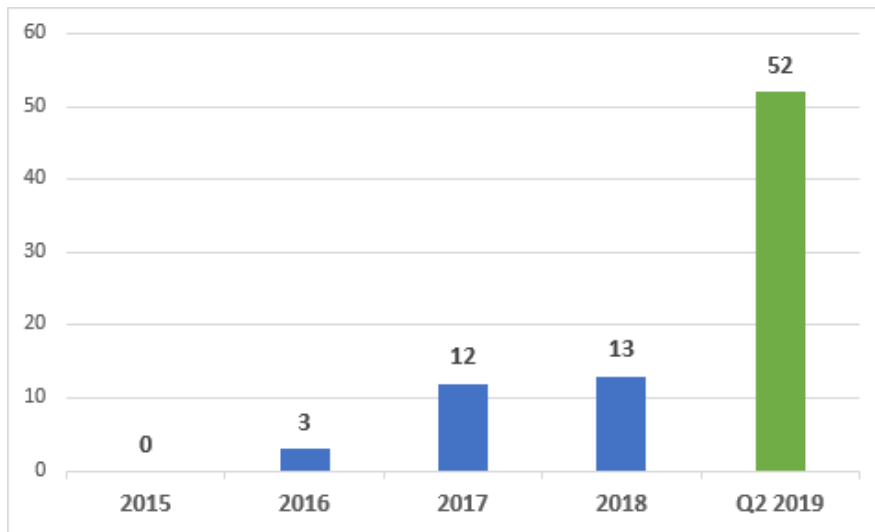
2.2 משקיעים

שנת 2019, מסתמנת כשנת מפנה בהיקף גיוסי ההון של חברות ישראליות העוסקות במקורות מזון אלטרנטיביים. לפי Startup Nation Central, הצפי הוא לגיוס של כ-52 מיליון דולרים עד סוף שנה זו לעומת כ-13 מיליון דולרים שגויסו בשנת 2018.

החברות המובילות בגיוסי הון בשנת 2019 הן Aleph Farms (גידול רקמת שריר שלמה) ו-Future Meat Technologies (גידול תאי שומן ושריר). חברות אלו ביחד עם חברת SuperMeat, העוסקת בגידול תאי עוף גייסו ביחד כ-\$30M בשנתיים האחרונות. נכון להיום, ישראל היא מהמובילות בעולם במספר החברות שהודיעו על גיוס הון בתחום הבשר המתורבת. בין המשקיעים העיקריים בתחום אפשר למצוא ענקיות מזון כמו PHW הגרמנית ו-Tyson Foods האמריקאית.

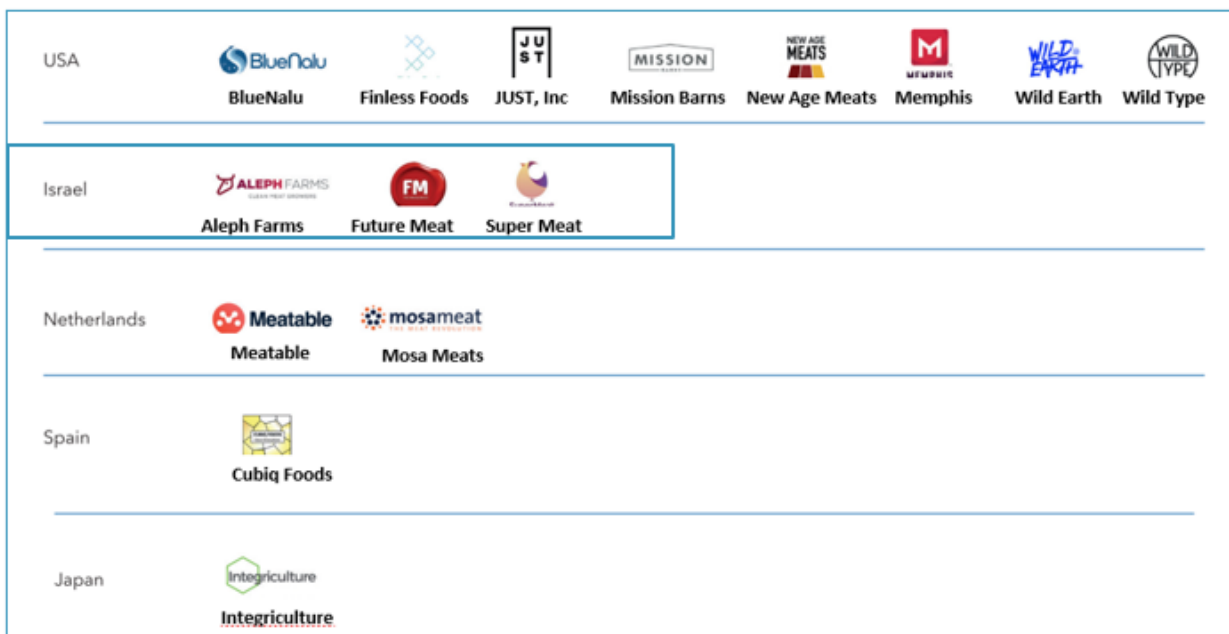
¹⁵⁷<https://www.thekitchenhub.com/>
¹⁵⁸<https://foodnxtlab.com/>

איור 73: גיוסי הון של חברות טכנולוגיה בתחום מקורות מזון אלטרנטיביים בישראל, \$M, 2015-2019



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל-2019, Rausnitz

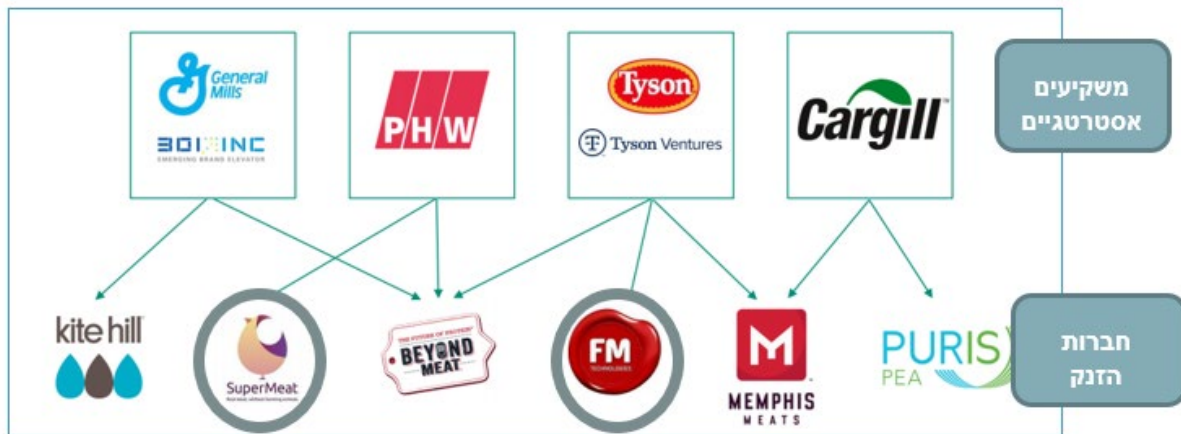
איור 74: חברות בתחום הבשר המתורבת (בשר ממקור תאי) בעולם שהודיעו על גיוסי הון (עד שנת 2018) לפי מדינות*:



מקור: (Cameron & Shannon, 2019)

*חברות נוספות שלא הודיעו על גיוס הון נמצאות בקנדה, סין, צרפת, הודו, סינגפור, תורכיה ואנגליה.

איור 75: משקיעים אסטרטגיים באקוסיסטם העולמי בתחום הבשר המתורבת (בשר ממקור תאי)*



מקור: (Bogin, 2018)
* בעיגול אפור: חברות ישראליות.

משקיעים ישראלים בתחום ה-FoodTech¹⁵⁹:

לפי נתוני Startup Nation Central Finder, בישראל פועלות כיום כ-26 חברות השקעה בתחום ה-Foodtech (אינקובטורים, הון סיכון והון פרטי), אך רק בודדות מהן השקיעו בתחומי המזון האלטרנטיביים ובהן FoodLab (Innovopro) Capital, Agrinovation¹⁶⁰, ChikP, Future Meat Technologies) ו-The Kitchen FoodTech Hub (Amai Proteins, Rilbite, Flying Spark).

מאיצים ותוכניות יזמות ישראליות בתחום ה-Food-Tech¹⁵⁹:

לפי נתוני Startup Nation Central Finder, בישראל פועלים היום 9 מאיצים (accelerators) בתחום ה-FoodTech, מתוכם 2 מאיצים זרים (במימון אירופאי ובינלאומי)¹⁶¹, 5 מאיצים ישראלים¹⁶² ו-2 מאיצים של חברות ישראליות (כיל¹⁶³ ופרטרום). כמו כן, ישנן 6 תוכניות יזמות, ובהן FaculTech בפקולטה לחקלאות ברחובות של האוניברסיטה העברית שממנה נבטה חברת Kinoko-Tech (חלבון אלטרנטיבי מבוסס פטריות).

3 מיפוי חברות בתחום מקורות מזון חדשים

נכון ספטמבר 2020, פועלות בישראל כ-33 חברות העוסקות בתחיליף חלבון ו/או תחליפי מנות מהחי מרכיבים חדשניים, בשר מתורבת (בשר על בסיס תאי) וחרקים לצורך מאכל¹⁶⁴ וזאת בתוך כ-251 חברות העוסקות ב-FoodTech בישראל, בתחומים כמו הדברת מזיקים, אריזה, הובלה, שיווק ועוד (לפי נתוני Startup Nation Central Finder). ניתן לראות שהחל מ-2007 החל גידול במספר החברות החדשות המוקמות בתחום מידי שנה ומספר זה נמצא במגמת עלייה. כאשר עלייה משמעותית חלה בשנת 2018.

¹⁵⁹ תחום ה-foodTech בכללותו, שיכול לכלול גם מזון אלטרנטיבי.

¹⁶⁰ Agrinovation is a unique independent agricultural investment fund with exclusive licensing and commercialization rights on all inventions and innovations developed from the world renowned Hebrew University (http://www.agri-nnovation.com/) (HU) Faculty of Agriculture, Food and Environment

¹⁶¹ EIT Food Accelerator Network (https://www.eitfan.eu/) ו-Bridge Hub (https://thebridgehub.co/)

¹⁶² XLR8 (https://maoftech.org.il/accelerator/kiryat-shmona/) TheHive by Gvahim, (https://www.thehivebygvahim.org/)

Eilat Food Tech Accelerator, (https://www.theacthub.com/) The ACT Hub, (https://www.eilatfoodtech.com/)

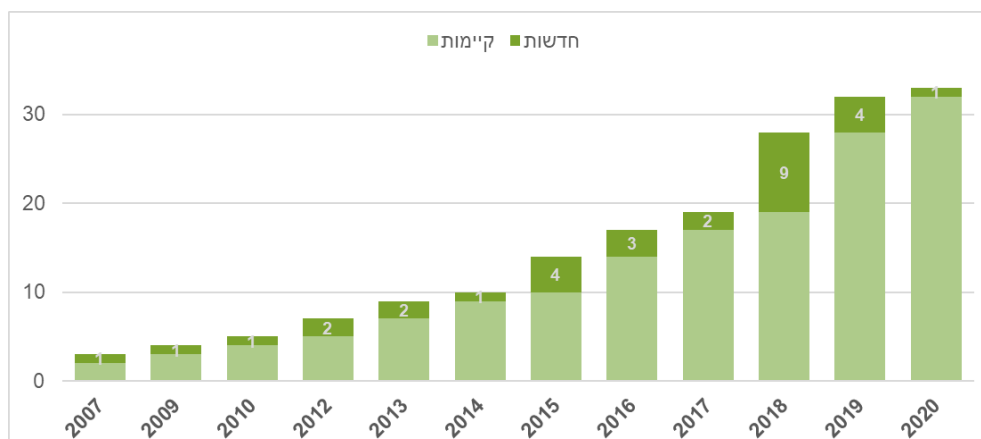
ו-TechForGood (http://techforgood.co/israel/)

¹⁶³ יש לציין כי בדו"ח חברת כ.י.ל הודיעה גם היא על פיתוח טכנולוגיית עיבוד חדשנית מאפשרת את ייצורם של מוצרי תחליף בשר (מערכת תרכובות Rovitaris הכוללת חלבון (אבקות וחומרי מרקם) ותוספי מזון פונקציונליים, שלהם יש להוסיף מים ושמן בלבד. בנוסף, מוצעים פתרונות צמחוניים, טבעוניים וכן נטולי-אלרגנים (כיל, 2018).

¹⁶⁴ מתוך 28 חברות המתויגות במאגר המידע Startup Nation Central finder בתגית foodtech וגם בלפחות אחת מהתגיות הבאות: proteins, plant-protein, protein-based, alternative-protein, sustainable-protein, functional-proteins, recombinant-proteins.

¹⁶⁵ קישור לאתר: (https://finder.startupnationcentral.org)

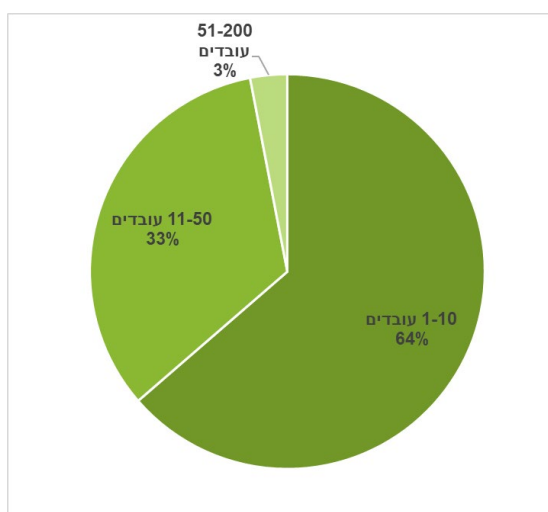
איור 76: חברות בתחום מקורות מזון חדשים בשנים 2007-2020



עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

רוב החברות 97% הן חברות קטנות שיש בהן עד 50 עובדים (ברוב החברות (64%) עובדים עד עשרה עובדים). פרט לחברה אחת גדולה (ICL) אין כלל חברות בתחום זה. נתונים אלה מחזקים את העובדה כי זהו תחום מתפתח ורוב החברות נמצאות בתחילת דרכן.

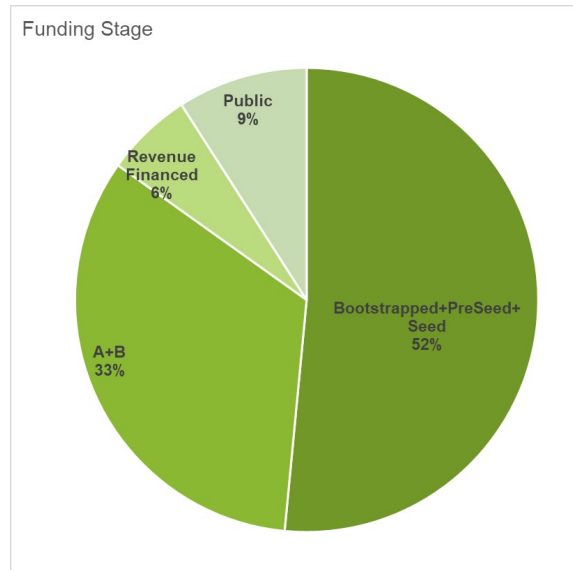
איור 77: גודל החברות לפי מספר העובדים בחברה



מקור: עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

מטבע הדברים חלק גדול מהחברות נמצא בשלבים התחלתיים. האיור הבא מציג את התפלגות החברות לפי Funding Stage. מבחינת שלב המימון: 52% מהחברות בתחום נמצאות בשלבים ההתחלתיים של Seed, Pre-Seed, Bootstrapped ו-Seed. 33% נמצאים בסבבי גיוס שונים B+A (15%). גם נתונים אלה מצביעים על חברות בתחילת דרכן.

איור 78: התפלגות חברות לפי Funding Stage



עיבוד של מוסד נאמן לנתוני Startup Nation Central Finder

גיוסי הון

24 מתוך 33 החברות גייסו הון בסך של כ- 145 מיליון דולר. כאשר כ- 60% מהסכום גוייסו על ידי חמש חברות: Aleph Farms, Future Meat Technologies, Equinom, InnovoPro ו-Hinoman. כאשר ממוצע ההשקעה הינו 17.5 מיליון דולר. שאר ההשקעות נמוכות בהרבה כאשר הממוצע עומד על 3 מיליון דולר.

חברות בינלאומיות

לפי Startup Nation Central Finder, שתי החברות הבינלאומיות המשמעותיות בתחום ה-FoodTech שלהן מרכזי מחקר וחדשנות בישראל הן Nestle ו-Unilever. חברת Anheuser-Busch InBev (יצרנית מותגי בירה מובילים כמו באדוויזר, קורונה, סטלה ארטוואר ועוד) הקימה מרכז מחקר בתחום הסייבר ומדעי הנתונים ומתכוונת להרחיב את פעילותה גם לתחומי ה-FoodTech וה-AgTech.

4 אקדמיה ומכוני מחקר

מניתוח מדדים ביבליומטריים בתחום עולה כי לא קיימת עדות להיקף משמעותי של פרסומים באוניברסיטאות בישראל בתחומי מקורות המזון החדשים. עם זאת, מספר חוקרים בכירים באקדמיה מקושרים עם חלק מהחברות המובילות בתחום (בעיקר בתחום הבשר המתורבת), ומכאן ניתן לשער שהמחקר בתחום זה מתבצע במידה רבה בחברות הסטארט-אפ, אולי בגלל אופיו האפליקטיבי, ומכיוון שלפחות בחלק מהמקרים הפיתוחים בתחום מקורות המזון החדשים מבוססים על ידע שנוצר בתחומים. להלן דוגמאות לחוקרים בכירים באקדמיה שקיימת זיקה בינם לבין חברות בתחום (רשימה חלקית שאינה ממצה את כלל החוקרים באקדמיה בתחומים השונים):

חוקרים באקדמיה בעלי זיקה לחברות בתחום הבשר מתורבת:

- פרופ' שולמית לבנברג (דיקנית הפקולטה להנדסת ביו-רפואה בטכניון ו-CEO ב-Aleph farms)
- פרופ' קובי נחמיאס (המחלקה לביו-הנדסה, האונ' העברית ומייסד ו-CEO של Future Meat Technologies), שהיא spin-off של חברת העברת הטכנולוגיה של האונ' העברית (יישום)

חוקרים באקדמיה בעלי זיקה לחברות בתחומים אחרים של מקורות מזון אלטרנטיביים:

- פרופ' רם רייפן (הפקולטה לחקלאות מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית ו-Founder ב-Chick-P)
- פרופ' עודד שוסייב (הפקולטה לחקלאות מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית ו- Co-founder & SavorEat ב-CEO)

- פרופ' עידו ברסלבסקי (הפקולטה לחקלאות מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית ו- Co-founder & SavorEat)
- ד"ר מאיר שליסל (המכללה האקדמית תל חי & Co-founder ב- Nutrilees)

4.1 מדדים ביבליומטריים- פרסומים מדעיים

בשנים 2008-2000 מספר הפרסומים המדעיים בעולם בתחום המזון האלטרנטיבי, קבוע ונמוך יחסית. משנת 2009 ואילך מסתמן גידול עקבי ומשמעותי במספר הפרסומים¹⁶⁶:

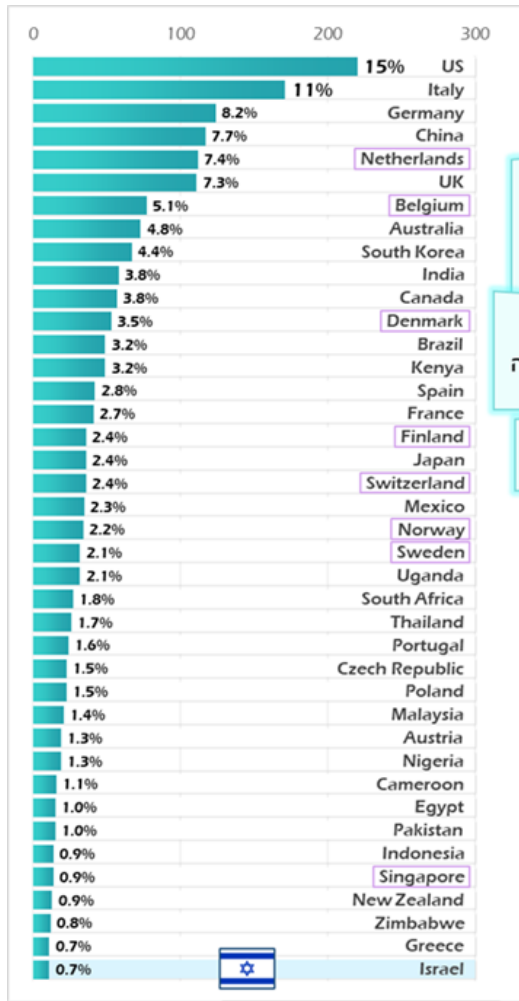
איור 79: מספר הפרסומים בעולם בשנים 2019-2000



כפי שניתן לראות בגרף הבא, ישראל איננה מהמדינות המובילות בעולם בפרסומים בתחום המזון האלטרנטיבי. מבדיקה עולה שב-5 השנים החולפות פורסם מאמר אחד בכל שנה על ידי חוקר ישראלי, ובשנת 2019 חל גידול ל-7 מאמרים. לאור המובילות של התעשייה בישראל בחלק מהתחומים השייכים למזון אלטרנטיבי ניתן לשער שהמחקר בתחום מתבצע ברובו בתעשייה, אך נדרשת בחינה מעמיקה יותר (באמצעות ראיונות) על מנת לבדוק את הסיבות למיעוט הפרסומים בתחום של חוקרים מישראל.

¹⁶⁶ Cultivated food" OR "Cultivated Beverage" OR "Cultured meat" OR "Cell based Meat" OR "Meat analogue" OR "Meat analog" OR "Clean Meat" OR "in vitro food" OR "Alternative protein" OR "sustainable protein" OR "Lab Edible Insects" OR "Edible Insect" OR "Insect Meal" OR "food printing" OR "grown Meat" OR "Animal free Food" OR

איור 80: 30 המדינות המובילות במספר הפרסומים בשנים 2015-2019



ארה"ב מובילה במספר המאמרים בשנים 2015-2019 עם 15% מכמות הפרסומים בעולם; במקום השני - איטליה עם 11%

ישראל ממוקמת במקום ה-40 עם 0.7% מפרסומי העולם באותה תקופה

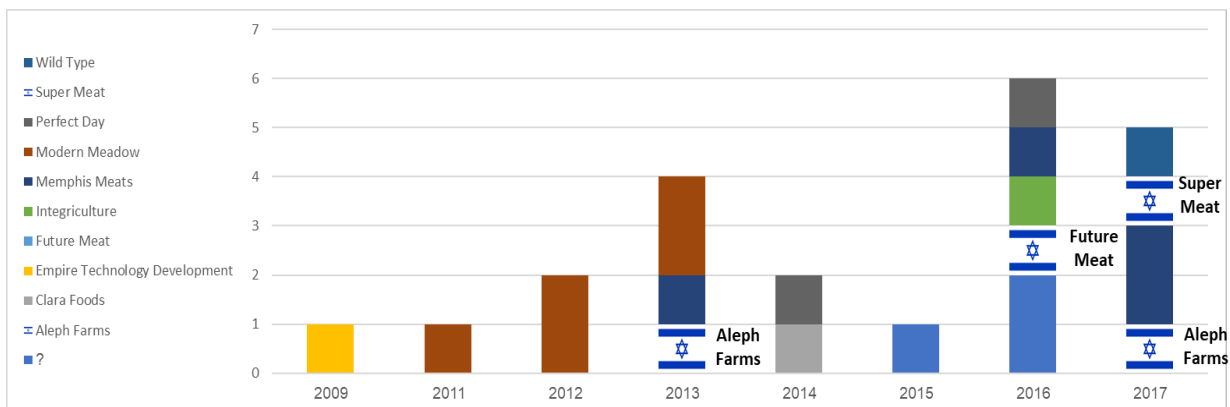
מודגשות בסגול מדינות בנות השוואה לישראל

עיבוד של צוות מוסד שמואל נאמן לנתוני מאגר סקופוס

4.2 בקשות לפטנטים

לפי Yaman (2019), מתוך 22 בקשות לפטנטים (משפחות פטנטים) שהוגשו בעולם בשנים 2009-2017, 4 בקשות לפטנטים הן של חברות ישראליות (קרוב ל-20%), והשאר של חברות אמריקאיות או חברות שאין מידע לגבי מיקומן (3 חברות). החברות המובילות במספר הפטנטים הן Aleph Farms (2 פטנטים בתקופה Future-Meat), עם פטנט אחד בתקופה לכל אחת.

איור 81: פטנטים בתחום הבשר המתורבת (active ו-pending) בשנים 2009-2017



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל-2019, Yaman

5 היתרונות של ישראל בתחום המזון האלטרנטיבי

לפי סקירה של רשות החדשנות (Israel Innovation Authority, 2019) חלים לאחרונה שינויים משמעותיים בשוק המזון העולמי הנובעים ממספר סיבות: גידול בביקוש למזון ללא כימיקלים וחומרים משמרים, הבנה גדלה של ההשפעות הסביבתיות השליליות של חקלאות במדינות מתפתחות, שינויים בשרשרת האספקה שנובעים מהתקדמות בתחומי המחשוב והמידע וגידול האוכלוסייה המביא לגידול כללי בביקוש למזון ומשקאות.

לישראל יתרונות יחסיים בתחום המזון האלטרנטיבי הנובעים בין היתר מיכולת של חוקרים ישראלים לעבוד עם חוקרים אחרים במחקר מולטידיסציפלינרי וממוניטין עולמי של חדשנות בתחום החקלאות. השוק המקומי הוא שוק קטן, אך כ-13% מהאוכלוסייה הם צמחונים (שיעור שהינו בין הגבוהים בעולם), וקיימת פתיחות לנסות פתרונות שונים בתחום זה (Press, 2019).

להלן חלק מהיתרונות של ישראל בתחום המזון האלטרנטיבי לפי תחומים:

בשר מתורבת: בישראל קיים אקו-סיסטם מגובש בתחום זה הכולל מחקר (כולל שיתוף פעולה בין האקדמיה לתעשייה), משקיעים מהארץ ומהעולם, חברות מזון מקומיות ובינלאומיות, חברות הזנק ותמיכה ממשלתית. התוצאה היא נוכחות מרשימה בשוק שהולך ומתגבש (ראו איור 82).

איור 82: גידול במספר חברות הבשר המתורבת בעולם בין השנים 2016 ל-2019*



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל-2019, Dent.
*חברות ישראליות מסומנות בעיגול אפור.

חלבון מהצומח היתרון של ישראל בתחומים אלו הוא בעיקר בתחום חומרי הגלם כמו למשל חלבון המופק מפטריות (דוגמה לחברה בתחום: Kinoko-Tech), חימצה (חומס) (דוגמה לחברות בתחום: InnovoPro, ChickP), צמח המים מנקאי (דוגמה לחברה בתחום: Hinoman) ועוד. בנוסף לפחות שתי חברות עוסקות בהדפסת תלת ממד של תחליף בשר ממקור צמחי, ואחת מהן, Redefined meat, גייסה כ-6M\$ במהלך השנה החולפת להשלמת הפיתוח.

חרקים למאכל: היישומים השונים של חרקים בשירות האדם מהווים דוגמה טובה לקו המקשר בין מספר מוקדים של יתרונות יחסיים שיש לישראל, בכך שהם דורשים אינטגרציה וסינרגיה בין ידע שבמקור נועד לשרת את תחום החקלאות, לדוגמה, ובין ידע בתחומי הכימיה והרפואה; היכולת ליצור חיבור שכזה היא נקודת חוזקה מאפיינת של ישראל, וביכולתה להיות "game-changer" עולמי בתחומים בהם תמומש. מסקירה בינלאומית וראיונות שקיים מוסד נאמן עם אנשי מפתח בתחום, ניכר כי תחומי החרקים לחקלאות ולמזון הם בעלי הפוטנציאל הגדול ביותר בטווחי הזמן המידי עד הבינוני. ראוי לציין שתחום המזון בישראל צפוי להיות מאד מוגבל מסחרית בגלל מגבלת כשרות של מירב סוגי המזון מחרקים (פורטונה et al., 2016).

6 הכשרת כוח אדם לעבודה בתחום מקורות מזון חדשים

ההכשרה הנדרשת היא בתחום הנדסת מזון עם התמחות בתחום החלבון האלטרנטיבי. ההכשרה משתנה בהתאם לתחום הטכנולוגיה המדובר אך מדובר בתחום מדעי מאד ולכן נדרשת הכשרה של תארים מתקדמים בכל המשרות בתחומי הנדסת רקמות, ביוטכנולוגיה ומזון, צמחים, ביולוגיה, כימיה, ואולי אף הנדסת מכונות - עם מכוונות לחלבון אלטרנטיבי. יש גם רלוונטיות גדולה לתחום של מדעי הבשר (כדי לשפר את ה mouth feel של התחליפים מבחינת הטעם, הרכב, טקסטורה). כיום בכל החוגים הללו אין התייחסות לאפליקציות של חלבון אלטרנטיבי ובהעדר תקנים ותקצוב רק בודדים יגיעו באמת לעסוק בתחום במסגרת התמחות או דוקטורט. במסלולי הביוטכנולוגיה ומזון המצב מעט יותר טוב (מבחינת הדגש על תחומי החלבון האלטרנטיבי) - אך זה חלק קטן ולא מעמיק מספיק את הידע הנדרש.

צפוי גידול משמעותי בביקוש בשנים הקרובות ויש להיערך לזה. מתוך זיהוי הצורך וכדי לתת לו מענה GFI ישראל כתבו ומעבירים את הקורס האקדמי הראשון לחלבון אלטרנטיבי בעולם, שמוצע השנה בשלוש אוניברסיטאות (העברית, תל אביב וכן גוריון) ויחשף כ-150 סטודנטים לתארים מתקדמים וראשונים לתחום.

בפקולטה להנדסת ביוטכנולוגיה ומזון קיים מסלול המכשיר מהנדסים לתחום, אבל כמות הבוגרים, במיוחד כאלה המסיימים תארים מתקדמים שהמחקר שלהם מתמקד בתחומי המזון אינו רב. באוניברסיטה העברית יש מסלול של מדעי המזון, במכללת תל חי יש בוגרים בתחומי מדעי המזון, אך אין שם תארים מתקדמים. במכללת אורט בראודה יש מסלול לביוטכנולוגיה שכולל התמחות במזון.

יש צורך בכא בעל תארים גבוהים בתחומי המחקר הרלוונטיים מהנדסי מזון, ביולוגים, מהנדסים ביו-רפואיים. ידע רחב בתהליכי פיתוח, מהנדסים עם ידע בפיתוח טכנולוגיות חדשות לתחום שמשלבות ביו-הנדסה וביוטכנולוגיה. רקע בביולוגיה ובמזון. ידע בהנדסת רקמות וביולוגיה סינטטית.

מבחינת ההכשרה יש בישראל את המומחים שיכולים לתת את הכשרה הן בתחומי החקלאות, הגנטיקה, המזון אך התחום לא מקבל פוקוס מספק באקדמיה.

להלן דוגמאות ממוסדות להשכלה גבוהה בהן קיימות תוכניות להכשרה בתחום:

האוניברסיטה העברית/הפקולטה לחקלאות

התמחות בביוטכנולוגיה ומדעי הצמח בחקלאות - התוכנית המקנה לסטודנטים את הידע הדרוש לעסוק בביוטכנולוגיה בתעשייה, בפיתוח המדעי, הניהול והשיווק וכן ללימודים לתארים מתקדמים. התוכנית הינה תוכנית משותפת לחוגים של מדעי הצמח, מדעי בעלי החיים, ביכמיה ומדעי המזון, אגרוטכנולוגיה ובריאות הצמח וכלכלה חקלאית ומנהל. **תוכנית הלימודים** כוללת לימודי תשתית במדעי החיים ולימודי התמחות כגון: הנדסה גנטית, גנטיקה מולקולרית, גנומיקה ופרוטאומיקה, אימונולוגיה, תרבויות תאים, תהליכי תסיסה ועוד. משך הלימודים 3 שנים בסיומן מקבלים את התואר B.Sc. בהתמחות בביוטכנולוגיה ומדעי הצמח בחקלאות. בוגרי התוכנית יוכלו להשתלב בתעשיות הביו-טק והיי-טק כולל חברות העוסקות בפיתוח מוצרים בתחום החקלאות, המזון והרפואה, בביו-אינפורמטיקה ובגנומיקה

הטכניון

תואר ראשון בהנדסת ביוטכנולוגיה ומזון. תוכנית הלימודים מבוססת 3 תחומים עיקריים: מדעי החיים והביוטכנולוגיה, הנדסה ומדעי המזון. בתום שנתיים, הסטודנט בוחר באחד משני מסלולי התמחות: **ביוטכנולוגיה** – מסלול המציע קורסים מתקדמים בביוטכנולוגיה מולקולרית (הנדסה גנטית), מיקרוביולוגיה, תהליכי תסיסה, תהליכי הפרדה והשבה, ביולוגיה מולקולרית, אימונולוגיה ועוד. **הנדסת מזון** – במסלול זה מתמחה הסטודנט באספקטים הקשורים בהנדסה וטכנולוגיה של מזון, באריזה, תכנון מפעלים, תהליכי בקרה, מזון פונקציונלי, כלכלה, שיווק וניהול, אבטחת איכות ואמינות ועוד. בוגרי תואר ראשון בהנדסת ביוטכנולוגיה ומזון מקבלים בסיום לימודיהם תואר BSc משולב “**מוסמך בהנדסת ביוטכנולוגיה ומזון.**”

בנוסף, הפקולטה להנדסת ביוטכנולוגיה ומזון בטכניון מציעה מגוון מסלולים **לתארים מתקדמים**. לדוגמא, לימודים לתואר מגיסטר - **מגיסטר למדעים בהנדסת ביוטכנולוגיה ומזון**

אוניברסיטת בן גוריון

תואר ראשון בהנדסת ביוטכנולוגיה - ארבע שנות הלימוד לתואר מהנדס ביוטכנולוגיה מאפשרות לסטודנטים ללמוד שילוב ייחודי של קורסים בסיסיים במדעי ההנדסה, ביולוגיה, כימיה ופיסיקה ובהמשך, קורסים מתקדמים בהנדסת ביוטכנולוגיה הכוללים: הנדסה גנטית, ביוריאקטורים והפרדת חלבונים, תרבויות תאים, כמו גם אתיקה ומשפט בביוטכנולוגיה ומנהל עסקים.

באוניברסיטת בן גוריון קיים גם **תואר שני בהנדסת ביוטכנולוגיה**.

מכללת אורט בראודה

במסגרת התואר ראשון **בהנדסת ביוטכנולוגיה** ישנה התמחות **במזון** החל מהשנה החמישית.

גם במסגרת התואר השני **בהנדסת ביוטכנולוגיה** ישנן תוכניות המשלבות התמחות במזון.

המכללה האקדמית "תל חי"

תואר ראשון - במדעי המזון-פודטק - במסלול זה מכשירים את הסטודנטים לפיתוח של מוצרי מזון חדשים. **סדנא לפיתוח מוצרי מזון** - קורס הדגל של החוג למדעי המזון, בשנה השלישית הסטודנטים מתחלקים לקבוצות של 3-4 סטודנטים ובהם הם נדרשים להציע רעיון למוצר חדשני שלא קיים בשוק ובעזרת הכלים שיש להם במטבח המזון, מעבדת החלב, מעבדת החישה והמחקר של תל-חי הם מפתחים את המוצר במשך שנה שלמה

המכללה האקדמית הדסה

תואר ראשון בביוטכנולוגיה - הלימודים בחוג לביוטכנולוגיה במכללה האקדמית הדסה שמים זרקור והדגשה על המחקר היישומי. ההכשרה המלאה מאפשרת לסטודנט המסיים לעבוד בתחום הרפואה, המזון או חקלאות – בביולוגיה מולקולארית, תכנון תרופות ופרמקוגנומיקה, מבנה חלבונים, שימוש בביו-אינפורמטיקה, מיקרוביולוגיה וגנטיקה מולקולארית.

7 סיכום צורכי כוח אדם לתחום מקורות מזון חדשים

קיים קושי בגיוס כ"א עם הכשרה מתאימה וניסיון רלוונטי. מאחר שהתחום כל כך חדשני, מספר החוקרים שלמדו או חקרו אותו עדין קטן. הדבר גורם לכך שיוזמות רבות לחדשנות אינן מקבלות מענה.

כיום יש מחסור בחוקרים בתחום החלבונים האלטרנטיביים עם דגש על מחסור בחוקרים בתחום הבשר מהצומח, תעשייה שהולכת לצמוח באופן משמעותי ב-10-15 שנה הקרובים.

תחום החלבונים האלטרנטיביים התחום בעצם חולש על שלוש תחומי טכנולוגיה מרכזיים (בשר מתורבת, פרמנטציה ומזון מן הצומח) ולכל אחד מהם צרכים שונים בחינת כוח אדם והכשרה, לכל אחד צרכי התמחות שונים, אך לכולם מחנה משותף של הנדסת מזון. בנוסף לכך התמחות במדעי הבשר (הרכב בשר, טעמי בשר, טקסטורת בשר) יכולה להיות רלוונטית לכל התחומים.

בפרמנטציה לא נראה שיש חוסר במומחים, אם כי נדרשת הכשרה שלהם להבנה מעמיקה יותר על ההזדמנויות בתחום החלבונים האלטרנטיביים. אופציה מעניינת להכשרה היא יציאה לפוסט-דוק למעבדות המתמחות בתחומים אלו בעולם והשבתם לארץ לפתיחת מעבדות אשר ירכשו כלים ממעבדות של מומחים עולמיים.

לאחרונה נוצרה הבנה על גודל השוק ורצון של גורמים רבים (משקיעים, חברות מזון) לקידום התחום, עם זאת, יצירת מומחים לוקחת זמן ויש לשים עליה יותר דגש.

בתחום "פיתוח מקורות חלבון מחרקים" אחת הבעיות היא הצורך לאתר אנשים המסוגלים "לקרוא" את החרקים ולתרגם זאת לטיפול טוב יותר ומיקצועי יותר באורגניזם. הקשיים שהועלו בנושא: כוח אדם תפעולי מייקר מאד את התוצר הסופי, בראיונות עבודה מתגלה פער בין יכולת מקצועית, מוכנות לעבודה בפועל ולדרישות שכר ותנאים, חוסר מעוף וחשיבה מחוץ לקופסה. נדרש שינוי בתפישת הלימוד באקדמיה כל מנת להכשיר כא לתחום.

תחום מקורות המזון האלטרנטיביים הוא תחום רחב שככל הנראה ידרוש ידע גם בעולמות הגידול (חקלאות, קרקע, אולי אף אנטומולוגיה) וגם בדרכים להפוך את הגידולים הללו למזון דבר שידרוש אנשי הנדסת מזון שיכולים לתרום לתחומי הייצור, התזונה, הבטיחות וכד'. כמו כן, בדומה לתחומים רבים נוספים יש צורך באנשים בעלי יכולות בתחום ה bigdata.

יש מחסור וביקוש של חברות לאנשים בעלי תארים גבוהים שהינם גם בעלי ניסיון בתחום המזון וגם הבנה הנדסית טכנולוגית.

8 מסקנות ותובנות לגבי צורכי כוח אדם לתחום

להלן התובנות העיקריות שעלו מהעבודה שכללה ראיונות, שאלונים¹⁶⁷ וסקירת מקורות מידע לגבי כוח אדם נדרש לקידום והתפתחות תחום מקורות מזון אלטרנטיביים:

תעשיית החלבונים האלטרנטיביים הולכת לצמוח באופן משמעותי בשנים הקרובות ועל כן סביר ותדרש הגדלת כוח האדם.

נדרשות הכשרות מעמיקות בתחום החלבונים האלטרנטיביים, שעוסקים בהבנת תהליכי עיבוד של חלבונים למזון, בפונקציונליות של חלבונים ובהתאמה שלהם לתחליפים ובמדעי הבשר/ביצים/חלב כדי לחבר תכונות רלוונטיות ליצירת תחליפים.

תעשיית המזון מן החי היא אחד הגורמים המשמעותיים ביותר למשבר האקלים ומהווה סכנה לבריאות הציבור. תעשייה זו גורמת ליותר פליטות גזי חממה מכל סקטור התחבורה העולמית, ומשתמשת ב-70% מהשטחים החקלאיים וברוב המים המתוקים. היא מהווה את הגורם המרכזי לזיהום מקורות מים וקרקעות, לביעור יערות ליצירת חיידיקים עמידים לאנטיביוטיקה ולהתפשטות מגפות זואווניות. יש צורך למצוא דרך בריאה ומקיימת יותר להזין את אוכלוסיית העולם הגדלה. מדינת ישראל יכולה להוביל במאמץ גלובלי זה.

- העלאת המודעות למסלולי לימוד כמו מדעי המזון והנדסת ביוטכנולוגיה ומזון בקרב מתעניינים בלימודים אקדמאים יכולה להיות משמעותית למשק הישראלי ולסטודנטים עצמם. הכשרות מעמיקות בחלבונים אלטרנטיביים - עיבוד חלבונים, פונקציונליות של חלבונים, הבנת תכונות בשר.
- הכשרה חשובה הן למומחי פרמנטציה הן לחברות פיתוח זני צמחים היא העמקה בחלופות בשר, בצרכים של התעשייה. כיום ישנו שימוש בפרמנטציה ופיתוח זני צמחים למטרות אחרות ונראה כאילו הכשרות והבנה מעמיקה בפיתוח חלופות בשר יכולה לעזור לחברות הללו להיכנס לתחום.
- יש צורך ביותר קורסים יעודיים לנושא ויותר מעבדות מחקר בתחום.

¹⁶⁷ המשיבים לשאלון: פרופ' רם רייפן, ד"ר תום בן אריה, חנן אביב, ניר גולדשטיין, פרופ' אבי שפיגלמן ופרופ' שולמית לבנברג.

- Barrett, E. (2019). China offers plant-based meats a huge market. Retrieved November 24, 2019, from <https://fortune.com/2019/10/05/plant-based-meats-china-impossible-beyond/>
- Bashi, Z., McCullough, R., Ong, L., & Ramirez, M. (2019). Alternative proteins: The race for market share is on. Retrieved November 6, 2019, from <https://www.mckinsey.com/industries/agriculture/our-insights/alternative-proteins-the-race-for-market-share-is-on>
- Benjamin, O. (2018). Harnessing the Startup Nation for Good Food Innovation. Retrieved November 12, 2019, from <https://www.gfi.org/gfi-applauds-joint-statement-from-usda-fda>
- Bogin, Y. (2018). The Good Food Institute and Israeli Clean Meat Innovation. Retrieved from [https://www.ey.co.il/userfiles/2_dr_yaron_bogin\(2\).pdf](https://www.ey.co.il/userfiles/2_dr_yaron_bogin(2).pdf)
- Cameron, B., Neill, S. O., & Bushnell, C. (2019). *Industry Report: Plant-based Meat , Eggs , and Dairy*.
- Cameron, B., & Shannon, O. (2019). *State of the Industry Report, Cell-based Meat*.
- Dent, M. (2019). Plant-based and Cultured Meat 2020-2030. Retrieved November 13, 2019, from <https://www.idtechex.com/en/research-report/plant-based-and-cultured-meat-2020-2030/702>
- European Commission. (2018). Legislation | Food Safety. Retrieved from https://ec.europa.eu/food/safety/biosafety/irradiation/legislation_en
- European Commission. (2019). Smart Protein for a Changing World. Retrieved November 24, 2019, from <https://cordis.europa.eu/project/rcn/225172/factsheet/en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). Insects for food and feed. Retrieved from <http://www.fao.org/edible-insects/en/>
- Gerhardt, C., Suhlmann, G., Ziemßen, F., Donnan, D., Warschun, M., & Kühnle, H.-J. (2019). *How Will Cultured Meat and Meat Alternatives Disrupt the Agricultural and Food Industry?* Retrieved from <https://www.atkearney.com/retail/article/?a/how-will-cultured-meat-and-meat-alternatives-disrupt-the-agricultural-and-food-industry>
- Gerhardt, C., Ziemben, F., Warschun, M., Suhlmann, G., Donnan, D., & Kuhnle, H.-J. (2018). *How Will Cultures Meat and Meat alternatives Disrupt the Agricultutral and Food Industry*. Retrieved from <https://www.atkearney.com/documents/20152/2795757/How+Will+Cultured+Meat+and+Meat+Alternatives+Disrupt+the+Agricultural+and+Food+Industry.pdf/06ec385b-63a1-71d2-c081-51c07ab88ad1?t=1559860712714>
- Griffiths, M., Harrison, S. T. L., Smit, M., & Maharajh, D. (2016). Major Commercial Products from Micro- and Macroalgae (pp. 269–300). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12334-9_14

- Holban, A. M., & Grumezescu, A. M. (2018). *Alternative and Replacement Foods*. *Alternative and Replacement Foods* (Vol. 17). <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00621-6>
- Israel Innovation Authority. (2019). Israel Innovation Authority Report: The Potential of Israeli Foodtech. Retrieved November 13, 2019, from <https://innovationisrael.org.il/en/news/israel-innovation-authority-report-potential-israeli-foodtech>
- Kaplan, A., Zelicha, H., Tsaban, G., Yaskolka Meir, A., Rinott, E., Kovsan, J., ... Shai, I. (2019). Protein bioavailability of *Wolffia globosa* duckweed, a novel aquatic plant – A randomized controlled trial. *Clinical Nutrition*, 38(6), 2576–2582. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2018.12.009>
- King, T., & Lawrence, S. (2019). *Meat the Alternative*. Retrieved from <https://www.foodfrontier.org/wp-content/uploads/2019/09/Meat-the-Alternative-Food-Frontier.pdf>
- Lagally, C., Rees Clayton, E., & Specht, L. (2017). *Plant-Based Meat Mind Maps: An Exploration Of Options, Ideas, and Industry*. Retrieved from <https://www.gfi.org/files/PBMap.pdf>
- Laxmi, V. (2019). *Synthetic (Cultured) Meat : Technologies and Global Markets*.
- Laxmi, V. (2020). *Plant-Based Protein : Global Markets*.
- McCracken, christine. (2018). Alternative Proteins: Hype or Hope. Retrieved November 17, 2019, from <https://www.pork.org/wp-content/uploads/2018/04/Key-to-Food-Security-Christine-McCracken.pdf>
- Press, G. (2019). Want To Invest In The Next Beyond Meat? Check Out The 252 Foodtech Startups In Israel. *Forbes*. Retrieved from <https://www.forbes.com/sites/gilpress/2019/07/29/want-to-invest-in-the-next-beyond-meat-check-out-the-252-foodtech-startups-in-israel/#410d08884c82>
- Ranghar, S., Agrawal, S., & Agrawal, P. K. (2019). Microbial Products: Protein, Enzyme, Secondary Metabolites and Chemicals. In *Microbial Interventions in Agriculture and Environment* (pp. 347–384). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9084-6_17
- Rausnitz, S. (2019). *Start-Up Nation Central Finder Insights Series:Israel's Agrifood-Tech Sector, 2019*.
- Siegner, C. (2019). Could India become the next cell-cultured meat hub? Retrieved November 24, 2019, from <https://www.fooddive.com/news/could-india-become-the-next-cell-cultured-meat-hub/554578/>
- Suganya, T., Varman, M., Masjuki, H. H., & Renganathan, S. (2016). Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 909–941. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.11.026>

van der Weele, C., Feindt, P., Jan van der Goot, A., van Mierlo, B., & van Boekel, M. (2019). Meat alternatives: an integrative comparison. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 505–512. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2019.04.018>

Yaman, R. (2019). Cultured Abundance. Retrieved November 14, 2019, from <https://www.culturedabundance.com/>

Yeshua, I. (2019). Edible Insects Market. Retrieved December 31, 2019, from <https://medium.com/forwardfooding/edible-insects-market-465217ae4774>

פורטונה, ג., ליבס, ע., & פרוינד קורן, ש. (2016). חרקים בשרות האדם, רקע והמלצות לפעולה לעיר עפולה כמוקד לקידום התחום-6. Retrieved from <https://www.neaman.org.il/Files/6-התחום-לקידום-התחום-6-468.pdf>

. Retrieved November 11, 2019, חם ממטבחי חממת הפוד-טק, from <http://innovationisrael.mag.calltext.co.il/magazine/51/articles/757>

! Retrieved November 11, 2019, מדינת ישראל מעצמה טכנולוגית גם בתחום המזון (2019a). Retrieved November 11, 2019, from https://innovationisrael.org.il/press_release/4441

רשות החדשנות. (2019b). קול קורא להצעות עבור הקמת חממה טכנולוגית חדשה בתחום טכנולוגיות המזון (פודטק). Retrieved November 11, 2019, from <https://innovationisrael.org.il/kol-kore/3965>

תקשורת לוויינים



החלל הוא משאב אסטרטגי והפעילות האנושית בחלל מהווה מנוף טכנולוגי ומוקד משיכה לכוח אדם מדעי וטכנולוגי איכותי. השקעות בחלל מקדמות את צורכי הביטחון הלאומי, התעשייה והכלכלה, המדע והטכנולוגיה ומסייעות בשיפור המעמד הגיאופוליטי של המדינה (פייקובסקי & לוי, 2010).

תעשיית החלל מורכבת מארבעה סגמנטים עיקריים¹⁶⁹: ייצור (סגמנט הייצור רחב וכולל: ייצור לוויינים למטרות וגדלים שונים, ייצור אנטנות לתחנות קרקע וללוויינים, ייצור מכלולים עבור הלוויינים, מודמים, וכד'), שיגור, תחנות קרקע וחברות המספקות שירותים בתחומי התקשורת והחיישה מרחוק, בעבודה זו נתמקד בתעשייה העוסקת בתחום התקשורת.

גישה לתשתיות תקשורת, מידע וידע היא תנאי הכרחי להתפתחות כלכלית ולמעבר ל"חברת מידע". בכלכלות מתפתחות ובאזורים מרוחקים בכלכלות מפותחות, עיקר הגישה לרשת התקשורת הגלובלית נעשית באמצעות לוויינים. תקשורת לוויינים מאפשרת חיבור בין אזורים בכדור הארץ שאינם נגישים דרך רשתות תקשורת קונבנציונאליות. עד היום תקשורת לוויינים התבצעה באמצעות לוויינים גדולים ויקרים. תקשורת הלוויינים נחשבת כיום ליקרה למדי, ומסתמכת בעיקר על לוויני תקשורת גדולים וכבדים הממוקמים במסלול בגובה של עשרות אלפי קילומטרים מעל כדור הארץ. בגובה זה, הלוויינים יכולים לכסות חלק משמעותי מכדור הארץ ולתקשר עם לוויינים אחרים בקו ישיר (ESRE, 2017).

קיימים שלושה סוגי מסלולי לוויינים: LEO, MEO ו-GEO. הטבלה הבאה מפרטת את מאפייני המסלול ואת היתרונות והחסרונות של סוג.

טבלה 9: מאפייני סוגי מסלולי לוויינים

מאפייני המסלול	לוויין GEO	לוויין MEO	לוויין LEO
	Geostationary Earth Orbit satellite	Medium Earth Orbit Satellite	Low Earth Orbit Satellite
זמן מסלול	24 hours	2 to 8 hours	10 to 40 minutes
גובה הלוויין	35,800 km	5000 to 12000 km	500 to 1500 km
אורך חיי הלוויין	ארון	ארון	קצר
מספר הלוויינים הדרוש לכיסוי מלא של כדור הארץ	3	20-80	40-80
יתרונות	מכסה שטח גאוגרפי גדול, דרושים רק שלושה לווייני GEO לכיסוי כדור הארץ. נמצא 24 שעות מעל מיקום קבוע על פני האדמה אידיאלי לשידור לוויני ותקשורת מרובת-נקודות	בגובה זה מספר הלוויינים הנדרש לכיסוי מלא של כדור הארץ נמוך יותר בהשוואה ללוויינים במסלולי LEO. זמן העיכוב עד להעברת המידע קטן יותר בהשוואה ללוויין GEO	לוויין LEO מספק את האות החזק ביותר מכיוון שהוא הכי קרוב לכדור הארץ. גם זמן העיכוב הוא נמוך ביותר מאותה סיבה.
חסרונות	קיים עיכוב משמעותי עד להעברת המידע מכיוון שהלוויין נמצא מעל קו המשווה, הוא נתקל בקושי בשידור קרוב לאזור הקוטב.	האות חלש יותר לעומת LEO מכיוון שהוא במסלול גבוה יותר מ-LEO. נמצא למשך שעתיים עד 8 שעות מעל מקום מסוים בכדור הארץ.	נדרש מספר גדול מאוד של רשת לוויינים נמצא רק למשך 15 עד 20 דקות מעל אזור מסוים

מקור: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/GEO-satellite-vs-MEO-vs-LEO-vs-Molniya-satellite.html>

¹⁶⁸ תודתנו לאבנר קידר, מוטי חיימוביץ ואבי בלסברגר, על הראיונות שקיימנו איתם בנושא ולעופר גולדהירש מרשות החדשנות על הערותיו ועל עזרתו במיקוד הסקירה.

¹⁶⁹ החלוקה לסגמנטים המרכיבים את תחום החלל מסתמכת על דו"ח של חברת Space Foundation. מיפוי החברות הישראליות הכלולות בסגמנטים השונים מסתמך על ההרצאה של ד"ר נילי מנדלבלית ועופר לפיד בכנס החלל הבין לאומי השנתי ע"ש אילן רמון בתאריך 30.1.13.

בשנים האחרונות חברות שונות החלו להציע טכנולוגיות חדשות לתקשורת לוויינים. לדוגמה, אילון מאסק, בעליה של חברת SpaceX, יזם פרויקט Starlink - בו ישוגרו בשלב הראשון 12,000 לוויינים. 122 לוויינים כבר בחלל (נכון ל 11/2019). יתר הלוויינים ישוגרו בקצב שיגור של 60 לוויינים פעם בשבועיים. בשלב הראשון, ישוגרו הלוויינים לשלוש מעטפות גובה 340 ק"מ, 550 ק"מ ו 1,159 ק"מ - תחום ה LEO¹⁷⁰. עד כה, SpaceX, עסקה בתכנון, ייצור ושיגור טילים וספינות חלל, כעת מנסה החברה להיכנס לתחום של ייצור לוויינים. גרג ויילר, מייסד חברת הלוויינים WorldVu¹⁷¹ המספקת פתרונות תקשורת ללוויינים יוביל את הפרויקט של SpaceX. פיתוח דומה הוצע גם על ידי המיליארדר הבריטי ריצ'רד ברנסן וחברת קוואלקום שהודיעו על הקמת רשת תקשורת לוויינים דומה, בשם One Web LTD (עילם, 2015)¹⁷².

טלוקומוניקציה מבוססת חלל (תקשורת לוויינים) מייצגת את הפעילות המסחרית הגדולה ביותר בכל השווקים הקשורים לחלל. טכנולוגיות לתקשורת לוויינים הקיימת כיום מבוססת בעיקר על חילופי מידע באמצעות תדרי רדיו. זהו אחד האתגרים של תחום זה. תדרי הרדיו הזמינים לגישה הינם מוגבלים מאוד, זוהי התמודדות הן טכנולוגית והן רגולטורית.

על פי דו"ח של ESRE בנושא טכנולוגיות חלל נבחרות שעתידות לשנות את העשור הבא, שוק התקשורת המסורתית, המבוסס על לוויינים גיאוסטציונריים¹⁷³, צפוי להישאר יציב למדי. למרות זאת, צפויים להיכנס לשוק טכנולוגיות חדשות, המבוססות על קבוצות לוויינים קטנים במסלולי LEO, המשתמשות במאות ואפילו אלפי לוויינים (למשל OneWeb)¹⁷⁴.

על פי דו"ח של חברת BCCResearch (Gaurav, 2018) בנושא תקשורת לוויינים (Satellite Communications), הכנסות שוק טכנולוגיות התקשורת הלוויינית הסתכמו בשנת 2016 ב-3.8 מיליארד דולר וצפויים להגיע לכמעט 7.5 מיליארד דולר בשנת 2022, בקצב צמיחה שנתי ממוצע (CAGR) של 10.5% בתקופת זו. עם זאת, צמיחת שוק טכנולוגיות התקשורת הלוויינית כיום מוגבל על ידי גורמים שונים כגון: עלות ייצור גבוהה - עלות טכנולוגיית התקשורת הלוויינית כוללת את עלות ייצור הלוויינים, שיגור הלוויינים והשקעות בפלח קרקעי ו/או בתחנות בסיס לניהול ושליטה על לוויין. בנוסף קיימים מגבלות נוספות כגון: הוצאות הכבדות של פיתוח ושיגור לוויינים שלוקח שנים להשלמתם, פריסת הלוויינים תלויה בשיגור מוצלח; בתנאי מזג אוויר - המשפיעים על העברת התקשורת ועלולים לגרום להפרעה או לעיכוב בקבלה או בשליחה. גורם נוסף, לוויינים סטנדרטיים הם בעלי אורך חיים של 12 עד 15 שנה, כך שצריך להחליף כל לוויין לפני תום תוחלת החיים שלו ולכן, יש מקום לפיתוח טכנולוגיות חדשות בתחום זה (Gaurav, 2018). כיום, לווייני התקשורת משמשים במגוון רחב של שימושים שונים, ולהלן העיקריים שבהם (Labrador, 2019):

- **שידורי טלוויזיה ישירים לציבור - DBS**, המשודרים מתחנת קרקע דרך הלוויין ישירות לבתיים של מנויי שירותי טלוויזיה רב ערוצים.
- **הפצת ערוצי טלוויזיה** בין אולפנים ומוקדי שידור אל מערכות טלוויזיה בכבלים.
- **שרותי דיווח חדשותי של ערוצי טלוויזיה ממקום התרחשותם** של האירועים (אירועים מתוכננים כגון אירועי ספורט או קונצרטים, או אירועים חדשותיים כגון אסונות טבע, מלחמות ופיגועים).
- **טלפוניה רב ערוצית** - חיבור מנקודה לנקודה בין שתי תחנות קרקע של אפיקי טלפוניה רבי ערוצים, לצורך תקשורת בינלאומית או בין עירונית. בעוד שימוש זה היה בתחילת ההיסטוריה של לווייני התקשורת הנפוץ ביותר, הוא הולך ונדחק על-ידי כבלים אופטיים תת-

¹⁷⁰[https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink_\(satellite_constellation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink_(satellite_constellation))

¹⁷¹ חברת WorldVu Satellites המכונה כיום OneWeb, היא חברת תקשורת עולמית הממוקמת בלונדון.

¹⁷²<https://oneweb.world/>

¹⁷³<https://www.calcalist.co.il/internet/articles/0,7340,L-3650118,00.html>

¹⁷⁴ לוויין גיאוסטציונרי הוא לוויין במסלול גיאוסטציונרי (באנגלית: Geostationary Earth Orbit - GEO) הוא מסלול מעגלי סביב כדור במרחק של 35,786 ק"מ מעל קו המשווה. תכונתו העיקרית של מסלול זה היא כי הלוויין מסתובב במהירות זהה לזו של כדור הארץ, ועל כן ייראה מכדור הארץ כנייח. תכונה זו מאפשרת להעביר שירותי תקשורת לאזורים מוגדרים על פני כדור הארץ לאנטנות הממונות בזווית קבועה לנקודה ספציפית בחלל (ויקיפדיה, ערך: לוויין גיאוסטציונרי ומסלול גיאוסטציונרי)

¹⁷⁴https://esre-space.org/wp-content/uploads/2018/01/ESRE_Whitepaper_-2017.pdf

- ימיים המעבירים ערוצי טלפוניה בכמות גדולה בהרבה ובעלות נמוכה יותר. עם זאת, יש עדיין שימוש נרחב בשירות הזה במדינות מתפתחות, בתקשורת לערים מרוחקות, וכגיבוי לשעת חירום למקרה של קריסת הכבלים האופטיים.
- **טלפוניה ניידת** - שרות טלפון למנויים בודדים הנמצאים באזורים מרוחקים בהם אין קישור לטלפונים סלולריים, לרבות תקשורת טלפונית לכלי שיט וכלי טיס.
- **תשתית לרשתות סלולריות** כאשר ממסרי הרשת נמצאים באזורים מבודדים.
- **תקשורת נתונים למערכות עסקיות גדולות**
- **תקשורת אינטרנט לאזורים מרוחקים** כאשר לא כלכלי או בלתי אפשרי לחבר מנויים לתשתית הטלפונית או לתשתית הטלוויזיה בכבלים.
- **הפצת סרטי קולנוע** בפורמט דיגיטלי מאולפנים למספר רב של בתי קולנוע בו-זמנית.
- **תקשורת לוויינים צבאית** - מגוון רחב של שימושים כגון: קשר לכלי טיס וכלי שיט, קשר לכוחות מבצעיים באזורי לחימה, הנחיית חימוש מונחה, תקשורת בין מפקדות, ותקשורת מלווייני בין וצילום אל תחנות קרקע על פני כדור הארץ.

התפתחויות עיקריות בתחום טכנולוגיית התקשורת הלוויינית ותחזיות עתידיות:

בשנים האחרונות חלה התקדמות רבה בטכנולוגיית תקשורת לוויינים. להלן מספר דוגמאות (ESRE 2017):

- SpaceX צפויה לשלוח לחלל טכנולוגיית נאס"א שתאפשר ללוויינים לתקן חלליות אחרות בחלל.
- 4,500 לוויינים צפויים להיות משוגרים למסלול נמוך סביב כדור הארץ בכדי להבטיח כיסוי פס רחב טוב יותר ומהיר יותר. לדוגמא, הפרויקט של SpaceX מטרתו לאפשר גישה רחבה יותר לאינטרנט בארה"ב עד שנת 2020.
- יושק גם ISRO Synthetic Aperture Radar Satellite של נאס"א, לצורך גישה ותקשורת טובים יותר לאינטרנט.
- Raytheon מפתחת מערכת טילים שצפויה לקיים תקשורת דו כיוונית עם האובייקטים בשטח.
- DARPA ו-SSL מפתחים לוויינים שיהיו מודולריים ממערכות תקשורת לווייניות הקיימות כיום.
- הודו עשתה טביעת רגל חזקה בתעשיית החלל המסחרית העולמית באמצעות שיגור מספר רב של לווייני תקשורת.

על פי התחזיות, שוק הטכנולוגיות לתקשורת לוויינים ימשיך לצמוח. בעשור הבא צפוי שיגור של מאות לוויינים גדולים ואלפי ננו-ומיקרו-לוויינים לאטמוספירה של כדור הארץ. התחזית היא כי התפתחויות מסוג זה יביאו את הדור הבא בתחום התקשורת הלוויינית. יתר על כן, פיתוח של טכנולוגיות בתחום זה ימלאו תפקיד מפתח בתחום הביטחוני והממשלתי. לדוגמא, בארה"ב ב-2017 הושק ה-SATCOM של בואינג, כשהמטרה היא להבטיח כי ארה"ב ושש מדינות בעלות הברית האחרות יוכלו להגביר את התקשורת, כמו גם לאפשר להן להגן על עצמן מפני התקפות טרור, למנוע אותן ולהגיב עליהן. מנגד, רוסיה וסין מפתחות מערכות נשק המשמידות לוויינים במסלול, ומעמידות את כל הלוויינים ברחבי העולם בסיכון (Gaurav, 2018).

טכנולוגיית תקשורת לוויינים והתקני לוויין היו חלק מהטכנולוגיות בתחום שהביאו לשינוי בתעשיית התקשורת. הצפי הוא כי בשנים הבאות רשתות המבוססות על טכנולוגיות מסורתיות יעברו לרשתות תקשורת מבוססות לווייניים בשל יתרונות הנגישות והדיוק היותר טובות שלהן. יתרה מזאת, מערכות של תקשורת לווייניות ישמשו בוורטיקליים שונים בתעשייה, כגון: תחבורה ולוגיסטיקה, קמעונאות, ביטחון ומעקב, ואלה צפויים להביא את שוק טכנולוגיות תקשורת לוויינים לעידן חדש.¹⁷⁵ טכנולוגיית תקשורת לוויינים מהירה זולה ומתקדמת יותר תביא לשימוש רחב של טכנולוגיות אחרות המתפתחות כיום כמו יישומי IOT ("אינטרנט של הדברים") (Gaurav, 2018).

Sinha G. Gaurav (2018), Satellite Communications: Global Market Through 2022, BCCResearch ¹⁷⁵

טכנולוגיות מובילות בתחום תקשורת לוויינים שהמלצו בדו"ח של (ESRE, 2017):

בשנת 2017 איגוד החלל האירופאי למחקר פרסם דו"ח העוסק במגמות וטכנולוגיות חלל שנבחרו לעצב את העשור הבא. אחד התחומים שהדו"ח עוסק בו הוא תקשורת לוויינים. להלן טכנולוגיות מפתח מומלצות שהדו"ח מציע להתייחס אליהן:

- Research and development of bi-directional optical feeder links to geostationary orbit and HAPS (High-Altitude Pseudo-Satellite)
- Elaboration of concepts for next generation collaborative small satellite data telecom constellations
- Research and development of small-scale transmitters/receivers for optical inter-satellite links
- Research and development of quantum-safe optical telecommunication

2 פעילותה של ישראל בתחום תקשורת הלוויינים

ישראל החלה את פעילותה בחלל בראשית שנות ה-80, ושיגרה מאז לחלל לוויינים אחדים, לשימושים צבאיים (לוויינים מסדרת אופק), לשימושים אזרחיים (לוויינים מסדרת עמוס), ולמחקר (לווייני טכסאט)¹⁷⁶. פעילותה של מדינת ישראל בתחום החלל הניבה תרומות רבות לכלכלה, לקידום המחקר המדעי והטכנולוגי ולפיתוח ההון האנושי. במהלך השנים השתלבה ישראל בפרויקטים מחקריים וטכנולוגיים בין-לאומיים בתחום החלל, וקיבלה הכרה ומוניטין בעולם על הישגיה ויכולותיה. במקביל, פיתחה מדינת ישראל מערך אקדמי שסיפק תמיכה מחקרית ומדעית בפקולטות הרלוונטיות. (גץ, בכניק, זלמנוביץ, לביד, & בראזני, 2014)¹⁷⁷

ההשקעה של ממשלת ישראל בתחום החלל בשנת 2018 הייתה כ-82 מיליון שקלים. ב-2019 הודיע ראש הממשלה לאחר ניסיון הנחתת גישושים ישראלית על הירח במימון תורמים, כי הוא שוקל לקדם "תוכנית חלל" ישראלית חדשה אשר תתקצב במימון ממשלתי וציבורי⁸.

לווייני התקשורת בישראל הנקראים "עמוס" מתפעלים על ידי חברת חלל תקשורת. סדרת "עמוס" היא סדרת לווייני תקשורת אזרחיים. עד היום נבנו 10 לווייני תקשורת מסדרת עמוס. מרביתם נבנו על ידי התעשייה האווירית. חלל תקשורת התחילה כספקית שרותי תקשורת לוויינית של עמוס 1 שיוצר על ידי התעשייה האווירית בשנת 1996 (פירוט על לווייני תקשורת עמוס בנספח ו').

בשל צרכים ביטחוניים ומגבלות גודל ומשאבים, בחרה ישראל להתמקד בעיקר בשני תחומים של טכנולוגיות החלל: חישה מרחוק ותקשורת. הלוויינים אשר פותחו בישראל הם קטנים יחסית ללוויינים בעלי ביצועים דומים בעולם. איכות ההון האנושי הגבוהה והחתיירה המתמדת להצטיינות בתחומי הביטחון וההגנה, מקנות לישראל יתרון תחרותי גם בתחום החלל (גץ, כצמן, פייקובקי, & אחרים, 2008) (בן יוסף & כהן, 2011).

3 תעשייה בישראל בתחום של תקשורת לוויינים

תעשיית החלל מורכבת מארבעה סגמנטים עיקריים: ייצור, שיגור, תחנות קרקע וחברות המספקות שירותים בתחומי התקשורת והחישה מרחוק. בישראל חלק מהחברות הגדולות שייכות ליותר מסגמנט

176

<https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%9C%D7%95%D7%95%D7%99%D7%99%D7%A0%D7%99%D7%9D%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C%D7%99%D7%9D>

¹⁷⁷ פעילות מו"פ, תשתיות וכוח אדם בתחום החלל האזרחי בתעשייה, באקדמיה ובמערכת החינוך בישראל, מוסד שמואל נאמן, 2014

3.1 השקעות הון

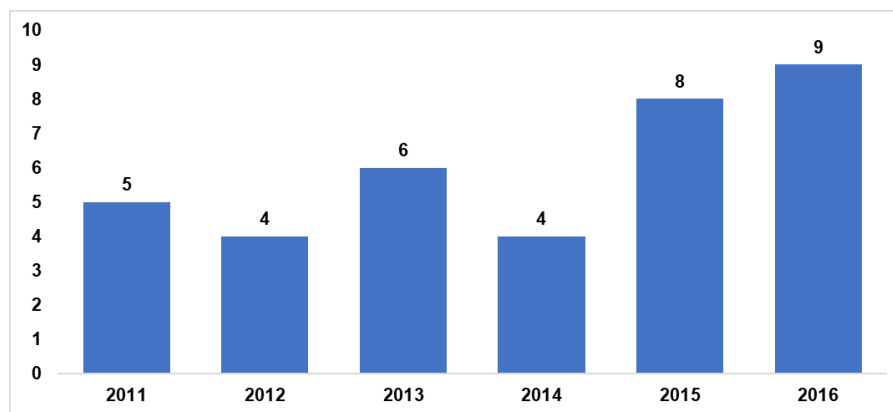
13 מתוך 31 החברות שבמאגר Startup Nation Central Finder, בוצעו גיוסי הון בסך כולל של 410.5 מיליון דולר. רוב הגיוס, 293 מיליון דולר בוצע בשנת 2013 בחברת חלל תקשורת - Spacecom Satellite Communications¹⁷⁸ על ידי התעשייה האווירית. ההשקעות האחרות קטנות בהרבה ורק בשליש מהחברות.

3.2 תפוקות מו"פ בתחום תקשורת לוויינים

3.2.1 פטנטים

הגרף הבא מציג את מספר הבקשות לפטנטים ב-USPTO של מגישים ישראלים בתחום תקשורת לוויינים על פי חיפוש לפי הסיווג הבא: H04B7/185 - Space-based or airborne stations; Stations for satellite systems. בשנים 2015 ו-2016 מספר הבקשות הכפיל את עצמו לעומת שנים קודמות. לא ניתן להציג נתונים לשנים מתקדמות יותר מאחר והנתונים עדיין לא סופיים.

איור 85: בקשות לפטנטים ב-USPTO של מגישים ישראלים בתחום תקשורת לוויינים לפי שנת הגשת הבקשה לפטנט, 2011-2019



מקור: עיבוד של צוות מוסד נאמן לנתוני USPTO.

מתוך בקשות לפטנטים שהוגשו בשנים 2018-2011 בתחום, 17 בקשות הוגשו על-ידי חברת גילת פי 3 מכל חברה אחרת שהגישה בתחום זה. הטבלה הבאה מציגה את החברות שהגישו בקשה לפטנט ב-USPTO בשנים 2018-2010.

¹⁷⁸ חלל תקשורת היא חברה ישראלית המספקת שירותי תקשורת לוויינית. החברה משווקת את שירותי הלוויינים מסדרת "עמוס", שחלקם יוצרו בישראל. **תחום פעילות החברה הוא** מכירת רוחב סרט של לווייני תקשורת ברחבי העולם. מתן שירותי תקשורת לוויינית באמצעות שיווק מקטעי חלל של לווייני תקשורת (או חלקים ממקטעים אלו) ברוחבי פס שונים. מקטעי החלל אותם משווקת החברה הם של הלוויינים עמוס 2 עמוס 3 (אזורי כיסוי: מזרח תיכון, מזרח אירופה, וקצת אמריקה), עמוס 4 (אזור כסוי מזרח אסיה- סין רוסיה, מלזיה) ועמוס 5 (אזור כיסוי אפריקה) אשר בבעלותה. החברה נוסדה בשנת 1992 אך בפועל החלה לפעול בשנת 1996 עם שיגור הלוויין עמוס 1.

טבלה 10: מגישים מובילים בהגשת בקשות לפטנט ב-USPTO בין השנים 2010-2018

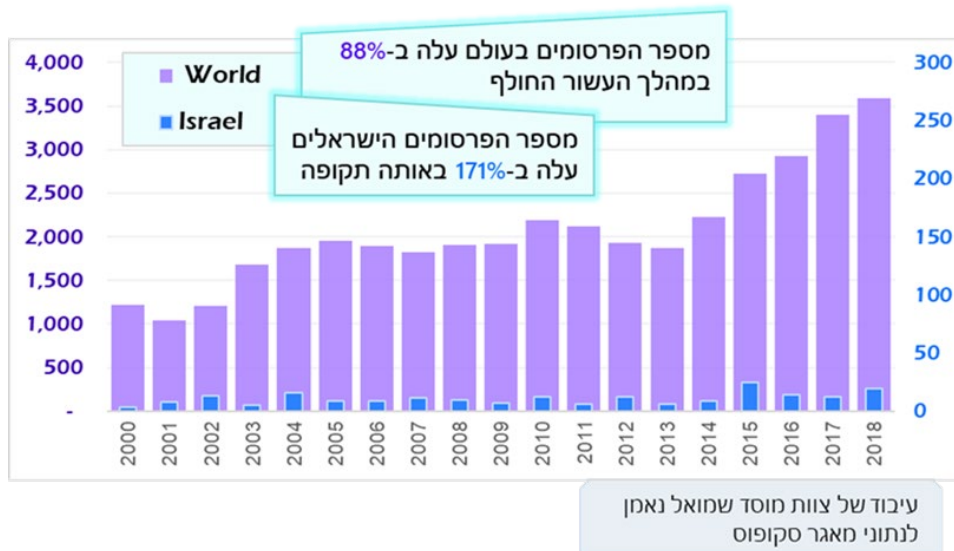
Number of applications	Assignee
17	GILAT SATELLITE NETWORKS LTD
5	SATIXFY ISRAEL LTD
4	NOVELSAT LTD
3	ELBIT SYSTEMS LAND & C4I LTD
3	ELTA SYSTEMS LTD
1	ADVANTECH WIRELESS LTD
1	AYECKA COMM SYSTEMS
1	BRIGHTSOURCE IND ISRAEL LTD
1	CONEXANT SYSTEMS INC
1	EMBEDDED SOLUTION
1	HISKY SCS LTD
1	INTEL CORPORATION
1	ISRAEL AEROSPACE IND LTD
1	LEVIN TIROSH,[IL]; DANIEL TOMER
1	MOBILE SAT LTD
1	NSL COMM LTD
1	ORBIT COMM SYSTEMS LTD

מקור: עיבוד של צוות מוסד נאמן לנתוני USPTO.

3.2.2 מדדים ביבליומטרים

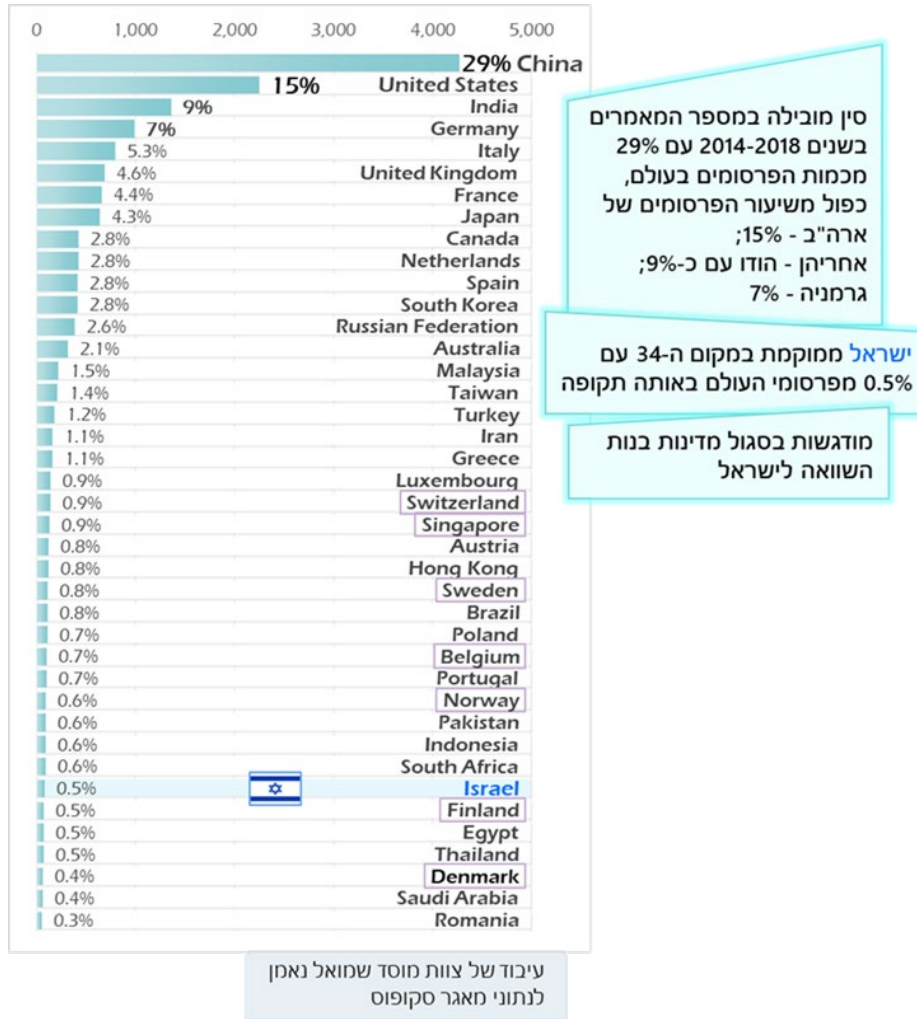
מניתוח מדדים ביבליומטרים ומענקי המחקר בתחום, אין עדות למחקר משמעותי בהיקפו באוניברסיטאות בישראל בתחום תקשורת לוויינים¹⁷⁹ בהשוואה למדינות אחרות בעולם. מספר הפרסומים בעולם עלה ב-88% במהלך העשור החולף כאשר עיקר העלייה היא משנת 2013. בשנת 2018 המאמרים הישראליים בנושא "תקשורת לוויינים" היוו כ-0.5% מפרסומי העולם בתחום והיא מדורגת במקום ה-34 בהשוואה בינלאומית.

איור 86: מספר הפרסומים בעולם ובישראל, 2000-2018



¹⁷⁹ מילות המפתח ששימשו לחיפוש: Satellite communication ו-satellite constellation

איור 87: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בשנים 2014-2018



הגרף הבא מציג תיאור סכמתי של התפלגות הפרסומים לפי אוניברסיטאות וחוקרים נבחרים. הטכניון ואוניברסיטת תל אביב בולטים במספר הפרסומים בתחום התקשורת הלוויינית.

איור 88: תיאור סכמטי של התפלגות הפרסומים בשנים 2014-2018 לפי אוניברסיטאות וחוקרים נבחרים



הגרף הבא מציג את גופי המימון המובילים בעולם למחקר האקדמי. הקרן הלאומית הסינית למדע (National Natural Science Foundation China) בולטת במספר המאמרים הממומנים, כ-10% מסך המאמרים בתחום בתקופה. ניתן לראות את ההשפעה בהובלה של סיין במספר הפרסומים בעולם שמהווה 30% מהם באותה תקופה. שאר הגופים הממומנים שיעורם נמוך יותר ועומד על לא יותר מ-1.3%

איור 89: גופי המימון המובילים לפי מספר המאמרים בעולם שמומנו בתקופה שבין 2014-2018



3.3 תמיכה ממשלתית בתחום

3.3.1 סוכנות החלל הישראלית (סל"ה)

תמיכה במחקרים באקדמיה – אחת המטרות של סל"ה היא שמירה על המעמד המוביל של האקדמיה הישראלית בנושא חלל היות וחלק מהיכולות של התעשייה נשענות על מחקרים בסיסים ויישומים באקדמיה. התמיכה במחקרים באקדמיה מתבצעת באמצעות קולות קוראים. התקציב כיום בשנת 2019 עומד על כ-20 מיליון ש"ח¹⁸⁰.

בשנת 2019, במסגרת משרד המדע והטכנולוגיה פורסם **מכרז פומבי מס' 19/2019 לפיתוח, בניה ושיגור של ננו-לוויין טכנולוגי**¹⁸¹: מכרז זה אמנם לא נוגע ישירות לתקשורת לוויינים אך כפי שתיארנו הפיתוח העתידי של תקשורת לוויינים מבוסס גם על פיתוח של ננו-לוויינים ותלוי המטעד המפותח עליו. לחוקרים שרוצים לחקור את תחום תקשורת לוויינים המבוססות על טכנולוגיות של ננו-לוויינים יכולים לגשת למכרז זה. להלן תיאור של המכרז: "ועדת המכרזים של משרד המדע והטכנולוגיה פונה לציבור בבקשה להגיש הצעות לביצוע פרויקט לבניית ננו-לוויין (לוויין זעיר) שגודלו לא יעלה על 6U בשילוב מטעד ושיגורו לחלל להוכחת יכולת טכנולוגית אשר פותחו לפלטפורמות חלליות, בעל פוטנציאל מסחרי ו/או הדגמת רעיון מסחרי בחלל". המכרז מיועד לגופי אקדמיה ו/או תעשייה העוסקים בפרויקטים בתחום החלל. משרד המדע ייתן סכום של 6,000,000 ₪ (שישה מיליון שקלים) לכל היותר או 80% מעלות הפרויקט, הנמוך מבניהם, בכפוף לזמינות תקציבית. ננו-לוויינים.

תמיכה במו"פ בתעשייה - אחת מהמטרות של סל"ה היא לסייע במו"פ הנעשה בתעשייה על מנת לפתח יכולת, וטכנולוגיות שיתנו לתעשיות הישראליות יתרון תחרותי בשוק האזרחי בעולם. התמיכה ניתנת לתחומים שהתעשייה הישראלית חזקה בהם כמו לווייני תקשורת, מזעור ועוד. חלק מהמימון נעשה דרך רשות החדשנות.

דוגמאות למימון דרך רשות החדשנות: מאגד ג'נסיס (ראה הרחבה סעיף 1.5); חברת NSLComm שעוסקת בתחום קיבלה מענקים. גם חברות כמו NovelSat ו-רמון צ'יפ ממומנות דרך מענקים של סל"ה.

ביוני 2019 יצא מכרז: קול קורא להגשת הצעות מחקר בתחום: חלל לשנת 2020 – שאפשר לכל אחד להגיש בקשה למימון בכל נושא בו הוא מעוניין. (ראה פירוט בנספח ה').

¹⁸⁰ מתוך ראיון טלפוני שבוצע ב-28/11/2019 עם אבי בלסברגר. ראה נספח א)
¹⁸¹ https://www.gov.il/he/departments/publications/Call_for_bids/most_rfp20191010

בין נושאי המחקר שסל"ה תומכת בהם באמצעות תקציבה: מודולים ללווייני תקשורת (Communication satellites modules), הנעה חשמלית, רכיבים למחשב חלל, רכיבים ממוזערים, פאנלים סולאריים נפתחים ועוד.

3.3.2 מאגד ג'ניסיס (Genesis) 182

מאגד ג'ניסיס הוקם במסגרת תוכנית מגנט של רשות החדשנות. מאגד ג'ניסיס (Genesis) אושר בשנת 2017 ומתמקד בטכנולוגיות לתקשורת לוויינים בכיסוי עולמי רחבת סרט עם שיהוי נמוך. מטרת המאגד היא פיתוח טכנולוגיות לניצול מרבי של משאבי רשת לוויינים ותחנות קרקע שתאפשר גידול בנפחי התעבורה ובכמות המשתמשים באמצעות ארכיטקטורה דינמית המשלבת יכולות עיבוד יעילים, בקרקע ובלוויין, ותוך מענה לדינמיות הגדולה ולכשלים מערכתיים¹⁸³. בשנת 2018 התקציב של המאגד עמד על 178,818 ₪.

המטרה של המאגד ליצור ידע במספר מישורים: **ארכיטקטורה** - פיתוח ארכיטקטורה חדשנית המשלבת את המקטע הלווייני המבוזר (באלפי לוויינים), עם רשת קרקעית מבוזרת; **ניצול משאבים דינמי** - פיתוח אלגוריתמים לניצול מיטבי של משאבי הרשת במערכים גדולים מאוד (משאבי עיבוד, משאבי תדר וכד'); **קצבי תקשורת גבוהים** - פיתוח קידודים ואפנונים חדשים על מנת לאפשר נפחי תעבורה גבוהים ביותר; **מכלול תקשורת חללי** - פיתוח יכולות עיבוד נצילות בלוויין (OBP) שיאפשרו יכולות עיבוד הן ברמת המקלט/משדר והן ברמת הרשת; **כלי סימולציה** - פיתוח כלי סימולציה לניתוח הרשת וחקר ביצועיה.

התקציב למאגד הוקצה לשלוש שנים. בעבר המאגדים היו מוקמים לחמש שנים. לדעת מוטי חיימוביץ – המנהל הטכנולוגי של המאגד זה לא מספיק זמן ויש מקום להאריך את משך החיים של המאגד. לעיתים לוקח לטכנולוגיות חמש שנים ויותר להבשיל.

בתחילת הפרויקט השתתפו במאגד האוניברסיטאות הבאות: האוניברסיטה העברית, טכניון, אוניברסיטת תל אביב, אוניברסיטת בר-אילן וחמש חברות: גילת, נובלסט, אדבנטק ווירלס, אלביט וצופן אלגוריתם.

היום במאגד יש 7 נושאי מחקר מהאוניברסיטאות ו-5 חברות שמשותפות במאגד:

- שלושה חוקרים מהטכניון - פרופ' אריאל אורדע מהפקולטה לחשמל; פרופ' ספי נאור מהפקולטה למדעי המחשב; פרופ' יובל עמק מהפקולטה לתעשייה וניהול.
- אוניברסיטת בר אילן - פרופ' זהבי אפרים מהפקולטה להנדסה עם שני דוקטורנטים
- אוניברסיטת בן גוריון - פרופ' שלומי דולב; פרופ' שלומי ארנון; ופרופ' מיכאל סגל
- אוניברסיטת תל אביב - פרופ' אורי ארז - הפקולטה להנדסה
- האוניברסיטה העברית - ד"ר אור אורדנטליך

החברות המשתתפות במאגד הם גילת רשתות; אדבנטק ווירלס; שתי קבוצות מאלביט – אלביט חיפה קבוצה העוסקת בכלי טיס בקונסטלציה לוויינית ובשיגור לוויין בגובה נמוך וקבוצה שנייה העוסקת בייצור רכיבי תקשורת לחלל. חברה נוספת היא איכה-חברה קטנה מפתחת תתי מערכות ומכלולים בתחום התקשורת הלוויינית. שלוש חברות שהיו בתחילת הדרך פרשו מהמאגד: חברת צופן אלגוריתם; רמון צ'יפ ומבט – תעשייה אווירית.

התחום של המאגד הוא תחום של "new space" העזיבה של תעשייה אווירית בתחילת המאגד יצרה קושי על הקמת והתנעת המאגד וזה לקח יותר זמן. בשנה האחרונה התחום מתחיל "להתחמם" שוב. חברת SpaceX נכנסה לתחום – שילחו 66 לוויינים במאי השנה ואמורים לשלח עוד 66 לוויינים בימים אלה. חלק מהתקציב של המאגד ממומן על ידי סל"ה וזה עוזר לרשות החדשנות להשקיע בתחום.

¹⁸² המידע בתת פרק זה מבוסס על ראיון שבוצע עם מוטי חיימוביץ – מנהל המאגד ומקורות פתוחים. <https://innovationisrael.org.il/content/%D7%9E%D7%A4%D7%92%D7%A9-%D7%94%D7%AA%D7%A0%D7%A2%D7%94-%D7%9C%D7%9E%D7%90%D7%92%D7%93-genesis>

3.4 מענקי מחקר

מענקי מחקר בתחומי תקשורת לוויינים

נסקרו חמש קרנות מהן מקבלים חוקרי ישראל מענקי מחקר : ERC, BARD, GIF, BIRD ו-ISF. רק שלוש מתוכן העניקו מענקי מחקר בתחום זה (ראה טבלה 11 ופירוט בנספח ד').

מספר המענקים הכולל שנמצא הוא נמוך ביותר, בעיקר בהתחשב בכך שזהו מספר המתפרס על פני תקופה ארוכה ומשתנה עבור כל קרן. מספר המענקים הגדול ביותר ניתן על ידי קרן BIRD, שהיא קרן משותפת לישראל וארה"ב והיא ייעודית למחקר תעשייתי. קרן BIRD העניקה 14 מענקים בין השנים 1988-2019. רובם בשנות ה-90 רק שני מענקים הוענקו בשלוש השנים האחרונות (המענק אחרון ניתן בשנת 2017).

קרן נוספת המממנת מענקים בתחום תקשורת לוויינים היא קרן קנדה-ישראל, CIRDF, אשר אישרה שמונה פרויקטי מחקר ופתוח חדשים וחדשניים של חברות ישראליות בשנת"פ עם חברות קנדיות בתחומי החקלאות, רובוטיקה, תקשורת לוויינים, מזון וקלינטק. תקציב המו"פ הכולל של הפרויקטים שאושרו בשנה האחרונה בין שתי המדינות עומד על 42 מיליון ₪. אחת החברות שזכתה היא חברת גילת רשתות לוויינים בע"מ – בתחום תקשורת לוויינים (לא ניתן לקבל את המידע כמה הוקצע לכל תחום)¹⁸⁴.

טבלה 11: מענקי מחקר בתחומי תקשורת לוויינים מקרנות נבחרות

קרן	טווח שנים	מספר המענקים
ERC	2007 - 2019	1
GIF	2011 - 2018	1
BIRD	1988 - 2019	14
סה"כ		16

3.5 חוזקות וחולשות של תעשיית החלל הישראלית – תקשורת לוויינים

מעבודה רחבה שעשה מוסד נאמן בנושא פעילות מו"פ, תשתיות וכוח אדם בתחום החלל האזרחי בתעשייה, באקדמיה ובמערכת החינוך בישראל עלו חוזקות וחולשות של כלל החוזקות והחולשות של ישראל. להלן החוזקות והחולשות שנוגעות לתחום של תקשורת לוויינים (גץ, בוכניק, זלמנוביץ, לביד, & בראזני, 2014).

3.5.1 חוזקות של תעשיית החלל הישראלית

- **פעילות חלל באקדמיה שנמצאת בחזית הידע** - לדוגמה, הפעילות המחקרית בנושא של **צבר/קבוצות של לוויינים** שנמצאת בחזית הידע העולמי מבחינת ציוד מחקרי בעיקר על ידי מימון של קרנות אירופאיות. פרויקט סמסון הוא ייחודי בעולם. שטחים נוספים חזקים בתחום החלל במדינת ישראל בהשוואה לעולם הם: חישה מרחוק והנעה רקטית.
- **תהליכי עבודה** - המאפיינים והמפתחים עובדים יחד בצורה הדוקה ויעילה. ישראל היא מדינה קטנה וקהילת החלל היא מצומצמת ואינטימית. קיימת אינטראקציה קרובה בין המפתחים ובין הצרכנים (לפחות במערכת הביטחון). עבודת הפיתוח נעשית בצמידות לצרכי הצרכנים. תהליך התכנסות למערכת שבה יש מיצוי של הנדרש והאפשרי לתוך יכולות מוגדרות, מתנהל בצורה טובה במערכות צבאיות בארץ, לא רק במערכות חלל. זה לא קיים בארה"ב – שם יש נתק בין המפתח (תעשייה) והמאפיין (צבא), שמוביל פעמים רבות לניפוח תוכניות.
- **כוח אדם איכותי** - בישראל יש קבוצות עם ידע וניסיון בנושאים של בקרה של לוויינים, מסלולים והנעה.

¹⁸⁴https://innovationisrael.org.il/press_release/3652

3.5.2 חולשות של תעשיית החלל הישראלית

- **לווייני תקשורת** - המדינה לא השקיעה מספיק כדי לפתח את תחום לווייני התקשורת. באמריקה ובאירופה חברות אוויר-חלל נסמכות על הזמנות מסודרות של הממשלות שמשקיעות בלוויינים לאומיים ולא רק על הזמנות מסחריות, דבר המאפשר לחברות הלוויינים להיות תחרותיות. לווייני התקשורת הישראלים עדיין יקרים יותר בהשוואה לעולם ואין להם יכולת להתחרות (לא במחיר ולא בזמן אספקה). התעשייה האווירית מייצרת לוויין תקשורת בודד אחת לכמה שנים (בהשוואה לחברות מקבילות בעולם שיש להם קו מוצר של לווייני תקשורת), עובדה שמקשה על פיתוח תחום זה. בניגוד ללווייני הצילום שבהם החומרה היא כחול לבן, בלווייני התקשורת כמעט כל החומרה מיוצאת בישראל מבוצעת ההרכבה.
- **ננו לוויינים** - מדינת ישראל נמצאת מאחור בהשוואה לעולם בנושא של שיגור ננו לוויינים. עד כה מספר הננו הלוויינים ששוגר נמוך בהשוואה בינלאומית.
- **חוסר השקעה בתעשייה של מכלולים (רכיבים, טכנולוגיות וכן הלאה)** - מדינת ישראל לא השקיעה כספים בפיתוח ושיווק תעשייה של מכלולים (מלבד המנוע היוני של רפאל). לדוגמה, אל-אופ יכולה להיות תעשייה שמייצאת טלסקופים אך בפועל, אל-אופ לא ייצאה אף טלסקופ פרט לקוריאה. מחסור בתמיכה תקציבית בפעילות מו"פ בתחום החלל.
- **קושי בגיוס מימון מסחרי** - יש קושי לגייס כספים ממשקיעים ומחברות השקעה כי בתחום החלל ההחזרים מוגבלים וארוכים. בדרך כלל רק עשור אחרי רואים החזר של ההשקעה.
- **תחום התקשורת הלוויינית הוא תחום מתפתח ולישראל יש יתרונות ייחודיים** - הממשלה צריכה להשקיע יותר כדי שישראל תוכל להיות שחקן משמעותי יותר.
- **מגבלות של יצוא**. זוהי מגבלה של מדיניות ממשלתית.
- האתוס בישראל לא תומך בנושאים של הנדסת חלל כמו האתוס הלאומי בארה"ב, נורבגיה ושבדיה, כיון שתחום החלל כרוך בהשקעות גבוהות ובסיכון. האתוס בישראל שם דגש על חברות הזנק בתחומים שבהם ההחזר הוא בפרק זמן קצר.

4 פעילות באקדמיה בתחום תקשורת לוויינים

פעילות באקדמיה בתחום החלל מתקיימת ב:

- טכניון – אנחנו בין המתקדמים אף אוניברסיטה בארץ לא בנו 3 לוויינים ברמה הזו
- בן גוריון – בנו לוויין BGUSAT שמב"ט בנו להם בגודל U6
- ת"א – הקימו לפני שנה קבוצה שבונה לוויינים מתחרים מול הטכניון על המכרז עם הצרפתים
- אריאל – רוצים להיכנס לפעילות
- יש קבוצות של חוקרים באקדמיה – יש קבוצה בתל אביב, יש קבוצת חוקרים בבן גוריון.

מסקירה שביצענו, הכשרות בתחום תקשורת לוויינים מתבצעות במוסדות הבאים:

הטכניון – במסגרת לימודי הסמכה ניתן קורס **לווייני תקשורת** שבסיומו הסטודנטים יקבלו כלים להבנה ותכן של לווייני תקשורת. הקורס כולל נושאים כגון: יסודות דינמיקת מסלולים בחלל, יסודות תקשורת דיגיטלית, לוויין התקשורת (שליטה, מטע"ד, בקרת מצב, הנעה, מקורות כוח, מבנה, עיבוד נתונים) ותחנות קרקע (אנטנות, רשתות, מערכת רדיו). שיקולי תכן יודגמו דרך מקרי חקר של לוויינים קיימים ומבנים (להקות) של לוויינים קיימים.

אוניברסיטת בן גוריון – הנדסת מערכות תקשורת (תואר ראשון) – הלימודים במחלקה מקנים לבוגרים הכרות מעמיקה עם מכלול המרכיבים של מערכות תקשורת, בהיבטי תוכנה, חומרה, וטכנולוגיות. תוכנית הלימודים כוללת נושאים נבחרים בהנדסת חשמל, הנדסת מחשבים, מדעי המחשב והנדסת תעשייה וניהול, וכן נושאים ייחודיים במערכות ורשתות תקשורת. תוכנית הלימודים המגוונת מאפשרת לבוגר המחלקה לבחור להתמקצע בתחומים שונים הנוגעים למערכות תקשורת, על פי העדפותיו, כבר במהלך לימודי התואר הראשון.

המחלקה להנדסת מערכות תקשורת מעניקה תארים מתקדמים: תואר שני (M.Sc.) ותואר שלישי (Ph.D.) בתחומים מגוונים הנוגעים לרשתות תקשורת. מטרת התוכנית לתארים מתקדמים במחלקה היא קידום המחקר בתחום התקשורת והרשתות

HIT-המכון הטכנולוגי חולון - הנדסת תקשורת - תחום התמחות ראשי בתואר ראשון. תחום זה משלב תחומי ידע נרחבים בתקשורת: תקשורת אנלוגית ודיגיטלית, תקשורת מחשבים, תקשורת סלולרית, תקשורת רדיו, תקשורת אופטית, עיבוד אותות ותמונה, מכ"ם ואנטנות. התחום מתאפיין במבחר גדול של קורסי בחירה עדכניים ומעבדות מתקדמות בתחום, ומקנה לסטודנטים את כול הכלים הדרושים בכדי להיענות לצורכי השוק הקיימים ולהתאים את עצמם גם לאתגרים ולשינויים הצפויים בעתיד.

ניתנים גם קורסים בתחום במסגרת תואר שני לדוגמא: **מערכות תקשורת לוויינים**

חשיפה לתחום במסגרת תיכון

ברשת אורט במסגרת תוכנית: מכשירים את דור העתיד - מומחי התע"א יכשירו מורים ברשת אורט להעביר שיעורים בנושאי חלל. במסגרת הקורס ילמדו המורים כיצד להעביר שיעורים לתלמידים בנושאי חלל כגון: סביבת החלל והשפעותיה על רכיבי אלקטרוניקה, תקשורת, מערכות חשמל ואלקטרואופטיקה. כמו כן, ילמדו המומחים לוויינות - הנעה לוויינית, מסלולי תנועת לוויינים, לווייני מכ"ם, לווייני תקשורת עמוס, ננו לוויינים ועוד. בנוסף, ייפגשו המורים עם יזמי פרויקט - Space il החללית הישראלית המשתתפת בתחרות העולמית של גוגל ובבנית בעזרת הידע המקצועי של מומחי התעשייה האווירית. בקורס ישתתפו כ- 20 מורים של רשת אורט ובתום הקורס, שיימשך כחצי שנה, יקבלו המורים תעודת סיום השתלמות בנושא חלל. ישראל הינה אחת משמונה המדינות המובילות בעולם שביכולתן לבנות ולשגר לוויינים לחלל.

התלמידים נחשפים לתחום גם בבתי הספר של אורט במסגרת מגמות שונות. לדוגמא:

- **אורט רונסון עוספיא** - מגמת אלקטרוניקה ומחשבים - לימודי מערכות תקשורת הכוללת תקשורת לוויינים.
- **המכללה הטכנולוגית אורט תעופה וחלל** - מעלה אדומים - פעילות ייחודית בבית הספר פלנטריום ומצפה כוכבים שמקיים בשיתוף נוער שוחר מדע מהאוניברסיטה העברית תוכניות לימודים באסטרופיזיקה ואסטרונומיה.
- **לימודי חלל בירוחם**

5 הכשרת כוח אדם לעבודה בתחום תקשורת לוויינים

מהראיונות¹⁸⁵, השאלונים¹⁸⁶ וסקירת הספרות שביצענו עולים הצרכים הבאים:

בנושא מחקר, פיתוח ותכנון מכלולי מיקרוגל בתחומי תדר גבוהים רואים היווצרות של מחסור בכ"א מיומן ומנוסה. האתגר הולך וגדל, נעשה מורכב ודורש פתרונות ואמצעי קליטה ושידור בקצבים גבוהים מאד מעבר למקובל היום וכן מערכי אנטנות עם תגובות מהירות יותר.

ישנו מחסור ניכר במהנדסים בתחום הספציפי ובתחומי תשתית נדרשים כגון: התמחויות בהנדסת מערכת, מערכות חומרה, תקשורת ספרתית, תדרי רדיו (RF), הנדסת רכיבים, תוכנה וכו'. יש ירידה במספר הסטודנטים שפונים לתחומים אלו - יתכן בשל עלויות ההכשרה הגבוהות יותר או בהינתן אפשרויות התמחות (כגון: סיבר, רובוטיקה ML וכו') שהינן אטרקטיביות יותר.

¹⁸⁵ במסגרת העבודה נערכו ראיונות עם:

פרופ' אבנר קידר- מהנדס ראשי בפרויקט סמסון בטכניון - מכון אשר.
מוטי חיימוביץ- מנהל מאגד ג'נסיס

אבי בלסברגר- מנהל סוכנות החלל הישראלית
עופר גולדהירש מהרשות לחדשנות

¹⁸⁶ מענה לשאלונים התקבל ממוטי חיימוביץ, אבי ברדה - חברת אייכה ואבי גל - חברת גילת

- בן-יוסף מ' וכהן א' (2011). ישראל בחלל-לא רק לוויינים.
<http://www.israeldefense.co.il/?CategoryID=472&ArticleID=1223>
- גץ, ד', כצמן, א', פייקובקי, ד' ואחרים (2008). הערכת ההשפעה של תעשיית החלל על כלכלת ישראל. מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית.
- גץ, ד', בוכניק, צ', זלמנוביץ, ב' ואחרים (2014). תשתיות וכוח אדם בתחום החלל האזרחי בתעשייה, באקדמיה ובמערכת החינוך בישראל. מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית.
- פייקובסקי, ד' ולוי, ר' (2010). החלל כפרויקט לאומי: תוכנית חלל ישראלית ותעשיית חלל מקומית בת קיימא בתוך שנים ספורות. דו"ח מסכם לפעילות צוות הנשיא והמלצות לפעולה. משרד המדע והטכנולוגיה.
- Sinha G. Gaurav (2018), Satellite Communications: Global Market Through 2022, BCCResearch
- ESRE (2017), Selected Trends and Space Technologies Expected to Shape the Next Decade
https://esre-space.org/wp-content/uploads/2018/01/ESRE_Whitepaper_-2017.pdf

אתרים באינטרנט

- אתר כלכליסט: "עם המבט למעלה: מאסק הכריז על כוונתו להשיק רשת לוויינים לאינטרנט מהיר"
<https://www.calcalist.co.il/internet/articles/0,7340,L-3650118,00.html>
- אתר techtime: "Sky and Space גייסה 12 מ' ד' – ותשגר לחלל מקבץ מסחרי ראשון של ננו-לוויינים"
<https://techtime.co.il/2019/02/20/sas/>
- אתר הידיען: "הלווין הישראלי NSLSat-1 של חברת NSLComm ישוגר לחלל מרוסיה"
<https://www.hayadan.org.il/the-nslsat-1-satellite-of-nslcomm-will-be-launched-into-space-from-russia-0407192>
- המאגר של Startup Nation Central Finder
<https://finder.startupnationcentral.org/>

שילוב רב תחומי ביולוגיה, תוכנה והנדסה לעולם הרפואה (Bio - Convergence)



בשנים האחרונות, חלו שינויים בסקטור הבריאות המצביעים על כך שסקטור זה נע יותר ויותר לכיוון של "התכנסות" (Convergence) ליצירת אקו-סיסטם מאוחד הכולל תתי תחומים כגון מכשור רפואי, ביופארמה¹⁸⁸, בריאות דיגיטלית (ובכלל זאת בינה מלאכותית ונתוני עתק- Big Data) ואת נותני השרות בתחום הבריאות (IATI PWC & IIA, 2019). "התכנסות" זאת, של התחומים השונים מאפשרת את שילובו של ידע מדעי והנדסי עם ידע מתחום מדעי החיים והרפואה, ויוצרת הזדמנויות לחדשנות טכנולוגית שהיא בעלת פוטנציאל רב לשפר את בריאות הציבור ולייצר אפשרויות כלכליות משמעותיות. הדוגמאות לשילובים אלו רבות וכוללות לדוגמא, את תחום הביו-אלקטרוניקה – טיפול במחלות כרוניות תוך שימוש בשתלים מזעריים (IATI PWC & IIA, 2019) וכן שימושים ביכולות טכנולוגיות ממוחשבות על מנת לבצע עיבוד תמונה מתקדם לצרכים אבחוניים. עיקר החדשנות מתמקדת כיום בשילוב המכשור הרפואי ויכולות ה Health IT עם עולמות הרפואה, אך קיימת חשיבות רבה להרחבת השימוש ביכולות ההנדסיות והטכנולוגיות גם לתחום הביופארמה.

בישראל, יותר מ-25% מתקציבה של הרשות לחדשנות הוקדש בעשור האחרון לסקטור הבריאות (בשנת 2018 לבדה הוקדשו לתחום \$125M). יוזמות נוספות כגון הקמת החממה הטכנולוגית FutuRx¹⁸⁹ נועדו אף הן לקדם את התחום ("What Do We Offer?"; IATI PWC & IIA, 2019; FutuRx, 2019). צפוי, כי החדשנות הטכנולוגית הנובעת משילוב היכולות ההנדסיות ותחומי מדעי החיים תשפיעה על יצירתם של פתרונות רפואיים הנוגעים לכל היבטים של שירותי הבריאות, החל מרפואה מונעת, דרך דיאגנוסטיקה מתקדמת וכלה במתן טיפול יעיל וממוקד יותר לחולה (IATI PWC & IIA, 2019).

בשנת 2011 פרסמה אוניברסיטת MIT דו"ח שכותרתו The Convergence of the Life Sciences, Physical Sciences, and Engineering (Sharp et al., 2011). המושג Convergence בהקשר זה הוגדר כ"מיזוג" או "התכנסות" של טכנולוגיות שונות למכלול אחיד, דבר היוצר שורה של מסלולי מחקר והזדמנויות חדשות. שילוב זה כרוך באינטגרציה של תחומים שונים ובמיוחד הנדסה, פיזיקה ומדעי החיים, תוך שיתוף פעולה בין קבוצות מחקר ושילוב של גישות מדיסציפלינות שונות. זוכה פרס נובל פיליפ שארפ, אחד ממחברי הדו"ח ופרופסור באוניברסיטת MIT, טען כי תהליך ה-Bio-Convergence מייצג חשיבה מחודשת בנוגע למחקר בתחום מדעי החיים, כך שיביא לידי ביטוי מגוון של תחומי ידע ויכולות טכנולוגיות, החל ממיקרוביולוגיה, דרך מדעי המחשב ועד לתכנון הנדסי. בדו"ח שהוצג בשיתוף עם האגודה האמריקאית לקידום המדע - AAAS¹⁹⁰ נטען שעל ארצות הברית לנצל את המגמה הכרוכה במיזוג מדעי החיים, הפיזיקה וההנדסה כדי לטפח את החדשנות הדרושה בכדי לענות על הביקוש הגובר בצרכי הבריאות של האוכלוסייה.

מחברי הדו"ח טוענים עוד, כי לתהליך ה-Bio-Convergence פוטנציאל ליצור "מהפכה" שעשויה להיות משמעותית לפחות כמו מהפכות קודמות בתחום מדעי החיים: חקר הביולוגיה המולקולרית וחקר הגנום האנושי. לטענתם, כשם שההתקדמות בתחום טכנולוגיות המידע, החומרים, ההדמיה, הננו-טכנולוגיה ותחומים קשורים - יחד עם ההתקדמות בתחום המחשוב, שינו את מדעי הפיזיקה, כך הם מתחילים כיום לשנות גם את מדעי החיים. התוצאה היא תחומי מחקר משמעותיים חדשים במדעי החיים, כגון ביו-הנדסה, ביולוגיה חישובית, ביולוגיה סינתטית והנדסת רקמות. הדו"ח ממליץ על מתן תמיכה כספית מספקת ועל מיקוד מאורגן היטב בתוך ה-NIH (National Institute of Health) למחקרים שעניינם Bio-Convergence (Sharp et al., 2011).

במחקר של ה-NRC (National Research Council) בארה"ב (NRC, 2014) זוהו אלמנטים חיוניים להצלחת תוכניות של Bio-Convergence. אלמנטים אלה הם כדלקמן:

¹⁸⁷ תודתנו לדר' איתי קלע, אבנר אמיר ודב מאור על הערותיהם ועל עזרתם במיקוד הסקירה.

תודתנו לדר' איתי קלע ודר' ז'נט לזרוביץ' על הראיונות שקיימו איתם בנושא.

¹⁸⁸ Biopharmaceutical: a pharmaceutical derived from biological sources and especially one produced by biotechnology (Merriam Webster Dictionary)

¹⁸⁹ במסגרת החממה חברות גדולות כגון Takeda ו Johnson & Johnson מסייעות במימון ובעזרה מקצועית לחברות פארמה קטנות הנמצאות בתהליכי המו"פ הראשוניים שלהם.

¹⁹⁰ American Association for the Advancement of Science (AAAS)

אנשים: מנהיגות המחויבת לתמוך בשילוב בינתחומי תוך מעורבות של סטודנטים, אנשי סגל וצוות, ראשי ומנהלי מחלקות ודיקנים. טיפוח יכולת העוסקים בתחום לתקשר על פני תחומים רחבים תוך בניית ידע ומומחיות עמוקים.

ארגון: חזון מוכוון יעד, ניהול אפקטיבי של תוכניות, תמיכה יציבה במתקני ליבה (תשתיות מחקר) ומקורות מימון.

תרבות: התרבות הדרושה לתמיכה בשילוב תחומי מדע שונים, כמו בסוגים אחרים של מחקר שיתופי, היא כזו המעודדת הזדמנויות לחלוק ידע ומטפחת את יכולתם של המדענים להיות בקיאים בנושאים בינתחומיים.

מערכת יחסי הגומלין (Ecosystem): מערכת יחסי הגומלין כוללת אינטראקציות דינאמיות עם שותפים מרובים ודורשת אסטרטגיות להתמודדות עם הסכמי השותפות הטכניים והלוגיסטיים הנדרשים.

צפוי, כי המאה ה-21 תהיה כזו שבה תהיה התקדמות בהבנת הבסיס הגנטי והמולקולרי של מערכות ביולוגיות וכיצד הן מתמזגות עם תחומים כגון פיזיקה, רפואה והנדסה להשגת מהפכות חדשות בחזית הידע. הבנה טובה יותר של התהליך והתגברות על האתגרים על מנת לאפשר מהלך זה, היא אסטרטגיה חשובה למימוש מלא של מטרה זו. לצורך כך, יש לקיים מאמץ שיטתי על מנת לרתום בצורה יעילה יותר את פוטנציאל ה-Bio-Convergence כדי לעודד חדשנות ולתת מענה לצרכים חברתיים וכלכליים מתפתחים (NRC, 2014).

בשנת 2019 קיימה האקדמיה הלאומית למדעים, הנדסה ורפואה של ארה"ב (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine) דיון בשאלה כיצד ניתן לקדם את תהליך חיבורם והתכנסותם (Convergence) של תחומים מדעיים שונים. מהדיון עלה, בין היתר, כי לנושא המנהיגות וההובלה ישנה חשיבות רבה בתהליך זה. ראשי ארגונים אקדמיים (אוניברסיטאות, מכללות, מכוני מחקר) ממלאים תפקיד מרכזי ביצירת תרבות של מחקר שמאפשרת Convergence במוסדותיהם, ובשל כך באחריותם להבהיר שנושא זה עומד בראש סדר העדיפויות שלהם כמו גם של המוסד אותו הם מנהלים. עליהם גם לעזור לתהליך באמצעות הסרת חסמים מוסדיים. יצירת תרבות של Convergence ותחזוקה לאורך זמן תלויה בחזון שמגיע מהנהלת הארגון, תהליך הידוע כ-Top Down Vision ודורש התמדה. זאת, עקב העובדה שהוא מצריך שינוי חשיבה ארגונית ועלול לארוך זמן רב (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2019).

סטטוס קיים והפוטנציאל העתידי בתחום ההנדסה הביולוגית

מחקר שערך ה-Engineering Biology Research Consortium (EBRC) בארה"ב במימון ה-National Science Foundation מיפה את הסטטוס הקיים והפוטנציאל העתידי בתחום ההנדסה הביולוגית (Biological Engineering). במיפוי זה ארבעה תחומים עיקריים בעלי פוטנציאל לתרום לחברה ולכלכלה בארה"ב בשנים הבאות (EBRC, 2019)¹⁹¹.

1. Gene Editing, Synthesis and Assembly – בתחום זה נכללים פיתוח כלים בתחום ההנדסה הגנטית ובמיוחד סינתזה מורכבת של¹⁹² Oligonucleotides ארוכים יותר, ושל חלקים גדולים של הגנום, כמו גם אפשרויות לביצוע הנדסה ועריכה גנטית בדיוק מירבי.

2. Biomolecule, Pathway, and Circuit Engineering – תחום זה כולל הנדסה של מולקולות ביולוגיות ומסלולים מולקולריים באופן שיחקה ואף יתחרו במולקולות הטבעיות הקיימות.

האתגר בתחום זה יהיה להנדס ביו-מולקולות או מסלולים מולקולריים, על מנת שיבצעו תפקידים מוגדרים מראש. חלק מהאתגרים העתידיים בתחום יהיו להשתמש במבנים ביולוגיים קיימים ולשפר או לשנות את פעולתם בהתאם לצורך. אתגרים נוספים יהיו סינתזה של מולקולות ביולוגיות בעלות תפקידים מוגדרים שלא על בסיס חומרים ביולוגיים קיימים.

¹⁹¹ מומלץ לעיין באתר הפרסום הכולל מטרות מפורטות לטווח הקצר והארוך עבור כל אחד מתחומי העניין השונים.
¹⁹² A short nucleic-acid chain usually consisting of up to approximately 20 nucleotides (Merriam Webster Dictionary)

3. Host and Consortia Engineering – תחום זה עוסק בשימוש באורגניזמים "מארחים" (Hosts) כדוגמת חיידקים, צמחים או תאים מן החי לייצור חומרים ביולוגיים שונים לצרכים רפואיים או תעשייתיים. כמו כן התחום עוסק גם בהנדסת מערכות "חופשיות מתאים" (Cell free systems) לביצוע פעילויות דומות. מבין האתגרים בתחום זה בשנים הקרובות יהיו יצירתם של מערכות מורכבות יותר (כדוגמת הנדסת Multi-Cellular Organisms) שימשו כמארחים והרחבת מגוון החומרים הביולוגיים שתאים או אורגניזמים מארחים יוכלו לייצר.

4. Data Science – במסגרת תחום זה, יעשה שימוש בכלים חישוביים מתקדמים על מנת לסייע לתכנונם והוצאתם לפועל של תהליכים בהנדסה ביולוגית. כך לדוגמה, יסתייעו במודלים חישוביים על מנת להעריך תפוקות ייצור במודלים של תאים או אורגניזמים "מארחים", לבחון השפעות של שינוי תנאי הסביבה על קצב הפעילות הביולוגית ולעודד אוטומציה בתהליך. בכדי לעשות שימוש במודלים אלו, יהיה צורך ליצור שיטות חישוביות ואלגוריתמיקה מתקדמת שתוכל באופן אחיד להתאים למערכות ביולוגיות שונות, לצפות את התנהגותן של מערכות ביולוגיות ולנתח כשלים אפשריים. הכלים החישוביים יאפשרו גם הנדסה של הרכיבים הביולוגיים (כגון מולקולות או אף מערכות רב-תאיות) באופן יעיל יותר. תהליך שילוב מתקדם של Data Science בהנדסה הביולוגית דורש יצירה, הנגשה ושילוב של מאגרי מידע אודות מערכות ומודלים ביולוגיים.

דו"ח מפת הדרכים של ה-EBRC היא הערכה ביקורתית של המצב והפוטנציאל הנוכחי של הביולוגיה ההנדסית. הוא נועד לספק לחוקרים ובעלי עניין אחרים (כולל מממנים ממשלתיים) מערכת משכנעת של אתגרים והזדמנויות טכנולוגיות בטווח הקרוב והארוך. תהליך המיפוי של מפת הדרכים (תהליך התקדמות שמתבצע כל הזמן) החל בתגובה להמלצות שהוצגו בדו"ח של האקדמיות הלאומיות לשנת 2015, תיעוש הביולוגיה, ולבקשת הקרן הלאומית למדעים ובעלי עניין אחרים בממשלת ארה"ב, כולל המועצה הלאומית למדע וטכנולוגיה. עם שחרורה של מפת הדרכים ביוני 2019, ה-EBRC מספק משאבים שמאפשרים להתקדם לכיוון של מחקר ופיתוח ביולוגיה סינתטית.

בשיחה שנוהלה עם ד"ר ז'נט לזרוביץ' (יועצת לרשות החדשנות) ז'נט סיפרה ש'ברשות החדשנות נעשתה עבודה די אינטנסיבית אבל ברשות עדיין לא מגובשים לגמרי לגבי מה יכול להיכלל בהגדרה הזו. לדברי ד"ר ז'נט לזרוביץ' צריך לזקק את הניסוח וההגדרה ולמצוא את אותן החברות שאכן מתאימות להגדרה של Bio-Convergence ועל בסיסן לכתוב אסטרטגיה המתאימה למדינת ישראל.

ד"ר ז'נט לזרוביץ' עדכנה שגברת אניה אלדן היא כיום ראש זירת הזנק ומובילה את הנושא של Bio-Convergence. ברשות הוחלט בשלב הנוכחי לקחת את הנושא לעולם הרפואה כפיילוט ולאחר מכן להשליך לנושאים אחרים כמו חקלאות, סביבה, וכדומה. הכותרת היא שילוב ביולוגיה עם הנדסה בתחומים שונים ועם חישוביות כלומר כלים כמו אלגוריתמים מתקדמים, בינה מלאכותית, טיפול בכמויות גדולות של מידע וכדומה.

בעולם הרפואה ההתמקדות היא על שלושה תחומים והם:

- פיתוח תרופות חדשניות
- פיתוח ציוד רפואי – Medical Devices and Equipment
- פיתוח כלי דיאגנוסטיקה

2 יתרונותיה של ישראל בתחום

יתרונותיה של ישראל בתחום ה-Bio-Convergence כוללים מערכת בריאות מתקדמת העושה שימוש ברשומות רפואיות דיגיטליות, אוכלוסייה בעלת מאפיינים גנטיים ייחודיים, חוזקות טכנולוגיות בתחום המחשבים ובכלל זה בנתוני עתק ובבינה מלאכותית וכן תעשיית טכנולוגיה רפואית מבוססת המשלבת חברות מקומיות ובינלאומיות. המערכת האקדמית המובילה בישראל, כמו במדינות מפותחות אחרות¹⁹³, הינה מקור חשוב לחדשנות עבור התעשייה. שילוב חוזקות הנדסיות אלו עם תחום הביולוגיה

¹⁹³ כך לדוגמה, מגזר מדעי החיים הוא הסקטור שמכניס את הרווחים הגדולים ביותר לאוניברסיטאות מובילות בארה"ב כתוצאה מ (Huggett, 2014) Technology Transfer.

והרפואה, הינו בעל פוטנציאל להניב יתרונות משמעותיים לישראל (PWC & IIA, 2019); התכנית הלאומית לבריאות דיגיטלית כמנוע צמיחה, " (2018). יתרונות אפשריים נוספים נובעים מהאופי היזמי הישראלי ("אומת הסטרטאפ") וכן מהעובדה שהאקו-סיסטם המקומי קטן יחסית ועל כן ניתן בצורה קלה יותר לקשר בין מרכיביו.

3 הסקטור האקדמי

3.1 לימודים אקדמיים בתחום

בשל העובדה שמדובר בתחום-עניין רחב, במגבלות סקירה זאת התמקדנו בתחום **ההנדסה הביו-רפואית**, המשלב את עולמות התוכן של מדעי החיים, הרפואה וההנדסה. במסגרת זאת, נבחנו הפקולטות או המחלקות להנדסה ביו-רפואית באוניברסיטאות המחקר בישראל. ראוי לציין כי גם באוניברסיטאות אחרות, כגון במכון ויצמן למדע, מתבצע מחקר המשיק לתחומים אלו, וכן באוניברסיטת בר אילן בה חוקרים מהפקולטה להנדסה עוסקים בין היתר בתחומי הביו-הנדסה. עם זאת, במוסדות אלה החוקרים אינם פועלים במסגרת פקולטה ייעודית לכך.

הלימודים לתארים מתקדמים (לתואר שני ושלישי) בפקולטות להנדסה ביו-רפואית באוניברסיטאות בישראל החלו לפני שנים רבות אך לאור ההתפתחות שחלה בתחום, מוצעים כיום גם לימודים לתואר ראשון בהנדסה ביו-רפואית או בביו-הנדסה. מוערך¹⁹⁴ כי ישנם כ-50 אנשי סגל אקדמי בכיר בפקולטות ובמחלקות להנדסה ביו-רפואית באוניברסיטאות בישראל. מסלולי הלימודים באוניברסיטאות ותחומי המחקר מפורטים להלן.

הטכניון

הפקולטה להנדסה ביו-רפואית בטכניון עוסקת בממשק בין המדעים, ההנדסה והרפואה, ומשלבת ידע וכלים מתחום ההנדסה לפתח שיטות, התקנים, אביזרי עזר, מערכות לאבחון וטיפול רפואי וכלים לחקר הבסיס הביולוגי של מחלות. מסלולי הלימוד בפקולטה כוללים:

הדמיה ואותות רפואיים – מכשור דיאגנוסטי וטיפולי, טכניקות לא חודרניות, טכניקות הדמיה, עיבוד אותות ועיבוד תמונות ברפואה, בקרה פיזיולוגית, שימושי אופטיקה ואולטרסאונד.

ביומכניקה וזרימה – ביו-מכניקה של תאים ורקמות, זרימה במערכות ביולוגיות, איברים מלאכותיים, שתלים פנימיים, שיקום אורתופדי/נוירולוגי, הנדסה שיקומית, ציוד ועזרים לבעלי מוגבלויות.

הנדסת רקמות וביו-חומרים – הדפסה תלת-ממדית של איברים ורקמות, שימוש בתאי גזע, פיתוח ננו חלקיקים וביו-חומרים רפואיים, ביו-סנסורים, איבר על שבב ושחרור מבוקר של תרופות.

כמו כן, קיימים בפקולטה מסלולים משותפים להנדסה ביו רפואית עם פקולטות אחרות כגון הפקולטה לרפואה, לפיזיקה ולהנדסת תעשייה וניהול.

בפקולטה להנדסה ביו-רפואית בטכניון עוסקים החוקרים הבכירים בתחומים מגוונים. אלו כוללים, בין היתר, עיבוד אותות אולטרה-סאונד, עיבוד תמונה רפואית (medical imaging), חישה מרחוק של מצבים רפואיים, בניית ביו סנסורים והנדסה של מערכות ביולוגיות, חקר המוח, Deep learning, היבטים ביולוגיים של מערכות הקול והדיבור, הנדסת רקמות, דיאגנוסטיקה מולקולרית ועוד (הפקולטה להנדסה ביו-רפואית בטכניון).

אוניברסיטת בן גוריון

המחלקה להנדסה ביו-רפואית באוניברסיטת בן גוריון עוסקת במגוון תחומים המשלבים מדעי החיים, רפואה והנדסה. מבין תחומי העיסוק העיקריים בה, מונה הפקולטה בין היתר, אופטיקה ביו-רפואית וננו-אופטיקה, ביו-רפואית וננו-רפואה, ביופיסיקה, מודלים מתמטיים במערכות ביו-רפואיות, ננו-ביו

¹⁹⁴ על בסיס ניתוח של אתרי האינטרנט של הפקולטות/מחלקות.

אלקטרוניקה (כדוגמת טכנולוגיות מיקרואלקטרוניקות לניטור נייד ורציף של מערכות ביולוגיות ורפואיות) וסינתזת ננו-חלקיקים להובלת תרופות.

המחלקה מציעה לימודים באשכול "עיבוד אותות פיסיולוגיים" ובאשכול ביו-מכניקה וכן מסלול לימודים משותף למצטיינים המעניק אפשרות לעשות תואר כפול ברפואה ובהנדסה ביו-רפואית.

במסגרת הלימודים במחלקה, יכולים הסטודנטים ליטול חלק בפרויקט "ביומד-טק ויזמות" בו נחשפים הסטודנטים לעולמות היזמות והתעשייה בתחום הביומד ("המחלקה להנדסה ביו-רפואית | אוניברסיטת בן גוריון").

אוניברסיטת תל אביב

המחלקה להנדסה ביו-רפואית באוניברסיטת תל אביב עוסקת בתחומים רבים המשלבים רפואה והנדסה, ובכלל זאת ביו-מכניקה, ביו-חומרים, ביולוגיה חישובית ומערכתית, עיבוד תמונות רפואיות, ביו זרימה, הנדסת רקמות ועוד.

באוניברסיטת תל אביב, בדומה לטכניון ולאוניברסיטת בן גוריון, קיימת אפשרות ללמוד אותות ומערכות ברפואה, וכן ביו-מכניקה הנדסת רקמות וביו-חומרים. בנוסף, קיים מסלול ייחודי של תואר כפול הנדסה ביו-רפואית וביולוגיה בדגש על חקר המוח. במסלול זה נלמדות שיטות אנליטיות וחישוביות כמו גם ביוטכנולוגיות לחקר המוח (המחלקה להנדסה ביו רפואית | אוניברסיטת ת"א).

אוניברסיטת בר אילן

באוניברסיטת בר אילן ניתן ללמוד הנדסה ביו-רפואית כחלק ממסלולי הפקולטה להנדסה. תחומי המחקר הנלמדים עוסקים במכשור ביו-רפואי, ננוטכנולוגיה וחומרים לשימוש ביו רפואה, הנדסת נורונים ורקמות, דימות (הדמיה) ביולוגית ומיקרוסקופיה, גנומיקה וביולוגיה מערכתית. מספר חוקרים בכירים בפקולטה להנדסה עוסקים בתחומים המשלבים את מדעי החיים וההנדסה.

האוניברסיטה העברית

באוניברסיטה העברית קיים מסלול לימודים ישיר לתואר שלישי בביו-הנדסה. מטרת התוכנית היא להכשיר תלמידים ליישום ידע הנדסי ומדעי לפתרון בעיות בתחומי הביולוגיה והרפואה והיא מיועדת לבוגרים מצטיינים בתחומי מדעי הטבע, מחשבים, רפואה והנדסה. התוכנית מקנה כלים תיאורטיים וכלים ניסויים בתחומים בסיסיים בביו-הנדסה כדוגמת: אנליזה הנדסית של מערכות ביולוגיות ורפואיות, פיתוח ופתרון מודלים מתמטיים בביולוגיה ורפואה, פיתוח מכשור רפואי, פיתוח חיישנים ביולוגיים, דימות רפואי, הנדסת רקמות, ביוחומרים, ביומכניקה, ביואלקטרוניקה ועוד (ביו הנדסה - לימודים לתואר מוסמך). באוניברסיטה העברית פועל מרכז מולטי-דיסציפלינרי לביו-הנדסה במסגרתו מתקיימים המחקרים (Alexander Grass Center for Bioengineering).

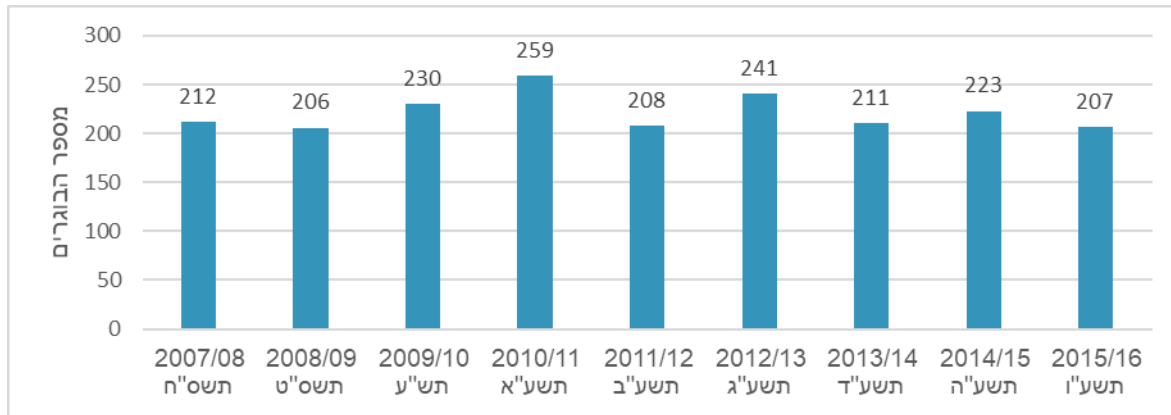
מכון ויצמן למדע

במכון ויצמן, כאמור, קיימים מרכזים המבצעים מחקר בתחומים המשלבים רפואה, ביולוגיה, תוכנה והנדסה. כך לדוגמה, המכון הלאומי על שם עזריאלי לדימות ומחקר המוח האנושי עוסק בחקר המוח ומשלב כלי מחקר כגון MRI לביצוע מחקרים מתקדמים בתחום הנורולוגיה. המרכז לפיסיקה ביולוגית ע"ש קלור עושה שימוש בשיטות הנדסיות ופיזיקליות למחקר מדעי על מבנים פיזיולוגיים וביוכימיים ומכון הנרי חנוך קרנטר לדימות ביו-רפואי וגנומיקה המשלב טכניקות מתקדמות בגנומיקה ובדימות ביו-רפואי לאפיון תהליכים סרטיניים. המכון לביואינפורמטיקה על-שם אילנה ופסקל מנטו עושה שימוש בכלים חישוביים חדשניים בכדי לסייע למדענים לנתח בעילות מידע רב שנוצר ממחקרים מודרניים בהיקף גדול (מרכזים ומכונים | מכון ויצמן למדע).

3.2 מקבלי תארים בהנדסה ביו-רפואית בישראל

האזור הבא מציג את מספר מקבלי התארים (ראשון, שני ושלישי) **בהנדסה ביו-רפואית בישראל על פי נתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה (הלמ"ס), לשנה"ל תשס"ח (2007-2008) עד תשע"ו (-2015)** (16). ניתן לראות כי כמאתיים בוגרים מסיימים את המסלול בכל שנה.

איור 90: מספר מקבלי התארים (ראשון, שני ושלישי) בהנדסה ביו-רפואית בישראל (שנה"ל תשס"ח-תשע"ו)



מקור: עיבוד מוסד נאמן לנתוני הלמ"ס

3.3 האגודה הישראלית להנדסה ביו-רפואית

האגודה הישראלית להנדסה ביו-רפואית פועלת לקידום שיתוף הפעולה בין מהנדסים, רופאים ומדענים, מעודדת השתלמויות מקצועיות בתחום ומסחור של טכנולוגיה. האגודה מקיימת כנסים (ראו פירוט להלן), מעודדת שיתופי פעולה בינלאומיים וכן שיתוף פעולה אקדמיה-תעשייה בתחום. מלבד העיסוק בתחומי ההנדסה הביו-רפואית ה"קלאסיים" כדוגמת עיבוד תמונות רפואיות, אולטרה-סאונד והנדסת רקמות, עוסקת כיום האגודה גם בתחומים הנחשבים חדשניים ופורצי דרך כגון תרופות מוכוונות מטרה, ננו רפואה וביולוגיה סינטטית ומערכתית (Israel Society for Medical and Biological Engineering, 2019).

4 כנסים בישראל

הכנס השנתי של האגודה הישראלית להנדסה ביו-רפואית

האגודה הישראלית להנדסה ביו-רפואית מקיימת מדי שנה כנס שנתי בהשתתפות אנשי אקדמיה, תעשייה ומוסדות רפואה. בפברואר 2019 התקיים בישראל הכנס השנתי של ההנדסה הביו-רפואית לשנה זו. הכנס ארך יומיים וכלל הרצאות של מובילי דעה באקדמיה מהארץ ומחול, רופאים, ואנשי תעשייה מחברות כגון פיליפס, Bioness, Barcode Diagnostics, Early Sense, Alpha Omega ועוד. למעלה מ-100 הרצאות ניתנו בתחומים שונים של ההנדסה הביו-רפואית במהלך הכנס (General information | ISMBE 2019, 2019). בכנס השתתפו כ-800 איש. בנוסף, כ-700 תלמידי תיכון הגיעו לביקור מיוחד בכנס בו הוצגו בפניהם הטכנולוגיות החדשות ביותר בתחום כדוגמת הדפסת רקמות במדפסת תלת ממד (הפקולטה להנדסה ביו-רפואית בטכניון, 2019).

כנס הביומד השנתי (IATI Biomed)

מדי שנה מתקיים בישראל כנס מרכזי בתחום הביומד שכולל חברות רבות מהארץ ומחול בתחומי הביו-פארמה, המכשור הרפואי והבריאות הדיגיטלית, וכן מובילי דעה מהאקדמיה, מהממשלה ומהסקטור הרפואי. הכנס עוסק בתחומים העומדים בחזית המחקר ומוצגים בו בין היתר נושאים כגון בינה מלאכותית בתחום הרפואה, רפואה מותאמת אישית וטיפולים ביולוגיים חדשניים. בכנס נטלים חלק מדי שנה אלפי משתתפים מישראל ומרחבי העולם. בשנת 2019 כלל הכנס אלפי משתתפים מ-45 מדינות ברחבי העולם והתמקד בנושאים הנמצאים בחזית הטכנולוגיה כגון בינה מלאכותית ברפואה, דיאגנוסטיקה ורפואה מותאמת אישית, Gene editing, רפואת המוח, בריאות דיגיטלית ופיתוחים טכנולוגיים פורצי דרך לטיפול במחלת הסרטן (IATI, 2019 - MIXiii-BIOMED 2019).

על פי ההערכות, בישראל קיימות כ-1600 חברות פעילות מתחומים שונים של מדעי החיים. מרבית החברות נמצאות בשלבי המו"פ, וכ-40% הם בשלבי ההכנסות הראשונות או בשלבים מתקדמים יותר. רובם הגדול של מרכזי הניהול של החברות נמצא בישראל ואילו כעשירית מהן ממוקם בחו"ל, בעיקר בארה"ב. בישראל עצמה, ממוקמים מרכזי החברות בעיקר באזור תל אביב וכן בירושלים ובחיפה (IATI PWC & IIA, 2019).

בישראל, התעשייה בתחום מוטה ברובה לכיוון המכשור הרפואי. חלוקת החברות בתחומי העיסוק הרלוונטיים לסקירה זאת, מראה כי כ-40% מהחברות עוסקות בתחום המכשור הרפואי וכ-20% בתחום ה-Health IT. בתחום הפרמצבטיקה עוסקות כ-13% מהחברות ובתחום הדיאגנוסטיקה כ-8%. מעט חברות (2%) עוסקות בתחום הביו-אינפורמטיקה וכ-5% בפיתוח מוצרים ביולוגיים (Biologicals) (IATI PWC & IIA, 2019).

האקו-סיסטם הישראלי בתחום הבריאות הדיגיטלית מתפתח בשנים האחרונות הודות להשקעות ממשלתיות, צמיחתן של חברות חדשות וכניסת משקיעים מקומיים וזרים. במסגרת התוכנית "בריאות דיגיטלית כמנוע צמיחה" צפויה הממשלה להשקיע בתחום זה כ-900 מיליון ₪ למשך 5 שנים החל משנת 2018. כן צפויה הממשלה לסייע בהקמתו של מאגר "פסיפס", מאגר נתונים גנטי ייחודי שמטרתו לקדם את תחום הרפואה המותאמת אישית ("התכנית הלאומית לבריאות דיגיטלית כמנוע צמיחה", 2018). במקביל, מוסדות רפואיים בישראל החלו להקים מרכזי חדשנות המשלבים מידע קליני עם פתרונות טכנולוגיים שונים. כך לדוגמא, בבית החולים שיבא הוקם מרכז לחדשנות דיגיטלית שיעסוק בחיזוי של מצבים רפואיים מתוך המידע הקליני ובפיתוח פתרונות לרפואה מרחוק (telemedicine) ("מרכז לחדשנות דיגיטלית | ARC - בית חולים שיבא - תל השומר"). המרכז הרפואי רבין בילינסון-השרון השיק לאחרונה מרכז חדשנות לשילוב טכנולוגיות בינה מלאכותית ו Big Data עם מערכי מחקר קליני ומחקר בסיסי ("בילינסון" השיק מרכז חדשנות המשלב יכולות מתחום הבינה המלאכותית", 2019). במרכזי החדשנות שהוקמו בתוך בתי החולים, יש כוונה לשתף פעולה עם חברות מהתעשייה על מנת למצוא את פוטנציאל החדשנות תוך שיתוף פעולה בין סקטורים אלו.

חברות רב-לאומיות מתעניינות אף הן בתחום הבריאות הדיגיטלית בישראל. חברות מתחום ה-ICT (כגון IBM, Amazon, Google) וכן חברות מתחום הפארמה (כדוגמת Leo-Pharma) משתפות פעולה עם גופים מישראל במטרה לנצל את הטכנולוגיה, החדשנות ומאגרי הידע הישראליים בתחום ה-Health IT. במקביל, בין השנים 2011 – 2017, חל גידול מתמיד במספר החברות הפעילות בתחום הבריאות הדיגיטלית בישראל. כמו כן, חלה עליה בהון המגויס במסגרת סבבי הגיוס בחברות אלו והוא עמד על כ-11 מיליון דולר בממוצע לסבב במחצית הראשונה של שנת 2018 לעומת כ-3.5 מיליון דולר ב-2014 (Beazley, 2018). מבין תתי התחומים המרכיבים את תחום הבריאות הדיגיטלית¹⁹⁵, כשליש מהחברות הן בתחום ה-Digital Therapeutics, העוסק במתן כלים ופלטפורמות לפציינט לעקוב ולטפל במצבים רפואיים שונים מהם הוא סובל. כחלק מהטכנולוגיה, מידע ביולוגי, התנהגותי, וסביבתי אודות החולה נאסף ומתורגם להמלצות ברות-ביצוע לשיפור מצבו הבריאותי.

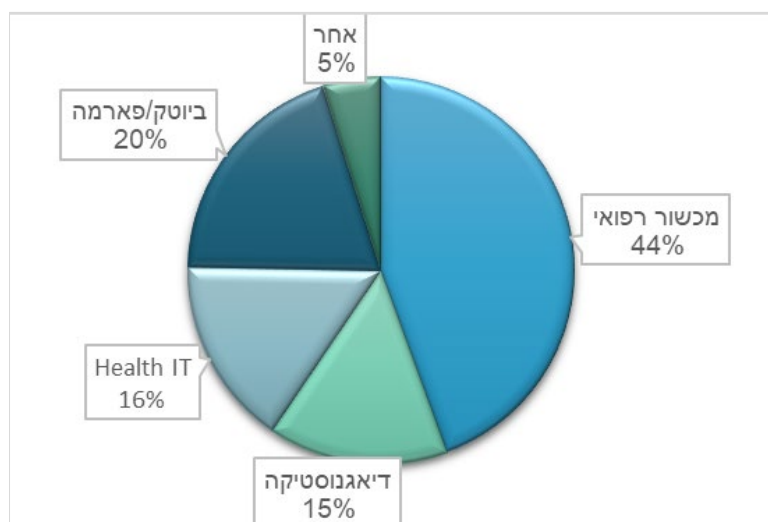
5.1 השקעות בתחומים הרלוונטיים ל Bio-Convergence בישראל

בשנת 2018, גייסו חברות מכלל תחומי מדעי החיים 1.514 מיליארד דולר ב-182 עסקאות. מתוך סכום זה, כ-40% (619 מיליון דולר) הושקעו על ידי משקיעים מישראל והיתר (895 מיליון דולר) על ידי משקיעים מחו"ל. לאורך השנים, ניתן לראות גידול מתמיד של השקעות מישראל ומחוצה לה בתחום. כך לדוגמא, בשנת 2013 הושקעו סה"כ 993 מיליון דולר מהם 398 מיליון דולר מישראל ואילו בשנת 2016 הושקעו 1.052 מיליארד דולר מהם 408 מיליון דולר מישראל. רוב החברות המגייסות היו בשלבי המו"פ (R&D) בעת גיוס הכספים (IATI PWC & IIA, 2019).

Remote Monitoring, Assistive Devices, Diagnostics, Patient Engagement, Clinical Workflow, ¹⁹⁵ Decision Support, Digital Therapeutics (Beazley, 2018)

האיור הבא מציג את אחוז גיוסי הכספים של חברות בתחום מדעי החיים מתוך כלל הסכומים שגויסו, על פי תחום העיסוק של החברה. ניתן לראות כי 60% מגיוסי ההון היו בתחומי המכשור הרפואי והבריאות הדיגיטלית (Health IT).

איור 91: אחוז גיוס ההון לשנת 2018 בישראל לפי תחום העיסוק של החברה



מקור: עיבוד מוסד נאמן לנתוני IVC Online-Database כפי שהתפרסמו בדו"ח IATI לשנת 2019 (IATI PWC & IIA, 2019)

בין השנים 2013-18 נרכשו 81 חברות ישראליות בתחום מדעי החיים בסך כולל של 8.6 מיליארד דולר. בשנת 2016 סך הרכישות הסתכם ב-539 מיליון דולר, בשנת 2017 נתון זה עמד על 2.1 מיליארד דולר, ואילו בשנת 2018 חל גידול משמעותי ביחס לשנים הקודמות והוא הסתכם ב-2.7 מיליארד דולר. (על פי נתוני IVC Online-Database כפי שהתפרסמו בדו"ח IATI לשנת 2019 (IATI PWC & IIA, 2019).

5.2 דוגמאות לחברות ישראליות העוסקות בתחום

חברת BioSense Webster – חברת BioSense Webster עוסקת בתחום הקרדיולוגיה ומפתחת מוצרים להדמיה תלת ממדית וניווט מכשור רפואי. החברה, המשלבת ידע הנדסי, תוכנה ורפואה נרכשה על ידי Johnson & Johnson. תמורת 427 מיליון דולר בשנת 1997.

(Biosense Webster, Inc. - Defining the Field of Electrophysiology, 2018; CARTO® 3 System Modules, 2014; Weinrab, 2013)

חברת Neuroderm - החברה עוסקת בפיתוח חדשני לטיפול במחלת הפרקינסון ומשלבת הנדסה ורפואה לצורך פיתוח מכשור חדשני למתן תרופות לסובלים מהמחלה. החברה נרכשה בשנת 2017 על ידי חברת מיצובישי-פארמה היפנית תמורת 1.1 מיליארד דולר "NeuroDerm – Continuous Therapy," 2014, ברגמן, 2017).

5.3 מסלולי סיוע ממשלתי

הרשות לחדשנות מציעה מספר מסלולים לתמיכה בפיתוח טכנולוגיות הנמצאות בשלבים ראשוניים ויכולות לקדם את הכלכלה בישראל בתחומים שונים ובכלל זה תחומים הקשורים ל-Bio Convergence (ראו פירוט להלן). כאמור, בשנת 2018 השקיעה הרשות לחדשנות כ-125 מיליון דולר לקידום התחומים השונים של סקטור מדעי החיים בישראל.

- תוכנית **קמין** של הרשות לחדשנות מסייעת לחבר בין האקדמיה והתעשייה ולקדם מחקרים אקדמיים שיתכן ויתפתחו למחקר תעשייתי ומסחרי ויקדמו יצירתם של מקומות עבודה במשק הישראלי. המענקים ניתנים לחוקרים ממוסדות מחקר בישראל (מסלול הטבה מס' 18 תוכנית קמין, רשות החדשנות).

- תוכנית **נופר** של הרשות לחדשנות מיועדת להכוונת ידע יישומי באקדמיה ליישום בתעשייה ומטרתה לתעל את הידע לכזה שיגרום לו להיות מאומץ על ידי תאגיד תעשייתי. התוכנית מתמקדת במחקר יישומי חדשני בתחום הטכנולוגי) שפותח במסגרת מחקר בסיסי במוסדות האקדמיים ועשוי להתפתח למחקר ופיתוח בתעשייה הישראלית (מסלול הטבה מס' 7 תוכנית נופר, הכוונת ידע אקדמי, רשות החדשנות).
- מסלול **תנופה** שמיועד לסייע ליזמים לגבש ולקדם רעיון טכנולוגי חדשני לשלב המחקר והפיתוח, בו יוכלו לגייס מימון המשך. המסלול מסייע להגיע לשלב של הוכחת היתכנות טכנולוגית ושימוט עסקית של המיזם (מסלול תנופה - סיוע ליזמים טכנולוגיים מתחילים).
- מסלול לעידוד הקמתם או הרחבתם של פעילויות המו"פ מצד תאגידים תעשייתיים זרים בתחומי הביוטכנולוגיה או הרפואה. התוכנית מעודדת תאגידים תעשייתיים זרים גדולים להקים או להרחיב במדינת ישראל פעילות של חברות הנמצאות בבעלותם בתחומי המו"פ, החדשנות הטכנולוגית או הייצור וכן העברת חלק מהפעילות שלהן לישראל. (מסלול הטבה 35 - תוכנית לעידוד הקמת או הרחבת פעילות חברות מחקר ופיתוח של תאגידים תעשייתיים זרים בתחומי הביוטכנולוגיה או הרפואה (פיילוט, רשות החדשנות). במהלך שנת 2018 נבחרו 3 חברות והן: Change Healthcare, GE, Medtronic להשתתף במסלול.
- **תוכניות מו"פ והרצה בתחומי הבריאות הדיגיטלית** – זהו מסלול משותף לרשות החדשנות, למשרד הבריאות ולמטה המיזם הלאומי ישראל דיגיטלית במשרד לשוויון חברתי, ומיועד לפיתוח ויישום טכנולוגיות חדשניות בתחומי הבריאות והרפואה ובחינת היתכנותן במערכות הבריאות. המסלול מתבסס על שיתוף פעולה בין חברות לבין ארגוני בריאות תוך שימוש בנתונים ומידע הנמצאים בידי האחרונים (תוכניות מו"פ והרצה בתחומי הבריאות הדיגיטלית, רשות החדשנות).

5.4 חממות טכנולוגיות בתחום

בישראל פועלות כיום למעלה מ-15 חממות טכנולוגיות בתתי התחומים המרכיבים את האקו-סיסטם הרלוונטי ל Bio-Convergence, חלק מהחממות נתמכות באמצעות הרשות לחדשנות ("Incubators (List | Israel Innovation Authority"; PWC & IIA, 2019).

5.5 מענקי מחקר בתחומי ה Bio-Convergence

מענקי המחקר בתחום ה Bio-Convergence נסקרו בחמשת הגופים: ERC, BARD, GIF, BIRD ו- ISF¹⁹⁶. ככלל, מענקים של ERC ניתנים לרוב למחקר בסיסי ותואמים יותר את ההגדרות של Bio convergence; bio engineering, בעוד מענקים של BIRD, שהיא קרן ייעודית למחקרים תעשייתיים, ניתנים יותר לתחומי Healthcare IT.

טבלה 12: מענקי מחקר בתחומים רלוונטיים ל Bio-Convergence

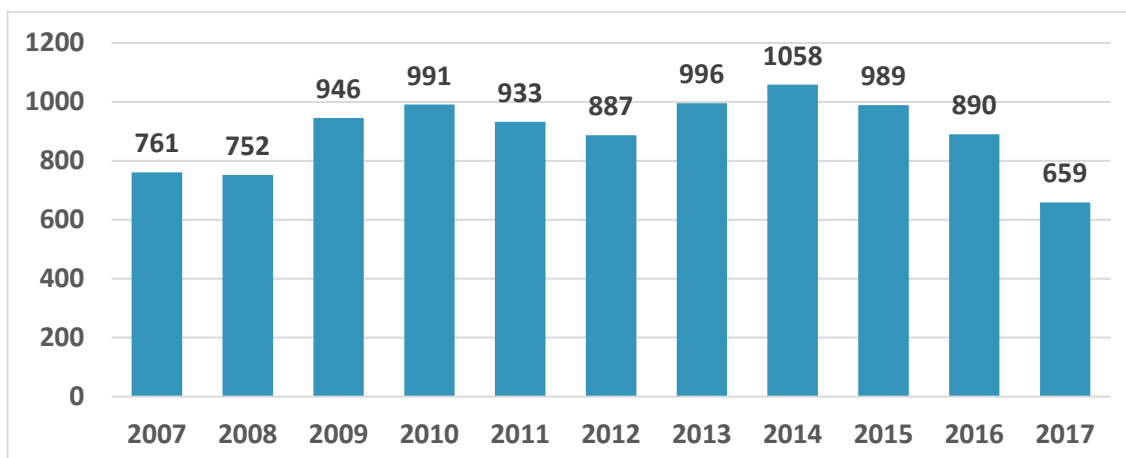
Foundation	For Years	No. of relevant Grants
ERC (European Research Council)	2007 - 2019	14
BARD (US-ISRAEL BINATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH AND DEVELOPMENT FUND)	2016 - 2019	0
GIF (The German-Israel Foundation for Scientific Research and Development)	2011 - 2018	0
BIRD (Binational Industrial Research and Development) Foundation	1988 - 2019	10
ISF (Israel Science Foundation)	1991 - 2019	6
BSF (U.S.-Israel Binational Science Foundation)	1997 - 2019	2
Total		32

¹⁹⁶ מתודולוגיה: נסקרו הגופים העיקריים מהם מקבלים חוקרי ישראל מענקי מחקר. נסקרו כל מענקי המחקר המתוארים באתר הרלוונטי, בכל השנים עבורן יש נתונים. הסריקה נעשתה על ידי מילות החיפוש (Bio convergence; bioengineering; healthcare IT; medicine), ובדיקת התוצאות למטרה המבוקשת.

5.6 פטנטים

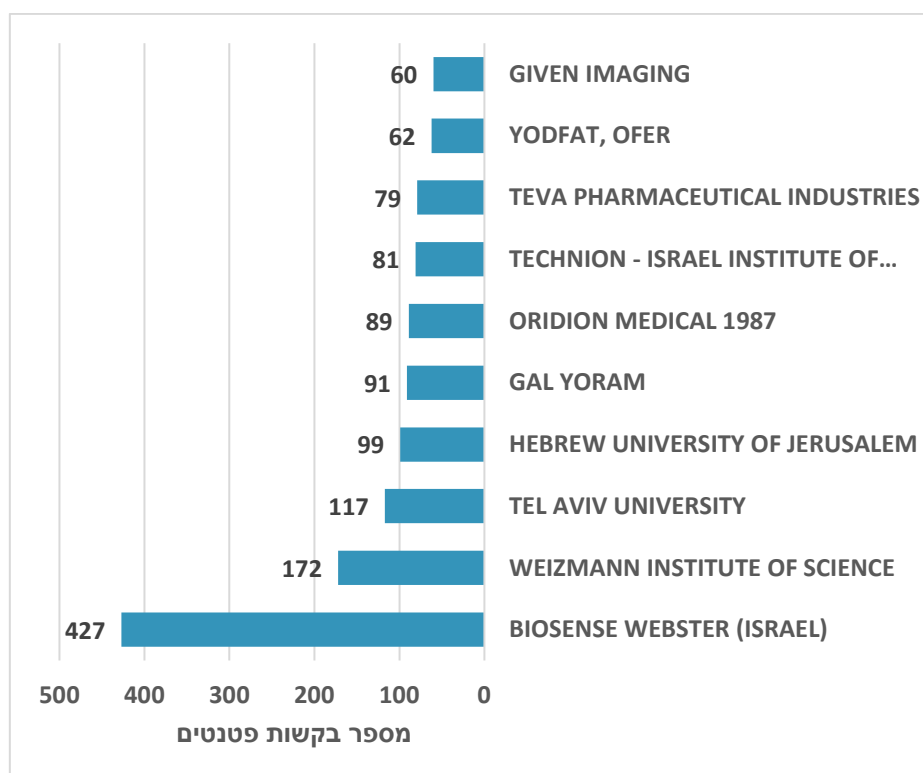
במסגרת עבודה זו ביצענו בדיקה למיפוי מספר בקשות הפטנטים בתחום ההנדסה הביו-רפואית שהוגשו מישראל בין השנים 2007-2017, על בסיס פרסומים דומים שנעשו בעולם (Alisova, 2013; Rodriguez-Esteban & Bundschus, 2016). בשל העובדה שמדובר בתחום רחב, בחרנו להתמקד באחת מתוך הקטגוריות הראשיות של תחום ההנדסה הביו-רפואית הקרובה יותר לעולמות התוכן של ההנדסה והמכשור הרפואי¹⁹⁷.

איור 92: מספר בקשות לפטנט ב-USPTO, לפי שנת הגשת הבקשה על פי סיווג טכנולוגי A61



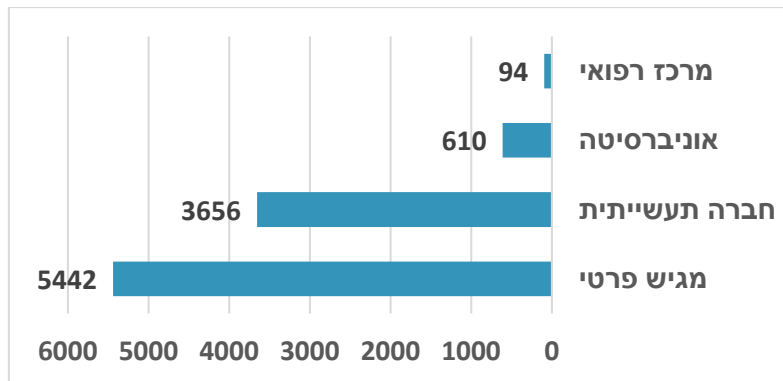
מקור: עיבוד של צוות מוסד נאמן לנתוני USPTO. הנתונים לשנת 2017 לא סופיים.

איור 93: עשרת המגישים המובילים לפטנט בשנים 2007-2017 ב USPTO לפי סיווג טכנולוגי A61



מקור: עיבוד של צוות מוסד נאמן לנתוני USPTO

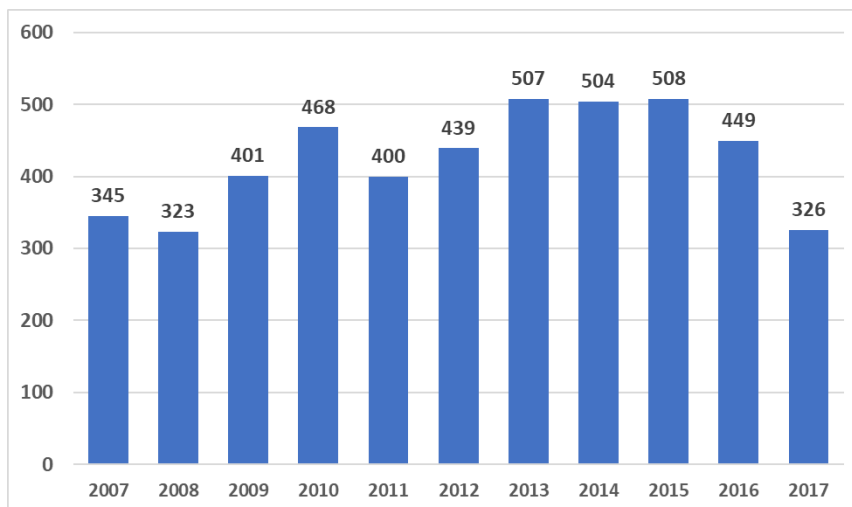
איור 94: מספר הבקשות לפטנט ב USPTO לפי פילוח סקטוריאלי בשנים 2007-2017 לפי סיווג טכנולוגי A61



מקור: עיבוד של צוות מוסד נאמן לנתוני USPTO.

האיור הבא מציג ניתוח של מספר הבקשות לפטנט שהוגשו מישראל ל USPTO בתתי הנושאים A61N, A61B בתוך הסיווג הטכנולוגי הכללי A61. תתי נושאים אלו מתייחסים לטכנולוגיות בתחום הדיאגנוסטיקה, ניתוחים, וכן Electrotherapy; Magnetotherapy; Radiation Therapy; Ultrasound Therapy

איור 95: מספר בקשות לפטנט ב-USPTO, לפי שנת הגשת הבקשה על פי תת סיווג טכנולוגי A61N, A61B



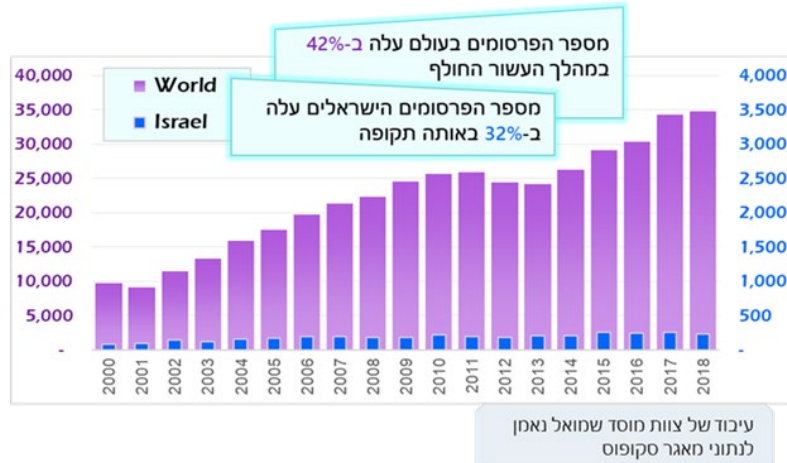
מקור: עיבוד של צוות מוסד נאמן לנתוני USPTO. הנתונים לשנת 2017 לא סופיים.

5.7 ניתוח ביבליומטרי - פרסומים מדעיים

הניתוח הביבליומטרי בוצע על פי חיפוש בעזרת מילות מפתח במאגר סקופוס של Elsevier. האירים הבאים מציגים את עיקרי הממצאים הנוגעים לפרסומים מדעיים בעולם ובישראל בתחום. כנקודת מוצא לניתוח שימש מאמר שהציג ניתוח דומה בתחום ההנדסה הביו-רפואית (Evdokimov, Goryachkina, & Leonov, 2014).

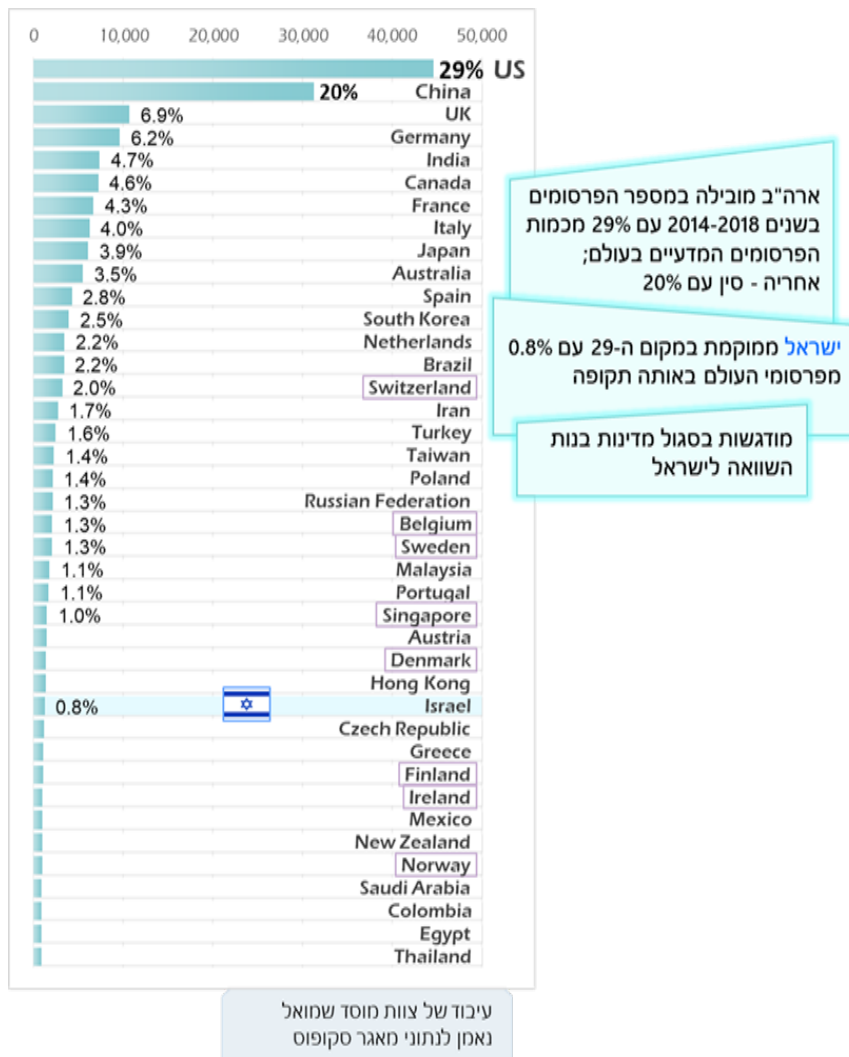
מהניתוח עולה כי מספר הפרסומים הישראליים בתחום ההנדסה הביו-רפואית עלה בעשור האחרון ב-32% ואילו בעולם עלה מספר הפרסומים ב 42%.

איור 96: מספר הפרסומים המדעיים בתחום ההנדסה הביו-רפואית בישראל ובעולם 2000-2018



מהניתוח עולה עוד כי ישראל ממוקמת במקום ה-29 עם 0.8% מכלל הפרסומים בעולם בתחום ההנדסה הביו-רפואית בין השנים 2014-2018. בעולם, מובילה ארה"ב (29% מכלל הפרסומים) ולאחריה סין (20%) ובריטניה (6.9%).

איור 97: דירוג המדינות לפי מספר הפרסומים בתחום ההנדסה הביו-רפואית בשנים 2014-2018



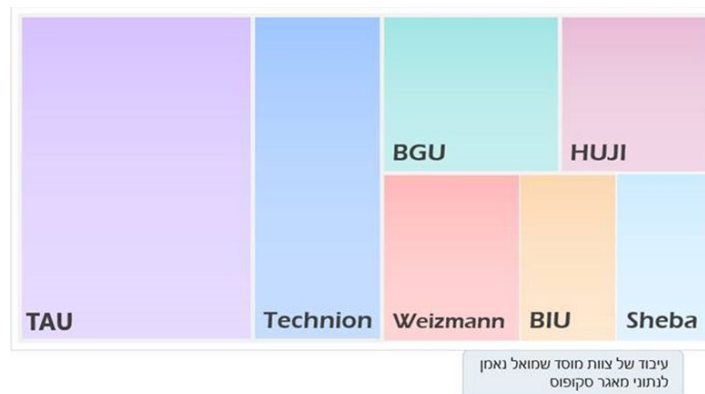
האיור הבא מציג את גופי המימון המובילים לפי מספר הפרסומים בתחום ההנדסה הביו-רפואית בשנים 2014-2018. ניתן לראות כי הגופים הממשלתיים של ארה"ב וסין עומדים בראש הטבלה.

איור 98: גופי המימון המובילים¹⁹⁸ לפי מספר הפרסומים בתחום ההנדסה הביו-רפואית בשנים 2014-2018



האיור הבא מדגים באופן סכמטי את התפלגות הפרסומים הישראליים בתחום ההנדסה הביו-רפואית לפי אוניברסיטאות¹⁹⁹ לשנים 2014-2018. ניתן לראות כי אוניברסיטת תל אביב ואחריה הטכניון מובילים במספר הפרסומים.

איור 99: תיאור סכמטי של התפלגות הפרסומים הישראליים בתחום ההנדסה הביו-רפואית לפי אוניברסיטאות בשנים 2014-2018



6 תובנות והמלצות

6.1 חולשה בתחום הפארמה החדשני בישראל לעומת פוטנציאל השוק הגלובאלי

על פי הערכות שונות, שווי שוק התרופות העולמי צפוי להגיע בשנת 2024 לכדי למעלה מ-1.1 טריליון דולר (Evaluate Pharma, 2019). לעומת זאת, שווי שוק המכשור הרפואי צפוי להגיע לכ-600 מיליארד דולר באותה תקופה (Evaluate, 2018) כמחצית מזה של שוק הפארמה העולמי.

מנתוני מכון היצוא הישראלי עולה כי שנת 2017 הייתה שנת שיא ביצוא התרופות מישראל, שהסתכם ב-7.5 מיליארד דולר (מכון היצוא הישראלי, 2018). עם זאת, בשנת 2018 חלה ירידה משמעותית של 22% לרמה של 5.85 מיליארד דולר, הנמוכה ביותר בעשור האחרון, וזאת בשל תנודות הקשורות ביצור וביצוא של חברת טבע (גזית, 2019; מכון היצוא הישראלי, 2019a). במחצית הראשונה של שנת

¹⁹⁸ מבוסס על ה Acknowledgment לגוף המממן המופיע בפרסום.
¹⁹⁹ גם באוניברסיטאות בהן לא קיימת באופן רשמי פקולטה או מחלקה להנדסה ביו-רפואית קיימים חוקרים מפקולטות אחרות שעוסקים ומפרסמים בתחום.

2019 הסתמנה ירידה נוספת של 33% בייצוא התרופות מישראל לעומת התקופה המקבילה אשתקד (מכון היצוא הישראלי, 2019b).

מניתוח שנעשה במוסד שמואל נאמן על פי נתוני Start Up Nation Central עולה שמרבית החברות בארץ העוסקות בתחום הפארמה הן חברות קטנות המעסיקות לכל היותר עד 50 עובדים ומרביתן אף פחות מכך²⁰⁰. על פי ראיונות ראשוניים שערכנו, נוכחנו לדעת כי קיימת בעיה בהכשרת ההון האנושי בהיבט של תיאום בין הידע הנרכש במהלך הלימודים האקדמיים לבין המיומנויות הנדרשות בתעשייה. פער משמעותי זה בהכשרה דורש מצד החברה המגייסת השקעה נוספת מבחינת זמן ותקציבים שאינם תמיד זמינים.

6.2 החשיבות בניצול יתרונותיה של ישראל גם לתחום הפארמה כדוגמת חדשנות טכנולוגית בתהליכי פיתוח תרופות

כאמור, על אף הפוטנציאל הכלכלי הרב שיש בשוק זה, בישראל נראה כי תעשיית הפארמה טרם הבשילה לכדי מיצוי מלא של הפוטנציאל העומד בבסיסה וזאת על אף המצוינות המדעית הבינלאומית של האקדמיה המקומית (Israel Innovation Authority, 2017; Samuel Neaman Institute, 2019). בשל מצוינותה המדעית של ישראל ופוטנציאל השוק בתחום זה, שילובם של היתרונות הטכנולוגיים בישראל עם פיתוחים חדשניים בתחום הפארמה עשויים להוות הזדמנות לקדם את התעשייה בתחום זה. על פי דו"ח IATI לשנת 2019, ישנו צורך "להדק" את הקשר של תחום הביו-פארמה אל שאר הסקטורים המשתתפים בתהליך ה-Bio-Convergence (IATI PWC & IIA, 2019). עבודות ראשוניות שנעשו במוסד נאמן תומכות בגישה זאת.

חוקרים העוסקים בגילוי תרופות חדשניות מבקשים לשלב כלים מתקדמים ויכולות אנליטיות באמצעות כמות גדולה של נתונים ובינה מלאכותית כדי לסייע בתהליך מורכב זה. מאמצים אלה מתרכזים בכמה היבטים של התהליך, כמו גילוי מבנים מולקולריים, תכנון מולקולות חדשות וניבוי תגובות כימיות הקשורות לתרופות אלה. כלים מודרניים של בינה מלאכותית (AI) מסייעים לחוקרים באיתור מבנים מולקולריים מתאימים באופן מהיר ומדויק יותר מהשיטות בהן עשו שימוש בעבר ולפיכך יש בהם פוטנציאל לקידום התחום, אם כי בשל חדשנות הטכנולוגיה, פוטנציאל זה טרם הוכח. (Buvailo & Ajami, n.d.; Coley, Barzilay, Jaakkola, Green, & Jensen, 2017; Schneider, 2018; Zhang et al., 2017).

בשל העובדה שתהליכי פיתוח תרופות בטכנולוגיות חדשניות רלבנטיות הם יקרים וארוכים ובעלי סיכון רב מבחינה טכנולוגית וכלכלית, ישנה חשיבות רבה לפיתוח חדשנות שתסייע להתגבר על החסמים בתחום זה. בשנים האחרונות חברות ענק בתחום הפארמה משתפות פעולה עם חברות המתמחות בתחום בינה מלאכותית (AI) והן משקיעות עשרות מיליוני דולרים בפיתוח שיטות חדשות המבוססות על טכניקות למידת מכונה, בינה מלאכותית וניתוח מאגרי נתונים גדולים כדי לנסות ולהאיץ את תהליך גילוי התרופות, להפחית את עלויות המו"פ ואת שיעורי הכישלון בתעשייה (Reader, 2019; Walker, 2019). זאת, בנוסף על הצורך לענות על דרישת השוק ההולכת וגוברת לספק הוכחות בנוגע ליעילותן בפועל של התרופות גם לאחר קבלת אישור רגולטורי. חשוב לציין כי המחקר החדשני הנוגע לתהליכי פיתוח תרופות אינו מוגבל לשימושים רק בכלי בינה מלאכותית וכולל גם היבטים טכנולוגיים נוספים בתחומי הביו-פארמה ובהם יצירתם של Bio-Molecular Platforms שהם מודלים המפותחים על ידי חברות מסחריות ומטרתן לאפשר גילוי של מולקולות בעלות ערך עבור מספר מחלות באופן יעיל וחסכוני מזה הקיים. על פי דו"ח של חברת מקינזי, השימוש בפלטפורמות אלו בשילוב יכולות הדיגיטציה והאוטומציה מאיץ את תהליך הפיתוח ומהווה חדשנות שעשויה להיות בעלת ערך לחברות הפארמה הגדולות (Leclerc & Smith, 2018).

עוד יש לציין כי אמנם במאמצי מו"פ אלו כלולים היבטים של בריאות דיגיטלית אך כאן אין הכוונה לשימושים ה"קלאסיים" של פיתוח תוכנה לצורך ניתוח מידע קליני ממוסדות רפואיים או ביצוע תחזיות

²⁰⁰ על בסיס ניתוח שנעשה בעזרת נתוני Start Up Nation Central עם מילות המפתח: Pharmaceutical, Biopharmaceutical, Pharmaceutical preparation, Drug-design, Orphan-drug, drug-discovery, Therapeutics

רפואיות על בסיס תיקי חולים דיגיטליים, אלא ניצול הטכנולוגיה לתחום בעל שווי שוק עצום שהרווחים בו, במקרים של פיתוחים מוצלחים, גדולים מאד ואף עשויים להיות יציבים לאורך שנים.

רתימת החדשנות הטכנולוגית והאופי היזמי בישראל למציאת שיטות טכנולוגיות להפחתת הסיכון הפיננסי וקיצור משך הזמן הנדרש לתהליכי גילוי ופיתוח תרופות חדשניות, כמו גם הנעת מו"פ על תהליכים יעילים וזולים יותר ושילוב של כלי מחשוב מתקדמים בתהליכים אלו, עשויה להיות בעלת פוטנציאל כלכלי רב לישראל. זאת, ללא הצורך בשלב הראשון, להשקיע בתהליכים הארוכים של פיתוח תרופות. לצורך יצירת מיומנויות וכישורים בתחום זה יש לשלב את האקדמיה והתעשייה ואחד המודלים העשויים להיות מועדפים לכך הינו דוקטורט תעשייתי המשלב אקדמיה עם התנסות תעשייתית בחברה פעילה.

6.3 דוקטורט תעשייתי בתחום תהליכי פיתוח התרופות

במדינות להן תעשייה מפותחת בתחום מדעי החיים כגון דנמרק, קיים מודל של דוקטורט תעשייתי (Industrial PhD) במסגרתו עבודת הדוקטורט מתבצעת בשילוב של חברה תעשייתית יחד עם המוסד האקדמי. עבודת הדוקטורט נתמכת על ידי תוכנית ממשלתית שבמסגרתה מקבל הסטודנט שכר על עבודתו בחברה התעשייתית. יתרונות התוכנית הם בכך שמדובר במדע יישומי ובפתרון בעיה מעשית הנדרשת לתעשייה, בשילובו של הסטודנט בצוות עבודה תעשייתי דבר הפותח בפניו את שוק העבודה ובהידוק הקשר בין האקדמיה והתעשייה (Industrial PhD, 2019). בישראל קיים מספר רב של בוגרי דוקטורט בתחום מדעי החיים שמחפשים תעסוקה המתאימה להכשרתם (Wilerfort, 2014), ואימוץ מודל מעין זה עשוי לסייע בכך כמו גם לקדם פתרונות יישומיים בתעשייה. מראיונות ראשוניים שערכנו בתעשיית התרופות, התרשמנו כי לרעיון זה עשויות להיות השפעות חיוביות בתעשייה ואנו ממליצים על בחינתו לעומק.

6.4 חסמים וכשלי שוק נוספים

בשיחה שקיימנו עם ד"ר ז'נט לזרוביץ' בתאריך 29 בדצמבר 2019 הועלו מספר חסמים וכשלי שוק ביישום ה- Bio-Convergence לתחום הרפואה

- קיים חוסר בהשקעות בחברות מתחילות – חברות הון סיכון נמנעות מלהשקיע בחברות ביוטכנולוגיה מתחילות בשל רמת הסיכון הגבוהה.
- המשקיעים והשוק לא מכירים את הנושא של Bio-Convergence ולא יודעים כיצד להתמודד אתו. זאת בשל העובדה שיש צורך באיחוד של מספר דיסציפלינות על מנת לפתח מוצר מצליח.
- יש בישראל הרבה בוגרי ביולוגיה שמתקשים למצוא עבודה ושלא נחשפו בכלל לשוק התרופות. לעומת זאת מהנדסים ואנשי תוכנה נחטפים על ידי תעשיית ה- ICT. כדי לבנות צוות של חוקרים בתעשיית התרופות החדשניות, יש צורך לפתור את הבעיה של זמינות כוח אדם מתאים ושילוב אנשים מדיסציפלינות שונות.
- אין ממשק מספק בין האקדמיה לתעשייה בשלבים המוקדמים של מחקר, לכן מומלץ לעודד עבודות מאסטר ודוקטורט בשילוב תעשייתי.
- אין כיום מנגנון להכשרת הדור הבא של אנשי תעשייה. חסרים מנהלים שיש להם הכרות עם שוק התרופות המורכב, שיוכלו לקדם חברות הזנק וחברות קטנות. רק על ידי פיתוח תעשיית פארמה יציבה ניתן יהיה לגשר על הפערים הללו.

6.5 קידום נושא Bio-Convergence בישראל

כדי לקדם את נושא ה-Bio-Convergence נדרש לגייס מספר משרדי ממשלה (משרד הכלכלה, משרד האוצר, משרד הבריאות, משרד החינוך, משרד לאיכות הסביבה). כמו כן, יש צורך לרתום את המל"ג לצרכי הכשרה מתאימה ואת- ISF לשם קבלת מענקי מחקר. יש צורך לעודד מענקי מחקר נוספים ולהגדיל את המענקים במסגרת תוכניות קמין ונופר של רשות החדשנות. זאת כדי ליצור זרם של רעיונות ומחקרים חדשניים שיכולים להביא להקמתם של חברות הזנק. חברות אלה צריכות להיות במצב שיוכלו לשכנע משקיעים חיצוניים שבתום תהליך של 3-5 שנים הפעילות תוביל להכנת מסמך An **Investigational New Drug Application (IND)**. מסמך זה הוא למעשה בקשה לאישור ממנהל

המזון והתרופות בארה"ב (FDA) לניהול מחקר לפיתוח תרופה או מוצר ביולוגי לשימוש בני אדם. כדי שהדבר יצליח משרד הבריאות שמשמש כרגולטור בנושא חייב להיות שותף לתהליך.

כמו כן מומלץ להקים באחת האוניברסיטאות או המוסדות להשכלה גבוהה מכון מחקר להנדסה בהשראה ביולוגית כדוגמת מכון Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering באוניברסיטת הרווארד בבוסטון, ארה"ב. זאת מתוך ראייה של הצורך בשילוב תחומים שונים של ביולוגיה, רפואה והנדסה.

מכון Wyss (The Wyss Institute)²⁰¹ משתמש בעקרונות עיצוב ביולוגיים תוך שימוש במספר תחומים מעולם ההנדסה כדי לפתח מוצרים חדשניים שיהפכו את הרפואה ויצרו עולם שהוא בר-קיימא ויותר ידידותי לבני האדם. על ידי חיקוי עקרונות ביולוגיים של הרכבה עצמית, ארגון ורגולציה, החוקרים והמהנדסים במכון מפתחים פתרונות טכנולוגיים פורצי דרך לבריאות, אנרגיה, ארכיטקטורה, רובוטיקה וייצור, המתורגמים למוצרים וטיפולים מסחריים באמצעות הקמת חברות הזנק (סטארט-אפים) חדשות ויצירת שיתופי פעולה עם חברות פארמה ואחרות.

משיחות עם מספר גורמים המעורים בנושא כולל ד"ר ז'נט לזרוביץ' וד"ר איתי קלע הרעיון המרכזי שחייבים להטמיע הוא: כאשר מקימים צוות רב-תחומי (מולטי-דיסציפלינרי) הרבה יותר קשה להוציא אותו מהארץ לחו"ל. זאת לאור העובדה שהתוצר השלם הרבה יותר משמעותי מהמרכיבים הבודדים. לכן הסיכוי גבוה שחברות שמפתחות מוצר (תרופה, תרופה ביולוגית, ציוד רפואי, כלי דיאגנוסטיקה) במודל רב-תחומי תשארנה בארץ. התוצאה היא שגדל הסיכוי להקמת תעשייה ברת-קיימא בישראל.

לסיכום חייבים לציין שבעיקרון הכסף הנדרש הוא כסף גדול ולכן יש לראות זאת כמשימה לאומית. נכון לעת הזו המשקיעים לא יודעים איך להתמודד עם הנושא ויש חשיבות רבה לבנות מודל עסקי שיודע להתמודד עם יצירת מיזם הכולל מהנדסים, אנשי ביולוגיה, קלינאים כאשר כולם מקבלים שכר שמתחרה בשוק. רק כך אפשר יהיה לייצר פרויקטים עם רעיונות חדשניים ומקוריים שיתרמו להקמת תעשייה מתוכנמת בתחום.

בנושא הכשרת כוח אדם לתחום עולה מהראיונות והמענה לשאלון²⁰² שההכשרה הקיימת כיום לתחום הינה חסרה מאוד ביחס לצרכים. צפוי שיכנסו כלים חינוכיים ורובוטיקה לעולם הביולוגיה, דבר שיידרוש הכשרה בתחומים אלו.

לימוד ביולוגיה בעתיד צריך לכלול כלים מתמטיים וחישוביים ברמה גבוהה, כמו כן יש ללמד שילוב של טכנולוגיה, בפרט רובוטיקה בביצוע ותכנון ניסויים.

בתחום השיווק נראה שישנם הרבה מאד מועמדים עם הרבה מאד ניסיון ואילו בתחומי הפיתוח נראה שאין מספיק אנשים עם רקע פיזיקאלי או הנדסת חשמל, עם ראייה מולטי-דיסציפלינרית מספקת. קשה מאד למצוא אנשים עם רקע חזק באלקטרוניקה ופיזיקה.

6.6 מינוף Bio-Convergence ליצירת פוטנציאל כלכלי עתידי

ד"ר סוזן הוקפילד (Dr. Susan Hockfield)²⁰³, האישה הראשונה שהייתה נשיאה של University of MIT וכיום היא פרופסור ל- Neuroscience וחברה במכון קוך (Koch Institute)²⁰⁴, מאמינה כי ההתכנסות של ביולוגיה והנדסה תהיה המגמה הטכנולוגית המהפכנית הגדולה ביותר של המאה ה-21. בעקבות שיחה עם דר' איתי קלע – מוביל אסטרטגי בנושא Bio-Convergence ברשות החדשות – ברורה החשיבות הגדולה בהכשרת כוח אדם איכותי על מנת לטפח את הנושא בארץ.

²⁰¹ למידע נוסף הקורא מופנה לקישורים הבאים:

https://en.wikipedia.org/wiki/Wyss_Institute_for_Biologically_Inspired_Engineering
<https://wyss.harvard.edu/>

²⁰² ראיונות/מענה לשאלון התקבל מ: פרופ' אבי שרודר, פרופ' יעל חנין וד"ר ג'נט לזרוביץ.

²⁰³ Convergence of biology and engineering will be "one of the transformational technology trends of the 21st century". **PUBLISHED:** 09 Nov 2018

<https://informaconnect.com/convergence-biology-engineering-susan-hockfield-mit/>

²⁰⁴ The Koch Institute for Integrative Cancer Research, a National Cancer Institute (NCI)-designated Cancer Center, is a state-of-the-art cancer research facility as well as the hub of cancer research on the MIT campus. <https://ki.mit.edu/>

ברשות לחדשנות הוחלט לקדם את הנושא של Bio-Convergence תוך התמקדות בתחום הרפואה כאשר החזון הוא שהנושא יתממש ויהווה מנוע צמיחה בכלכלת ישראל. באירוע השקת התוכנית בהדסה ירושלים על יד אהרון אהרון, מנכ"ל רשות החדשנות, תחת הכותרת Bio-Convergence – The Future of Health-Tech

הודגשה העובדה ש- Bio-Convergence חייבת להיות פעילות רב-תחומית שבה עובדים ביחד ביולוגים, מהנדסים, תכנתים ואחרים ממספר תחומים שהאינטגרציה ביניהם יכולה להוביל לחדשנות פורצת דרך. דוגמה לתחומים ומוצרים שפיתוחם דורש התכנסות של עולם הביולוגיה עם עולם ההנדסה אפשר לראות בדברים הבאים: Lab-on-chip תוך שימוש בטכנולוגיה של *Microfluidic לפיתוח של Microfluidic devices, הדפסה תלת ממדית (3D) של תוצרים אורגניים, Gene Editing, Bioelectronics, Ontogenetic, הנגשת תרופה בתוך גוף האדם על ידי רובוט אורגני (Living Robotics), חומרים חכמים כמו גם הנדסת רקמות.

מניתוח הפעילות של מכון Wyss באוניברסיטת הרווארד ומכון Koch ב-MIT וגם משיחה עם ד"ר איתי קלע עולה כי עולם הרפואה נמצא בנקודת שינוי שבה הטיפול הרפואי בבני אדם (פיתוח תרופות, מכשירי רפואה מתקדמים וכלי דיאגנוסטיקה) מאמץ יותר ויותר את הגישה החדשנית של Bio-Convergence. כל הנושא יכול להפוך לתעשייה עם פוטנציאל כלכלי גבוה מאוד למדינת ישראל.

- Alexander Grass Center for Bioengineering. (n.d.). Retrieved November 20, 2019, from http://cbsh.cs.huji.ac.il/Center_for_Bioengineering/Welcome.html
- Alisova, N. V. (2013). Biomedical Engineering in International Patent Classification. *Biomedical Engineering*, 47(3), 164–167. <https://doi.org/10.1007/s10527-013-9360-7>
- Beazley, A. (2018). Start-Up Nation Central Digital Health Report 2018. Retrieved November 17, 2019, from <https://lp.startupnationcentral.org/digitalhealth-2018/>
- Biosense Webster, Inc. - Defining the Field of Electrophysiology. (2018). Retrieved November 18, 2019, from <https://www.biosensewebster.com/emea/>
- Buvailo, A., & Ajami, A. (n.d.). Top 7 Trends In Pharmaceutical Research, 2018 | BioPharmaTrend. Retrieved November 24, 2019, from <https://www.biopharmatrend.com/post/60-top-7-trends-in-pharmaceutical-research-in-2018-and-beyond/>
- CARTO ® 3 System Modules. (2014). Retrieved from www.biosensewebster.com.
- Coley, C. W., Barzilay, R., Jaakkola, T. S., Green, W. H., & Jensen, K. F. (2017). Prediction of Organic Reaction Outcomes Using Machine Learning. *ACS Central Science*, 3(5), 434–443. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.7b00064>
- EBRC. (2019). Engineering Biology: A Research Roadmap for the Next-Generation Bioeconomy. Retrieved December 29, 2019, from <https://roadmap.ebrc.org/>
- Evaluate. (2018). EvaluateMedTech World Preview 2018, Outlook to 2024 | Evaluate. Retrieved December 24, 2019, from <https://www.evaluate.com/thought-leadership/medtech/evaluatemedtech-world-preview-2018-outlook-2024>
- Evaluate Pharma. (2019). World Preview 2019, Outlook to 2024. Retrieved November 24, 2019, from https://info.evaluate.com/rs/607-YGS-364/images/EvaluatePharma_World_Preview_2019.pdf
- Evdokimov, V. I., Goryachkina, T. G., & Leonov, B. I. (2014). Analysis of Publication Activity in the Field of Biomedical Engineering in 2003-2012. *Biomedical Engineering*, 48(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s10527-014-9403-8>
- General information | ISMBE 2019 . (2019). Retrieved November 13, 2019, from <http://bme-il.com/general-information/>
- IATI PWC, & IIA. (2019). Israel's Life Sciences Industry IATI Report 2019. Retrieved from www.iati.co.il
- . (n.d.). Retrieved November 13, 2019, from <https://innovationisrael.org.il/startup/programsrnd/incubators/list>
- Industrial PhD. (2019).

- . Retrieved from מצב תמונת ישראל בחדש Israel Innovation Authority. (2017).
 תמונת מצב 2017 - תמונת מצב <https://innovationisrael.org.il/sites/default/files/>
- Israel Society for Medical and Biological Engineering. (2019). Retrieved November 13,
 2019, from <http://ismbe.org.il/>
- Leclerc, O., & Smith, J. (2018). Digital and the future of drug discovery and
 development | McKinsey. Retrieved December 24, 2019, from
<https://www.mckinsey.com/industries/pharmaceuticals-and-medical-products/our-insights/how-new-biomolecular-platforms-and-digital-technologies-are-changing-r-and-d#>
- MIXiii-BIOMED 2019 - IATI. (2019). Retrieved November 21, 2019, from
<https://www.iati.co.il/conference/44/mixiii-biomed-2019>
- National Academies of Sciences Engineering and Medicine. (2019). Fostering the
 Culture of Convergence in Research: Proceedings of a Workshop | The National
 Academies Press. Retrieved November 19, 2019, from
<https://www.nap.edu/catalog/25271/fostering-the-culture-of-convergence-in-research-proceedings-of-a>
- NeuroDerm – Continuous Therapy. (2014). Retrieved November 18, 2019, from
<https://neuroderm.com/>
- NRC (National Research Council). (2014). Convergence: Facilitating Transdisciplinary
 Integration of Life Sciences, Physical Sciences, Engineering, and Beyond.
 Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18722>
- Pfizer. (2019). Pfizer Inc. - PFIZER REPORTS FOURTH-QUARTER AND FULL-
 YEAR 2018 RESULTS. Retrieved December 24, 2019, from
<https://investors.pfizer.com/investor-news/press-release-details/2019/PFIZER-REPORTS-FOURTH-QUARTER-AND-FULL-YEAR-2018-RESULTS/default.aspx>
- Reader, R. (2019). DeepMind, Insilico, and the race to change how drugs are made.
 Retrieved November 24, 2019, from
<https://www.fastcompany.com/90402484/the-billion-dollar-race-to-change-how-drugs-are-made>
- Rodriguez-Esteban, R., & Bundschuh, M. (2016, June 1). Text mining patents for
 biomedical knowledge. Drug Discovery Today. Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.drudis.2016.05.002>
- Samuel Neaman Institute. (2019). Models for Translational Medical Research in Israel.
 Retrieved November 26, 2019, from <https://www.neaman.org.il/EN/Models-for-Translational-Medical-Research--in-Israel>
- Schneider, G. (2018, February 1). Automating drug discovery. Nature Reviews Drug
 Discovery. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nrd.2017.232>
- Sharp, P. A., Cooney, C. L., Kastner, M. A., Lees, J., Sasisekharan, R., Yaffe, M. B.,
 ... Sur, M. (2011). The Third Revolution: The Convergence of the Life Sciences,
 Physical Sciences, and Engineering.

Technavio. (2019). Medical Device Companies: Top 10 in the World 2019 | Global Medical Device Industry Report. Retrieved December 24, 2019, from <https://blog.technavio.com/blog/top-10-medical-device-companies-worldwide>

Walker, J. (2019). Machine Learning Drug Discovery Applications – Pfizer, Roche, GSK, and More. Retrieved November 24, 2019, from <https://emerj.com/ai-sector-overviews/machine-learning-drug-discovery-applications-pfizer-roche-gsk/>

Weinrab, G. (2013). Israel attracts global healthcare giants - Globes. Retrieved November 18, 2019, from <https://en.globes.co.il/en/article-1000810965>

What Do We Offer? | FutuRx. (2019). Retrieved November 6, 2019, from <https://www.futurx.co.il/what-do-we-offer/>

Wilerfort, T. (2014). הדנא הלא תקין של לימודי מדעי החיים בישראל. Retrieved January 30, 2019, from <https://www.calcalist.co.il/Ext/Comp/ArticleLayout/CdaArticlePrint1280/0,16492,3629085,00.html>

WIPO. (n.d.). A61. Retrieved November 19, 2019, from <https://www.wipo.int/classifications/ipc/en/ITsupport/Version20180101/transformations/ipc/20180101/en/html/A61.htm>

Zhang, C., Idelbayev, Y., Roberts, N., Tao, Y., Nannapaneni, Y., Duggan, B. M., ... Gerwick, W. H. (2017). Small Molecule Accurate Recognition Technology (SMART) to Enhance Natural Products Research. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13923-x>

. (n.d.). Retrieved November 20, 2019, from <http://moon.cc.huji.ac.il/nano/pages/WebChugInfoNew.aspx?page=&removebutton=1&faculty=2&year=0&entityType=chug&entityId=582°reeCode=72>

". (2019). Retrieved November 20, 2019, from <https://quality.doctorsonly.co.il/2019/09/174325/>

'. Retrieved November 18, 2019, from <https://www.yediot.co.il/articles/0,7340,L-4993800,00.html>

. Retrieved November 6, 2019, from <https://www.calcalist.co.il/local/articles/0,7340,L-3753661,00.html>

. (n.d.). Retrieved November 13, 2019, from <https://engineering.m.tau.ac.il/biomed/main>

. (n.d.). Retrieved November 13, 2019, from <https://in.bgu.ac.il/engn/biomed/Pages/default.aspx>

– Faculty 2019 of Biomedical Engineering. Retrieved November 19, 2019, from <https://biomed.faculty-ms.technion.ac.il/2019-הכנס-השנתי-להנדסה-ביו-רפואית-2019/>

. (2018). Retrieved from [צמיחה כמנוע דיגיטלית לבריאות הלאומית](#)

https://www.gov.il/BlobFolder/pmopolicy/des3709_2018/he/digital290418.pdf

מכון היצוא הישראלי. (2018). התפתחויות ומגמות ביצוא הישראלי דו"ח סיכום לשנת 2017 ותחזית ל 2018.

מכון היצוא הישראלי. (2019a). התפתחויות ומגמות ביצוא הישראלי דו"ח מסכם לשנת 2018 ותחזית 2019.

מכון היצוא הישראלי. (2019b). התפתחויות ומגמות ביצוא הישראלי סיכום למחצית הראשונה של 2019.

מסלול הטבה 35 - תכנית לעידוד הקמת או הרחבת פעילות חברות מחקר ופיתוח של תאגידים תעשייתיים זרים בתחומי הביוטכנולוגיה או הרפואה (פיילוט) | Israel Innovation Authority (n.d.). Retrieved November 18, 2019, from <https://innovationisrael.org.il/rules/3247>

מסלול הטבה מס' 18 תכנית קמין – Israel Innovation Authority | רשות החדשנות. (n.d.). Retrieved November 18, 2019, from <https://innovationisrael.org.il/rules/2935>

מסלול הטבה מס' 7 – נופר – הכוונת ידע אקדמי – Israel Innovation Authority | רשות החדשנות. (n.d.). Retrieved November 18, 2019, from <https://innovationisrael.org.il/rules/3085>

מסלול תנופה - סיוע ליזמים טכנולוגיים מתחילים | רשות החדשנות. (n.d.). Retrieved November 18, 2019, from https://innovationisrael.org.il/tnufa?gclid=EAlalQobChMI5oiatYrz5QIV1oTVCh0utAmoEAAYASAAEgKq7fD_BwE

מרכז לחדשנות דיגיטלית | ARC - בית חולים שיבא - תל השומר. (n.d.). Retrieved November 17, 2019, from <https://www.sheba.co.il/>

מרכזים ומכונים | מכון ויצמן למדע. (n.d.). Retrieved November 20, 2019, from <https://www.weizmann.ac.il/pages/he/research-activities/centers-and-institutes>

תכניות מו"פ והרצה בתחומי הבריאות הדיגיטלית – Israel Innovation Authority | רשות החדשנות. (n.d.). Retrieved November 18, 2019, from https://innovationisrael.org.il/general_content/3760

מדע וטכנולוגיה



מוסד שמואל נאמן
למחקר מדיניות לאומית

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