

# 'מרוץ החידוש'

טכנולוגיות מסחריות וצבאיות באמצעי  
לחימה – נקודת האיזון המתאימה





קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה



המכללה לביטחון לאומי

# 'מרוץ החידוש'

טכנולוגיות מסחריות וצבאיות באמצעי לחימה –  
נקודת האיזון המתאימה

גיא פאגלין

ינואר 2018

## המרכז למחקר של המכללה לביטחון לאומי, צה"ל

מרכז המחקר של המכללה לביטחון לאומי עוסק בחקר תופעות מתהוות בהקשרי הביטחון הלאומי, בשיתוף פעולה אקדמי עם מכללות מקבילות בחו"ל ובפיתוח ידע אקטואלי להוראה במכללה. חצר המכללות מבקשת לשמש אכסניה ובית מדרש, אשר בו יתפתח ידע חדש ורלוונטי עבור גופי הביטחון הלאומי, מכללות צה"ל וגופי מחקר עמיתים, בארץ ובחו"ל, ובהשתתפותם. המרכז שם לו למטרה לממש את הייעוד המחקרי של המכללה לביטחון לאומי, תוך ניצול יתרונו היחסי בתחום הביטחון הלאומי כמקום מפגש בין-ארגוני ולאור ניסיונם המעשי של התלמידים, הבא לידי ביטוי במחקר.

## קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה, אוניברסיטת חיפה

הקתדרה עוסקת בנושאי הביטחון הלאומי שלהם ביטוי מרחבי, דוגמת משאבים טבעיים ותפוצתם, פריסת האוכלוסייה, התשתית הפיזית והמרכיבים הסביבתיים. הקתדרה מפרסמת ניירות עמדה, נותנת ייעוץ למקבלי החלטות בכירים, יוזמת מחקרים, ימי עיון וכנסים, מוציאה ספרים ועבודות מדעיות ומסייעת לתלמידי מחקר בתחומים הנזכרים לעיל. כמו כן עוסקת הקתדרה בהפצת הנושא בבתי הספר התיכוניים ומוסדות אקדמיה.

## ראובן חייקין ז"ל (1918-2004)

ראובן חייקין נולד בתל אביב, היה שותף בכיר במשרד רואי החשבון סומך-חייקין, גילה עניין רב בגאוגרפיה ובגאופוליטיקה וסייע רבות לתחומים אלה באוניברסיטת חיפה.

יהי זכרו ברוך!

ראש הקתדרה: **שאל חורב** schorev@univ.haifa.ac.il

ראש תחום מחקר במכללה לביטחון לאומי: **ד"ר ענת שטרן**

עריכת לשון: **מרים מילשטיין**

עריכה גרפית והבאה לדפוס: **נוגה יוסלביץ**

הודפס בישראל בשנת 2018

© כל הזכויות שמורות לקתדרת חייקין לגאואסטרטגיה, אוניברסיטת חיפה

ISBN 965-7437-64-3

הדפסה: מפעל הדפוס, אוניברסיטת חיפה

כריכה: מבוסס על ציור של: Bálint Kiss, Scene from the War against the Turks 1857

<http://ch-strategy.hevra.haifa.ac.il>

## תוכן העניינים

5	הקדמה
6	פתח דבר
8	מבוא
13	<b>פרק ראשון: מדע, מלחמה וטכנולוגיה</b>
13	התקופה הראשונה – מדע וטכנולוגיה עד למלחמת העולם הראשונה
15	תקופה שנייה – השתנות פני הלחימה במאה העשרים
18	הדיאלקטיקה שבין מדע וטכנולוגיה לבין המלחמה
21	סיכום ופנים לעתיד – מהפכת ה-IT (Information Technology)
24	<b>פרק שני: טכנולוגיות והעברת טכנולוגיה – מונחי יסוד</b>
29	סיכום
30	<b>פרק שלישי – מערכת החדשנות הלאומית בישראל</b>
30	הגדרת המערכת
30	התעשיות הביטחוניות הממשלתיות
34	התעשיות הביטחוניות בישראל – ממשלתיות ופרטיות
36	המעבדות הלאומיות, מוקדי הידע והתשתיות הלאומיות בישראל
38	גופי משרד הביטחון (משהב"ט)
39	התעשייה הטכנולוגית הפרטית (תעשיות העילית/ההזנק)
42	משרד הכלכלה – הרשות לחדשנות טכנולוגית (בעבר ה"מדען הראשי")
42	גופי המחקר הבסיסי והתשתיתי בישראל
43	סיכום ודיון
45	<b>פרק רביעי – מאפייני מערכות הלחימה</b>
45	ארכיטקטורה של מערכות נשק ו"מערכת של מערכות"
46	תהליך הפיתוח של אמל"ח
48	דרישות ייחודיות ממערכת לחימה
49	דילמת הרכש למול הפיתוח העצמי
50	סיכום
53	<b>פרק חמישי – ה'היסט' במערכת החדשנות המשולבת</b>
53	תופעת היפוך המגמה בהעברת טכנולוגיות
54	דוגמה 1: טכנולוגיות הטלפון החכם – מצבאיות למסחריות
55	דוגמה 2: Information Technology – התפתחות מואצת (מעריכית)
59	דוגמה 3: ראיית לילה – שני מקרים של הובלה: צבאית ומסחרית
61	חקר התופעה – משפחות טכנולוגיות נוספות
61	סיבות אפשריות להיפוך המגמה וההאצה האזרחית
68	סיכום
69	<b>פרק שישי – השפעת המציאות המשתנה על מערכת החדשנות</b>
70	חסם המוטיבציה העסקית-רגולטורית (במו"פ ובייצור והתאמה)
71	החסם ההתקשרותי (מחקר ופיתוח)
72	החסם המשפטי – קניין רוחני

---

73	החסם הפנימי במערכת החדשנות הביטחונית
74	החסם התהליכי נוהלי
75	חסם אבטחת המידע, משטר ספקים
76	שיקולים אסטרטגיים נוספים: אמברגו, תלות
77	סיכום
79	ממצאים
80	מסקנות
81	המלצות – קווים ראשוניים
84	המלצה למחקרי המשך – שעלו במהלך כתיבת העבודה ולא נענו
84	תודות
85	<b>מקורות</b>

## הקדמה

בעשורים האחרונים השתנה אופי המלחמה. עלייתם של ארגונים בלתי סדירים הנטמעים באוכלוסייה האזרחית לצד התפתחות טכנולוגית מהירה מהווים אתגר לצבאות הסדירים בתחום הפעלת הכוח ובנייתו. התפתחותה המעריכית (אקספוננציאלית) של הטכנולוגיה מקשה על מערכות פיתוח אמצעי הלחימה הנאלצות להתמודד עם שינויים תכופים המקשים על התהליכים הסדורים של בניין הכוח בצבאות הסדירים כפי שהתפתחו לאורך עשורים בעת המודרנית.

במחקר שלפניכם, שנכתב כעבודת גמר במכללה לביטחון לאומי, בוחן תא"ל גיא פאגלין את התמורות שחלו במערכת החדשנות הביטחונית של ישראל על מנת למצוא את נקודת האיזון המתאימה בפיתוח אמצעי לחימה בין פיתוח עצמי לרכש טכנולוגיות מסחריות והתאמתן לדרישות המבצעיות. חלקו הראשון של המחקר עוסק בהתפתחויות ההיסטוריות בתחום פיתוח אמצעי הלחימה ובחינת התפתחות הקשר הקיים כיום בין לבין העולם האזרחי. מניתוח המגמות בשוק עולה כי חל שינוי בקשר בין עולם הפיתוח הצבאי לבין השוק האזרחי. אם בעבר המערכת הצבאית הובילה את הפיתוח הרי שכיום מנוע החדשנות המשמעותי נמצא בשוק האזרחי. העבודה סוקרת דוגמאות למעבר של הטכנולוגיה מהעולם הצבאי לאזרחי (תופעת ה-Spin Off) ומצביעה על תופעה חדשה יחסית של מעבר טכנולוגיה מן העולם האזרחי מסחרי לעולם הצבאי (תופעת ה-Spin On). בחלקו השני בוחן המחקר את התפתחות "מירוץ החידוש" בין המערכת האזרחית המסחרית לבין מערכת החדשנות הצבאית, ומראה את היחס הדיאלקטי בין העולמות המורכב מזרימה דו-כיוונית והשפעה הדדית של גופים הנמצאים בה בעת בתחרות.

בחלקו השלישי של המחקר, לאחר מיפוי יסודי של גופי הפיתוח והטכנולוגיה הצבאיים והאזרחיים בישראל, מצביע תא"ל פאגלין על פיצול ארגוני בין השוק האזרחי לעולם הפיתוח הצבאי אשר פוגע במיצוי מיטבי של טכנולוגיות לטובת הביטחון הלאומי של מדינת ישראל. על מנת לשמור על ייחודה ועל הנכסים האסטרטגיים של מדינת ישראל נותחו חמישה חסמים מתחומים שונים שאותם יש לפרוץ. בסיכום העבודה מצביע תא"ל פאגלין על הצורך בביצוע שינוי פרדיגמטי שיאחד את כלל הגופים מהשוק הצבאי והאזרחי למערכת אחודה בכל הקשור לפיתוח אמצעי לחימה, ומציע מספר שיפורים שסייעו בהתייעלות גופי הפיתוח הביטחוניים לשם מיצוי מיטבי של פוטנציאל השוק המסחרי, זאת על מנת לשמור על האינטרסים הביטחוניים של מדינת ישראל.

ניסיונו המקצועי העשיר, היכרותו העמוקה עם מערכות החדשנות הצבאיות והאזרחיות בצירוף יכולת הניתוח המרשימה של תא"ל פאגלין תרמו לכתיבתו של מחקר חשוב זה המומלץ לקריאה למקבלי ההחלטות בתחום בניין הכוח בגופים הביטחוניים ומחוצה להם.

בברכת קריאה מלמדת

אלוף תמיר הימן

מפקד המכללות הצבאיות

## פתח דבר

עבודה זו שבוצעה כעבודת גמר של תא"ל גיא פאגלין במכללה לביטחון לאומי (מב"ל) עוסקת בנושא מרכזי בתחום פיתוח אמצעי לחימה צבאיים, והוא בחינת המגמות בתחום המחקר והפיתוח של טכנולוגיות עילית חדשניות שפותחו לשימושים אזרחיים, ובהתאם למגמות אלה, איתור ההזדמנויות לשימוש בטכנולוגיות אלה במערכות לחימה צבאיות.

בפרספקטיבה היסטורית ניתן לציין כי חלק גדול מהטכנולוגיות המצויות כיום בשימוש מסחרי נרחב, כגון המחשב, אמצעי ראיית לילה ורשת האינטרנט, הם פרי מחקר ופיתוח צבאיים שבוצעו ברוב המקרים במימון צבאי ובמעבדות המחקר והפיתוח הביטחוניות. במלחמת העולם השנייה והמלחמה הקרה גויסו מעבדות אלו לשירות המדינות השונות כדי לספק מענה יצירתי וחדשני לבעיות מבצעיות שהתעוררו.

לאחר תום המלחמה הקרה ובעקבות תופעת הגלובליזציה בכלכלה העולמית, לצד העלייה בדרישה לפתרונות חדשניים בתחום רחב של נושאים אזרחיים, התפתחה "הטכנולוגיה האזרחית" במהירות והקיפה מוצרים מתחומים רבים. לצד הדרישה הגוברת לפתרונות טכנולוגיים יצירתיים בשוק האזרחי הצטמצמו מאוד תקציבי המחקר והפיתוח הצבאיים, וחלק מהמעבדות הלאומיות הביטחוניות נסגרו, ו/או היקף פעילותן צומצם עד מאוד. לצד תופעה זו חל גידול משמעותי ביותר משנות 1990 ואילך בפעילות חברות טכנולוגיות עילית (היי-טק), שהכניסו לתחום החדשנות (בנוסף לנושא איכות הפיתוח), שני קריטריונים חדשים והם: זמינות הטכנולוגיה למוצר מפותח ומחירה הנמוך יחסית. בשל מגמות אלו ניצבים הגורמים המופקדים על פיתוח אמל"ח עבור מערכת הביטחון בפני מציאות חדשה הטומנת בחובה אתגרים והזדמנויות מורכבים בכל הקשור להחלטות באילו נסיבות ותנאים נכון לתקצב פיתוח טכנולוגיות חדשניות למערכות הלחימה, ובאלו נסיבות עדיף לרכוש אותן מהשוק האזרחי ולהתאימן למערכות הלחימה המפותחות על ידי מערכת הביטחון.

תא"ל גיא פאגלין, מחבר עבודה זו ערך עבודת מחקר מקיפה שכוללת את הרקע ההיסטורי של מחקר ופיתוח אמצעי לחימה עבור צבאות שונים בעולם המערבי וישראל בעשורים האחרונים, עקב אחר המגמות השונות בין טכנולוגיות שפותחו עבור גורמים ביטחוניים, ואחר יחסי הגומלין בין אזרח טכנולוגיות צבאיות לבין אימוץ טכנולוגיות שפותחו על ידי המגזר האזרחי למערכות המפותחות למטרות צבאיות.

בסיומו של תהליך מתודולוגי יסודי ומקיף מגיע מחבר העבודה למסקנה כי:

*כדי לאפשר למערכת החדשנות הביטחונית להתמודד עם האתגרים של הדור הבא בכל ממדי הלחימה, ולבצע את 'קפיצת המדרגה' שתשאיר אותה ביתרון יחסי, צריכה מערכת הביטחון לנצל את יתרונותיה של מדינת ישראל הן בעולם החדשנות הטכנולוגי (העולם המסחרי), והן במערכת החדשנות הביטחונית, שלה יתרון מוכח בעולם ביכולת למצוא טכנולוגיות ולהפכן*

*למערכת לחימה. על כן, נדרש לתכנן אסטרטגיית זינוק לעולם המחקר ופיתוח, שתתאים למציאות המתהווה, תתמודד עם החסמים שתוארו, וזאת תוך מיצוי הפוטנציאל בישראל.*

עקב חשיבותה של עבודה זו מצאו לנכון קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה באוניברסיטת חיפה והמכללה לביטחון לאומי לפרסם במשותף עבודה זו ולהפיצה בקרב קהלי יעד מגוונים העוסקים בנושא.

ראוי כי עבודה זו תשמש את הגורמים האחראיים למחקר ופיתוח הביטחוני כבסיס להערכת מצב מקיפה יותר, שלאורה ניתן יהיה לשנות את המדיניות הקיימת בנושא המחקר ופיתוח הביטחוני בישראל בתחום זה, לאור השינויים והאתגרים העומדים בפניה, כפי שעבודה זו מתארת בצורה מקיפה וברורה.

פרופ' שאל חורב

ראש קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה



## מבוא

עניינה של עבודה זו הוא בהגדרת נקודת האיזון המתאימה בפיתוח אמצעי לחימה (אמל"ח) בין רכש טכנולוגיות ומוצרי מדף מסחריים (COTS<sup>1</sup>) והתאמתם, לבין פיתוח עצמי. העבודה ממוקדת באמל"ח המפותח בישראל על בסיס טכנולוגיות עילית מסחריות שיש להן שימוש כפול: ביטחוני ומסחרי (לרבות טכנולוגיות דואליות<sup>2</sup>). בעוד פיתוח האמל"ח בישראל מתבצע על ידי מערכת החדשנות הביטחונית (לרבות: גופי צה"ל, גופי משרד הביטחון, התעשיות הביטחוניות והמעבדות הלאומיות) ומערכות האמל"ח מתאפיינות בכך שהן עתירות טכנולוגיות, פיתוח טכנולוגיות עילית מסחריות וטכנולוגיות דואליות מתבצע על ידי מערכת החדשנות האזרחית הכוללת גורמים מסחריים אזרחיים (תעשיות העילית וההונק בעיקר) וציבוריים (מעבדות המחקר ואוניברסיטאות).

בשנים האחרונות חל גידול הן בכמות אמצעי הלחימה הנשענים על רכיבים ומכלולים של טכנולוגיות מסחריות, והן בקצב ההתפתחות של הטכנולוגיות הללו. ההתפתחות הטכנולוגית של הטכנולוגיות בעלות השימוש הכפול נובעת מסיבות רבות, ובעיקר השימוש הנרחב בהן על ידי הצרכן הפרטי, במיוחד בסביבה הקרובה, בבית, בדרכים ובעבודה (טלפונים סלולריים, רכבים, מחשבים, אמצעי תקשורת וכיוצא בזה). שימוש נרחב זה מעודד השקעות בתחום (במיוחד בישראל), המביאות בו לחדשנות רבה לצד האצת התפתחות והיצע של טכנולוגיות ומוצרים טכנולוגיים איכותיים וזולים בזכות 'היתרון לגודל' (כמות).

בד בבד החל מתחילת המאה העשרים חלו שינויים מרחיקי לכת בפניה של המלחמה ובאופיו של האויב אשר כנגדו מפותחות מערכות הלחימה, ואלה הגדילו את תחום העניין הצבאי ממלחמות רחבות היקף מול מדינות וכוחות להתמודדות רציפה כנגד איומים לא-מדינתיים, לרבות ארגוני טרור, אשר פועלים מתוך ונגד אוכלוסייה אזרחית. בזירת הפעולה האסטרטגית הצבאית החדשה כמות האמצעים והטכנולוגיות המסחריים ואיכותם היא גבוהה ביותר, וקצב התפתחותם הוא מעריכי (אקספוננציאלי). דוגמה לכך היא התפתחות הרשת והיקף המחשבים והמעבדים המחוברים אליה, עד כדי הפיכתה מתווך אזרחי מסחרי לתווך לחימה המעניין את גופי הביטחון.

בשל מגמות אלו ניצבת בשנים האחרונות בפני הגורמים האמונים על פיתוח אמל"ח מציאות טכנולוגית חדשנית חדשה, לצד מציאות ביטחונית חדשה. בעבודה זו תתואר המציאות החדשה המתהווה, התפתחותה ההיסטורית, וההזדמנויות והאתגרים שהיא מציבה בכלל, ובהקשר להתנהלות ומדיניות המחקר ופיתוח בפרט. השאלות העומדות במרכז הדיון הן: באילו נסיבות/תנאים נכון לרכוש טכנולוגיות מסחריות ולהתאימן לדרישות, ובאילו נסיבות/תנאים נכון לפתח

1 COTS – Commercial off the shelf items. COTS items are commercial items that have been sold, leased, or licensed in substantial quantities in the commercial marketplace and that are offered to the Government without modification.

2 Dual Use Technology – dual-use is technology that can be used for both peaceful and military aims, mainly for WMD (Weapons of Mass Destruction) and its derivatives.

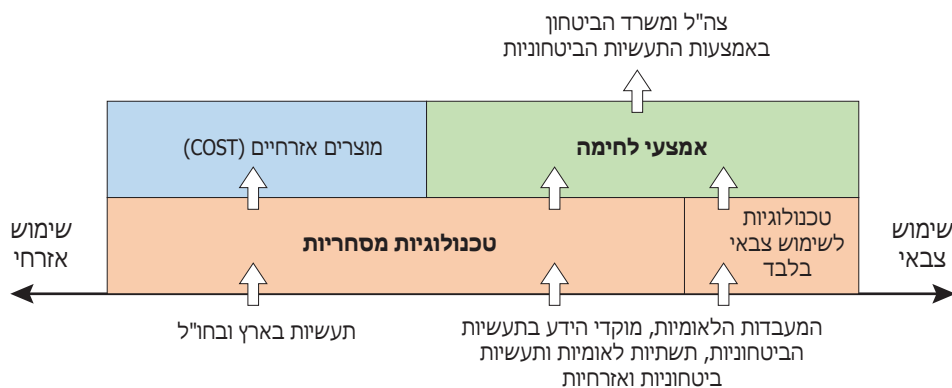
טכנולוגיות ומוצרים אלו באופן עצמי? לשימוש בטכנולוגיות מסחריות או מוצרי מדף והתאמתם לצורכי מערכת הביטחון ישנם הזדמנויות, חוזקות ויתרונות רבים, כדוגמת: קיצור זמן הפיתוח, צמצום עלויות הפיתוח ולעיתים גם באיכות התוצרים, אך לצידם גם חסרונות וסיכונים רבים, כדוגמת: חוסר עצמאות טכנולוגי, תלות בגורם חיצוני, סיכון ל-"Backdoor" שיאפשר שליטה זרה או פגיעה במערכת,<sup>3</sup> זיופים ברכיבים אלקטרוניים הנעשים בשוק המסחרי, שליטה בספקים ועוד. בנוסף לכך, כיוון שמערכת החדשנות הביטחונית לא השתנתה כמעט מאז הימים שבהם עיקר הפיתוח היה עצמי ישנם חסמים רבים לשינוי הפרדיגמטי הנדרש כדי לנצל את ההזדמנויות הרבות הטמונות בשימוש במוצרי מדף, לרבות חסמים ארגוניים, חסמים תהליכיים, חסמים התקשורתיים ועוד.

האמל"ח שבו תדון העבודה הוא המפותח בישראל, המבוסס (גם) על טכנולוגיות ורכיבים מסחריים, ומיועד למשתמשי קצה, כדוגמת: זרוע היבשה, כוחות מיוחדים, תקשור"ב, מודיעין, לוחמה אלקטרונית, שכבות הגנה, כלי טיס מופעלים מרחוק (כטמ"מ), לווייניות, מערכות עבור מטוסים, ספינות וצלולות (ללא דיון בפלטפורמות עצמן ובטכנולוגיות הימיות והאוויריות שאינן מפותחות בארץ).

פיתוח טכנולוגיות בידי מדינת ישראל מתבצע באמצעות השקעות של מערכת הביטחון במוקדי הידע והתשתיות הלאומיות בתעשיות הביטחוניות, באמצעות המעבדות הלאומיות או גופים מסחריים (תעשיות הביטחון הפרטיות). ההחלטה להשקיע בפיתוח טכנולוגיה על ידי ביצוע מערכת הביטחון והמעבדות הלאומיות היא תוצאה של ניהול יעדים וסיכונים, הלוקחים בחשבון, מחד גיסא את ההשקעות והמשאבים הנדרשים לפיתוחה, ומאידך גיסא את הטכנולוגיות הקיימות בעולם: את אלה הזמינות לטובת ישראל ואת מידת היכולת, הסיכון ומגבלות השימוש בהם. איור 1 מתאר את הגורמים השונים הפועלים בעולם הטכנולוגי, הרלוונטי לפיתוח אמצעי לחימה, ואת ההפרדה הסמנטית שבין טכנולוגיות ומוצרים מסחריים וצבאיים.

מטרת העבודה היא להצביע על התמורות שחלו במערכת החדשנות הביטחונית בישראל, ולהציע קווים להתמודדות יעילה עם תמורות אלו, ובעיקר, להמליץ על נקודת האיזון המתאימה בפיתוח אמל"ח בישראל שבין רכש טכנולוגיות מסחריות והתאמת, לבין פיתוח עצמי. בין השאר ייעשה ניסיון בעבודה להצביע על השינוי שחל במערכת הדיאלקטית שבין העולם המדעי-טכנולוגי לבין עולם המלחמה ומאפייניו על ארבעת דורותיו (באמצעות גניאולוגיה); להצביע על התמורות שחלו בפיתוח טכנולוגיות ומוצרים טכנולוגיים על ידי המערכת הביטחונית למול המערכת המסחרית החל משנות התשעים, ולמפות ולנתח את הגורמים והתהליכים שהובילו לתמורות אלו; לציין את ההשלכות של תמורות אלו על הגופים המפתחים את הטכנולוגיות ואת האמל"ח במערכת הביטחון;

3 ראה מקרה ה-F-35 וסירובם של האמריקנים לתת לנו את התוכנה, תוך כדי הקטנת היכולת לפתח את האינטגרציה של מערכות לכלי, והשארת הפיקוח והבקרה האמריקנית על הכלים (וייתכן אף במישור הטקטי), כדוגמה למקרה של אפשרות שליטה חיצונית במערכת. דוגמה נוספת: חבלה בתשתיות במתקן חיוני באמצעות "נוזקה" שמטרתה פגיעה פיזית בתשתית באמצעות הרשת.



איור 1: מוצרים וטכנולוגיות צבאיים ומסחריים בישראל

לנסח עקרונות למיצוי מיטבי של טכנולוגיות ומוצרים הקיימים באזרחות לטובת מערכת הביטחון תוך שמירה על האינטרסים והנכסים הטכנולוגיים והתשתיתיים של מדינת ישראל; ולסיכום, יומלץ על קווים ראשוניים לשיפור ועדכון השיטות והתהליכים לפיתוח אמצעי לחימה שיכולים להתאים יותר למציאות המשתנה.

בעבודה יוצגו מספר שאלות:

1. מהן אבני הדרך בשינוי המגמה שחל בקצב התפתחות מוצרים טכנולוגיים בין המערכת האזרחית-מסחרית לבין המערכת הביטחונית?
2. מה היו הגורמים והתהליכים, הפנימיים והגלובליים, שהאיצו את תהליכי השינוי?
3. מהן המשמעות וההשלכות על מערכות המחקר והפיתוח הביטחוניות (מערכת החדשנות הביטחונית בישראל)?
4. מהי נקודת האיזון המתאימה בפיתוח אמל"ח שבין רכש טכנולוגיות מסחריות והתאמתן לבין פיתוח עצמי?
5. מהם הטכנולוגיות והמוצרים אשר מערכת הביטחון צריכה להמשיך ולפתח בעצמה ומהם השיקולים לכך?

הטענה שתעמוד במרכז העבודה היא כי חל שינוי יחסי בקצב התפתחותם של טכנולוגיות אזרחיות ומוצרים טכנולוגיים (מבוססי טכנולוגיות אלו) בין השוק האזרחי לביטחוני. בעבר, לפני כשנים-שלושה עשורים, הובילה מערכת הביטחון פיתוח של טכנולוגיות ומוצרים טכנולוגיים רבים, והייתה מנוע חדשנות משמעותי עבור השוק האזרחי. טכנולוגיות רבות "מוסחרו" (באנגלית: עברו "Spin Off") מהמערכת הביטחונית לשוק האזרחי, עם הימצא להם שימוש נוסף (בבית, בעבודה, בדרכים וכיו"ב). משלב זה נהיה קצב ההתפתחות של טכנולוגיות ומוצרים טכנולוגיים אלו על ידי גופי המחקר ופיתוח האזרחיים גבוה יותר, וזאת מסיבות שונות ובעיקר בשל עתירות המשאבים, פוטנציאל השוק

הגבוה המצדיק השקעות גבוהות, קוד פתוח, חכמת המונים וחופש ממגבלות ואילוצים ביטחוניים. השוק המסחרי עתיר הטכנולוגיות נהיה שחקן משמעותי בעל יכולות גבוהות, עלויות נמוכות ואיכות גבוהה בכלל, ועבור מפתחי האמל"ח בפרט. בעקבות זאת החל במהלך השנים שימוש גובר בכיוון הפוך בטכנולוגיות ומוצרים טכנולוגיים, קרי: ממוצרי השוק הפרטי לשימוש באמל"ח ("Spin On"). כיוון שלאמל"ח יש בכל זאת דרישות ייחודיות (כדוגמת תנאי סביבה ייחודיים או בטיחות מידע למשל) מבוצעות בטכנולוגיות אלו "התאמה" ו/או תוספת לשימוש הביטחוני הנדרש. שימוש זה, שהיקפו עתיד לגדול בעתיד, הוא עתיר הזדמנויות ויתרונות, בעיקר בישראל, אך מכיוון שאינו מתבצע בצורה האופטימלית יש פוטנציאל חיוני להגדלת יתרונה היחסי של מדינת ישראל.

לשינוי האמור בכיוון ובהיקף העברת הטכנולוגיות יש השפעות מסוגים שונים על המערכות הלאומיות, העוסקות בפיתוח טכנולוגיות ואמצעי לחימה. למשל: תהליכי הפיתוח, תהליכי קבלת החלטות, אופן המימוש, שיטות ההתקשרות ואף אופן מיצוי כוח-האדם הטכנולוגי האמון על כך. הגורמים במערכות אלו חווים את הצורך בשינוי מזה כמה שנים, ובחלק מהמקרים כבר החלו שינויים המעידים על כך (למשל במפא"ת, ובחלק מהתעשיות הביטחוניות). הטענה היא כי בניתוח מערכתי רחב, הכולל הן את מערכת החדשנות הביטחונית והן את מערכת החדשנות המסחרית אזרחית גם יחד, ניתן להציע שיפורים בתהליכים הקיימים במערכת הביטחונית אשר יביאו להתייעלות ולמיצוי מיטבי של הפוטנציאל הגלום בשוק המסחרי לצורך פיתוח אמצעי לחימה – לוחות זמנים, איכות ומחיר – לצד שמירה על נכסים אסטרטגיים, לרבות החדשנות הביטחונית.

העבודה מורכבת משישה פרקים:

בפרק הראשון יידון הקשר שבין מדע וטכנולוגיה לצבא ואמל"ח, לרבות הקשר הדיאלקטי ההיסטורי שבין טכנולוגיה ומלחמה. כמו כן, ידון הפרק בהתפתחות הרלוונטית בישראל.

בפרק השני יובהרו מונחי היסוד הרלוונטיים לעבודה מתחום הטכנולוגיה והחדשנות, לרבות: מחקר ופיתוח, חדשנות, המצאה, העברת טכנולוגיה, COTS, Dual Use, טכנולוגיות צבאיות ומסחריות, Spin Off, Technology Transfer, שלבי פיתוח והבשלת טכנולוגיה ועוד.

בפרק השלישי תסוקר מערכת החדשנות הביטחונית והאזרחית בישראל, הכוללת את כלל הגורמים העוסקים בחדשנות. בפרט יפורטו הגורמים הרלוונטיים לעבודה, מאפייניהם והתפתחותם עם השנים, ובעיקר: התעשיות הביטחוניות ותעשיות ההזנק (היי-טק) בישראל.

בפרק הרביעי יידון האמל"ח (המפותח בישראל) המתאפיין במורכבות מערכתית וברביבו טכנולוגיות, צבאיות ומסחריות. בפרק יפורטו מאפייניו השונים, הרלוונטיים לעבודה, לרבות: ארכיטקטורה, דרישות ייחודיות ותהליך הפיתוח.

הפרק החמישי יוקדש לתיאור מגוון הטכנולוגיות הביטחוניות בעלות השימוש הכפול הרלוונטיות, ולמיפוי ההיסטורי של המעבר שלהן מטכנולוגיות ומוצרים שהתפתחו במערכת הביטחונית

לצורכי ביטחון לטכנולוגיות המתפתחות היום לטובת שתי המערכות הביטחונית והמסחרית. פרק זה יתבסס על ניתוח טכנולוגי שהתבצע לצורך כתיבת העבודה, שמטרתו להוכיח את הטענות הבסיסיות באשר לשינוי המציאות הטכנולוגיות כפי שתוארה.

בפרק השישי יובא דיון בהשלכות של המציאות המשתנה על גופי המחקר ופיתוח של אמל"ח ובתהליכים המעכבים החלים בהם ("חסמים") המונעים ניצול מקסימלי של ההזדמנויות – סוגי התקשרויות, נוהל פיתוח, תפקידי כוח-האדם הטכנולוגי, תמהיל ההשקעות במו"פ ועוד.

בסוף העבודה יובאו המלצות ראשוניות לעתיד, הנגזרות מתמונת המציאות ומהתובנות שיתגבשו במהלך העבודה.

עבודה זו אינה ראשונה בתחום – בעשור האחרון נכתבו מספר מאמרים ועבודות הקשורים בנושא, לרבות חלקים מתוך "אסטרטגיית ההיסט השלישית האמריקנית" (שמואל 2016: 1-10),<sup>4</sup> ומאמרים שונים העוסקים בבעיה המתפתחת במערכת המחקר ופיתוח הביטחונית, לעומת העולם המסחרי/אזרחי המתפתח בקצב מהיר (חסר 2007: 62)<sup>5</sup> למשל, בזכות ההשקעות הגדולות באופן יחסי בהשוואה להשקעות בשוק הביטחוני (מתניה 2003: 56-59).<sup>6</sup> התחושה הכללית היא כי מתקיים "מירוץ חידוש" בין המערכת האזרחית מסחרית המנהיגת מושק גלובלי גדל והשקעות הון-סיכון גבוהות, לעומת מערכת החדשנות הביטחונית, שבעבר הובילה את פיתוחן של טכנולוגיות רבות בעולם בזכות ההשקעות המדינתיות. חשיבותה של עבודה זו היא בניתוח החדש והרחב של המערכות הביטחונית והמסחרית גם יחד. זאת, כיוון שישנה השפעה דו-צדדית דיאלקטית ארוכת שנים בין המערכת הביטחונית למערכת הפרטית, בכמות התחומים המושפעים (הזרימה הדו-כיוונית), בקצב החידושים ובכוח האדם הטכנולוגי שאותו המערכות חולקות. קצב השינויים המואץ (אקספוננציאלי) בעולם הטכנולוגי, עליונותה היחסית של מדינת ישראל בתחום החדשנות הטכנולוגית, וייחודה של ישראל בהשוואה לכל יתר מדינות המערב בהיבטי הביטחון הלאומי, מייחדים את המרחב הטכנולוגי אסטרטגי של ישראל מרובה הפוטנציאל ומרובה הסיכונים. בנוסף לכך, חשיבותה של העבודה היא בהצגת תמונת מציאות אסטרטגית טכנולוגית ביטחונית כללית שממנה ניתן לבחור נושאים נוספים לניתוח, לאו דווקא שאלת המחקר שבעבודה זו. המפתח ל"זינוק" הבא, שיאפשר את שמירת היתרון היחסי של ישראל, טמון לא רק במודעות ל"שינוי" שאותו אנו חווים ושעליו נכתב לא מעט, אלא גם במודעות לכך שחלקים במערכת שומרים זמן ארוך מדי על תהליכים והנחות יסוד פרדיגמטיים הדורשים שינוי.

4 אסטרטגיה חדשה המנסה להתמודד עם השחיקה בעליונות הצבאית הטכנולוגית האמריקנית באמצעות "קפיצת מדרגה" אשר תיצור "היסט" במאזן האסטרטגי הקיים ותהפוך את בניין הכוח של היריב למיושן.

5 "קצב תהליך המו"פ הוא איטי באופן משמעותי מקצב התפתחותה של הטכנולוגיה, והדבר הופך להיות צוואר הבקבוק בהגשמת הרצונות, הצרכים והתפיסות המתעדכנים ומשתנים של הגורמים המבצעים".

6 "מימון מחקר ופיתוח ביטחוני באמצעות קרנות הון-סיכון" (ברי-יוסף וארבל 2002: 32-41), והתגובה של אביתר מתניה: "מו"פ ביטחוני במימון הון סיכון – האומנם?".

## פרק ראשון: מדע, מלחמה וטכנולוגיה

השאלה "מה לטכנולוגיה ולמלחמה?" היא שאלה מרתקת, אך עם זאת, לכאורה, ברורה מאליה. הייתכן צבא ללא נשק ואמצעי לחימה? הייתכן ניצחון ללא עדיפות או יתרון יחסי או הפתעה? כל אלה הן שאלות פתוחות. אך כיוון ששאלת המחקר בעבודה זו עוסקת בנקודת האיזון הנכונה בין פיתוח טכנולוגיה לצורכי לחימה לבין שימוש בטכנולוגיה ומוצרי מדף קיימים, והסבתם לצורכי לחימה, נכון להסתכל אחורה בזמן. זאת כדי להבין כיצד התפתחה והשתנתה תפיסת המלחמה עצמה? מה הייתה מידת התלות שלה בהתפתחות המדעית והטכנולוגית? ואיך התפתחו הדיאלקטיקה והתלות ההדדית בין שני עולמות אלו? לכן, תיבחן בפרק זה התפתחות הקשר שבין צבא ומלחמה לבין מדע וטכנולוגיה, וייעשה ניסיון להציג שאלות למחשבה, כדוגמת: "עד כמה חשוב ומנוצל היתרון המדעי והטכנולוגי לצורכי ביטחון לאומי ומלחמה?", "מהם הגבולות שבין טכנולוגיה צבאית לאזרחית?", "האם ומתי החלו גבולות אלו להיטשטש?".

### התקופה הראשונה – מדע וטכנולוגיה עד למלחמת העולם הראשונה

רבים כתבו על ההתפתחות הטכנולוגית הצבאית, חלקם בחרו לפתוח ב"רובה הקשת" (ברודי וברודי 1966) וחלקם ביכולת חרושת הברזל שבה השתמשו לצורך הכנת חרבות, מגינים ורומחים. התקופה הפאודלית (700–1500 לסה"נ) ולאחריה תקופת ההשתחררות של העולם מהפאודליזם (1500–1750) היו תקופות שבהן עמד הגידול מבחינה כלכלית על 0–0.1%, כך שקצב ההתפתחות היה איטי מאוד, ו"דור" של התפתחות טכנולוגית ארך כמאה שנה ויותר. בסוף תקופה זו עם תחילת הגילויים המדעיים (של ניוטון וגלילאו) ומלחמות הדת באירופה חל המעבר מימי הביניים לימי המהפכה התעשייתית הראשונה.

נראה כי האיטיות בהתפתחות כלי הנשק בתקופה שקדמה למאה התשע-עשרה ועוד יותר מכך בזו שקדמה למאה העשרים נובעת מכך שהמדע שהיה בנמצא, ואותם כישרונות שעמדו לרשות ההמצאה, הוקדשו למטרות אחרות מאשר פיתוח כלי נשק חדשים. ואכן, הן חרושת המתכת והן אבק השריפה (אבש"ר), שתרומתם המהפכנית לפני המלחמות דאו הייתה משמעותית ללא שיעור ואיפשרה את פיתוחם של נשקים רבים לא נוצרו במקור או נוצלו לצרכים צבאיים: את חרושת המתכת מייחסים להתפתחות טכנולוגית שמקורה באמנות, ואילו האבש"ר שהיה מוכר באירופה עוד מראשית המאה הארבע-עשרה נהיה רק לאחר חמש מאות שנה לבר-שימוש באמצעי לחימה.<sup>7</sup> על ארכימדס בן סיציליה, שהיה המתמטיקאי הגדול ביותר בימי קדם, מספרים שהפנה את גאוניותו לצורכי מלחמה רק כאשר עיר, סירקוז, הייתה נצורה על ידי הרומאים בשנת 215 לפסה"נ. רק אז

7 לאחר הוספת מלח החומצה החנקנית שאיפשר את הספקת החמצן להתלקחות מהירה של הרכיבים האחרים באבק השריפה.

תכנן ארכימדס את הקטפולטה הרבתי אשר הטילה אבנים במשקל 1,800 ליברות על הגלארות הרומאיות. ישנן גם דוגמאות רבות של עוד ממצאים גדולים שבחרו שלא לחשוף את המצאותיהם בשל החשש מהנזק שהן יכולות להביא: כך, רוג'ר ביקון (1214–1294) אשר פיתח נוסחה בת-ביצוע לאבק שריפה, אך הסתיר אותה בכתב סתרים; ליאונרדו דה-וינצ'י אשר הביע את חששו מהמכשירים שתכנן והציג, ושמר את חלקן בסוד (ברודי וברודי 1966: 12);<sup>8</sup> לניקולו טרטליה אשר שמר בסתר את תוצאות חישוביו הבליסטיים של כדורי תותח בקובעו כי "השאיפה להביא לידי שלמות מלאכה הגורמת נזק לשכנך והרסנית לגזע האנושי הינה מעשה בלתי הוגן, מביש וברברי, הראוי לעונש כבד לפני האלוהים והאדם", ורבים גדולים נוספים (ברודי וברודי 1966: 10–13).

כלומר, דווקא בימים שבהם התפתח המדע והיה זמין לכול, ומשמעות המקצוע "מהנדס" הייתה "מהנדס צבאי", חלה מעין "סובלימציה" והאטה בהתפתחות החימוש ובהשתנות המלחמה. אפילו בתקופת מלחמות נפוליאון שבה חלה פריצת הדרך העיקרית באופי המלחמה והתעצב הצבא המדינתי לראשונה – מצבא שכיר שהיה נהוג עד אז לצבא של גיוס המוני – לא היו המדע והטכנולוגיה עיקר הדבר. נפוליאון עצמו למרות גאונותו כגנרל וגודל דמיונו כמחדש מדיני גילה חוסר עניין מפליא כלפי היחס שבין המלחמה והמדע, והיה אדיש במידה מפתיעה להזדמנות להנהגת כלי נשק חדשים. תקופת לחימתו בלטה בהיותה בלתי פורה למרות שחפפה את שיא הגאות של המהפכה התעשייתית (ברודי וברודי 1966: 70–106).

עד מחצית המאה התשע-עשרה, במהלך המהפכה התעשייתית הראשונה באירופה, 1750–1860, היה קצב ההתפתחות של המדע הבסיסי והיישומי ובעקבותיהם הטכנולוגיה הצבאית איטי למדי (גורדון 1997: 53). עד תחילת המאה העשרים, במהלך המהפכה התעשייתית השנייה, 1860–1915, קצב ההתפתחות הטכנולוגית לא היה גבוה, אך כל אימת שטכנולוגיה חדשה יושמה לצורך צבאי הייתה לה השפעה דרמטית על אופי הלחימה, והיא הקנתה יתרון הפתעה לצד יכולת הכפלת כוח. הדוגמאות לשינויים בהתפתחות הן רבות: מרובה הקשת של ימי הביניים, דרך הבליסטראות של הזמן הקדום, הביצורים שאופיים וטיבם נשאר ברמה דומה במשך שנים (גורדון 1997: 53), הופעת אבק השריפה, הרובה (rifle) והתותח (פלד 2011: 11–13), אשר כל אחד מהם לכשהגיע, שינה את המציאות.

הסיבה לכך היא כי החל ממחצית המאה התשע-עשרה חל שינוי יסודי בקשר שבין מדע וטכנולוגיה לבין עולם המלחמה, זאת על רקע שתי המגמות העולמיות שחלו בה בעת: המהפכה התעשייתית השנייה, ולעומתה מלחמות העולם החדש. לאחר תקופת שלום ארוכה באירופה בין השנים 1815–1848, שבהן חלה התפתחות תעשייתית מרשימה, ונושא החימוש הוזנח תחת אשליית השלום, הפכה אירופה במחצית השנייה של המאה לזירת מלחמות עקובות מדם: מלחמת קרים

8 ראה לדוגמה את התבטאותו על תוכנית הצוללת שלו: "בשל זדונם של האנשים, שיגרמו להרג במעמקי הים על ידי שבירת האניות בחלקיהן התחתונים והטבעתן על צוותותיהן".

1854–1856, מלחמת האזרחים בארצות הברית 1861–1865,<sup>9</sup> המלחמה האוסטרו פרוסית 1867, הצרפתית פרוסית 1870–1871, הרוסית טורקית 1877–1878, הספרדית אמריקנית 1898, מלחמת הבורים בדרום אפריקה 1899–1902,<sup>10</sup> ורוסיה יפן 1904–1905 (ברודי וברודי 1966: 122–123). מלחמות אלו סימלו את המעבר מהעולם הישן לעולם החדש המדינתי, ואת הצורך התמידי בהתגוננות, בהרתעה, בהתקפה בהתרעה ובדיפלומטיה.

בעת ובעונה אחת חלו במאה התשע-עשרה תמורות משמעותיות וגילויים רבים במדע, לרבות: התפתחות התרמו-דינמיקה (ובעקבותיו מהפכת הקיטור), הפיסיקה, האלקטרו-מגנטיקה (של פאראדיי) והחשמל (ובעקבותיהם הטלגרף, שאיפשר את התקשורת החשמלית, הסוללה והמנוע החשמלי), המטאורולוגיה, גילוי קרני ה-X ב-1895, חקר חומרי הנפץ (על ידי המדען השבדי נובל 1833–1896). וכן הופעת הט-נט וחומר-הנפץ המתפוצץ, הכימיה, מדע הגבישים, המטאולוגיה וחקר המתכות, שבעקבותיהם התפתחה יכולת ייצור הברזל והפלדה, לרבות: תנור מרטין (1824) ותהליך בסמר (1856), ששיפרו את טיב הברזל החשיל והפלדה, השימוש בפלדת כרום ב-1878, פלדת מגן ב-1882, פלדת הטונגסטן, הצורך ב-1889, הניקל ב-1883 והוונאדיום של סוף המאה התשע-עשרה (ברודי וברודי 1966: 122–129). משמעות ההתפתחות בייצור הפלדה מבחינת כלי נשק הייתה בעיקר בייצור התותחים, ספינות הברזל, הצוללות ומיגון באמצעות לוחות שריון.

כאמור, התפתחות המדע במאה התשע-עשרה (המקרים שצינו לעיל הם רק דוגמאות ספורות) בד בבד עם התעצמות תופעת המלחמות המדינתיות מגויסות ההמונים, שינו לחלוטין את מאן השפעות הגומלין שבין המדע והטכנולוגיה למלחמה. תיאורו הולך ונעשה קשה ככל שהמדע נעשה מורכב יותר. כל ניסיון פשוט עלול להכניס עיוותים ולהוליד שולל, באשר השפעת המדע אינה סדירה, משפיעה על כל הדיסציפלינות הצבאיות, ושונה במהותה מזו של העולם הישן (ברודי וברודי 1966). עם זאת, ברור כי בעולם החדש שנוצר הואץ המרחק בזמן שבין פריצה מדעית ועד לפיתוח הטכנולוגי ליישומה בקרב (גורדון 1997: 53). משמעות המונח "דור" בהיבט קצב השינויים התקצר ממאה שנים ויותר בימי הקדם לעשרות שנים ספורות בימים שלפני המאה העשרים.

## תקופה שנייה – השתנות פני הלחימה במאה העשרים

ארבע פעמים השתנו פני הלחימה במאה העשרים בגין מהפכות טכנולוגיות (אדמסקי 2016): המהפכה הראשונה, מהפכת המוביליות האסטרטגית שחלה בעקבות הופעת הקיטור, הטלגרף והאוטומטיזציה של הנשק החם. המצאת הרובה נטען מכנס, פיקת ההקשה מבוססת כספית

9 למלחמת האזרחים האמריקנית מייחסים גם תהליכים כלכליים עולמיים: בעקבות עצירת אספקת הכותנה ממדינות הדרום לבריטניה, מוצאת בריטניה, בירת עיבוד הכותנה העולמית, צורך בעצירת האבטלה הבריטית באמצעות ייצור כותנה בהודו ובמצרים, וכך גם נכרית תעלת סואץ.

10 נחשב לקרב האחרון שבו סכינים ניצחו רובים.



הועמת, הקליע הגלילי חרוטי והקנה המחורק הביאה למהפכה ביכולות האש ואיפשרה ירי מהיר ועצמאי,<sup>11</sup> שהביאה סוף לטקטיקה הנפוליאונית של הסתערות המונים. המוביליות האסטרטגית והיכולת לשנע כוחות רבים למרחקים גדולים השתנו לחלוטין בזכות תרומתו של הקיטור כמחליף המפרש בים וביבשה באמצעות מסילות הברזל שאיפשרו הובלת כוחות עצומים ממקום למקום. השלמת התמונה על ידי שליטה בכוחות מרחוק ב"זמן אמת" התאפשרה באמצעות הטלגרף. מהפכה זו באה לידי מיצוי וביטוי במלחמת העולם הראשונה, הסטטית, אשר "מלכת הקרב" שלה הייתה מכונת הירייה האוטומטית.

המהפכה השנייה בפניה של המלחמה, מהפכת המוביליות הטקטית, הופיעה בעקבות השיפור במנועים (מנוע בעירה פנימי וזמינות הדלק), המצאת הרדיו ושיפור יכולות האש והאוויוניקה. מהפכה זו באה לידי ביטוי בשיאה במלחמת העולם השנייה, תחילה בתורת הלחימה החדשה של הגרמנים, מתקפת הבזק ("הבליץ קריג") המשלבת מתקפת טנקים, חי"ר והפצצה אווירית, ולאחר מכן בתגובה של בנות-הברית לתורת לחימה זו, אשר הובילו במלחמת העולם השנייה לכך שאירופה כולה נכבשה פעמיים: פעם אחת על ידי גרמניה, ולאחר מכן על ידי בנות הברית וברית המועצות.

במהפכה זו (מלחמת העולם השנייה) הופיעו לראשונה המכ"ם, מרעום הקרבה, ציוד בקרת האש האלקטרוני, פצצות התבערה והרקטות. האמצעים האחרים במלחמה היו שיכלול ושיפור של כלי הנשק ממלחמת העולם הראשונה: תותחים, מטוסים, טנקים, טורפדו, מוקשים, צוללות וספינות. אלו מילאו תפקיד עיקרי בלחימה – בכמות ובאיכות. כמות המטוסים והטנקים שהיו ברשות ארצות הברית בפרוץ מלחמת העולם השנייה הסתכמה במאות בלבד, וזאת לעומת צי הטנקים, המטוסים והצוללות בכמויות של מאות אלפי כלים, שיוצרו בגרמניה במסווה של תעשייה אחרת ובשיתוף פעולה עם הרוסים. כשהחלה המלחמה הבין הנשיא רוזוולט שאם לא יחליט להסב את רוב התעשייה האמריקנית ולרכז מאמץ בתחום הטכנולוגיה הצבאית, אין סיכוי שיוכל לעצור את היטלה.

בתחילת המלחמה שלטו הגרמנים בתחום התעופה. הם פיתחו מטוסי בוכנה קלים ומהירים, והיו גם הראשונים לממש מנוע סילון על מטוס (פלד 2011: 15). במהלך המלחמה הוסבו ושועבדו כלל המפעלים באירופה ובארצות הברית לטובת ייצור אמצעי לחימה ואמצעי סיוע ללחימה, דבר שהביא להתפתחות משמעותית גם בטכנולוגיות וביכולות הייצור. מאפיין עיקרי של מהפכה זו הוא התפתחותם, שכלולם ומיצויים של אמצעי לחימה מוכרים בעזרת טכנולוגיות פיתוח וייצור, ולא רק כוללות בפריצות מדעיות חדשות. הדוגמאות המאפיינות ביותר של מלחמה זו הן המטוס והטנק, שהופיעו לראשונה עוד בסוף המהפכה הקודמת, אך לא מוצו מבחינה צבאית.

11 עצמאי – ללא צורך בחייל ה"טוען" את האבש"ה, ובהמשך, הופעת המכנס והמחסנית/שרשיק, שאפשרו ירי בצרורות.

הופעת הטנק התאפשרה (כבר ב-1916) בזכות צירוף נבון ונכון של המצאות טכניות שהיו כבר בשימוש, ולא בזכות רעיונות מדעיים חדשים. שימוש רציני ראשון בטנקים נעשה במערכת קמברי (Cambrai) ב-20 בנובמבר, 1917 כאשר הבריטים השתמשו בכ-381 טנקי לחימה. אך השימוש שהפך להיות הסמל של סוף מלחמת החפירות היה קרב אמיאן (Amiens), הידוע גם כקרב השלישי של פיקארדי: ב-8 באוגוסט 1918, עמדה הארמיה הבריטית הרביעית עם 450 טנקים בראש התקפת פתע בגזרת אמיאן ופרצה בה פרצה ברוחב 13 ק"מ תוך כדי הרג ושבי של 28,000 איש. גנרל לודנדורף הגרמני כינה זאת כ"יומו השחור ביותר של הצבא הגרמני בתולדות הלחימה". השימוש בטנק סימל את קץ הקיפאון בלוחמת הקרקע הסטטית, אך זו באה לידי ביטוי, כאמור, רק במלחמת העולם השנייה בלוחמה הטקטית הדינמית. אחד משיאייה של זו היה קרב קורסק (Kursk) שהתחולל בחודשים יולי ואוגוסט 1943 בין הצבא הסובייטי לבין צבא גרמניה הנאצית, והיה לאחת מהמערכות המכריעות בחזית המזרחית בפרט, ובמלחמת העולם השנייה בכלל. קרב קורסק נחשב גם לקרב השריון הגדול ביותר בהיסטוריה שבו השתתפו למעלה מ-6,000 כלי רכב משוריינים משני הצדדים.

בזמן המלחמה נבנו מאות אלפי טנקים, מטוסים וספינות. היתרון של ארצות הברית היה בכך שתעשייתה הייתה מרוחקת מתקיפות, ולמעשה שימשה לא רק את הצבא האמריקני אלא את כל הקואליציה האנטי-גרמנית ואף את הרוסים. לדוגמה: היקף ייצור הטנקים במהלך המלחמה הגיע ליותר מ-35,000 טנקים אמריקניים (בשנת 1944), 20,000 טנקים רוסיים (בשנת 1942) ו-15,000 טנקים גרמניים (בשנת 1944).

המהפכה השלישית בפניה של המלחמה היא המהפכה הגרעינית. מהפכה זו החלה מיד עם סיום מלחמת העולם השנייה ותחילת המלחמה הקרה, והיא תוצאה של הופעת טכנולוגיות הטילים והאטום. הופעתה של הפצצה בסוף מלחמת העולם השנייה סימלה את ראשית הספקנות ביעילותה של המלחמה כמכשיר של מדיניות לאומית – כפי שהתקבעה עד אותה תקופה, על פי משנתו של קלאוזוביץ (ברודי וברודי 1966). משנשתנו חוקי המלחמה הפך "שם המשחק" להרתעה באמצעות חימוש. השליטה בטכנולוגיה נהייתה המפתח ליכולת הכרעת האויב ב"יום הדין", אך לא פחות מכך הייתה חשובה גם היכולת התודעתית להרתיע את האויב באמצעות מלחמת תודעה על היקף היכולת ומידת המוכנות להשתמש בהם.

השלמת פיתוחה של הפצצה הגרעינית בזמן קצר ביותר (עשרים ושמונה חודשים), וההשפעה שהייתה להפעלתה על סיום המלחמה מול יפן, הביאו לתודעת מנהיגי המדינות השונות שהיו להם שאיפות בזירה הבינלאומית, את חשיבות הקמתו של ממסד מחקר מדעי ממשלתי חזק. ממשלות שאימצו מנגנון זה נהיו ה"פטרונות" הראשיות של המדע, דבר שגרם בעקיפין ובמישרין למספר שינויים משמעותיים במאפייניו של הממסד המדעי, ובדרך ביצוע העבודה המדעית שבו, והקנה לו את השם "מדע גדול" (חורב 2006: 23).

בעקבות מהפכה זו נולדו מטוסי החמקן והצוללות הגרעיניות, שהתפתחו גם על מנת לשמש כאמצעי הובלת הפצצה. בד בבד, כתוצאה מכך שהרתעה מתבססת על הגישה הרציונלית במדע המדינה ויחסים בינלאומיים (אויב רציונלי, שיקולי רווח והפסד), התפתחה תורת המשחקים ומדע חקר הביצועים. כתוצאה מכך, התחיל תהליך של הגדלת קצב החימוש לצורך הגדלת ההרתעה תוך כדי התשת האויב כלכלית וללא קרב, אשר התאפיין בתוכניות גרנדיוזיות כדוגמת: המרוץ לחלל, תוכנית הטילים, "מלחמת הכוכבים" ועוד. כך "שחקה" ארצות הברית את ברית המועצות במלחמה הקרה עד לפילתה של זו האחרונה. כדי להימנע ממלחמה גרעינית גיבשה ארצות הברית את גישת ההכלה (Containment) והמלחמה המוגבלת (קוריאה ווייטנאם).

## הדיאלקטיקה שבין מדע וטכנולוגיה לבין המלחמה

ישנה הסכמה רחבה בקרב היסטוריונים ופילוסופים של המדע בנוגע לזיקה המתהדקת בין המדע למלחמה, ועל כך שקשר זה שינה את אופיו של המדע. אדגרטון כינה זיקה זאת בשם "החיול של המדע" (The Militarization of Science). לדעתו, חיול המדע נוצר בשל השיטה שלפיה מימנו הצבאות את הפעילות המדעית והטכנולוגית, ונתנו עדיפות לתחומים מדעיים מסוימים בביצוע המחקר המדעי (חורב 2006: 29). עם זאת, בשל סיומה של המלחמה הקרה בראשית שנות התשעים והתמוטטותו של הגוש הסובייטי, צומצמו הוצאות הביטחון בארצות הברית, ואיתן גם המשאבים שהקצה הממשל הפדרלי למעבדות הלאומיות. מעבדות הנשק של משרד האנרגיה שעסקו בפיתוח ובייצור הראשים הגרעיניים למערך האסטרטגי סבלו במיוחד ממגמה זו של הקטנת משאבים. מציאות זו הביאה לשינוי ב"מערכת היחסים" שבין טכנולוגיה וצבא, לאור ההבנה כי מהפכות ב"פני המלחמה" אינן רק תוצאה של טכנולוגיה חדישה, אלא של תכנון תפיסתי נכון המביא לפיתוח אמצעי הלחימה הנכונים (אדמסקי 2012). הטכנולוגיה היא תנאי הכרחי, אך אין די בה. בתקופה עתירה בהתפתחות טכנולוגית מהירה ורציפה יש לפתח את "מה שנוכח", ולא כבעבר את "מה שאפשר". כלומר, השינוי בקצב הפיתוח של אמצעי לחימה בעקבות הופעת התגליות המדעיות והטכנולוגיות, מהאיטיות שאפיינה את העידן הישן ועד למהירות שאפיינה את העידן החדש, יצרה מציאות שבה ריבוי משאבים המושקעים בביטחון ("מרוץ החימוש") מאפשר "הצפה" באמצעי לחימה (בגדר "הכול אפשרי"). לכן יש הכרח להתמקד בשאלה הדוקטרינית יותר: "מהו הנשק שיביא את הניצחון?" וממנה לעבור לפיתוח אמצעי הלחימה אשר יאפשרו זאת.

הרוסים היו הראשונים שהבינו כי עוד טרם פיתוח טכנולוגיה צבאית חדשה כלשהי, יש לפתח תפיסה נכונה להפעלת הכוח, אשר יכולה להביא למהפכה בעניינים הצבאיים (RMA – Revolution in Military Affair) וממנה כמובן, ליכולת הכרעת הצד השני. על פי הרוסים, המטכ"ל הוא המוח של הצבא, ותפקיד הרמטכ"ל הוא להיות האינטלקטואל הצבאי מספר אחד. יחד הם אמורים לייצר חשיבה רצינית בתחום הזה. לעומתם, בארצות הברית מאז מלחמת העולם השנייה החלה נטייה חזקה ללוחמה טכנו-צנטרית (לחימה שבמרכזה עומדת הטכנולוגיה), שהפכה למרכיב מהותי

בהתנהגות האסטרטגית האמריקנית. במרוצת ההיסטוריה שלהב אופטימיזם טכנולוגי את תכנון הביטחון האמריקני, והפיח בו רוח חיים. שום אומה אחרת לא הקנתה דגש גדול יותר לתפקיד הטכנולוגיה בתכנון וניהול המלחמה מזו שהקנתה לכך האומה האמריקנית (אדמסקי 2012: 133). ה"מכונה" זכתה למשמעות סימבולית, והמסורת הליברלית האמריקנית ראתה בטכנולוגיה מכשיר שבאמצעותו ניתן לשמר את המצב שבו האומה חסינה מפניה של מלחמה יותר מאשר אמצעי לעשיית מלחמה. הרומנטיות הטכנולוגית הולידה חזון מיסטי של 'קליע כסף' הנושא עימו הבטחה לניצחון מכריע (אדמסקי 2012: 134). הנטייה המסורתית לפעולה מהירה ולהשגת תוצאות מהירות, ההתמסרות למוצר החדש והעתידי, והסלידה ממלחמה ממושכת, כל אלה יצרו בקרב האסטרטגים האמריקנים הסתמכות אינסטינקטיבית כמעט על הטכנולוגיה כתרופת פלא בעיניי הביטחון הלאומי.

כעשר שנים לאחר הרוסים הבינו גם האמריקנים כי פיתוח טכנולוגיה ויכולות ייצור אינם תנאים מספיקים, וכי נדרש ניתוח דוקטריני של "מה שצריך" לפתח ולא רק "מה שאפשר". כך, בסוף שנות השמונים החל השינוי הפרדיגמטי בחשיבה הביטחונית האמריקנית. מי שהיה הראשון לעמוד על חשיבותה של המהפכה בעיניים הצבאיים בארצות הברית היה אנדרו מרשל וצוות מומחי ב"משרד להערכות נטו" (ONA – Office of Net Assessments) אשר הוקם ב-1973, והיה מהראשונים להכניס חשיבה משולבת זו לקהילה הביטחונית האמריקנית (אדמסקי 2012: 109).

המהפכה בנושאים הצבאיים מחייבת טכנולוגיה פורצת דרך חדשה, אך ללא תפיסה מסדרת ניתן יהיה להפסיד מלחמה, גם אם קיים יתרון טכנולוגי בתחום מסוים. כך נולדה למשל, תפיסת ה-ALB (Air Land Battle). תפיסה זו התאפשרה בזכות התפתחות טכנולוגיות (כדוגמת המחשוב), שאיפשרו את נטרול המטרות הקרקעיות בצורה מדויקת החל מסוף שנות התשעים, והעלו את היעילות של השמדת מטרה (כדוגמת טנק) מהאוויר מאחזים בודדים ללא מחשוב, לעשרות אחוזים (רמת מחשוב של F16) ועד למאות אחוזים – מספר פצצות חכמות נכון להיום (בן ישראל 2017). עם זאת, טכנולוגיה ואפילו אמל"ח ללא תפיסת הפעלה מסודרת ודוקטרינה מתאימה אינה מבטיחה מהפכה בעיניים הצבאיים או יתרון מספיק במלחמה.

בישראל התקבלה גישה תפיסתית זו באיחור של כעשור בהשוואה לאמריקנים החל משנות התשעים באמצעות גוף שנקרא המלת"ם. מתוך רעיון "המערכה העמוקה" נולדו תפיסות חדשות (אדמסקי 2012: 167) כדוגמת: האפקטים המערכתיים EBO (Effect Based Operations), המבצעים מבוססי אפקטים, תפיסת האש-מהלומה (המשולבת ברעיון הקטנת התמרון) ותפיסת השילוביות.

כלומר, בעוד שבמהלך המאה העשרים צפו רוב המהפכות הצבאיות מתוך התקדמות טכנולוגית (טכנולוגיה משנה דוקטרינה ומלחמה), הרי שה"מהפכות בעיניים צבאיים" נולדו מתוך הצורך לנצח את המלחמה הבאה באמצעות היגיון מסדר המתאפשר באמצעות טכנולוגיה. "הטכנולוגיה רק מתווה את המסגרת למה שניתן, ויוצרת את הפוטנציאל למהפכה צבאית. ואולם הדבר שבאמת

מחולל את החדשנות בפועל הוא המידה שבה הארגונים הצבאיים מכירים ומנצלים אותן" (מקס בוט מתוך אמסקי 2012). "מהפכה בעניינים צבאיים" אינה מתכוון קסמים לניצחון צבאי, ואולם ישנה סבירות גבוהה לכך שאלה הצופים מוקדם את התרחשותה של מהפכה בעניינים צבאיים ומשנים את כוחותיהם בהתאם לכך, יחזקו עד מאוד את יעילותם הצבאית. האיחור, בהתאם, יביא תוצאה הפוכה (אדמסקי 2012).

**בישראל** ההתייחסות לטכנולוגיה בהקשר הצבאי הייתה תמיד קשורה להשגת "יתרון איכותי" כפתרון נגד לעליונותו המספרית של האויב. החיפוש אחר הדרך לשמר את היתרון הזה הפך למוטיב אסטרטגי יסודי בישראל. בעוד תפקידה של הטכנולוגיה בתרבות המלחמה הישראלית גדל בהדרגה, הותירה החוויה של חוסר היכולת להשיג כלי נשק חיוניים בעת בידוד מדיני חותם קבוע במנטליות האסטרטגיה הישראלית. התפיסה כי יש להסתמך על ייצור עצמי של מערכות נשק נהייתה למאפיין יסודי, ותוצאתה הייתה בנייה של תעשייה ביטחונית חדשנית עד מאוד. לקראת מלחמת ששת הימים החלה ישראל לרכוש בחו"ל מערכות נשק מתקדמות ולפתח את תעשיית הנשק שלה. בו זמנית החל צה"ל לראות בפתרונות הטכנולוגיים יותר ויותר כתרופת פלא לענייני הביטחון, וכך הכתיבו מערכות נשק מתוחכמות את האסטרטגיה הישראלית (אדמסקי 2012: 193–157). גם בישראל, בדומה להשפעה השלילית של מירוץ החימוש על הרוסים במהלך המלחמה הקרה, שולם מחיר כלכלי כבד בשנים שלאחר מלחמת יום כיפור שכונה העשור הכלכלי האבוד, 1973–1984. עקב כך, באיחור מה בהשוואה לאמריקנים ולרוסים, התפתחו בישראל הרעיונות המערכתיים, המאפשרים מיקוד וניצול יעיל יותר של המשאבים המושקעים באמצעי לחימה. בישראל, שבה האיום הוא המוחשי ביותר, הרמטכ"ל נחשב ל"חייל מספר אחד", והפיתוח הטכנולוגי הוא בר-מימוש, מתקיימת תרבות חדשנית צבאית המתאפיינת בזמן קצר ביותר מפיתוח טכנולוגי ועד להגעתו לשדה הקרב.

לסיכום שלוש התרבויות בהקשר של היחסים הדיאלקטיים שבין מדע וטכנולוגיה לבין צבא ומלחמה, להלן תוצאות השוואה של החדשנות הצבאית הטכנולוגית בין ישראל, ארצות הברית ורוסיה (אדמסקי 2016). ההשוואה מראה כי ישנם הבדלים משמעותיים בין המדינות בשלושת הפרמטרים של: הצטיידות בטכנולוגיה, הפיכתה לאמצעי לחימה וצבירת ניסיון קרבי עימה ובתכנון המהפכה הצבאית בשלושת המרכיבים (טכנולוגיה, דוקטרינה וארגון):

בכל הנוגע להצטיידות בטכנולוגיה	1. אמריקנים	2. ישראלים	3. רוסים
בכל הנוגע לצבירת ניסיון קרבי	1. ישראלים	2. אמריקנים	3. רוסים
בכל הנוגע לשינוי פרדיגמטי (RMA)	1. רוסים	2. אמריקנים	3. ישראלים

## סיכום ופנים לעתיד – מהפכת ה-IT (Information Technology)

עד כה נסקרו בקצרה בפרק זה התפתחות המדע והטכנולוגיה ובעקבותיהם כלי הלחימה, עד למהפכה השלישית בפני המלחמה במאה העשרים. עד המאה התשע-עשרה, כולל מלחמות נפוליאון בעולם החדש, המדינתי, המתאפיין בצבא המונים, היה ניתן להבחין כי ההתפתחויות המדעיות החדשניות איפשרו את הופעת אמצעי הלחימה החדשים, אך עם זאת, מהפכות בפני הלחימה חלו בתדירות לא גבוהה. לאחר מכן במאה העשרים היה ניתן להבחין בקצב השינויים הגבוה בפני המלחמה, עובדה המסבירה את התלות המערכתית הגבוהה מאוד בין העולם הצבאי לעולם הטכנולוגי (והמדעי). התלות הייתה עד כדי כך שמדינות הקימו מערכות חדשות שלמות (מוסדות מחקר, פיתוח וייצור, ממשלתיים ואזרחיים) כדי להתמודד בהצלחה עם האויב. בעקבות כך, התפתחו רבות מן הטכנולוגיות של המאה העשרים מתוך צורך צבאי. דוגמאות לכך הן ההשקעות הביטחוניות שהביאו להמצאת המחשב הספרתי הראשון, המכ"ם, התקשורת הספרתית ועוד. היה ניתן להבחין גם כי ההשקעה האדירה בטכנולוגיה הצבאית, שגדלה לממדים אדירים במהלך מלחמת העולם השנייה ולאחריה, הביאה בעקבות שינויים תרבותיים דוקטריניים לחקר ביצועים שיאפשר את מיצוי המשאבים באופן יעיל, באמצעות השאיפה התכנונית להשגת "המהפכה הבאה בעניינים הצבאיים". מיצוי כלכלי של המשאבים באמצעות ניתוח כלכלי והערכות "נטו" ו"קניזו" איפשרו למצות את היתרון היחסי, כדוגמת הבסת הרוסים על ידי האמריקנים באמצעות "מירוז החימוש" (חורב 26.12.2016, 6.2.2017, 16.4.2017, ראינות)<sup>12</sup>.

במבט לעתיד, יש הטוענים כי אנו נמצאים כבר בשלהי המהפכה הרביעית, מהפכת ה-IT (אדמסקי 2016), שניצניה בהופעת ה"טרניזיסטור" ובעקבותיו המעבד, וטכנולוגיות התקשורת והמחשוב המשלימות אותו. טבעה של מהפכה זו הוא טכנולוגי, אך היא מתרחשת זה כמה עשורים (החל משנות התשעים) בעת ובעונה אחת עם שינויים נוספים, בלתי תלויים במאפייניו של האויב.

ההתפתחות הטכנולוגית שאותה אנו חווים מאז הופעת המחשב היא התפתחות בקצב מעריכי (אקספוננציאלי) ולא לינארי (המתואר באמצעות קו ישר). על פי חוק מור (משנת 1965), צפיפות הטרניזיסטורים במעגלים משולבים מכפילה את עצמה מדי 18-24 חודשים. כיום, הנחת היסוד באשר לרוח טכנולוגיות עולם התקשורת והמחשוב (תקש"ב) היא כי כל שנתיים מוכפלים הביצועים. הדבר נכון לא רק למהירות החישוב והעיבוד של נתונים, אלא גם לגודל זיכרון, מהירות התקשורת בין מחשבים, ואף כמות הפיקסלים בסנסורים (מצלמות), צגים, ועוד. תהליכים מואצים אלה הם

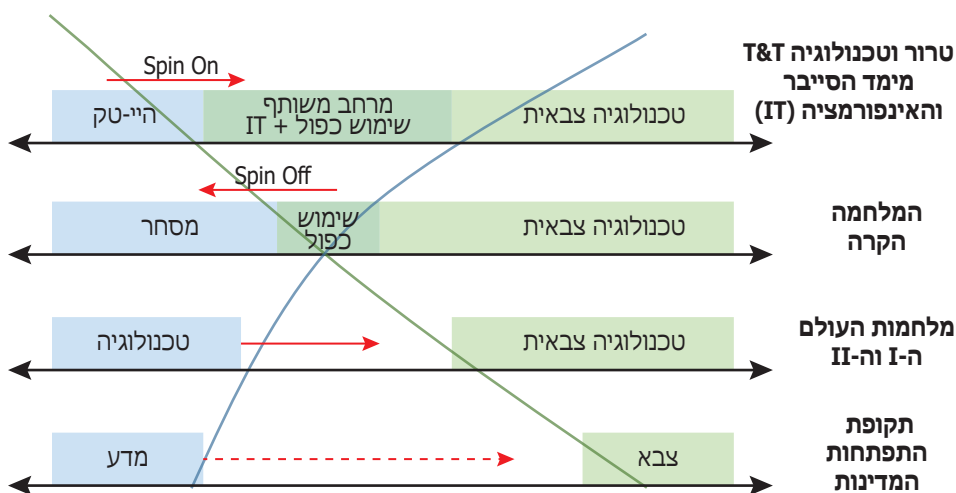
12 רייגן השקיע הון עתק ב"יוזמת ההגנה האסטרטגית" שאמורה הייתה לשבור את מאזן האימה בין ארצות הברית לברית המועצות, ולאפשר לאמריקנים להתגונן מפני טילים גרעיניים סובייטיים. תוכנית זו, שכונתה "מלחמת הכוכבים", הגם שהייתה בלתי מיציאותית ולא מומשה, גרמה לכך כי ההוצאות הצבאיות שברית המועצות נגררה אליהן בעקבותיה תרמו להתמוטטותה.

שהביאו לכניסתו של המחשב לרוב תחומי החיים, ולא רק למערכות הצבאיות. מכאן חלה שוב התקצרות משמעותית במונח "דור" המתייחס לשינוי – והיא מספר שנים בלבד.

כאמור, במקביל לכל אלה משתנות גם הזיקות שבין מדע טכנולוגיה לצבא ומלחמה, למול מספר שינויים פרדיגמטיים בעולם המלחמה: מצבי המלחמה (תוספת השגרה והחירום 'שח"מ', המלחמה שבין המלחמות 'מב"מ', והמלחמה ההיברידית!); אופיו של האויב (אויב מדינתי לצד אויב לא מדינתי, טרוח, אויב א-סימטרי); בספקטרום הלחימה (קונבנציונלי, לא קונבנציונלי, עורף וקיברנטי/ סביבת רשת – 'סב"ר'); בהגדרת הניצחון (מה"הכרעה" שאפיינה את ימי דוד בן-גוריון ל"ניצחון" ול"תודעה" של ימינו, לצד הפולמוס: "מהו ניצחון?") ובמורכבות הסביבה (מהפיכת המידע, והקשר שהיא מאפשרת בין העורף והאויב).

השילוב של שינויים פרדיגמטיים אלה בעולם המלחמה יחד עם המהפכה הרביעית (מהפכת ה-IT) יוצרים מציאות חדשה, המכונה T&T – Technology and Terror. במציאות זו מעגל העניין הצבאי מכיל לא רק אמצעי לחימה מבוססי טכנולוגיות צבאיות, אלא גם (ובעיקר למול האיומים החדשים) טכנולוגיות מסחריות לחלוטין. דוגמאות לכך הם: עיבוד ושמירת מידע (Data Science, Storage), סב"ר, חו"ר, מחשוב, רחפנים, רובוטיקה, הצפנה, ועוד. בפרקים הבאים נדון בתקופה זו ובמורכבות השימוש הצבאי בטכנולוגיות מסחריות.

באיור 2 מוצג תיאור סכמטי של התפתחות הטכנולוגיות הצבאיות והתפתחות תחום העניין הצבאי, לצד התפתחות הטכנולוגיות המסחריות במהלך הדורות שתוארו בפרק זה.



איור 2: התפתחות בארבעה דורות: הטכנולוגיות הצבאיות והאזרחיות

ניתן לראות, כי החל מימי המהפכה התעשייתית ועד שלהי המאה ה-19 נוצל המדע בקצב איטי יחסית לצרכים צבאיים. בהמשך ממחצית המאה ה-19 ועד מלחמת העולם השנייה, בעוד הטכנולוגיה מתפתחת בקצב מהיר, החלה ההתפתחות הטכנולוגית להשפיע על פני המלחמה, ובתקופת מלחמות העולם הגיע לשיא ניצול המדע והטכנולוגיה לטובת הצבא. בתקופת המלחמה הקרה ועד נפילת הגוש הסובייטי החל תהליך שבו טכנולוגיות שפותחו לצרכים צבאיים זרמו לשוק המסחרי, ועם תחילת מהפכת המידע נוצר מרחב טכנולוגי משותף המעניין את המערכת הביטחונית ואת העולם האזרחי.

עבודה זו מתמקדת בתקופה האחרונה. העובדה כי לישראל מערכת חדשנות צבאית בעלת יתרון בצבירת ניסיון קרבי עם טכנולוגיות חדשות רלוונטי מאוד בהמשכה, בעיקר בעניין ניצול התעשייה עתירת הידע בישראל לטובת מערכת הביטחון.



## פרק שני: טכנולוגיות והעברת טכנולוגיה – מונחי יסוד

בפרק זה ננסה להבהיר את מונחי היסוד המובאים בעבודה זו, זאת במטרה ליצור שפה משותפת שתעסוק בהמשך בטכנולוגיות והתמורות שחלו בשימוש שלהן, משימוש צבאי למסחרי ולהפך. נדון גם במונחי היסוד אשר ילוו אותנו גם בהמשך, לרבות: מחקר ופיתוח, חדשנות, טכנולוגיה, העברת טכנולוגיה, בשלות טכנולוגית, טכנולוגיות מסחריות (COTS), טכנולוגיות דואליות, מערכת החדשנות הלאומית ועוד מונחים.

מחקר ופיתוח (מו"פ) (R&D – Research & Development) מציין שני תהליכים הקשורים זה בזה באופן הדוק ובאמצעותם נוצרים מוצרים חדשים או משודרגים מוצרים קיימים באמצעות חדשנות טכנולוגית (Technological Innovation). המונח מו"פ כמעט שלא היה נפוץ בתחילת המאה העשרים, אך החל מהמחצית השנייה של המאה נהיה במהירות מטבע לשון רווחת במדינות המתועשות. שלב המו"פ הוא השלב הראשוני של מרבית המערכות שמגיעות בסופו של דבר לייצור תעשייתי (חורב 2006: 20–24). בשלב המחקר (Research) מתבצעת הבשלה של טכנולוגיה או בדיקת התאמה של טכנולוגיה למוצר הסופי (למשל באמצעות מחקר שמוליד רעיון הנבדק במעבדה), ואילו בשלב הפיתוח (Development) או הפיתוח המלא (Full Scale Development, FSD) מתבצע תהליך פיתוח הכולל בניית אב טיפוס (Prototype), ייצור של דגם הנדסי, ובהמשך, לאחר סדרה של ניסויי מעבדה, ניסויים פונקציונליים וניסויי שטח, מתבצעת העברה לייצור סדרתי.

ההמצאה (Invention) מוגדרת כ"יצירת אמצעי, או תהליך חדש הנובע ממחקר ומניסוי" (חורב 2006: 20–24). יש המגדירים אותה גם כ"פתרון חדש ובלתי צפוי לבעיה או קושי בעולם המוחשי, הנהוגה במחשבתו של אדם" (מוטט 2017.5.2, 2017.4.18, 2017.3.5, ראינות). המצאה היא הבסיס לכל תהליך של חדשנות.

החדשנות (Innovation) היא התהליך שבאמצעותו מפותחים מוצרים חדשים, או שיטות חדשות של ייצור מוצרים. חדשנות כוללת את מכלול הצעדים מהרעיון של הממציא ועד הצבתו של המוצר החדש בשוק. הגדרה נוספת לחדשנות היא: יצירת ערך מוסף באמצעות פתרונות חדשים לצרכים קיימים, או באמצעות יצירת פתרונות לצרכים חדשים (חורב 2006: 20–24). למונח "חדשנות" ישנן עשרות הגדרות מגוונות בספרות. זאב בונן מבחין בין המושג "חידוש" (Novelty) לבין "חדשנות" (Innovation), ולדעתו הראשון הוא שם עצם המציין דבר חדש בעל ערך, ואילו השני מציין תהליך. פול הרביג סבור כי "החדשנות איננה מורכבת מאירוע יחיד, אלא מרצף של אירועים המתחיל ממדע בסיסי ומסתיים בהפצת החידוש דרך השוק. ברצף זה ההתמקדות בדרך כלל היא בלב החדשנות שכוללת את התגלית (Discovery), בדיקת ישימותה (Feasibility) והייצור המסחרי שלה" (חורב 2006: 21).

החדשנות הצבאית כוללת שלושה מאמצים עיקריים (אדמסקי 2016): טכנולוגיה שמייצרת אמצעי לחימה (בניין הכוח); תפיסת הפעלה ותורת לחימה (דוקטרינה); וארגון הכוח. בחדשנות הצבאית ישנן שתי שיטות עיקריות, קוטביות: שיטת הציפיה (Anticipation), ושיטת ההסתגלות (Adaptation).<sup>13</sup> בשיטת הציפיה מתבצע מאמץ אינטלקטואלי של חשיבה "מהסוף להתחלה" – דמיון של שדה הקרב העתידי וממנו גזירה מלמעלה למטה ('top down') של הצרכים, בדרך כלל בעת שלום ('מה צריך' בכדי להשיג RMA). שיטה זו היא דדוקטיבית (deductive). בשיטת ההסתגלות מתבצע מאמץ מלמטה למעלה ('bottom up') הנשען על החיכוך עם האויב, שאותו חווה לראשונה הדרג הטקטי. תהליך זה הוא אינדוקטיבי (Inductive).

אם מתרחש שינוי בשלושת מרכיבי החדשנות בו זמנית, כנראה שמדובר בשינוי רבולוציוני. אם השינוי הוא הדרגתי יותר, כנראה מדובר בשינוי אבולוציוני. כך לדוגמה, המהפכה בעניינים צבאיים – RMA היא חדשנות צבאית רדיקלית, רבולוציונית, שבה מבנה ארגוני, תפיסות צבאיות ואמל"ח חדש משנים את האופן שבו נראית המלחמה.

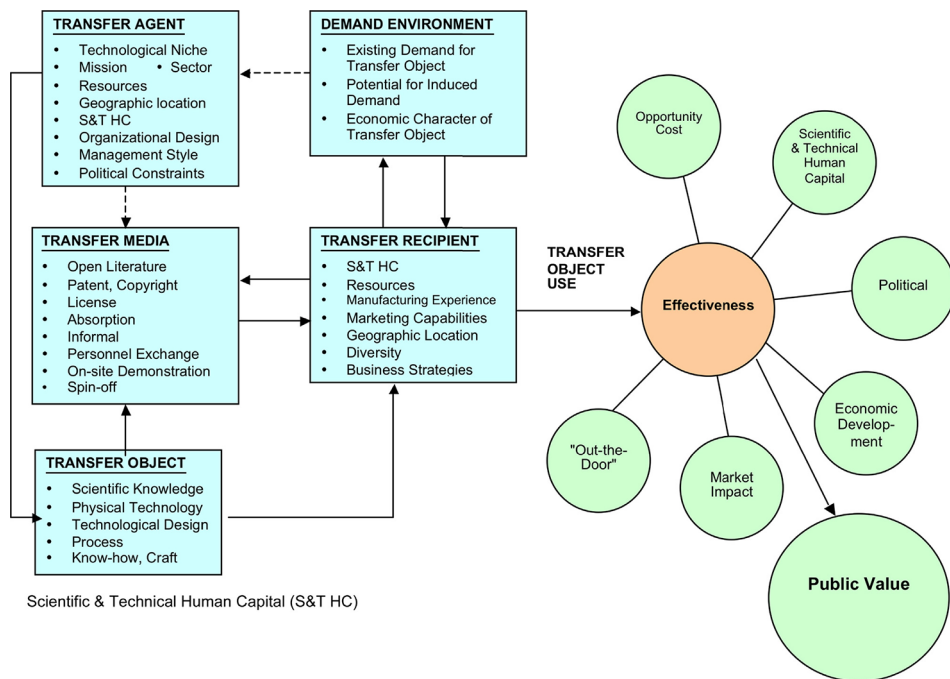
טכנולוגיה היא "פיתוח ויישום של מכשירים, מכונות, חומרים ותהליכים אשר מסייעים לפתרון בעיות האנושות". הטכנולוגיה כוללת הן את המדע והן את ההנדסה.

למושג העברת הטכנולוגיה (Technology Transfer, TT) שבו נדון רבות בעבודה זו, ישנן כמה הגדרות כגון: "התהליך של העברת ממצאים מדעיים ממעבדות המחקר למגזר המסחרי", או "התהליך שבו ידע קיים, מתקנים, או יכולות שפותחו באמצעות תקציב ממשלתי מנוצלים למלא צרכים של הציבור והמגזר הפרטי". העברת טכנולוגיה כוללת תחום רחב של שיתופי פעולה פורמליים ובולתי פורמליים בין מעבדות ממשלתיות לבין המגזר הציבורי או הפרטי. מטרת העברת טכנולוגיה היא לחזק את הכלכלה הלאומית על ידי האצת יישומם של טכנולוגיות ומשאבים שמקורם במעבדות הממשלתיות להזדמנויות של המגזר הציבורי או הפרטי (חורב 2006: 22).

תהליך העברת הטכנולוגיה הוא מקרה פרטי של תופעת ה-"Spin Off", שהן "אותן תוצאות לוואי, או תועלות כלכליות עקיפות, הנובעות מתהליך הלמידה הטכנולוגי והארגוני, וניצול משאבים ותשתיות מתחום פעילות נתון לתחומי פעילות נוספים" (גלאי ושחר 1993: 19). יתרונות כלכליים נלווים אלה יכולים להיראות בארבעה תחומים שונים: יתרונות טכנולוגיים (פיתוח מוצרים חדשים או שיפור מוצרים קיימים); יתרונות מסחריים (כניסה לשווקים חדשים בעקבות פיתוח הטכנולוגיה החדשה); יתרונות בארגון ושיטות ניהול (יישום שיטות ניהול מתקדמות שנלמדו במהלך פיתוח הטכנולוגיה) ויתרונות בהון האנושי (שיפור היכולת והידע של העובדים כתוצאה מפיתוח הטכנולוגיה). דוגמאות להעברת טכנולוגיה בתהליך Spin Off: תנור המיקרוגל כטכנולוגיה אזרחית שהתפתחה מהמכ"ם

13 "הפרש הפולני" הוא ביטוי המתאר בהשאלה חוסר הסתגלות לשינוי במציאות. חיל הפרשים הפולני נחשב לטוב באירופה, אולם חוסר יכולתו להסתגל למציאות הטכנולוגית החדשה לא הותיר לו סיכוי בקרב למול הטנקים הגרמנים בפרוץ מלחמת העולם השנייה.

בשנות החמישים; המחשב האלקטרוני הגדול לשימושים כלליים (ENIAC) שפותח על ידי צבא ארצות הברית; המעגלים המשולבים הראשונים; חללית התקשורת הראשונה; גלאי העשן; רשת האינטרנט הראשונה; מערכת ניווט לוויינים (GPS – Global Positioning System) ומחשבי-העל. באיור 3 להלן מובא המודל של בארי בזמן (Bozeman, Rimes, and Youtie 2015) המתאר את יעילות העברת טכנולוגיה מהמעבדות הלאומיות וממוקדי ידע, כשבצידי הימני מצוינים שישה קריטריונים למדידת יעילות העברת טכנולוגיה (קריטריוני תפוקה), ובצידי השמאלי מצוינים חמשת הגורמים המשפיעים ביותר על העברת טכנולוגיה (גורמי תשומה). מודל זה פורסם לראשונה בשנת 2000 (Bozeman 2000), ואחד מהשינויים העיקריים שבו הוא התוספת של "הערך הציבורי" (קריטריון יעילות).



איור 3: המודל של בארי בזמן להעברת טכנולוגיות (מקור: Bozeman et al. 2015 fig. 2)

התהליך ההפוך להעברת טכנולוגיה מהממסד הממשלתי למגזר המסחרי הפרטי הוא "Reverse Spin Off", או "Spin On", וזהו תהליך שבו המגזר הביטחוני משתמש בפרויקט מו"פ חדש בטכנולוגיה שפותחה במעבדות תעשייתיות פרטיות. תהליך זה הוביל להגדרת טכנולוגיה המכונה "טכנולוגיה לשימוש כפול" (Dual Use Technology), המוגדרת כ"טכנולוגיה ומוצרים שפותחו לשימוש אזרחי, אך יכולים גם לשימוש ליישומים צבאיים". במקור הכוונה היא למטרות ייצור של כלי נשק להשמדה המונית: אטומי, כימי, ביולוגי ואמצעי השימוש וההפצה שלהן; טילי שיוט וטילים

בליסטיים (חורב 2006: 23). על מנת למנוע מטכנולוגיות דואליות "לזלוג" או לעבור לגורמים לא רצויים, נערכים תהליך בקרה ואישור של העברתן ממדינה למדינה (אף כמוצרים). כך, מוצר או טכנולוגיה המוגדרים כדואליים, או גם כ"רכיבים אסטרטגיים", צריכים לקבל אישור מגורמי המדינה כדי למכרם ללקוח שאינו ביטחוני מאושה. תהליך אישור זה דורש במדינות אירופה וארצות הברית הצהרת End User-ו End Use שבהם מצהיר הרוכש מיהו המשתמש הסופי בפריט, ומהו ייעודו.

כפועל יוצא מהאמנה למניעת הפצת נשק גרעיני (Nuclear Non-Proliferation Treaty, NPT), וממשטר הפיקוח על יצוא ציוד, תוכנה וטכנולוגיית טילים (Missile Technology Control Regime, MTTCR), שהוא הסדר בינלאומי מוסכם שמטרתו להיאבק בתפוצת מערכות לא מאוישות (טילים, מל"טים) המסוגלות לשאת נשק להשמדה המונית קיימות מספר בקרות בעולם על טכנולוגיות Dual Use, לרבות הקבוצה האוסטרלית, הבקרה האמריקנית והאירופית (טבלה 1).

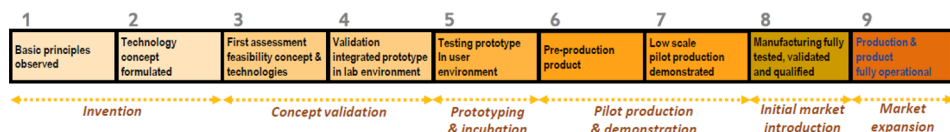
טבלה 1: רשימת הטכנולוגיות הדואליות שבבקרה האירופית

Category 0	Nuclear materials, facilities and equipment
Category 1	Materials, chemicals, "microorganisms" and "toxins"
Category 2	Materials Processing
Category 3	Electronics
Category 4	Computers
Category 5	Telecommunications and "information security"
Category 6	Sensors and lasers
Category 7	Navigation and avionics
Category 8	Marine
Category 9	Aerospace and Propulsion

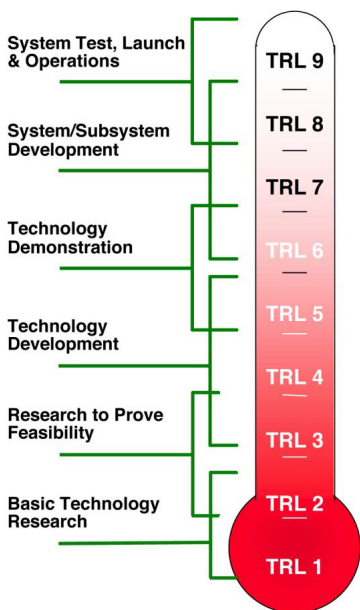
מתוך אתר אפי": <http://www.exportctrl.mod.gov.il/ExportCtrl/Hakika/MTTCR> ואתר הסוכנות הבינלאומית לאנרגייה אטומית: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-technology-and-applications>

הסבר ודוגמה: ניתן לראות כי הטכנולוגיות המוגדרות כ"דואליות" כוללות תחומים צבאיים "טהורים" (לדוגמה: קטגוריה 0) לצד טכנולוגיות שהתפתחו בדור האחרון בה בעת, הן במערכת המסחרית (מחשבים ואלקטרוניקה למשל, קטגוריות 3, 4 בהתאמה) והן במערכת הצבאית. רשימה זו אינה סטטית, והיא אמורה להיבחן (ונבחנת) מדי תקופה לבחינת הרלוונטיות והיכולת לאכוף אותה. את הבעייתיות והקושי שבהגדרת רשימה זו ואכיפתה ניתן להבין באמצעות סוגיית טכנולוגיות ההפצה של נשק להשמדה המונית (Weapons of Mass Destruction - WMD) לצד ההתפתחות שאותה אנו חווים בימים אלה של כלים רובוטיים הנעים באוויר ומפותחים בשוק המסחרי בהיקף לא קטן (ואף גדול ומהיר יותר) באשר לשוק הצבאי. תחום זה, שהתפתחותו הייתה בעבר "נחלתו" של השוק הצבאי, והבקרה בו הייתה בת-מימוש בקלות, יצא משליטת המערכת הצבאית ונעשה תחום משולב מסחרי/צבאי. בפרק החמישי להלן יתוארו מספר תחומים טכנולוגיים נוספים אשר בהם חל שינוי מאתגר מסוג זה.

שלבי פיתוח מוצרים טכנולוגיים (Technology Readiness Level, TRL) – הכוונה לסולם המתאר את ההתקדמות הטכנולוגית בתוכנית מו"פ. הסולם בנוי מ-1 עד 9, ובו 9 מסמן את הבשלות הגבוהה ביותר. השימוש בסולם זה מאפשר שיח עולמי אחיד באשר לבשלות הטכנולוגית של תוכנית או מוצר, ניהול סיכונים, קבלת החלטות בנוגע למימון חיצוני והעברת טכנולוגיה. ישנם כמה סולמות שבהם יש שימוש נפוץ, כדוגמת הסולם של ה-European Association of Research and ה-U.S. Department of Technology Organizations (EARTO); הסולם של NASA והסולם של ה-Defense (DoD).



איור 4: סולם NASA לבשלות טכנולוגית מתוך: The TRL Scale as a Research & Innovation Policy Tool, EARTO Recommendations, 30 apr 2014.



איור 5: סולם DoD לבשלות טכנולוגית

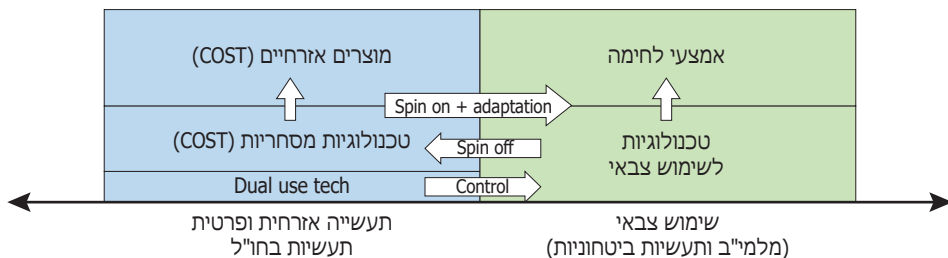
מערכת החדשנות הלאומית (National Innovation System, NIS) מוגדרת כ"רשת של מוסדות במגזרים הפרטיים והציבוריים, שמערכת יחסי הגומלין ההדדיים ביניהם יוזמת, מייבאת, משנה, מתאימה ומפיצה טכנולוגיות חדשות". באופן כללי, מערכת החדשנות הלאומית כוללת את כלל המוסדות במדינה העוסקים במו"פ של טכנולוגיות ומוצרים, לרבות גופי מערכת הביטחון (הצבא,

משרד הביטחון), גופים ממשלתיים (לרבות המעבדות הלאומיות ומוקדי הידע הביטחוניים – מלמ"ב) וגופים אזרחיים ומסחריים. בפרק השלישי תתואר מערכת החדשנות הלאומית בישראל.

מוצרי מדף (Commercial Off-The-Shelf, COTS) – אלה הם מוצרים או לפריטים שניתנים לרכישה/קנייה ולאחר מכן להסבה (adaptation) לצרכים ולדרישות שלשמן נקנו, כחלופה לפיתוח עצמי (דילמת Make/Buy). מוצרי המדף מיוצרים בתעשיות האזרחיות, והם מוצרים או שירותים מסחריים. הממשל האמריקני מגדיר גם תוכנה ושירותי תוכנה כמוצרי מדף, וכן שירותים הקשורים למוצר הנרכש, כדוגמת מאמנים וכדומה. שימוש במוצרי מדף נחשב כמוזיל לוחות זמנים לפיתוח והתארגנות לייצור, כמוזיל עלויות פיתוח ומקטין סיכונים, וכמוזיל עלויות ייצור לנוכח כמויות ייצור גבוהות לשוק האזרחי או לפחות לשוק המשותף. קיצור לוחות זמנים בתהליכי מחקר ו/או פיתוח ו/או ייצור של מוצר נקרא גם קיצור "זמן ההגעה לשוק" (Time to Market). הדוגמאות למוצרי מדף בשימוש במערכות לחימה הן רבות ומגוונות, כדוגמת: רכיבי מחשב, תקשורת, מצלמות יום, רכיבים אלקטרוניים, מערכות הפעלה (תוכנה) ועוד. לצד היתרונות שבשימוש במוצרי מדף במערכות צבאיות ישנם גם משמעותיים וסיכונים. תהליכי ההסבה, ההתאמה, הסיכונים והמשמעותיות יתוארו בהרחבה בהקשר זה בפרק הרביעי.

## סיכום

בפרק זה נסקרו המונחים הבסיסיים הנדרשים לצורך הבנת נושא העבודה והוא הגדרת נקודת האיזון הנכונה בפיתוח אמצעי לחימה (אמל"ח) בישראל – בין רכש טכנולוגיות ומוצרי מדף מסחריים (COTS) והתאמתם לבין פיתוח עצמי. בפרקים הבאים תנתח מערכת החדשנות הישראלית על הגורמים הפועלים בה (פרק שלישי) ומאפייני אמצעי הלחימה הרלוונטיים לעבודה, העושים שימוש בטכנולוגיות צבאיות לצד טכנולוגיות מסחריות (פרק רביעי). לאחר מכן ייבחנו שני תהליכי העברת הטכנולוגיות המרכזיים והדו-כיווניים – Spin On ו-Spin Off – בהקשר של זליגת/העברת טכנולוגיות צבאיות לשימוש מסחרי, ולאחר התפתחותם המואצת (טכנולוגית) באזרחות – זליגתן/העברתן חזרה לצורך התאמתן ויישומן במערכות לחימה (פרק חמישי). איור 6 להלן ממחיש את תהליכי העברת טכנולוגיה הנ"ל בין המערכת הלאומית למערכת האזרחית/פרטית.



איור 6: העברת טכנולוגיות מהמערכת הצבאית למסחרית ולהפך

## פרק שלישי – מערכת החדשנות הלאומית בישראל

בפרק תיסקר מערכת החדשנות הלאומית בישראל, ובעיקר החלקים הרלוונטיים לעבודה זו. תתואר בקצרה התפתחותם ההיסטורית של הגופים הביטחוניים המובהקים שבמערכת החדשנות הביטחונית/צבאית, האסטרטגיה שהכוינה אותם בעבר, וכן ייערך ניסיון לאפיין את האתגרים העתידיים העומדים בפניהם.

### הגדרת המערכת

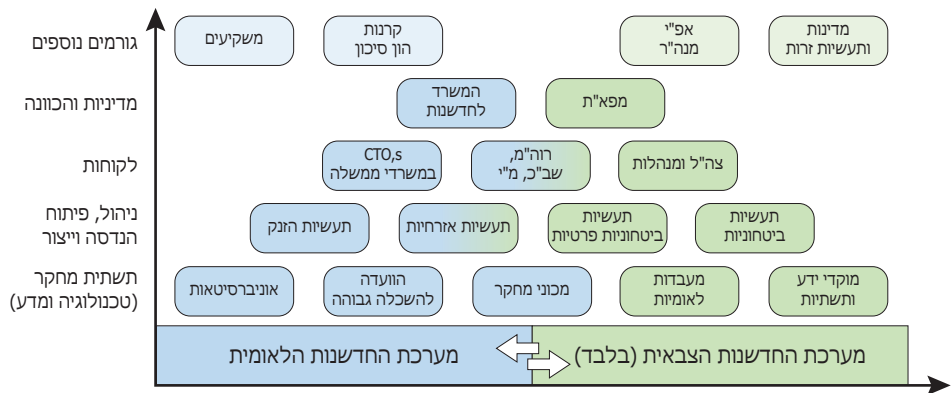
כאמור, מערכת חדשנות כוללת את כלל המוסדות, הלאומיים והפרטיים, העוסקים בחדשנות טכנולוגית. כאשר אנו מתבוננים במערכת החדשנות בישראל, ובפרט זו הרלוונטית לנושא הקשר שבין מדע וטכנולוגיה לצבא וביטחון, ישנם שני מעגלים עיקריים המרכיבים אותה:

1. מעגל המוסדות השייכים רק למערכת החדשנות הביטחונית – גופי מערכת הביטחון, צה"ל, התעשיות הביטחוניות הממשלתיות והפרטיות, משרד הביטחון ובראשם המנהל לפיתוח אמצעי לחימה ותשתיות במשרד הביטחון (מפא"ת), מנהל הרכש במשרד הביטחון (מנה"ר), האגף לפיקוח על הייצוא במשרד הביטחון (אפ"י), המעבדות הלאומיות (המרכז למחקר גרעיני בנחל שורק והמכון הביולוגי בנס ציונה) ומוקדי הידע בתעשיות הביטחוניות.
2. מעגל המוסדות השייכים למערכת החדשנות הלאומית והאזרחית – מערכת הפטנטים הלאומית, האוניברסיטאות, מכוני המחקר, משרד הכלכלה ובתוכו המשרד לחדשנות (לשעבר המדען הראשי), גופי הפיתוח של משטרת ישראל (מ"י), שירות הביטחון הכללי (שב"כ), משרד ראש הממשלה, המדענים הראשיים במשרדי הממשלה השונים, תעשיות פרטיות העוסקות במחקר ופיתוח (מו"פ) עצמי ותעשיות העילית וההזנק. בנוסף לכך, קיימת השפעה משמעותית בשנים האחרונות על מערכת זו של החממות הטכנולוגיות, קרנות הון-סיכון, והמשקיעים השונים.

באזור 7 מפורטים הגורמים העיקריים במערכת החדשנות בישראל, בחלוקה לשני המעגלים העיקריים ומסווגים על פי סוגי התפקידים במערכת.

### התעשיות הביטחוניות הממשלתיות

גוף הביצוע העיקרי והוותיק ביותר לפיתוח ולייצור אמצעי לחימה הוא התעשייה הצבאית. זו נוסדה כבר בשנות העשרים של המאה העשרים בעקבות יחסי עוינות שהתחילו להתפתח בין האוכלוסייה היהודית לערבית. בתחילה הגבילו עצמם בתי המלאכה של התעשייה לייצור תחמושת קלה, רימוני יד וחומרי נפץ מתוצרת בית. החל משנות השלושים הקימו חברי ארגוני המחתרות (ההגנה והאצ"ל, ומשנות הארבעים גם הלח"י) מפעלים סודיים קטנים, ועם הקמת המדינה בשנת 1948 היו



אזור 7: הגורמים העיקריים במערכת החדשנות בישראל

מפעלי ארגון ההגנה את התשתית לתעשייה הצבאית – תעש (עברון 1992: 13-76). בשני העשורים הראשונים שלאחר קום המדינה ייצרה תעש את כלי הנשק הבסיסיים של צה"ל, לרבות הת-מקלע "עוזי". כלי הנשק היקרים והמתקדמים יותר יוצרו בארצות אחרות ובמיוחד בצרפת.

ב-5 ביוני 1958 החליט שר הביטחון דוד בן-גוריון על הקמת "הרשות למחקר ופיתוח אמצעי לחימה" (רפא"ל), ומינה את מוניה מרדור למנהלה הראשון. באותה תקופה התבססה מערכת הביטחון על שלוש תעשיות ביטחוניות עיקריות: תעש, מפעל בדק תעופה (לימים התעשייה האווירית לישראל) ורפא"ל. הקשר ההדוק בין מפעלים אלה לצה"ל התבטא בכך שמנהליהם השתתפו כחברים מן המניין בישיבות המטה הכללי, והיו מסוגלים להשפיע על כיווני המחקר והפיתוח והצרכים המבצעיים מתוך הפורום המבצעי הבכיר של הצבא (חורב 2006: 135).

בשנות החמישים הכיר משרד הביטחון (משהב"ט) ברפא"ל כמעבדה לאומית העוסקת במחקר ופיתוח (מו"פ) ביטחוני, בעוד ש"מכון בדק" ותעש הוכרו כמפעלים ביטחוניים העוסקים בייצור אמל"ח ותחזוקתו (חורב 2006: 136). חלוקת עבודה זו לא החזיקה מעמד זמן רב, ובסוף שנות ה-50 התחילו "בדק תעופה" ותעש להפעיל לחצים על הנהלת משרד הביטחון לקבל משאבים לביצוע מו"פ עצמאי (מרדור 1981: 180). בשנת 1964 השלימה רפא"ל את פיתוח טיל אוויר-אוויר "שפריר", ושילבה אותו בטיסת "שחק" הראשונה. פיתוח ה"שפריר" הקנה לרפא"ל יכולות ייחודיות בתחום טילי אוויר-אוויר, ואוויר שטח, תחום שבו היא מובילה עד היום. עד סוף שנות השישים המדיניות הייתה כי רפא"ל מפתחת ואחרים מייצרים. אך בשנות השבעים חל שינוי, והיא החלה לייצר את פיתוחיה.

צה"ל ומשרד הביטחון – פעילות מו"פ מעבדתית ראשונית התחילה עוד בתקופת המדינה שבדרך. בשנת 1947 פנו יוחנן רטנר מהטכניון בחיפה, ופרופסור אהרון קציר מהאוניברסיטה העברית בירושלים לדוד בן-גוריון, והציעו לו תוכניות ראשוניות למו"פ צבאי. בן-גוריון תקצב פעילות זו



ב-2,000 לירות א"י (מרדור 1981: 70). החלטה מוסדית ראשונה להקמת גוף רשמי שירכז את נושא המחקר והפיתוח הביטחוני התקבלה באוקטובר 1947 על ידי ועדת הביטחון של הסוכנות היהודית בראשות דוד בן-גוריון. בעקבותיה נוסדה המחלקה המדעית של ההגנה. במרץ 1948 הוקם חיל המדע (חמ"ד) במסגרת המחלקה המדעית של ההגנה, ובמאי 1948 הוחלט להקים את המחלקה למחקר מדעי ליד אגף המבצעים במטה הכללי (חורב 2006: 134). חמ"ד העסיק בתחילת שנות החמישים כ-560 עובדים בחמישה מכוני מחקר ברחבי הארץ, אנשי צבא ואזרחים (מרדור 1981: 79). בשנת 1952 החליט בן-גוריון להקים במשרד הביטחון את אגף מחקר ותכנון (אמ"ת) ולהעביר את חמ"ד ממסגרת צה"ל למשרד הביטחון.

ההיערכות למבצע סיני גרמה להאצת ייצור חלק מאמצעי הלחימה (אמל"ח) שפותחו על ידי אמ"ת בתעש. אמל"ח זה כלל בין היתר את התת-מקלע "עוזי" שפותח על ידי עוזיאל גל בשנת 1954, מוקשים, נשק נגד טנקים (נ"ט), פצצות וחומרי הניטרוגליצרין. עסקת הנשק שנחתמה בין צ'כוסלובקיה למצריים בשנת 1955, ו"מבצע קדש" בשנת 1956 הביאו את צה"ל לדרוש ממערכת הביטחון לפתח ולייצר נשק מתקדם יותר עבורו. כדי להיענות לדרישה זו הוגדלה עתודת המדענים והחוקרים שעסקו במו"פ ביטחוני, ונפתח בשנת 1956 מסלול הכשרה ייחודי שנקרא בשם "העתודה האקדמאית". אמברגו הנשק שהטילו צרפת ובריטניה על ישראל לאחר מלחמת ששת הימים, ובמיוחד זה שהוטל על ידי צרפת, שהייתה עד אז ספק הנשק המתקדם העיקרי של ישראל, הביא את קברניטי מערכת הביטחון להחליט כי יש להשיג עצמאות גם במו"פ של מערכות נשק עיקריות. החל ממצצית שנות השבעים, בעקבות מלחמת יום הכיפורים נעשו אמל"ח מפיתוח וייצור התעשיות הביטחוניות הישראליות לנפוצים יותר באמל"ח הצה"לי. ספינות טילים מדגם "רשף", מטוסי ה"כפיר", טילי ה"גבראל" וטנקי ה"מרכבה" הם חלק מהדוגמאות. יש להדגיש שעדיין נשארו מספר תחומים שבהם התעשיות הביטחוניות ייבאו ידע מחו"ל, לדוגמה: מטוס ה"כפיר" נבנה בהתאם לתוכניות של המיראז' הצרפתי, והמנוע של המטוס נרכש בארצות הברית מחברת General Electric. ספינות הטילים מדגם "רשף" בחיל הים שנבנו במספנות ישראל היו פרי תכנון גרמני, בעוד שמערכות הנשק והלוחמה האלקטרונית פותחו על ידי התעשייה האווירית ואלביט.

**התעשייה האווירית לישראל (תע"א)** שהוקמה כמפעל ממשלתי בשנת 1953, התחילה לאחר מלחמת ששת הימים בבניית קווי הרכבה למטוסי תובלה קטנים מדגם 'ערבה', ומטוס הקרב הראשון 'כפיר' היה אמור להחליף את מטוסי המיראז' וה'נשר'. במרץ 1968 הפכה התעשייה האווירית מיחידת סמך של משרד הביטחון (משהב"ט) לחברה ממשלתית. ההחלטה לפתח ולייצר מטוס קרב בתעשייה האווירית נבעה אף היא מהאמברגו הצרפתי, והביאה להגדלת המשאבים שהשקיעה מערכת הביטחון בתעשייה האווירית (חורב 2006: 137).

בין השנים 1968–1984 נוספו לתעשייה הביטחונית בישראל מדענים ומהנדסים (לרבות עולים חדשים) בקצב שנתי ממוצע של כ-10%, שיעור שהיה בשעתו גבוה מכל מדינה מתועשת אחרת.

ריכוז זה הרחיב את הבסיס התעשייתי, וזרימת משאבים ממשלתיים שהופנו למו"פ ביטחוני יצרו גידול משמעותי בנפח הייצור המקומי של מערכות נשק. בשנות השמונים כ-65% מהוצאות המו"פ ברמה הלאומית היו למו"פ ביטחוני, ורק 13% היו למו"פ בתעשייה האזרחית. מחצית מהמהנדסים והמדענים שהועסקו בסקטור התעשייתי עבדו בתעשייה הביטחונית. שיעור המשאבים שהוקצו ב-1975 למערכת הביטחון היה 32% מהתוצר הלאומי הגולמי (חורב 2006: 137). גורמים רשמיים טענו כי נגזרות ממו"פ זה, ובמיוחד בתחום האלקטרוניקה, עוררו בהמשך את המגזר הטכנולוגי האזרחי, ותרמו באופן עקיף להגדלת הייצוא של ישראל לעולם. על טענה זו נמתחה ביקורת מצד כלכלנים ישראלים, אשר כינו את השנים 1973–1984 ה"עשור האבוד" מבחינה כלכלית של מדינת ישראל, עם צמיחה של 0% ופיריון אפסי (ברודט 2016, 2017).

טענתם הייתה כי לו הושקעו משאבים אלו (700 מיליון דולר לשנה בממוצע) במו"פ אזרחי, התשואה המושגת הייתה גבוהה יותר. המשבר התקציבי של אמצע שנות השמונים, תוכנית החירום הכלכלית להורדת האינפלציה ב-1985 והפסקת פיתוחו של מטוס הקרב ה"לביא" בשנת 1987, היוו את "קו פרשת המים" בכל הקשור להשקעות מערכת הביטחון בפיתוח מערכות נשק עיקריות במדינת ישראל. ההחלטה על הפסקת ה"לביא" גרמה לפיטורי אלפי מהנדסים וטכנאים בתעשייה האווירית ובמפעלים אחרים שהיו שותפים לפרויקט. ברפא"ל, לדוגמה, נעשה קיצוץ חד במצבת כוח אדם מ-7,800 עובדים ל-4,500 עובדים בשנת 2000. על התעשיות הביטחוניות הוטל תפקיד חדש והוא: "להעניק לצה"ל 'מכפילי כוח' באמצעות פתרונות טכנולוגיים מקוריים וייחודיים שניתן להסתיר אותם עד שעושים בהם שימוש בשדה הקרב" (חורב 2006: 139).

בשנת 1986 התחילה במפעל מל"מ של התעשייה האווירית תוכנית ההדגמה וההוכחה של הטיל ליירוט טילים בליסטיים 'חץ'. בכך נוסד בתעשייה האווירית מוקד ידע נוסף בתחום ההגנה בפני טילים בליסטיים המשרת את מערכת הביטחון עד היום. בשנת 1988 שיגרה ישראל לחלל את לוויין 'אופק 1', ובכך נכנסה למועדון המדינות אשר ביכולתן לשגר לוויין לחלל. פיתוח הלוויין היה משותף לתע"א, לרפא"ל ולתעש. הצורך בלווייני צילום התעורר בתחילת שנות השמונים לאחר הסכם השלום עם מצרים, החזרת חצי האי סיני והתפתחותם של איומים רחוקים, כמו בניית הכור הגרעיני בעיראק. ביצוע משימות צילום בטווחים אלו על ידי מטוסי חיל האוויר נהיה מורכב, ומחיר ההישענות על שירותי מעצמות נראָה בלתי סביר. בכך הרחיבה מדינת ישראל את יכולותיה בתחום החלל, והרחיבה את יכולת ההתרעה שלה.

בתחילת שנות התשעים התעצבו מחדש פניה של התעשייה הביטחונית בישראל. הגורם המעצב היה תהליך הירידה בצריכה הפרטית והממשלתית שהקטינה את הוצאות הממשלה, ובכלל זה גם את תקציב הביטחון (טבלה 2). בין השנים 1985–1995 צומצמה ההוצאה הביטחונית ב-37% במונחים ריאליים. סיומה של המלחמה הקרה הוביל לירידה בביקוש למערכות לחימה בעולם כולו, דבר שהשפיע על נפח המכירות של תעשיית הנשק הישראלית בחו"ל. מצבן הכלכלי של התעשיות

הביטחוניות החמיק, ובמיוחד של אלה שאיגדו מרכזי מו"פ גדולים בבעלות המדינה, כמו רפא"ל. בשנת 2000 הגיע היצוא הביטחוני ל-15% מכלל היצוא של תעשיית האלקטרוניקה בישראל. לצד ההשפעות הללו התחיל בישראל גם דיון ציבורי בשאלות מדיניות ביטחון ארוכות טווח, שבחן את הצורך והכדאיות בפיתוח ובבנייה של פלטפורמות לחימה עיקריות, כמו המטוס, הטנק והסטי"ל בתעשיות הביטחוניות בישראל. משלושת האמצעים שצוינו, רק טנק ה"מרכבה" המשיך להיות מפותח ומויצר בישראל, ואילו מטוסי הקרב המתקדמים של חיל האוויר (F15, F16) וספינת הטיילים של חיל הים (סער 5) נרכשו מארצות הברית. הסדרי הקיזוז (Offset Agreements) שהיו אמורים להעביר טכנולוגיות מתקדמות לתעשייה הביטחונית בישראל, קידמו את התעשיות הביטחוניות לחזית הטכנולוגיה, אך חייבו בהמשך את אישורה של ארצות הברית לפני כל חוזה מכירה לצד שלישי.

טבלה 2: אחוז הצריכה הביטחונית ביחס לתמ"ג במהלך השנים

שנה	1956	1967	1973	1982	1991	2006
צריכה ביטחונית מהתמ"ג	14.1%	17.4%	31.2%	20.9%	12.7%	8.1%
צריכה ביט' מקומית (ללא יבוא) מהתמ"ג	10.2%	14.6%	14.8%	9.4%	6.2%	

מקור: אבן 2007

מדיניות משרד הביטחון בשנות התשעים הייתה כי יש לפתח בתעשיות הנשק הביטחוניות בישראל מערכות נשק ייחודיות לצה"ל, לצד הקטנת גודלן של התעשיות הביטחוניות ומספרן, תוך כדי שמירה על יתרון איכותי בתת-מערכות ובשדרוג מערכות קיימות (חורב 2006: 144). דוגמה לצמצום דרמטי זה התרחש בתעשייה הצבאית (תעש): בשנת 1990 עבדו בתעשייה זו כ-11,000 עובדים, ובשנת 2003 ירד מספרם ל-3,300 עובדים.

רפא"ל הפכה להיות חברה ממשלתית בתחילת שנת 2002. עם זאת, משרד הביטחון התחייב להמשיך ולקיים את ההסכם הייחודי עם רפא"ל, כמלמ"ב, בנושא תשתיות לאומיות ומוקדי ידע (תלמ"י). נכון להיום, מתקיימים תהליכים להפרטת התעש, אשר עד לימי כתיבת שורות אלה טרם הושלמו.

## התעשיות הביטחוניות בישראל – ממשלתיות ופרטיות

התעשייה הביטחונית שנוסדה במדינת ישראל הייתה יציר כפיו של הממסד הפוליטי בתקופת המדינה שבדרך ולאחר קבלת העצמאות. התעשייה עוצבה על ידי האיום המתמיד על קיום המדינה, האתוס של מדע לאומי והמחסור בשווקים לרכש נשק מתקדם. יוזמות פרטיות ראשונות בייסוד חברות שיעסקו בייצור מערכות נשק עבור מערכת הביטחון התחילו בשנות השישים. בשנים אלה פרשו מרפא"ל מספר אנשי מפתח בשטח המחשבים אשר הקימו את חברת "אלרון" ליישומי

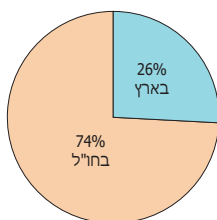
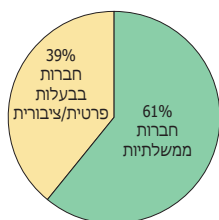
אלקטרוניקה, ובמסגרתה חברת בת לאלקטרוניקה ביטחונית בשם "אלביט". נכון להיום, אלביט היא התעשייה הביטחונית הפרטית הגדולה ביותר בישראל (והיחידה בסדר הגודל שלה).

נכון להיום קיימות בישראל כ-700 תעשיות ביטחוניות, המעסיקות מעל 40,000 עובדים ישירים (ועוד כ-80,000 עקיפים). ארבע התעשיות הגדולות (התעשייה האווירית, רפא"ל, אלביט ותעש) מעסיקות כ-35,000 עובדים יחד. התוצר הביטחוני מהווה כ-15% מהתוצר התעשייתי בישראל; היצוא הביטחוני הוא 6 מיליארד ₪ בשנה (כ-13% מסך היצוא), ומרבית התוצרת הביטחונית (כ-74%) מיועדת ליצוא (אחוז ייחודי בהשוואה לעולם שבו רוב התעשיות מייצרות את רוב תוצרתן עבור המדינה שבה הם נמצאות). עובדה זו מעמידה את ישראל במקום שישי בעולם בהיקף היצוא הביטחוני. כ-61% מהתוצרת הביטחונית בישראל מקורה בשלוש התעשיות הממשלתיות והשאר (39%) – מכירות של התעשיות הפרטיות ובראשן אלביט. התעשייה הביטחונית הישראלית מתאפיינת בפריון גבוה, שכר גבוה וערך מוסף גבוהים, אך בשנים האחרונות סובלת התעשייה מאי-גידול במכירות ותחרות קשה בעולם (כלל הנתונים באדיבות התאחדות התעשיינים ויועכ"ל משהב"ט). האירוסים להלן מתארים את המאפיינים העיקריים של תעשייה זו בישראל, ולאחר מכן – תמצית מאפייניהן של התעשיות הביטחונית העיקריות הלוקחות חלק נכון להיום בייצור סנק המרכבה.

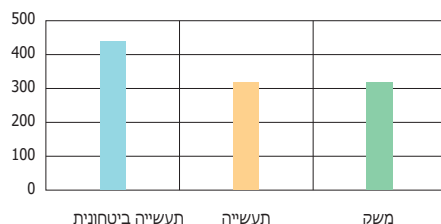


איור 8: התעשיות הביטחונית בישראל – תמצית יצרני המרכבה

סך המכירות ב-2015, כ-10 מיליארד \$



התוצר למועסק באלפי ש"ח



איור 9: מאפייני התעשייה הביטחונית בישראל

## המעבדות הלאומיות, מוקדי הידע והתשתיות הלאומיות בישראל

מוקדי הידע והתשתיות הלאומיות (תלמ"י) – בשנת 1995 הגדיר משרד הביטחון 33 מוקדי ידע ו-13 מתקני תשתית ברפא"ל כתשתית לאומית ומוקדי ידע (להלן תלמ"י). בשנת 1996 נחתם בהסכמת משרד האוצר הסכם בין משרד הביטחון לרפא"ל שהסדיר את צורת הטיפול בתלמ"י. התוכנית בהיקף תקציבי שנתי של 55 מיליון דולר הסדירה את תמיכת מערכת הביטחון בתשתיות הלאומיות ומוקדי הידע ברפא"ל, וחייבה גם את רפא"ל לתרום את חלקה, ולהשקיע במו"פ ביטחוני סכום שנתי של כשישה מיליון דולר (חורב 2006: 150).

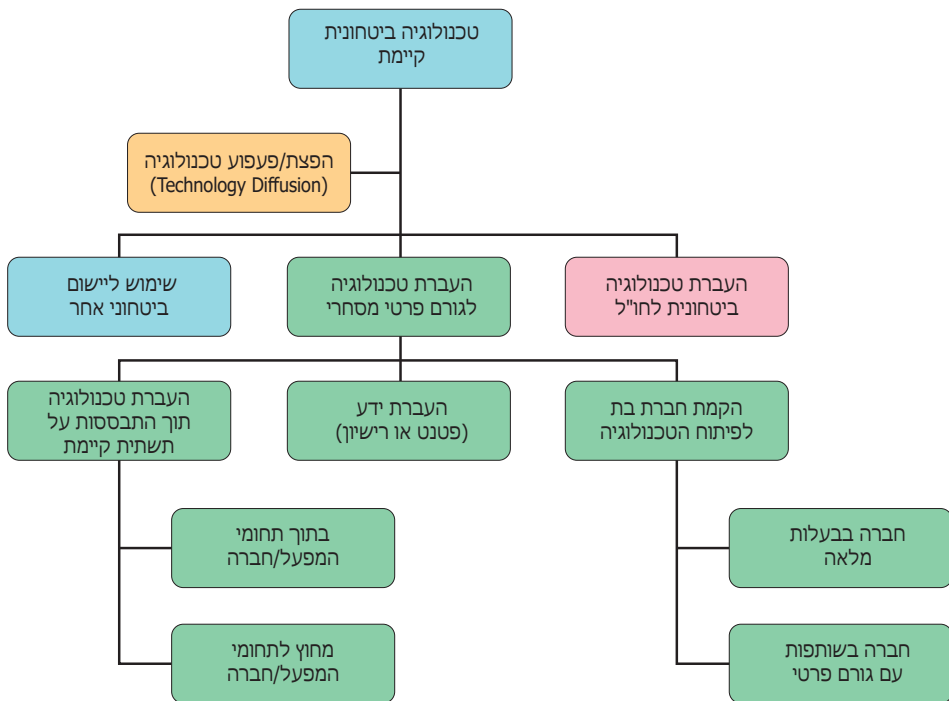
מוקד ידע הוגדר בהסכם כ"תחום טכנולוגי או מדעי מסוים, שבו עוסקת קבוצת עובדים מומחים מוגדרת שמית, אשר צברה ניסיון והתמחות במו"פ בנושאים באותו תחום אשר חיוניים לביטחון המדינה, והעומד באותם קריטריונים שצוינו לגבי תשתית לאומית.

מתקן תשתית לאומית הוגדר כ"מכלול ציוד, מבנים, קרקע המשמשים למטרות מו"פ ו/או ניסויים ביטחוניים, לרבות הקרקע בבעלות המדינה עליה בנויים המבנים כאמור לעיל, או שאליה מחובר הציוד בצורה ארעית או קבועה". המתקן עצמו חויב לעמוד באחד מהקריטריונים הבאים: חיוני לביטחון המדינה, יחיד בארץ או מוביל וייחודי בארץ, חיוני לקידום מגוון פרויקטים או תשתית טכנולוגית במערכת הביטחון, עתיר ידע ו/או השקעות, לא ניתן או לא רצוי לרכוש בחו"ל שירותים שהמתקן מספק או תוצרת הזהה לשירותים הניתנים על ידו או לתוצרתו.

ההסכם מסייג את יכולתה של רפא"ל להוציא על דעת עצמה עובדים מתוך מוקד ידע, וקובע כי הוצאת מומחה הכלול ברשימת המומחים של מוקד הידע אליו הוא שייך ביוזמת רפא"ל טעונה אישור של משרד הביטחון. על פי ההסכם, רשאי משרד הביטחון להציב ברפא"ל עתודאים ובוגרי "תלפיות", ובאחריות רפא"ל להעסיקם אך ורק במוקדי הידע, או במתקני התשתיות הלאומיות. נקבע כי ייעודן של ההזמנות שמשרד הביטחון מוציא לרפא"ל יהיה למחקרי תשתית, לבדיקות ייתכנות ולקדמי פיתוח, ולא לפיתוח מלא (FSD). ניסיונות להרחיב את ההסכם למוקדים ייחודיים

בתע"א, שגם היא כמו רפא"ל חברה ממשלתית, זכו להתנגדות מצד משרד האוצר. הסכם תלמי"י נשמר גם לאחר הפיכתה של רפא"ל בשנת 2002 לחברה ממשלתית, ועורר לא מעט טענות מצד התע"א ותעש על קיפוחן בהשוואה לרפא"ל בנושא (חורב 2006: 151). התלמי"י היא תוכנית רב-שנתית, שיעדיה נבחנים בכל שנה מחדש למול צפי צורכי השוק (עוזיאל 2017, 1.1, ריאיון).

לסיכום, המעבדות הלאומיות והתלמי"י מהוות את המלמי"ב במדינת ישראל. הכוונת המלמי"ב נעשית על ידי המדינה באמצעות משרד הביטחון, משרד ראש הממשלה והוועדה לאנרגייה אטומית. עיקר העיסוק הטכנולוגי של המלמי"ב הוא בפיתוח טכנולוגיות ואמצעים ביטחוניים ייחודיים, ולא פיתוח של טכנולוגיות מסחריות. המלמי"ב עוסק בפיתוח של טכנולוגיות ורכיבים אסטרטגיים על מנת לאפשר לישראל את "ההישענות על עצמה", ולהקטין את התלות במדינות זרות. בנוסף לכך, מתקיים גם פיתוח של טכנולוגיות מסחריות בעלות שימוש כפול, במקרים שבהם יש חשיבות כי מערכת הביטחון תשלוט בטכנולוגיה ולא תאבד עצמאות, או במקרים שבהם קיימת בקרה או מגבלת הפצה של טכנולוגיות אלו. במשך שנים רבות היה כיוון העברת הטכנולוגיה מהמלמי"ב לתעשיות הביטחוניות ולתעשיות פרטיות מסחריות (Spin Off). באיור 10 (חורב 2006: 285) רואים פירוט של סוגי העברת הטכנולוגיות בישראל מהמעבדות הלאומיות (המלמי"ב):



איור 10: סוגי העברת טכנולוגיות ממלמי"ב בישראל

## גופי משרד הביטחון (משהב"ט)

תפקידו של משהב"ט במערכת החדשנות הביטחונית הוא רב-כובעי: כלקוח (צה"ל), כקובע מדיניות (מפא"ת), כנציג הבעלים/מחזיק מניות (של התעשיות הממשלתיות), כמשקיע בתשתיות ושומר על היכולות האסטרטגיות (מנה"ר, מפא"ת) וכרגולטור ומפקח (אפי", סיב"ט, מנה"ר).

מנהל פיתוח אמצעי לחימה ותשתית (מפא"ת) הוא הגוף המכווין המרכזי של מערכת החדשנות הביטחונית. כפי שתואר קודם לכן, מוסדות ה"מדען הראשי" ויחידת המו"פ הוקמו במשרד הביטחון באמצע שנות השישים. בראש יחידת המו"פ עמד בדרך כלל איש צבא בדרגה בכירה, ובתפקיד המדען הראשי שימש אזרח בעל מוניטין בתחום המדעי או הטכנולוגי. בשנת 1982 אוחדו שני המוסדות למוסד אחד שנקרא בשם מפא"ת. כתוצאה מכך התחיל ראש מפא"ת להיות מעורב בתוכניות פיתוח מרכזיות, לרבות התשתית הנדרשת לפיתוח במעבדות הלאומיות ובמוקדי הידע הביטחוניים. מפא"ת נהייתה גורם מרכזי בהתקשרות בין משרד הביטחון לתעשיות הביטחוניות בכל הקשור לפיתוח אמצעי לחימה חדשים. כיום משמשת מפא"ת כגוף מטה משותף למשרד הביטחון ולצה"ל ואחראית להתוות את מדיניות המו"פ במערכת הביטחון. פעילויות מפא"ת ושימושי התקציב שלה הם: בניית התשתית המדעית טכנולוגית וקידומה להבטחת כושר פיתוח מערכות אמל"ח עתידי מתקדם לצורכי צה"ל זאת באמצעות יכולת שליטה במגוון רחב של טכנולוגיות; פיתוח כוח אדם ומוקדי ידע מדעיים וטכנולוגיים, והבטחת קיומם התקין והיעיל של מתקני התשתית הדרושים לפיתוח אמל"ח מתקדם באמצעות תכנית תלמ"י; הכוונת פוטנציאל המו"פ על ידי ייזום ובחינה של תפיסות חדשניות לאמל"ח עתידי; קדם פיתוח בפרויקטים; רכש וניהול פרויקטי פיתוח עבור צה"ל והתקשרות עם התעשיות הביטחוניות בפרויקטי פיתוח לפי דרישות צה"ל באמצעות מנהלות הפרויקטים; ניתוח ותיאום העבודה של כלל צה"ל בנושאי מו"פ כגוף מטה המשותף למשרד הביטחון וצה"ל, בחינת צרכים ותיאום פעילויות המו"פ הביטחוני בצה"ל ובמערכת הביטחון; קיום קשרים עם גורמים ביטחוניים בחו"ל בנושאי התשתית והמו"פ הביטחוני והסכמים עם מדינות שונות להחלפת מידע, טכנולוגיות וביצוע מחקרים בנושאי ביטחון במימון משותף.

המטה לרכיבים קריטיים במנהל ההרכשה במשרד הביטחון (מנה"ר) מנהל תוכנית עבודה רב-שנתית באמצעותה הוא משתתף במימון הנבטות של טכנולוגיות בתעשיות הביטחון ובתחומים שהמטה מגדירם כחיוניים למערכת הביטחון. ההנבטות הן בשטחי האופטרוניקה, האלקטרוניקה, חומרים וטרומ ייצור. התעשייה נדרשת להשתתף בערך שווה לזה המתקבל מהמטה. זוהי תוכנית רחבה יותר מהסכם תלמ"י של רפא"ל, ואינה מתמקדת בתעשייה אחת, עם זאת, המשאבים המוקצים לה קטנים למדי.

## התעשייה הטכנולוגית הפרטית (תעשיות העילית/ההזנק)

במובן מסוים צמחה תעשיית ההיי-טק בישראל מתוך המשבר הכלכלי של מחצית שנות השמונים, צמצום ההוצאה הציבורית על ביטחון, השקעות גורמים חיצוניים בתעשייה הטכנולוגית, ועזיבת אלפי עובדים טכנולוגים את התעשיות הביטחוניות. המשבר הכלכלי החריף שהתרחש בישראל במחצית שנות השמונים התאפיין באינפלציה דוהרת ואיים על קצב הגידול של תעשיית הטכנולוגיה המתקדמת. המדיניות המרסנת שנקטה ממשלת האחדות כדי להתמודד עם משבר זה, הביאה ליציבות הכלכלית שהושגה במחצית השנייה של שנות השמונים, וגרמה לגידול בהשקעות של גורמים חיצוניים בתעשיית הטכנולוגיה המתקדמת. מענקי מו"פ למגזר הפרטי מוסדו בשנת 1984 באמצעות ה"חוק לעידוד מו"פ תעשייתי". לשכת המדען הראשי במשרד התעשייה והמסחר התמנתה כאחראית על ביצוע המדיניות הממשלתית בכל הקשור לתמיכה במו"פ תעשייתי.

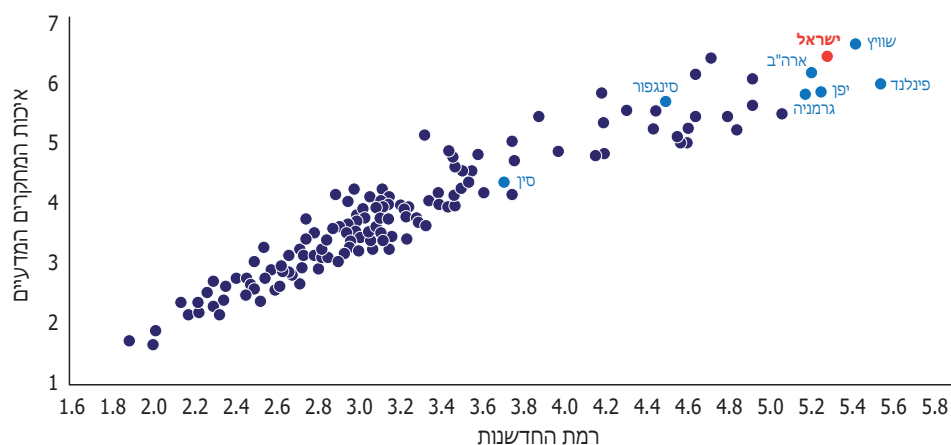
ישנה הסכמה רחבה בין חוקרי מערכת החדשנות הישראלית כי במחצית שנות השמונים הגיעה תעשיית הטכנולוגיה המתקדמת של מדינת ישראל לחזית הידע העולמית במספר תחומים. בשנים אלו גם התחולל שינוי מבני שמקורו בעודף כישורים ומיומנות, שנוצרו בשוק העבודה בהמשך לפעילויות במגזר הביטחוני לאחר מלחמת יום הכיפורים, צמצום תקציב הביטחון באמצע שנות השמונים בעקבות המשבר הכלכלי. שיאו של השינוי היה בהחלטת ממשלת ישראל בשנת 1987 לבטל את פרויקט מטוס הקרב העתידי של חיל האוויר הישראלי ה'לביא'. השינוי גרם להתחזקות של תעשיית הטכנולוגיה המתקדמת. למרות שהתמיכה הממשלתית באמצע שנות השמונים בתקציב המו"פ למעבדות הלאומיות והאוניברסיטאות קטנה, חל בשנים אלה גידול במו"פ שמומן ובוצע בתעשייה. חלקה היחסי של התמיכה הממשלתית בפעילויות המחקר והפיתוח בשנים 1982-3 היה 47% – שיעור גבוה בכל קנה מידה בינלאומי. בד בבד גדל נתח היצוא של מערכות נשק, ועברו מועסקים בעלי כישורים טכניים גבוהים לשוק העבודה האזרחי. תופעה זו השפיעה בצורה ניכרת על הגידול ביוזמות של תעשיית העילית בישראל, ומשנת 1994 גדל היקף ההשקעות של גורמי חוץ בחברות ההזנק (Start Up) ותעשיות האלקטרוניקה הישראליות, במיוחד בתחומי התקשורת, וחלק מהחברות הזרות אף ייסדו מעבדות מו"פ בישראל, דוגמת אינטל ומוטורולה (חורב 2006: 157-158).

טבלה 3 להלן ממחישה באופן כמותי את המהפכה שחלה בתעשיות ההיי-טק בישראל: כמות ומגוון ההשקעות במו"פ, בין אם באמצעות השקעות ממשלתיות, השקעות של קרנות הון-סיכון (VC – Venture Capital), השקעות פרטיות והנפקות, ולעומתן את כמות חברות ההזנק והפטנטים שפורסמו בשלושת העשורים 1970-2000 (Getz and Segal 2008).



טבלה 3: נתוני התפתחות תעשיית ההיי-טק בישראל בשלושה עשורים

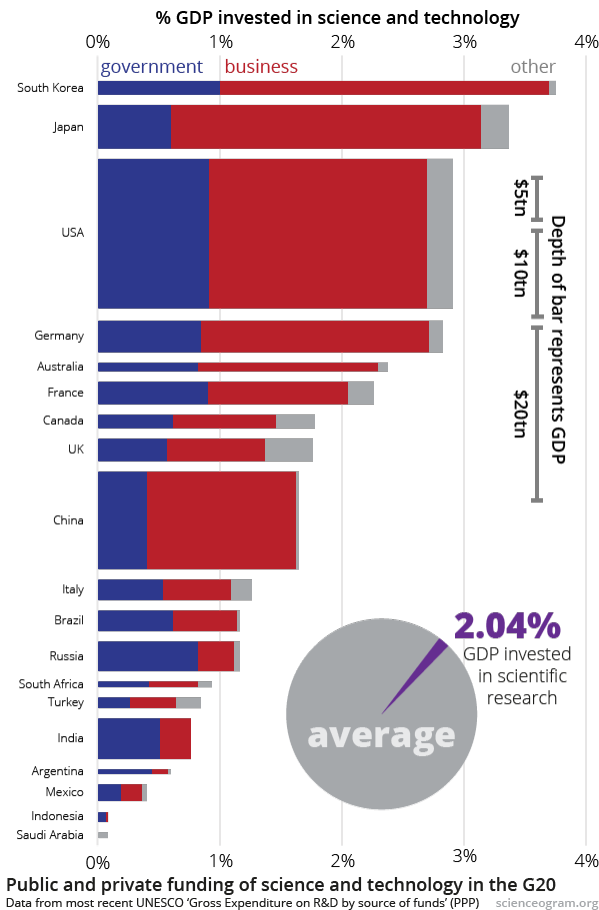
	1970s	1980s	1990s
Number of start-ups (SUs) created	~150	~300	~2,500
Funds raised by VCs (in m. Euro)	0	~40	~6,850
Capital invested in Israeli SUs by VCs (incl. foreign) (in m. Euro)	0	~40	~5,362
Total number of IPOs (high-tech):	1	9	126
Total number of VC-backed IPOs	0	3	72
Total number of significant mergers and acquisitions by MNEs:	0	0	~75
Capital raised on NASDAQ in the decade (in m. Euro)	~8	~40	~8,670
Mergers and acquisitions (in b. Euro)	~0	~0	~14,680
Number of international investment banks in Israel	0	1	
Number of VC companies	0	2	~100
ICT exports' share of manufacturing exports	~14%	28%	54%
ICT manufacturing exports (in m. Euro)	280	1975	10,440
Software exports (in m. Euro)	0	60	2,100
Civilian R&D as percentage of GDP	1.8%	2.8%	4.8%
ICT employees (thousands)	~60	~80	152
ICT skilled employees (thousands)	~26	37	57
Patents issued	140	325	969



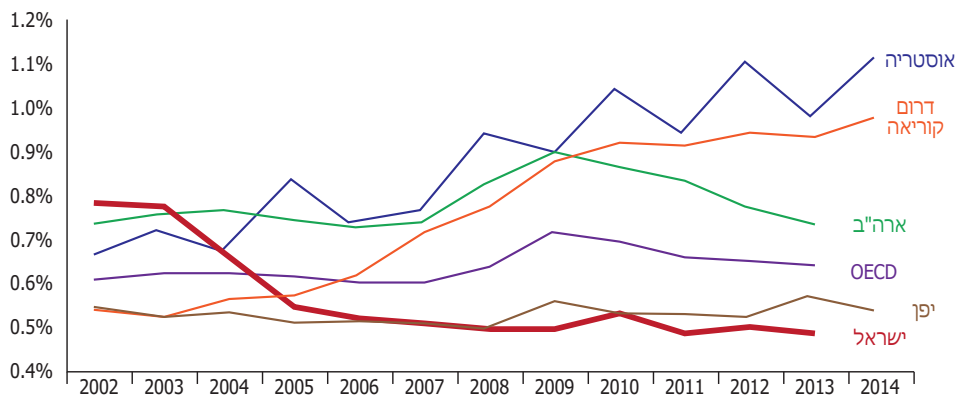
איור 11: רמת החדשנות בישראל ביחס למדינות המובילות, על פי: Global Competitiveness Report 2015-2016

עשור וחצי לאחר מכן, נכון לשנת 2015, הגיעו ההשקעות באמצעות קרנות הון-סיכון בחברות הזנק ישראליות לכדי 4.5 מיליארד דולר בשנה, ובשנת 2016 כ-5.5 מיליארד דולר – יותר מכל ההשקעות הדומות באירופה. כ-50% מההשקעות מגיעות מחו"ל, וכ-300 חברות רב-לאומיות פתחו

מרכזי פיתוח בישראל, המעסיקים כחצי מהעובדים בתחום. כמות חברות ההזנק המוקמות בישראל בכל שנה היא כ-1,100, ואילו היקף ה"אקזיט" הוא כשמונה מיליארד דולר (2015). תחום זה למרות שמעסיק כ-9% מהעובדים במשק בלבד ("תקרת הזכוכית" נכון להיום), מהווה כ-15% מהתמ"ג וכ-50% מהיצוא של ישראל: כ-25 מיליארד דולר בשנה (חסון 2016). לצורך השוואה וכדי להמחיש את ייחודיותה של מדינת ישראל בתחום זה, מובאים באיורים 12, 13 נתונים על גובה ההשקעות (באחוזים מתוך ה-GDP) במדינות ה-G-20, ונתח ההשקעה הממשלתית והפרטית. ניתן לראות כי ההשקעה הכוללת נעה בין 0-3.5%, מתוכה ההשקעה הממשלתית היא כ-0.5%-1%. לשם השוואה בישראל ההשקעה העסקית בלבד היא כ-4.8% החל משנות התשעים (טבלה 3), בעוד שנתח ההשקעה הממשלתית שבה הוא הנמוך ביותר מהמדינות המתקדמות.



איור 12: השקעות במדע וטכנולוגיה במדינות ה-G20, מתוך: Global private and public R&D funding, Sciencogram UK, May 29, 2013 <https://scienceogram.org/blog/2013/05/science-technology-business-government-g20>



איור 13: אחוז ההשקעה הממשלתי במדינות המובילות, מתוך: הרצאת המדען הראשי, מב"ל, 1/12/16, על פי: OECD

## משרד הכלכלה – הרשות לחדשנות טכנולוגית (בעבר ה"מדען הראשי")

המדען הראשי במשרד התמ"ת פעל מתוקף החוק לעידוד מו"פ בתעשייה, תשמ"ד 1984". הוא הופקד על פיתוח התעשייה עתירת הידע, עידוד החדשנות הטכנולוגית והתעשייתית לשם פיתוח תעשיית הייצוא של מוצרים עתירי ידע, יצירת מקומות עבודה בתחומי הטכנולוגיה, שיפור מאן התשלומים של מדינת ישראל, ויצירת תשואה עודפת למשק. תקציב המדען הראשי לשנת 2004 היה בשיעור של 1.28 מיליארד ש"ח (חורב 2006: 161).

נכון לשנת 2015 היו השקעות הרשות לחדשנות טכנולוגית בהיקף של כ-2 מיליארד ₪ (מתוכם 0.5 מיליארד הון חוזר מתמלוגים). מתוך הבנת התרומה האדירה של שוק זה לכלכלת ישראל, כפי שהוצג לעיל, המשרד מתמקד בשיתופי פעולה ציבורי-פרטי (Public-Private Partnership), וכן בניסיונות לפרוץ את תקרת הזכוכית של ההון האנושי (אחוז המועסקים בענפי ההיי-טק בשנת 2015 היה 9% מהמועסקים במשק), וזאת באמצעות ניסיון להרחיב את מעגל המועסקים מתוך אוכלוסיות נשים, ערבים, שיתופי פעולה וכוח אדם גלובלי (חסון 2016).

## גופי המחקר הבסיסי והתשתיתי בישראל

המחקר הבסיסי והתשתיתי מכון לקדם את הידע המדעי ללא התייחסות ליעדים מסחריים ספציפיים ומיידיים, גם אם הוא מתבצע בשטחי מחקר שבהם ישנם אינטרסים מסחריים עכשוויים. המוסדות העיקריים העוסקים במחקר הבסיסי והתשתיתי במדינת ישראל הן האוניברסיטאות, לרבות הטכניון ומכון ויצמן למדע, המיוצגות על ידי הוועדה להשכלה גבוהה. בשנים האחרונות ישנן יותר עדויות לכך כי מאמצים לחדשנות נסמכים יותר ויותר על מחקר בסיסי, שתוצאותיו

מאפשרות הזדמנויות רבות יותר למסחר (Commercialization). לדוגמה, המחקר הבסיסי בביוטכנולוגיה הוביל בשנים האחרונות למספר רב של יישומים מידיים.

## סיכום ודיון

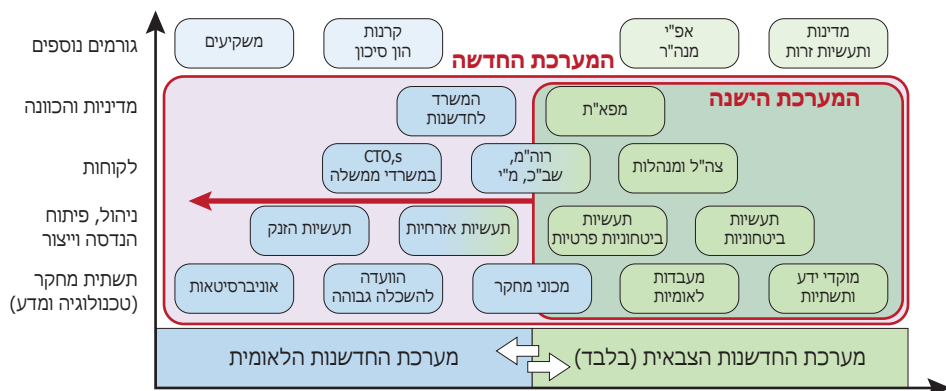
כפי שעולה מהסקירה בפרק זה, מערכת החדשנות הלאומית בשנים הראשונות של המדינה הייתה חופפת כמעט למערכת החדשנות הביטחוניתי: מרבית תקציבי המו"פ הגיעו אל התעשיות הביטחוניות והמעבדות הלאומיות, גודלו של תקציב הביטחון היה בשיאו, ולאור חשיבותה של החדשנות הצבאית, הופנו גם משאבי כוח האדם לכיוון זה. תקופה זו הניבה פיתוח המעבדות הלאומיות והתעשייה הצבאית, אשר היו אחראיות לעיקר התוצרת החדשנית בישראל ולהישגים ברמה עולמית. התפנית במערכת החדשנות הלאומית אירעה כעשר שנים לאחר מלחמת יום הכיפורים, בתקופת היציאה מהמשבר הכלכלי והשינויים במשק הישראלי ובראשם המעבר ממשק סגור למשק פתוח, גלובלי, תחרותי, פתוח להשקעות ולייצוא וההקטנה המשמעותית בתקציב הביטחון. בעשרים וחמש השנים האחרונות התפתחה בישראל תעשיית היי-טק מפוארת, אשר הקנתה לישראל את הכינוי "מדינת הסטארט-אפ" (Start-Up Nation). מרכז הכובד של ההון האנושי וההשקעות (הציבוריות והפרטיות) במערכת החדשנות בישראל נטה מהתעשייה הצבאית לתעשיית ההיי-טק. יש המייחסים, לפחות חלקית, את הצלחתה של ישראל בתחום ההיי-טק דווקא לתעשייה הביטחונית שהוקמה בארץ, אשר הכשירה במשך שנים רבות כוח אדם איכותי וטכנולוגי. סיבות נוספות המיוחסות להצלחה זו הן השירות הצבאי, חלק מהתפקידים והיחידות הצה"ליות (8200 לדוגמה), והעלייה המקצועית מרוסיה בשנות התשעים (Getz and Segal 2008: 40–41).

במקביל למגמה זו אירעו עוד שתי תופעות אשר הוזכרו בפרקים הקודמים: האחת, שינוי בפרדיגמת הביטחון (ה-Grand Strategy החדש הכולל את העורף, האיב, תודעת הניצחון, האיום הקיברנטי, איום הטרור והאויב הא-סימטרי הלא-מדינתי) אשר הביאה להתעניינות גוברת של המערכת הביטחונית בטכנולוגיות מענף ההיי-טק, והשנייה ההתפתחות המעריכית בחדשנות בתחום ה-IT (מהפכת ה-IT, או ה-ICT-Information and Communication Technology, כפי שהיא מכונה בעולם החדשנות היום).

שלוש התופעות הללו מביאות אותנו למסקנה כי מערכת החדשנות הרלוונטית למערכת הביטחון אינה מערכת החדשנות הביטחונית ההיסטורית בלבד, אלא מערכת החדשנות הלאומית הכוללת את מערכת החדשנות הביטחונית והאזרחית גם יחד. החלוקה הדיכוטומית שהייתה בעבר – מערכת חדשנות צבאית ומערכת חדשנות אזרחית, שהביאה למיקוד במערכת הביטחונית בלבד – מגבילה, ועלולה להביא ל"החמצת הזדמנות" לקפיצת מדרגה, או גרוע מכך – להידרדרות ביחס לאויב, ש"מצמצם פערים" טכנולוגיים בזכות הגלובליזציה והרלוונטיות של טכנולוגיות מסחריות לשימוש

זדוני. הסתכלות מערכתית חדשה, המתבססת על שתי המערכות יחד, היא, אם כן, הכרח, והעובדה כי בישראל צומחת אחת מתעשיות ההיי-טק המובילות בעולם רק מחזקת זאת.

להתבוננות המערכתית הרחבה ישנם משמעויות, חסמים וקשיים, שאותם נתאר בפרקים הבאים. החיסרון העיקרי בכך הוא איבוד שליטה בחלק מתחומי החדשנות, יחד עם הגדלת הסיכון והחשיפה, אך מנגד, היא מאפשרת תכנון יעיל ועדכני יותר של מערכת החדשנות הביטחונית, תוך כדי מיצוי המערכת הצבאית. באיור 14 מתואר השינוי המתבקש בנייתו המערכתית של מערכת החדשנות הביטחונית.



איור 14: "מערכת החדשנות הביטחונית" למול "מערכת החדשנות הרלוונטית לענייני ביטחון"

## פרק רביעי – מאפייני מערכות הלחימה

בפרק זה ייסקרו המאפיינים של אמצעי הלחימה (אמל"ח) המודרניים, המפותחים באמצעות מערכת החדשנות הביטחונית, במטרה לשמש יסוד לדיון שבסוף העבודה באשר לשיפורים האפשריים במערכת החדשנות הביטחונית בהקשר של פיתוח אמצעי לחימה.

במהלך השנים התפתחו אמצעי הלחימה מ'כלי הנשק' ל'מערכות נשק', וככל שחלפו הדורות נעשו מערכות הנשק מורכבות יותר ועתירות טכנולוגיה. בד בבד עם התהליכים אלה התעצבו השיטות והתהליכים של פיתוח אמצעי לחימה, והעמיק השימוש בטכנולוגיות ופריטים מסחריים במערכות הנשק.

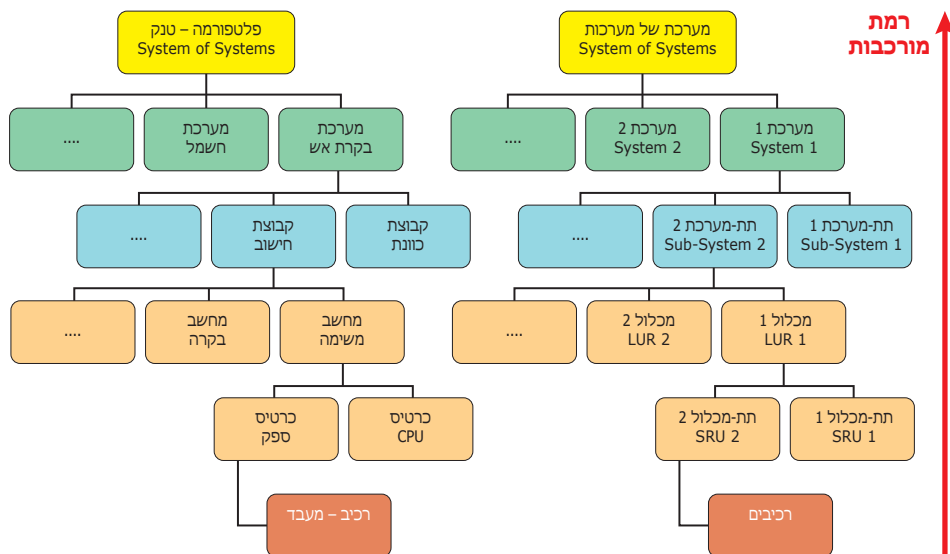
בפרק זה יתוארו התהליכים והמאפיינים שתוארו לעיל: מונחי היסוד בארכיטקטורת מערכת; תהליכי הפיתוח המשולבים (בצה"ל ובתעשיות הביטחונית); ייחודיותה של מדינת ישראל בחדשנות הצבאית; השונות הקיימת בין הדרישות מאמצעי לחימה לבין הדרישות ממוצרים מסחריים רגילים, ולבסוף, הדילמה שבבסיס העבודה: פיתוח של מרכיבים במערכת או רכש מוצר מדף והתאמתם.

### ארכיטקטורה של מערכות נשק ו"מערכת של מערכות"

את מרבית אמצעי הלחימה שפותחו בשלושת העשורים האחרונים בעולם המערבי בכלל ובישראל בפרט, ניתן להגדיר כ"מערכות נשק" ולא כ"כלי נשק". זאת בשל מידת המורכבות שלהם, תתי-המערכות המרכיבות אותם והקשרים ביניהם. כל מערכת נשק מכילה מגוון טכנולוגיות, שאפשר לסווג תמיד ל"טכנולוגיות הליבה" של אותו נשק, ולטכנולוגיות תומכות" שבהן יש שימוש לצורכי תמיכה ותפעול של הליבה. פיתוח של מערכת חדשה מתבצע על פי רוב לאחר שקיים חידוש טכנולוגי בטכנולוגיית הליבה של המערכת, זאת כדי ליצור "קפיצת מדרגה" בביצועים ו/או ביכולות ו/או באמינות. כדוגמה למערכת נשק אביא מערכת נשק נשלטת מרחוק, המבוססת על טכנולוגיות רבות, הליבה שבהן היא יכולת הבקרה, ההנעה והתצפית של מערכת הנשק, ומסביבן טכנולוגיות תומכות נוספות כדוגמת: עקיבה אלקטרואופטית, עיבוד אות ועוד. דוגמה "רכה" יותר היא גרסת תוכנת שליטה ובקרה (שו"ב), המכילה מספר פרודורות, חלקן לצורך מימוש הלוגיקה והאלגוריתמיקה של המערכת וביצועיה, וחלקן לצורך ניצול החומרה עליה מתקנת תוכנת השו"ב, לרבות הסנסורים והמשאבים העומדים לרשותה (ניווט, זיכרון, תקשורת וכדומה).

רמת מורכבות אחת מעל, במקרה של מערכת-על אחת גדולה שמטרתה מימוש משימה משולבת, נקראת "System of Systems", והיא קשורה בדרך כלל למערכת המכילה מספר רב של מערכות. דוגמה ל"מערכת של מערכות" זוהי, למשל, פלטפורמת לחימה (כמו טנק או נגמ"ש), הכוללת מערכות נשק, הגנה, הנעה ושו"ב (שליטה ובקרה), כדוגמת אלו שתוארו לעיל, המקושרות ביניהן לצורך נצילות משאבים ויצירת פונקציות בין מערכתיות. גם מערך הגנה נגד רקטות או טילים או

מערכת כדוגמת צי"ד (צבא יבשה דיגיטלי), מתאימים להגדרה זו, כיוון שהם מכילים מערכות רבות המקושרות ביניהן ומשפיעות זו על זו. איור 15 מתאר את רמות מורכבותן של מערכות לחימה באופן כללי, ואת הטנק כדוגמה ל"מערכת של מערכות".



איור 15: רמות מורכבות של מערכת אמל"ח, והטנק כדוגמה ל"מערכת של מערכות"

דוגמה נוספת הממחישה עוד התפתחות בתחום היא מערכת 'מענ"ק' (מערכת עזר לניהול קרב), שהיא מערכת שליטה ובקרה וניהול קרב בזמן אמת של מסגרת לוחמת (ברמת גדוד). הייחודיות היא בהגדרת קבוצה של כלים (טנקים ונגמ"שים) כ"מערכת", ולא פלטפורמה בודדת. באמצעות קישוריות גבוהה ומהירה בין הכלים מתאפשרים שליטה, התמצאות וניהול קרב בזמן אמת על ידי מפקד המסגרת, תוך כדי שימוש באמצעים הקיימים בכל הכלים גם יחד. תפיסה זו מדגימה באופן מוחשי את עליית המדרגה בתכנון של מערכות אמצעי לחימה עד כדי "מערכת של מערכות של מערכות" (System Of System Of Systems).

## תהליך הפיתוח של אמל"ח

תהליכי הפיתוח של אמל"ח מתחילים בחלק מהמקרים על בסיס דרישה או פער מבצעי, ובמקרים רבים אחרים פיתוח אמל"ח מגיע מתוך ניצול הזדמנות טכנולוגית הנותנת מענה לא שגרתית לפער מבצעי, מענה שאינו נמצא ב"ארגז הכלים" המסורתי. בדרך כלל מענים טכנולוגיים מעין אלה הם ייחודיים ומהווים במידה רבה פריצת דרך טכנו-מבצעית או מכפיל כוח ('Edge'). הדרך להנביט ולפתח יכולות ייחודיות מעין אלה היא באמצעות "חדשנות" Innovation ועידוד החשיבה היצירתית.

בשאלה, האם מפתחים את "מה שאפשר" או את "מה שצריך" לא נעמיק בשלב זה, אך ניתן לומר כי בכל אחד משני המקרים שתוארו, תהליך הפיתוח הפורמלי של אמל"ח דורש את הגדרת הצורך המבצעי או הפער המבצעי, שאותו אחראי להגדיר קצין האמל"ח בזרוע הרלוונטית. קצין זה הוא בדרך כלל בעל ניסיון וראייה מבצעית, שתפקידו לאפשר את מימוש האמל"ח כנגזר מתפיסת ההפעלה באופן האפקטיבי ביותר. אם הדרישה היא למערכת חדשה על בסיס טכנולוגיות זמינות מדובר בפרויקט פיתוח (FSD), ואם הדרישה היא למערכת המבוססת על טכנולוגיות ליבה שאינן זמינות או קיימות, מדובר בפרויקט מו"פ (מחקר ופיתוח), שמטרתו היא בראש וראשונה להבשיל את טכנולוגיית הליבה של האמל"ח לרמת בשלות שתאפשר פיתוח של מערכת הנשק. סוגי המחקר השונים (Research) הרלוונטיים הם: מחקר בסיסי – שאינו מתקיים במערכת הביטחון; מחקר תשתיתי (Science & Technology) שמטרתו פיתוח אבני בניין טכנולוגיות – אשר מתקיים במערכת הביטחון באמצעות מפא"ת/מט"ת; מחקר יישומי – המנוהל במחלקות השונות של מפא"ת.

אם מדובר במערכת הדורשת פיתוח בלבד, יכתב על ידי קצין הפרויקט (בדרך כלל מהנדס מאחת מיחידות הפיתוח שבאחת הזרועות או המנהלות) אפיון טכני ל-FSD, על בסיס הדרישה המבצעית אשר ישמש את הבסיס לפיתוח. הפיתוח יתבצע על ידי אחת מהתעשיות הביטחוניות שתיבחר לפיתוח המוצר או באופן עצמי, במקרה שמדובר ביחידה בעלת יכולת פיתוח עצמי (כדוגמת יפת"ח, רפ"ט ויחידות מודיעין מסוימות).

בחירת תעשייה ביטחונית לפיתוח אמל"ח היא תהליך המתבצע בדרך כלל לאחר בחינת חלופות ובחירת שיטת ההתקשרות (ספק יחיד במקרה וקיימת הצדקה ייחודית או מכרז). אם מפותחת מערכת בתעשייה, מופעל נוהל הפיתוח הצה"לי שאותו מוציא לפועל צוות הפרויקט. במקרה מורכב יותר מוקם ומנוהל הפרויקט באמצעות מטה פיתוח ובמקרים מסוימים ומורכבים אף יותר – באחת מהמנהלות הרלוונטיות.

כאשר מדובר במערכת הדורשת מו"פ, כלומר מבוססת על טכנולוגיה לא קיימת, או שלא הוכחה היתכנות השימוש בה, או שאינה זמינה בישראל, יהיה צורך להמתין לסיומו של תהליך המחקר שמטרתו פיתוח הטכנולוגיה, בדיקת היתכנות שלה, ובחינתו באמצעות מדגים טכנולוגי.

במקרים רבים ניתן להשתמש במוצר מדף (מרמת רכיב אלקטרוני ועד מוצר שלם) ולבצע בהם התאמה לדרישות המערכת כדי לחסוך זמני פיתוח והבשלה של רכיבים או של טכנולוגיות. במקרה זה יש להתייחס לדרישות הייחודיות ממערכת אמל"ח, בהשוואה לדרישות שלצורכיהן פותח הרכיב או מוצר המדף.



## דרישות ייחודיות ממערכת לחימה

הדרישות ממערכת אמל"ח צבאית הן ייחודיות במספר היבטים. מצד אחד דרישות אלה מאפשרות את תפקודה של המערכת בסביבה, באמינות ובזמינות המבצעיים, אך מצד שני הן מייקרות את המערכת. השימוש ברכיבים ובפריטי מדף במערכות צבאיות אינו חוסך את המאמץ הנדרש כדי להתאימו לדרישות ייחודיות אלה. להלן כמה דוגמאות הממחישות את המורכבות הנדרשת ממערכת צבאית בהשוואה למסחרית, כפי שאופיינו בישראל:

- תנאי סביבה – על תנאי הסביבה של מערכות המתפקדות בסביבה צה"לית לעמוד במשטר קפדני של עמידה בטמפרטורות גבוהות ונמוכות, הלמי דרך ורעידות המאפיינים את הפלטפורמה עליה המערכת מותקנת, חסינות ויכולת "חיים בצוותא" לצד מערכות אחרות (למשל בהיבט קרינה אלקטרומגנטית), תפעול אינטנסיבי, שרידות בתנאי קרב ודרישות רבות נוספות. בדרך כלל, מערכות אזרחיות אינן צריכות לעמוד בדרישות גבוהות כל כך, ולכן אם קיים מוצר או רכיב המתאים לדרישות, תתבצע פעילות הנדסית לשילובו, כך שתתאפשר עמידתו בדרישות תנאי הסביבה הצבאיות.
- בטיחות – מכיוון שחלק ממערכות אמל"ח הן בעלות יכולת פגיעה בנפש ו/או סיכון המפעיל, דרישות הבטיחות במקרה של תנועה, ירי והחלטה אוטונומית הן מחמירות. בדרך כלל, נדרשת רמת בטיחות כזו ברמה שרק עם סיכוי של אחד למיליון יתרחש אירוע בטיחותי. על כן, מערכת צבאית כוללת בדרך כלל חיישני התרעה ובקרה נוספים המייקרים אותה אף הם. תהליך האישור של רמת הבטיחות של מערכת צבאית הוא מורכב וארוך יותר מתהליך אזרחי (מכון תקנים) וכולל ניסויי בטיחות רבים, במקרה שצריך.
- יתירות ושרידות – כדי שהמערכת הצבאית לא תאכזב בזמן אמת, כלומר בשעת קרב או ב"זמן יקר", יש למערכת צבאית דרישות שרידות גבוהות המתבטאות ביתירות של אופני הפעלה ותפעול, יתירות משאבית, ניהול חכם של מצבי דגרדציה (ירידת ביצועים), גיבויים מחזוריים ועוד. בנוסף לכך, נדרשת המערכת לרמת שרידות פיזית גבוהה, כגון עמידות בירי / שיגור / פיצוצים ורסיסים / שחיקה אופיינית לסביבה מבצעית.
- חסינות וביטחון מידע – במטרה לא לחשוף אינפורמציה חיונית בשעת קרב או לאפשר פגיעה יזומה במערכת, באמצעות רכיב מסחרי היושב בה יש דרישה לחסינות גבוהה של אמצעי לחימה. ברכיבי מדף מסחריים ישנה סכנה של שימוש ברכיב המאפשר "back-door" לתוך המערכת – יכולת המאפשרת לאויב את האפשרויות שתוארו לעיל. על כן, למשל, במערכות תקשורת צבאיות ישנה דרישה קריטית להצפנה וחסינות (בן-ישראל 2006: 117). על מנת להקטין סיכון זה בצמתים קריטיים במערכת ניתן להשתמש ב"משטר ספקים" המתיר שימוש רק ברכיבים המיוצרים על ידי יצרן אמין ומאושר. שיטות אחרות, כדוגמת ייצור עצמי או הגנה על רכיבים מסחריים מפני סכנות אלו מייקרות את הרכיבים ואת עלות הפיתוח.

- אמינות ואיכות – מאחר שמערכות אמל"ח הן מערכות מורכבות ויקרות, הנדרשות להיות זמינות בכל רגע נתון ומופעלות בהיקף נרחב עם מערכות מסחריות, מוגדרות להן דרישות אמינות ואיכות גבוהות, זאת הן על מנת להזיל את עלויות הקיום שלהן, והן כדי להגדיל את זמינותן.
- מועילות לאורך זמן ויכולת תמיכה טכנית – אחת מהדרישות הקשות ביותר ממערכת לחימה, בעיקר נוכח עלותה הגבוהה והצורך בהפעלתה על ידי לוחמים בסדיר ובהמשך במילואים, הוא משך החיים הנדרש. במערכות מורכבות ואסטרטגיות מגיעה הדרישה עד למשך של עשרות שנים, כולל תמיכה אחזקתית במערכות. ציפייה זו אינה קיימת ברוב המוצרים המסחריים, אשר משך חייהם הוא בדרך כלל שנים ספורות (ממכשיר חשמלי ביתי ועד רכב פרטי). יכולת תמיכה אחזקתית של מערכת מורכבת במציאות שבה רכיבים מתפתחים בקצב מעריכי וייצורן מופסק (רכיבים אלה מכונים רכיבי "אובסוליט"), היא אתגר טכנולוגי וכלכלי, הכולל מאמצי מעקב מתמשך אחר אלפי רכיבים ותכנון ורכש של מלאי רב-שנתי. אתגר נוסף וקשה עוד יותר בהקשר זה הוא הצורך במערכת חדשנית אשר תשמור לאורך שנים על יתרונה המבצעי בהשוואה למערכות אחרות שיפותחו (חלקם אף בדורות הטכנולוגיים הבאים).
- יכולת קישוריות תפעולית למערכות נוספות (Interoperability). הדרישה של הסוכנויות השונות, שניהלו את פעילות המו"פ הפדרלי בארצות הברית למשל, הייתה כי תוצרי המו"פ יתוכננו כך שיוכלו לעבוד במשולב עם מערכות אחרות ללא צורך בשינויים כלשהם. תפיסת "שילוב מערכות" זו מקורה בגמישות שרצו לשמור לעצמם הגורמים השונים שהזמינו מערכות לחימה, בכל הקשור להתאמתן למערכות הפעלה ושפות תכנות שונות ומגוונות, ללא מאמץ מיוחד מצד המשתמש בכל הקשור לממשקי המערכת. עקב מורכבות מערכות האמל"ח הפכה הפעלה משולבת (Interoperability) למושג איכותי ("הרשת היא המחשב") במיוחד במערכות משובצות מחשב העוסקות בטכנולוגיית המידע (חורב 2006: 85).
- נדרשת יכולת אימון אפקטיבית במקרים שבהם: מחיר המערכת יקר; תפעול המערכת יקר; תפעול המערכת מסוכן; תפעול המערכת לא אפשרי, אלא בזמן אמת; תפעול על ידי אנשים לא מיומנים; מילואים.

## דילמת הרכש למול הפיתוח העצמי

הדילמה של פיתוח עצמי (במערכת החדשנות הביטחונית) או רכש מוצר מדף מסחרי (COTS) והתאמתו מציבה שיקולים משמעותיים ביותר – משני הכיוונים. היתרונות שבשימוש במוצר (או פריט) מדף קיים הם מובהקים: עלות סדרתית נמוכה כתוצאה מעלויות פיתוח וייצור המחולקות בין הצרכנים; איכות הנובעת בעיקר משימוש רב עד המוני במוצר (לדוגמה כאשר מדובר ברכיבים אלקטרוניים) וההדירות הגבוהה, הנובעת מדרישות הייצור של כמויות גדולות יותר; עלויות הקמת קו ייצור; קיצור משך זמן הפיתוח והייצור, ועלותן בהתאם, וסיבות נוספות.

ברמת הפריט הבודד או הרכיב במערכת (כרטיס אלקטרוני, ספק כוח, מנוע חשמלי למערכת, גלגל לרכב ועוד) כדאיות השימוש במוצר מדף היא גבוהה יותר בהשוואה לתועלת הנובעת מפיתוח עצמי. לעומת זאת, כאשר מדובר בפריט/רכיב קריטי (מבוקה, כדוגמת פריטי dual-use שבפיקוח), או פריט שהסיכון הביטחוני/אבטחת המידע שבו הם גבוהים, או פריט שיש צורך לבצע לו התאמה לשימוש צבאי, מתחדדת הדילמה שבין פיתוח עצמי או רכש מתוך הרצון לשמור על עצמאות בייצור האמל"ח, הקטנת ההישענות על אחרים, והקטנת הסיכונים הביטחוניים/ אבטחת מידע הקיימים ברמת הפריט.

דוגמה לסיכון הביטחוני הטמון ברכיבים מסחריים ניתן לקחת דווקא מהתחום שבו רכיבים אלה הם הזמינים ביותר: המחשוב. בתחום זה, היצע הפריטים המסחריים ואיכותם מיתר כמעט לגמרי את המוטיבציה של גופים ביטחוניים לפתח מוצר בעצמם – בגין משך התהליך ועלותו, לעומת רכב מוצר מדף. היצע המחשבים בעולם גדל באופן מעריכי (מואץ, אקספוננציאלי), והם נמצאים בשימוש נרחב ברוב תהליכי החיים הפרטיים, אך גם בשגרה הביטחונית, לרבות טלפונים ניידים של מפקדים, מחשבים בחמ"לים, מעבדים בפלטפורמות לחימה ועוד. לכן, פוטנציאל הנזק שעלול להיגרם מ'הפעלה מרחוק' או 'חבלה מרחוק' באמצעות רכיבים אלה הוא עצום, כמעט באופן פרופורציונלי לזמינותם ואטרקטיביות השימוש בהם. סכנה זו מאפיינת את עולם הסייבר, והיא נקראת ה-'New Normal', כלומר: המציאות ה"נורמלית" החדשה (חלמיש 2017). לא בכדי, מייצר מדי שנה ממד הסייבר, שהינו ממד ללא חוקים ובלמים, התרחשויות זדוניות, החל ב"רושעה" וה"רוגלה" של תחילת הדרך, ועד ל"נזקה" של ימינו.

ברמת מערכת, או ברמת מערכת של מערכות עיקר השיקולים הנלקחים בחשבון בין פיתוח על ידי מערכת החדשנות הביטחונית (בצה"ל או בתעשייה) לרכש מוצר מדף והתאמתו, הם: התוצאה הסופית הצפויה השונה בין מוצר מסחרי שהוסב לעומת מוצר המפותח במיוחד למול צורך; משמעות התאמת המוצר, בהקשרים כלכליים, זמן הגעה לשוק ושיקולים טכניים (תנאי סביבה, בטיחות, שרידות וחסיונות); משך החיים הנדרש ממנה, כולל תמיכה טכנית ואחזקתית, רמת ויכולת השדרוג האפשריות; רמת החיבוריות הנדרשת; הסיכון הביטחוני שבשימוש במוצר המדף, ולבסוף: משמעות ההתמודדות מול החסמים השונים במערכת במקרה שניתן לרכוש מוצר מדף (נושא זה יורחב בפרק שישי בהמשך).

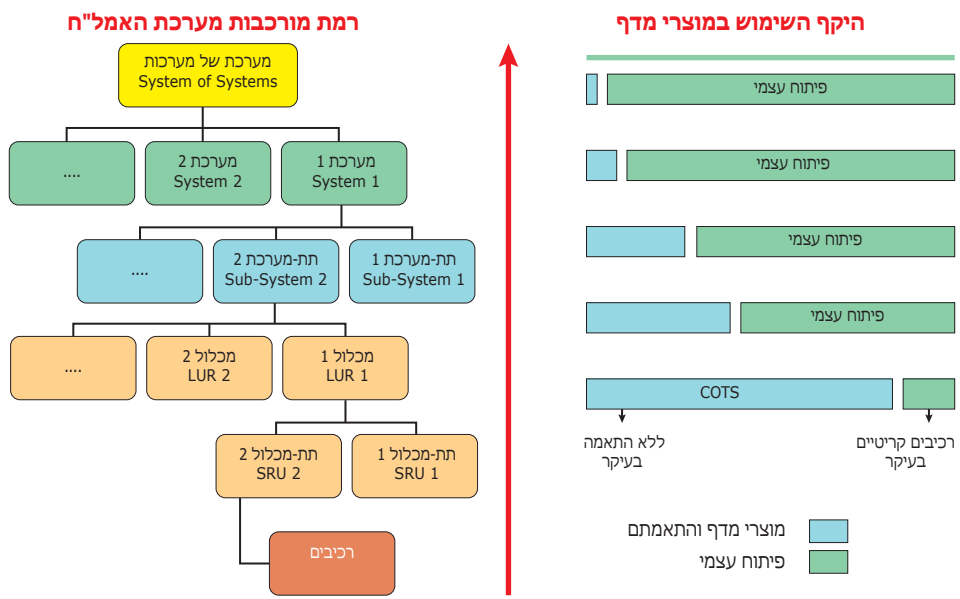
## סיכום

בפרק זה נסקרו מאפייניהם הטכנולוגיים של מערכות הלחימה הנפוצות בימינו, אשר עברו התפתחויות משמעותיות רבות מאז "רובה הקשת" שתואר בתחילת הפרק הראשון של העבודה, וכיום מתאפיינות במורכבות גבוהה מאוד. מורכבות זו היא תוצאה של היכולת הטכנולוגית לפתח, לתכנן ולייצר מערכות מורכבות, המשולבת עם הצורך הביטחוני להשגת אפקטיביות מרבית

באמצעות חדשנות ו"מהפכה בעניינים הצבאיים", עד כמה שניתן. עם זאת, ככל שהמערכות מתפתחות יותר ויותר בתהליך אבולוציוני 'בלתי הפיך' שאין חזרה ממנו, כך הן חשופות לתקלות רבות יותר, לאמינות נמוכה יותר ולסיכונים חיצוניים חדשים וגבוהים יותר.

בנוסף לכך, נסקר תהליך הפיתוח של מערכות לחימה הנהוג בישראל, התפקידים השונים מתהליך האפיון והדרישה המבצעית ועד לפיתוח, והדרישות הטכניות הייחודיות ממערכות צבאיות בכלל, ובישראל בפרט. דרישות אלה הן רלוונטיות כאשר נדרש להחליט בין פיתוח של אמצעי לחימה (או רכיב במערכת) על ידי מערכת החדשנות הביטחונית או רכש של מוצר או פריט מדף, והתאמתו לדרישות.

בדיאגרמה באיור 16 מתואר המתאם (קורלציה) הקיים כיום בין רמת המורכבות הטכנולוגית של מערכת אמל"ח לבין היקפי השימוש בטכנולוגיות ומוצרי מדף (COTS). לאור היתרונות של השימוש ברכיבים ומוצרי מדף, שאיפת המתכננים היא להגדיל את אחוזי השימוש בהם ככל הניתן. עם זאת, ככל שרמת מורכבות המערכת גדלה כך ישנם קשיים וחסמים גדולים יותר למימוש מגמה זו. במציאות המשתנה בעשרים השנים האחרונות חל גידול משמעותי באחוז והיקף השימוש ברכיבים, טכנולוגיות ומוצרי מדף במערכות לחימה, בדרך כלל, ברמות המורכבות הבסיסיות יותר במערכות. ברמות אלו של הרכיבים והמודולים, היקף השימוש במרכיבים מסחריים עבר "היפוך" מגמה מפיתוח עצמי על ידי מערכת החדשנות הביטחונית, לשימוש במוצרי מדף (COTS) והתאמתן לדרישות. תיאור היפוך מגמה זה במערכות לחימה השונות יובא בפרק הבא.



איור 16: תיאור המורכבות של מערכות אמל"ח והיקף השימוש ב-COTS

בד בבד עם הגדלת הנתח של פריטי מדף ורכיבים מסחריים, התפתחו שתי מגמות חדשות בתחום החדשנות הצבאית: האחת, מיקוד של פיתוח הידע והחדשנות בטכנולוגיות בסיסיות העונות להגדרה של 'רכיב קריטי', שלו יש שימוש צבאי בלבד, או שהוא ייחודי מבחינה אסטרטגית ומוגבל שימוש, תוך זניחת תחומים מסוימים שלהם יש תחליף מסחרי אמין. המגמה השנייה היא התפתחות תחום המערכות המורכבות, ובעקבותיו, מקצוע 'הנדסת מערכת' ופיתוח מערכות פתוחות וכן 'מערכות של מערכות'.

## פרק חמישי – ה'היסט' במערכת החדשנות המשולבת

פרק זה יוקדש לחקר השינויים שהתחוללו החל משנות התשעים ועד היום בהעברת הטכנולוגיות בין מערכות החדשנות הצבאיות (ה"ישנה"), לבין מערכת החדשנות האזרחית, בשני הכיוונים. בפרק יפורטו הטכנולוגיות ומשפחות המוצרים שמקורן ההיסטורי הוא צבאי/מדינתי, ומהם אף בוצעה העברת טכנולוגיות לשוק המסחרי בארץ ובחו"ל (Spin Off), אך במהלך תקופה זו נעשו לבני-שימוש גם לצרכים לא צבאיים, ועל כן התפתחו באמצעות גופים אזרחיים ומסחריים. התפתחותם בקצב מעריכי (מואץ, לא לינארי) הייתה גבוהה עד כדי כך, שבמהלכה (בזמן פיתוח הדורות המתקדמים יותר), שינתה מגמת העברת הטכנולוגיה כיוון, וכיום היא בת-שימוש כפול: כטכנולוגיה או כרכיב מסחרי גם במערכות צבאיות (Spin On). בפרק זה יתוארו מספר משפחות טכנולוגיות (שמקורן צבאי) ומועד הפיכתן למשפחות בשימוש כפול (צבאי ומסחרי).

טענה עיקרית בעבודה זו היא שהיקף הטכנולוגיות והרכיבים אשר עברו את התהליך שתואר גדל כל הזמן מסיבות שונות (אותם נתאר בפרק זה), וכי מדובר ב"עניין של זמן" עד לאזרוח ומסחור של מרבית המשפחות הטכנולוגיות שבתחילת הדרך הוגדרו כצבאיות (במימון מדינתי). בפרקים הקודמים תוארו מספר תהליכים גלובליים (ולוקאליים) אשר באופן טבעי מעודדים את המערכות לפעולה בכיוון זה: אחד מהם הוא תופעת ההתפתחות המואצת של השוק רווי-הטכנולוגיה המסחרי, בעקבות השקעות מואצות (בעולם בכלל ובישראל בפרט), השני הוא תופעת השתנות פני המלחמה (אויב לא סימטרי, טרוף וסביבת רשת), שמתבטאת בהתעניינות ביטחונית גדולה יותר במוצרים ובטכנולוגיות מסחריות. התהליך שלישי הוא התפתחות יכולות התכנון והפיתוח של מערכות מורכבות, והתובנה כי אפשר להגדיל יותר ויותר את המרחב המסחרי במערכות אלו וניצולן, הן לקיצור לוחות זמנים ועלויות, והן להגדלת יכולות המערכת וביצועיה.

בסוף הפרק יבואו תובנות בעניין קצב ומגמת השינוי (המואץ) במציאות המתהווה, ובנוגע לשינוי האפשרי ו/או הנדרש במערכת החדשנות הביטחונית (ה"סטטית" יותר). מתוך תובנות אלו ניתן יהיה לתכנן קווים לאסטרטגיית היסט ישראלית שמטרתה הגדלת היעילות (אפקטיביות) של מערכת החדשנות הביטחונית והקטנת "היסט" (שלילי) אליו המערכת עלולה להתפתח. הכלי לתכנון זה מתוך פרק 3 (מערכת החדשנות) הוא השינוי הפרדיגמטי הנדרש בתפיסת מערכת החדשנות הביטחונית הרלוונטית, ומעבר לניתוח תמונה כוללת, רחבה יותר. דוגמה לכך היא התהליך הדו-קוטבי, הכולל את מיקוד המחקר והפיתוח הבסיסיים של טכנולוגיות נבחרות, ופיתוח יכולות התאמה ואינטגרציה מתקדמות, הן של טכנולוגיות ומוצרים מסחריים, והן של מערכות מורכבות יותר, מנגד.

### תופעת היפוך המגמה בהעברת טכנולוגיות

"היפוך המגמה והאצה אזרחית" של חלק מהטכנולוגיות הצבאיות ה"קלאסיות" ניתנות להמחשה פשוטה ביותר באמצעות מספר דוגמאות אשר על כולן היה אפשר לשאול את השאלות הבאות

במהלך הדור האחרון: "מי היה מאמין שטכנולוגיה 'ABC' תפותח לצרכים מסחריים/פרטיים?", "ממתי התחילה ה'ברירה' וההתפתחות המואצת בטכנולוגיות אלו, ולמה?". לדוגמה, במקום 'ABC' ניתן לשאול: "מי היה מאמין (לפני עשרים שנה), כי כלי טיס בלתי מאוישים (כטב"מ ובהמשך הרפנים) יפותחו על ידי תעשיות מסחריות לשימושים פרטיים ושימושי 'תרבות הפנאי' ולא על ידי תעשיות בהשקעה ממשלתית?", או: "מי היה מאמין כי מערכות לראיית לילה יפותחו על ידי תעשיות פרטיות לצרכים מסחריים?", וכך הלאה בקשר לטכנולוגיות חלל, מכ"מ, ניווט מתקדם מונחה לוונינים, רובוטיקה, הצפנה טקטית, ראייה ממוחשבת וכיוצא בזה.

כיום זמינותן של רוב המשפחות הטכנולוגיות הללו למשתמש הפרטי, בין אם ברכב, בטלפון הנייד, בבית או בשירות ציבורי כלשהו ברורה מאליה, אך יש לזכור כי רובן המוחלט פותחו כחדשנות טכנולוגית, כמענה לצורך צבאי, באמצעות מערכת החדשנות הביטחונית ובהשקעה ממשלתית, בין אם מדובר ביישום ישראלי (כדוגמת העוקב האלקטרואופטי לטנקים) או בטכנולוגיה אמריקנית (המחשב הראשון, רשת האתרנט ועוד).

בין המשפחות הטכנולוגיות אשר עברו תהליך מסוג זה נמנים: מחשב, תקשורת ושו"ב; ניווט וחישה אינרציאלית; ראיית לילה (לא מקוררת) וראייה בתאורה נמוכה (ראיית לילה); עיבוד אות, עיבוד תמונה וראייה ממוחשבת; לייזרים (חלקי); הצפנת מידע (תוכנה); סלולר טקטי; מאמנים וסימולטורים (תוכנה); כלי תכנון באמצעות מחשב – תיב"מ (תוכנה); מכ"מ (חלקי) רובוטיקה (קרקעית ואווירית).

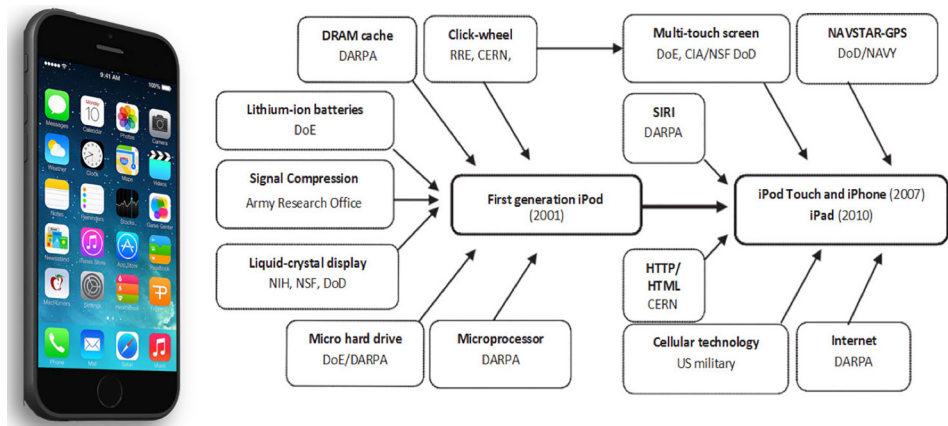
בשנת 2014 קבעה ועדת משרד ההגנה לענייני עסקים (Defense Business Board) שברוב התחומים החיוניים ליכולות הצבאיות הטכנולוגיה האזרחית מתקדמת יותר מזו הצבאית (Harrison 2014). אחת מהנחות היסוד של "אסטרטגיית ההיסט השלישית האמריקנית" היא כי כתוצאה מתהליכים דומים בארצות הברית, הופכת בשנים האחרונות הטכנולוגיה האזרחית למתקדמת יותר ויותר בהשוואה לטכנולוגיה הצבאית.

מן הפרט אל הכלל יובאו להלן מספר דוגמאות מתוך הספרות, ולאחר מכן טבלה מסכמת, של משפחות הטכנולוגיה אשר עברו תהליך "היפוך מגמה והאצה אזרחית", והן מרבית הטכנולוגיות בשימוש אמל"ח נכון להיום.

## דוגמה 1: טכנולוגיות הטלפון החכם – מצבאיות למסחריות

המכשיר הסלולרי החכם, שחדר בשנים האחרונות אל המרחב הפרטי של מאות מיליוני תושבים בעולם, הוא עתיר טכנולוגיות ממשפחות שונות ומגוונות כדוגמת: מיקרו-מעבדים, שבבי זיכרון, דיסק זיכרון במצב מוצק, צגי LCD וטכנולוגיית מסך המגע, סוללות מבוססות ליתיום, אלגוריתמי עיבוד מידע המאפשרים עיבוד תמונה וקול (ממשפחת פורייה), האינטרנט, ה-HTTP וה-HTML

(השפות והפרוטוקולים שמאפשרים את הגישה לרשת הגלובלית (www), הרשת הסלולרית, ה-GPS ואפילו SIRI – אלגוריתם העוזר האישי הממוחשב. הכלכלנית מריאנה מאזוקטו (Harford 2016), מיפתה את שתיים-עשרה הטכנולוגיות המובילות הללו (בן עזרא 2017, 27.2, ריאיון),<sup>14</sup> הנמצאות בכל מכשיר iPhone, ואת מקור הפיתוח שלהן אשר במפתיע בכל המקרים הוא לא אחר מאשר הממשל הפדרלי האמריקני (כולל במקרה של SIRI). כיום מפותחים כל הדורות הבאים של המשפחות הטכנולוגיות הללו על ידי תעשיות ההיי-טק בעולם, בעיקר בארצות הברית אך גם בישראל ובמדינות נוספות בעולם. קצב ההתפתחות של רוב הטכנולוגיות הללו הוא מואץ, בעיקר כדי "לכבוש" כמה שיותר יעדי משתמשים ברחבי העולם. הפיתוח הממשלתי לצרכים צבאיים של מרבית הטכנולוגיות הללו אינו אפקטיבי לעומת הפיתוח המסחרי שלהן, הן בכמות משאבי המו"פ והן במהירות הפיתוח. מנגד, הפוטנציאל למיצוי הטכנולוגיות הללו לצרכים צבאיים קיים, ואף מתמש באופן מסוים באמצעות המנגנונים הקיימים. דוגמאות לכך הן: סלולר צבאי, אלגוריתמיקה ומעבדים. איור 17 מתאר את מיפוי הטכנולוגיות בטלפון החכם, ומקורות המימון הפדרליים שלהם, כפי שנתחו על ידי מאזוקטו.



איור 17: המקורות הממשלתיים של טכנולוגיות ה-iPhone (Mazzucato 2013: 109, fig. 13)

## דוגמה 2: Information Technology – התפתחות מואצת (מעריכית)

טכנולוגיות הטלפון החכם, שמקורן במחקר ופיתוח לצרכים צבאיים, מכילות כמה משפחות טכנולוגיות בסיסיות, רובן מתחום המוכר יותר בשם: טכנולוגיות המידע (IT – Information)

<sup>14</sup> יש לציין כי בטלפון החכם קיימות עוד טכנולוגיות רבות שלא מופו במסגרת מחקר זה והם: מדידים שונים (לרבות מדי נטייה ומדי תאוצה, מדידים תלת ציריים, ברומטה, מד-תאורה, מדידי לחץ מדידי קיבול, מצפן, חיישנים ביומטריים של טביעת אצבע ו/או מיפוי רשתית העין), קישוריות אלחוטית במגוון תקנים (G4, WI-FI), BT, NFS ועוד), מצלמות איכותיות, מעבדים גרפיים (כמעט ברמה של מחשב שולחני ביתי).



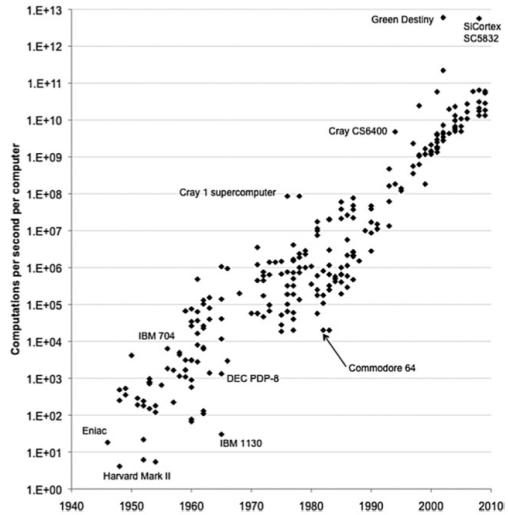
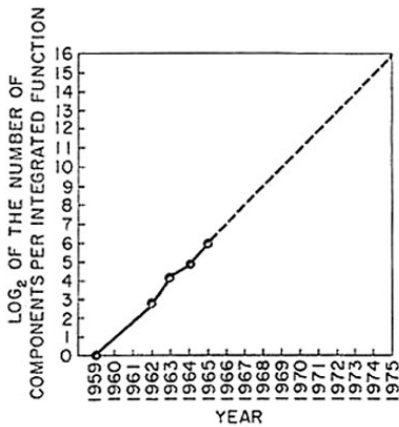
Technologies). בין טכנולוגיות בסיס אלה ניתן למצוא את המחשבים, המעבדים, הזיכרונות, התקשורת והמדיות השונות (אות, קול, תמונה וחזי). כאמור, עברו טכנולוגיות בסיס אלו תהליך של Spin Off ממערכת החדשנות הביטחונית למערכת החדשנות האזרחית. בסביבה המסחרית, ובעיקר מרגע שנמצא שימוש פרטי (ביתי בעיקר, או תעבורתי), נעשה פוטנציאל השוק ל"מושך העיקרי" של טכנולוגיות אלו. למול פוטנציאל זה הושקעו על ידי המערכת האזרחית מסחרית סכומים גבוהים בהרבה מאלו שהושקעו עד כה כדי "להנביט" טכנולוגיות אלו, כל זאת על מנת להביא לכל עסק (שנות השמונים), ולאחר מכן לכל בית (שנות התשעים) מכשיר סלולרי נייד (שנות האלפיים) או רכב (2010). הפוטנציאל העסקי העצום הגלום בשוק האזרחי לצריכה פרטית בתפוצה רחבה הוא המנוע העיקרי מאחורי פיתוח טכנולוגיות אלה (בן עזרא 2017, 27.2, ריאיון).

הרעיון המעניין הבא הוא ההתפתחות המעריכית של טכנולוגיות אלה. בגרפים המובאים בהמשך ניתן לראות את השינוי המואץ שבו אנו נמצאים זה שנים בתחומים הטכנולוגיים הללו, בין אם מדובר בקצב עיבוד המידע של המחשבים והמעבדים, גודל הזיכרונות וטכנולוגיות אגירת המידע השונות (מטכנולוגיות של דיסק קשיח מכני מסתובב או דיסקט, ועד לזיכרונות מצב מוצק סטטיים זעירים, כדוגמת אלו הנמצאים ב-Disk On Key), קצב העברת האינפורמציה בתקשורת השונות וטכנולוגיות התקשורת (מהמודם הטלפוני, דרך האתרנט ועד לסלולר האלחוטני) ולבסוף, המדיות השונות: מעבדי האות, הקול, התמונה והחזי אשר קצב העבודה והאינפורמציה עימם הם מסוגלים להתמודד צמח אף הוא באופן מעריכי. כפי שהוזכר בתחילת העבודה, על פי חוק מור לתכנון (משנת 1965), צפיפות הטרניזסטורים במעגלים משולבים מכפילה את עצמה מדי 18-24 חודשים. חוק זה נבחן מעשית במשך עשרות שנים והוכיח את נכונותו (איור 18). חוק נילסן לרוחב סרט (מדד למהירות תקשורת) קובע גם הוא גידול מעריכי בכמות תעבורת האינפורמציה באינטרנט בהיקף של 50% כל שנה. בנושא נפח זיכרון לא נוסח חוק מקביל ל"חוק מור", אולם בפועל גם תחום זה התפתח בקצב מעריכי גבוה אף יותר מחוק מור (איור 19) (בן עזרא 2017, 27.2, ריאיון).<sup>15</sup> בהתאמה, רוב הנחות היסוד באשר להתפתחות עולם התקשורת והמחשוב (תקשו"ב) מניחות עולם גידול מואץ, מעריכי.

שילוב של יכולת הגידול המעריכי של טכנולוגיות אלו בנוסף על השאיפה לתפוצה רחבה ("סלולר לכל אדם בעולם"), הביא לתופעה הנקראת מהפיכת ה-IT. על תופעה זו נכתב גם לפני עשור ושני עשורים, ובכל נקודת זמן נראה כי השינויים שאירעו עד כה הם הגדולים ביותר – ואכן כך הוא. תכונה זו אופיינית לאופי ההתפתחות המואץ המתקיים במשך דורות, ולנקודת ההתבוננות הנקודתית שבה בוחנים את ההתפתחות לאחור. דוגמה לתופעה דומה שאירעה כבר מלפני כ-120 שנים היא הדברים המיוחסים לצ'רלס הולנד דוול, שהיה שופט פדרלי והנציב הממונה על משרד הפטנטים האמריקני בשנת 1900, וסיכם מאה שנות חדשנות במשפט: "כל מה שניתן היה להיות

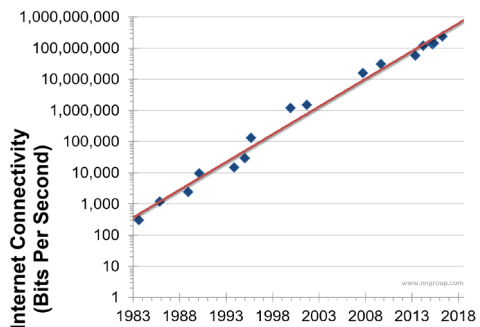
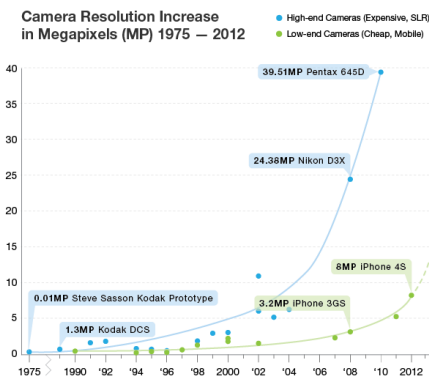
15 דיסקים מגנטיים ולאחר מכן SSD מכפילים את נפח האחסון שלהם בקצב של 3-6 חודשים, ובמונחים של 18-24 חודש מדובר בעלייה של סדר גודל (פי 10-20!) בנפח האחסון ליחידת נפח.

מומצא, הומצא כבר", בפועל יש לציין כי השופט הבין כי מגמת הגידול המואץ עוד עתידה להימשך  
 "In my opinion, all previous advances in the various lines of (הציטוט המקורי: invention will appear totally insignificant when compared with those which the present century will witness. I almost wish that I might live my life over again to see the  
 .(wonders which are at the threshold", In: *The Friend*, Vol. 76, 1902

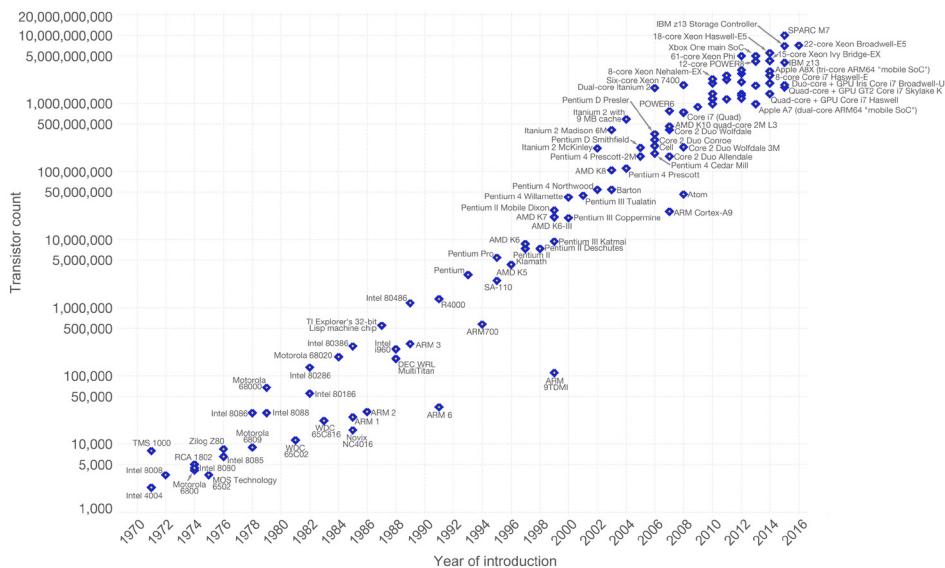


איור 18: חוק מור 1965, והדגמתו על כמות החישובים לשנייה למחשב, מקור: Max Roser, *Technological Progress*. Our world <https://ourworldindata.org/technological-progress>

Camera Resolution Increase in Megapixels (MP) 1975 – 2012



איור 19: חוק נילסן מודגם על מהירות האינטרנט על Bandwidth, April 1998 <https://www.nngroup.com/articles/law-of-bandwidth>  
 The More Pixels Law: Gigapixel Cameras and the 21st Century Reality Effect, [http://makemetics.com/drafts/more\\_pixels\\_law.html](http://makemetics.com/drafts/more_pixels_law.html)



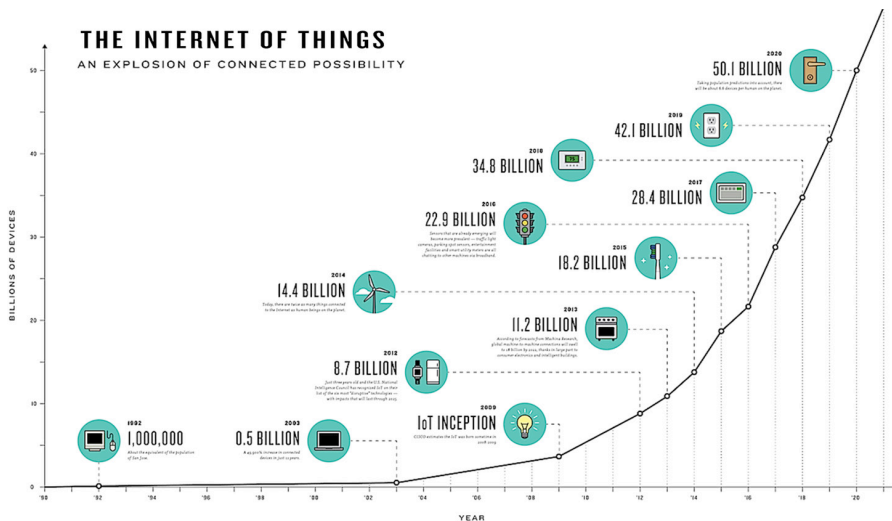
Data source: Wikipedia ([https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_count](https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count))  
The data visualization is available at OurWorldinData.org. There you find more visualizations and research on this topic.

Licensed under CC-BY-SA by the author Max Roser.

איור 20: חוק מור מודגם על כמות הטרנזיסטורים במעבדים 1970–2016, מתוך: Technological Progress, by Max Roser, Our world in data, <https://ourworldindata.org/technological-progress>

כאמור, הביאה מהפכה זו אף לשינוי של פני המלחמה (כפי שפורט בפרק הראשון), אך חשוב מכך לעבודה זו הוא הקשר שבין ההתפתחות המעריכית של הטכנולוגיה בשוק האזרחי/מסחרי לבין ההתאמה המהירה שאותה מבצעת מערכת החדשנות הביטחונית לעולם זה: בתגובה להאצת הפיתוח המסחרי בתחום זה החלו גופי המו"פ לבצע שימוש בתוצרים הטכנולוגיים ולהתאים אותם לצורכיהם, זאת כיוון שלא היה טעם עוד בפיתוח צבאי של מוצר כדוגמת תקשורת נתונים קווית, מחשב משימה טקטי, זיכרון ומעבד אות, לא בהיבט לוחות הזמנים וודאי שלא בהיבט הכלכלי. בהמשך נראה גם כי השימוש שבוצע היה בעיקר ברמת הרכיבים והיכולות הבסיסיות, ולא במוצרים או במערכות. הבעיות שעלולות להיווצר בעקבות מגמה זו הן שימוש חסר, או שימוש לא יעיל בהשוואה לפוטנציאל, לנוכח הגידול המהיר בהיצע, וכן חוסר שליטה והכוונה של היכולות המתפתחות לשימושים צבאיים.

מתוך ההתבוננות הרב-עשורית נראה כי שתי מערכות החדשנות לא רק שנמצאות ב"מהפכת השינוי הטכנולוגי המעריכי", אלא שאין אינדיקטורים לכך שהן על סף עצירה או האטה טכנולוגית. על כן מתבקש כי מערכת החדשנות הביטחונית תגדיר את עצמה מחדש, כפי שתואר בפרק השלישי, ותעדכן חלק מהתהליכים שנוצרו בעבר, בימים שבהם החל השינוי (מתוך: חלמיש 18.12.2016, 28.2.2017, 4.5.2017 ראינות; פינסלר 1.1.2017 ריאיון; אוסטר 8.1.2017, ריאיון).

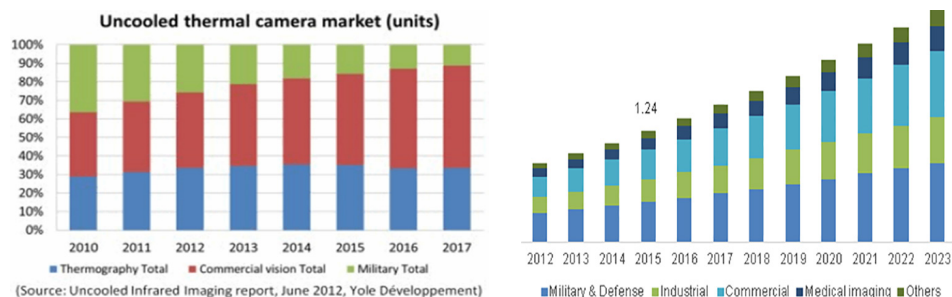


איור 21: גידול מעריכי בכמות פריטי הקצה המחוברים לרשת האינטרנט 2000–2020  
מתוך: Internet of Things: The complete IoT guide – benefits, risks, examples, trends, *i-scoop*, 6-2014, <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide>

### דוגמה 3: ראיית לילה – שני מקרים של הובלה: צבאית ומסחרית

המקרה המובא בדוגמה השלישית מורכב יותר, ובאפשרותו שוב להדגים כיצד טכנולוגיות מסוימות מ"משפחת טכנולוגיות" עוברות תהליך של היפוך טכנולוגי והאצה, כפי שתואר לעיל, אך טכנולוגיות אחרות, ממשיכות להתפתח בחסות מערכת החדשנות הביטחונית זאת לצרכים ביטחוניים. עולם החישה בתנאי תאורה נמוכה מכיל טכנולוגיות רבות, כדוגמת גלאים באורכי גל שונים, טכנולוגיות קירור מבוק, טכנולוגיות העברת קרינה אלקטרואופטית ועוד. בעוד שבעבר הובל גם תחום זה על ידי מערכת החדשנות הביטחונית בעולם (תעשיות ביטחוניות, מעבדות מחקר, וגופי מו"פ) במימון ממשלתי (בדרך כלל, כל מדינה ש"מכבדת את עצמאותה", לעצמה) הפכו חלק מהיכולות בתחום, ובעיקר אלו המאפשרות ראייה באמצעים לא מקוררים בחלק מספקטרום אורכי הגל (ולכן על פי רוב, זולים ופשוטים יותר) לבעלי שימוש מסחרי פרטי, כדוגמת: הנחתת מטוסים בערפל (לפני עשור), הנדסה אזרחית, זיהוי מקורות חום, ביטחון פנים ונהיגה אוטונומית (ראה גידול השימושים, באיורים 22, 23) *Infrared IR Camera Market Size By Application (Commercial, Industrial, Medical, Military & Defense), By Material (Sapphire, Silicon, Germanium, Zinc Selenide), Industry Analysis Report, Regional Outlook, Application Potential, Price Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2012–2023, Global Market Insights, 4/2016.* <https://www.gminsights.com/industry-analysis/IR-infrared-camera-market-report>. שימושים אלו הכפילו בעשור האחרון את כמות הצרכנים של המערכות, ובעתיד אף צפוי

שימוש פרטי בתפוצה רחבה של יכולת זו כחלק מיכולות הטלפון החכם, תרחיש שאם יתממש – יעצים עוד יותר את התפתחות המערכות מסוג זה ותפוצתן (ראה איור 24). (Infra-red imaging market: First smart phones and new low-cost cores widen commercial markets and pave the way for consumer application, Yole Développement, 2014. [http://www.yole.fr/iso\\_album/illustration\\_infraredimagingmarket\\_scenario\\_yoledeveloppement\\_july2014.jpg](http://www.yole.fr/iso_album/illustration_infraredimagingmarket_scenario_yoledeveloppement_july2014.jpg)).

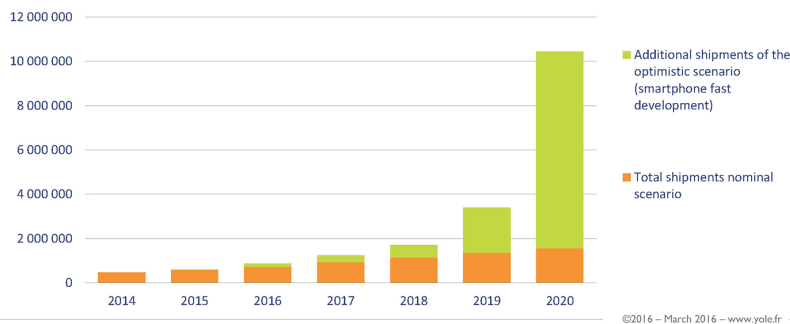


איור 23: שוק המצלמות התרמיות בצפון אמריקה בחלוקה לשווקים – עבר ותחזית [מיליארד דולר]

איור 22: שוק המצלמות הלא מקוררות בצפון אמריקה בחלוקה לשווקים [אחוז מהשוק]

### Global uncooled infrared camera business – In units

(Source: Uncooled Infrared Imaging Technology & Market Trends report, Yole Développement, June 2015)



איור 24: תחזית לגידול התפוצה של מצלמות לא מקוררות בעולם – עם כניסה לשוק הסלולר [יחידות]

כאמור, לצד השימוש המסחרי וההאצה של חלק מהטכנולוגיות הבסיסיות והמערכות בתחום זה, עדיין מתקיים (בעולם כולו) פיתוח בלעדי של טכנולוגיות לשימושים צבאיים של מערכות מקוררות. המניע למיקוד זה הוא שילוב של מספר גורמים: הצורך הצבאי הקיים, בחישה בתחומים ספקטראליים מסוימים, שאין להם (כרגע) שימוש מסחרי נפוץ; שימור העצמאות הלאומית בתחום; מורכבות טכנולוגית וידע, המאפשרים שימור היתרון היחסי.

## חקר התופעה – משפחות טכנולוגיות נוספות

על פי מתודולוגיה זו בוצע תחקור גניאולוגי של מספר משפחות טכנולוגיות על מנת להפיק תובנות מהתפתחותן, עד למציאת המכנה המשותף, המתאר את התהליך: "Spin Off", האצה טכנולוגית במערכת האזרחית, תהליך "היפוך" ו-"Spin On". התחקור בוצע באמצעות ראיונות של מומחים טכנולוגיים (CTO's) ברוב המקרים, מגופי משהב"ט, צה"ל והתעשייה הביטחונית) שלהם ניסיון רב-שנתי עם הטכנולוגיות המדוברות. ברוב המקרים, "סיפור התהליך" חוזר על עצמו בהבדלי תיזמון בלבד של "היפוך" העברת הטכנולוגיות או היקף ה"האצה" המסחרית, כך שיש הסכמה בין כלל המרווינים הרלוונטיים בתחום. בנוסף לכך, תופעת ה-Spin On מתבצעת בדרך כלל מרמת מערכת נמוכה לגבוהה, כלומר מרמת רכיבים וחלקים עד לרמת מוצרי מדף סגורים.

איור 25 להלן מתאר את שלבי התהליך, כפי שהוא חוזר על עצמו בכל אחת מהמשפחות הטכנולוגיות. מודגש, כי ההאצה הטכנולוגית במערכת החדשנות האזרחית והתפתחותה הן תנאי לכך שהמערכת הצבאית תפסיק לפתח בעצמה תחום זה ותבצע "Spin On" לצרכיה. תנאים נוספים נדרשים הם למשל, החלטת מערכת הביטחון הנובעת משיקולים רחבים יותר שתוארו בפרק הקודם (שיקולים טכנולוגיים אסטרטגיים, סוגיית ה"הישענות", ביצועים והתאמה לדרישות).



איור 25: תהליך המאפיין את העברת ההובלה הטכנולוגית

טבלה 4 להלן מראה את התופעה של מעבר משימוש צבאי לשימוש כפול (צבאי ומסחרי), על פי משפחות טכנולוגיות: בצבע ירוק, השימושים הצבאיים בשלב שבו מערכת החדשנות הביטחונית הובילה את החדשנות בתחום, ובצבע כחול השימושים המסחריים שנוספו לטכנולוגיה, המסמנים את תחילת התקופה שבה השימוש בטכנולוגיה הוא שימוש כפול. טבלה 5 להלן מראה פירוט של הניתוח של תופעת ה-Spin On של אחת מהמשפחות הטכנולוגיות מטבלה 4, לפי רמת השימוש הצבאי במוצר/טכנולוגיה המסחרית.

## סיבות אפשריות להיפוך המגמה וההאצה האזרחית

ישנם מספר גורמים (או תופעות, גלובליות או לוקליות ישראליות), חלקם תלויים זה בזה וחלקם בלתי תלויים, אשר עשויים להסביר את התופעה אשר תוארה בסעיף הקודם או חלקים מהתופעה: שינוי מגמה בהיקף ההשקעות הטכנולוגיות במחקר ופיתוח, בעולם בכלל ובישראל בפרט, מהשקעות לאומיות במערכת החדשנות הביטחונית להשקעות (לאומיות ופרטיות) במערכת החדשנות האזרחית – שינוי שעודד את מעבר כוח האדם הטכנולוגי ובעקבותיו את ההתפתחות

## טבלה 4: טבלת שימושי משפחות טכנולוגיות מצבאי לכפול

קבוצה טכנולוגית	שימושי שנות ה-80	שימושי שנות ה-90	שימושי שנות ה-2000	שימושי 2010	שימושי 2020
מצלמות יום רזולוציה גבוהה	חלל ואויר	תצפית ומודיעין	שידורי HD	מצלמות מקצועיות	סלולר
עיבוד תמונה	תצפית חלל, עקיבת מטרות	עוקב אחר מטרות טילי אויר	אוטומציה, עכבר למחשב	זיהוי פנים ולוחית רכב	היתוך רשתי מתקדם כלל המדיה
תקשורת אופטית	חלל ואויר	שימושיים אסטרגיים	תשתיות תקשורת בין יבשות	תשתית אישית	תקשורת מוח מכונה
מצלמות תרמיות	חלל ואויר	תצפיות מודיעין	נהיגה, שימושיים טקטיים	הנדסה אזרחית, טיסה, שרברבות	רכיב נהיגה אוטונומית
לוחיינות	שימושיים אסטרגיים	חקר חלל ותקשורת	תקשורת אזרחית	ניווט אזרחי	חקר חלל - מסחרי וממשלתי
ניווט אינרציאלי	חלל ואויר	בקרת אש	שימושיים טקטיים	נהיגה	סלולר, נהיגה אוטונומית, בקרת רחפנים
רובטיקה יבשתית	שימוש ביטחוני חבלה	שימוש ביטחוני (חבלה וחלל)	שימוש משטרתי (חבלה)	רובטיקה לתעשייה	רובטיקה לבית
רובטיקה ימית	מחקר ימי NOAA	מחקר ימי מיפוי צבאי	מיפוי צבאי ימי	רובטיקה לתעשיית נפט	רובטיקה לתעשיית נפט ומחקר
רובטיקה אווירית	משימות תצפית סימון ומודיעין	מודיעין ח"א ותחילת טילי שיוט	שימושיים חיל אויר טקטיים	שימושי צבא יבשה טקטי	רחפנים לחקלאות ושעשוע
מכ"מ	איתור מטוסים וספינות	בקרה ואחזת שטח		גילוי חודרים	נהיגה

## טבלה 5: Spin On – צילום יום HD

קבוצה טכנולוגית	שנות ה-80	שימושי שנות ה-90	שנות ה-2000	עד 2010	עד 2020
מוצרים	חלל ואויר	תצפית ומודיעין	שידורי HD		סלולר
רמת השימוש הצבאית במוצרים/טכנולוגיות מסחריות	מצלמה מוגמרת				
	לב מצלמת יום OEM				
	חיישן תצפית יום				

הטכנולוגית המואצת בעולם האזרחי; מגמות של גלובליזציה עולמית, שוק פתוח והפרטה, אשר מעודדות התייעלות והתמקדות מקצועית מחד גיסא, ושיתופי פעולה מאידך גיסא, על מנת להגדיל יעילות מחקרית, ותעשייתית - מגה מגמה עולמית שעשויה להסביר את ההתפתחות המואצת של התעשיות הטכנולוגיות בעולם; "משיכה" טכנולוגית חזקה של הצרכן הביתי הפרטי, (בעיקר בטכנולוגיות מזעור, מחשוב, תקשורת, צילום, תצוגה, עולם המשחקים, Gaming,

Virtual Reality (VR), ראייה ממוחשבת ועוד) והפוטנציאל הכלכלי העצום המשוך לשוק הפרטי הביתי/אישי; התפתחות טכנולוגית מעריכית, בזכות חוקי הפיסיקה שתוארו לעיל, ובזכות כלים מודרניים כדוגמת ארכיטקטורה פתוחה, "קונטיינרים" לשדרוגי חומרה מתקדמים, Open Source, Open Resources, כל אלה מהווים "מכפילי כוח" ביחס לתהליכי המחקר ופיתוח בעבר; ולבסוף, צורך ועניין ביטחוני בטכנולוגיות מהתחום האזרחי מסחרי.

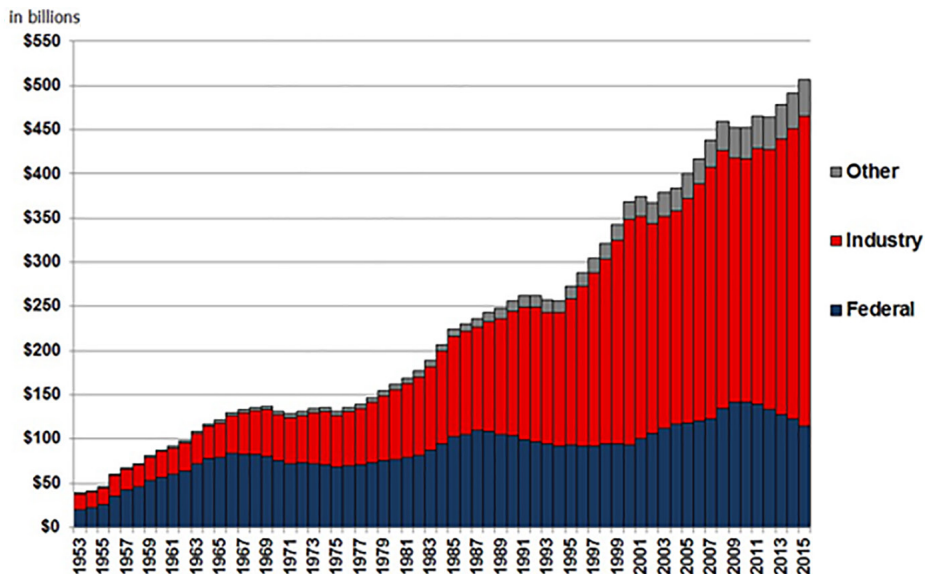
להלן מספר דוגמאות לחלק מהתהליכים והמגמות שתוארו לעיל, שטרם נדונו עד כה:

השקעות וכוח אדם טכנולוגי – היקף ההשקעה במערכת החדשנות הוא אחד הנתונים החשובים ביותר, מכיוון שבסופו של דבר, מערכות החדשנות ברוב המדינות, ובעיקר בישראל מתחרות על כוח אדם טכנולוגי, שהוא המשאב העיקרי החסר והכלי העיקרי בתחרות זו הוא השכר. כפי שתואר בפרק השני, צומצמו ההשקעות במערכת החדשנות הביטחונית בישראל באמצע שנות השמונים משמעותית בעקבות התערבות הממשלה והקטנת תקציב הביטחון. אלפי עובדים טכנולוגיים עזבו את התעשיות הביטחוניות ועברו לתעשיות עתירות הידע בישראל. עד שנות התשעים הוקמו כ-2,500 חברות הזנק, אך כבר אז נפער פער בין ההשקעות במערכת החדשנות הביטחונית לבין ההשקעות בשוק ההיי-טק, לזכות ההשקעות הפרטיות, אשר בשנות התשעים הגיעו לכ-4.8% מהתוצר. נכון לשנת 2016, ההשקעות בתעשיות עתירות הידע בישראל הן מהגבוהות בעולם, והן גבוהות בהרבה מההשקעות בשוק הביטחוני. ה-*turning point* (נקודת המפנה) בהשקעות בין השוק הצבאי לשוק המסחרי אירע כבר בשנות השמונים, והוא מהווה את אחת הסיבות העיקריות להתפתחות שוק זה בישראל. בנוסף לכך, יש לציין כי העלייה מרוסיה בשנות התשעים הביאה לגידול משמעותי בכוח אדם טכנולוגי, אשר סייע רבות בהפריית מערכת החדשנות הלאומית (הצבאית ובעיקר האזרחית).

בארצות הברית חלה נקודת הזינוק של ההשקעות הפדרליות והציבוריות במערכת החדשנות הפרטית עם סוף שנות השמונים לאחר נפילת הגוש המזרחי, כפי שניתן לראות באיורים 26-28.

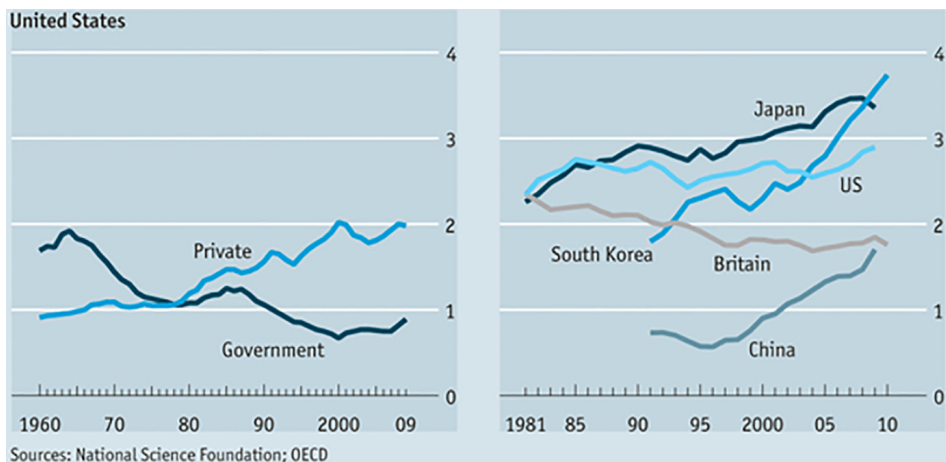
הגלובליזציה – מגמת הגלובליזציה בישראל החלה במחצית השנייה של שנות השמונים, באיחור מסוים בהשוואה לעולם. השוק הפתוח, הסכמי הסחר ושיתופי הפעולה שימשו מקור להשקעות גבוהות מחו"ל בשוק החדשנות בישראל. אלו פתחו לתעשיות טכנולוגיות רבות את האפשרות לשווק את תוצרתן בחו"ל (ביטחוניות ועתירות ידע) ולשתף פעולה עם תעשיות מקבילות בידע, במכונות ובתהליכי פיתוח וייצור. כאמור, מרבית ההשקעות בחדשנות בישראל מגיעות ממקורות חיצוניים, ורוב התוצרת של שוקי החדשנות (שוק ההיי-טק והתעשיות הביטחוניות) מוכונת כלפי חוץ. על כן מאפשרת הגלובליזציה בישראל את אחד מתנאי הקיום של מערכת החדשנות, הן בגין ההשקעות שהיא מזמנת, והן בגין המכירות בשוק העולמי.



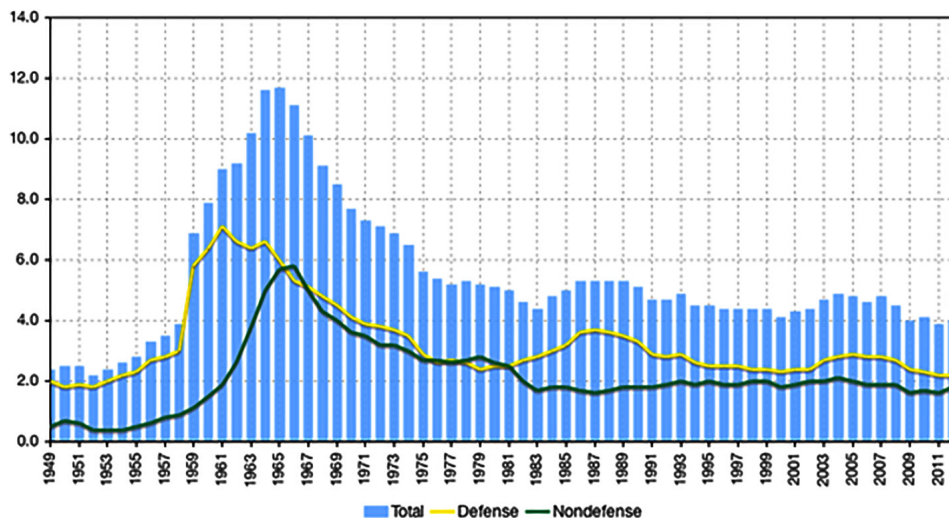


Source: Source: National Science Foundation, *National Patterns of R&D Resources* series. Constant-dollar conversions based on GDP deflators from *Budget of the U.S. Government FY 2017*. © 2016 AAAS

איוור 26: היקף השקעות מו"פ בחלוקה פרטית/ממשלתית בעולם, מתוך: Orla, O'Sullivan, How can the US regain its mojo on R&D? Asia Times, Jan 2017



איוור 27: היקף השקעות מו"פ בחלוקה פרטית/ממשלתית בארצות הברית, מתוך: Rich Couch, Corporate Investment: R&D, let's talk books and politics, Sep 2012

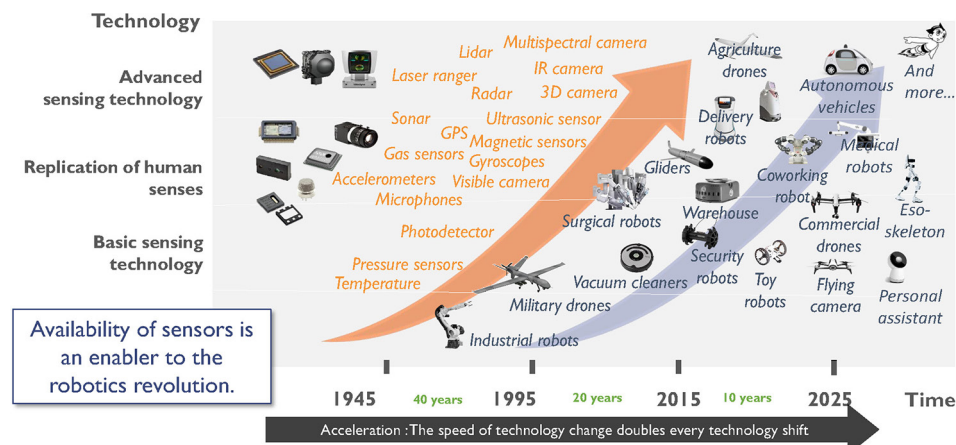


איור 28: פריסת ההשקעות הפדרליות בארצות הברית במחקר ופיתוח, מתוך: R&D Spending by the Federal Government, Department of Numbers, Jan 2012  
<http://www.deptofnumbers.com/blog/2012/01/rd-spending-by-federal-gov>

**כלים מודרניים למחקר ופיתוח** – בשנים האחרונות כתוצאה מהחיבוריות הגבוהה של כלל משתמשי הקצה והגלובליזציה (בהיבטי המחקר ופיתוח) התפתחו כלים מודרניים המאפשרים ומאיצים את המחקר הבסיסי הטכנולוגי בעולם, ולצידם כלים המאפשרים חיסכון זמן עצום בפעילויות ומאמצי פיתוח. שיתוף המידע בין גופי מחקר ופיתוח בעולם, וכן שיתופי פעולה ושיתופי מאמץ מסונכרנים, הביאו לחיסכון משמעותי בשנות מחקר ולאפשרות לתכנן מחקרים מדעיים מורכבים, המסונכרנים ביניהם בכמה מקומות בעולם, באמצעות שיתופי פעולה. בתחום ההנדסה והפיתוח נוספו כלים רבים והם: כלים אוטומטיים של הדמיה ותכנון המקצרים משמעותית את זמני הפיתוח והתכנון, כדוגמת: אנליזות ובדיקות אשר בעבר בוצעו בפועל במשך שבועות רבים; התפתחות של ספריות ידע ותכן "מן המדף" של מודולים מתחומים שונים; יכולת מהירה לבנות אבי טיפוס ומדגימים באמצעות הדפסה תלת ממדית; שפות מחשב מודולריות (NET. ובהמשך C-SHARP) וקוד פתוח, שאיפשרו פיתוח מבוזר של מערכות (תוכנה) באמצעות ריבוי מתכנתים (תכונה זו גם איפשרה "עקיפה" של מגבלת כוח האדם לפיתוח באמצעות הפעלת צוותי מתכנתים במדינות אחרות, למשל בהודו, וכן למצות את כוח האדם הטכנולוגי החסר); התפתחות של הנדסת מערכת מבוססת "ארכיטקטורה פתוחה" המאפשרת חיבוריות גבוהה של מערכות, בעיקר בגין קצב ההתפתחות המהיר שגרם לשינוי בתדירות גבוהה במעבדים ומחשבים; התפתחות תקנים וכלים לניהול ממשקים (תוכנה וחומרה) המאפשרים שדרוג חומרה במערכות ללא צורך בפיתוח תוכנה מחדש כל פעם ועוד דוגמאות רבות ומגוונות.

הצרכן הביתי הפרטי – כאמור, הפוטנציאל הכלכלי העצום המיוחס לשוק הפרטי ובעיקר האישי (בית/רכב) נהיה אחד המניעים הגדולים ביותר להשקעות בחברות ההזנק. הצריכה הפרטית מתמקדת בעיקר בטכנולוגיות ה-IT והסמארט-פון (שתיארנו קודם), ובנוסף לכך, טכנולוגיות המיוחסות לתחום ה-Gaming (הדמיה, תצוגה, מזעור, Virtual Reality – VR וחישה ממוחשבת) והרובוטיקה בים, באוויר וביבשה (אגירת אנרגייה קלת משקל, ראייה ממוחשבת, שחיה, ריחוף, תנועה בשטח, קבלת החלטות ועוד). בעתיד צפויות להתפתח טכנולוגיות רבות בתחום החלל. לכלל הטכנולוגיות הללו יש פוטנציאל עצום לשימושים צבאיים, החל משימושים טקטיים בממדים השונים (ים, אוויר, יבשה, חלל), דרך שימושים מגוונים בממד הסייבר: מבצעים מיוחדים, מודיעין, לחימה בטרור ותקש"ב. שימוש כפול זה של הטכנולוגיות המסחריות ביותר (אלו המיועדות להגיע לכל בית) הוא אחד הגורמים המשפיעים ביותר על מגמת ה-Spin On (רכש מוצרי מדף והתאמתם).

באיורים 29–31 נראה תיאור של הטכנולוגיות הבסיסיות הנדרשות לרחפנים (שפותחו בעבר לשימוש צבאי), והטכנולוגיות העתידיות (שבהן ייעשה שימוש במערכות צבאיות בעתיד והמפותחות נכון להיום במערכת המסחרית); תיאור של השימושים השונים, הצבאיים והמסחריים ברובוטים למיניהם, ופוטנציאל השוק על פי הקטגוריות השונות בעבר ובעתיד. איורים אלו ממחישים גם את תהליך ההיפוך (מטכנולוגיות צבאיות למסחריות, וחזרה לשימוש צבאי) וההאצה הטכנולוגית הפוטנציאלית לאור פוטנציאל השוק הפרטי.



(Source: Sensors for Drones and Robots: Market Opportunities and Technology Revolution report, Yole Développement, March 2016)

איור 29: טכנולוגיות החישה עבור רחפנים ורובוטים (דור הבסיס ודור העתיד),

מתוך: Sensors for Drones and Robots, Market Opportunities and Technology

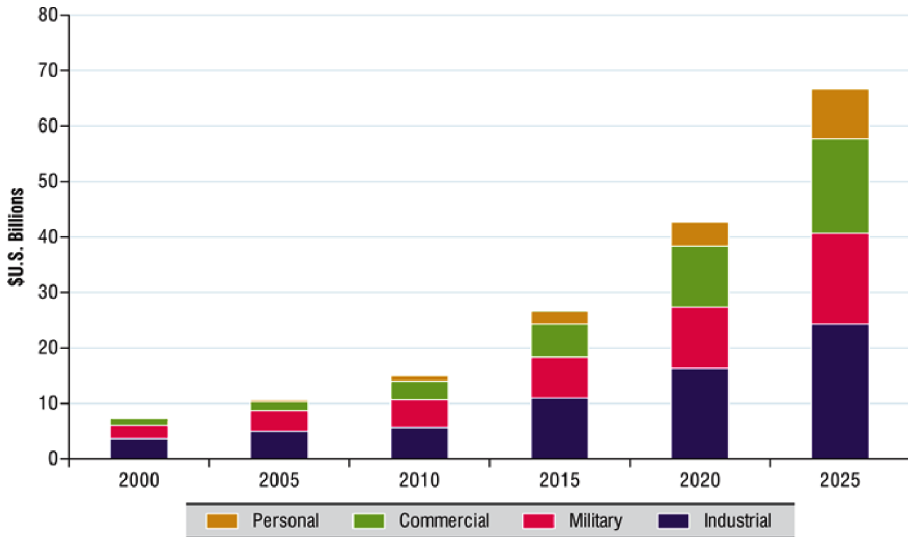
Revolution, 3/2016, Yole Développement

[http://www.yole.fr/iso\\_album/illus\\_drones\\_robots\\_roadmap\\_yole\\_march2016.jpg](http://www.yole.fr/iso_album/illus_drones_robots_roadmap_yole_march2016.jpg)

	Flying	Swimming	4+ Legged	2 Legged	4+ Wheeled	2 Wheeled	Arms	Head
Defense								
Industry								
Security								
Medical								
Transport								
Commercial								
Consumer								

(Source: Sensors for Drones and Robots: Market Opportunities and Technology Revolution, March 2016, Yole Développement)

איור 30: שוק הרובוטים והרפנים - חלוקה לשוקים - השימוש הצבאי אחד מיני רבים,  
 מתוך: Sensors for Drones and Robots, Market Opportunities and Technology Revolution, 3/2016, Yole Development [http://www.yole.fr/iso\\_album/illus\\_drones\\_robots\\_marketsegmentation\\_yole\\_march2016.jpg](http://www.yole.fr/iso_album/illus_drones_robots_marketsegmentation_yole_march2016.jpg)



איור 31: התפתחות שוק הרובוטים (עלות) - גידול מעריכי לאור שוק פרטי, מתוך: Robots and Automation, Bill Wanlund, Sage Business Researcher, 2/2015  
<http://businessresearcher.sagepub.com/sbr-1645-94777-2641309/20150209/robots-and-automation>

## סיכום

אחד מהאתגרים הגדולים ביותר בעיצוב אסטרטגי הוא הבנת המציאות, שמטרתה בין השאר היא לחזות את ההיסט (הלא רצוי) שבו עלולה להימצא המערכת אם תמשיך להתנהל ללא שינוי, ולגבש אסטרטגיה מתקנת, בהתאם. בעיתים של שינוי איטי, אתגר הבנת המציאות והסיכוי להיסט משמעותי הם נמוכים. בעידן של שינוי מואץ, לעומת זאת, האתגר גבוה הרבה יותר. על השינוי שבו אנו חיים נכתבו כתבים רבים, חלקם מגדירים את תחילת השינוי במהפכה התעשייתית, חלקם בתחילת המאה העשרים, חלקם בסוף מלחמת העולם השנייה וחלקם בנפילת הגוש הסובייטי. ההבנה כי אנו בעידן של שינוי מתמיד מאפשרת לגלות סבלנות (תרבותית) תמידית במערכות לתהליכי בחינה והתאמה מחדשים של עצמה – ומכאן חשיבותה של הבנת מציאות השינוי המואץ. בפרק זה נעשה ניסיון להבין ולתאר את המציאות המשתנה שבה נמצאת מערכת החדשנות הביטחונית, לרבות הגורמים והפרמטרים המשפיעים עליה, במטרה להבין כיצד לייצר קווים לאסטרטגיה מתאימה לישראל, בדומה לתהליך שבוצע על ידי האמריקנים בהיבטים הטכנולוגיים של 'אסטרטגיית ההיסט השלישית'. התובנה כי בכל זמן נתון בתקופה הנחקרת מתקיים שינוי מסדר שני (מואץ, מעריכי, אקספוננציאלי), במילים אחרות – שינוי בקצב השינוי (בדיוק כמו תאוצה ומהירות), יוצרת גם תחושת דחיפות וחוסר יציבות שאותה צריך לאזן.

אחת מהתובנות העיקריות מההתבוננות על תהליכי המחקר והפיתוח הצבאיים בשלושת העשורים האחרונים היא שמערכת החדשנות הביטחונית מבינה כי ניצול טכנולוגיות שהתפתחו בשוק המסחרי מהווה יתרון עצום למערכת החדשנות הביטחונית, ומבקשת להגדיל ככל הניתן נתח זה ו"לרכוב על הגל" (חלמיש 2017: 1–10). יותר מכך, ניתן לטעון כי למערכת החדשנות הביטחונית אין ברירה, אלא לנצל התפתחויות טכנולוגיות מסחריות אלה, מכמה סיבות: היקף השקעות מו"פ בעולם המסחרי, שהוא גבוה בסדר גודל מהשקעות המערכת הביטחונית-מדינית, מייצר חדשנות רלוונטית לעולם הביטחוני (חלמיש 2017); התקדמות פרוגרסיבית בטכנולוגיה ו"צימצום פערים" טכנולוגיים על ידי מדינות וארגוני אויב של ישראל אינם מתירים מצב של "במקום דרוך"; היווצרות ממד לחימה חדש, ממד הסייבר, מתוך סביבה טכנולוגיות מסחריות דורש את התערבות מערכת הביטחון לצורך הגנה על תשתיות לאומיות ועל הרשת הצה"לית (שער 2017).

עם זאת, נראה כי בשלב זה ניצול הטכנולוגיות הזמינות הוא 'ניצול חסר', הן מכיוון שמערכת החדשנות הביטחונית עדיין מתנהלת בהתאם לפרדיגמות המציאות הישנות באופן ניהול המו"פ הביטחוני, ואין בידה עדיין את כל הכלים כדי להתמודד עם "השינוי בקצב השינוי". כלומר, מערכת החדשנות הביטחונית מתמודדת עם מציאות השינוי המואץ בכלים ישנים לא מחוסר רצון, אלא מחוסר כלים מתאימים בשלב זה. בפרק הבא ינותחו החסמים והסיבות שבגינם נשארה מערכת החדשנות הביטחונית כמעט ללא שינוי בעשורים האחרונים, ויוצעו כלים להתמודד עם חסמים אלה כדי לאפשר גיבוש "אסטרטגיית היסט" מתאימה לישראל.

## פרק שישי – השפעת המציאות המשתנה על מערכת החדשנות

פרק זה יעסוק בשאלות המעשיות לגבי מימוש האפשרות לנצל את הטכנולוגיות המתפתחות בשוק האזרחי לטובת מערכת הביטחון. זאת, כאמור, על מנת לנצל את היתרון היחסי של מדינת ישראל לטובת הצרכים הביטחוניים המשתנים. לכאורה, אין נכון מלגייס בצורה היעילה ביותר את הצלחות השוק המסחרי, ולחדש את צה"ל ויתר גופי הביטחון האחרים, באמצעי לחימה מהשורה הראשונה בעולם. בהקשר זה נשאלות שאלות רבות כדוגמת: "למה זה לא קורה?", "למה מנצלת מערכת החדשנות הביטחונית רק חלק קטן מהחדשנות המתרחשת בעולם בכלל, ובישראל בפרט?", "מהם החסמים במערכת החדשנות הביטחונית, שמגבילים אותה מלעשות את מה שבהבנתה הוא נכון?". על מנת להמחיש יותר את הפוטנציאל האבוד שאינו מנוצל ניתן לשאול מספר שאלות נוספות כדוגמת: "למה אין לחייל סלולר צבאי? ואם יש כזה בפיתוח – האם כשיגיע, איך הוא ייראה בהשוואה לטלפונים שמחזיק החיל בזרועו האזרחית?", "למה אין רחפנים בשימוש מבצעי מלא ברמה הטקטית?", "מדוע ארגוני טרור ומורדים מעבר לגדר מפעילים בעילות מגוון מוצרים טכנולוגיים חדשים, וצה"ל עדיין לא?", "מדוע עולם המאמנים נראה עדיין מיושן בכמה דורות בהשוואה לעולם הגיימינג?", ועוד ניתן לשאול שאלות פתוחות רבות מסוג זה.

מדינת ישראל אינה לבדה במציאות זו. גם במשרד ההגנה האמריקני הבינו, במסגרת הניתוח האסטרטגי להיסט השלישית (שמואל 2016: 12), כי הצבא שיצליח לפתח טכנולוגיה מהר יותר, ובתוך כך לשלב בצורה טובה יותר טכנולוגיה אזרחית, יזכה בעדיפות וביזומה (Brimley 2014). מהות האסטרטגיה האמריקנית היא לנצל את יתרונה הטכנולוגי כדי להשאיר את יתר מדינות העולם ב"היסט" (כלומר, מאחור).

עם זאת, למרות האתגר המשותף, הפרקטיקה המתאימה במדינת ישראל שונה במהותה מהאמריקנית. זאת בזכות ההבדלים הקיימים בפועל בין מערכת החדשנות הלאומית (הביטחונית והאזרחית) בארץ לבין זו האמריקנית. ההבדלים העיקריים בהקשר זה הם: תרבות המחקר ופיתוח; היקף המשאבים הלאומיים לפיתוח טכנולוגיות בסיס; היקף התלות בשיתופי פעולה עם מדינות עולם אחרות; היכולת ההנדסית המהירה (בקנה מידה עולמי) ליישם טכנולוגיות חדשות באמצעי לחימה והיכולת לבחון אותם בשדה הקרב ולשפר אותן בזמן קצר (ראה השוואת המאפיינים המדינתיים של ישראל, ארצות הברית ורוסיה בפרק הראשון), ועוד רבות נוספות. אי לכך, צפוי כי בעת גיבוש אסטרטגיית היסט מתאימה לישראל בהקשר המחקר ופיתוח, יהיו בה שינויים הן בתהליכים, והן במיקוד הטכנולוגי.

במסגרת גיבוש הפרקטיקה הנכונה למיצוי הטכנולוגי הנדרש של טכנולוגיות מסחריות באמצעי לחימה, יתוארו בפרק זה חמישה חסמים עיקריים, שישנם במערכת החדשנות הביטחונית בישראל,

אשר מונעים את יכולת המיצוי של ההיצע הטכנולוגי בשוק האזרחי. חסמים אלה תורמים לתופעת ההיסט שבין המערכת הרצויה לבין המערכת המתהווה, ועלולים להביא להשאת מערכת החדשנות הביטחונית מאחור, ביחס למערכות המקבילות המובילות בעולם. במקביל לתיאור החסמים, יתואר בחלק מהמקרים מרחב הפתרונות הקיים להסרתם. החסמים העיקריים הם: חסם המוטיבציה העסקית; החסם ההתקשרותי; החסם המשפטי; החסם הפנימי במערכת החדשנות הביטחונית; החסם התהליכי – נוהל הפיתוח; ולבסוף – חסם ביטחון המידע.

## **חסם המוטיבציה העסקית-רגולטורית (במו"פ ובייצור והתאמה)**

על פי שר ההגנה קרט (Work 2016), נתקלת מערכת הביטחון האמריקנית בקשיים לעבוד עם התעשייה האזרחית, מכיוון שמשרד ההגנה אינו נחשב ללקוח פוטנציאלי של חברות טכנולוגיות העילית, והוא נחשב כ"לקוח קשה" ולא ידידותי. חברות אלה ממוקדות בלקוחות אחרים, באופקים אחרים, ואינן משתפות פעולה כלל עם משרד ההגנה. הטענה היא כי משרד ההגנה מתעקש לדבוק בתהליכים בירוקרטיים נוקשים וקבלת החלטות איטיות, שאינם מתאימים למערכת האזרחית (שמואל 2016: 21).

בישראל המצב אינו שונה: משרד הביטחון, הפועל גם כרגולטור וגם כלקוח, קובע את הכללים להתקשרות עם תעשיות. על מנת להפוך לספק של משרד הביטחון נדרש הקבלן לעבור תהליך רגולטורי ארוך ובירוקרטי, שבסיומו ניתן לבצע עימו התקשרות. השאלה הראשונה שנשאלת על ידי תעשייה עתירת ידע, המכוונת את עצמה לייצור (בדרך כלל המוני) של מוצרים טכנולוגיים, היא: "למה לי לעבוד עם משרד הביטחון?". על פי רוב, הדרישות הטכניות של הלקוח הן ייחודיות (ראה פרק רביעי) ודורשות זמני פיתוח והוכחת תכן ייחודיים (בדרך-כלל ארוכים, או נוספים), אשר בסופם כמויות הייצור הפוטנציאליות (ובעיקר בישראל) הן מזעריות. לעומתן, השוק הפוטנציאלי האזרחי אטרקטיבי הרבה יותר בכמויות הייצור, בתהליך וברווחים. מעטות התעשיות עתירות הידע הרואות רווח משמעותי בעבודה מול משרד הביטחון לעומת השוק האזרחי. בנוסף לכך, הצגת משרד הביטחון כלקוח של תעשיית הזנק, עלול לדחות משקיעים מחשש להגבלות ייצוא בעתיד, נחשב כ"מגדיל סיכון", ומקטין את הסיכוי להשקעות (שנרץ 2017, 30.4, ריאיון).

מכל הסיבות שפורטו טכנולוגיות ורכיבים מסחריים מוטמעים באמצעי לחימה בדרך כלל באמצעות קבלן ביצוע "מתווך", בדמות תעשייה ביטחונית קיימת שלה מנגנוני עבודה מול משרד הביטחון, ואפשרות וידע לבצע את ההתאמות הנדרשות.

מרחב האפשרויות להתמודדות עם סוגיה זו הן: חיזוק ומיסוד מנגנון ה"תעשייה המתוכנת" ו/או שינוי פרדיגמטי באופי הפרויקטים והדרישות. בהקשר למיסוד ה"תעשייה המתוכנת" היתרון בכך הוא בעיקר במקרים שבהם נדרשת התאמה ייחודיות לדרישות, כיוון שהיכולת והידע הקיימים בתעשייה הביטחונית לביצוע ההתאמה מתואמים עם המוטיבציה של התעשייה הביטחונית לבצע

התאמה זו, זאת בהשוואה ליצרן של מוצר מדף טכנולוגי שאין לו ידע ורצון (בדרך כלל) לעסוק בכך. החיסרון הוא בעלויות התיווך הגבוהות שעל מערכת הביטחון לשאת בהם במקרים מסוג זה; באשר לאפשרות השנייה, מדובר בשינוי (פרדיגמטי) באופי והיקף הדרישות הטכניות ה"מסורתיות" (ראה פרק רביעי) בעיקר במקרים שבהם מדובר במוצר מדף טכנולוגי זול שנדרש לבצע לו התאמה לדרישות המבצעיות. מכיוון שאורך חייהם של מוצרי מדף טכנולוגיים קצר, מחירים נמוך, תהליך אישורם קצר וזול יותר, ולכן מתאים להם מודל פרויקטלי שונה מרוב אמצעי הלחימה המאופיינים היום על ידי הצבא. בפרויקטים מבוססי מוצרי מדף, או עתירי מוצרי מדף, ייתכן שניתן להגיע לפתרון טכנולוגי מהיר וקצר חיים (בהשוואה לעשרות השנים שבדרך כלל מאפיינות דרישות מבצעיות), הכולל מענה מבצעי יחד עם מענה אחזקתי, והוא כלכלי בהיבט מחזור החיים (– Life Cycle Cost, LCC, הכולל עלויות פיתוח, ייצור וחלפים). דוגמה לכך היא שימוש ברחפנים מסחריים והתאמתם לצרכים שונים, תוך כדי בניית ממשק ההתאמה של הרחפן לדרישות, כך שיוכל "לדלג" לאחר מספר שנים לרחפן הבא שייבחר מן המדף לביצוע המשימה.

## החסם ההתקשורתי (מחקר ופיתוח)

מנגנוני ההתקשרות הסטנדרטיים בישראל הם מנגנונים שנבנו על ידי מערכת הביטחון, תוך כדי יישום לקחים רבי שנים מתוך התקשרויות עבר. כללי הרכש מבוססים על חוק חובת המכרזים ועל הסכמים רבי שנים בין התעשיות הגדולות למערכת הביטחון במקרים של פיתוח מצוינות ("מוקדות ידע" או "בית מערכת"). הדינמיקה המאפיינת את הכללים והחוקים בתחום זה נמוכה מאוד, ויש לכך יתרונות לצד חסרונות. על פי רוב, כאשר מדובר בפיתוח כמות המתחרים היא קטנה, דבר ההופך את התחרות לבעלת "חיכוך" גבוה בין התעשיות, ולעיתים יש לכך מחיה או כלכלי או חדשני. אפיון המערכת לפיתוח הוא מסמך מגביל מבחינת אופקים טכנולוגיים מתוך הצורך לאפשר מכרז שוויוני בין כולם. יוצא אפוא שמרחב הפתרונות והאפשרות לחדשנות מוגבל באופן מובהק. למערכת הביטחון אין מגוון כלים התקשורתיים המאפשרים לה לפנות לחברות החדשניות ביותר, מהתעשייה הביטחונית ומתעשיות ההיי-טק עתירות הסיכון, ואין לה מנגנון של "מכרז על מחקר ופיתוח". בנוסף לכך, אין מנגנוני התקשרות מודרניים, המאפשרים השקעה ללא תמורה במקרה של כישלון, טיפול בסיכון (אי-פיצוי על מחקר ופיתוח לא מוצלחים), טיפול בקניין רוחני ועוד. חסר נוסף מתוך עולם הרשת הוא הצורך ביצירת תחרות על אלגוריתמיקה של מיצוי מידע (Machine Learning, Big Data), על מנת להגיע לפתרון הטוב ביותר מתוך מגוון עצום של פתרונות (פינסלר ליאור. רמ"ח תקשו"ב במפא"ת/מו"פ, 1.1.2017).

גם במסגרת "אסטרטגיית ההיסט השלישי" האמריקנית, מוגדרת בעיה זו כחסם משמעותי לחדשנות, ועל כן מציע שר ההגנה קרטל להפעיל מיזמים שונים כדי לצמצם את הבעיה. דוגמאות לכך: הקמת יחידת חדשנות ניסיונית, פיתוח שיטת התקשרות חדשה בשם: "מכרז לפתרון מסחרי (Commercial Solutions Opening)", הקמת מרכז מצוינות וירטואלי ושיטות נוספות (שמואל 2016).



במערכת הביטחון בישראל לעומת הפער המתפתח בין היכולת לפתח פתרונות מהירים בשיטות הישנות לבין זמינות פתרונות המדף הרלוונטיים, נוסו בשנים האחרונות מספר מנגנונים הרכשתיים חדשים, בעיקר בתחומי המחקר ופיתוח (חלמיש 2017: 7). דוגמה לכך היא שיתוף הפעולה שבוצע בין מפא"ת לבין המדען הראשי להקמת מימ"ד, מנגנון המאפשר התקשרות עם חברות הזנק, וזאת בהשקעה משותפת לפיתוח טכנולוגי חדשני, על בסיס של השקעה ללא החזר, בעלות על הידע ליישומים צבאיים בלבד, והחזר השקעה במקרה שחברת ההזנק מגיעה ל"אקזיט". באופן זה הותנעו מעל 100 פרויקטים חדשניים בחמש השנים האחרונות, בהשקעה שנתיית לא גבוהה, אך משמעותית ביותר לחברות ההזנק, המקבלות מימון ממשלתי כפול הן ממשרד הביטחון והן ממשרד הכלכלה והמסחר. דוגמה נוספת היא שיתוף פעולה שבוצע בין המדען הראשי מפא"ת והתעשייה הביטחונית לפתח טכנולוגיית בסיס חדשה בתחום ההדמאה, שיש לה פוטנציאל שוק מסחרי לצד ביטחוני; עוד דוגמה היא מנגנון חממה טכנולוגי בחסות תעשייה ביטחונית, שהוקם במטרה להנביט טכנולוגיות רלוונטיות לשימוש כפול, תוך כדי סיכום של סוגיית הידע, התגמולים וחלוקת השוק במקרה של הצלחה (רוסו 2017.27.2, ריאיון).

הפתרונות המתבקשים לטיפול בחסם זה הם למעשה, פיתוח ומיסוד של מנגנוני התקשרות מודרניים, הסכמי שיתוף פעולה והשקעות מוגבלות (הון-סיכון) בטכנולוגיות רלוונטיות נבחרות, במטרה להעלות את פוטנציאל החברות המסחריות המשתתפות בפרויקטי החדשנות של צה"ל.

## החסם המשפטי – קניין רוחני

חסם נוסף המעכב חדשנות הוא בעיית הקניין הרוחני, הנוצרת בעת השקעה של גוף ממשלתי בחברת הזנק, שלה שאיפות גלובליות, ולא דווקא שאיפות הממוקדות בשוק הביטחוני. למערכת הביטחון כללים קשיחים לגבי הבעלות על הידע בכל הזמנת פיתוח היוצאת ללקוח, ולמעשה "דרישת המחדל" היא כי הידע יהיה בבעלות המשרד. לכן עלולה מערכת הביטחון להמשיך ולהחמיץ יכולת מיצוי של טכנולוגיות רבות בגין חוסר מוטיבציה של תעשיות חדשניות לסכן את הידע (ראה גם חסם מספר 1). מחד גיסא, מעוניינות החברות האזרחיות לשמור אצלן את זכויות היוצרים על הטכנולוגיות שאותן הן מפתחות, זאת כדי להגביל את היכולת של חברות אחרות להתחרות בהן, כדי לאפשר להן תמיכה בלעדית בטכנולוגיה בעתיד, כדי לאפשר להן הפצה אזרחית של הטכנולוגיה בשוק האזרחי הגלובלי, הגדול והרווחי הרבה יותר מהשוק הביטחוני, וכדי לשמור על יכולתן לבצע אקזיט בהמשך. מאידך גיסא, מעוניין משרד הביטחון לשמור את זכויות הייצור אצלו, הן כדי להזיל את התמיכה בטכנולוגיה, הן כדי לאפשר תחרות והן כדי להגביל את הייצוא של הטכנולוגיה לגורמים זרים.

מרחב הפתרונות לבעיה זו דורש ממערכת הביטחון פתיחות והתפשרות על חלק מדרישות הבעלות על הידע על מנת לאפשר לחברת ההזנק ליהנות מהשקעת מערכת הביטחון בטכנולוגיה, ולאפשר

לה להתפתח בכיוונים מסחריים בהמשך, ועם זאת, נדרש להגן על האינטרסים של מערכת הביטחון בכל האמור ביישומים צבאיים של הטכנולוגיה. כיוון מחשבה מסוג זה אף הוא נוסה לאחרונה במערכת הביטחון, אך טרם מוסד באופן שמאפשר את השימוש בו בצורה מלאה.

## החסם הפנימי במערכת החדשנות הביטחונית

השתנות של הגדרת מערכת החדשנות הביטחונית – מהמערכת הישנה המוכרת למערכת הכוללת את השחקנים האזרחיים – מהווה סיכון לתעשיות הביטחון הן בהיבט הכלכלי, הן בהיבט הידע המתפתח ואובדן של תחומי חדשנות והתמקצעות, והן בהיבט היקף הפעילויות וכוח האדם. באופן טבעי, כמות המשאבים שתושקע בפרויקט עתיר טכנולוגיית מדף מקטינה את היקף הפרויקטים ואת עלות היחידה, יחד עם הגדלת התחרות והגדלת הסיכון (אוקטובר 2017, 8.1, ריאיון). כפי שתואר בפרק שלוש, תעשיות הביטחון מייצאות לחו"ל כ-74% מתוצרתם, כל זאת, בזכות היותם ספק ישיר של צה"ל בפרט, ומערכת החדשנות הביטחונית בישראל בכלל. על כן, יש לזכור כי כל פעולה במערכת "אקולוגית" זו נדרשת להתבצע בשום שכל בכדי לשמור על נכס ייחודי זה. "שיבוש" שוק, שינוי המודל העסקי שלו ומערכת היחסים בין השחקנים נקראים Disruption (מתוך: <http://www.investopedia.com/terms/m/marketdisruption.asp>). היתרונות בכך הם יעילות כלכלית חדשה בדרך כלל, והחסרונות הם בעיקר לשחקנים הישנים במערכת, שנפגעו מהשחקנים החדשים. כיוון שהתעשייה הביטחונית היא הנפגעת העיקרית מכניסת גורמים מסחריים אזרחיים, התייחסותה הטבעית למגמה המתוארת היא כסיכון. כיוון שנכסים ביטחוניים רבים מושקעים במערכת זו יש לדאוג לשיווי משקל שיאפשר מיצוי ושמירה על נכסים אלה, לצד הצורך והרצון להתחדש.

התבוננות היסטורית על התעשייה הביטחונית בישראל מראה, שעם הזמן עברו עוד תחומים טכנולוגיים את מגמת ההיפוך, כך שהיקף העיסוק של התעשייה הביטחונית בהם הצטמצם. דוגמאות לכך הן: תחום הצגים (באלביט), מחלקות המחשוב בתעשיות הביטחוניות, תחום פיתוח מצלמות צבאיות, תחום פיתוח רכיבי ASIC, פיתוח מערכות הפעלה, ופיתוח ממשק משתמש ייעודי, פיתוח חומרות תקשורת מהירה וחומרות הקלטת וידאוד RTD (בן-עזרא 2017, 27.2, ריאיון). בד בבד ובעקבות תהליכים אלה, קרו בתעשיות הביטחוניות שתי מגמות קוטביות חיוביות אשר פיצו על הירידה ואף הביאו להגדלת החדשנות הצבאית: הראשונה, עיסוק בפיתוח של מערכות מורכבות (מערכת של מערכות – System of Systems), התמקצעות בתחום הנדסת מערכות ותכנון של "מערכת-על". השנייה, מיצוי טכנולוגיות מסחריות והתאמתן למערכות לחימה, תוך התמקדות טכנולוגית בתחומים הצבאיים בלבד. הבעיה העיקרית העומדת כיום בפני תעשיות אלה היא ההשתנות המהירה שעדיין מתקיימת, והסיכון שב"השתלטות" השוק המסחרי על תחומים, או רמות תוכן (ראה איור 13) נוספות. האתגר הגדול ביותר של תעשיות אלה הוא ההחלטה באיזה תחום חדשנות לבצע מיקוד והשקעה כדי להישאר משמעותיות בהמשך.

המעבדות הלאומיות ומוקדי הידע (המלמי"ב) – חשיבותם של גופי המעבדות הלאומיות ומוקדי הידע תוארה בהרחבה בפרק השני. עם זאת, כמו התעשייה הביטחונית, עוברים חלק ממוקדי הידע והמעבדות הלאומיות תהליך של שינוי בתחומי העיסוק עקב ההתפתחות המעריכית של טכנולוגיות מסחריות, שבחלקן עסק בעבר המלמי"ב. השינוי הנכפה על גופים אלה בעקבות השימוש בטכנולוגיות מסחריות אינו מתקבל בהכרח באור חיובי, וכופה על גופים אלה ועל הגופים המנחים אותם, בחינה מחדשת ורציפה של הנושאים שבהם יתמקדו.

## החסם התהליכי נוהלי

נוהל הפיתוח הצבאי מגדיר בעלי סמכויות שונים בתהליך הפיתוח. בין הסמכויות השונות קיימת חלוקת תוכן בין קציני התורה והאמל"ח, אשר כותבים את האפיון המבצעי ומתרגמים אותו לדרישה מבצעית, לבין הקצינים הטכניים, אשר כותבים את האפיון הטכני ומסמכי ההתקשרות לצורך פיתוח וייצור. חלוקה זו היא דיכוטומית, ומבוססת על האוכלוסיות השונות בגופים השונים: בגופי התורה והאמל"ח משרתים קצינים בעלי ניסיון מבצעי, ובגופי הפיתוח, מהנדסים. הדרישה מקציני האמל"ח והתורה היא כי יכירו את השטח, ויהיה להם ניסיון מבצעי, והדרישה מקציני הפיתוח היא כי תהיה להם הכשרה הנדסית פרויקטלית. בדרך כלל, אין מעבריות יתרה בין היחידות (למעט קצינים העונים על שני הקריטריונים), אך ישנה היכרות מעמיקה, ושותפות עמוקה בין הקצינים בצוות הפרויקט. למרות זאת נשאלת השאלה: "עד כמה יעילה חלוקה דיכוטומית זו בעידן שבו כמות ההזדמנויות הטכנולוגיות גבוהה מאוד, ואפיון מבצעי ודרישה מבצעית יכולים בהחלט להיוולד מהזדמנויות טכנולוגיות המגיעות לבשלות מספקת?". בשונה מהימים שבהם היה זמן ארוך מהופעת ההזדמנות (המדעית או הטכנולוגית, לצורך העניין), דרך הגותה של מכונת נשק חדשה ועד לתכנונה ובנייתה, בעידן הנוכחי היכולת להפיתע את האויב קשורה, על פי רוב, גם ביכולת המהירה ביותר לנצל את ההזדמנות הטכנולוגית הבאה בעקבותיה. החלוקה הדיכוטומית שבה קציני האפיון והדרישה המבצעית אינם בהכרח בקיאים בטכנולוגיה (מגמות של ביטול דירוג מחקר למשל לקציני אמל"ח), והקצינים הטכניים לעומתם, בקיאים בעיקר ביכולת ההנדסית "לתרגם" דרישות מבצעיות לאפיון טכני, לוקה ב"אובדן פוטנציאל" לאפיון מערכת טכנולוגית עתירת מוצרים או חלקים מסחריים. בכדי למצות פוטנציאל זה על המאפיין המבצעי להכיר את הטכנולוגיות החדשות בעולם, ולהגדיר את דרישותיו על בסיס ידע זה ולעומתו, על המתכנן ההנדסי להיות בקיא הן בטכנולוגיות המובילות בתחום המדובר, הן ב"הנדסת מערכת", והן ביכולת תכנונית, לאפיין מערכת שבה מוצרי מדף רבים.

באשר לקצין הפרויקט ההנדסי, קיימים מספר חסמים נוספים בהקשר לשימוש במוצרי מדף. העיקרי שבהם הוא חסם אטרקטיביות השירות: בדומה לתעשייה הביטחונית ולמלמי"ב, גם קצין הפרויקט רוצה לשמור על האתגר ההנדסי, ולהגדיל את נתח התכנון בשלב זה של הפרויקט. שימוש במוצר מדף בדרך כלל אינו נתפס כאטרקטיבי כמו פיתוח מאפס. גם העיסוק ב"הנדסת

מערכת" או ב"התאמת המוצר לדרישות" ביחס ל"תכנון הנדסי" ו"פיתוח", במקרים רבים, ובעיקר בקרב הקצינים הצעירים יותר, יהיו מושכים (הנדסית) פחות בעיני הקצינים הצעירים (בדרך כלל, נהוג להגיע לתחומי "הנדסת מערכת" לאחר צבירת ניסיון מעשי באחד מהתחומים הנדסיים הבסיסיים ולא מיד לאחר הלימודים בתפקיד הנדסי ראשון). ההתמודדות עם חסם זה אינה פשוטה, ודורשת טיפול נכון במוטיבציה לעיסוק במוצרי מדף.

דוגמה חיובית לאפשרות להתמודד עם חסם זה היא פרויקט נושא הגייסות המשוויין (נגמ"ש) הגלגלי החדש – "האיתן". כלי זה תוכנן על ידי מהנדסי המרכבה תוך מיצוי מקסימלי של מוצרי מדף. למרות זאת, המוטיבציה של הקצינים העוסקים בפרויקט זה הייתה אדירה, בזכות האפשרות שניתנה להם להשפיע באופן ישיר ובצורה מהירה על בניית הדגמים: בתוך 18 חודשים בלבד הועמד דגם נוסע על ידי מנהלת טנק המרכבה, תוך כדי שימוש נרחב בבחינת חלופות טכנולוגיות מכל העולם, מיצוי הידע הגלובלי הקיים ושיתופי פעולה טכנולוגיים. אגב, עלות הכלי צפויה להיות כמחצית מעלות כלים מקבילים בעולם בזכות השימוש הנרחב במוצרי מדף.

חסם נוסף הקשור בקצין הפרויקט ההנדסי הוא אופן הכתיבה של האפיון הטכני לפיתוח. אפיון זה נכתב על פי נוהל ברוך, שבו רשימת הדרישות הטכניות מהמוצר הכוללות דרישות של יכולות, ביצועים, תפעול, ממשקים (לעיתים) ותנאי סביבה. הסיבה לכך היא כי האפיון מיועד בדרך כלל לתעשייה ביטחונית כלשהי, שתפקידה לזקק את דרישות הביצועים (Performance Spec.) מהאפיון הטכני, להציע חלופות לעמידה במפרט, ולהציגן לאישור הגוף הטכני באמצעות סדרת סקרים טכניים. כל זאת החל מסקר דרישות מערכת (SRR-System Requirement Review) וסקר תכנון מערכת (SDR-System Design Review), דרך סדר תיכון ראשוני (PDR-Preliminary Design Review) ועד לסקר תיכון קריטי (CDR-Critical Design Review), שלאחריו מתקבל אישור לבנות את הדגם הראשון. תהליך זה, ככל שנעשה שימוש נרחב יותר בטכנולוגיות ומוצרי מדף (COTS) הוא ארוך, יקר ויעיל פחות. אחת מהסיבות לכך היא כי רוב ההחלטות המשמעותיות לגבי ארכיטקטורת המערכת נקבעות בזמן המשא ומתן עם החברה על הפרויקט והתמחור שלו, אז מתקבלות גם ההחלטות העקרוניות לגבי מוצרי המדף (חומרה ותוכנה) שיעשה בהן שימוש לצורך הפרויקט ואלה שיפוחו באופן עצמי. שלב הסקרים הוא שלב חשוב בתהליך אך יכולת ההשפעה על הפרויקט בשלב זה נמוכה בהרבה מאשר בשלב תיאום הציפיות לגבי היקף ה-COTS.

## חסם אבטחת המידע, משטר ספקים

כאמור בפרק ארבע, הזמינות הגבוהה של רכיבים מסחריים רלוונטיים מגדילה את האטרקטיביות שלהם לשימוש במערכות צבאיות, ובכך מאפשרת לחסוך פעילויות פיתוח של מוצרים קיימים ("להמציא שוב את הגלגל"). עם זאת, היצע זה עלול להיות, במקרים רבים, "מלכודת דבש", המאלצת את מערכת הביטחון להשתמש בפריטים מסחריים לא מבוקרים בתשתיות אשר במתקניה

(מזגנים, מחשבים, טלפוניה וכדומה), ואף באמצעי לחימה (יחידות תפעול, מחשבי משימה, מרכזיות תקשורת, חווי ועוד). הרצון להימנע מסיכון שביצירת "Back Door" מהווה חסם משמעותי אשר צפוי לגדול בעתיד במקרה שיתגלו כשלים במערכות קיימות מבוססות טכנולוגיות מסחריות, ומולידה מרחב אפשרויות הכולל: פיתוח עצמי על ידי מערכת הביטחון; משטר ספקים מצומצם של ספקים מאושרים ומבוקרים; תכנון ארכיטקטורה ייעודית המקשה את השליטה מבחוץ, או מקטינת נזקים.

## שיקולים אסטרטגיים נוספים: אמברגו, תלות

בנוסף לחסמים שתוארו ישנה גם מגמה הפוכה במישור האסטרטגי, המפעילה "כוחות נגד" מול מגמת הניצול המרבי של טכנולוגיות ומוצרי מדף. מגמה זו, שהוזכרה בפרקים הקודמים, נובעת משיקולי מדיניות של מערכת הביטחון בהקשר לטכנולוגיות מסוימות, בעיקר כאשר מדובר בטכנולוגיות מבוקרות (הדורשות הצהרת END USER/ END USE כמתואר בפרק שלוש); טכנולוגיות אסטרטגיות המפותחות בישראל במטרה לשמור על עצמאות (למרות שניתן בתקופה מסוימת לרכוש אותם בזול בחו"ל), או טכנולוגיות הנמצאות תחת משטר ספקים ובקרה. במקרים מסוג זה מערכת הביטחון היא שתכתוב את השימוש במוצר שאינו מוצר מדף, לעיתים גם בניגוד לעמדת הגוף הדורש, כיוון שתפקידה כקובעת מדיניות, הוא לא רק לאפשר הצטיידות במוצר מסוים כרגע, אלא לאפשר את היכולת של מדינת ישראל להתנהל באין מפריע, ולהמשיך לרכוש/לפתח/לייצר מוצרים טכנולוגיים מסוימים גם בעתיד.

דוגמה לתהליך מסוג זה היא מדיניות מערכת הביטחון לשמור על יכולתה האסטרטגית של מדינת ישראל לפתח ולייצר גלאים אלקטרואופטיים מתקדמים המאפשרים את יכולת התצפית בתאורה נמוכה ("ראיית לילה"). הגלאים לראיית לילה הם תחום המוגדר כטכנולוגיה דואלית מבוקרת (ראה טבלה 1 – קטגוריה 6). חברת SCD בבעלות משותפת של רפא"ל ואלביט מערכות מפתחת ומייצרת במימון משרד הביטחון משפחות של גלאי אינפרה אדום ודיודות לייזר. כבר לפני עשור דורגה SCD כספק השני בגודלו בעולם לגלאי אינפרה אדום צבאיים, וכספק מערכות גלאי אינפרה אדום מסוג אינדיום אנטימוניד (InSb) הגדול בעולם למערכות צבאיות. חברת רפא"ל נהנית מ-SCD הן באספקה מובטחת של גלאים מתקדמים לראשי בית של טילים ומערכות גילוי ותצפית אופטרוניים, והן מהרכיבים והמוצרים המפותחים על בסיס טכנולוגיה זו לשוק הביטחוני והאזרחי בעולם (תהליך של Spin Off באמצעות חברה נוספת, אופגל). ייתכן מצב (ואכן כך אירע בעבר במספר הקשרים) שבו גלאי מסוים, המיוצר על ידי חברה המתחרה ב-SCD, ניתן לשימוש במערכת צבאית כלשהי כ-COTS, אולי אף במחיר זול יותר. במקרה כזה, המדיניות במשרד הביטחון תהיה לנסות להגיע עם חברת SCD למצב שבו היא תייצר את הגלאים מתוך ראייה ארוכת טווח, המעצימה את החברה מול המתחרים בעולם, ומאפשרת שמירה על קווי הייצור האסטרטגיים שהוקמו בהשקעת משרד הביטחון ב-SCD, וניצול יעיל יותר שלהם. כך גם נשמרת ההישענות של מדינת ישראל על

עצמה בתחום טכנולוגי זה, ומתאפשר גם החזר השקעה (ברמה לאומית) באמצעות ייצוא ביטחוני משמעותי.

לסיכום, פרק זה עסק בתהליכים ובחסמים המעכבים את יכולתה של מערכת החדשנות הביטחונית לנצל את השוק המסחרי בצורה מיטבית עבור פיתוח מערכות ואמצעי לחימה. מטרתו היא לעורר חשיבה שתסייע בעיצוב של מנגנוני תיקון ושינויים תהליכיים, שיאפשרו התמודדות עם חסמים אלה בצורה המיטבית.

בנוסף על כך, עסק הפרק גם במנגנונים הפנימיים המכוונים, ה"מרסנים" את מערכת הביטחון מפני היחשפות לסיכונים שבהתמסרות לשוק המסחרי. וכן בשיקולים הנוספים שיש למערכת הביטחון בהקשר של שמירה על יכולות טכנולוגיות אסטרטגיות באמצעות מערכת החדשנות הביטחונית (מוקדי הידע, המעבדות הלאומיות, התשתיות והתעשיות הביטחוניות).

בפרק הבא יובאו קווים ראשוניים לגיבוש אסטרטגיית היסט טכנולוגית ישראלית עבור מערכת החדשנות הביטחונית, לצד חלופות להתמודדות עם החסמים שתוארו בפרק זה.

## סיכום

ויצק (WEIZAC – Weizmann Automatic Calculator) היה המחשב הראשון במדינת ישראל, אחד מהמחשבים האלקטרוניים הראשונים בעולם. המחשב, שנבנה במכון ויצמן, החל לפעול בשנת 1955, ובמשך שש שנים היה המחשב היחיד שפעל בישראל. היחידה האריתמטית שלו הכילה כ-2,000 שפופרות ריק (הטכנולוגיה הדיגיטלית הראשונה – טרם עידן הטרנזיסטור), והזיכרון הראשון שלו היה תוף מגנטי שנבנה בבית המלאכה של המכון. הזיכרון היה בן 1,024 מילים, שבכל אחת מהן 40 סיביות. על ויצק אמר איינשטיין: "מדינה כזו קטנה, מה היא תעשה עם מחשב כזה גדול?"

60 שנים לאחר מכן, נעשתה מדינת ישראל "ראש חץ" בקנה מידה עולמי בפיתוח חדשנות: החל במכוני המחקר הבסיסי, דוגמת מכון ויצמן, דרך ה"איינשטיינים" הרבים, המאיישים את מערכת החדשנות הלאומית, ועד לאתגרים הביטחוניים, המדיניים, הכלכליים והחברתיים המאפיינים ומאתגרים את ה"מדינה הקטנה" והייחודית הזו. אין לה לישראל ברירה אחרת, אלא להישאר בשיאה, כי המציאות משתנה כל הזמן, ומי ש'מתחפר' במקום, נמצא בסכנת 'עקיפה' על ידי גופים המנצלים את הגלובליזציה ואת הטכנולוגיה לצמצום פערים. לכן, חובתה של ישראל לייצר כלים שיאפשרו לה לשמור על יתרונה היחסי. חשיבות המערכת הטכנולוגית-חדשנית עבור הביטחון הלאומי בישראל היא לא רק ביכולת לפתח אמצעי לחימה ויתרון מבצעי, ולא רק בהיבטים הכלכליים והמדיניים של הפוטנציאל שהיא מאפשרת למדינת ישראל למצות. מערכת זו היא

הבסיס והיסוד שאיפשרו את התפתחות הגלובליזציה בעולם (זאבי [פרקש] 2006: 124) ואת מיצובה של ישראל בעולם זה.

במשך שנים חיפשו מדענים בעולם את ה"אתר", החומר הממלא את כל המרחב, אשר אריסטו הגדיר כ"ממד החמישי". איינשטיין ייחס לו חשיבות ביכולתו להיות תווך המקנה תכונות פסיקליות למרחב זמן. כתווך המקשר בין כל העצמים במרחב, שימש האתר השראה לשמה של טכנולוגיית רשתות המחשבים "אתרנט" (Ethernet) ומכאן שמה. מי ידע אז כי רשת זו, והטכנולוגיה והחדשנות שתפתח סביבה, תאפשר את התפתחות האינטרנט, וממנה לבסוף אכן ייוולד הממד החמישי, ממד הסייבר והאינפורמציה (IT), הצפוי לחבר, בעוד מספר שנים בלבד, את רוב התושבים והמוצרים בעולם. ממד זה מאפשר האצת תהליכים שארכו בעבר שנים ארוכות (החל במחקר ופיתוח והמשך בפוליטיקה, חברה וכלכלה), גורם לשינויים גלובליים, והופך להיות "מגרש המשחקים החדש" שבו משחקים גופים מדינתיים לצד גופים לא-מדינתיים (NGO's – Non Government Organizations). לישראל יש חלק משמעותי, ייחודיות ופוטנציאל עצום בממד זה בזכות היתרון היחסי שיש לה בטכנולוגיה וחדשנות. על כן, הוא מהווה עבודה אינטרס ממשי של ביטחון לאומי.

המרחב שבו עסקה עבודה זו הוא מרחב החדשנות הטכנולוגית בעולם בכלל, ובישראל בפרט. בתוך מרחב זה עסקה העבודה בהקשר הביטחוני, במערכת החדשנות הביטחונית ובפיתוח אמצעי לחימה (אמל"ח) לשימוש בחמשת המרחבים (Domains): אוויר, ים, יבשה, חלל וסייבה. המציאות החדשנית המשתנה, בעולם ובישראל, אינה תופעה שהחלה רק בעשורים האחרונים, אלא עוד בימים שבהם החלה הגלובליזציה (לאחר מלחמת העולם השנייה), ומקורותיה בימים שבהם החלה המהפכה התעשייתית. עם זאת, בשלושת העשורים האחרונים מתרחשת "העברת מקל" בהובלת החדשנות מיוזמות ביטחונית בהשקעות מדינה, ליוזמות מסחריות ואזרחיות בהשקעות פרטיות. התייחסות למרחב החדשנות המסחרי כחלק מהמרחב הביטחוני, מתוך הנחה כי השינוי המואץ הוא קבוע ("הכול זורם", כדברי הרקליטוס, אך הפעם – בקצב מואץ), והשינויים במאפייני המלחמה ופונקציית המטרה הביטחונית, דורשים חקר מחודש בשאלות רבות בתחום הביטחון הלאומי. אחת מהשאלות היא השאלה שבה בחרתי לעסוק בעבודה זו: מהי הגדרת נקודת האיזון המתאימה בפיתוח אמל"ח בישראל בין רכש טכנולוגיות ומוצרי מדף מסחריים (COTS) והתאמתם, לבין פיתוח עצמי? אך עם זאת, ישנן שאלות רבות נוספות וחשובות שניתן ורצוי לשאול, כדוגמת: "מהי הרתעה אמיתית, בימי המהפכה הרביעית?" (שנק 2017), "האם ניתן לוותר על מאזן האימה הגרעיני ולהחליפו במאזן אימה חדש, קיברנטי?", "האם ישראל יכולה להיות מעצמה גם בתחום זה, ולהחזיק ב'נשק יום הדין' הטכנולוגי?", "האם יש עדיין מקום להפריד בין משאבים ההולכים לביטחון, לבין אלה המיועדים לחדשנות טכנולוגית, בימים שבהם התועלת היא משותפת?".

העבודה התמקדה באמצעי לחימה (אמל"ח) המפותחים בישראל על בסיס טכנולוגיות עילית מסחריות, שיש להן שימוש כפול: ביטחוני ומסחרי. לשם כך, נסקרו ונותחו בפרקים הראשונים

הזיקות שבין מדע וטכנולוגיה לצבא וביטחון לאורך השנים, מאפייניה של מערכת החדשנות הביטחונית והאזרחית בישראל, ומאפיינים רלוונטיים של מערכות הלחימה – מבנה, דרישות, תהליכי פיתוח ועוד.

לאחר מכך, נבחנו השימושים לאורך השנים של משפחות טכנולוגיות שמימושן היום הן במוצרים מסחריים והן במוצרים ביטחוניים, במטרה למצוא "תבנית" המתארת את מודל העברת הטכנולוגיה והתפתחותם של מוצרים הנשענים עליה.

בהמשך נותחו המשמעויות וההשלכות של המציאות (הסביבה החדשנית בישראל בשילוב עם התבנית שנוצרה) על מערכת החדשנות הביטחונית בישראל, ההזדמנויות הנוצרות, והחסמים הקיימים למימושן.

## ממצאים

המערכת הדיאלקטית שבין מדע וטכנולוגיה לבין צבא וביטחון עברה שינויים רבים לאורך השנים. מתחילת המהפכה התעשייתית ועד היום מתרחשים שינויים טכנולוגיים, הרלוונטיים ליישום באמצעי לחימה. קצב החדשנות הטכנולוגית הצבאית, שהיה איטי בעבר, החל להתגבר באופן מואץ, עד שבמאה העשרים הביא לארבעה שינויים בפני המלחמה (בהמשך, נקראו שינויים מהפכניים אלה בשם: Revolution in Military Affairs, RMA וחיפוש המהפכה הבאה היה מפתח הכרחי להשגת יתרון). המהפכה הרביעית בפני המלחמה, מהפכת ה-IT, החלה עם התפתחותם של טכנולוגיות התקשורת, קשר ומחשבים (תקש"ב). מהפכה זו איפשרה את התפתחותן של מערכות הנשק המודרניות וה"מערכות של מערכות". בד בבד עם מהפכה זו אירעו שתי תופעות גלובליות רלוונטיות: האחת, העברת טכנולוגיות צבאיות לשימוש מסחרי אזרחי (Spin Off) והתפתחות מואצת של טכנולוגיות מסחריות אלו בשוק המסחרי; והשנייה, התעניינות גוברת של גופים ביטחוניים במוצרים מסחריים טכנולוגיים אלו בשל השינוי הפרדיגמטי בעולם המלחמה: מצבי המלחמה (שח"מ ומב"מ – תוספת השגרה והחירום, המלחמה שבין המלחמות ו"המלחמה ההיברידית"), אופיו של האויב (אויב מדינתי לצד אויב לא מדינתי, טרום-אויב א-סימטרי), ספקטרום הלחימה (קונבנציונלי, לא קונבנציונלי, עורף וקיברנטי/סביבת רשת), הגדרת הניצחון (מה"הכרעה" ל"ניצחון" ו"תודעה").

שילובן של תופעות אלו הביא להתעניינות גוברת של גופי החדשנות הביטחוניים במוצרים מסחריים (מלחמת ה-T&T – Technology & Terror), וכך גם החלה תופעה של העברת טכנולוגיות בכיוון הפוך (Spin On) לצרכים צבאיים: תחילה, ברמת רכיבים בסיסיים, ולאחרונה גם ברמת תת-מערכת ותת-הרכבות (מטרניסטור בעבר הרחוק, למחשב, דהיום). תופעה זו חוזרת על עצמה במגוון משפחות טכנולוגיות, רובן טכנולוגיות שפותחו ומומנו בעבר בעיקר על ידי גופים מדינתיים ממשלתיים, וכיום פיתוח מובל על ידי תעשיות מסחריות וגופים אזרחיים. במימון של המחקר והפיתוח בשלושים השנים האחרונות חלה "נקודת היפוך", בארץ ובעולם, ממימון מדינתי ביטחוני למימון מסחרי



ואזרחי. בישראל ישנו שוק היי-טק ייחודי, מהמובילים בעולם, אשר הפך בשנים האחרונות לעתיר משאבים (ממשלתיים ומסחריים) באופן משמעותי הרבה יותר (בסדר גודל) מהשוק הביטחוני, זאת בעקבות השקעות זרות (רובן מחו"ל). ייחודיות נוספת של ישראל היא היתרון שלה בהשוואה למעצמות אחרות בעולם ביכולת המהירה שלה להפוך טכנולוגיות למערכות לחימה, זאת בזכות "תרבות" מחקר ופיתוח ייחודית, ואפשרות לבחון בסביבה מבצעית אמצעי לחימה חדשים. על כן, השוק הביטחוני בישראל הגיב להתפתחויות במספר ערוצים: שימוש בטכנולוגיות מסחריות והתאמתן; התמקדות בטכנולוגיות בסיס מסוימות בעלות שימוש צבאי בלבד ופיתוחן, בעיקר ברמת הרכיבים ופריטים, תוך ויתור על פיתוח תחומים ש"התמסחרו"; התפתחות תחום "הנדסת מערכת" ופיתוח של מערכות מורכבות יותר, עד לרמת System of Systems ומעבר לכך. מערכת החדשנות הביטחונית בישראל היא נכס המאפשר לה שמירה על היכולת האסטרטגית בתחומים מסוימים, שמירה על עצמאות ויכולת הישענות עצמית, עוצמה בשיתופי פעולה מדיני, ונכסים כלכליים, כגון: ייצוא ביטחוני בהיקף גדול, מקומות עבודה רבים, בעיקר בפריפריה, פיתוח כוח אדם טכנולוגי ועוד. יש צורך ורצון לשמור על נכסים אלה תוך מיצוי ההזדמנויות הגלום בשוק החדשני המסחרי/אזרחי המתפתח (ראה איור 2).

## מסקנות

"היפוך המגמה" בכיוון העברת הטכנולוגיות מהימים שבהם המערכת הממשלתית ביטחונית הייתה אחראית על מרב החדשנות, הוא תהליך בעל מספר "שלבים" (ראה איור 25). תהליך ה"Spin On" הוא נרחב יותר וקודם יותר, ככל שמדובר ברמת יישום נמוכה יותר (פריטים ורכיבים, לעומת תת מערכת ומערכת) (ראה איור 16).

הגורמים לתופעה זו הם: היקף ההשקעות (גידול בהשקעות המסחריות פרטיות וממשלתיות, לצד הקטנה בהשקעות הביטחוניות); גלובליזציה, המאפשרת השקעות חיצוניות ומכירות בחו"ל לצד שיתופי פעולה, מחקר וידע – בעיקר בשוק המסחרי ובמקביל, מיצוי של כלים טכנולוגיים פתוחים ושיתופיים (קוד פתוח, שפות מודולריות, ממשקים, הנדסת מערכת וארכיטקטורה פתוחה) לצד כלים מחקריים והתפתחות המחקר הבסיסי; הצרכן הפרטי הביתי המגלם פוטנציאל שוק בכמות ובתפוצה; ההתפתחות המעריכית של טכנולוגיות התקשוב; עניין ביטחוני גובר במערכת המסחרית.

נכון להיום נמצאת מערכת הביטחון (בישראל ובארצות הברית) במיצוי חסר של חדשנות בשוק המסחרי המואץ. נקודת האיזון המתאימה בין פיתוח עצמי לבין הישענות על מוצרי מדף מסחריים משתנה עם הזמן, ו"מושכת" את המערכת הצבאית לכיוון המיצוי המסחרי, הן בשל השינויים באופי ובממדי הלחימה, והן בזכות ההיצע הטכנולוגי המתפתח באופן מואץ. מערכת החדשנות הביטחונית "נקראת" לנצל את החדשנות הקיימת בעולם המסחרי מכמה סיבות: הצורך "לקפוז

מדרגה" ביכולות; מניעת מצב של סטגנציה שתביא ל"צמצום פערים" טכנולוגיים על ידי האויב, בזכות הגלובליזציה, והרלוונטיות של טכנולוגיות מסחריות לשימוש זדוני; ניצול השקעות המחקר ופיתוח של המערכת האזרחית לטובת המערכת הביטחונית; התפתחות ממד הסייבר בעולם האזרחי והרלוונטיות שלו בעולם הביטחוני.

למרות הרצון במערכת החדשנות הביטחונית לנצל את יתרונות הטכנולוגיות המסחריות לצרכיה, קיימים מספר "חסמים" המעכבים או מונעים ממנה למצות פוטנציאל זה: חסם של מוטיבציה עסקית של תעשיות הזנק לעבוד עם המערכת הביטחונית; חסם התקשרותי הנובע מהמנגנונים הקיימים, שאינם מאפשרים התקשרויות מודרניות, כדוגמת השקעות עם סיכון גבוה, מכרז על מחקר ופיתוח ועוד; חסם משפטי בנוגע לסוגיית הבעלות על הידע; חסם פנימי במערכת החדשנות הביטחונית המתנגד ל"ערעור" השוק בגין הכנסת תעשייה מסחרית; חסם תהליכי – נוהל הפיתוח ותפקידי הקצינים, שנבנו בתקופה שבה פרדיגמת המחקר ופיתוח הייתה שונה.

בנוסף לכל אלה, ישנם למדינת ישראל עוד שיקולים המרסנים אותה מלהתמסר באופן 'אוטומטי' לטכנולוגיות המסחריות והם: השמירה על היכולת האסטרטגית שלה בתחומים טכנולוגיים מסוימים; התובנה, שיכולת בסיסית טכנולוגית מקנה למדינה עוצמה מדינית, יתרון יחסי וכרטיס כניסה לטכנולוגיות מקבילות בעולם; סיכונים למערכות לחימה ולתשתיות ביטחוניות באמצעות "Back Door" זדוני; רצון לשימור המערכת האקולוגית של החדשנות הביטחונית כ"נכס" המניב טכנולוגיות וכנקודת משען בשעות חירום ובידוד מדיני.

כדי לאפשר למערכת החדשנות הביטחונית להתמודד עם האתגרים של הדור הבא, בכל ממדי הלחימה, ולבצע את 'קפיצת המדרגה' שתשאיר אותה ביתרון יחסי, צריכה מערכת הביטחון לנצל את יתרונותיה של מדינת ישראל הן בעולם החדשנות הטכנולוגי (העולם המסחרי), והן במערכת החדשנות הביטחונית, לה יתרון מוכח בעולם, ביכולת למצות טכנולוגיות ולהפכן למערכת לחימה. על כן, נדרש לתכנן אסטרטגיית זינוק לעולם המחקר ופיתוח, שתתאים למציאות המתהווה, תתמודד עם החסמים שתוארו, תוך כדי מיצוי הפוטנציאל בישראל.

## המלצות – קווים ראשוניים

להלן קווים מנחים ראשוניים ל"מעשים" שיוכלו להיות חלק מאסטרטגיה עדכנית למחקר ופיתוח אמצעי לחימה בישראל:

שינוי פרדיגמה – כבסיס לבניית אסטרטגיה חדשה למערכת המחקר ופיתוח הביטחונית – מערכת החדשנות הרלוונטית לעניינים הצבאיים תהיה מערכת החדשנות האזרחית והצבאית גם יחד. שינוי הפרדיגמה כבר היום בלתי נמנע, וככל שעובר הזמן – צורך זה מתחזק. שינוי הפרדיגמה ישפיע הן

על אופי הפרויקטים, הן על תהליכי העבודה, הן על החשיבה של צוות הפרויקט והן על היעדים האסטרטגיים של מערכת הביטחון (ראה איור 14).

התמודדות עם שאלות הבסיס: "מה?" ("מה צריך לפתח, מכל המגוון הטכנולוגי, בכדי להשיג יתרון?" ולא "מה אפשר?"); "מי?" ("מי הם הגופים המעורבים בתהליך ומה צריך להתעדכן בחשיבתם"); "איך?" ("איך מנצלים בצורה הטובה ביותר את משאבי מערכת הביטחון ואת יתרונותיה היחסיים של מערכת החדשנות הביטחונית ושל מערכת החדשנות האזרחית בעולם הגלובלי, ובישראל בפרט?", ו"איך נזהרים מהסיכונים הטמונים במודל זה?").

### שאלת ה"מה?"

#### 1. מיקוד המו"פ

◇ השקעה ופיתוח בטכנולוגיות דואליות, מוגבלות הפצה, המפותחות בעולם. טכנולוגיות אלו הן זמינות לישראל בדרך כלל במקרים שבהם לישראל יש חלופה "מבית" (רוסו 2017, 27.2, ריאיון).

◇ מיצוי טכנולוגיות מסחריות במקרים שבהם קיים פוטנציאל.

◇ תמהיל השקעות מאוזן – השקעה בבדיקות ייתכנות ומדגימים טכנולוגיים, והקטנת מנגנוני "אבני הבניין" הטכנולוגיות (אוסטר 2017, 8.1, ריאיון).

◇ פיתוח טכנולוגיות התמגנות, מניעה, גילוי, זיהוי והתמודדות עם איומי ה-'Back-Door' בטכנולוגיות מסחריות, אשר פוטנציאל הנזק שלהן גדל ישירות עם ההתפתחות הטכנולוגיות בעולם המסחרי.

◇ השקעה ופיתוח של טכנולוגיות ליבה צבאיות (מחשבי-על, מיגון, חומרי נפץ ורבות אחרות) – במודל תלמי, בריענון תדיר ולא רק בתעשיות הגדולות (פינסלר 2017, 1.1, ריאיון).

#### 2. השקעה במערכת החדשנות הביטחונית במספר ערוצים:

◇ פיתוח ועידוד ערוצי שיתוף פעולה עם התעשיות הביטחוניות והמדען הראשי בטכנולוגיות ובמוצרים שלהם פוטנציאל שימוש כפול (דוגמת הגלאי).

◇ פיתוח ועידוד מיזמי הון-סיכון על ידי התעשייה הביטחונית – כדוגמת מודל החממה הטכנולוגית (אלביט) או מנגנונים של Open Innovation<sup>16</sup> (שנרץ 2017, 30.4, ריאיון).

◇ פיתוח היכולת של התעשייה הביטחונית להיות "מוקד הידע" להתאמת טכנולוגיות ומוצרים מסחריים לדרישות.

◇ פיתוח ועידוד השקעות מערכת הביטחון בתעשיות עתירות סיכון – כדוגמת מפא"ת במודל 'מימ"ד' (מיזמים והשקעות משותפים) וגופים נוספים במערכת הביטחון.

◇ פיתוח המצינות בתחום "הנדסת המערכת" המאפשר פיתוח "מערכות-על".

16 מנגנון Open Innovation – מנגנון שבו חברה גדולה (דוגמת התעשייה האווירית), פותחת את הדלת לחברות הזנק ומאפשרת להן שימוש במתקניה ובתשתיותיה לצורך מחקר ופיתוח, תוך סיכום מנגנון של ניצול הידע המתפתח לצורך מסחרי, על ידי תעשיית הזנק, ושימושים צבאיים, על ידי החברה המשקיעה.

- ◇ פיתוח יכולות מערכתיות, ארכיטקטורות מערכת ושיטות שיאפשרו ניטור וניטרול של פעילויות לא רצויות במערכת הלחימה. לדוגמה: מיקוד בפיתוח תוכנה, על בסיס חומרות מסחריות על מנת להקטין משמעותית את סיכויי ה-"back door" במערכת.
- ◇ השקעה מחושבת בטכנולוגיות ליבה (Core-Tech) שבהן יש לתעשייה הביטחונית יתרון יחסי.

### שאלת ה"מי?"

3. נוהל פיתוח אמל"ח
  - ◇ תוספת של מודל פיתוח מערכות לחימה "חדשניות", מבוססות טכנולוגיות ומוצרי מדף והתאמתם.
  - ◇ נוהל פיתוח אמל"ח מעודכן או נוסף (בדומה לנוהל 10/3), המאפשר אינטגרציית טכנולוגיות ופתרונות מדף מסחריים במערכות לחימה: כתיבת דרישות בחלוקה ל-Performance Spec, ולדרישות התאמה; קיצור תהליך האפיון והפיתוח (דמ"צ המכיל עקרונות למימוש מתוך רכיבים וטכנולוגיות מסחריים); קיצור מחזור החיים הנדרש ורידוד הדרישות הלוגיסטיות והמחיה, בהתאמה; החלטה על בדיקת ייתכנות לטכנולוגיה/מוצר מדף או על פיתוח טכנולוגיה; תחרות ובחירת קב"מ; התקשרויות מתאימות; דינמיקה של אינטגרציה, בדיקות ייתכנות ושד"ב לעומת דינמיקה של CDR/PDR); נהלי בחינה וניסויים נוספים.
4. צוות הפרויקט
  - ◇ קצין אמל"ח – פחות "קצין רכש" ויותר בעל יכולות לשילוב רעיוני בין צרכים מהעולם המבצעי לפתרונות, טכנולוגיות ומוצרי מדף מהעולם הטכנולוגי.
  - ◇ קצין פרויקט – חיזוק הנדסת המערכת והיכולות האינטגרטיביות – תוספת של ידע מתחום הנדסת מערכת (תואר שני) כדי לאפשר יכולת תכנון של מערכות מורכבות, ויכולת שילוב של טכנולוגיות בסיס עם טכנולוגיות דואליות. בעל יכולת לבודד את המרכיבים המסחריים הנדרשים ממוצר מסחרי כדי להתאימו לדרישות. בנוסף לכך, אימוץ מודל של קשר הדוק בין הקצין הטכני לבין המשתמש הסופי כדי לצמצם "מעגלי תיווך", ולחזק את הבחירה המתאימה ("מה צריך") מן המגוון.
  - ◇ קציני חדשנות טכנולוגיים – הקצאת כוח אדם לתפקידים של CTO's (קציני חדשנות טכנולוגיים – Chief Technology Officer) בזרועות ובגופי הפיתוח – במטרה ל"תווך" טכנולוגיות מן המגוון ולעודד חשיבה ממוקדת ביצירת יתרון מבצעי. חיזוק יכולות של בדיקות ייתכנות, היכרות עם המתרחש בעולם, ויכולת הגדרת מפת דרכים טכנולוגית.

### איך?

5. משרד הביטחון – פיתוח של מודלים מודרניים להתקשרות המאפשרים:
  - ◇ יותר יצרנים קטנים וחברות הזנק

- ◇ הכוונת יצרנים גדולים לפתרונות מדף – סיכון משותף
- ◇ השקעות מסוכנות
- ◇ מכרזים על התאמת מוצרי מדף נבחרים
- ◇ תחרות טכנולוגית (challenge)
- ◇ מכרז על מו"פ ממוקד
- ◇ מנגנוני השקעה והחזרת השקעה מותנית
- ◇ סוגיית הטיפול ב-IP – הפרדת IP ביטחוני מ-IP מסחרי

## המלצה למחקרי המשך – שעלו במהלך כתיבת העבודה ולא נענו

מהי נקודת העבודה הנכונה להשקעות מדינה במחקר ופיתוח? האם ירידת השקעות המדינה במו"פ להיקף נמוך בסדר גודל מההשקעות המסחריות היא סיכון ביטחוני, כלכלי ומדיני? האם מדובר ב"אובדן הגאים"? בהיבט הביטחוני – האם מצטמצמים הפערים הטכנולוגיים שהיו לגורמי האויב של מדינות המערב, וישראל בפרט? בהיבט הכלכלי גלובלי – על איזו נקודת "שיווי משקל" תתייצב ה"מערכת האקולוגית" החדשנית בישראל בעידן הבא? האם ישראל תצליח לשמור על היתרון היחסי שלה ללא השקעה מספקת במחקר בסיסי?

מונח ההרתעה ב"מהפכת המרחב החמישי" – האם ניתן לייצר את "נשק יום הדין" בעולם הסייבר, בזכות היכולת להגיע לכל מקום בזמן אמת, באמצעות הרשת? מהי מידת ההרתעה של ישראל לאחר אירוע הצנטריפוגות בנתנז? מהי מידת ההרתעה של רוסיה לקראת הבחירות בארצות הברית ולקראת הבחירות באירופה?

## תודות

פרופ' שאול חורב, אוניברסיטת חיפה – על הכוונה מועילה ומאתגרת.  
 סא"ל מיכאל בן-עזרא, ז"ח/חט"ל – על סיוע בניתוח טכנולוגיות ובחשיבה.  
 תא"ל חלמיש ניר, מפא"ת – על סיוע בחשיבה וליווי מועיל.  
 פארי מוטט, מפא"ת/CTO – על סיוע בחומרים ובחשיבה.  
 גב' אורנה קזמירסקי – על הסיוע באוריינות.  
 סא"ל נאוה גרוסמן – על הסיוע בחומרים לעבודה ובעריכה.  
 מיכאל (מיקי) לוריה, ר' החט"ל בזרוע היבשה – על סיוע בחשיבה.

## מקורות

- אבן, שמואל (2007). ועדת ברודט: צה"ל במשבר רב ממדי. מבט על, גיליון 22.
- אדמסקי, דימה (2012). *תרבות אסטרטגית וחדשנות צבאית*. תל אביב: מערכות.
- אדמסקי, דימה (2016). *אסטרטגיה*. הרצאה, צה"ל: המכללה לביטחון לאומי, 12.12.2016.
- בן-ישראל, יצחק (2006). מגמות בתקשוב הצבאי – תקשורת בין אדם למכונה. בתוך: חגי גולן ויצחק בן-ישראל (עורכים), *מהאדם בקרב עד החלל החיצון*, 113–122, תל אביב: מערכות.
- בן-ישראל, יצחק (2017). סייבר, הרצאה, צה"ל, המכללה לביטחון לאומי, 24.4.2017.
- ברודט, דוד (2016). *כלכלת ישראל*, הרצאה, צה"ל: המכללה לביטחון לאומי, 1.11.2016;
- ברודט, דוד (2017). *גלובליזציה*, הרצאה, צה"ל: המכללה לביטחון לאומי, 18.4.2017.
- ברודי, ברנרד וברודי, פאון (1966). *מרובה הקשת ועד פצצת המימן*. תל אביב: מערכות.
- בר-יוסף, אבריאל וארבל, דוד (2002). מימון מחקר ופיתוח ביטחוני באמצעות קרנות הון סיכון. *מערכות*, 385, 32–41.
- גורדון, שמואל (1997). *קשתו של פאריס*. תל אביב: הקיבוץ המאוחד.
- גלאי, דן ושחר, יוסי (1933). *העברת טכנולוגיות ואורח פרויקטים בתעשייה הביטחונית בישראל*. ירושלים: המכון הישראלי לדמוקרטיה.
- זאבי (פרקש), אהרון (2006). טכנולוגיות מודיעין – יצירת זמינות מידע ועדיפות במידע. בתוך: חגי גולן ויצחק בן-ישראל (עורכים), *מהאדם בקרב עד החלל החיצון*, תל אביב: מערכות.
- חורב, שאול (2006). *העברת טכנולוגיה וביצוע פעילות יישומים אזרחיים במעבדות הלאומיות ובמוקדי הידע*. חיבור לשם קבלת התואר "דוקטור לפילוסופיה", רמת גן: אוניברסיטת בר-אילן.
- חלמיש, ניר (2017). *לרכב על הגל – אתגרי המו"פ הביטחוני בתר"ש גדעון*. צה"ל: מפא"ת.
- חסון, אבי. *חדשנות*, הרצאה, צה"ל: המכללה לביטחון לאומי, 12.12.2016.
- חסה, יריב (2007). עקרונות למחקר ופיתוח בעידן הנוכחי. *מערכות*, 414, 58–62.
- מרדור, מוניה (1981). רפא"ל – בנתיבי המחקר והפיתוח לביטחון ישראל. תל אביב: משרד הביטחון.
- מתניה, אביתר (2003). מו"פ ביטחוני במימון הון סיכון – האומנם? *מערכות*, 388, 56–59.
- עברון, יוסף (1992). *מגן ורומח, סיפורה של התעשייה הביטחונית בישראל*. תל אביב: משרד הביטחון.
- פלד, אלון (2011). *טכנולוגיה וביטחון לאומי, מימוש או החמצה?* צה"ל: המכללה לביטחון לאומי.
- שמואל, שמואל (2016). *Third Offset Strategy*, המסע לאסטרטגיית ההיסט השלישית במערכת הביטחון האמריקנית 2016–2012. צה"ל: מרכז דדו.
- שנק, יוסי (2017). סייבר, הרצאה, צה"ל: המכללה לביטחון לאומי, 3.5.2017.
- שער, נועם (2017). *הגנת סייבר*, הרצאה, צה"ל: המכללה לביטחון לאומי, 9.5.2017.

Bozeman, Barry (2000). Technology Transfer and Public Policy: A Review of Research and Theory. *Research Policy*, 29, 627–655.

Bozeman, Barry, Rimes, Heather and Youtie, Jan (2015). The evolving state of the art in technology transfer research: Revisiting the contingent effectiveness model. *Research Policy*, 44, 34–49.

Brimley, Shawn (2012). Offset Strategies & Warfighting Regimes, *War on the Rocks*.

Couch Rich, *Corporate Investment: Research and Development*, let's talk books and politics, 9.

Getz, Daphne, and Segal, Vered. (2008). *The Israeli innovation system: An overview of national policy and cultural aspect*. The Samuel Neeman Institute.

Harford, Tim (2016). The iPhone at 10: How the smartphone became so smart, 50 Things That Made the Modern Economy. *BBC World Service*, 26 December, BBC NEWS.

Harrison, A. J. (2014). *Offset 3.0 or how I learned to stop worrying and Love commercial Technology*. War on the Rocks.

Mazzucato, Mariana (2013). *The Entrepreneurial State: debunking private vs. public sector myths*. Anthem Press.

Nielsen, Jakob (1998). Nielsen's Law of Internet Bandwidth, April 5.  
<https://www.nngroup.com/articles/law-of-bandwidth/>

O'Sullivan, Orla (2017). *How can the US regain its mojo on R&D?* Asia Times, 1.

Roser, Max, *Technological Progress*, Our world in data.  
<https://ourworldindata.org/technological-progress/>

Wanlund, Bill (2015). Robots and Automation, *Sage Business Researcher*, 2.  
<http://businessresearcher.sagepub.com/sbr-1645-94777-2641309/20150209/robots-and-automation>

Work, Robert (2016). *The third US Offset Strategy and its Implications for Partners and Allies*. Remarks by Secretary Carter in Media Availability at DIU Event in Boston, 26/7/2016.

-(2016). IR (Infrared) Camera Market Size By Application (Commercial, Industrial, Medical, Military & Defense), By Material (Sapphire, Silicon, Germanium, Zinc Selenide), Industry Analysis Report, Regional Outlook, Application Potential, Price Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2012–2023, *Global Market Insights*, 4/2016.  
<https://www.gminsights.com/industry-analysis/IR-infrared-camera-market-report>

-(2016). Sensors and robots will share a common destiny, *Yole Developpement*, 3/2016.  
[http://www.yole.fr/Drones\\_Robots\\_Roadmap.aspx#.WQ1slG5BzIU](http://www.yole.fr/Drones_Robots_Roadmap.aspx#.WQ1slG5BzIU)

-(2014). Internet of Things: the complete IoT guide – benefits, risks, examples, trends, *i-scoop*, 6-2014. <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide>

-(2014). The TRL Scale as a Research & Innovation Policy Tool, *EARTO Recommendations*, 30 apr 2014.

-(2014). Infra-red imaging market: first smartphones and new low-cost cores widen commercial markets and pave the way for consumer application, *Yole Developpement*.

[http://www.yole.fr/iso\\_album/illustration\\_infraredimagingmarket\\_scenario\\_yoledeveloppement\\_july2014.jpg](http://www.yole.fr/iso_album/illustration_infraredimagingmarket_scenario_yoledeveloppement_july2014.jpg)

-(2014). Internet of Things: the complete IoT guide – benefits, risks, examples, trends, *i-scoop*, 6-2014.

<https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/>

-, The More Pixels Law: Gigapixel Cameras and the 21st Century Reality Effect, [http://makemetics.com/drafts/more\\_pixels\\_law.html](http://makemetics.com/drafts/more_pixels_law.html)

-(2013). Global private and public R&D funding, *Sciencogram UK*, May 29, 2013

<https://scienceogram.org/blog/2013/05/science-technology-business-government-g20/>

-(2012). R&D Spending by the Federal Government, *Department of Numbers*, Jan 2012,

<http://www.deptofnumbers.com/blog/2012/01/rd-spending-by-federal-gov/>

## ראיונות

אוסטר דובי (2017). CTO מפא"ת, 8.1.2017.

בן-עזרא מיכאל (2017). CTO חט"ל בזרוע היבשה, 27.2.2017.

חורב שאול (2017). ראש מרכז חיפה למחקרי אסטרטגיה ימית באוניברסיטת חיפה, 16.4.2017, 6.2.2017, 26.12.2016.

חלמיש ניר (2016). ראש מו"פ במפא"ת, 18.12.2016, 28.2.2017, 4.5.2017.

מוטט פארי (2017). רמ"ד חדשנות מו"פ, מפא"ת, 5.2.2017, 18.4.2017, 3.5.2017.

עוזיאל אמיר (2017). סגן מדעי לר' מפא"ת, 1.1.2017.

פינסלר ליאור (2017). רמ"ח תקש"ב במפא"ת/מו"פ, 1.1.2017.

רוסו חיים (2017). יו"ר 'תעשידע', 27.2.2017.

שנרך צחי (2017). מנהל המערך הטכנולוגי ברשות לחדשנות טכנולוגית, משרד הכלכלה והתעשייה, 30.4.2017.



תא"ל גיא פאגלין משמש בתפקיד ראש מנהלת המרכבה והרק"מ במשרד הביטחון. גיא משמש מזה כ-23 שנים בתפקידים שונים בצה"ל בפיתוח פלטפורמות, מערכות ואמצעי לחימה ליבשה. גיא מהנדס אלקטרוניקה, בעל MBA (אוניברסיטת תל אביב) ותואר שני (אוניברסיטת חיפה) במדעי המדינה בביטחון לאומי ובוגר המכללה לביטחון לאומי.