



מפא"ת

מערכות



טבת התשפ"ב | דצמבר 2021



גיליון נושא: מחזון לביטחון

בגיליון:

העתיד כבר כאן - לייזרים בשדה הקרב | כימת ברזל | לחימה טכנולוגית במגפה | טסים מחוץ לקופסה: הובלת בניין כוח במערכי הכסמים | קטלניות הלוחם הבודד | זום על הספקטרום הביולוגי | אפו של הכלב | לקחים היסטוריים בנושא המו"פ הצבאי | פודקאסט: מתחנות חלל צבאיות ועד דגל ישראל בחלל



גיליון מיוחד | טבת התשפ"ב | דצמבר 2021
<http://maarachot.idf.il>

מפקד מערכות: ד"ר אמיר גילת

עורך מערכות: עדי לרנר

סגנית עורך: יעל קולטון זיו

עורך לשון: ניצן לטון

צוות מוביל מפא"ת: אל"ם ב ומר פארי

עיצוב ועריכה גרפית: סטודיו זאב אלדר

רכזי מערכת: סמל עידו גבריאל וטור אריאל לרידו

ISSN 0464-2147

טלפון: 03-7607585

דוא"ל המערכת: maarachot@idf.il

כתובת למכתבים: ד"צ 02624 צה"ל

יצא לאור באמצעות משרד הביטחון - ההוצאה לאור

הדעות והתפיסות המובעות במאמרים מבטאות את דעתם האישיים של הכותבים.

תגובות למאמרים יפורסמו בגיליון העוקב בלבד.



רוצים לקבל חומרים נוספים מבית מערכות?
סקרו את הקוד והירשמו לניוזלטר שלנו.

לתכנים נוספים בנושאי צבא וביטחון לאומי
הצטרפו לדף הפייסבוק של מערכות.



לעדכונים שוטפים הצטרפו לערוץ הטלגרם של מערכות.



לציוצים שוטפים הצטרפו לטוויטר של מערכות.



בשער: מחזון לביטחון



התובנה וההכרה שמדינת ישראל נדרשת ליכולת מחקר ופיתוח עצמאית לאמצעי לחימה וטכנולוגיה ביטחונית מתקדמת הביאה להקמת מפא"ת (המנהל למחקר ולפיתוח אמצעי לחימה ותשתית טכנולוגית) בשנת 1982. מאז ועד היום, הובילו אנשי מפא"ת למגוון רחב של פתרונות טכנולוגיים לצרכים ביטחוניים ולמשימות העומדות בפני מדינת ישראל.

במהלך השנים, הובילה מפא"ת להישגים רבים ויוצאי דופן, שעיצבו את עוצמת ביטחון ישראל והשפיעו עליה במגוון רחב של תחומים, ולפריצות דרך טכנולוגיות כדוגמת פרויקטי המחקר והפיתוח בכלל הדיסציפלינות: אוטונומיה, חימוש, סייבר, ספקטרום, קוונטים ורבים נוספים, שהם מכפיל כוח לעוצמתו של צה"ל ובסיס למבצע יכולות. זאת לצד יכולות ברמה העולמית כמו שיגור לוויינים לחלל - פרויקט אסטרטגי ממעלה ראשונה, מערכות ההגנה האווירית המבססות את תפיסת ההגנה הרב-שכבתית, הקמה והעצמה של יכולות כלי הטיס הבלתי מאוישים, יצירת שתופי פעולה אסטרטגיים עם מדינות רבות, וקידום משמעותי של וקטורי ההתעצמות העתידיים הרב-ממדיים: אוויר, ים, יבשה, תת-קרקע, חלל ובממד הקיברנטי.

מגוון רחב של מחקרים המקודמים ביחידת התשתיות הטכנולוגיות מאפשרים לייצר בסיס רחב ומגוון של אבני בניין טכנולוגיות, ובוחנים בזוויות חדשות אתגרים עתידיים ופתרונות יצירתיים. יחידת המו"פ מאפשרת אקסלרציה של מאות פיתוחים בר-זמנית, בחופש מחשבתי מלא תוך אחריות אישית ומרחיבה. מנהלות מפא"ת (מל"טים, מת"א וחומה) מובילות קונספטים טכנולוגיים חדשים, והן הפכו למותג-על של יצירתיות ביטחונית טכנולוגית בעולם כולו. תוכניות העילית לפיתוח כוח אדם טכנולוגי הן סמן ימני לדרך שבה נכון לפתח מנהיגות טכנולוגית משפיע ומובילה.

ליבת היתרון האיכותי בהיותנו מובילים עולמיים טמונה בערכי החדשנות, היצירתיות והגמישות המחשבתית, זאת לצד סקרנות וצניעות. ערכים אלו הם הבסיס לפתרון אתגרי ההווה והעתיד, במקביל לחיזוק התעשיות הביטחוניות, חברות ההזנק והאקדמיה. השנה הוענקו למפא"ת פרסי ביטחון ישראל על הובלת פרויקטים אסטרטגיים ומסווגים. זוהי הפעם ה-26 שהפרסים מוענקים למפא"ת ולאנשיה. ללא כל ספק, מדובר בהערכה הגבוהה ביותר לתרומה לביטחון ישראל. הישג זה הושג בעיקר בזכות הבנת המשימה, פיתוח יכולת טכנולוגית ייחודית, מקצוענות וחתירה למטרה של אנשי מפא"ת בשיתוף פעולה עם זרועות צה"ל, גופי הביטחון והתעשיות הביטחוניות.

בשנתיים האחרונות התמודדו ישראל והעולם כולו עם מגפת הקורונה. בשלבי ראשית המאבק, הוקם על-ידי מפא"ת המרכז הטכנולוגי הלאומי, במסגרתו נרתמנו להיות חלק מהכוח שמוביל את ההתמודדות עם האתגר באמצעות הבנת הבעיה, חשיבה מחוץ לקופסה והובלה לפתרונות טכנולוגיים מגוונים ושימיים. הותנעו שיתופי פעולה עם חברות ומשרדי ממשלה לקידום טכנולוגיות ומיזמים בתחומים דואליים (בטחוני ואזרחי).

כל זאת בוצע בזכות אנשי מפא"ת בעבר ובהווה - מארג איכותי של אנשים - במדים, עובדי המשרד, יועצים, סטודנטים ומפתחים. וזאת בשיתוף פעולה עם התעשיות הביטחוניות וזרועות הביטחון.

בגיליון חשוב זה של "מערכות", מובאים בפניכם מגוון מרשים של מאמרים שנתבתו על-ידי אנשי מפא"ת. מאמרים אלו יציגו מקצת מכיווני החשיבה היצירתיים של הארגון ויפתחו צוהר אל עולם שאין בו מנוחה, ממשך כל הזמן לחשוב קדימה למען ביטחון מדינת ישראל וביטחון עם ישראל.

אני גאה מאוד באנשי מפא"ת - על הדרך, ההישגים, התעוזה, היצירתיות והחתירה למטרה. יישר כוח.

תא"ל (מיל') ד"ר דניאל גולד

4 | העתיד כבר כאן - לייזרים בשדה הקרב

רס"ן ברוך, רמ"ד לייזר רב-עוצמה
 עם הצלחת מערכות הלייזר הקיימות היום ופריצות הדרך הגדולות שנעשו בשנים האחרונות בתחום ה"לר"ע, נראה שבעתיד הקרוב נוכל להשתמש בלייזרים עם דיוק מרבי, לטווחים ארוכים ובמחיר נמוך לטובת יירוט של כל איום מהאוויר ומהקרקע

10 | כיפת ברזל במבט לעתיד

סא"ל רותם, ראש תוכנית כיפת ברזל במנהלת חומה
 כיפת ברזל היא מערכת ייחודית בעולם הפיתוח הביטחוני. תיאום עם זרועות האוויר והים וסיוע אמריקני, יחד עם הטמעה מהירה ויעילה של יכולות היירוט המתפתחות, יאפשרו לכיפת ברזל להמשיך לתרום לביטחון ישראל מהרובד הטקטי ועד הרובד האסטרטגי, כאמצעי המשפר את עמידות התשתיות החיוניות ועמידות האוכלוסייה בעורף הישראלי, וכאמצעי המצמצם את היכולת של האויב לכפות עימות בתזמון נוח עבורו

14 | לחימה טכנולוגית במגפה

סא"ל (מיל) ד"ר יובל, מהנדס ראשי למתקני תשתית ופרויקטור קורונה / סא"ל ערן, רע"ן בינה מלאכותית / רס"ן מידן, רמ"ד רובוטיקה ואוטונומיה / רס"ן אלון, רמ"ד מכ"ם מתקדם

רובוטיקה למחלקות קורונה, חישה פיזיולוגית מרחוק, בינה מלאכותית לתמיכה בהחלטות רפואיות במחלקת קורונה ותוכנית מנן חינוך - ארבע מפעילויות שערכה מפא"ת בקורונה, אשר שרדו את מבחן הזמן ומאפשרות מעד רחב של יישומים. בראייה לאומית, יש לשקול להשתמש ביכולות אלה בתבונה גם בימי שגרה עבור יעדים לאומיים

20 | טסים מחוץ לקופסה: הובלת בניין כוח במערכי הכטמ"ם

אל"ם (מיל) חיים, ראש מנהלת מל"טים / אל"ם יניב, ראש מת"ס / אל"ם (מיל) עמי, יועץ / סא"ל עידן, רע"ן הנדסת מערכת ודיגיטל

נוכחות גוברת של כוחות חדשים בשוק העולמי מאפשרת לאויב "רף כניסה" תקציבי וטכנולוגי נמוך מבעבר ויוצרת אתגרים חדשים למערכת הביטחון. אתגרים אלו מניעים את מנהלת מל"טים לספק פתרונות בקדמת הטכנולוגיה במטרה לשמר את היתרון האיכותי של צה"ל, להוביל את תחום הכטמ"ם בעולם וכפועל יוצא לקדם את התעשיות הביטחוניות בעסקאות ייצוא

24 | קטלניות הלוחם הבודד

רס"ן יואב, רמ"ד חי"ר וקומנדו

החתימה למטב את יכולות הליבה של הלוחם, חשובות ככל שיהיו, לא תצליח לייצר את העליונות הנדרשת. ההסתכלות צריכה להיות רחבה על יכולות הלוחם והמסגרת מול מנבולותיהם, ופיתוח דרכי הנגשת מידע ויכולות בצורה אינטואיטיבית תוך שילוב יכולות טקטיות משולבות אוטונומיה

30 | זום על הספקטרום הביולוגי

ד"ר מיכל, רמ"ח הנדסה ביולוגית

יצורים חיים נוטים לחוש את סביבתם ולהגיב לשינויים בה, ותכונה זו היא הבסיס לאיסוף מידע מבוסס ביולוגיה. איסוף מידע סביבתי ידרוש פיתוח מתודולוגיה לעיבוד ולאנליזה של דגימות בשטח, ולפיתוח של אמצעי חישה בהתאם. המפגש בין עולם מדעי החיים לעולמות תוכן אחרים יוכל לייצר ממשק מפרה דרכיווני

36 | What does the dog's nose know?

סרן יובל, רמ"דית ביולוגיה ובע"ח

כלב הוא פלטפורמה חכמה, בעלת יכולת הרחה יוצאת דופן המשולבת עם יכולת סריקה מהירה, אך הידע על מעטפת היכולות שלו מועט. למרות הניסיון לפתח את הרובוט העתידי שידמה בצורה טובה את פעילות הכלב, רחוק היום שבו הרובוטים יחליפו את הכלבים בשדה הקרב

40 | לקחים היסטוריים בנושא המו"פ הצבאי

אל"ם (מיל) יעקב צור, לשעבר מח"ט (אגד ארטילרי) ולשעבר רמ"ח אמל"ח במפא"ת, כיום עורך לקט מו"פ ביטחוני בעולם

כיצד ומדוע נוצרו חידושים טכנולוגיים בתחום כלי המלחמה במהלך ההיסטוריה? מהו היה יחסי הגומלין בין "המנהיגות הטכנולוגית" ובין "המנהיגות הצבאית" ומה היה חלקם של גורמי השלטון האזרחיים? אי אפשר לחזות מראש פריצות דרך טכנולוגיות, ולא להסתמך עליהן או לתזמן אותן עם אירועי מלחמה. לכן צבא הרוצה להתכונן למלחמה חייב להבטיח, הרבה לפני שהמלחמה מתרחשת, זרימה הדדית מתמדת בין הדוקטרינה, הטכנולוגיה ומערכת הנשק

48 | הערות שוליים

החדשנות והטכנולוגיה הן חלק בלתי נפרד מהשיח הצבאי ומזירת המלחמה. שדות הלחימה המסורתיים שבהם לחמו חיילים פנים אל פנים בחרבות, פרשים וכידונים, ולאחר מכן ברובים, סנקים, ארטילריה וטילים, עברו לשדות אחרים - מתחת לקרקע, בחלל ובמרחבי הסייבר.

"מערכות", כביית התוכן המקצועי של צה"ל לצבא ולביטחון לאומי, קיבל על עצמו בהקשר זה משימה חדשה - להנגיש את הידע הרב בנושאי חדשנות וטכנולוגיה לכלל מפקדי צה"ל. במציאות המשתנה לנגד עינינו יש חשיבות רבה לכך שכל מפקד יכיר את היכולות הטכנולוגיות הקיימות בזירה ואת אלה המתוכננות. מידע זה יוכל להעשיר אותו בכלים פוטנציאליים שסייעו לו ביום-יום - בשגרה וביום פקודה.

במסגרת התפיסה של "הצבא כפרופסיה", הרי רק מתבקש שחלק מהידע ומהדעת שרוכש הקצין הלומד יהיה הכרת ארגו הכלים החדשני שיכול לעמוד לרשותו. מצד אחר, הכרת העולם הטכנולוגי יכולה להיות עבורו מקור השראה לייזום, מחשבה ותרומה לפיתוח של אמצעים טכנולוגיים חדשים.

שני משתנים אלה - ההעשרה וההשראה - שבימינו לעולם יהיו משתנים, עומדים מאחורי היוזמה של הוצאת כתב עת של "מערכות" המתמקד כל כולו בטכנולוגיה, על היבטיה השונים. תחום זה התרחב והפך לעולם בפני עצמו, ועניינו חורג גם מעבר לקהל הקוראים האורגני של "מערכות". מסיבות אלה החלטנו להפיק מעת לעת כתב עת ייחודי בנושא הטכנולוגיה שינגיש - לא רק ליודעי ח"ן - את הנושאים השונים בשפה מובנת ונהירה.

את הגיליון הראשון הוצאנו בשיתוף פעולה עם מפא"ת, שלשמחנו הבינו כמונו את החשיבות של כתב עת מקצועי בתחום. חודשים ארוכים של עבודה משותפת, בתוך תקופה של משבר הקורונה והיעדר תקציב מדינה, רק חיידו את האתגר שבהפקת כתב העת. זו ההזדמנות להודות לשותפינו אל"ם ב ומר פארי, שתרמו רבות להוצאה לאור של הגיליון.

הגיליון הראשון נגיש לקריאה בפורמט דיגיטלי, וכולל גם פודקאסט ראשון בסדרת הסכתים נוספים שיופקו, ללמדנו שבעידן החדשנות - הנגשת תוכן מקצועי נעשית לא רק בדפוס, אלא גם בזירה הדיגיטלית באמצעות תוכן אודיו ווידאו.

"מערכות" ימשיך בהפקת תכנים מקצועיים בתחומי החדשנות והטכנולוגיה באמצעים שונים ומגוונים, ואני מזמין כל מפקד - בין אם הוא עוסק בפיתוח טכנולוגי ובין אם הוא "לקוח" של פיתוחים אלה, לתרום למאגר הידע המצטבר - לכתוב מאמר או להציע נושא להפקת תוכן בכל אמצעי אחר.

קריאה מועילה ופורייה,
 ד"ר אמיר גילת



פודקאסט על לווינים וחלל

מתחנות חלל צבאיות ועד דגל ישראל בחלל

במסגרת הגיליון הוקלט פודקאסט עם רס"ן יואב על לווינים וחלל. להאזנה סרוקו את הקוד.



העתיד כבר כאן לייזרים בשדה הקרב

עם הצלחת מערכות הלייזר הקיימות היום ופריצות הדרך הגדולות שנעשו בשנים האחרונות בתחום ה"לר"ע, נראה שבעתיד הקרוב נוכל להשתמש בלייזרים עם דיוק מרבי, לטווחים ארוכים ובמחיר נמוך לטובת ירוט של כל איום מהאוויר ומהקרקע

רס"ן ברוך, רמ"ד לייזר רב-עוצמה



פרויקט "נאוטילוס". בציר המערכתי פותחו מערכות אופטיות ענקיות המבוססות על טלסקופים גדולים והמשלבות טכנולוגיות חלל

"מלחמת הכוכבים", לפיתוח מערכות לייזר עוצמתיות לפגיעה בעצמים שונים.

המעצמות פתחו במעין מרוץ חימוש, כחלק מהמלחמה הקרה, לנשק העתידי שישנה את פני המערכה והחלו לפתח טכנולוגיות לייזר שונות. המרוץ כלל שני צירים מרכזיים: ייצור לייזר עוצמתי ואיכותי וייצור רכיבים מערכתיים שיאפשרו ללייזר לרכו אנרגיה גבוהה על מטרה כדי להשמידה. בציר ייצור הלייזר נחקרו דרכים ליצירת קרן לייזר בעוצמה גבוהה תוך שמירה על טיבה, ופותחו טכנולוגיות תומכות שיאפשרו ייצור רכיבים. בציר המערכתי פותחו מערכות אופטיות ענקיות המבוססות על טלסקופים גדולים והמשלבות טכנולוגיות חלל אשר יכוונו

קרני לייזר שממסות קרחונים ומפוצצות מטוסים מלוות אותנו בסרטים זה שנים רבות. מפיקים רבים בוחרים בנשק הלייזר כחזות העתידנות בסרטים המציגים לוחמה עתידית מתקדמת. נדמה אפוא שלייזר הוא פני העתיד, אך מתי הוא יהיה להווה? נדמה היה שבהמצאת הלייזר על-ידי תיאודור מיימן ב-1960 נמצאה טכנולוגיה בעלת פוטנציאל רב המאפשרת העברת אנרגיה רבה במהירות האור, לטווחים ארוכים ובאופן מדויק מאוד. שילובה של טכנולוגיה מתקדמת עם שיוק הוליוודי המדגים יכולות מופלאות לקרן האור המרוכזת יצרו תנופה חזקה לתחום הלייזר, בייחוד הצבאי, והביאו להשקעות ענק מצד המעצמות, כבר בראשית שנות ה-80, בעקבות סרטי

הלייזר בקדמת הבמה

טכנולוגיות רבות שפותחו עם השנים באזרחות בשילוב ביטחון הולך וגובר בלייזר השיבו את תוכניות הלייזר לשימוש צבאי לקדמת הבמה. באמצע שנות ה-90 ישראל וארה"ב קידמו תוכנית שאפתנית לפיתוח מערכת לר"ע שתיירט רקטות מטווחים גדולים – פרויקט "נאוטילוס". המערכת פותחה במשך קרוב לעשור והתבססה על לר"ע כימי בהספק של מאות קילוואטים שתכוון את קרן הלייזר לטיל במעופו באמצעות טלסקופ ענק.

פעולת הלייזר מבוססת על יצירת שטף (אנרגיה ליחידת שטח) גבוה במטרה.² אם מרכזים כראוי את קרן הלייזר ומצליחים לשמור עליה מרוכזת כל הדרך אל המטרה, משיגים אנרגיית חימום יוצאת דופן שיכולה להתך מתכות ולהשמיד רקטות וטילים במעופם.

פרויקט "נאוטילוס" קרם עור וגידים בחברה האמריקנית נורת'רופ גראמן. החברה פיתחה לייזר הפועל בעוצמה גבוהה

את אלומת הלייזר לפגוע בנקודה מרוכזת במטרה תוך כדי תנועת המטרה (עקיבה מדויקת).

ההתקדמות בשני צירים אלה הולידה ציפייה גבוהה מהלייזר, אך מהר מאוד המעצמות הבינו שאין הלייזר אלא "פתרון המחפש בעיה".¹ בהיעדר יכולות הנדסיות וטכניות מתקדמות דיין, המערכות פשוט לא מצליחות להגיע לביצועים צבאיים רלוונטיים. בעקבות אכזבות מהפיתוח וניסויים כושלים, רוסיה וארצות-הברית עצרו את פיתוח המערכות ועברו לפתח אבני בניין ותשתיות טכנולוגיות לבניית מערכות לר"ע בעתיד, וכן מערכות לייזר קטנות תומכות לחימה כמו סמני לייזר ומט"לים (מדי טווח לייזר).

במקביל לפיתוח הצבאי, התקדם פיתוח הלייזר האזרחי, בתעשייה וברפואה. בעוד השימושים הצבאיים דורשים עוצמות גבוהות במיוחד ויכולות מתקדמות להעברת אנרגיה למרחקים ארוכים, בתעשייה וברפואה הדרישות משתנות. לדוגמה: לצורך ניתוחי לייזר לתיקון הראייה נדרשת שליטה במהירות, מיקוד ודיוק לייזר וכן באורך הגל שלו; לעומת זאת בחיתוך ובריתוך מתכות נדרשות לרוב עוצמות גבוהות יותר (אך עדיין נמוכות מהנדרשות לצרכים הצבאיים), תוך הפעלה רצופה וארוכה של המערכת.

פיתוח הלייזר למטרות צבאיות אומנם לא צלח, אך ההתקדמות המחקרית בתחום תרמה ליישומים אזרחיים רבים, שהחלו לצוץ בזה אחר זה: זיהוי חומרים, עיבוד חומרים מדויק, טיפולים כירורגיים וקוסמטיים, העברת תקשורת בסיבים אופטיים, כתיבת מידע על מדיה מגנטו-אופטית וקריאתו ואף שפשוף מכנסי ג'ינס. הלייזר מסוגל לחתוך מתכות בדיוק ובמהירות גבוהה משמעותית מכל חלופה אחרת, וככזה משמש במפעלי רכב רבים. נראה שלפחות בתחום האזרחי הלייזר כבר זמן רב אינו "פתרון המחפש בעיה", אלא פתרון לבעיות רבות.

**המעצמות פתחו במעין מרוץ חימוש,
כחלק מהמלחמה הקרה, לנשק העתידי
שישנה את פני המערכה והחלו לפתח
טכנולוגיות לייזר שונות. המרוץ כלל
שני צירים מרכזיים: ייצור לייזר עוצמתי
ואיכותי וייצור רכיבים מערכתיים
שיאפשרו ללייזר לרכז אנרגיה גבוהה
על מטרה כדי להשמדה**



עמדת בקרה של מערכת לייזר צבאית. טכנולוגיות רבות שפותחו עם השנים באזרחות בשילוב ביטחון הולך וגובר בלייזר השיבו את תוכניות הלייזר לשימוש צבאי לקדמת הבמה



מערכת לייזר בשימוש חיל הים האמריקני. המעצמות מפתחות נשקי לייזר ומציגות הדגמות ראשוניות של לייזר מסוגים שונים: קרקעי, רכוב, מוטס ועל אוניות

לייזר - יתרונות וחסרונות הטכנולוגיה

לייזר הוא שם כללי לטכנולוגיות לזירה שונות. עם השנים נלמדו היתרונות והחסרונות של כל טכנולוגיה בעזרת ניסיון המדענים, השימוש בהן ובניתוחים מתמטיים שלהן. ההחלטה בעולם הצבאי לזנוח את טכנולוגיית הלייזר הכימי לטובת לייזר חשמלי נבעה בראש ובראשונה מהיעוד המבצעי שלו, להשתמש בלייזר שיוכל להיות נייד ועמיד בסביבה צבאית ובטוח למפעיליו. גם בקטגוריית הלייזר החשמלי יש טכנולוגיות לזירה שונות:

- **לייזר מצב מוצק, מוט** – הרכיב היוצר את הלזירה הוא מעין מוט, לרוב מתרכובת החומרים נאודימיום-יאג (Nd:YAG), אשר בולעים קרינה מדיודות לייזר או מנורות ופולטים קרינה בכיוון אורך המוט. לייזר זה יכול ליצור קרן בעלת אנרגיה גבוהה, ובשונה מהלייזר הכימי, הוא רב-פעמי ואינו רעיל. עם זאת שטח הפנים של הרכיב קטן ביחס לנפחו, לכן הוא מתחמם מאוד ואינו עומד בהספק ממוצע גבוה לזמן רב. על כן הוא משמש בייחוד ללזירה בפעימות ולא ללזירה רציפה.
- **לייזר מצב מוצק, דיסק** – כדי להקל על בעיית ההתחממות, משתמשים בדיסק, מעין פרוסה מתוך המוט שהוזכר קודם. הדיסק בעל שטח פנים גדול יותר ביחס לנפח, ואמנם פינוי החום שופר, אך עדיין בהספק ממוצע גבוה מאוד הוא עלול להיהרס.

וכן את כלל המערכת, מערכת יקרה ומתקדמת להשגת היעד הנכסף. כמו כן החברה השלימה ניסויים רבים בהצלחה.³ עם זאת טכנולוגיית הלייזר הכימי טמנה בחובה כמה חסרונות:

- סכנה בטיחותית וסביבתית – הטכנולוגיה מבוססת על חומרים היוצרים תגובה כימית רעילה ומתכלים בעקבות השימוש, אשר בסיום כל לזירה מבצעית, באורך מסוים, דורשים החלפת מכל הגזים ומילוי מחדש בחומרים היוצרים תגובה כימית רעילה.
 - גודל המערכת – מערכת נאוטילוס, בניגוד למערכות יירוט כמו כיפת ברזל, הייתה בגודל של חצי אצטדיון כדורגל. שטחה הגדול לא אפשר לנייד אותה לצרכים מבצעיים והפך את המערכת לפגיעה במיוחד.
 - ביצועים מוגבלים – למרות ההתקדמות המשמעותית בפיתוח הלייזר ובפיתוח המערכת, טווח היירוט של המערכת היה מוגבל עקב טיב קרן ירוך וקושי לעבור באטמוספירה לטווחים ארוכים.
- חסרונות אלה הובילו לסגירת הפרויקט ב-2005, לאחר השקעה של כ-200 מיליון דולר (מתוכם כ-50 ממומן ישראל), בהחלטה משותפת של הממשל האמריקני ומדינת ישראל. היו כוונות להשתמש בטכנולוגיה בעלת נפח מצומצם והספק גבוה יותר (פרויקט SkyGuard), אך אלה נעצרו לחלוטין ב-2007, תוך זניחת טכנולוגיית הלייזר הכימי ופנייה לטכנולוגיית הלייזר החשמלי, לייזר המופעל על בסיס חשמל ולא על בסיס גז.



מערכת לייזר לירוס בלוני תבערה בגבול עזה. המערכת השתתפה בפעילות מבצעית לירוס בלונים והוכיחה את ביצועיה עם למעלה ממאה יירוטים מוצלחים (צילום מסך מיוטיוב: משטרת ישראל)

היתרון הבולט ביותר של הלייזר הוא עלות היירוט השולית, שהיא בעיקר עלות החשמל, לעומת העלות הגבוהה של היירוט במערכות מבוססות הטילים. הוועדה העדיפה את מערכת "כיפת ברזל" על פני מערכות הלייזר כיוון שטווח היירוט של הלייזר מוגבל מאוד, דבר המחייב הצטיידות במערכות רבות ופריסה שלהן על שטחים נרחבים. אף על פי שבזמן החלטת הוועדה טכנולוגיית הלייזר לא הייתה מפותחת, מפאת המשכיכה לשפר את הטכנולוגיה כדי שבעתיד ישראל תוכל ליהנות מהיתרון האסטרטגי של המערכת – הגנה אקטיבית נגד רקטות – בעלות יירוט זניחה.

אתגרים ומענים

כדי שטכנולוגיית הלייזר תתאים לשימוש צבאי, יש להתגבר על כמה אתגרים:

הגברת עוצמת הלייזר – כדי להגביר את עוצמת הלייזר, הרכיבים האופטיים צריכים לעמוד בעוצמות הלייזר הגבוהות מבלי להיהרס. כמו כן יש עוד חומרים במערכת העלולים להיהרס ממעבר של אנרגיות גבוהות, דבר הדורש מחקר רב בנושא תופעות פיזיקליות בלייזר.

שמירת טיב הקרן – בעבר התקשו לרכז את אנרגיית הלייזר מכיוון שעוצמת לייזר גבוהה הגבירה את התבדרות הקרן. היום המטרה היא לשמור על טיב הקרן גם בעוצמת לייזר גבוהה.

מעבר באטמוספירה – כאשר הלייזר עובר בתווך האטמוספרי, חלק מאנרגיית הלייזר נבלע באטמוספירה וכלל לא מגיע למטרה. כמו כן שינויי טמפרטורה המתרחשים בחלקיקים זעירים הנעים באוויר כל העת מבדרים את אלומת הלייזר, וכאשר היא מגיעה למטרה מפוזרת ומרצדת, היעילות שלה נמוכה. אחת הדרכים לפתור בעיה זו היא התקנת מערכת היירוט על על מטוס, הטס בגובה שבו האטמוספירה דלילה וקרן הלייזר עוברת ביעילות.

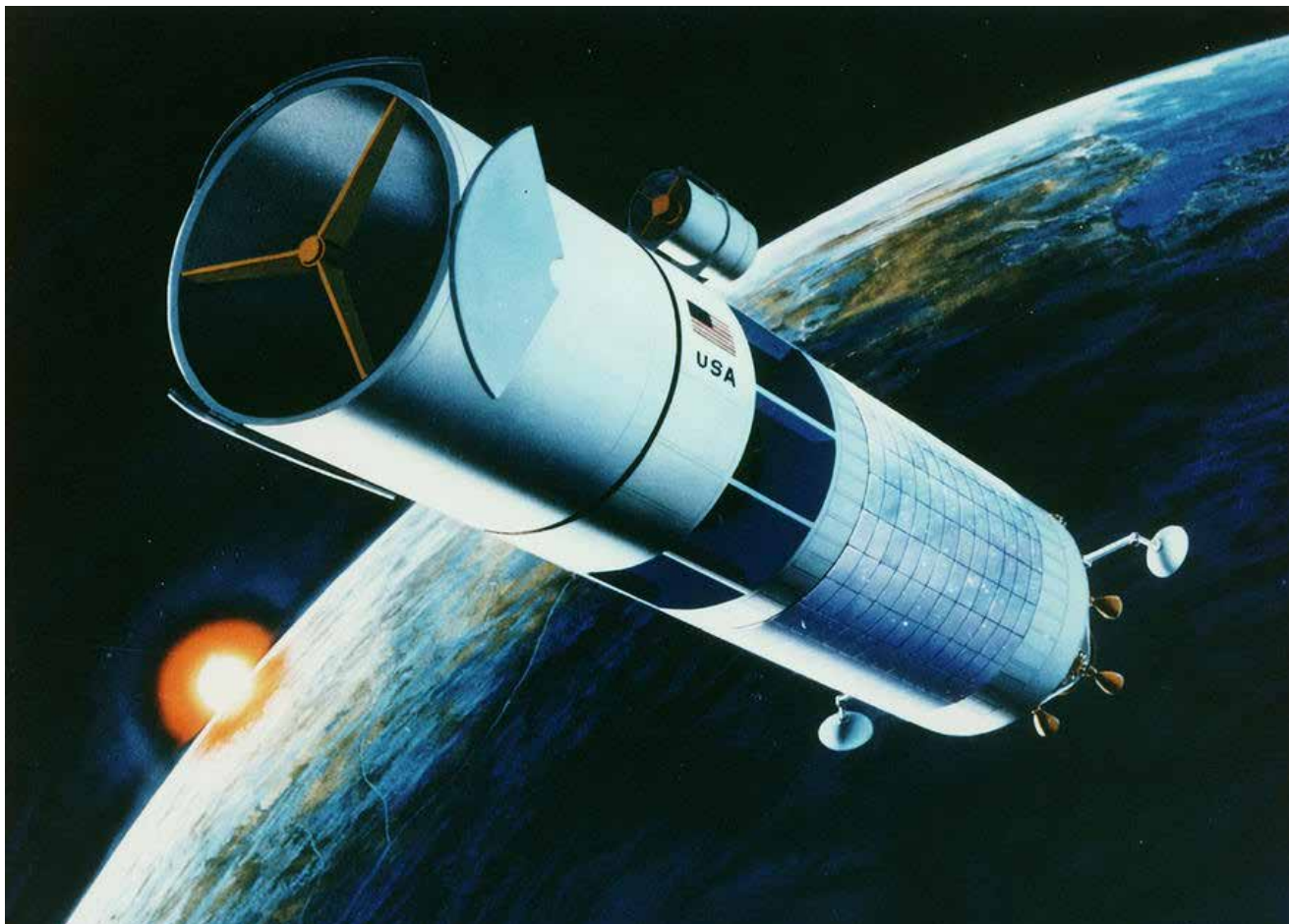
● **לייזר סיב** – לייזר בעל סיב אופטי אקטיבי המגביר את הלייזר ומאפשר שטח פנים גדול במיוחד, המונע התחממות ומאפשר להגביר את ההספק הממוצע של הלייזר. לטכנולוגיה זו אמינות גבוהה ורובוסטיות להולכת הלייזר על-ידי הסיב למקומות הנדרשים בתוך המערכת – הלייזר עובר בתוך סיב אופטי, שהוא כעין חוט המעביר בתוכו אור, חוט זה ניתן לנתב לכל חלק במערכת ולכוון ביתר קלות את האור. החיסרון הוא שהאנרגיה מרוכזת בשטח קטן (חתך הסיב) המגביל את האנרגיה הרגיעית שאפשר להעביר דרך הסיב, ועל כן לייזר זה מתאים יותר ללייזר רציף מאשר ללייזר פולסי.

טכנולוגיות רבות שפותחו עם השנים באזרחות בשילוב ביטחון הולך וגובר בלייזר השיבו את תוכניות הלייזר לשימוש צבאי לקדמת הבמה

מפאת רוב צבאות העולם בחרו להשתמש בטכנולוגיית לייזר סיב בזכות יתרונותיה והפוטנציאל הרב שראו בה.

מפאת בשיתוף חברת רפאל לקחו את הידע שצברו בפרויקט "נאוטילוס" והמשיכו בשקט בפיתוח מערכת יירוט מבוססת לייזר שתאפשר יירוט מהיר וזול של איומי הרקטות על מדינת ישראל. אכן הושגו הישגים מערכתיים משמעותיים שאפשרו לרפאל לשלב לר"ע תעשייתי בדגם ראשוני שפיתחה, ואף בוצעו ניסויי יירוט מוצלחים בשטח ישראל.

לאחר מלחמת לבנון השנייה, בצל איום הרקטות ההולך ומתממש, הוקמה ועדת נגל לבחינת מערכות לייזר רקטות.⁴ הוועדה דנה בטכנולוגיות יירוט רבות, וביניהן גם מערכות לר"ע.



יש מדינות רבות ששמו להן את נושא הלייזר כיעד אסטרטגי שיש לקדם במהירות האפשרית, ומשקיעות כסף וכוח אדם בשאיפה להגיע לפריצות דרך

בשנים האחרונות מפא"ת התחילה פרויקט שאפתני עם אל-אופ לפיתוח לר"ע (לייזר רב-עוצמה) ליירוט שיותקן על כלי טיס, יגיע לטווחים גדולים ולא יהיה תלוי במזג האוויר. זה כמה שנים שמפתחים בתע"א לר"ע בטכנולוגיה חדשה ומתקדמת הסוללת את הדרך לתחרות עתידית בין שלוש התעשיות הגדולות בתחומי היירוט באמצעות לייזר.

לייזר צבאי בעולם

במקביל לפיתוחי הלייזר בארץ, הלייזר הצבאי צובר תאוצה גם בחו"ל. המעצמות מפתחות נשקי לייזר ומציגות הדגמות ראשוניות של לייזר מסוגים שונים: קרקעי, רכוב, מוטס ועל אוניות. נוסף על המעצמות, יש מדינות רבות ששמו להן את נושא הלייזר כיעד אסטרטגי שיש לקדם במהירות האפשרית, ומשקיעות כסף וכוח אדם בשאיפה להגיע לפריצות דרך.

ההשקעה הרבה, פיתוח התשתית הטכנולוגית והתקדמות ההדרגתית בתר"ש אכן נושאות פרי. מפא"ת השיגה באמצעות רפאל ואל-אופ את פריצות הדרך שיחלו להן, ומתקדמים לקראת פיתוח מערכת מבצעית עמידה וניידת עם לייזר בעל עוצמה גבוהה, טיב קרן מיטבי, עבירות טובה באטמוספירה ויכולות הכוונה ייחודיות ומשודרגות שפותחו עם השנים וכל זה. לראשונה בעולם מפותח בישראל לר"ע בעוצמה גבוהה

הכוונה מדויקת – מכוון המערכת צריך להיות בעל דיוק חסר תקדים כדי לכוון קרן לייזר בקוטר של מטבע על מטרה הנעה באוויר במהירות של מאות מטרים בשנייה ורחוקה ממערכת הלייזר כמה ק"מ מבלי שהקרן תזוז מהמטרה במשך כמה שניות. חוסר דיוק של המכוון יפגע בביצועי המערכת באופן משמעותי.

מערכת צבאית – המערכת שתפותח חייבת להתאים לדרישות הצבאיות, מערכת אמינה שתפעל במשך שנים ארוכות, תהיה עמידה בשינוע ובתנאי סביבה שונים. אם המערכת תותקן בכלי רכב או במטוס, עליה אף להיות עמידה לרעידות משמעותיות. כל המדינות המפתחות נשק לייזר עוסקות בחמשת האתגרים המרכזיים הללו, ואט אט פותרות אותם. ככל שייפתרו אתגרים רבים יותר, כך יקרב היום שבו נראה מערכת לייזר ליירוט מטרות שונות.

אל הפיתוח המערכתי בחברת רפאל הצטרפו חברת בת של אלביט, חברת אלאופ, ותע"א (התעשייה האווירית). בחברת אל-אופ עבדו שנים על פיתוח הלייזר עצמו שיאפשר הספקים גדולים ובאיכות גבוהה, בדגש על ההיבט המבצעי. במהלך השנים מפא"ת השקיעה רבות, יחד עם אל-אופ, בפיתוח לייזר צבאי איכותי, תוך בניית תר"ש (תוכנית רב-שנתית) לקידום טכנולוגיית הלייזר הצבאית. לצד פיתוח המערכות הקרקעיות,



ר' מו"פ, תא"ל יניב רותם, בתהליכי ההיערכות לניסוי. ככל שייפתרו אתגרים רבים יותר, כך יקרבו היום שבו נראה מערכת לייזר למטרות שונות

ממרחק רב ומפילה אותם עוד בטרם חצו את הגבול. המערכת השתתפה בפעילות מבצעית לייזר בלונים והוכיחה את ביצועיה עם למעלה ממאה יירוטים מוצלחים.

מערכת לייזר צבאית אחרת היא המערכת לנטרול מטענים "אש קרה", פרי הפיתוח ברפאל. המערכת פועלת כבר כעשור, היא נטרלה מטענים רבים בזירה המבצעית והוכיחה את יעילותה. המערכת מותקנת על נגמ"ש ומסוגלת לנטרל מטען ממרחק של מאות מטרים, תוך שמירה על צוות הנגמ"ש בטווח בטוח.

לצד מערכות לר"ע כמו אלה, וכמו מערכות לייזר רחפנים שהולכות ומתפתחות, מפא"ת מפתחת גם מערכות לייזר בהספק נמוך לצרכים שונים, כמו מערכת "מגן רקיע", שפותחה בחברת אל-אופ, ומנטרלת טילי כתף המאיימים על מטוסי נוסעים. מערכת זו הוכיחה את ביצועיה ומגינה על מטוסי חברות התעופה הישראליות ואף מטוסים נוספים בעולם.

סיכום

עם הצלחת מערכות הלייזר הקיימות היום ופריצות הדרך הגדולות שנעשו בשנים האחרונות בתחום ה"לר"ע, אפשר לומר שמה שבעבר היה דמיון רחוק, עתה הופך למציאות. נראה שבעתיד הקרוב נוכל להשתמש בלייזרים עם דיוק מרבי, טווחים ארוכים ומחיר נמוך למטרות רבות – יירוט של כל איום מהאוויר ואף איום מהקרקע.

ההערות למאמר זה מתפרסמות בסוף הגיליון.

במיוחד, בעל טיב קרן אופטימלי ואשר מאפשר יכולת לעבור באטמוספירה לטווחים ארוכים – יכולת פורצת דרך שכבר הוכחה בניסויים.

ההתקדמות המוצלחת בפיתוח המערכת הציבה יעדים חדשים ושאפתניים להתמודדות עם האיומים המתפתחים. קיים פוטנציאל שעוד אפשר לממש מטכנולוגיות הלייזר השונות, שלא רק ישמור על היתרון האסטרטגי של צה"ל, אלא גם יעצים אותו.

כבר אפשר לראות בשטח סנוניות ראשונות של מערכות הלייזר הצבאיות. אחת מהן היא מערכת לייזר בלוני תבערה, פרי השקעה משותפת של מפא"ת והמשטרה בחברת אופטידיפנס ובהכוונתן הטכנו-מבצעית. המערכת מיירטת זרי בלונים

כבר אפשר לראות בשטח סנוניות ראשונות של מערכות הלייזר הצבאיות. אחת מהן היא מערכת לייזר בלוני תבערה, פרי השקעה משותפת של מפא"ת והמשטרה בחברת אופטידיפנס ובהכוונתן הטכנו-מבצעית. המערכת מיירטת זרי בלונים ממרחק רב ומפילה אותם עוד בטרם חצו את הגבול



כיפת ברזל במבט לעתיד

כיפת ברזל היא מערכת ייחודית בעולם הפיתוח הביטחוני. תיאום עם זרועות האוויר והים וסיוע אמריקני, יחד עם הטמעה מהירה ועילה של יכולות היירוט המתפתחות, יאפשרו לכיפת ברזל להמשיך לתרום לביטחון ישראל מהרובד הטקטי ועד הרובד האסטרטגי, כאמצעי המשפר את עמידות התשתיות החיוניות ועמידות האוכלוסייה בעורף הישראלי, וכאמצעי המצמצם את היכולת של האויב לכפות עימות בתזמון נוח עבורו

סא"ל רותם, ראש תוכנית כיפת ברזל במנהלת חומה



יירוטי רקטות ששוגרו מעזה לכל אורך קו החוף של ישראל ב"שומר החומות" (צילום: יהונתן קלרמן)

ועשרות תיקונים ושיפורים קטנים במערכת. מאמצי פיתוח מתמשכים אלו היו מרכיב הכרחי בשימור ביצועיה הגבוהים של כיפת ברזל מול התגברות האיום מעזה במהלך עשרות סבבי לחימה, ובראשם מבצע "עמוד ענן" (2012), מבצע "צוק איתן" (2014) ומבצע "שומר החומות" (2021).
השנה מנהלת חומה מציינת 30 שנה להיווסדה. במאמר זה, על רקע עשור ליירוט הראשון של כיפת ברזל בשנת 2011 והצלחתה ב"שומר החומות" אתאר את עיקרי דרכה של המערכת עד כה ואת האתגרים לעתיד.

ההקשר המבצעי הרחב של כיפת ברזל

ב-1969 שיגר ארגון פתח רקטות משטח ירדן על עמק בית שאן, ומ-1982 עד שנות ה-90 של המאה ה-20 שיגרו הארגונים

מערכת כיפת ברזל, שנועדה להתמודד עם איומים אוויריים על ישראל, פותחה בזמן שיא ופועלת באופן מבצעי זה כעשור. תרומתה של המערכת לביטחונה של ישראל התבטאה במהלך השנים ביירוט של כ-4,000 רקטות, טילים וכטב"מים. פיתוח המערכת בשנים 2007-2011 הביא תוך זמן קצר יכולת מבצעית משמעותית וחדשה שהפכה למרכיב מרכזי בביטחונה של ישראל בעשור האחרון. מנהלת חומה במפא"ת אחראית על פיתוח וייצור המערכת בתעשיות הביטחוניות,¹ וכן על פיתוח מערכות ההגנה האקטיבית חץ ושרביט קסמים (קלע דוד). פעילותה של מנהלת חומה כוללת שיתוף פעולה הדוק עם חיל האוויר, חיל הים, התעשיות הביטחוניות, קהילת המודיעין וארצות-הברית. במהלך העשור האחרון הביאה ההשקעה הישראלית בפיתוח כיפת ברזל למספר סבבי שדרוג גדולים



משגרים של כיפת ברזל ומירט המשוגר לעבר מטרה בעת ניסוי פיתוח של המערכת בתחילת 2021. כדי לשמור על ביצועי המערכת בהתאם להתפתחויות, נדרשים סבבי פיתוח מחזוריים וניסויי פיתוח, ולאחר מכן פעילויות הטמעה והכשרה לדרגי השדה בצה"ל המפעילים את המערכת ומתחזקים אותה (צילום: משרד הביטחון)

יחד עם שיגור טק"ק (טיל קרקע-קרקע) איראני מדויק לטווח קצר על החרמון בשנת 2019, היו סימן לצמיחת פוטנציאל הנזק והתחזקות איראן בתחום התקיפה המדויקת. בראיית העתיד הקרוב, חימוש מדויק קצר טווח והמוני בידי ארגוני הטרור גורם לאסימטריה מסוג חדש. ישראל בעלת יכולת תיאורטית לתקוף במדויק ולהשמיד תשתיות כגון תחנות כוח, מתקני זיקוק, נמלי ים, שדות תעופה וסמלי שלטון של כל מדינת אויב שעומדת נגדה ולגרור לה נזק חמור ביותר. ישראל מרסנת את עצמה ולא מממשת את יכולת התקיפה שלה בגלל עמידתה במנהגים בין-לאומיים ודיני המלחמה. לעומת זאת, ארגוני טרור אשר ישיגו חימוש מדויק עלולים לתקוף מתקנים חיוניים בישראל ללא מגבלות של דיני המלחמה. חמור מכך, המדינות שבהן פועלים ארגוני טרור אלו תוכלנה לטעון שהן אינן אחראיות על הארגונים ושאינן סיבה לתקוף את תשתיותיהן בתגובה. לכן בעת עימות עם ארגון טרור בעל חימוש מדויק, צפוי מצב של חוסר סימטריה שבה תשתיותיה החיוניות של ישראל תחת התקפה, אך אין לה לגיטימציה לתקוף תשתיות זהות במדינה ממנה האימונים משוגרים והיא נאלצת לרדוף, במאמצים טכנולוגיים יוצאי דופן, אחרי כל פעיל טרור, משגר וטיל בצד השני. במציאות זו של הרתעה חלקית, ההגנה האקטיבית הופכת להיות לא רק אמצעי להגנת האזרח מארגון הטרור, אלא גם לאמצעי המבטיח שבעת מלחמה בישראל יהיו תנאי מחיה בסיסיים, כגון חשמל ומים.

הפלטסטיניים וחזבאללה רקטות באופן תדיר על יישובי הצפון מנהריה ועד קריית שמונה. ב-2001 החלו התקפות הרקטות על שדרות ויישובי הדרום, כאשר במהלך 20 השנים האלו, כולל "שומר החומות", שוגרו מעזה מעל 15,000 רקטות ופצמ"רים. במלחמת לבנון השנייה ספגה ישראל תוך 33 ימים כ-4,000 רקטות ששוגרו על-ידי חזבאללה וגרמו ל-53 הרוגים ומאות פצועים. זו הייתה נקודת המפנה שהבליטה את הצורך בפיתוח מואץ של מערכת ליירוט אימונים קצרי טווח.² בניגוד לאיום הלא מדויק ("סטטיסטי") של רקטות ופצמ"רים, לחימוש מדויק יכולת לפגוע באופן שעלול להשבית תשתיות אזרחיות וצבאיות קריטיות, ממתקני חשמל וזיקוק ועד בסיסי חיל האוויר. ב-1967 הופעל באופן מבצעי לראשונה חימוש מדויק כנגד ישראל כאשר צבא מצרים הטביע את אח"י אילת על-ידי טח"י (טיל חוף-ים) מתוצרת סובייטית מדגם "סטיקס". במלחמת יום הכיפורים הושמדו מכ"מי היב"א (יחידות הבקרה האווירית) הדרומית (528) והמערבית (511) בסיני על-ידי טיל שיוט מדויק מתוצרת סובייטית מדגם "קלט". ההתפתחות הטכנולוגית אפשרה גם לארגון לא-מדינתי כמו חזבאללה להשתמש בטח"י מתוצרת איראנית לתקיפת אח"י חנית ב-2006. מאז מחזיקים ארגונים ומדינות רבים יותר ביכולת תקיפה מדויקת ובכמויות הולכות וגדלות של טילים, כטב"מים וטילי שיוט. תקיפת מתקני הזיקוק הסעודים על-ידי כמות גדולה של מל"טים מתאבדים וטילי שיוט בשנת 2019,



כיפת ברזל מיירת מטס של רביעיית כטב"ם ברוזמניה בניסוי. יכולת יירוט הכטב"מים הוכחה באופן מבצעי עם הפלת כטב"מי נפץ של חמאס ב"שומר החומות" (צילום: משרד הביטחון)

מענה טכנולוגי ומבצעי להגנה מפני מערך מנהרות תת־קרקע התקפיות צמצמו את משרעת היכולות היעילות לתקיפת האוכלוסייה הישראלית והתשתיות הלאומיות של ישראל. ירי התמ"ס נותר הכלי הזמין ביותר לתקיפת מרכזי האוכלוסייה בישראל שיש בידי ארגוני הטרור, ובתור האמצעי אשר נעשה בו השימוש התכוף ביותר להגנה מפני האיום לאחר ששוגר, כיפת ברזל הפכה למרכזית בשיח הציבורי בישראל.

- **תודעה** – המשגרים הניידים של כיפת ברזל נמצאים ליד ערים רבות בישראל בהתאם לצורך המבצעי, לטילי המערכת זמן מעוף קצר עם שובל עשן ניכר והם נראים בקלות למבטים מהקרקע. מיליוני תושבים ראו יירוטים במו עיניהם או נחשפו לסרטונים של היירוטים ברשתות חברתיות בסבבי הסלמה ומבצעים חוזרים ונשנים בעשור האחרון. כתוצאה מכך ההגנה שמספקת כיפת ברזל, גם אם איננה הרמטית, נכנסת לתודעת הציבור ומחזירה במידה רבה את צה"ל לחצוץ בין ארגוני הטרור לבין האוכלוסייה האזרחית. מובהקות ההשפעה התודעתית העמוקה הוכחה במחקר שלפיו כיפת ברזל הפחיתה את תחושת חוסר האונים הנגרמת מאיום הירי והפכה אותה לתחושת הישג, ובכך פחתה הטראומה של האוכלוסייה מתקיפות תמ"ס של האויב.⁴

- **השפעה ברורה** – בניגוד למערכות צבאיות רבות שבהן יש קשר עמום בין ההישג הטקטי להישג האופרטיבי להישג האסטרטגי, בכיפת ברזל הקשר ברור. ההישג ברובד הטכני־טקטי של כיפת ברזל ביירוט איומים אוויריים מונע מהאויב לגרום לנזק והיקף נפגעים חריג בעורף ברובד המערכתי. כנגזרת מכך, כיפת ברזל תורמת ברובד האסטרטגי בשני

הפיתוח של כיפת ברזל

תהליך ייזום והתנעת הפיתוח של המערכת בשנים 2004–2007 כלל קבלת החלטות יוצאת דופן של הדרג המדיני ושל ראש מו"פ דאז תא"ל ד"ר דני גולד. מרגע תקצוב הפרויקט במלואו בסוף 2007, פותחו טיל מיירט (טמיד), מערכת שו"ב, תצורת מכ"ם ומערכת תקשורת ושולבו יחד תוך ייצור שתי הסוללות הראשונות ומבצוען בתחילת 2011. למאמץ זה נרתמו מאות מהנדסים, מדענים, טכנאים ואנשי ייצור בתעשיות הביטחוניות, וכן צוות הפרויקט במפא"ת וגרעין ההקמה של חיל האוויר. ההצלחה המהירה של הפיתוח התרחשה בזכות שילוב הכרחי של גורמים רבים, הן בתחומים הטכנולוגיים והן באופן הניהול והתעדוף של הפרויקט במשרד הביטחון ובתעשיות הביטחוניות.³ השלמת סבב הפיתוח הראשון ומבצוע כיפת ברזל ב־2011 שינו תוך זמן קצר את הדינמיקה של העימותים בין ישראל לעזה, ואף השפיעו על ההתנהלות האזרחית והמדינית בישראל.

המעמד הייחודי של כיפת ברזל

כיום תופסת כיפת ברזל מקום מרכזי בשיח הישראלי. מרבית התושבים מכירים את המערכת ואת חשיבותה לביטחון האוכלוסייה בישראל. אין עוד מערכת נשק בעלת מעמד ציבורי כשל כיפת ברזל, ויש לכך כמה סיבות מרכזיות:

- **מרכזיות ירי התמ"ס (תלול מסלול) אצל האויב** – בעשורים האחרונים הפכו מתקפות הטרור על האוכלוסייה בישראל לאיום מרכזי של ארגוני הטרור המודרניים. בתהליך מקביל, איום הצבאות הערביים הסדירים פחת והפך לשולי, כל עוד הסכמי השלום יציבים. עליונותו של צה"ל בזירות הלחימה השונות, הבסת טרור המתאבדים ברובו ופיתוח



המכ"ם של כיפת ברזל, המגלה את האיומים ועוקב אחריהם עד יירוטם, בניסוי פיתוח של המערכת (צילום: משרד הביטחון)

לשמירה על אפקטיביות המערכת בעלויות סבירות. בעשורים האחרונים המערכת מוכיחה את עצמה שוב ושוב בלחימה בהיקף יירוטים אשר אין שני לו בעולם בממדיו ובמורכבותו. על רקע המודיעין על התפתחות האויב, ובתיאום עם זרועות האוויר והים, מערכת הביטחון משקיעה רבות בפיתוח כדי שכפת ברזל תמשיך להיות רלוונטית מול האיום המתפתח בזירה, וכן היא משקיעה בהצטיידות כמותית ברכיבי המערכת, בסיוע אמריקני, כדי לעמוד מול היקף הירי הרב. רק השילוב של כל אלו, יחד עם הטמעה מהירה ויעילה של יכולות היירוט המתפתחות, יאפשר לכפת ברזל להמשיך לתרום לביטחון ישראל מהרובד הטקטי ועד הרובד האסטרטגי כאמצעי המשפר את עמידות התשתיות החיוניות ועמידות האוכלוסייה בעורף הישראלי, וכאמצעי המצמצם את היכולת של האויב לכפות עימות בתזמון נוח עבורו.

ברצוני להודות על ההשקעה והתרומה של האנשים העומדים מאחורי פיתוח וייצור כיפת ברזל בתעשיות הביטחוניות ובמערכת הביטחון – מאות מהנדסים, טכנאים, אנשי מטה וניהול, קציני הפרויקט במפא"ת ובצה"ל ומומחים במגוון תחומים אשר עובדים יום-יום בהגשמת כל אשר תואר במאמר.

ההערות למאמר זה מתפרסמות בסוף הגיליון.

היבטים: המערכת מפחיתה מיכולת האויב לדרדר את ישראל למהלך קרקעי כאשר הוא מנוגד לאינטרס הישראלי, ולכפות אותו במועד לא רצוי מבחינת ישראל. נוסף על כך, המערכת מאפשרת לספוג את תגובת האויב למהלכים התקפיים שישראל יוזמת, ובכך מפחיתה את חומרתם (לדוגמה בפתחת "עמוד ענן").

התפתחות היכולות של כיפת ברזל

בעשור האחרון התפתחה כיפת ברזל באופן שמפתחיה לא יכלו לחזות לפני 13 שנים. השטח המוגן על-ידי כל סוללה הוגדל שוב ושוב, קיבולת המטח גדלה, נוספו משגרים בכל סוללה ופותחה היכולת ליירט איומים בליסטיים קצרי טווח מתקדמים ופצמ"רים. "צוק איתן" היה אבן דרך חשובה בהתפתחות יכולות כיפת ברזל מול האיום הבליסטי, היות שהמערכת הצליחה להתמודד עם ירי דומה בהיקפו וצפיפותו לתרחיש מלחמת לבנון השנייה.

בשנים האחרונות התפתחו היכולות בעולם יירוט הכטב"ם וטילי השיוט, ונערכו ניסויים ליירוט כטב"ם מים בודדים ומטסים. היכולת הוכחה באופן מבצעי עם הפלת כטב"ם נפץ של חמאס ב"שומר החומות". יכולת היירוט של טילי שיוט וטח"י (טילי חוף-ים) פותחה והבשילה בעקבות הצורך של חיל הים להגן על המים הכלכליים של ישראל ממגוון איומים, וממומשת בפרויקט "כיפה ימית" לספינות סער 6. שתי סוללות למענה ביניים לאיומי כטב"ם וטילי שיוט אף נמכרו לצבא ארצות-הברית, ויכולתן הוכחה שם בניסויים.

הן בהיבט הבליסטי והן בהיבט ההתמודדות עם כטב"ם, האתגרים והניסיון המצטבר אשר רצועת עזה מעמידה בפני ישראל מאפשרים לשפר את כיפת ברזל ולהפוך אותה לטובה יותר, עמידה יותר ורובוסטית יותר מול האיומים בכל הזירות.

העתיד של כיפת ברזל

כיפת ברזל נדרשת להמשיך ולהתפתח אל מול מרוץ החימוש האזורי. ממד אחד של המרוץ הוא הכמות. נדרשים סוללות, משגרים ומיירטים בכמות מספקת כדי לעמוד בהיקפי הירי המתגברים בדרום, תוך היערכות אפקטיבית לעימות נרחב בצפון. ממד שני של המרוץ הוא האיכות. כיפת ברזל נדרשת ליירט איומים חדשים, בהם סוגים חדשים של נשק איראני בזירה. כדי לשמור על ביצועי המערכת בהתאם להתפתחויות, נדרשים סבבי פיתוח מחזוריים וניסויי פיתוח, ולאחר מכן פעילויות הטמעה והכשרה לדרגי השדה בצה"ל המפעילים את המערכת ומתחזקים אותה.

למרות כל מאמצי הפיתוח וההצטיידות, ההגנה אינה הרמטית ולא תהיה הרמטית. כדי לשפר את ההגנה ולצמצם את האיום להיקף שההגנה מסוגלת לעמוד בו, על צה"ל להמשיך ולנקוט בפעילויות התקפיות רב-זרועיות. כמו כן יש להסביר לאוכלוסייה בישראל באופן ברור שאין הגנה הרמטית ועל כן יש להישמע להוראות פיקוד העורף בעת עימות. אל מול האיומים אשר אינם מיורטים, הנחיות אלו מצילות חיים.

סיכום

כיפת ברזל היא מערכת ייחודית בעולם הפיתוח הביטחוני. המערכת פותחה בזמן שיא, סיפקה ביצועים טובים מהמתוכנן והיא רובוסטית באופן המאפשר שדרוגים חוזרים ונשנים



לחימה טכנולוגית במגפה

רובוטיקה למחלקות קורונה, חישה פיזיולוגית מרחוק, בינה מלאכותית לתמיכה בהחלטות רפואיות במחלקת קורונה ותוכנית מגן חינוך - ארבע מפעילויות שערכה מפא"ת בקורונה, אשר שרדו את מבחן הזמן ומאפשרות מנעד רחב של יישומים. בראייה לאומית, יש לשקול להשתמש ביכולות אלה בתבונה גם בימי שגרה עבור יעדים לאומיים

סא"ל (מילי) ד"ר יובל, מהנדס ראשי למתקני תשתית ופרויקטור קורונה / סא"ל ערן, רע"ן בינה מלאכותית
רס"ן מידן, רמ"ד רובוטיקה ואוטונומיה / רס"ן אלון, רמ"ד מכ"ם מתקדם



ר' מפא"ת, תא"ל (מילי) ד"ר דניאל גולד בחפ"ק קורונה. התמגנות אנשי הצוות לפני כניסתם למחלקות הקורונה הוא ארוך, בובזני ומייגע

מ"המרכז הטכנולוגי הלאומי למאבק בקורונה" שהובל על ידי אגף המבצעים ופעל עד מאי 2020. לפעילות הטכנולוגית בהובלת מפא"ת היו שותפים צה"ל, משרדי ממשלה, התעשיות הביטחוניות, חברות הזנק והאקדמיה. גם לאחר סגירת מרכז השליטה הלאומי, מפא"ת המשיכה לתמוך במשרד הבריאות וקידמה עשרות פרויקטים. מטבע הדברים חלק מהפרויקטים לא צלחו את מבחן ההיתכנות והנחיצות, וחלק עדיין נמצאים בשלב המו"פ. מאמר זה יסקור ארבע מהפעילויות אשר שרדו את מבחן הזמן ומאפשרות מנעד רחב של יישומים.

רובוטיקה למחלקות קורונה

אחד הצרכים במאבק בנגיף היה הרחקת המטפל מן המטופל, שכן התמגנות אנשי הצוות לפני כניסתם למחלקות הקורונה

הצעדים המהירים והטוטליים שנדרשו בעקבות התפרצות נגיף הקורונה בארץ ובעולם, הפכו את אירועי מרס-אפריל 2020 ליוצאי דופן ומכוננים. ישראל הציבה את עצמה כחלק מהמאמץ העולמי לבלימת הנגיף, ותוך ימים ספורים נדרשה להתארגן לבלימת המגפה באמצעות בניית תשתיות וסל פתרונות לצרכי מערכת הבריאות והאזרחים. זה היה אך טבעי שמערכת הביטחון תגויס למשימה, ומשכך ראש מפא"ת יזם פעילות לאומית רחבה וחוצת ארגונים להתמודדות עם המשבר. מפא"ת הפכה במהרה ל"מרכז הטכנולוגי הלאומי למלחמה בקורונה".

כחלק מהיותה מרכז טכנולוגי לאומי, מפא"ת הקימה את "חפ"ק מפא"ת", שהורכב מצוות רבת-תחומי בהובלת רמ"ח תקשור"ב, לניהול וקידום המאמצים הטכנולוגיים המיידים הדרושים למלחמה בקורונה. חפ"ק זה הפך להיות חלק חשוב



ראש מו"פ, תא"ל יניב רותם, מקבל הסבר על רובוט מקרוב. המאמץ המשותף של מפא"ת וחברות הרובוטיקה הועיל ואף הוכיח את עצמו במהלך הזמן כמפחית את סיכון ההדבקה בנגיף (צילום: מולטימדיה מפא"ת)

המאמץ המשותף של מפא"ת וחברות הרובוטיקה הועיל ואף הוכיח את עצמו במהלך הזמן כמפחית את סיכון ההדבקה בנגיף. התוצר הסופי אפשר לצוותים הרפואיים לשלוח ציוד למטופלים, לתקשר איתם בווידאו, לעקוב אחר מצבם ואף להשתמש ברובוט לבידור המבודדים. כל זאת תוך שימוש בטכנולוגיות מתקדמות כגון ניווט תוך-מבני, הפעלה בזמן אמת של כמה רובוטים במקביל, זיהוי תמונה וקול ומיפוי מדויק של כל המחלקה לטובת ניווט הרובוט בסביבה דינמית. משרד הבריאות היה שבע רצון מביצועי הרובוטים, ובסוף תהליך הפיתוח קובעה תצורה המאפשרת לו לרכוש עוד רובוטים משודרגים בעלות-תועלת מיטבית. בימים אלה מטמיע משרד הבריאות, בליווי מפא"ת, רובוטים בבתי חולים נבחרים. נוסף על כך מתוכננת הצטיידות של רובוטים מסוג זה עבור מחלקות תשושי נפש ומחלקות גריאטריה, ואפשר לשער שבעתיד הרובוטים ישמשו בעוד מקומות במערכת הבריאות.

חישה פיזיולוגית מרחוק

צוות חישה פיזיולוגית מרחוק לפיתוח כלי חר"ס (כלי חישה רב-סנסורי) הוקם בענף מכ"מ שבמחלקת מערכות במפא"ת. הצוות גיבש ופיתח תפיסה המגובה במאמרים אקדמיים לניטור מדדים פיזיולוגיים של מטופלים בחדרי מיון, דוגמת קצב נשימות, דופק וחום גוף – ללא מגע ישיר בין הצוות הרפואי למטופל.

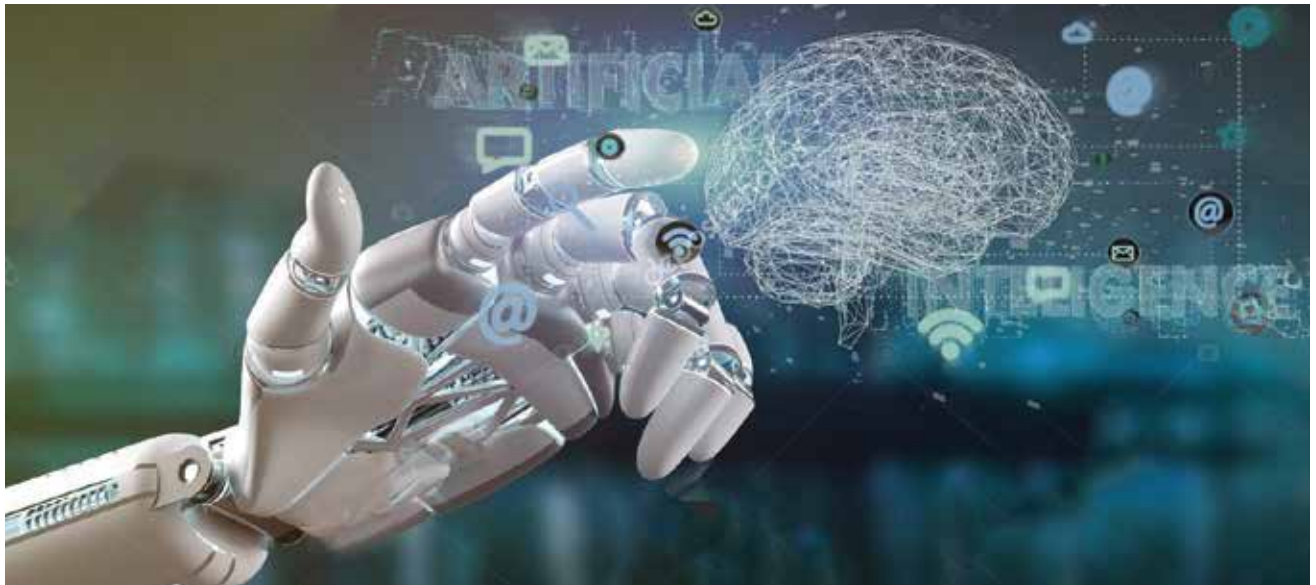
מטרת המערכת שפותחה היא להגן על הצוות הרפואי בבתי החולים מחשיפה למטופלים העלולים לשאת את נגיף הקורונה, ויחד עם זאת לנטר ביעילות ובמהירות מדדים פיזיולוגיים של חולים במלר"דים (מחלקות לרפואה דחופה) בבתי החולים כדי למיין חולים על-פי דרגת חומרתם ולהפחית את העומסים שבחדרי המיון.

הוא ארוך, בזבזני ומייגע ומקשה עליהם לעבוד לאורך זמן, ומנגד חשיפה לחולים ללא מיגון מסכנת את הצוות. הפתרון שמצאו נציגי מחלקת מח"ר (מערכות חימוש ורק"ם) בשיתוף אנשי הצוות הרפואי הוא שימוש ברובוטים מחלקתיים לטובת תקשורת עם המטופלים ושינוע של ציוד, תרופות ומזון. האפשרויות למערכות רובוטיות שעלו נעו בין פיתוח מהיר של פלטפורמה לטובת הצרכים המיוחדים של בתי החולים לבין רכישת מוצר מדף מהעולם האזרחי.

מדור רובוטיקה במחלקת מח"ר פיתח בזמן קצר פתרון המותאם לדרישות בתי החולים על בסיס רובוט לסביבה ביתית הקיים בשוק, המשמש בעיקר כ"מארח חברה" לאוכלוסיות מבוגרות באסיה, מתלווה לבעליו ברחבי הבית וכולל מצלמה ומסך מגע לבידור ותקשורת. הרובוט הוא פרי פיתוח של חברת TEMI הישראלית, אשר החלה את דרכה בפיתוח פלטפורמות רובוטיות לצרכים צבאיים (גם כן בשיתוף פעולה עם מפא"ת) ולאחר מכן הרחיבה את עיסוקיה לעולם האזרחי.

20 רובוטים הוטמעו במחלקות הקורונה במהירות כדי שתהליך למידת הדרישות מהמערכות יחל בד בבד עם תהליך הפיתוח והכנסת השיפורים. כמו כן כמה רובוטים מסוג זה ניתנו לחברות הרובוטיקה המובילות בארץ כדי שיציעו פתרונות משלהן לשדרוג יכולות הרובוט – החל בהתאמת מצלמות לגובה המיטות, דרך זיהוי נפילת אדם מרחוק וכלה בשליטה בכמה רובוטים במקביל. חברת TEMI נרתמה לפיתוח והחלה לעבוד על עדכון גרסה לתוכנה של הרובוט תוך התאמה לצרכים הרפואיים.

נמצא כי הפעלת רובוטיקה בבית חולים היא מאתגרת במיוחד בגלל בעיות תקשורת, סביבה מורכבת המקשה על הרובוט לנוע, חוסר הניסיון של אנשי הצוות בהפעלת רובוטיקה והפרעות מצד עוברים ושבים בבית החולים.



בינה מלאכותית לתמיכה בהחלטות רפואיות במחלקות קורונה (אילוסטרציה: DEPOSITPHOTO)

● ניטור מתמשך של מטופלים קשים. שיטות המדידה הייחודיות מאפשרות רגישות גבוהה לתהליכים פיזיולוגיים רבים בגוף הן בשל רגישותן הגבוהה לתנודות והן בשל רגישותן לשינויים כימיים מהירים בעור ובשכבות מסוימות מתחתיו. שיטות המדידה יפתחו צוהר לביצוע מדידות שאינן זמינות כיום לרופאים, לחיבור התוצאות למערכת התיקים הרפואיים בבתי החולים ובאמצעות הפעלת אלגוריתמי AI (בינה מלאכותית), הצלבת מידע וניתוח סטטיסטי שלו, לאבחן מטופלים בדיוק רב יותר ולהבין את הפיזיולוגיה לעומקה.

בינה מלאכותית לתמיכה בהחלטות רפואיות במחלקת קורונה

באפריל 2020, כשבועיים לאחר הקמת "המרכז הטכנולוגי הלאומי למאבק בקורונה", יצאה לדרך התוכנית לפיתוח והטמעה בבתי החולים של מערכת ICU-DIS (Intensive Care Unit Data Intelligence System). מערכת זו נועדה לתמוך בהחלטות רפואיות לטיפול בחולי קורונה המאושפזים בבית החולים, והיא מבוססת על בינה מלאכותית. המערכת פותחה בהובלת חברת TSG ובשיתוף מפא"ת והרשות לחדשנות יחד עם מרכז רפואי רבין – בתי החולים בילינסון והשרון.

הפרויקט כלל שני נדבכים שנבנו כמשלימים זה את זה, הנדבך הראשון פותח באפריל 2020 והתבסס על המעבדה למחקר של מאושפזי הקורונה בבית החולים. הנדבך השני פותח לאחר כשלושה חודשים והיה אב טיפוס של אפליקציה אונליין התומכת בהחלטות רפואיות למאושפזים במחלקת טיפול נמרץ ופנימית.

האלגוריתם לחיזוי הידרדרות להנשמה מלאכותית פולשנית פותח במלואו עם תוצאה רטרוספקטיבית מעולה המאפשרת חיזוי של מעל 94% מהמקרים שניתנו לאלגוריתם בהצלחה, כאשר בקבוצת המדגם היו כ-1,700 מאושפזים מהמרכז הרפואי רבין. האפליקציה שמריצה את האלגוריתם על נתוני החולים המאושפזים במחלקה בזמן אמת נמצאת בתהליך

החל ממרס 2020, במהלך השבועות הראשונים של גל הקורונה הראשון, הצוות חבר לרופאי המרכז הרפואי בילינסון, יחד עם ראש המלר"ד פרופ' דרשר ורופאי ד"ר יוסי שעה וד"ר עקיבא אסתרסון, כדי לאפיין את הצורך הרפואי לניטור המדדים הפיזיולוגיים מרחוק ואת המדדים הנדרשים לאבחון במיון הראשוני. לאחר מכן סקר הצוות את הספרות האקדמית ביסודיות, גיבש מתווה מערכתי שכלל מערכת המשלבת מכ"ם ואלקטרואופטיקה במטרה לאפשר עמדת בדיקה אחודה לצוות הרפואי, רתם את התעשיות הביטחוניות הגדולות אל תא ואלביט יחד עם הטכניון וחברות הזנק כגון נטירא, בחן יחד איתן טכנולוגיות לניטור שיחלו לפעול במהירות, ואף כתב חלק מהקוד למיצוי מידע מהחיישנים וגילוי דופק ונשימות בחולים באמצעות מכ"ם.

תוך כשלושה שבועות הושלם תהליך פיתוח אב טיפוס טכנולוגי של המערכת בכל אחת מהתעשיות המבוסס על מכ"ם לבדיקת דופק ונשימות ומצלמה תרמית למדידת חום גוף ואף נבחן בהצלחה על כ-200 מטופלי המלר"ד בבילינסון במסגרת ניסוי קליני באישור ועדת הלסינקי. תוצאות הניסוי העלו כי המתווה שגובש נראה מבטיח וכי כבר כעת המערכות מגיעות לכ-90% הצלחה ולעיתים הן אף מדויקות יותר מהאמצעים הרפואיים ששימשו עד כה כמדד הזהב (Gold Standard).

בעקבות הצלחת הניסוי והירתמות הצוותים הרפואיים של בית החולים בילינסון, המערכת נבחנה על עוד מטופלים בבית החולים בילינסון, והוחלט לבחון אותה גם בבתי החולים שמיר ואסותא אשדוד, וזאת במטרה להשלים את תהליך האמ"ר (אמצעי רפואי) למערכות – התהליך הישראלי המקביל לאישור ה-FDA האמריקני.

זכות פריצות הדרך בפיתוח המערכת, היא יועדה לשפר את מערכת הבריאות בעוד דרכים מלבד הטיפול בחולי קורונה:

- מיון ראשוני (טריאז') של מטופלים בקיפוח המודינמי וספסיס.²
- מיון ראשוני באירוע רב-נפגעים של מטופלים קשים אל מול קלים או הפרדה של מטופלים למלר"ד ביולוגי ומלר"ד רגיל.



הצלחה בתוכנית "מגן אבות" אפשרה את התנעת הפיילוט של "מגן חינוך", תוכנית לאומית לבדיקות סקר שבועיות בבתי הספר, שאף היא יוזמה של מפא"ת ובהובלתה (אילוסטרציה: DEPOSITPHOTO)

המידע המגיע למעבדת המחקר עובר התממה (אנונימיזציה) באמצעות בית החולים, ואילו אפליקציית האונליין פועלת בתוך רשת בית החולים והמידע מגיע אליה ללא התממה. הרשומות הרפואיות נקלטות כקבצים במבנה סטנדרטי ומטופלות אוטומטית בתהליך נרמול יחידות מידה, ניקוי שגיאות, מיזוג שדות עם תוכן זהה והשלמת פערים בתהליך המתאים במהירות את האלגוריתם לבתי חולים ולבסיסי מידע שונים. בסוף תהליך זה נוצר בסיס נתונים סטנדרטי, ללא תלות במקור המידע, מוכן ללמידת מכונה.

בעבודה משותפת עם הרופאים פותחה תפיסה חדשנית להנגשת המסקנות של אפליקציית האונליין, המסייעת להם להבין את התוצאה ולקבל החלטות בעזרתה. המידע מוצג לרופא בארבעה חלונות מידע באמצעות האפליקציה של בית החולים בילינסון, המכונה "עלמה" והזמינה לכל רופא במחשב העבודה הרגיל שלו, ללא צורך בציוד ייעודי כלשהו.

ייעול תהליך הבדיקות ותוכנית מגן חינוך

בשנת 1943, במהלך מלחמת העולם השנייה, יזמו שירותי בריאות הציבור האמריקניים פרויקט גדול לאיתור חולי עגבת בקרב המתגייסים לצבא. באותם ימים בדיקה פרטנית לזיהוי עגבת או שלילתה הייתה יקרה.

רוברט דורפמן, כלכלן וסטטיסטיקאי, אשר שירת בחיל האוויר האמריקאי, ובהמשך הפך לפרופסור באוניברסיטת הרווארד, הציע פתרון יעיל לבעיה באמצעות בדיקות קבוצתיות.³ בשיטה

בחינה פרוספקטיבי-קליני. האלגוריתם נבחן על-ידי הרופאים בבית החולים ככלי מעשי שמציל חיים, והם נעזרים בו הלכה למעשה בבואם להחליט אם להנשים או לא. נוסף על כך נבחנים טיפולים משלימים אחרים כמו טיפול מיטבי לחולים מונשמים וחיזוי משך השהייה הצפוי לחולה.

מקור המידע לפרויקט הוא הרשומות הרפואיות האלקטרוניות של בית החולים המתועדות במערכות המידע וכוללות מידע סטטי ומידע דינמי על כל מאושפז. המידע הסטטי כולל פרטים כגון מגדר, גיל וגובה; המידע הדינמי כולל את המדדים מהמוניטורים כגון רמת חמצון, דופק, קצב נשימה, טמפרטורה ולחץ דם. כמו כן נכללות בפרויקט תוצאות בדיקות מעבדה כמו דם, שתן, PCR ומיקרוביולוגיה.

כשבועיים לאחר הקמת "המרכז הטכנולוגי הלאומי למאבק בקורונה", יצאה לדרך התוכנית לפיתוח והטמעה בבתי החולים של מערכת ICU-DIS שנועדה לתמוך בהחלטות רפואיות לטיפול בחולי קורונה המאושפזים בבית החולים, והיא מבוססת על בינה מלאכותית

כמות בדיקות מעבדה ל-10,000 נבדקים כתלות באחוז התחלואה ובכמות המטושים במבחנה

כמות מטושים במבחנה							אחוז תחלואה
30	25	20	15	10	8	5	
629	647	698	816	1,100	1,330	2,050	0.10%
1,057	1,007	988	1,035	1,247	1,448	2,124	0.25%
1,729	1,578	1,454	1,391	1,489	1,643	2,248	0.50%
2,936	2,622	2,321	2,066	1,956	2,023	2,490	1.00%
4,878	4,365	3,824	3,281	2,829	2,742	2,961	2.00%
6,323	5,730	5,062	4,334	3,626	3,413	3,413	3.00%
7,395	6,796	6,080	5,246	4,352	4,036	3,846	4.00%
8,187	7,626	6,915	6,034	5,013	4,616	4,262	5.00%
8,771	8,271	7,599	6,714	5,614	5,154	4,661	6.00%
9,200	8,770	8,158	7,300	6,160	5,654	5,043	7.00%
9,514	9,156	8,613	7,804	6,656	6,118	5,409	8.00%
9,743	9,454	8,984	8,237	7,106	6,547	5,760	9.00%
9,909	9,682	9,284	8,608	7,513	6,945	6,095	10.00%

מהילת מבחנות רבות מפחיתה מרגישות הבדיקה, ולכן האיגום מוגבל לשמונה מבחנות בלבד.

החידוש ברעיון שהובילה מפא"ת היה לבצע את האיגום כבר בעת לקיחת הדגימה – איגום מטושים פרטני. במקום להכניס לאותה מבחנה מטוש עם דגימה מהלוע ומטוש עם דגימה מהנחיריים (כמקובל בבדיקה רגילה), באיגום מטושים פרטני דוגמים בעזרת מטוש את הלוע ונחיר אחד ומכניסים למבחנה פרטנית ובעזרת מטוש אחר את הלוע והנחיר השני ומכניסים למבחנת איגום. אם לדוגמה דוגמים בשיטת איגום מטושים כיתה של 20 תלמידים, מקבלים בסוף התהליך 20 מבחנות פרטניות עם מטוש אחד, כאשר כל מבחנה משויכת לתלמיד, ומבחנת איגום אחת עם 20 מטושים, אשר מייצגת את כל הכיתה. באיגום מטושים פרטני אין צורך ברובוטיקה ייעודית למהילת המבחנות, משום שהאיגום כבר מתבצע בעת הדגימה, וכן רגישות הבדיקה אינה נפגעת מכמות הנבדקים מכיוון שכל המטושים מוכנסים לאותה מבחנת איגום, והמגבלה היחידה היא גודל המטוש ביחס לגודל מבחנת האיגום. בפועל הודגמו איגומים של שלושים מטושים ללא פגיעה ברגישות. ככל שאחוז התחלואה נמוך יותר כדאי לבצע את האיגום עם כמות מטושים גדולה יותר.

שיפור נוסף לשיטת האיגום הוא החלפת התמיסה המשמרת במבחנה בתמיסה מנטרלת-משמרת, כך שכבר בשלב הדיגום הנגיף מנטרל ומושגת בטיחות ביולוגית גבוהה. כמו כן נחסך

זו לקחו במעבדה חלק מכל דגימת דם, ערבבו כמה חלקים ביחד ובדקו את התמהיל. ברוב הפעמים התוצאה הייתה שלילית. כאשר התוצאה הייתה חיובית היו חוזרים לדגימות הדם המקוריות ובודקים אותן אחת-אחת.

באפריל 2020 החלה המעבדה בבית החולים הדסה שבירושלים, בהובלת פרופ' דנה וולף, ליישם את הפתרון שהציע דורפמן על-ידי איגום מבחנות. בעזרת רובוטים יעודיים במעבדה העבירו חלק מהנוזל שנמצא במבחנות המקור למבחנת איגום. שיטה זו חוסכת את כמות הבדיקות, אך מחייבת רובוטיקה ייעודית ומוסיפה שלב בעבודת המעבדה לטובת יצירת התמהיל. כמו כן

במסגרת ההכנות לפיילוט התברר שלצוות המטפלים נכונות נמוכה להיבדק אחת לשבוע, כפי שנדרש מהם, מכיוון שהבדיקות אינן נעימות. עשרות אחוזים מצוות המטפלים לא נבדקו, ובגלל ההשתתפות החלקית בבדיקות הסקר, האפקטיביות שלהן הייתה נמוכה

הצורך לשנע את המבחנה בקירור שנועד לשמר את הנגיף פעיל עד לנטרול שלו במעבדה.

אישור השיטה דרש בחינה בשטח והשוואה בין תוצאות המתקבלות מבדיקות פרטניות עם נוזל משמר אל מול בדיקות באיגום מטושים עם תמיסה מנטרלת-משמרת. כ-2,000 נדגמים נבדקו באותו זמן בשני האופנים, והשוואה זו הוכיחה שהתוצאות המתקבלות בשתי השיטות זהות לכל צורך פרקטי. משרד הבריאות אישר את השיטה, ומאמר על כך פורסם בעיתונות המדעית.⁴

גם לאחר שהשיטה אושרה, נדרשה עבודה רבה כדי לעדכן ולסנכרן את מערכות המחשוב של משרד הבריאות, קופות החולים, הגופים הדוגמים וכל המעבדות הפרטיות כך שכל נדגם המשוך לאיגום יקבל את תוצאת הבדיקה. מפא"ת נרתמה למאמץ ולאחר כמה שבועות של עבודה מאומצת ותיאום בין כל הגופים, הוכן פיילוט איגום מטושים פרטני נרחב ב"מגן אבות", תוכנית לאומית לבדיקות סקר שבועיות בבתי אבות בהובלת מפא"ת.

במסגרת ההכנות לפיילוט התברר שלצוות המטפלים נכונות נמוכה להיבדק אחת לשבוע, כפי שנדרש מהם, מכיוון שהבדיקות אינן נעימות. עשרות אחוזים מצוות המטפלים לא נבדקו, ובגלל ההשתתפות החלקית בבדיקות הסקר, האפקטיביות שלהן הייתה נמוכה. מפא"ת הציעה למשרד הבריאות ולצט"ם (צוות טיפול במגיפות המייעץ למשרד הבריאות) כיצד לדגום את הנדגמים בדרך ידידותית יותר, המגובה במחקרים, ולאשר לחלק מהמטפלים לדגום את עצמם תחת השגחה. ההמלצות התקבלו תחילה עבור "מגן אבות", ואחר כך הן אושרו כהמלצות כלליות. ההנחיות לדוגמי בדיקות PCR בכל הארץ עודכנו בהתאם להמלצות בתחילת נובמבר 2020.⁵

בפיילוט נבדקו תמיד גם מבחנות האיגום וגם המבחנות הפרטניות, והוכח הלכה למעשה שהתוצאות שמתקבלות במבחנות האיגום דומות מאוד לתוצאות שמתקבלות במבחנות הפרטניות. מפא"ת העבירה דו"ח מסכם של הפיילוט להתייחסות של פורום 876 המייעץ למפא"ת (פורום מומחים בהובלת פרופ' צבי ליבנה ממכון ויצמן שנרתמו לתהליך) וקיבל את אישור מנהלת המעבדה המרכזית לנגיפים של משרד הבריאות פרופ' אלה מנדלסון. פיילוט "מגן אבות" סוכם בהצלחה מלאה וכל הגופים הביעו עניין להמשיך במתווה.

ההצלחה בתוכנית "מגן אבות" אפשרה את התנעת הפיילוט של "מגן חינוך", תוכנית לאומית לבדיקות סקר שבועיות בבתי הספר, שאף היא יוזמה של מפא"ת ובהובלתה. שיטת הבדיקות

ב"מגן חינוך" הייתה איגום מטושים פרטני. כ-40 אלף תלמידים ואנשי צוות ב-60 בתי ספר נבדקו במסגרת הפיילוט, שהחל בבית הספר היסודי בן-גוריון בגבעת שמואל בנובמבר 2020 ופעל עד ינואר 2021. הפיילוט סוכם כמוצלח מכמה בחינות: מבחינה בריאותית הוא תיקף את ההנחה שבדיקות סקר מאפשרות לאתר מאומתים לפני שהם מדביקים אחרים, וכך מקדם ההדבקה יורד; מבחינה פדגוגית התאפשרו יותר לימודים פרונטליים לאורך זמן; מבחינה חווייתית והסברתית מספר המשתתפים בתוך בית הספר עלה משבוע לשבוע וכל בתי הספר שנרשמו לפיילוט ביקשו להמשיך בתוכנית. המורים הרגישו בטוחים יותר, ההורים הבינו שבדיקות מפחיתות את הסיכון שהילד שלהם ידבק מילד אחר בכיתה ומדינת ישראל הרוויחה מכך שקיבלה כלי רב-עוצמה המאפשר למערכת החינוך לפעול בנוכחות הקורונה.

בעקבות הצלחת הפיילוט משרד הבריאות אישר את התוכנית, ומשרד החינוך הקים מטה להפעלת תוכנית מגן חינוך בכל הארץ שפעלה לפי קריטריונים פדגוגיים, חברתיים ובריאותיים. בתי ספר באזורים עם תחלואה גבוהה קיבלו אישור לפעול לפי התוכנית, והם אף לימדו ללא חלוקה לקפסולות. בתוכנית נבדקו מעל ל-100,000 תלמידים, היא צומצמה עם דעיכת הגל השלישי, ובסוף אפריל 2021 נסגרה התוכנית. המידע שהתקבל מהתוכנית היה הבסיס העובדתי להחלטה לבטל את מתווה הקפסולות בכל בתי הספר ממאי 2021.

באוגוסט 2021, עם התגברות הגל הרביעי של הקורונה, הוחלט בקבינט הקורונה לחדש את תוכנית מגן חינוך לכל בתי הספר היסודיים. בדצמבר 2021 היו רשומים לתוכנית כ-750 בתי ספר יסודיים בכל רחבי הארץ.

השימוש בשיטת איגום מטושים התרחב, ובנובמבר 2021 מעל ל-90% מהדיגומים נעשו בשיטה זו. השיטה ממומשת בבתי אבות, בתי ספר, נתב"ג מתחמי הבדיקות של פיקוד העורף ועוד. השיטה תרמה להפחתת הזמן לקבלת תשובה לבדיקת PCR, וכיום הוא נמוך מ-24 שעות בממוצע. נוסף על כך, עדכון מודל התשלום למעבדות הביא לחיסכון כלכלי של כ-75 מיליון שקלים בכל חודש.

סיכום

המטה הטכנולוגי של מפא"ת קידם עשרות פעילויות לטובת ההתמודדות עם הקורונה. יחד עם זאת רק חלקן שרדו את מבחן הזמן, כמו הפעילויות שנסקרו במאמר זה: רובוטים למחלקות הקורונה, חישה פיזיולוגית מרחוק, מערכת לתמיכה בהחלטות רפואיות, ייעול הבדיקות על-ידי איגום מטושים ותוכנית מגן חינוך. פעילויות אלה נוגעות במגוון רחב של תחומי המדע: פיזיקה וביולוגיה, הנדסה ורפואה, מדעי המחשב ומתמטיקה, והן משלבות בין חדשנות ויצירתיות לצד יכולת ניהולית להובלה ורתימת מומחים במשרד הביטחון ומחוצה לו. למנעד היכולות המאפשרות למפא"ת להוביל פרויקטים מורכבים ורב-תחומיים יש השפעה לאומית על תחומים כמו רפואה, כלכלה וחינוך. כך סיסמת מפא"ת "הופכים חזון לביטחון" מרחיבה את משמעותה מהביטחון הצבאי הקלסי לעבר ביטחון אזרחי. בראייה לאומית, שומה עלינו לשקול להשתמש ביכולות אלה בתבונה גם בימי שגרה עבור יעדים לאומיים.

ההערות למאמר זה מתפרסמות בסוף הגיליון.

פעילות מפא"ת לייעול תהליך בדיקות הקורונה באמצעות איגום מטושים, שינוי שיטת הדיגום לידידותית יותר ובניית מודל מגן חינוך אינם מבוססים על טכנולוגיות דואליות, אלא בעיקר על יכולת ניהול פרויקטים מורכבים תוך רתימת מומחים מתחומי ידע שונים ומנהלים בכירים



טסים מחוץ לקופסה: הובלת בניין כוח במערכי הכטמ"ם

נוכחות גוברת של כוחות חדשים בשוק העולמי מאפשרת לאויב "דרך כניסה" תקציבי וטכנולוגי נמוך מבעבר ויוצרת אתגרים חדשים למערכת הביטחון. אתגרים אלו מניעים את מנהלת מל"טים לספק פתרונות בקדמת הטכנולוגיה במטרה לשמר את היתרון האיכותי של צה"ל, להוביל את תחום הכטמ"ם בעולם וכפועל יוצא לקדם את התעשיות הביטחוניות בעסקאות ייצוא

אל"ם (מילי) חיים, ראש מנהלת מל"טים / אל"ם ניב, ראש מת"ס / אל"ם (מילי) עמי, יועץ
סא"ל עידן, רע"ן הנדסת מערכת ודיגיטל



פלטפורמת "איתן" תוצרת התעשייה האווירית. שיתוף הפעולה היעיל בין מפא"ת, יחידות צה"ל והתעשיות הביטחוניות הניב פתרונות פורצי דרך לצרכים מבצעיים ולצרכים עתידיים (צילום: דו"ץ)

כטמ"ם – כלי טיס מוטסים מרחוק – נמצאים בשירות מבצעי בצה"ל זה כחמישים שנה. תחילת הדרך הייתה במהלך מלחמת ההתשה (1967–1970), עת הצטיידה מערכת הביטחון בכטמ"מים סילוניים בודדים מתוצרת ארצות הברית, ששימשו בין היתר לצילום בשטח האויב. פיתוח הצילומים בכטמ"מים אלה ומלאכת הפענוח המודיעיני נעשו רק אחרי שהם נחתו

בשטחנו או הונצלו בנקודה המתוכננת. ממלחמת יום הכיפורים (1973) ועד ימינו הלך וגבר השימוש בכטמ"ם. במלחמת יום הכיפורים מערך הכטמ"ם היה בסיסי בלבד. במלחמת לבנון הראשונה (1982) תרם הכטמ"ם לניצחון חיל האוויר על הטק"א (טיל קרקע-אוויר) הסורי. התקדמות ניכרת התרחשה בלחימה באנתפאדה השנייה (2000–2005), כאשר הפך הכטמ"ם לכלי



פלטפורמת "כוכב" תוצרת אלביט. כיום פועלות בכל צה"ל יחידות כטמ"ם המפעילות מגוון מערכות וכלי טיס במרחב הולך וגדל של משימות מבצעיות

לעומתם ישראל זיהתה את הפוטנציאל שבמערכי הכטמ"ם, ובמחצית המאה האחרונה היא מגדילה בהדרגה את ההשקעה בפיתוח מערכות כטמ"ם. פרט לעלות הגבוהה שבהשקעה במטוסים מאוישים, נשאלת השאלה למה להשקיע דווקא בכטמ"ם. השאלה מתחלקת לשתיים: מדוע להשתמש בכטמ"ם, ומדוע השימוש בו הוא כה אינטנסיבי בצה"ל.

כדי לענות על השאלה הראשונה נהוג לחלק את הדרישות ממשיות אוויר לפי ארבע מילים המתחילות כולן באות D: Dangerous, Dull, Dirty, ו-Duration. מסוכן, מטוס הטס מעל שטח אויב נתון בהגדרה בסכנת יירוט והפלה, ולצוות נשקפת סכנת מוות או נפילה בשבי. Dull "משעמם", היכולת לבצע משימות אוויריות ארוכות ולעיתים שגרתיות שאינן מתאימות לצוות מטוס מאויש. Dirty – מלוכלך, ביצוע משימות בסביבה שעלול להיות בה זיהום כימי או רדיואקטיבי שישכן את חיי הצוות במטוס. Duration –

מרכזי ברמה הצה"לית והלאומית.

מערך הכטמ"ם הפך לאבן יסוד בתפיסה המבצעית של צה"ל כפי ששימש במלחמת לבנון השנייה (2006) ובכל העימותים בעזה מ"עופרת יצוקה" (2008) ועד מבצע "שומר החומות". בכל עימות מאז מלחמת לבנון השנייה, מבוצעות יותר שעות טיסה של כטמ"ם מאשר פלטפורמות מוטסות אחרות.

כיום פועלות בכל צה"ל יחידות כטמ"ם המפעילות מגוון מערכות וכלי טיס במרחב הולך וגדל של משימות מבצעיות. שעות הטיסה של הכטמ"מים הן ללא עוררין החלק הגדול ביותר מתוך כל שעות הטיסה המבצעיות בצה"ל.

מנהלת מל"טים במפא"ת אמונה על בניין הכוח של עולם הכטמ"ם במערכת הביטחון ומובילה את מימושו של חזון בעל השפעה מבצעית עתידית לשנים רבות. אחד האתגרים של המנהלת הוא שימור האיזון בין מענה ארוך טווח ובין גמישות למול ההשתנות התמידית של הזירה המבצעית. בניין הכוח העתידי שמובל במנהלת מבוסס על שיתוף פעולה הדוק עם זרועות הצבא, קהילת המודיעין והתעשיות הביטחוניות ובעבודה קרובה עם שאר יחידות מפא"ת. במאמר זה נסקור את הדרך שעשה המערך מתחילת פעילותו ועד היום – עשרים שנה להקמת המנהלת.

מדוע כטמ"ם?

במהלך שנים רבות תעשיות ביטחוניות גדולות וצבאות מובילים בעולם השקיעו בפיתוח מטוסים מאוישים ומערכותיהם.

כיום פועלות בכל צה"ל יחידות כטמ"ם המפעילות מגוון מערכות וכלי טיס במרחב הולך וגדל של משימות מבצעיות. שעות הטיסה של הכטמ"מים הן ללא עוררין החלק הגדול ביותר מתוך כל שעות הטיסה המבצעיות בצה"ל



למטפורת "רוכב שמיים" תוצרת אלביט. ריבוי שכבות כטמ"ם מספק מענה משולב לדרגי לחימה שונים במקביל (צילום: דו"ץ)

עבור מערך מטוסי הקרב, והן על-ידי יחידות בזרוע היבשה, העוסקות במיצי תווך אווירי לסיוע לדרג התמרון בשילוב מלא של מערכי כטמ"ם אוויריים.

איתור התפתחויות טכנולוגיות ויישומן בעולם הכטמ"ם יצר התפתחויות זרועיות פרטניות. כך לדוגמה, מזעור אלקטרוניקה, מזעור מטע"דים (מטענים ייעודיים) והתפתחות סוללות חשמל מודרניות אפשרו את פיתוחן של מערכות כטמ"ם קטנות (כ-10 ק"ג למטוס כולל מטע"ד) המונעות במנועים חשמליים. כלים כאלה, כמו רוכ"ש (רוכב שמיים), שנכנס לשימוש מבצעי בזרוע היבשה לפני כעשור, מאפשרים לזרוע היבשה ממד אווירי

מערכי הכטמ"ם זקוקים להגנת סייבר, הן בממד האווירי של כלי הטיס ושל ערוצי התקשורת והן בממד הקרקעי של תחנות השליטה הקרקעיות; בתחום זה יש תחרות למידה תמידית כדי לאפשר את חופש הפעולה של צה"ל

בלחימתה באופן עצמאי ברום הקרוב לקרקע ומשחררים את הדרג הלוחם ברמת פלוגה, גדוד וחטיבה מתלות מלאה בגורמים חיצוניים לו בעבודה מהאוויר.

ריבוי שכבות כטמ"ם מספק מענה משולב לדרגי לחימה שונים במקביל. השכבות מתאפיינות בדרך כלל לפי גודל ומשקל כלי הטיס מחד ולפי גובה הטיסה האופייני וטווחי הפעולה מאידך. כלי טיס חשמליים קטנים יחסית (עשרות ק"ג) בעלי יכולת טיסה למשך שעות בודדות ובעלי מטע"דים קטנים טסים בדרך כלל בגובה נמוך הם "השכבה הנמוכה". כלי טיס גדולים, כדוגמת ה"איתן" השוקל כחמש טונות ויותר ובעל יכולת טיסה למשך יותר מיממה לטווחים רחוקים ובגובה של עשרות אלפי רגל, הם "השכבה הגבוהה". בין שתי שכבות אלה נמצאת "שכבת הביניים", שהיא עמוד השדרה של מערכי הכטמ"ם בצה"ל.

זמן שהייה, היכולת לבצע משימות ארוכות באוויר במשך יממה או יותר בטווחים רחוקים מישראל. מערכות הכטמ"ם עונות היטב לדרישות אלה, וזאת בניגוד למטוסים מאוישים בכלל ומטוסי קרב בפרט, שגיחותיהם מוגבלות לשעות ספורות, גם כאשר הם מתדלקים באוויר. נוסף על כך, את הכטמ"ם אפשר להתאים לצרכים משתנים.

השימוש האינטנסיבי בכטמ"ם בצה"ל נובע משני גורמים: **הצורך המבצעי הצה"לי** – צורך זה ייחודי לישראל, והוא מתפתח בהתאם לאופי הלחימה בגזרות השונות: השטח העירוני הצפוף בעזה, חזבאללה בערים ובכפרים בלבנון וצבא קונבנציונלי לצד מיליציות בסוריה. בניגוד לצבאות המערביים המובילים, אין לצה"ל צורך לנהל לחימה עם כוחות שנפרסו מעבר לים או במרחק גדול מהגבול לתקופות ארוכות, כדוגמת מדינות הקואליציה בעיראק ובאפגניסטאן.

היכולות הטכנולוגיות, ההנדסיות והמבצעיות – שיתוף הפעולה היעיל בין מפא"ת, יחידות צה"ל והתעשיות הביטחוניות הניב פתרונות פורצי דרך לצרכים מבצעיים ולצרכים עתידיים. זה עשורים שהתעשיות הביטחוניות הישראליות מובילות בעולם בפיתוח ומכירת הכטמ"ם, והצלחתן מאפשרת לצה"ל לשפר את האפקטיביות המבצעית שלו.

פיתוח מערך הכטמ"ם מתאפשר הודות לשיח ההדוק בין מערכת הביטחון וצה"ל לבין התעשיות הביטחוניות – שהן חממה מעולה לייזום פתרונות לצרכים מבצעיים קיימים ולהנבטת טכנולוגיות פוטנציאליות לשדה הקרב העתידי. משנות ה-80 ועד אמצע שנות ה-90 של המאה ה-20 הוקמו יחידות וטייסות הכטמ"ם הראשונות בחיל האוויר ובאגף המודיעין שהטיסו מערכות זהבן ובהמשך מערכות סרצ'ר (גדולות יותר) מתוצרת התעשייה האווירית. במהלך שנות ה-90 הוקם "הפרויקט המרכזי" – פרויקט כטמ"מים גדול ומורכב שלצורך הוצאתו לפועל הוקמה במפא"ת מנהלת מל"טים.¹

מנהלת מל"טים כיום

מנהלת מל"טים יוזמת ומובילה פיתוח, הצטיידות ומבצוע של מגוון מערכות כטמ"ם, הן רב-זרועיות והן זרועיות. המנהלת פועלת בגמישות מול ההשתנות התמידית של זירת הלחימה ובניין כוח מהיר (Time To Market).

אחת מאבני הבניין במנהלת מל"טים הוא ההון האנושי. כוח אדם איכותי מכל חילות צה"ל וכוח אדם מומחה אזרחי מובילים את פיתוחן של מערכות הכטמ"ם בתעשייה הביטחונית בעולמות טכנולוגיים כגון אווירונאוטיקה, מכונות, תקשורת, אלקטרו-אופטיקה, RF והנדסת מערכת, תוך שילוב תפיסת חדשנות והתמחות בעולמות טכנולוגיים חדשים כגון בינה מלאכותית ואוטונומיות. חלק מן המהנדסים במנהלת משרת במקביל בתפקידים מבצעיים בעולם הכטמ"ם. החיבור בין עולם בניין הכוח לעולם המבצעי מקצר ומייעל את התהליך מהפיתוח למבצעיות.

מערך כטמ"ם יחיד מאפשר רב-זרועיות כאשר כל זרוע מתמקדת בביצוע המשימות המבצעיות הרלוונטיות לה. לדוגמה, במשימת זיהוי של כלי שיט המתקרבים לחופי ישראל שותפים חיל האוויר, המטיס את מערכות הכטמ"ם, וחיל הים המופקד על משימת הקצה. רב-זרועיות זו באה לידי ביטוי לדוגמה ב"פרויקט המרכזי", שבו מערכות כטמ"ם מופעלות במקביל הן על-ידי חיל האוויר, האוסף מודיעין ויוצר מטרות



פלטפורמת "שובל" תוצרת התעשייה האווירית. אתגר מסוג שונה הוא שמירת העליונות הטכנולוגית של התעשייה הישראלית (צילום: חיל האוויר)

כל מערכי המודיעין בצה"ל ובאמ"ן לצורך מיצוי המידע הנאסף באוויר בכמויות גדולות ליצירת מטרות מודיעיניות בזמן הקצר ביותר וקרוב לזמן אמת.

אתגר מסוג שונה הוא שמירת העליונות הטכנולוגית של התעשייה הישראלית, לא רק במערכות המשמשות את צה"ל אלא גם בהשוואה לתעשיות בעולם, מול שמירת הסודות של מערכות הכטמ"ם בצה"ל. נתח הארי של הכנסות התעשיות הביטחוניות מגיע מייצוא ביטחוני, והוא המאפשר את מימונו של המו"פ בתעשיות אלה. כיום בתחומים ביטחוניים, אך גם אזרחיים, מורגשת יותר ויותר נוכחות של כוחות חדשים בשוק הטכנולוגי, בראשם סין ולאחרונה עולה גם טורקיה. כוחות אלה מתחרים בתעשיות הישראליות ומחייבים את המנהלת ללוות אותן ולעמוד בקדמת העסקאות הנחתמות בהליכי "ממשלה מול ממשלה" כנציגת ישראל. דוגמה לכך היא החתימה מול משרד ההגנה הגרמני על עסקת הענק האסטרטגית "ברון אדום" להחכרת מטוסי "איתן" לגרמניה, עסקה זו היא הראשונה של ישראל במנגנון ממשלה-ממשלה בתקציב רב מול מדינה מערבית ומרכזית באירופה. העסקה התאפשרה בזכות עבודה מאומצת ושיתוף פעולה בין גופים רבים במערכת הביטחון לתעשיות הביטחוניות, והיה בה אף אירוע סמלי כשכטמ"ם "איתן" כחול-לבן שפותח עבור גרמניה טס בשמי ישראל.

מערכות הכטמ"ם הן סיפור הצלחה ישראלי פורץ דרך בעשורים האחרונים הן בממד המבצעי, הן הטכנולוגי והן הכלכלי-עסקי. התפתחות המערך בשנים האחרונות והשימוש המבצעי הגובר בכטמ"מים מאתגרים כל העת את מנהלת המל"טים. בעזרת חשיבה "מחוץ לקופסה" ועבודה רב-זרועית המנהלת תמשיך להיות ראש החץ של המערך ולשמור על היתרון הטכנולוגי של ישראל.

ההערות למאמר זה מתפרסמות בסוף הגיליון.

כחלק משיטת העבודה של המנהלת וכדי לייצר בסיס לתכנון ולמעקב אחר התפתחויות טכנולוגיות בארץ ובעולם, נבנתה במנהלת "מפת דרכים" לעולם הכטמ"ם. מפה זו משמשת כמגדלור בתכנון בניין הכוח הרב-שנתי של עולם הכטמ"ם במערכת הביטחון.

כיום המנהלת מובילה פרויקט רב-זרועי מרכזי ופורץ דרך שהוגדר על-ידי הרמטכ"ל אביב כוכבי כ"קטר תפיסתי וטכנולוגי"². הפרויקט מנוהל כארגון זמיש (זמין וגמיש), מודל עבודה חדשני במערכת הביטחון שאומץ מהתעשייה בהתאמות הנדרשות, וכן בגישת "הנדסה במקביל", הלוקחת מהנדסים שבדרך כלל מעורבים בשלב מסוים בפיתוח מערכת ומשלבת אותם גם בשלבים אחרים ויוצרת מודל עבודה שמכיל יציבות ודינמיות כאחד. כדי לתמוך בפרויקט הוקמו 15 צוותים תחומיים רב-זרועיים, והוקם מתחם עבודה רב-זרועי המאפשר עבודה בלתי אמצעית של צוות הפרויקט. האתגרים הארגוניים הרבים בתוכנית העולים מעבודה רב-זרועית קיבלו מענה בדמות תפיסת הפעלה חדשנית, מבנה תומך, תהליכים ומנגנונים.

מבט קדימה

תמונת המצב המבצעית הנוכחית מעמידה בפני מערכת הביטחון במפאת אוסף גדול של אתגרים והזדמנויות להוות ולעמיד.

ראשית, יש צורך לפעול בטווחים גדולים לביצוע משימות אוויריות ובאותה העת להישאר חסינים בפני איומי האויב בכל המרחב האופרטיבי של צה"ל בכלל וחיל האוויר בפרט. שנית, מערכי הכטמ"ם זקוקים להגנת סייבר, הן בממד האווירי של כלי הטיס ושל ערוצי התקשורת והן בממד הקרקעי של תחנות השליטה הקרקעיות; בתחום זה יש תחרות למידה תמידית כדי לאפשר את חופש הפעולה של צה"ל. כמו כן, יש צורך מבצעי בהקניית שילוביות דיגיטלית מלאה של מערכי הכטמ"ם עם



קטלניות הלוחם הבודד

החתימה למטב את יכולות הליבה של הלוחם, חשובות ככל שיהיו, לא תצליח לייצר את העליונות הנדרשת. ההסתכלות צריכה להיות רחבה על יכולות הלוחם והמסגרת מול מגבלותיהם, ופיתוח דרכי הנגשת מידע ויכולות בצורה אינטואיטיבית תוך שילוב יכולות טקטיות משולבות אוטונומיה

רס"ן יואב, רמ"ד חי"ר וקומנדו



לצפייה בסרטון של חזבאללה סרקו את הברקוד

אימון ירי של חזבאללה במטרה עם מיגון גוף. ההבדלים בין האמצעים שבהם מצויד כל צד הם זניחים ביחס למיומנות הלוחמים

בלבד, ומטפחים במקביל קריירה מקצועית הרחוקה ממקצוע הלוחם הרגלי.

מטרת מאמר זה היא ניתוח מקצועי של הלוחם הבודד ואמצעי הלחימה הבסיסיים שהוא נושא (נשק, כוונות, תחמושת ומיגון), ובמתאר לחימה אורבני "רגלי" (להבדיל מהעולם התת-קרקעי, שהוא נחלתם של יחידות ייעודיות). הניתוח במאמר ינתק את הלוחם מתהליך ההכשרה שלו ומהמעטפת הארגונית הצבאית המקנות לו עליונות מול האויב ומתבטלות בלחימה בשטח הבנוי.

הנחת עבודה בתחום המיגון האישי היא כי קיים יחס הפוך בין מיגון הלוחם לכושר הניידות שלו, בעיקר עקב משקל המיגון והסרבול שהוא עלול ליצור.

בדו־קרב המפורסם בין דוד לגוליית מתואר כיצד גוליית ממוגן וחמוש לעיפה: "וְכֹכֵב נְחֹשֶׁת עַל רֹאשׁוֹ וְנִשְׁרִיּוֹן קֶשֶׁקְשִׁים הוּא לְבוּשׁ וּמְשָׁקֶל הַשְּׁרִיּוֹן חֲמִשָּׁת אֲלָפִים שְׁקָלִים נְחֹשֶׁת: וּמְצָחָת

צה"ל מצויד במיטב הטכנולוגיה הישראלית והעולמית, והוא יודע להשתמש בה היטב – בים, באוויר וביבשה. שריונרים, לוחמי הנדסה ולוחמים ביחידות אש (ארטילרית או רקטית) נמצאים בעמדת עליונות על האויב. לרוע המזל, האויב מבין זאת היטב, ולכן שואף לפרק את הצק"פ (צוות קרב פלוגתי) ולמשוך מתוכו את החוליה החלשה – הלוחם הרגלי – אל השטח הבנוי הצפוף, המקום הנוח לאויב, שבו אין ללוחם הרגלי הישראלי עליונות.

לוחמי צה"ל, כמו לוחמי האויב, מצוידים בנשק אישי, תחמושת, מיגון, אמצעי ראיית לילה וכדומה. ההבדלים בין האמצעים שבהם מצויד כל צד הם זניחים ביחס למיומנות הלוחמים. בעוד לוחמי האויב משרתים זמן רב יותר במודל של שירות מקצועי ומשפרים את מיומנותם בלחימה, לוחמי צה"ל משתחררים תוך שנתיים מסיום ההכשרה ונכנסים למאגר כוחות המילואים, המתאמנים בתדירות נמוכה יחסית לשמירת כשירות בסיסית



לצפייה בפיתוח של החברה האמריקנית
- Advanced Accuracy Solutions
סרקו את הברקוד



חייל מרינס נושא מיגון ראשי. העמסת הצוואר במשקל רב יותר מהמשקל המומלץ תפגע בתנועתיות הלוחם לאורך זמן

מיגון גוף

מיגון גוף הוא הסוגיה המורכבת ביותר בעולם המיגון האישי. עם מיגון גוף הלוחם כבד ומסורבל, ובלעדיו הלוחם מסתכן בפציעות ואף במוות.² הוספת משקל על גוף הלוחם משפיעה על ביצועיו. המשקל הנישא יוצר עומס פיזיולוגי, ביומכני וסובייקטיבי. הלוחם מוציא אנרגיה רבה יותר, מתעייף מהר יותר, תבנית ההליכה שלו משתנה וחוסר נוחות ותחושת כאב מפריעות לו לבצע משימות בצורה מיטבית. אתגר המו"פ הוא לפתח מיגון אידיאלי שמחד יהיה דק, קל וגמיש ככל האפשר, ומאידך שיצליח להתמודד עם האיומים במתארי הייחוס השונים.

בעוד לוחמי האויב משרתים זמן רב יותר במודל של שירות מקצועי ומשפרים את מיומנותם בלחימה, לוחמי צה"ל משתחררים תוך שנתיים מסיום ההכשרה ונכנסים למאגר כוחות המילואים, המתאמים בתדירות נמוכה יחסית לשמירת כשירות בסיסית

נחשט על רגליו... " (שמואל א, יז: 5-6). לא זאת אף זאת, יש לו מיגון נייד: "...ונשא הצנה הלך לפניו" (שם: 7). ומולו מתואר דוד, הנער: "וילבש שאול את דוד מדיו ונתן קובע נחשט על ראשו וילבש אתו שריון: ויחגר דוד את חרבו מעל למדיו ויאל ללקת כי לא נסה ויאמר דוד אל שאול לא אוכל ללקת באלה כי לא נסיתי ויסרם דוד מעליו" (שם: 38-39). דוד, שאינו מנוסה בשימוש במיגון, מעדיף את ההיכרות שלו עם יכולותיו ומוותר לחלוטין על מיגון. אומנם לא כל לוחם נלחם כמו דוד: "וישלח דוד את ידו אל הפלי ויקח משם אבן ויקלע ויך את הפלשתי אל מצחו..." (שם: 49), אבל השיקול המבצעי ברור. גם בקרב הזה – כמו גם בקרבות רבים אחרים בהיסטוריה – התמרון והמהירות ניצחו את המיגון.

יש מתח תמידי בין רמת המיגון לחיילות הלוחם והאפקטיביות שלו. עם זאת קיימים נתונים רבים בספרות המקצועית על התרומה הישירה של אפודי מגן חסיני קליעים לשרידות לוחמים ועל הפחתה של פציעות, שאלמלא המיגון האישי, סביר להניח שהיו קטלניות. בניתוח פגיעות בצה"ל ובצבאות זרים כמו ארצות-הברית ובריטניה נמצא כי מיגון מציל חיים. מיגון החיילים רווח בכל העולם מקדמת דנא, ואמצעי המיגון מתפתחים בהתאם לסוג האיום על הלוחם – החל באבן, דרך חרב, חנית או חיצים וכלה בקליעים ורסיסים בימינו. את המיגון אפשר למיין לפי סוג האיום (בליסטי, רעש, אש או מכות מכניות) או לפי אזור אנטומי. מאמר זה יתמקד במיגון גוף ומיגון ראש (כולל עיניים ואוזניים).



שני הצדדים הלוחמים מעדיפים להשתמש בנשק המתאים לתחמושת קלה וזמינה מאשר לפתח נשק חדש המותאם לסביבת לחימה עכשווית ולהטמיע אותו

מנתוני המחקר הרפואי הצבאי בתחום הטראומה עולה כי לרוב אי אפשר להציל לוחם עם פגיעה חודרת בראשו. קסדת לוחם מודרנית ממוגנת בעיקר נגד רסיסים וחבטות, ומשקלה דומה למשקל הנשיאה המרבי המומלץ על הצוואר, 1.2-1.4 ק"ג בלבד. העמסת הצוואר במשקל רב יותר מהמשקל המומלץ תפגע בתנועתיות הלוחם לאורך זמן. בצבאות המערב המודרניים יש משקל יתר על ראש הלוחם בגלל אמצעים כמו פנס ראש, אמר"ל, נצנץ לזיהוי כוחותינו, משקפי מגן, אוזניות ומיקרופון. שיפור מיגון הראש נעשה מורכב בגלל מגבלת המשקל, ובגלל היעדר מודל או תקן (לפחות לא גלויים) שיודעים להעריך את הנזק מהדף, את הסיכון לשברים בגולגולת מחבטה או טראומה או את הסיכון לשברים במפרקת הלוחם (חוליה C1) מפגיעה ישירה של קליע בקסדה.

מיגון ראש

יש לציין כי לצבא ארצות-הברית קסדה בשימוש מבצעי, ה-ECH (Enhanced Combat Helmet), ויש כבר עדויות לקסדות עמידות לקליעים שהצילו חיים של לוחמים בצבא ארצות-הברית.³

פתרון שיוכל לשפר את המיגון ולהפחית את העומס על צוואר הלוחם הוא העברת משקל מהקסדה לאפוד. גוף הפיתוח של כוחות היבשה בצבא ארצות-הברית (Army Research

ARL) Army Research

ARL) Army Research

מנתוני המחקר הרפואי הצבאי בתחום הטראומה עולה כי לרוב אי אפשר להציל לוחם עם פגיעה חודרת בראשו. קסדת לוחם מודרנית ממוגנת בעיקר נגד רסיסים וחבטות, ומשקלה דומה למשקל הנשיאה המרבי המומלץ על הצוואר 1.2-1.4 ק"ג בלבד. העמסת הצוואר במשקל רב יותר מהמשקל המומלץ תפגע בתנועתיות הלוחם לאורך זמן



מטול הרימונים האמריקני XM25. בעבר נעשו ניסיונות למצוא קוטר אחר, אך כיום רוב העולם מנסה לשפר את התחמושת דרך הגדלת יכולת השיגור

ששיפרה בצורה ניכרת את עמידות העדשות בדגם החדש. חברת "רפאל" ומפעל "צובה" הצליחו לסנתז את המינרל ספינל ($MgAl_2O_4$) וליצור לוחית "קרמיקה שקופה" עמידה בפני שריטות, דוחה אדים, דקה וקלה בכ-50% מפוליקרבונט תוך שמירה על רמת מיגון דומה. הספינל בצורתו הטבעית משמש כאבן חן, ומשובץ למשל באחד הכתרים המשמשים להכתרת מלכי אנגליה ("אודם הנסיך השחור") ובתכשיטי המלוכה האחרים ("אודם טימור"). לוחיות הספינל כבר משמשות בחלונות של רכבים ממוגנים.

האתגר הטכנולוגי הנוכחי הוא ליצור משקפי מגן בעלי קמירות אנכית ואופקית, ולשמור על משקל דומה למשקל משקפי המגן שיש היום בצה"ל, 40 גרם בלבד.

מיגון אוזניים מפני רעשים

כיום לוחמי זרוע היבשה מצוידים באטמי אוזניים סלקטיביים פסיביים, המגינים מפני רעשים עם מתקף גבוה, כלומר ירי ופיצוצים, אך פוגעים במעט באיכות השמע. יש גם אטמים אקטיביים אלקטרוניים, המאפשרים להפחית רעש באופן משמעותי תוך שמירה על יכולת שמיעה ברמה גבוהה, אך אלו אטמים יקרים וגדולים, מצריכים סוללות, מנתקים את הלוחם משמיעה טבעית וגורמים להזעה במגע עם העור. אטמים הם אומנם המיגון הרווח מפני רעשים ללוחם הרגלי, ולדעתי מומלץ לבחון פתרון משלים מכיוון אחר – עמעם לנשק האישי.

החברה האמריקנית Advanced Accuracy Solutions⁵ היא מורכב מסליל קפיצי המחזיק כבל ברזל לאורך מסילה קשיחה, קצה הכבל חופשי ומאפשר תנועתיות מלאה. הודות לעקרון הפעולה של ה-Reaper אפשר להתאימו בפשטות למערכת קטנה המיועדת למשקל נמוך (כ-3 ק"ג). מערכת זו צמודה למותאר הקסדה ("מגל"), מאפשרת תנועתיות מלאה ומעבירה את משקל הקסדה וצידוד הראש לגב הלוחם.

מיגון עיניים

מיגון עיניים הוא ככל הנראה המיגון החשוב ביותר לתפקוד הלוחם מפני שפציעה בעיניים, אפילו מחלקיק קטן, עלולה להשבית את הלוחם ולהפוך אותו לנטל משמעותי על הצוות. המיגון פשוט לכאורה – משקפי מגן. זרוע היבשה יישרה קו עם העולם בעשור האחרון, והיום מנופקים לכל לוחם משקפי מגן במסגרת "המענה השלם" – ציוד בסיסי שכל לוחם מקבל עם סיום הכשרתו. מיגון העיניים הוריד דרמטית את אחוז פצועי העיניים ביחס לכל הפצועים, מ-11% במלחמת לבנון השנייה ו-9% ב"עופרת יצוקה"⁶ ל-6% בלבד ב"צוק איתן"⁷. דא עקא, המשקפיים עשויים פוליקרבונט, ולכן נוטים להישרט ולצבור אדים. חסרונות אלו מפריעים ללחימה עד כדי כך שלוחמים מוותרים על משקפי המגן.

ראוי לציין שבהצטיידות האחרונה חט"ל הגדירו דרישות חדשות לעמידות העדשות כנגד אדים והובילו פעילות מו"פ



כוונת טלסקופית. שימוש בכוונות טלסקופיות אומנם משפר את הדיוק, אך שדה הראייה שלהן מצומצם, הן טובות לאור יום בלבד והמיקוד בהן מנתק את הלוחם מסביבתו

ארצות-הברית מכתוב – תרמיל מתכלה או קל משקל המפחית את המשקל הכולל של הכדור, כפי שכבר נעשה בפגזי טנקים וארטילריה. הפחתת 10%–15% ממשקל הקליע צפוי לחסוך 2–3 ק"ג מהתחמושת הנישאת. האתגרים שבפניהם ניצב הפיתוח הם שיפור חוזק התרמיל והחיבור לכרכוב והגברת קצב ייצור התחמושת.

כמו כן בשנים האחרונות גופי הפיתוח והרכש של זרועות ארצות-הברית בוחנים קוטר קליע גדול יותר לרובאי (6.8 מ"מ) ולמקלע (6.5 מ"מ). לפי צבא ארצות-הברית, הקטרים האלו יאפשרו מסלול בליסטי שטוח יותר, התנגדות טובה יותר להשפעת הרוח וחדירות משופרת.⁸

עם זאת כשמחברים את ביצועי הנשק והתחמושת הנתונים, טובים ככל שיהיו, עם מגבלות היכולת של הלוחם בשדה הקרב – התוצאה היא כמעט תמיד החטאה, אפילו כשמדובר בחיים או מוות. זאת מכיוון שכדי לפגוע באויב צריך לא רק נשק ותחמושת טובים, אלא גם יכולת לראות את האויב, לכוון אליו בעילות ולסגור עליו מעגל.

כוונות

כוונות אופטיות וסמני לייזר מאפשרים כינון מהיר, התורם בעיקר בלחימה בשטח בנוי, כאשר תגובה מהירה נחוצה

קול הירי מורכב מפיצוץ בבית הבליעה, פליטת הגזים מהקנה והבוים העל-קולי הנוצר ממהירות הקליע. לא ניתן לבטל את השניים הראשונים, ובעצם ההבדל בין "עמעם" ל"משתיק" הוא מהירות התחמושת המשמשת בהם – על-קולית או תת-קולית. שימוש בעמעמים מאפשר שמיעה מבצעית (פקודות וכדומה), מפחית את הנוזק לשמיעה מרעש הירי, מייצב את צליפת הקנה, מקטין את חתימת הירי ומבדל בין הירי שלנו לירי של האויב. רוב היחידות המיוחדות בצה"ל כבר משתמשות בעמעמים, וכמובן שמשמשים בהם גם בעולם.

נשק אישי

למרות השתנות סביבת הלחימה, עולם הנשק האישי לא השתנה דרמטית מאז המצאת ה-M16 ב-1964. גם אנחנו וגם האויב מעדיפים להשתמש בנשק המתאים לתחמושת קלה וזמינה מאשר לפתח נשק חדש המותאם לסביבת לחימה עכשווית ולהטמיע אותו. כיווני פיתוח אפשריים לנשק יתמקדו בהפחתת משקל, מולטי קליבר, ניתוק צימוד עין לרובה והפחתת רתע.

תחמושת קליעית

בצבאות העולם קיימות יוזמות רבות לשיפור התחמושת הקליעית, אך רוב הצבאות הולכים בעקבות הפיתוח שצבא

יותר מאשר דיוק. אולם כשהאויב מקפיד להיחשף לזמן קצר מאוד, גם הדייק הוא גורם משמעותי. הלוחם נמצא בתנועה מתמדת בשדה הקרב, התחמושת שהוא נושא ויכולת הדייק שלו מוגבלות.

כוונות קיימות שעונות על הצורך בירי מדויק, יוצרות בעיות בתחומים אחרים. שימוש בכוונות טלסקופיות אומנם משפר את הדייק, אך שדה הראייה שלהן מצומצם, הן טובות לאור יום בלבד והמיקוד בהן מנתק את הלוחם מסביבתו. לכוונות תרמיות, המאפשרות חשיפה טובה יותר של אדם ביום ובליילה יש עלות גבוהה, קיים הבדל בין התמונה התרמית לבין התמונה במציאות וקשה לזהות באמצעותן את כוחותינו.

מערכת בקרת האש הממוחשבת "פגיון", שפותחה על-ידי חברת סמארט-שוטר ומפא"ת, משלבת בין מהירות ודייק, והיא מעין המקבילה בחי"ר ל"ירי חליפה" בשריון. המערכת מתחשבת בתנועת הלוחם, תנועת המטרה, הבליסטיקה ותזמון הוצאת הכדור ומאפשרת פגיעה בסבירות גבוהה מאוד כבר בכדור הראשון. חסרונות המערכת הם מגבלת טווח הירי, מהירות שחרור הכדור, העלות והמשקל, אך בשל יתרונותיה המובהקים בלחימת "חזה מול חזה" מול האויב, פגיעה מהירה יותר ומדויקת יותר, החליטה זרוע היבשה להצטייד בכמה אלפי מערכות.⁹

מערכת פגיון היא "מחשב על נשק" ויכולה לשמש תשתית ליישומים שונים, כמו כל מכשיר נייד שברשותנו כיום – זיהוי כוחותינו בכוונת, יירוט רחפנים, חיבור למערכת תקשורת פנים כוח וחיישנים שונים, הכוונה למטרות וניווט. עלויות הרכיבים האלקטרוניים, קרי מעבדים, מצלמות ו-GPU, יורדות בשל המגמות האזרחיות ובשל הצורך ביכולות רבות על תשתית זו. הכוונות הבאות יהיו מבוססות מחשב ואלגוריתמיקה כדי להביא ערך מוסף ללוחם.

תחמושת נפיצה וחבלה תחמושת משוגרת

מאז פיתוח אבקת השריפה חלה התפתחות ביכולת לשגר תחמושת במשקל רב לפנים, וכן לגרום לה להתפוצץ כשהיא מגיעה למטרה.

בעולם התחמושת המשוגרת יש פצצות רסס, גז, הארה, נ"ט ונ"ט משולב רסס, וביניהן שולטת ללא עוררין פצצת מטול בקוטר 40 מ"מ, הנורית ממטול ייעודי ובעלת אפקט עוצמתי.

החתימה למטב את יכולות הליבה של הלוחם, חשובות ככל שיהיו, לא תצליח לייצר את העליונות הנדרשת בגלל שתי סיבות: כל מערכת מפותחת בצורה המיטבית ללא התחשבות במערכות אחרות; הלוחם נמצא בעומס קוגניטיבי המקשה עליו למצוא את הפוטנציאל של האמל"ח המעולה שמפותח ונרכש למענו

משקל של פצצת מטול לסוגיה עומד על 200–400 גרם, מתוכם כ-50% הודף והשאר משקל מועיל (האפקט הנדרש).

המגבלה המרכזית של תחמושת משוגרת היא הטווח הקצר, העומד על כ-400 מ' בלבד. מגבלה משנית, בשל המשקל הצנוע, היא אפקט הפיצוץ המצומצם ביחס לפגזי הטנק והארטילריה. בעבר נעשו ניסיונות למצוא קוטר אחר (למשל פרויקט XM25 שלא צלח), אך כיום רוב העולם מנסה לשפר את התחמושת דרך הגדלת יכולת השיגור. זאת כדי להביא יותר משקל מועיל לטווח הקיים או כדי להגדיל את הטווח ולפגוע בנקודה הכואבת ביותר לחי"ר, בין 300 ל-1000 מ', הפער בין יכולות המחלקה לגדוד.

עם זאת ככל שההודף עוצמתי יותר, האפקט על היורה גדול יותר, כך שהגדלת הפצצות מוגבלת ליכולת הגופנית של הלוחם. פתרון אפשרי לבעיה זו הן מערכות הדיפה מופחתות רתע, כמו שיש במערכות שיגור אחרות – הפלטה ראשונית לטווח קצר ומעבר להודף רקטי.

תחמושת מוטלת ידנית - רימוני יד

רימוני הרסס המודרניים (המוטלים ידנית) מיועדים לשטח פתוח, בעוד שהלחימה המודרנית היא בשטחים בנויים, שם חלק גדול מהרסיסים נעצרים בקירות ורכיבים. מכאן שצריך להצטייד ברימוני התקפה אורבניים, דהיינו רימוני הדף ורימונים תרמוברייים, היוצרים אפקט משמעותי בחללים סגורים. ראוי לציין שכפי שפיתוח מנגנון ההשהיה של הרימונים הביא לתפוצתם אצל כל לוחם, כך פיתוח מנגנוני אבטחה אלקטרוניים יאפשר בעתיד להטמיע תחמושת מונחת בקרב לוחמי חי"ר.

אנרגיה

בשל מיעוט האמצעים האלקטרוניים שנושא לוחם בצה"ל, אין כיום אתגר גדול בהפעלתם באמצעות סוללות. עם זאת ככל שצה"ל יצייד את לוחמיו באמצעים רבים יותר, כמו צבאות אחרים בעולם,¹⁰ הוא יצטרך רכיב מרכזי שיספק אנרגיה לכל האמצעים, יחד עם ניהול נכון של האנרגיה.

סיכום

החתימה למטב את יכולות הליבה של הלוחם, חשובות ככל שיהיו, לא תצליח לייצר את העליונות הנדרשת בגלל שתי סיבות: כל מערכת מפותחת בצורה המיטבית ללא התחשבות במערכות אחרות; הלוחם נמצא בעומס קוגניטיבי המקשה עליו למצוא את הפוטנציאל של האמל"ח המעולה שמפותח ונרכש למענו.

ההסתכלות צריכה להיות רחבה על יכולות הלוחם והמסגרת מול מגבלותיהם ("קצה המחר"), ופיתוח דרכי הנגשת מידע ויכולות בצורה אינטואיטיבית תוך שילוב יכולות טקטיות משולבות אוטונומיה ("קצה מרום").

אני מבקש להודות לגורמי המקצוע שהיו שותפים למאמר – סא"ל גיא שושן, רס"ן עודד נגר, סא"ל ל', סא"ל ד"ר אבי בנוב ורס"ן איתי קטקו. תודה מיוחדת לסא"ל ש', מפקדי, וחבר אמיתי, שדוחף אותי קדימה מקצועית ואישית.

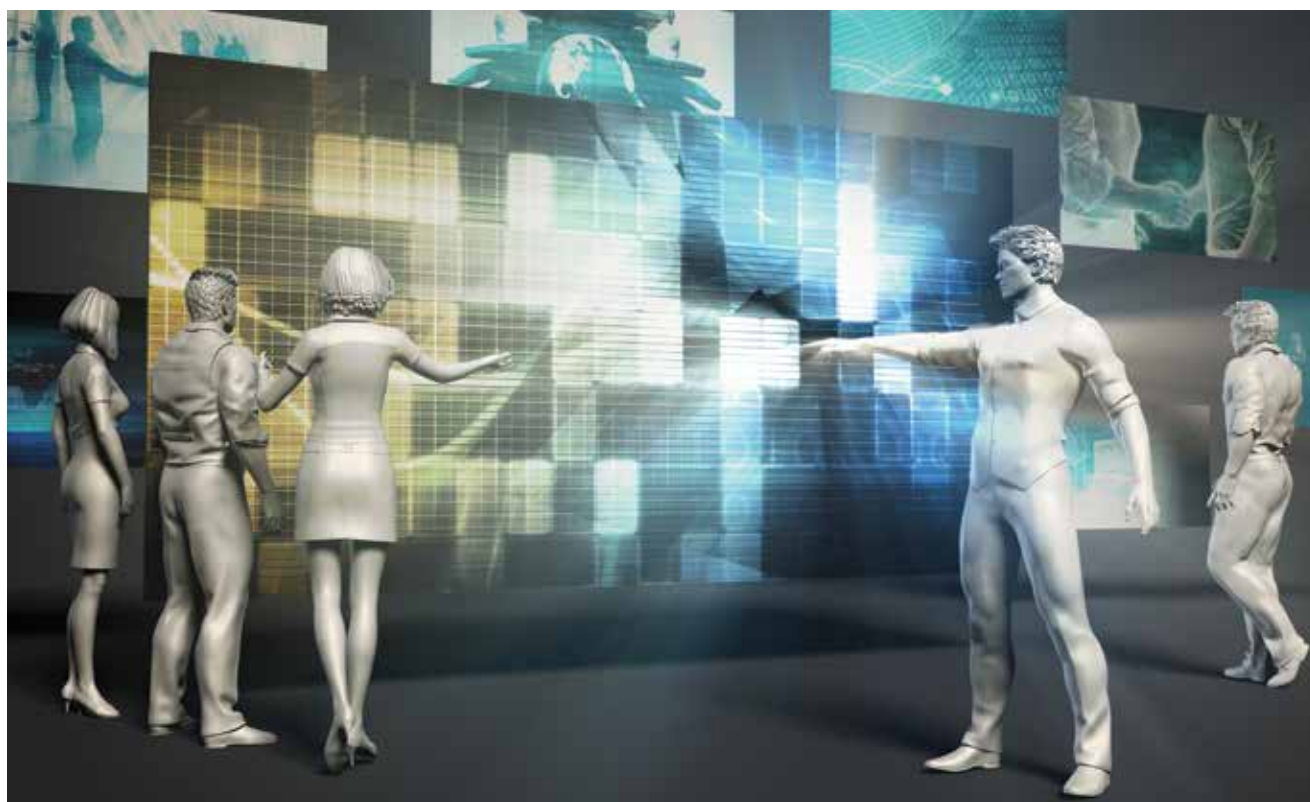
ההערות למאמר זה מתפרסמות בסוף הגיליון.



זום על הספקטרום הביולוגי

יצורים חיים נוטים לחוש את סביבתם ולהגיב לשינויים בה, ותכונה זו היא הבסיס לאיסוף מידע מבוסס ביולוגיה. איסוף מידע סביבתי ידרוש פיתוח מתודולוגיה לעיבוד ולאנליזה של דגימות בשטח, ולפיתוח של אמצעי חישה בהתאם. המפגש בין עולם מדעי החיים לעולמות תוכן אחרים יוכל לייצר ממשק מפרה דו־כיווני

ד"ר מיכל, רת"ח הנדסה ביולוגית



עולם הביולוגיה מכיל ספקטרום שלם של אותות, והיודע לפענח אותם חשוף לרובד נוסף של מידע מודיעיני (אילוסטרציה: depositphotos)

הביטחון. ארצות־הברית מובילה את המהלך כאשר ארגון המו"פ הביטחוני DARPA הקים ב־2014 את ה־BTO (Biological Technologies Office), המשרד השישי מבין משרדיו. כמו כן, ב־2017 הוקמה תוכנית רב־זרועית בארצות־הברית לנושאי ביולוגיה סינתטית. התוכנית עוסקת הן במענים מבוססי יכולות ביולוגיות לצורכי ביטחון (כמו אחסון מידע באמצעות דנ"א, ייצור חומרים ושיפור המודיעין) והן בהגנה מפני איומים ביולוגיים חדשים בעקבות יכולות עריכה גנטית והנגשת השיטות הביולוגיות (biodefense)¹, ביניהם פנדמיה. השאיפה לייצר מענים המבוססים על ביולוגיה לצרכים ביטחוניים מחייבת לפתח ארגז כלים ייחודי לסביבת שדה דינמית, שאינה מבוקרת כמעבדה. בפיתוח עתידי יש לתת דגש לאפיון האות הביולוגי (עוצמה, יציבות, השתנות בזמן ויחס

צלחת פטרי שגדלים בה חיידקים ממי שיפוליים של ספינה מלמדת מאיזה נמל בעולם הגיעה הספינה. אדמה שנתפסה בסולייט הנעל מתעדת את נתיבה של הנעל במרחב על־פי טביעת החיידקים בה. אור פלורסנטי הזורח מחיידקים באדמה מתריע על אזור מוקשים. עולם הביולוגיה מכיל ספקטרום שלם של אותות, והיודע לפענח אותם חשוף לרובד נוסף של מידע מודיעיני. מאמר זה סוקר את קפיצת המדרגה בטכנולוגיות מדעי החיים, הפוטנציאל בהבנת האותות הביולוגיים ומגמת הכניסה של עולם הביטחון לתחום מדעי החיים.

הביולוגיה והביטחון

בעולם ניכרת מגמה ברורה המציבה בקדמת סדר העדיפויות את המו"פ במדעי החיים לצורך מענה על אתגרים בתחום

רצועות המידע השונות של האומיקה

מידע אפקטיבי	סוג המידע	רצועת המידע (omics)	
בקרה על ביטוי גנים (השתקה או ביטוי).	מולקולות כימיות על גבי ה-DNA והכרומטין	epigenomics	
מידע גנטי כולל על אורגניזם, זיהוי האורגניזם.	DNA	genomics	
גילוי וכימות בזמן אמת של עותקי העבודה המשמשים לתרגום הגנים לחלבון. זיהוי תפקוד ומצב האורגניזם.	RNA	transcriptomics	
אוסף החלבונים, תוצרי האורגניזם ומידע יציב על תפקוד האורגניזם וסביבתו.	חלבונים	proteomics	
אוסף המולקולות (כמו שומנים, סוכרים וחומצות אמיניות). תוצרי ביניים המייצגים את המצב התפקודי של האורגניזם.	מולקולות כימיות	metabolomics	תוצרי המטבוליזם
אוסף המיקרואורגניזמים (כגון חיידקים, פטריות ונגיפים) בסביבה מסוימת.	אוקלוסיית מיקרואורגניזמים	microbiomics	אחר
ניתוח תהליכים בתא הבודד (שניתוח רוחבי של תאים עשוי להחמיץ).	תאים	single cell omics	

(AlphaFold). ב-60 השנים האחרונות נחשפו מבנים תלת-ממדיים של כ-170,000 חלבונים בעמל רב באמצעות מדידות קריסטלוגרפיות ואחרות. כעת יהיה ניתן לפצח את המבנה של למעלה מ-200 מיליון החלבונים הידועים בגישה חישובית. זאת דוגמה להתקדמות הטכנולוגית המרשימה במדעי החיים שהתאפשרה בזכות המפגש של שני וקטורים טכנולוגיים שעברו התפתחות בשנים האחרונות.

ליבת המהפכה הביולוגית קשורה בהתפתחויות בטכנולוגיות דנ"א: קריאת המידע הגנטי, כתיבה לפי הזמנה ועריכה גנטית. הטכנולוגיות הבסיסיות הפכו זולות ונגישות יותר, לדוגמה עלות מיפוי גנום האדם המבוסס על ריצוף צנחה מ-14 מיליון דולר ב-2006 לכאלף דולר כיום.³ תחום הריצוף נעשה זול ומהיר לאין ערוך הודות לטכנולוגיות ריצוף מהירות⁴ בשיטות הנשענות

אות לרעש), לממשק עם מערכות אחרות ולשימוש בו תוך שמירה על קיימות.

כמו בתחומים אחרים, מו"פ ביולוגי בעולם הביטחוני יכול לפרוץ את הגבולות המוכרים. פיתוח החיסון לקורונה הוא דוגמה אופיינית לפריצת דרך. כבר ב-2012 תמכה DARPA בפרויקט בחברת מודרנה שמטרתו להגן על בריאות הכוח הלוחם ועמידותו בפני יתושים נושאי וירוס ה-Chikungunya.² DARPA הייתה חלוצה בגישת השימוש בגוף כביו-ריאקטור להפקה של נוגדנים להגנה מפני איומים פתוגניים. גישה זו הובילה לראשונה לחיסון RNA באדם בניסוי קליני ב-2019, ומכאן נסללה הדרך לפיתוח חיסון מבוסס mRNA לקורונה. יחידת מו"פ (מחקר ותשתיות טכנולוגיות) במפא"ת בוחנת ומפתחת טכנולוגיות מתקדמות מעולם הביולוגיה. איתור טכנולוגיות מבטיחות בראשית דרכן ויישומן דורשים אורך נשימה, אך הכרחיים לפתירת צרכים ללא מענה וצרכים עתידיים, כפי שהוכח לאורך השנים. נוסף על כך מפא"ת מקימה מסלול הכשרה עילית אקדמית לעתודה המשלב לימודי חישוביות והנדסה עם מדעי החיים. מסלול זה יכשיר קבוצה איכותית של מועמדים שיפתחו טכנולוגיות בהנדסת מערכות ביולוגיות בשירותם הצבאי ולימים גם בתעשייה הישראלית.

המהפכה הביולוגית

ביוני 2021 חברת דיפ-מינד של גוגל הנגישה לקהילה המדעית בקוד פתוח את היכולת לצפות את המבנה התלת-ממדי של החלבון על בסיס רצף חומצות האמינו ב-90% דיוק

מו"פ ביולוגי בעולם הביטחוני יכול לפרוץ את הגבולות המוכרים. פיתוח החיסון לקורונה הוא דוגמה אופיינית לפריצת דרך. כבר ב-2012 DARPA תמכה בפרויקט בחברת מודרנה שמטרתו להגן על בריאות הכוח הלוחם ועמידותו בפני יתושים נושאי וירוס

מהסיומת הלועזית של הרצועות השונות, לדוגמה genomics (בעברית גנומיקה) מלשון genome. הגנומיקה עוסקת במכלול החומר התורשתי, הגנום של יצורים חיים. זוהי רצועת המידע הנחקרת ביותר שעוסקת בגנים, בתפקודם ובטכנולוגיות הקשורות בהם. הגנומיקה היא חלק מתוך הסט הראשון של ה-omics המתייחס לרעיון המסדר בביווגיה מולקולרית לפיו הדנ"א (רצועת ה-genomics) משועתק לרנ"א (רצועת ה-transcriptomics) ומתורגם לחלבונים (רצועת ה-proteomics). רצועת המידע השנייה בהיקפה מבחינת מחקר ויישום היא המיקרוביום. רצועה זו מתייחסת לכלל המיקרואורגניזמים (בעיקר חיידקים, פטריות ונגיפים) בסביבה נתונה (קרקע, מים, אזורים בגוף וכדומה). התרשים במאמר מפרט את רצועות המידע העיקריות ב-omics ואת המידע האפקטיבי שאפשר להפיק מהן. ככלל, האפיון והכימות של אוסף המולקולות הביוולוגיות מאפשר הבנה מעמיקה של המבנה, הפעילות והדינמיקה של אורגניזם בודד ואוכלוסיות אורגניזמים.

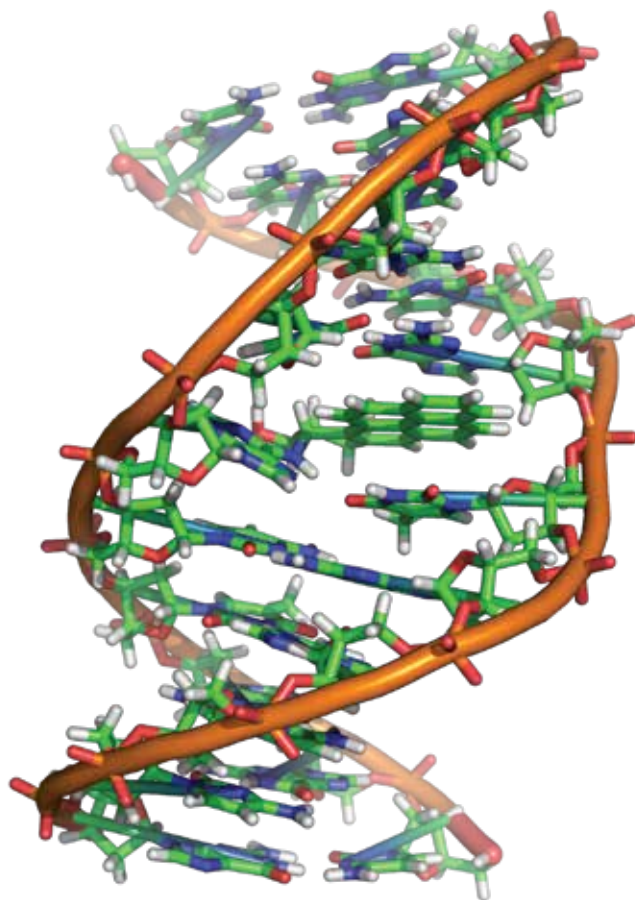
יישומים מבוססי מידע ביולוגי

המידע המולקולרי של האדם משמש כיום להבנת תהליכים פיזיולוגיים וחיוזי מחלות. ניתוח מגוון רצועות המידע של האדם ושל הסביבה יכולים לשמש גם מחוץ לתחום הבריאות.

גנומיקה

אחד השימושים המרתקים במידע גנטי מהשנים האחרונות הוא איתור פושעים שלא הצליחו לאתרם עשרות שנים באמצעות ניתוח של תוכן גנטי, בשילוב כלים מתחום הגנאולוגיה (חקר אילנות יוחסין).¹⁰ השיטה מתבססת על מאגר של נתוני דנ"א שאנשים מעלים לאפליקציות רשת ייעודיות כדי לחפש קרובי משפחה. באתרים אלו ניתן לבנות אילנות יוחסין מהאב הקדמון ולזהות את הצאצאים הרלוונטיים באמצעות מידע גנאולוגי. בגישה זו אפשר לבחון את רצף הדנ"א של חשוד מזירת הפשע (רצף השמור במאגר המשטרת), לאתר אנשים שחולקים דנ"א עם החשוד וכך לעלות על עקבותיו. ב־2018 פוענחה לאחר שנים רבות של חקירה פרשת הרוצח מגולדן סטייט (פעל בארצות-הברית בשנים 1974–1986) באמצעות דגימות דנ"א של בני משפחה מדרגה שנייה ושלישית. במקרה זה נעשה שימוש במאגרי דנ"א של אנשים שכלל לא היו מודעים לחשדות או לקשר המשפחתי עם הפושע. השימוש במידע גנטי למטרות מסחריות וביטחוניות מציב סוגיות אתיות חדשות בהגנת הפרטיות.

לכל אוכלוסיית חיידקים טביעת אצבע ייחודית האופיינית לסביבת החיים שלה. הרכב החיידקים בגוף האדם משתנה בין אזורים בגוף ומושפע ממיקום גיאוגרפי ומאינטראקציות עם הסביבה. גישת המיקרוביום מלמדת על תהליכים, אינטראקציות עם הסביבה ומיקום גיאוגרפי



מקטע דנ"א. הביואינפורמטיקה והבינה המלאכותית סיפקו כלים חישוביים להתמודדות עם היקף המידע העצום שריצוף הדנ"א ייצר

על מיקרופבריקציה, עיבוד תמונה ברזולוציה גבוהה וכוו חישובי. קפיצת מדרגה נוספת מאפשרת ריצוף מקטעי דנ"א ארוכים יותר ובזמן אמת.⁵ אחד ממכשירי הריצוף החדשניים הוא מכשיר המיניון (MinION), מכשיר נייד וזול המרצף דוגמה בשטח עצמו ומנתח אונליין מול ספריות המידע ברשת. הודות לתכונות אלה המיניון משמש באתרים מבודדים.⁶ במקביל להתפתחויות בטכנולוגיות דנ"א, התפתחו הביואינפורמטיקה והבינה המלאכותית (AI) שסיפקו כלים חישוביים להתמודדות עם היקף המידע העצום שריצוף הדנ"א ייצר. בשנים האחרונות הפך המידע הגנטי למקור רב-ערך לדיון רגולטורי ומשפטי, והוא עשוי לשמש מעסיקים ומבטחים. כיום המידע הגנטי משמש ברפואה⁷ לגילוי מחלות (כמו דיאגנוסטיקה מבוססת למידת מכונה), ברפואה מותאמת אישית לחיוזי מחלות ובמוצרי צריכה שונים (אילנות יוחסין⁸ וייעוץ תזונתי מותאם אישית⁹).

הספקטרום הביוולוגי

כמו שאפשר לחלק את הספקטרום האלקטרומגנטי לטווחי גל שונים, כך אפשר לחלק את הספקטרום הביוולוגי לרצועות מידע אשר לכל אחת מהן דרכי איסוף, אנליזה ותובנות שונות. אוסף רצועות המידע הביוולוגי נקרא omics (מדעי האומיקה) שנגזר

מיקרוביום

לכל אוכלוסיית חיידקים טביעת אצבע ייחודית האופיינית לסביבת החיים שלה. הרכב החיידקים בגוף האדם משתנה בין אזורים בגוף ומושפע ממיקום גיאוגרפי ומאינטראקציות עם הסביבה. גישת המיקרוביום מלמדת על תהליכים, אינטראקציות עם הסביבה ומיקום גיאוגרפי.¹¹ ניתוח דגימת מיקרוביום אנושית והשוואתה למאגר דגימות יכולים להעיד על המוצא הגיאוגרפי של אדם, לקשר בין אנשים לחפצים ואף לקשר בין אנשים שונים. ייתכן שאפשר אף לזהות פרופיל אישי על בסיס המיקרוביום. החסרונות בגישת הפרונזיקה המיקרוביומית הם חלוף הזמן, שינויים במרחב והרגישות להפרעות סביבתיות. העמקת מחקר המיקרוביום ותחזוקה מתמשכת של מאגרי מידע עשויים להרחיב את השימוש בגישה זו לעוד תחומים.

אפיגנומיקה

חשיפה משתנה לחומרים סביבתיים כגון חומרי דשן ומוזמים עשויה להשאיר חותם עקבי לעיתים למשך כל החיים ואף לדורות.¹² חותם זה בא לידי ביטוי בשינויים אפיגנטיים. שינויים אלו אינם משנים את רצף חומצות הגרעין של הדנ"א, אלא גורמים לשינויים כימיים (מתילציה או מודיפיקציות בהיסטונים ובכרומוטין). באנליזה אפיגנטית אפשר להבחין בטביעת אצבע ייחודית המצביעה על סממנים חיצוניים כגון צבע עיניים ושיער, וחשיפה לחומרים כימיים כמו מתכות כבדות, חומרים אורגניים וקרינה. השאלות לעתיד האפיגנטיקה בפרונזיקה קשורות ביכולות להצביע על השפעות סביבתיות ואורח חיים במקרים של חשיפה לסמים, מבנה גוף, פעילות, אזור מגורים, מצב סוציאקונומי וכדומה.¹³

מטבולומיקה

במקרים רבים צמחים המצויים בעקה (יובש, חום או היעדר חומרי מזון) יוצרים תגובה המובילה לייצור של מטבוליטים, מולקולות קטנות.¹⁴ כך לדוגמה הרעלה של מתכות כבדות בצמחים מורידה את תהליכי הפוטוסינתזה והנשימה התאית. צמחים אלו מגיבים בהעלאת רמות חומצות אמינו פרולין, היסטידין, אלאנין ועוד. בדוגמה אחרת העקה הסביבתית נגרמת על ידי חומרי דישון מבוססי ניטרט. שילוב של חישה היפרספקטרלית, מולטיספקטרלית ולמידת מכונה מאפשר להבחין בין צמחים שנחשפו לניטרט שמקורו בדשן (קלציום אמוניום ניטרט) לצמחים שנחשפו לניטרט המשמש לחומרי נפץ (אמוניום ניטרט). אנליזה מטבולית של עלים מצמחים חושפת שינויים במטבוליטים הצבעוניים אשר יוצרים חתימה שונה של ספקטרום ההחזרה האופטי.

פרוטאומיקה

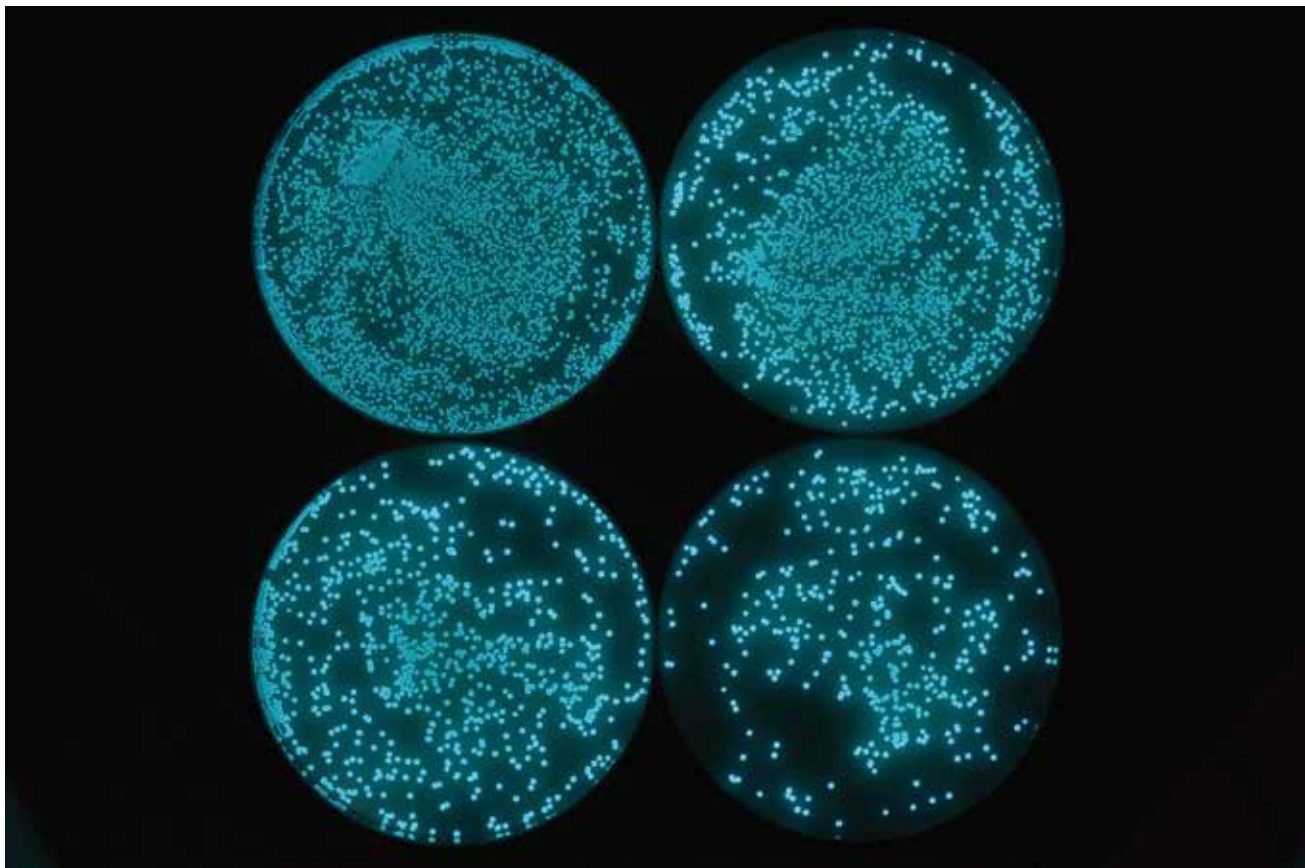
פרונזיקה מבוססת חלבונים צוברת תאוצה בשנים האחרונות. גישה זו מאפשרת ללמוד על התהליכים המתרחשים, ולא רק על המצב הסטטי, ויש לה חשיבות כאשר הדנ"א התפרק או שאינו קיים. עדויות ראשונות מראות כי סוג שיער יכול ללמד על שייכות אתנית, מגדרית, ואף להבחין בין אנשים.¹⁵ השיטה המרכזית היא ספקטרומטריית מסה (mass spectrometry) המאפשרת אנליזה של אלפי חלבונים ופפטידים בתוך שעות.

הנדסת חיישנים חיים

ראוי לציין כי חקר המידע הטבעי הביולוגי הוא רק חלק ממגמת השינוי בתחום מדעי החיים. היכולת המשלימה היא עיצוב מחדש של מערכות ביולוגיות לטובת פונקציונליות רצויה, זו



רחפן מנטר שדה חקלאי. שילוב של חישה היפרספקטרלית, מולטיספקטרלית ולמידת מכונה מאפשר להבחין בין צמחים שנחשפו לניטרט שמקורו בדשן (קלציום אמוניום ניטרט) לצמחים שנחשפו לניטרט המשמש לחומרי נפץ (אמוניום ניטרט) (צילום: shutterstock)



חיישנים חיים בעלי פליטת אור פלורוסנטי. לוקטור הדנ"א של החיידקים הוכנס מקטע פונקציונלי לחיבת מולקולות DNT, המצויות בחומר הנפץ TNT, ומקטע שגורם לחיידקים לפלוט אור כשהם חשים את המולקולות הנדיפות מהמוקשים (צילום: shutterstock)

שלהם הוכנס מקטע פונקציונלי לחיבת מולקולות DNT, המצויות בחומר הנפץ TNT, ומקטע שגורם לחיידקים לפלוט אור כשהם חשים את המולקולות הנדיפות מהמוקשים. כך אפשר לאתר מרחוק את הסכנה. גישת ההנדסה הביולוגית מאפשרת "plug and play" של האלמנטים הפונקציונליים. כך אפשר לתפור לפי דרישה את מטרת הגילוי, אופן הדיווח, השליטה והבקרה, ואף לייצר מעגלים לוגיים מורכבים יותר.

הממשק בין הביולוגיה לתחומי ידע אחרים

חלק מהתמורות אשר חלו בחקר העולם הביולוגי הן תוצאה של ה-Bio-Convergence, המפגש עם תחומי ידע אחרים כגון הנדסה, חישוביות, ננוטכנולוגיה, פיזיקה וחומרים. השתלבות התחומים היא בעלת פוטנציאל להניב יישומים נוספים. התחזית לשנים הבאות צופה מנוע צמיחה משמעותי שמחצית מהיישומים הצפויים בו בשני העשורים הבאים הם מחוץ לתחומי הרפואה (חקלאות, מוצרי צריכה ועוד).²⁰ הפוטנציאל בתחום זוהה על-ידי גורמי הממשל בארץ, ובימים אלו נבחנת הקמה של תשתיות לאומיות לטובת עידוד הקמת מנוע צמיחה לאומי (ועדת תל"מ Bio-Convergence).

סיכום

מוסכם על הכול שמידע לצורכי ביטחון מופק מהספקטרום האופטי, האקוסטי והסיסמי. במאמר זה נסקר הפוטנציאל

המכונה ביולוגיה סינתטית. בתקופת הקורונה עלתה הדוגמה הבולטת לכך, כשהקוד הגנטי של הנגיף התפרסם מיידיית לכל הקהילה המדעית, וזמן קצר לאחר מכן הונדסו חיסונים יעילים במגוון גישות.¹⁶

הטכנולוגיות שהאיצו את ההנדסה הביולוגית הן טכנולוגיות מתקדמות המאפשרות ייצור דנ"א סינתטי וכן שיטות חדשות בעריכת מידע גנטי בתוך אורגניזם חי (CRISPR). גם כאן היכולות החישוביות השתלבו ויצרו גל חדש של יישומים: בתכנון ובעיצוב של חלבונים, תיקון מחלות גנטיות, ייצור מזון ותחליפי בשר, חומרים ואנרגיה בגישות ביולוגיות,¹⁷ אחסון מידע וחישוב מבוסס דנ"א.¹⁸

אחד היישומים הוא הכוונת אורגניזמים לתפקד כחיישנים על-ידי תפירה ייעודית של מעגלי החישה והדיווח של האורגניזם. דוגמה לכך היא פיתוח של חיישן לגילוי מוקשים המבוסס על חיידקי המעי E. coli שעברו הנדסה גנטית.¹⁹ לוקטור הדנ"א

ראוי לציין כי חקר המידע הטבעי הביולוגי הוא רק חלק ממגמת השינוי בתחום מדעי החיים. היכולת המשלימה היא עיצוב מחדש של מערכות ביולוגיות לטובת פונקציונליות רצויה



המפגש בין עולם מדעי החיים לעולמות תוכן אחרים יוכל לייצר ממשק מפרה דו־כיווני ליישומים

ביולוגיה. בשונה מהתפיסה הקלסית של הפרונזיקה, שהשוותה באופן חד־ערכי בין רצפי מידע, גישת האומיקה הסביבתית היא סטטיסטית, יחסית ודינמית. הסביבה הטבעית עשירה בנתונים בעלי חתימה "חלשה" היוצרים יחד תמונה מורכבת. היתוך המידע באמצעות כלים חישוביים תוך כדי אנליזה של רצועות המידע השונות הוא תחום מתפתח שיוכל להניב תמונה הוליסטית על מערכות ביולוגיות.²²

אף עתה קיימים אתגרים משמעותיים לפיתוח חקר המידע הביולוגי הנוגע לאיסוף דגימות רחב, אנליזה מהירה של דגימות, ועיבוד מידע רב. איסוף מידע סביבתי ידרוש פיתוח מתודולוגיה לעיבוד ולאנליזה של דגימות בשטח ולפיתוח של אמצעי חישה בהתאם. המפגש בין עולם מדעי החיים לעולמות תוכן אחרים (הייטק, ביטחון, חקלאות וכדומה) יוכל לייצר ממשק מפרה דו־כיווני ליישומים.²³

פיתוח הספקטרום הביולוגי יאפשר תמונה מודיעינית עשירה יותר המופקת בתמונות הנוף הטבעי, הכוללת הבנה של ההקשרים לתהליכים המתרחשים בשדה, גילוי חריגות, אינטראקציות, לוקליזציה גיאוגרפית ועוד. ליצירת המידע הביטחוני יש פוטנציאל להיות מוכוונת באמצעות הנדסה ביולוגית של האורגניזמים, תוך שימת לב לשמירה על הקיימות ועל כללי האתיקה.

ההערות למאמר זה מתפרסמות בסוף הגיליון.

האגוד בספקטרום הביולוגי להוספת שכבת מידע חדשה, פוטנציאל הנובע מהעולם הביולוגי בכלל ומאוכלוסיות האורגניזמים בפרט.²¹ יצורים חיים נוטים לחוש את סביבתם ולהגיב לשינויים בה. תכונה זו היא הבסיס לאיסוף מידע מבוסס

חלק מהתמורות שחלו בחקר העולם הביולוגי הן תוצאה של ה־Bio-Convergence, המפגש עם תחומי ידע אחרים כמו הנדסה, חישוביות, ננוטכנולוגיה, פיזיקה וחומרים. השתלבות התחומים היא בעלת פוטנציאל להניב יישומים נוספים. הפוטנציאל בתחום זוהה על־ידי גורמי הממשל בארץ, ובימים אלו נבחנת הקמה של תשתיות לאומיות לטובת עידוד הקמת מנוע צמיחה לאומי (ועדת תל"מ Bio-Convergence)



What does the dog's nose know?

כלב הוא פלטפורמה חכמה, בעלת יכולת הרחה יוצאת דופן המשולבת עם יכולת סריקה מהירה, אך הידע על מעטפת היכולות שלו מועט. למרות הניסיון לפתח את הרובוט העתידי שיִדמה בצורה טובה את פעילות הכלב, רחוק היום שבו הרובוטים יחליפו את הכלבים בשדה הקרב

סרן יובל, רמ"דית ביולוגיה ובע"ח



אימון כלבי הרחה לזיהוי סמים בחיל הים האמריקני. שנים של אבולוציה הפכו את הכלב בכלל ואת אפו בפרט לסנסור רגיש, בעל יכולת כיוול מהירה ובעל יכולת סריקה אוטונומית ורגישות לריכוזים מזעריים

ואין חולק על היכולות המיוחדות שהם מביאים לשדה הקרב. כעת כל שנוותר הוא להבין את יכולותיהם ולפתח איתם שפה משותפת. המושג אמל"ח מקיף קשת רחבה, מטיל טמיר ועד רובה, וכולל בתוכו גם את עולם הכלבנות הביטחונית. מחלקת תשתיות כימיה וביולוגיה במפא"ת עוסקת בקידום מחקרים תשתיתיים ויישומיים בתחומים של כימיה וחומרי נפץ, ביולוגיה

המרוץ אחר פיתוח הרובוט המתקדם שיוכל לסרוק שטחים באופן עצמאי, בצורה מהירה ויעילה תוך שילוב חיישנים מתקדמים לחישה ובקרה הוא מרוץ ארוך ומייגע שקו הסיום שלו רחוק והעלויות שלו גבוהות. אך מה אם יתגלה שרובוט כזה כבר קיים? כלבי עבודה במערכת הביטחון כבר מזמן מוכרים כ"לוחמים על ארבע", הם משתתפים במלחמות ישראל ובבט"ש

כמה מחקרים נעשו בשיתוף המחלקה והשפיעו רבות על הבנת מעטפת ביצועי כלבים והפעלתם בדגש על תחום ההרחה:

שיטות הפעלה ו"הכלב האוטונומי"

קיים קשר מיוחד בין הנוהג (הכלבן) ובין הכלב, יש שיאמרו שרק הנוהג של אותו הכלב יודע "לקרוא" אותו כראוי, ועל כן במשימות רבות הכלב נמצא בקשר עין ישיר עם הנוהג ומקבל ממנו משוב תמידי.

בעולם הכלבנות מקובל להפעיל את הכלב עם רצועה, כך הנוהג נשאר צמוד יחסית לכלב ושולט בו באופן מיטבי. הנוהג יכול לשלוח את הכלב גם ללא רצועה, אך בעיקר למרחקים קצרים יחסית. שליחת כלבי תקיפה היא דוגמה לכך. ההתקדמות הטכנולוגית והשימוש במקמ"שים מאפשרים להגדיל את מרחק השליחה של הכלב, אך עם הגדלת המרחק, הביטחון של הכלב מתערער והוא מחפש תמיד את "אישורו" של הנוהג.

מה קורה כאשר סביבת הפעלה רחוקה משמעותית מהנוהג או שאינה בטוחה? אפשר לראות דוגמה לכך בפרויקט משותף עם חטיבת החילוץ וההדרכה.

בפרויקט לסריקת לכודים באתר הרס נמצא שבעזרת הכשרה מיוחדת לכלבים אפשר להפחית את התלות שלהם באדם ובקרבה אל המפעיל. המפעיל הוא לוחם שעבר הכשרה בסיסית ביותר, וכל שנדרש היא פקודת הסריקה, המעוררת את החושים המיוחדים הטבועים בכלב, כדי לסרוק אחר הריח הייחודי של בני אדם בתוך אתר הרס.

כדי לתקשר עם הכלב ולקבל תמונה ברורה יותר על תהליך הסריקה, משולב רחפן המספק תמונה ברורה למפקד הצוות, והוא מעין תחנת ממסר להעברת שמע, מידע על גוים מסוכנים ואף מידע על מצבו הגופני של הכלב כדי לוודא את כשירותו. יש לזכור כי הכלב עצמו הוא כמו סנסור רגיש לאיתור לכודים במהירות, בעוד שהרחפן מספק בעזרתו רמקול פשוט פקודות מרחוק; בעזרת שילוב של הטכנולוגיה עם עולם בע"ח אפשר להרחיב את המשימות אליהן נשלח הכלב ולהרחיקו מהמפעיל.⁵

אינספור ריחות

כלבי הרחה הוכשרו בעבר בצורה טורית: הכלב למד לזהות חומר נפץ מסוג מסוים, ורק לאחר מכן הוא הוכשר לזהות סוג אחר. קיימים אינספור חומרי נפץ בשימוש האזרחי, וצה"ל בוחר מספר מוגבל של חומרי נפץ להכשרת הכלבים לפי איום ייחוס מסוים. ההכשרה הטורית מצריכה השקעה רבה של זמן ותקציב.

נוסף ליחידת עוקץ קיימות לא מעט יחידות ביטחוניות בצה"ל ומחוצה לו אשר עוסקות בפיתוח יכולות כלבנות - חיל האוויר, חטיבת החילוץ וההדרכה, משטרת ישראל, ימ"מ, שב"ס ואפילו משמר הכנסת. רובן ככולן משתמשות ביכולת ההרחה של הכלבים לאיתור חומרי נפץ, חומרים דו-שימושיים, סמים, אנשים או אפילו טלפונים

וכלבנות ורפואה צבאית. שלושת הענפים במחלקה עובדים יחד ותורמים זה לזה. דוגמה לכך מצויה בהכשרת כלבים לגילוי מטענים; כדי להכשיר בצורה הטובה ביותר את הכלב, שהוא בראש ובראשונה כלי ביולוגי בסל הכלים של הכוח המתמרן, יש להכיר מהי בדיוק המולקולה הכימית (או צבר המולקולות) שעליו לזהות.¹ כך משמשות הביולוגיה והכימיה לחקר האמל"ח המורכב הזה שנקרא כלב, והן נתמכות במחקרים רפואיים, למשל מחקרים וטרינריים התורמים להבנת הפיזיולוגיה של יכולות הכלב.

יש לציין כי הקושי במחקר מדעי בשדה שטרם נחקר לעומקו ובסביבה מבצעית הוא קושי מהותי. כאשר הניסויים מצליחים במעבדה, זהו הצעד הראשון בלבד, משום שהאתגר הוא ליישם את המסקנות בשטח יחד עם לוחמים, בסביבה מבצעית שהריחות והרעשים שבה משתנים בכל יום ללא שליטה.

רבים רואים בכלב "פלטפורמת-על", אך נרתעים מהפעלתו לצרכים ביטחוניים בגלל האתגרים הרבים הכרוכים בכך. "הכלב לא בא לעבודה" היא אמירה השגורה בפיהם של מאלפים רבים, משמע אי אפשר להכריח את הכלב לעבוד. נוסף על כך, אין לנו שפה משותפת עם כלבים, וקשה להעביר את המידע שנמצא בראשו של הכלב אל הלוחם, זהו אתגר שמתמודדים איתו בימים אלו.

בראשית

הכלבנות הביטחונית בארץ התחילה עם אישה אחת - פרופ' רודולפינה מנצל. מנצל נולדה בווינה שבאוסטריה ב-1891, היא נישאה לרודולף מנצל, ויחד הם עברו לעיר לינץ והקימו בביתם בית ספר לאימון כלבי תקיפה, הגנה, שמירה וגישוש, וערכו מחקרים בתחום זה שזיכו אותם במוניטין בין-לאומי. מנצל הקימה בקריית מוצקין את המכון לחקר כלבים ואילופם, שם אומנו כלבי יחידת הכלבנים של ההגנה, שמאוחר יותר הפכה ליחידת הכלבנים הראשית של צה"ל. כיום מוכרת במיוחד יחידת הכלבנות המבצעית של צה"ל, עוקץ, אך נוסף עליה קיימות לא מעט יחידות ביטחוניות בצה"ל ומחוצה לו אשר עוסקות בפיתוח יכולות כלבנות - חיל האוויר, חטיבת החילוץ וההדרכה, משטרת ישראל, ימ"מ, שב"ס ואפילו משמר הכנסת. רובן ככולן משתמשות ביכולת ההרחה של הכלבים לאיתור חומרי נפץ, חומרים דו-שימושיים, סמים, אנשים או אפילו טלפונים.

שנים של אבולוציה הפכו את הכלב בכלל ואת אפו בפרט לסנסור רגיש, בעל יכולת כיוול מהירה ובעל יכולת סריקה אוטונומית ורגישות לריכוזים מזעריים. בנושא יכולת ההרחה של הכלבים עדיין רב הניסוח על הגלוי, אבל בזכות מחקר מדעי בתחום, היום יודעים יותר מבעבר. לכלבים יש 200-300 מיליון קולטני ריח באפם, לשם השוואה לבני האדם יש רק כ-5 מיליון.² כשכלב נושם, האוויר הנכנס מתפצל לשני מסלולים - מסלול נשימתי רגיל ומסלול הריח, אשר משתמש ב-12%-13% מכמות האוויר הנקלטת בכל נשימה.³ השטח המכיל תאי ריח בבני האדם הוא כ-5 סמ"ר בלבד, בעוד שאזור זה בכלב נע בין 150-170 סמ"ר.⁴

מחלקת תשתיות כימיה וביולוגיה שואפת להבין לעומק את יכולות ההרחה של הכלב: מה הכלב מסוגל להריח ובאיזה מצב פיזיולוגי אינו מסוגל להריח. הבנה לקויה של יכולות אלו עלולה לעלות בחיי אדם.



כלב ביחידת עוקץ. בעומסי חום כלבים משתמשים באנרגיה רבה ומתקשים לבצע משימות ביטחוניות (צילום: דו"ץ)

יכולת ההרחה של הכלב, מריצים את הכלב על הליכון תוך ניטור מלא של המדדים שלו ולאחר מכן נותנים לו לזהות את חומר המטרה.⁶

תרמורגולציה

הכלב משתמש בחושיו כדי לצמצם את האנרגיה הנדרשת מצידו לביצוע משימות, וכך הוא משמר אנרגיה לאורך זמן.⁷ בעומסי חום כלבים משתמשים באנרגיה רבה ומתקשים לבצע משימות ביטחוניות. במחקר משותף עם אוניברסיטת תל-אביב נבנתה באמצעות רחפן מפת חום מדויקת של שדה ניסוי כדי לבדוק איך כלבים מתנהגים בעומסי חום. בעזרת המפה אפשר היה לראות שבכל משימה שהוטלה על הכלבים, הם בחרו במסלול הקר ביותר, כלומר הם העדיפו את המסלול שבו צריך להשקיע את האנרגיה המזערית ביותר.⁸

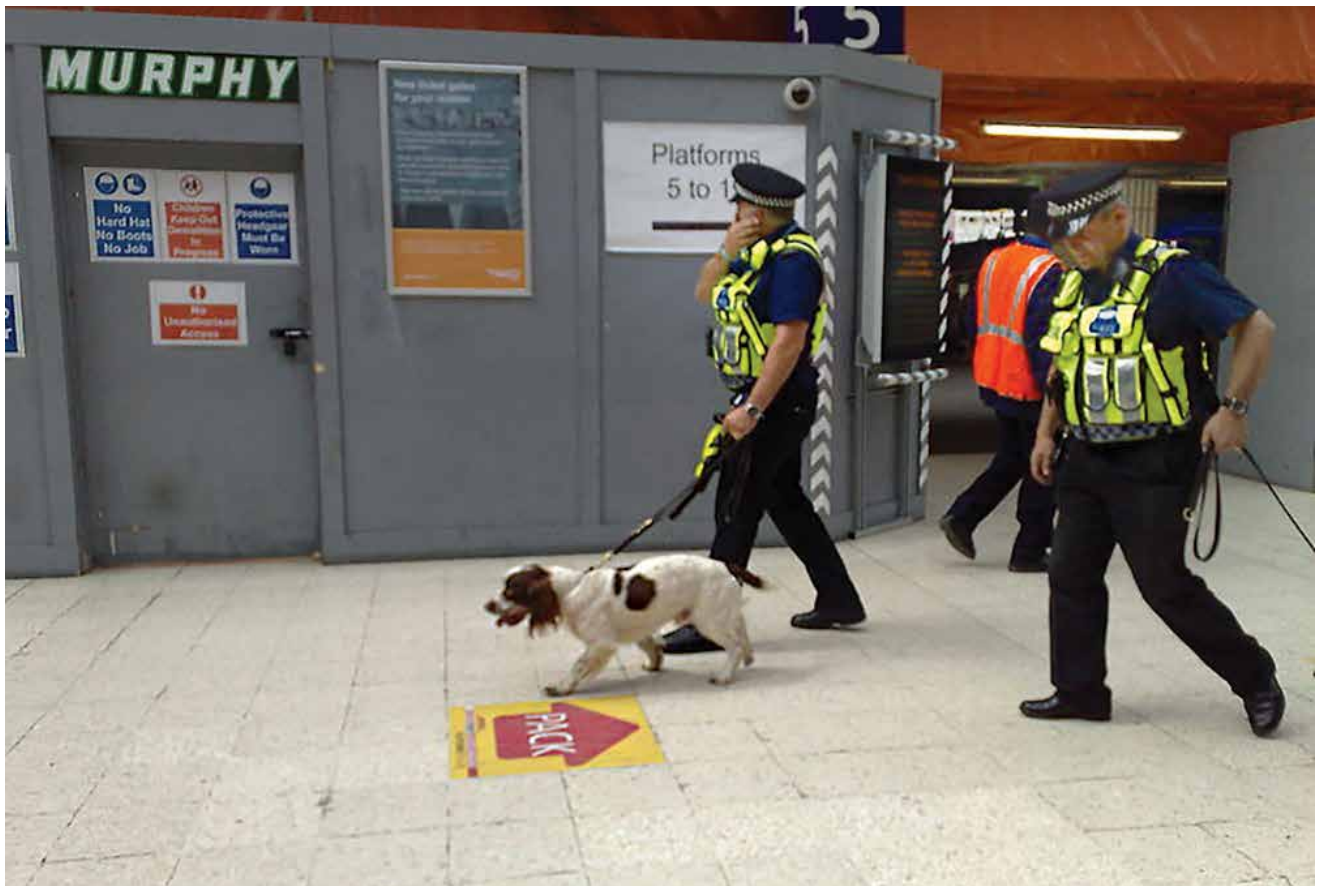
החידקים במעי וחוש הריח

מחקר תשתיתי שנעשה עם אוניברסיטת בן גוריון בחן את השפעת אוכלוסיית החידקים שנמצאת במעיים על תכונות שונות אצל כלבים. אוכלוסיות החידקים אצל יונקים –

מחקר שנעשה בשיתוף אוניברסיטת תל-אביב ויחידת עוקץ ניסה ללמד כלבי הרחה כמה ריחות במקביל, ואכן הוכיח שגם בשיטה זו הכלבים יכולים לזהות כל ריח בנפרד. במחקר המשך אף הוכח שכלבים יכולים לזהות את חומר המטרה כאשר הוא מופיע בתצורות שונות או מעורבב בחומרים אחרים. המשמעויות הנגזרות ממחקר זה הן הכשרה מהירה יותר על חומרים רבים יותר וחיסכון בתקציב וכוח אדם.

"מעבדת קרב" לכלבים

מחקר על התנהגות כלבים הוא אתגר לא פשוט, ויש מעט מאוד מסקנות ודאיות על התנהגותם. לכלב אין סימנים פשוטים המחווים על תפקודו, והסביבה שבה נבחן הכלב תמיד משתנה. מסיבות אלו המחלקה מימנה תשתית מחקר חדשנית בטכניון המכונה "מעבדת קרב" לכלבים. בזכות תשתית זו אפשר לבחון את מעטפת הביצועים של כל כלב בצורה פרטנית, וכך להפחית את חוסר הוודאות בשדה הקרב, תוך שליטה מלאה בתנאי הסביבה: טמפרטורה, תאורה, שמע, הרכב האוויר והקרנת סרטי וידאו על הקירות בטכנולוגיית מציאות מדומה. כדי לבחון למשל את ההשפעה של פעילות גופנית מאומצת על



כלב הרחה בשירות משטרת לונדון. עם התקדמות המחקר, לא רחוק היום שבו ייצרו תרופות לשיפור יכולות ההרחה או יכולות הריצה אצל כלבים

המגבירים את ייצור תאי הדם האדומים בגוף, כך שמולקולות חמצן רבות יותר נקשרות להמוגלובין ומתאפשר סף מאמץ גבוה יותר גם בסביבות מאתגרות.¹¹ המחלקה בודקת את מידת השיפור ביכולות הכלבים לאחר ששהו בתאי לחץ במכון לרפואה ימית בחיפה.

גישה להעצמת כלבים המתגבשת בעולם היא פרמקולוגיה, תוספים כימיים בטוחים לשימוש המשפרים את יכולות הכלבים. הדוגמה הקלסית לשיפור יכולות בני אדם באמצעות פרמקולוגיה היא נטילת ריטלין למיצוי יכולות קשב, שנפוצה יותר ויותר בשנים האחרונות.¹² עם התקדמות המחקר, לא רחוק היום שבו ייצרו תרופות לשיפור יכולות ההרחה או יכולות הריצה אצל כלבים.

סיכום

כלב הוא פלטפורמה חכמה, בעלת יכולת הרחה יוצאת דופן המשולבת עם יכולת סריקה מהירה, אך הידע על מעטפת היכולות שלו מועט. תפקיד מחלקת תשתיות כימיה וביולוגיה במפא"ת הוא להמשיך לחקור ולבחון בכל דרך את המכונה המופלאה שהיא כלב הרחה. אף על פי שמהנדסים מוכשרים מכל העולם מנסים לפתח את הרובוט העתידי שיִדמה בצורה טובה את פעילות הכלב, רחוק היום שבו הרובוטים יחליפו את הכלבים בשדה הקרב.

ההערות למאמר זה מתפרסמות בסוף הגיליון.

המיקרוביום – כבר נחקר רבות באדם ואף הוכח שהוא משפיע על תכונות כמו נטייה להשמנה ונטייה להידבק במחלות,⁹ אך אין ידע רב על המיקרוביום של כלבים. במחקר זה מתבצע ריצוף גנטי לדגימות מיקרוביום ממגוון כלבי ביטחון בארץ, ובמקביל מאפיינים את התנהגות הכלבים הנדגמים בתקווה שבעתיד הקרוב יזוהו אוכלוסיות חיידקים דומיננטיות בכלבי הרחה ובכלבי הגנה, ואף נוכל להשתמש באוכלוסיות אלו לטובת האדם.¹⁰

מבט לעתיד - "העצמת הכלב"

בשנים האחרונות השתגר המונח "העצמת החייל", כל אותם אימונים, טכנולוגיות והכשרות הניתנים לחיילים כדי לשפר את יכולותיהם. כך גם בתחום הכלבנות, המחלקה מקדמת דרכים להעצמת יכולות הכלבים.

אפשר להשוות כלב ביטחון לספורטאי תחרותי: שניהם מתאמנים קשה לאורך תקופה ארוכה כדי שיוכלו לספק את התוצאה הטובה ביותר בשעת האמת, לשניהם צריך לדאוג לתזונה מתאימה ולמשטר אימונים ייעודי עם סרגל מאמצים המותאם אישית לכל פרט. דרכים אלו להעצמת הכלב מתבססות על היכולות הקיימות שלו ומנסות למצות את הפוטנציאל שבו, את קפיצת המדרגה האמיתית המחלקה בוחנת בכמה תחומים אחרים.

ספורטאים ומטפסי הרים שוהים בתאי לחץ ייעודיים, תאים



לקחים היסטוריים בנושא המו"פ הצבאי

כיצד ומדוע נוצרו חידושים טכנולוגיים בתחום כלי המלחמה במהלך ההיסטוריה? מה היו יחסי הגומלין בין "המנהיגות הטכנולוגית" ובין "המנהיגות הצבאית" ומה היה חלקם של גורמי השלטון האזרחיים? אי אפשר לחזות מראש פריצות דרך טכנולוגיות, ולא להסתמך עליהן או לתזמן אותן עם אירועי מלחמה. לכן צבא הרוצה להתכונן למלחמה חייב להבטיח, הרבה לפני שהמלחמה מתרחשת, זרימה הדדית מתמדת בין הדוקטרינה, הטכנולוגיה ומערכות הנשק

□ □
אל"ם (מיל') יעקב צור, לשעבר מח"ט (אגד ארטילרי) ולשעבר רמ"ח אמל"ח במפא"ת,
כיום עורך לקט מו"פ ביטחוני בעולם
□ □

חוסר השליטה בידע הטכנולוגי ובנוסף גם אמצעי ייצור שלא תאמו את צרכיו של הממציא, שהקדים את זמנו. ניתן להוסיף עליהם את הבאים: גורם שמפתיע להיווכח בעוצמת השפעתו, הוא המוסר או האמונה. לדוגמה במאה ה-15 ליאונרדו דה וינצ'י הסתיר רבות מהמצאותיו בתחום הצבאי מאחר שחשש מפני "זדונם של האנשים".
גורם נוסף, הרווח במיוחד במשטרים הדמוקרטיים, הוא הגורם

על פניו נראה שכל אומה, ובמיוחד אומה הנתונה בסכנה, תיתן עדיפות לפיתוח אמצעי לחימה, בעיקר כאשר אין בפניה חלופה בטוחה ומשתלמת של רכש ממקורות זרים. השאיפה הטבעית להישרדות, להמשך הקיום ואף להגדלת השליטה וההשפעה, מספקת מוטיבציה בכיוון זה. מפתיע לכן לראות שפיתוח אמצעי הלחימה נתקל בגורמים שונים שהאטו ובלמו אותו!
הגורמים הברורים והפשוטים ביותר לכך הם הברות שהיא



מלחמת האזרחים בארצות הברית. נחשבת למלחמה המודרנית הראשונה שבה נעשה שימוש באמצעים חדשניים. בציור: קרב צ'יקמוגה, היה לאחד מהקרבות עקובי הדם של החזית המערבית (מקור: ספריית הקונגרס האמריקני)

הכלכלי. לעיתים על פניו אין כדאיות כלכלית לפיתוח עצמאי. הדילמה של קביעת סדרי העדיפות הלאומית איננה חדשה, והיא אך מחמירה עם הזמן. לכך ניתן להוסיף את "כוח ההרגל". קשה לאנשים לוותר או להיפרד מדברים מוכרים וידועים ומדרכי חשיבה מקובלות, שעליהן גדלו. במיוחד נוהגים להאשים בזאת את הגנרלים בצבא. אלה הגנרלים נתפסים כמעט תמיד כגורם הבולם שינויים, לפעמים תוך התעלמות שרירותית מעובדות ברורות.

הגורם האחרון הוא הפער הגדל והולך בין הטכנולוגיה ובין הדוקטרינה² של המלחמה. יש פער מתמיד ולא סביר בין מועד לידתו של חידוש טכנולוגי ובין מועד קליטתו והטמעתו כאמצעי פעיל בצבא. הדבר נכון גם באותם צבאות הנחשבים "פתוחים". פתיחות זו נובעת לרוב מכשלון או מתבוסה שחו בעבר הקרוב, או מתחושה של שעת חירום אמיתית בהווה. ספרים העוסקים בטכנולוגיה צבאית, שנכתבו למשל במאה ה-19, נקראים היום כקוריוז משעשע. לעומת זאת, ספרו של פון קלאוזוויץ על המלחמה, שפורסם לפני יותר מ-180 שנה, או חוכמת המלחמה של סון טסו מלפני 2,500 שנה, עדיין נחשבים רלוונטיים, מפני שאומנות המלחמה מסתמכת עד היום על עקרונות חשיבה קלסיים. הקיפאון היחסי בתחום החשיבה הצבאית הדוקטרינרית בולט על רקע קצב ההתחדשות המתמדת בתחום הטכנולוגיה הצבאית.

הזמן העתיק, ימי הביניים ועד סוף המאה ה-19

כבר בזמן העתיק השתמשו הצדדים הלוחמים באמצעי לחימה שהלכו והשתכללו, שהביאו מדי פעם לניצחונות מפתיעים. היוונים והרומאים למשל הפגינו יכולות גבוהות בשכלול האמצעים. בימי הביניים חלה נסיגה בפיתוחי אמל"ח, אך בכל זאת יש לציין למשל את שריון האבירים, רובה הקשת, הופעת אבק השריפה וניצני הנשק החם. עם התפתחות הצבאות הסדירים ההמוניים חלה קפיצת מדרגה בטכנולוגיה הצבאית בתחומים כמו ארטילריה או לוחמה ימית. חשוב ללמוד את קורות מלחמת האזרחים בארצות-הברית, אשר נחשבת למלחמה המודרנית הראשונה שבה נעשה שימוש באמצעים חדשניים, כמו נשק אישי משופר מאוד, מקלע, הסעת גייסות באמצעות מסילות ברזל, תקשורת טלגרף וארטילריה מדויקת. עם זאת פיתוח הדוקטרינה הצבאית פיגר מאוד לעומת פיתוח האמל"ח. ראוי לציין שהצבאות בעולם לא הפיקו לקחים ראויים ממלחמה זאת ולא טרחו להבין את המשמעויות שלה.

מלחמת העולם הראשונה

במלחמת העולם הראשונה באה לידי ביטוי בולט האסטרטגיה של המגננה³, אף על פי שהופיעו בה לראשונה אמצעי לחימה שהיו מפתיעים: תותח השדה מהיר הירי, המקלע, הביצורים ופקעות גדר התיל התלכדו לרביעייה מהפכנית ששינתה את פני הלחימה. כדי לשבור את הקיפאון בשדה הקרב נעשו מאמצים ניכרים, מדעיים וטכנולוגיים, בשני צידי החזית. המאמצים הללו, שניצלו יכולות שפותחו ושוכללו בעולם האזרחי בעשורים שלפני המלחמה, הולידו בסופו של דבר אמצעי לחימה משוכללים כגון הגז הרעיל, הטנק בתצורתו הגולמית הראשונה, הצוללת המהירה ומטוסי הקרב וההפצצה. המטוסים, שהיו אז תופעה חדשנית, שימשו תחילה לצורכי

מודיעין וקשר, ורק בשלב מאוחר הבינו את משמעות היכולת שלהם וציידו אותם בנשק ובחימוש. שיפורים ושכלולים רבים נעשו בכלי הנשק הקיימים, כמו המקלעים והארטילריה (הקטלן העיקרי במלחמה היה הפגז). התקשורת (רדיו וטלפון), התחבורה הממונעת והלוגיסטיקה השתפרו לאין ערוך (אם כי הסוס נותר אמצעי לוגיסטי חיוני בשדה הקרב). גם מערכת הייצור התעשייתי השתכללה. בצבאות אנגליה וצרפת לבדם הגיעה צריכת תחמושת הארטילריה, לקראת סוף המלחמה, לכדי 13 מיליון פגזים בחודש. בתחום התחבורה נעשו רוב העבודות הקשות על-ידי בני אדם וסוסים, על אף שהיו כלי רכב מתקדמים ואף טרקטורים. הבריטים הובילו לחזית המערבית בזמן המלחמה יותר מספוא לבהמות (5.5 מיליון טונות) מאשר תחמושת.

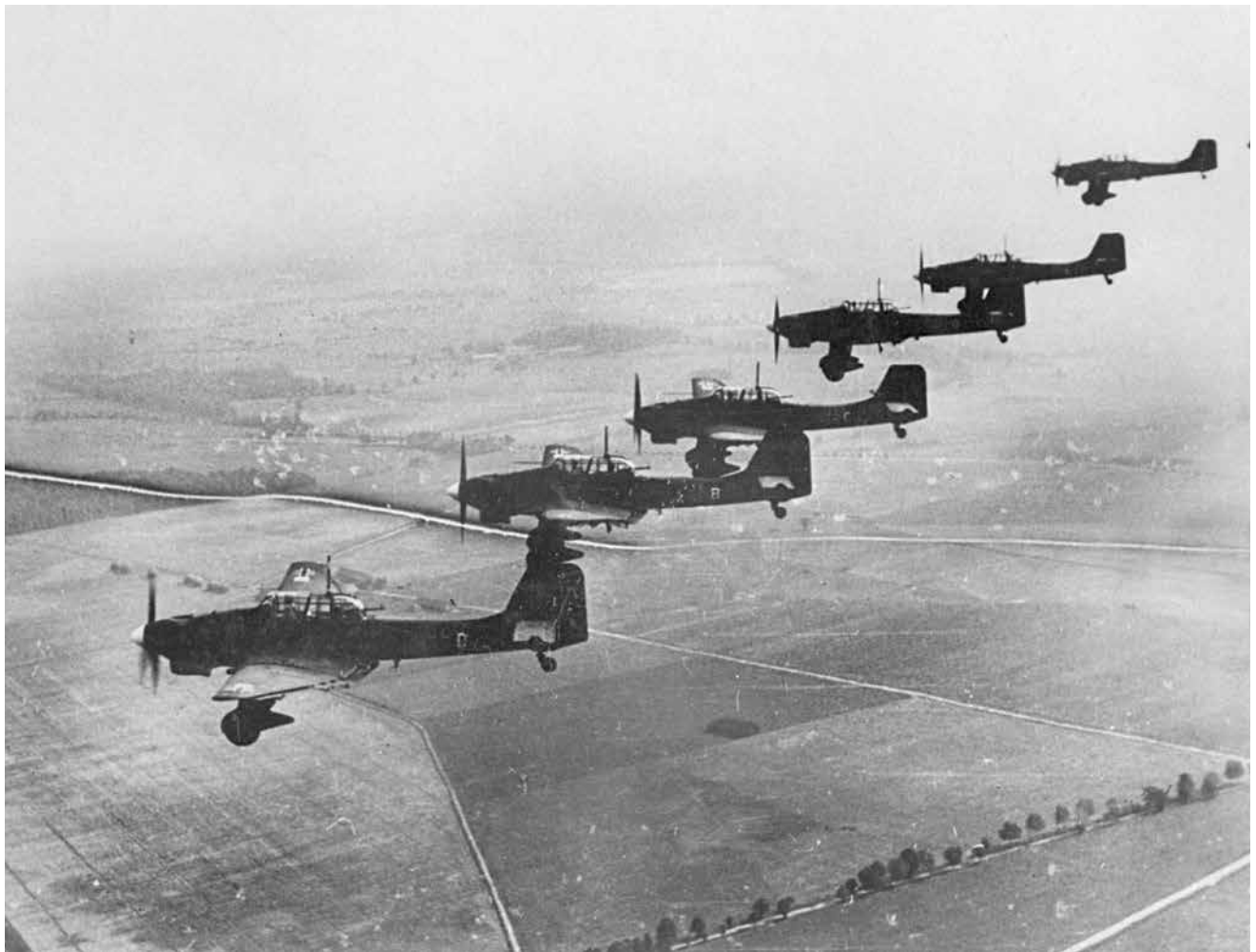
זו הייתה המלחמה הראשונה שמדענים מילאו בה תפקיד חשוב, והיו חלק אינטגרלי בצוותים שנועדו לפתח אמצעי לחימה ואמצעי נגד. בין השאר פיתחו מאוד את היכולת הארטילרית, כולל פגזים בעלי דיוק משופר, גיאופונים לאיכון ארטילריה, הידרופונים לאיכון ביס, פצצות עומק, אמצעי תקשורת, חנ"ם וחנ"ה משופרים ואמצעי עשן. ואולם גולת הכותרת בחידושים היה הטנק⁴, שגרם מהפכה בשיטות הלחימה ביבשה. הגנרלים הגרמנים היו אמנם ספקנים בנוגע אליו עד סוף המלחמה, לא

במלחמת העולם הראשונה באה לידי ביטוי בולט האסטרטגיה של המגננה, אף על פי שהופיעו בה לראשונה אמצעי לחימה שהיו מפתיעים: תותח השדה מהיר הירי, המקלע, הביצורים ופקעות גדר התיל התלכדו לרביעייה מהפכנית ששינתה את פני הלחימה

תפסו את משמעותו, לא הפיקו לקחים ולא דאגו לפיתוחו במועד. גם בצד הבריטי לא חסרו מתנגדים, ולמעשה פותח הטנק באחריות האדמירליות הבריטית דווקא, ולא על-ידי צבא היבשה; במרחב הימי התפתחה לוחמת הצוללות ונגד צוללות, שנחשבה בעיני שני הצדדים כמכריעה ולפיכך נעשו הרבה פיתוחים מעניינים בטכנולוגיה ובטקטיקה בתחום זה.

בין שתי המלחמות

לאחר מלחמת העולם הראשונה נזקקו כל הצדדים לתקופה של התאוששות. הפקת לקחים ופיתוח אמצעי לחימה חדשים לא עמדו בראש מעייניהם של הקברניטים שדאגו לבעיות החברה והכלכלה. השנים הללו אופיינו בהתקדמות בטכנולוגיה האזרחית⁵, למשל בתחומי הרכב והתעופה. גם התקווה לשלום עולמי ופירוק נשק השפיעו מן הסתם. רק אחרי שוועידת פירוק הנשק בו'נבה (1934) התמוטטה סופית התחיל להתעורר מחדש מרוץ הפיתוח והצטיידות. דווקא בעלות הברית, שהיו הצד המנצח, מצאו עצמן תקועות עם מלאי עצום של נשק ותחמושת, כלי רכב, מטוסים וספינות. מלאי זה רבץ כרחיים על הצוואר ובלם יוזמות פיתוח חדשות, כך שהמנוצחים עלו על המנצחים בחידושים ובפיתוח של אמצעי הלחימה.



בליצקריג. בתקופה שבין שתי המלחמות, תחת אילוצים חברתיים וכלכליים קשים, נכשלו האסטרטגים של בעלות הברית בהבנת משמעות המגמות בטכנולוגיה הצבאית. בצילום: מטוסי יונקרס גרמניים מעל אדמת פולין, אוקטובר 1939

מעבודותיהם שהתפרסמו היו דווקא הגרמנים. לאחר המלחמה השביתה ארצות הברית כלים רבים וצמצמה מאוד את הצבא, אבל בכל זאת פיתחה נושאות מטוסים וצוללות ארוכות טווח. חיל המארינס הותאם ללחימה אמפיבית. גם יפן ובריטניה הגיעו למסקנה שנושאות מטוסים הן עניין חיוני והחלו בייצורן. ביחידות האוויר של ארצות הברית היו כמה חידושים גם כן. מ־1930 התחיל פיתוח מזורז של מטוסים וב־1935 כבר הופיע המפציץ הידוע B-17. יש להזכיר כי רק ב־1947 הוקמה באופן סופי זרוע אוויר עצמאית בכוחות המזוינים של ארצות הברית.

הרוסים נתפסו גם הם לרעיון המיכון והסתייעו בגרמנים כמעט בכל תחומי הפיתוח הצבאי כל עוד היו ביניהם יחסים תקינים, ואולם הטיהורים הפנימיים בצמרת הצבא האדום שיבשו תהליכים רבים בקידום אמצעי הלחימה.

בתקופה שבין שתי המלחמות, תחת אילוצים חברתיים וכלכליים קשים, נכשלו האסטרטגים של בעלות הברית בהבנת משמעות המגמות בטכנולוגיה הצבאית, מגמות שהובילו אל "הבליצקריג", אל ההפעלה המסיבית של כוחות אוויריים ואל לוחמת הצוללות שהכריעה כמעט את גורל המלחמה.

הגרמנים הקדימו את כולם כאשר התחילו לפתח צבא יבשה ממוכן, משוריין ובעיקר - מצויד בדוקטרינה מתאימה ליכולות החדשות. הם הקימו חיל אוויר חזק באיכות ובכמות. דווקא האיסור להחזיק צבא גדול ומצויד בנשק כבד חסך להם את הדילמה האם להשאיר את המערכות הישנות, והם היו יכולים לבנות חילות אוויר, ים ושריון מדף חלק, תוך ניצול הטכנולוגיות האזרחיות שפותחו מ־1918. הם הטמיעו את האמצעים החדשים על בסיס תפיסה ותיקה ומגובשת של ניהול הלחימה, עבודת מטה ומערך פיקוד ושליטה. במרחב הימי עסקו בפיתוח צוללות חדישות תוך עקיפת ההסכם וניצול מספנות זרות וכן "אוניות מערכה של כיס". הם ניצלו היטב את מלחמת האזרחים בספרד כשדה ניסויים נרחב, דבר שגם אחרים לא נמנעו ממנו, וניצלו הסכמים עם הרוסים כדי לערוך ניסויים ותרגילים צבאיים בשטחם.

הבריטים עסקו בענייני הציוד הצבאי בעצלתיים ורק ב־1938 התחילו להתעורר בפיתוח אמצעים חדשים, בעיקר בתחום הים והאוויר. אף על פי שבתחום החשיבה הצבאית ובפיתוח גישות מתקדמות חדשות הצטיינו קצינים בריטים בוגרי המלחמה, אלא ש"אין נביא בעירו", ומי שהפיק תועלת אמיתית



דיוויזיית הפאנצר ה-24 של הוורמכט, יוני 1942. היטלר צפה מלחמה מוחצת וקצרה, ולא העריך שיהיה צורך לפתח אמצעים ואמצעי נגד תוך כדי לחימה

לחלוטין בכך שלא דאג מראש לגייס את הכישרונות המדעיים הגדולים של עמו למאמץ המלחמתי. כשנוכח בטעותו החל לכנוס אותם מבין שורות הלוחמים ב-1942, אולם כבר איחר את המועד. על אף שהמדענים הגרמנים הביאו להתקדמות עצומה בזמן קצר (למשל בפיתוח הרקטות ומנועי סילון), לא היה בכוחם לסגור את הפער. יש הרואים במחדל זה את אחת הסיבות לכישלונם של הגרמנים במלחמה.

מקרה דומה התרחש גם בארצות-הברית. גם שם גויסו אנשי מדע והנדסה כחיילים רגילים ורק אחר כך הועברו, אחד אחד, לפעילות מתאימה לכישרונם. היחידים שהיטיבו לפעול היו הבריטים, לבד מניצול מושכל של מדעניהם, השכילו לפעול במשותף עם העולם האקדמי וזרועות המחקר והפיתוח

במהלך מלחמת העולם השנייה היו מדעני הטכנולוגיות הצבאיות גורם כמעט מכריע ובעל השפעה יסודית על הטקטיקה והאסטרטגיה. הצד שהשכיל להפעילם נכון ובמועד יצא נשכר. דווקא הגרמנים נכשלו בנקודה זו

בארצות הברית וזכו להישגים טכנולוגיים גדולים, שהשפיעו השפעה מכרעת על האסטרטגיה והטקטיקה של המלחמה ועל תוצאות המערכה. כלי הנשק המוכרים ממלחמת העולם הראשונה שוכללו מאוד ובסופו של דבר מילאו תפקיד עיקרי בלחימה. בנוסף לכך הופיעו בשדות הקרב המצאות מהפכניות כמו המכ"ם (כולל מכ"ם מוטס), מרעום הקרבה (נ"מ ויבשה), מערכות בקרת אש אלקטרוניות בים ובאוויר, מערכות מתוחכמות ללחימה נגד צוללות, רקטות וטילים בליסטיים, נשק נ"ט, ל"א ונ"א, ניווט - ומעל לכול - הפצצה האטומית. כדאי לציין עד לאן הגיעו אמצעי הלחימה המתקדמים בסוף המלחמה: אצל הגרמנים כבר פעלה ביעילות הרקטה ארוכת

הדוקטרינות היו מוטעות, בחלקן, ולשם תיקון נדרש זמן רב גם אחרי שהתגלתה הטעות.

מלחמת העולם השנייה

מייד עם פרוץ המלחמה הוכיח אדולף היטלר לעולם מה אפשר להשיג באמצעות שילוב מתואם בין טכנולוגיה צבאית מתקדמת לדוקטרינה הולמת. העדיפות בטכנולוגיה ובתורת לחימה ביבשה ובאוויר אפשרה לו להתעלם מהעדיפות שהייתה לאויביו בכוח אדם ובאמצעים "קונוונציונליים", שסבר שהם חסרי משמעות מכרעת בלחימה ניידת. לפני שיצא למתקפה על צרפת אמר היטלר לאנשיו: "חיל הטנקים וחיל האוויר הגיעו בזמן הנוכחי לרמה טכנית, לא רק כנשק התקפה כי אם גם כנשק הגנה, שאותה לא השיגה כל מעצמה אחרת. הפוטנציאל האסטרטגי שלהם למבצעים מובטח על-ידי ארגונם והנהגתם המנוסה היטב, העדיפה על זו שבכל ארץ אחרת".⁶

בניגוד למלחמת העולם הראשונה, שהתאפיינה בתחום המגננה, הפעם הייתה שעתה של המתקפה. הגורמים לכך רבים, ושלושה מהם בולטים במיוחד: הטנק שהגיע במלחמה זו ל"בגרות", עוצמתו החדשה של המטוס, הן כסיוע לכוחות היבשה והן כאמצעי התקפה אסטרטגי, והשיפורים הניכרים בתעבורה המכאנית שהעניקו לצבאות ניידות מוגברת וחוללו מהפכה באסטרטגיה. על סיבות הכישלון המוחץ של בעלות הברית בראשית המלחמה אמר ההיסטוריון הבריטי באזיל לידל הארט: "רעיונותיהם התקדמו פחות משל יריביהם אל מעבר לשיטות מלחמת העולם הראשונה. כפי שאירע תכופות בהיסטוריה, הוליד הניצחון שאננות וטיפח דבקות במקובל, ואלה הביאו לידי מפלה במלחמה הבאה".⁷

במהלך מלחמת העולם השנייה היו מדעני הטכנולוגיות הצבאיות גורם כמעט מכריע ובעל השפעה יסודית על הטקטיקה והאסטרטגיה. הצד שהשכיל להפעילם נכון ובמועד יצא נשכר. דווקא הגרמנים נכשלו בנקודה זו: היטלר צפה מלחמה מוחצת וקצרה, ולא העריך שיהיה צורך לפתח אמצעים ואמצעי נגד תוך כדי לחימה. הוא בטח לחלוטין במה שכבר היה בידי, פקד להקפיא את רוב מאמצי המו"פ ולעבור לייצור המוני. הוא טעה



מלחמת קוריאה, הנחיתה האמפיבית באינצ'ון. המלחמה הפתיעה את האמריקנים ובעלי בריתם כשהיו לא מוכנים ולא מצוידים כראוי. (צילום: צבא ארצות-הברית)

ששימשה את הצי האמריקני הייתה אמורה להימשך כשנה; בסוף המלחמה סיימו את בנייתה בחודשיים.

אחרי מלחמת העולם השנייה

ראשית התקופה עומדת בסימן הלם הנשק הגרעיני וההישענות על תורת "הגמול האדיר", כלומר גורם ההרתעה הגרעיני.⁸ כלי נשק גרעיניים פותחו לכוחות אוויר אסטרטגיים, לטילים החדשים של הצי וכוחות היבשה, ואפילו לרמה הטקטית הם עתידים להגיע. הצבאות הזניחו את הלוחמה המקובלת, ובמערב פירקו במרץ את "מכונת המלחמה" העצומה שנוצרה

הטווח V-2 שמשקלה 15 טונות עם רש"ק של טונה חומר נפץ, טווח של 325 ק"מ ומהירות סופית של כ-5 מאך. הם כבר הפעילו מזל"טים מונחי רדיו לצורכי צילום. אצל האמריקנים כבר הופעלו טילים מונחים ופצצות גולשות בהנחיית טלוויזיה, למשל פצצה משוגרת ממטוס וניתנת להנחיה על-ידי אדם באמצעות מכ"ם, טלוויזיה, או ביותת-אדום שימשה להפצצות מדויקות. פצצה אחרת ושמה Bat, שהייתה טיל מונחה עצמאי בעזרת מכ"ם, פגעה קשות באוניות יפניות ב-1945, והיפנים נקטו נגדה אמצעי שיבוש אלקטרוניים. כל זה לפני יותר מ-75 שנה. מסתבר שכאשר נוצרת תשתית בת עשרות שנים של פיתוחים פורצי דרך בעולם המדעי ובשוק האזרחי, כזו שניתנת ליישום צבאי, וכאשר האומה נלחמת באויביה במלוא ההיקף, אפשר לגייס משאבים, לגבור על בירוקרטיה ושמרנות ולהגיע להישגים מהירים בפיתוח אמל"ח. אולי מפני שהצורך המבצעי נהיר יותר למקבלי ההחלטות בצבא ובממשל, ומפני שאין זמן להתלבטויות, ולפעמים מפני שמתייחסים ברצינות לידעיות המאיימות שהאויב מפתח את אותו אמצעי (ראה סיפור הפצצה הגרעינית). גם ביעילות הייצור המלחמתי היו שינויים מפליגים: במלחמת העולם השנייה ייצרו בארצות-הברית 300 אלף מטוסים ו-86 אלף טנקים. בניית ספינה מסוג "ליברטי"

הסכסוך בקוריאה, שגיבש סופית את חלוקת העולם לשני מחנות יריבים, היה בנוסח מלחמת העולם השנייה - פחות או יותר אותם אמצעי לחימה, אותן טקטיקות ובמידה מסוימת אותם מפקדים

בעת מלחמת העולם וצמצמו את התקציבים לביטחון. המרוץ הגרעיני נמשך כמובן. להפתעת הכול ברית המועצות פוצצה מתקן גרעיני ב-1949 ובריטניה ב-1952. הסובייטים היו פעילים מאוד, בסודיות האופיינית להם, בניצול הישגי הגרמנים בתחום הטילים. הם שיגרו לוויין ראשון לחלל ב-1957 והכריזו בכך על מרוץ חימוש חדש המופנה אל החלל החיצון. הלקחים של המלחמה התעכלו והתגבשו לאט, והשפיעו בעיקר על מבנה מערכות הביטחון והצבאות. בארצות-הברית הוגדרו מחדש הסמכויות והמשימות של הזרועות השונות. גם בברית המועצות נעשו שינויים ארגוניים, עם פיקוד מאוחד לכוחות המזוינים. כתשובה לעוצמה האווירית האסטרטגית של ארצות-הברית, פיתחו הסובייטים מערך משוכלל נגד התקפות מהאוויר. הם גם שקדו על פיתוח טנקים חדשים, כוחות ממוכנים ולוחמת גרילה ומשקיעים הרבה בפיתוח איכותי וכמותי בצי, בעיקר בצוללות. מלחמת קוריאה שפרצה ב-1950 הפתיעה את האמריקנים ובעלי בריתם כשהיו לא מוכנים ולא מצוידים כראוי. הסכסוך בקוריאה, שגיבש סופית את חלוקת העולם לשני מחנות יריבים, היה בנוסח מלחמת העולם השנייה - פחות או יותר אותם אמצעי לחימה, אותן טקטיקות ובמידה מסוימת אותם מפקדים. המעצמות (ובעיקר ברית המועצות) ניצלו את המלחמה כשדה ניסויים לכלים השונים, ובמיוחד למטוסי קרב חדשים. אחרי המלחמה ניסו בארצות-הברית להפיק לקחים ולנקוט מדיניות של "מראה חדש" לכוחות המזוינים, בעיקר באוויר ובים (נושאות מטוסים). עם עליית ג'ון קנדי לנשיאות ניכרה התאוצה הגוברת של המרוץ הטכנולוגי. מחלוקת קשה פרצה בין המנהיגות הצבאית למנהיגות המדינית-אזרחית בשאלה בידי מי יש להפקיד את הסמכות והאחריות לקבלת ההחלטות על מגמות הפיתוח והרכש של הציוד הצבאי. לבסוף הייתה ידו של "האגף אזרחי" על העליונה והוקמה זרוע מו"פ אזרחית.

גם המלחמה הארוכה בווייטנאם, על אף שהופיעו בה כמה חידושים שבלטו בתחום הלחימה מהאוויר והשימוש במסוקים ובמסוקי קרב, הייתה בסופו של דבר, כמו קודמותיה, בעיקר לחימה של חיילי החי"ר שהתבוססו בבוץ. מלחמה זו היא דוגמה לכך שלא הצד המצויד באמצעים החדשים יותר מנצח, אלא הצד הנחוש יותר. תופעה זו אפיינה גל שלם של מלחמות דה-קולוניאליזציה בעשורים שלאחר מלחמת העולם השנייה, שבהן מחתרות וכוחות גרילה מצוידות בנשק פשוט גברו על צבאות מערביים מתקדמים ומצוידים היטב. אלה גילו להפתעתם כי אמצעי לחימה מודרניים לבדם אינם פתרון קסם.

קצת על השמרנות ועל תרופות אפשריות

ראוי להתמקד בכמה תופעות בולטות ולעקוב אחרי התפתחות אמצעי לחימה מסוימים ויחסי הגומלין שלהם עם אמצעי הנגד שהתפתחו במקביל. דוגמאות טובות הן ההתמודדות המתמשכת בין אמצעי החימוש לדורותיהם ובין אמצעי המיגון. כך גם הפרשים מול הטנקים, המטוסים בשדה הקרב מול אמצעי הנגד, ויש עוד רבים.

המילה "שמרנות" חוזרת שוב ושוב במאמר, ולא בכדי. תכונה אנושית זו, שבתחומים רבים אין בה שום רע, היא מסוכנת כאשר עוסקים בחידושי הטכנולוגיה הצבאית. התעלמות מעובדות ברורות ואטימת המוח מלהבין לקחים חד-משמעיים, המיטו בעבר אסון על אומות. מי הם הנתפסים בדרך כלל כשמרנים?

אלה אנשי הצבא המקצועיים, כמובן. להלן כמה ציטוטים עוקצניים שנכתבו על השמרנות שלהם. דיקסון כתב: "שמרנות יסודית ודבקות במסורת ישנה"; "העדר היכולת להיבנות מלקחי העבר... הימנעות משימוש, או שימוש שלא כהלכה, בטכנולוגיה הקיימת"; "חשד עמוק כלפי החדש והמזרז"; "התנגדות לקדמה מדעית"; פיתוח מנגנונים של "התנגדות עיקשת לאי-ודאות הצפונה בחדשנות, בחידוש ובאמצעים שמעמיד המדע לרשות הלוחמה".

לידל הארט מאופק קצת יותר כשהוא אומר (1935): "הגנרלים והאדמירלים אינם קצרי-יד, אלא שהחובות המוטלים עליהם הינם מעבר ליכולתם. מקור מגבלותיהם אינו טמטום מלידה - כפי שנוטים לראות זאת אנשים מאוכזבים - אלא התפתחות המדע שערערה את יסודות הטכניקה שלהם". "זאת ועוד, בדבקותם במסורות העבר, נהפכות שאלות טכנולוגיות מעיקרן לשאלות של אמונה, כמעט אמונה דתית, שאין להעמידן לבחינה הגיונית, ושלמענה כמעט כל אמצעי כשר, כולל הונאה עצמית וגם הונאה ביועדן, של הדרג העליון בצבא ואפילו של הדרג המדיני הממונה על הצבא".

כיצד מתגברים על הבעיה? חוקרים סבורים כי אפשר לקדם מודרניזציה וקליטת חידושים באמצעותם של קצינים יחידים ("משוגעים לדבר") ולעתים לא ממושמעים, וגם על-ידי לחצים

מאחר שתפקידו של הצבא לשמור על הקיים, מפקדיו נוטים להתמקד בבעיות ההווה. לנוכח האחריות הכבדה המוטלת עליהם, והסיכון הגדול במקרה של טעות, מנהיגי הצבא נוטים "ללכת על בטוח" ולא נוטלים סיכונים מיותרים

מדיניים ותעשייתיים, ובמקרים השכיחים יותר - על-ידי מידע על קליטתם של אותם חידושים אצל האויב. אפשרות נוספת להחזיר מחשבות חדשות לצבא, כך ממליץ לידל הארט, היא להציג אותן "לא כמשהו החדש מן השורש כי אם כתחיית, בלבוש חדש, של עיקרון או של נוהג מקודש, מסורת שנשתכחה". כך קרה כאשר התעוררה התנגדות למיכון הכוחות היבשתיים. התומכים במיכון טענו שהרכב המשוריין הנייד הוא ביסודו של דבר יורשו של הפרש המשוריין ועל כן הוא האמצעי הטבעי להשיב לתחייה את תפקידו המכריע של חיל הפרשים בדורות שחלפו (לכן כינו את יחידות השריון הראשונות "קבלריה" כמו יחידות הפרשים לשעבר). משום כך חשוב להקנות לאנשי הצבא הנועדים לקידום אל הדרג הקובע והמחליט השכלה רחבה, כולל השכלה טכנולוגית יסודית. רק כך יהיו אנשי הדוקטרינה ערניים להתפתחות הטכנולוגיה ויידעו לזהות "הזדמנויות". בשעת מיון הקצינים לקידום, יש לתת משקל מכריע לתכונת ה"פתיחות" של הקצין, לכושרו ולנכונותו "לספוג" רעיונות חדשים, גם אם אינם מקובלים בציבור.

מאחר שתפקידו של הצבא לשמור על הקיים, מפקדיו נוטים להתמקד בבעיות ההווה, או מקסימום בעתיד הקרוב ("הקדנציה שלהם"), זאת במיוחד כאשר ניצבות לפנייהם בעיות



מערכת שרביט קסמים. רק בעת מלחמה משתנות רבות מהנורמות. המערכת פתוחה יותר להקשיב וזריזה בתגובתה. בתמונה משוגר הטיל המיירט בניסוי המוצלח בדצמבר 2015 שבסיומו הפכה המערכת למבצעית

יותר להקשיב וזריזה בתגובתה. יש הרבה יותר משאבים, פחות ויכוחים ופחות שמרנות. הצורך המיידי בפתרונות חדשים מוליד רעיונות מפתיעים, תהליך הפיתוח והניסויים מזורז ושונה לחלוטין, וכך תהליך חידוש התו"ל והטמעת האמצעים. תופעה נוספת במצב מלחמה היא נכונות של הדרג המדיני והאזרחי להתערב, להכריע מחלוקות בצבא ולפעמים לכפות החלטות קשות ולפתוח "מחסומים". תפקיד כזה מילא וינסטון צ'רצ'יל בבריטניה בעת מלחמות העולם, ויש דוגמאות נוספות. בשעת מלחמה גם המדענים והמהנדסים מתאמצים יותר מהרגיל. אנשים שתחום הטכנולוגיה הצבאית אינו מעניין אותם ואפילו דוחה אותם, נרתמים כעת בהתלהבות לשיתוף פעולה עם

של ביטחון שוטף. לנוכח האחריות הכבדה המוטלת עליהם, והסיכון הגדול במקרה של טעות, מנהיגי הצבא נוטים "ללכת על בטוח" ולא ליטול סיכונים מיותרים. שינויים - הן באמצעי לחימה והן בתו"ל ובארגון - מערערים את שיווי המשקל הקיים, מקשים על המפקדים וטומנים בחובם סיכון שאינו תמיד "סיכון מחושב". בזמנים של רגיעה נוח יותר להתעלם, לשלם מס שפתיים ולמצוא נימוקים משכנעים מדוע אין צורך, או אין אפשרות לשנות. בדרך כלל מתעוררים מהאשליות כאשר כבר מאוחר מדי. צייטוט "טרי" מפיו של קולונל דאגלס מקגרורו, מחבר הספר **השתנות תחת אש** (שהרמטכ"ל רא"ל אביב כוכבי קבע כספר חובה לקריאה לקציני צה"ל): "בכל פעם שמגיעות יכולות חדשות, הצבא מנסה לדחוס אותן לתוך התשתית הקיימת, לתוך יחידות וכלי נשק שכבר נמצאים בשימוש, במקום לעשות את הצעד המתבקש: לעצור, לשלוף עט ודף נייר ריק, ולתכנן מחדש, לפי היכולות שנוספו". וכתב לידל הארט: "צבאות לומדים רק מתבוסה", ואכן דרושה לפעמים תבוסה גדולה וכואבת כדי שהלקחים יופקו, יילמדו ויביאו לעיון מחדש בדוקטרינה ובטכנולוגיה המשרתת אותה. רק בעת מלחמה משתנות רבות מהנורמות. המערכת פתוחה

בשעת מיון הקצינים לקידום יש לתת משקל מכריע לתכונת ה"פתיחות" של הקצין, לכושרו ולנכונותו "לספוג" רעיונות חדשים, גם אם אינם מקובלים בציבור

הצבא, מסייעים בהבנת הצרכים המבצעיים, באפיון אמצעים חדשים או אמצעי נגד, בפיצוח הבעיות הטכניות ובפיתוח מהיר וייצור המוני. אולם עם תום המלחמה נעלמת המוטיבציה, והכול שבים להתנהלות המקורית. גם יחסי הגומלין במשולש גנרלים-פוליטיקאים-מדענים שבים אל "מי המנוחות" של עיתות השלום, גם כשאין לכך כל הצדקה.

מסקנות ולקחים¹⁰

בקרב מרתון, בשנת 490 לפנה"ס, ניצחו היוונים את הפרסים לא בזכות יתרון כמותי, אלא בעיקר בזכות אמצעי הלחימה המשוכללים שהפתיעו את אויביהם: שריון גוף טוב יותר וכידונים ארוכים יותר, ששולבו היטב בטקטיקה מתאימה. מאז חזרה ונשנתה תופעה זו במלחמות רבות, כאשר כלי נשק חדשים, שהפתיעו את האויב, קיבלו בשדה הקרב חשיבות העולה על כל פרופורציה. לעיתים הכריעו אמצעים אלה את המלחמה כולה, ולעיתים הייתה להם השפעה ניכרת על הלוחמים. לדוגמה, הופעת טילי הסאגר במלחמת יום הכיפורים. התוצאה שלהם בשטח לא הייתה כה משמעותית, אבל התהודה המוראלית והתדמיתית הייתה גדולה.

כיצד קורה שצד אחד מצויד טוב יותר ממשנהו, והאם די בכך כדי לנצח? הניסיון ההיסטורי מלמד שההזדמנויות הטכנולוגיות קיימות למעשה, צריך רק להבחין בהן במועד, לקלוט את משמעותן הצבאית ולנצל אותן. אבל צבאות רבים נוטים להתעלם מחידושים זמינים. הם מפגרים באימוץ טכנולוגיות חדשות לאמצעי הלחימה ומתייצבים לא פעם בשדות הקרב עם כלים שעבר זמנם, או עם כלים חדשים יחסית, אך שעדיין מתופעלים בדוקטרינה ישנה, שאינה תואמת ליכולתם. היו גם מקרים הפוכים, כשצבאות דווקא מיהרו לאמץ רעיון חדש, שאיננו בשל, ולהסתמך עליו. גם גישה כזו עלולה להביא לתבוסה בקרב.

בעבר, בעיקר בעיתות שלום, היה פער לא סביר בין זמן הופעת ההמצאה ובין יישומה בצבא. הרדיו, למשל, יושם ב-1902, 35 שנים אחרי שהודגם הרעיון. גם אחרי הוכחת ההיתכנות של מערכת המכ"ם, חלפו 15 שנים עד שנעשה בה שימוש. יש הסבורים כי פער זה נוטה עתה להצטמצם (יש הגורסים את ההיפך), אך גם בימינו אלה נזנח לא פעם במשך זמן רב פיתוחו של רעיון חדש, שההיתכנות שלו הוכחה, מפני שאינו מקבל עדיפות בצבא. לדוגמה, מזל"טים הופעלו לראשונה במלחמת העולם השנייה על-ידי הגרמנים. פצצות גולשות מונחות טלוויזיה שימשו את האמריקנים כבר בשנת 1944. הוכחת ההיתכנות של הגנה אקטיבית לטנקים הייתה בראשית שנות ה-80 של המאה הקודמת. והזמן שחלף עד שנכנסו אמצעים אלה לשירות בפועל היה 30 עד 40 שנה. לעומת זאת יש כלי נשק "קלסיים" שמתמידים בשירות בעקשנות, דור אחר דור: רובים "צ'כיים" (מאוזר 98) שימשו בצה"ל עד שהיו בני 70 ויותר, מקלעי 0.5 בראונינג שבשירות הם מדגם שנמצא בשירות 90 שנה. טיל הנ"ט "טאו" פותח ב-1962, ועודו בשימוש צבא ארצות-הברית.

אי אפשר לחזות מראש פריצות דרך טכנולוגיות, ולא להסתמך עליהן או לתזמן אותן עם אירועי מלחמה. ולכן צבא הרוצה להתכונן למלחמה חייב להבטיח, הרבה לפני שהמלחמה מתרחשת, זרימה הדדית מתמדת בין הדוקטרינה, הטכנולוגיה ומערכות הנשק. רצוי שהדוקטרינה תוביל, ממנה ייגזרו הצרכים

באמצעי הלחימה, והטכנולוגיה תשרת את הצורך, תוך היזון חוזר ומתמיד. כדי להקצות את המשאבים הנדרשים לפיתוח ולרכש חייבים להיות בצבא מי שיכולים לקרוא "כתובות על הקיר" בעוד מועד, שיודעים לנתח ולהבין את משמעותן, להחליט החלטות אמיצות וליטול סיכונים מחושבים. יש להקצות לתהליך זה "זמן חשיבה" ויש לעשות זאת בצורה מקצועית, רצופה ויסודית.¹¹

עלינו לזכור שהטכנולוגיה הצבאית המודרנית נעשית סבוכה ומורכבת יותר ויותר. לעיתים היא "משתלטת" על החשיבה הצבאית ועלולה לגרום סיבוך במבנה, בארגון, בלוגיסיטיקה, במודיעין ובתו"ל ואף לגרום נזק שגדול מהתועלת שבאמצעים החדשים. הטכנולוגיה גם עלולה ליצור סכנה של "השתעבדות" לפיתויים שבאמתחתה. הליכה לא שקולה אחרי הקסם שבטכנולוגיות שטרם הגיעו לבשלות עלולה ליצור מצב מסוכן של הסתמכות מוגזמת על הטכנולוגיה המתקדמת. כדי למנוע זאת נדרש מטה מודרני מקצועי ומיומן, שישכיל למצות את כל היתרונות שבטכנולוגיה אבל גם להיזהר מחסרונותיה. אומה קטנה כשלנו, שנאלצת להילחם על זכותה להתקיים,

כיצד קורה שצד אחד מצויד טוב יותר ממשנהו, והאם די בכך כדי לנצח? הניסיון ההיסטורי מלמד שההזדמנויות הטכנולוגיות קיימות למעשה, צריך רק להבחין בהן במועד, לקלוט את משמעותן הצבאית ולנצל אותן

חייבת שתהיה לה מנהיגות אזרחית וצבאית שתדע לנצל ולטפח את היתרונות היחסיים בתחום המדע והטכנולוגיה. חשיבה פתוחה ונועזת, ללא כבלים של שמרנות וללא כניעה לאינטרסים צרים, וניצול חכם של הזדמנויות, של רעיונות מקוריים, תכנון מיטבי של משאבים וטיפול כוח אדם - זה בדיוק מה שמפא"ת חייבת לעשות. זה מה שנדרש לנו כדי לקיים יתרון טכנולוגי בשדה הקרב העתידי. אם נפעל כך, נשכיל לרתום את הדוקטרינה והטכנולוגיה לצרכינו. על גבן נוכל לרכוב בכיוון הנכון ולשמר את ביטחון המדינה.

סקרתי את הדברים מנקודת מבט היסטורית-כרונולוגית ובהמשך ניסיתי להסיק מסקנות ולהפיק לקחים. מאחר שאני עוסק כאן במבט היסטורי, עצרתי את הסקירה הזו בשליש האחרון של המאה הקודמת. האירועים הצבאיים הגדולים שקרו בחמישים השנים האחרונות ראויים למאמר נפרד, אבל לדעתי הם תואמים בכללותם את התובנות של מאמר זה.

ההערות למאמר זה מתפרסמות בסוף הגיליון.



העתיד כבר כאן - לייזרים בשדה הקרב (עמ' 4)

1 "DEVELOPER OF THE LASER CALLS IT 'A SOLUTION SEEKING A PROBLEM'"
THE NEW YORK TIMES, (MAY 6, 1964), P. 69

2 כדי להבין את משמעותו של שטף גבוה אפשר להיעזר בתחושה המוכרת של חום קרני השמש ולהשוות זאת ללייזר. מעין מספר אצבע לחישובי שטף השמש ביום שמש על פני כדור הארץ הוא, כלומר על כל מטר רבוע מפוזרת אנרגיה של כ-1kW. אם נחשב לדוגמה אנרגיית לייזר של 100kW המרוכזת בקוטר של 10cm, אשר שטחו הוא כמעט 80 cm^2 , נקבל: $\frac{100 \text{ kW}}{80 \text{ cm}^2} = 1.25 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2} = 12,500 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$

3 זו עוצמה ממוקדת השווה לכפי 12,500 מעוצמת השמש על פני כדור הארץ. פרופ' יצחק בן ישראל, ראש מפא"ת לשעבר, "בניסויים שנערכו בניו מקסיקו על ידי צוות הפיתוח הוכיחה המערכת מאה אחוזי הצלחה. משנת 2000 ועד להקפאת הפרויקט בשנת 2004 הביאו איתם המדענים הישראלים עשרות קטיושות תוצרת המזרח התיכון, וכולן ללא יוצא מן הכלל הופלו בזמן מעופן". ריאיון עם יועד הנדל במקור ראשון, (29/12/2006)

4 "ההליך קבלת ההחלטות לפיתוח ולהצטיידות במערכות להגנה אקטיבית כנגד רקטות קרקע-קרקע (רק"ק)", מבקר המדינה, דו"ח שנתי 59 לשנת 2008, (מרס 2009), עמ' 38-5

כיפת ברזל במבט לעתיד (עמ' 10)

1 חברת רפאל היא המפתחת והמייצרת את מערכת כיפת ברזל, בשיתוף עם חטיבת אלטא של התעשייה האווירית שפיתחה ומייצרת את מכ"ם ה-MMR וחברת אמפרסט המספקת את מערכת השליטה והבקרה

2 באופן דומה, ההתקפות על גוש דן וחיפה בסקאדים ששיגרה עיראק בתקופת צדאם חוסיין ב-1991 הביאו לפיתוח מערכת חץ כ-15 שנה קודם לכן

3 קבלן ראשי אחד בתעשייה, מעמד חריג לתכן לעלות (DTC), הנדסת מערכת נבונה, פיתוח מקביל של רכיבים קריטיים, ביצוע ניסויים רבים עם כמות גדולה של איומים ומיירטים, פשטות בארכיטקטורה ובקישוריות, חוזה במחיר קבוע, שילוב מוקדם של המשתמש, יעילות בצוות הפרויקט של מפא"ת, ריכוז ממוקד של מיטב המשאב האנושי בכל תחום ותחום בתעשיות הביטחוניות לטובת הפרויקט, וכן העדיפות העליונה לצרכי הפרויקט בדרג הניהולי הבכיר ביותר של התעשיות הביטחוניות ושל משרד הביטחון

4 YAAKOV HOFFMAN, ET AL., "CONFIDENCE IN THE 'IRON DOME' MISSILE DEFENSE SYSTEM COMBINED WITH A SENSE OF RESILIENCE REDUCED THE EFFECT OF EXPOSURE ON POSTTRAUMATIC STRESS DISORDER SYMPTOMS AFTER MISSILE ATTACKS", **THE JOURNAL OF CLINICAL PSYCHIATRY** 77(3) (2016), PP. 407-408

לחימה טכנולוגית במגפה (עמ' 14)

1 YANG XIAOFENG, ET AL., "DENGUE FEVER DETECTING SYSTEM USING PEAK-DETECTION OF DATA FROM CONTACTLESS DOPPLER RADAR", **IEEE 40TH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE (JULY 2018)**, PP. 542-545;

2 NGUYEN CUONG VAN, ET AL., "A NON-CONTACT INFECTION SCREENING SYSTEM USING MEDICAL RADAR AND LINUX-EMBEDDED FPGA: IMPLEMENTATION AND PRELIMINARY VALIDATION", **INFORMATICS IN MEDICINE UNLOCKED** 16 (AUGUST 2019), P. 100225

3 זיהום חריף אשר גורם לנפילת לחץ דם

3 ROBERT DORFMAN, "THE DETECTION OF DEFECTIVE MEMBERS OF LARGE POPULATIONS", **THE ANNALS OF MATHEMATICAL STATISTICS** 14(4) (DECEMBER 1943), PP. 436-440

4 ERSTER ORAN, ET AL., "IMPROVED SENSITIVITY, SAFETY, AND RAPIDITY OF COVID-19 TESTS BY REPLACING VIRAL STORAGE SOLUTION WITH LYSIS BUFFER", **PLOS ONE** 16(3) (MARCH 2020)

5 /HTTPS://WWW.GOV.IL/HE/DEPARTMENTS/PUBLICATIONS/REPORTS/PHS-426291820

ססים מחוץ לקופסה (עמ' 20)

1 במהלך המאמר הקורא ייתקל במונח כטמ"ם לצד המונח מל"ט כשם המנהלת. "מנהלת מל"טים" – שם היסטורי הנשמר מטעמי מורשת, אף על פי שבעקבות התפתחות התפיסה בעולם אין נוהגים להשתמש במונח מל"ט (מטוס ללא טייס) אלא במונח כטמ"ם. שינוי ההמשגה נועד להציב את האדם במרכז המערכת. כמו כן, לעיתים המונח כטמ"ם אינו מתייחס לכלי הטיס בלבד, אלא מכיל מנעד רחב של מערכות שהמנהלת אמונה עליהן

2 אל"ם (מיל") ד"ר אמיר עוזיאל ואחרים, "סיירת" רבזרועית חדשנית לבניין הכוח", **מערכות** 491 (אוגוסט 2021)

קטלניות הלוחם הבודד (עמ' 24)

1 יפתח שפייר, "חזבאללה כצבא", **עדכן אסטרטגי** 19(4) (ינואר 2017)

2 בתמונה – אימון ירי חי דו"צ, של כוח רצ'ואן של חזבאללה, על לוח מיגון, 26 במאי 2020

3 [HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=4W5P18ECKT4&T=89S](https://www.youtube.com/watch?v=4w5p18EckT4&t=89s)
 MATTHEW COX, "SOLDIER GETS BACK BATTERED HELMET THAT SAVED HIS LIFE DURING INSIDER ATTACK", **MILITARY.COM**, 4 MARS 2019

4 T'JAE GIBSON, "HARNESSING NEW IDEAS: ARL'S HIGH-RISK RESEARCH PUSHES TECH BARRIER TOWARD NEW HELMET SYSTEM", **ARMY.MIL**, 1 AUGUST 2013

5 /HTTPS://ADVANCEDACCURACY.COM/THE-REAPER-TM

6 רס"ן יובל רן ואחרים, "מאפייני הפציעות המלחמתיות של חיילי צה"ל במבצע עופרת יצוקה", **הרפואה הצבאית** 3(6) (יולי 2009)

7 סרן ארז ברוך, "הטיפול הרפואי בדרג השטח במהלך הלחימה ב'צוק איתן'", **הרפואה הצבאית** 12(1) (אוקטובר 2015)

8 NICK ADDE, "NEW 6.8 MM ROUND A GAME-CHANGER FOR GROUND TROOPS", **NATIONALDEFENSEMAGAZINE.ORG**, 18 JANUARY 2019

9 אודי עצינן, "סמארט שוטר מקיבוץ יגור תספק ללוחמי חי"ר כוונות חכמות בעשרות מיליוני שקלים", **כלכליסט**, 9 בינואר 2019

10 [HTTPS://WWW.RHEINMETALL-DEFENCE.COM/EN/RHEINMETALL_DEFENCE/SYSTEMS_AND_PRODUCTS/FUTURE_SOLDIER_SYSTEMS/INDEX.PHP](https://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/systems_and_products/future_soldier_systems/index.php)

זום על הספקטרום הביולוגי (עמ' 30)

1 THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, **BIODEFENSE IN THE AGE OF SYNTHETIC BIOLOGY**, WASHINGTON: THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 2019

2 DARPA, "ADEPT : PROTECT ADVANCING NATIONAL SECURITY THROUGH FUNDAMENTAL RESEARCH", **DARPA**, 2014

3 "BIOECONOMY DASHBOARD: ECONOMIC METRICS", **BIOECONOMY CAPITAL**, 2018

4 JASON A. REUTER, DAMEK SPACEK & MICHAEL P. SNYDER, "HIGH-THROUGHPUT SEQUENCING TECHNOLOGIES", **MOLECULAR CELL** 58(4) (2015), PP. 586-597

5 ALICE MARIA GIANI, ET AL., "LONG WALK TO GENOMICS: HISTORY AND CURRENT APPROACHES TO GENOME SEQUENCING AND ASSEMBLY", **COMPUTATIONAL AND STRUCTURAL BIOTECHNOLOGY JOURNAL** 18 (2019), PP. 9-19

6 AARON S. BURTON ET AL., "OFF EARTH IDENTIFICATION OF BACTERIAL POPULATIONS USING 16S rDNA NANOPORE SEQUENCING", **GENES** 11(1) (2020), P. 76

7 "TOP 31 MICROBIOME STARTUPS", **MEDICALSTARTUPS**, 11 NOVEMBER 2021

8 [HTTPS://WWW.23ANDME.COM/EN-INT](https://www.23andme.com/en-int)

9 [HTTPS://WWW.DAYTWO.COM](https://www.daytwo.com)

לקחים היסטוריים בנושא המו"פ (עמ' 40)

1 המאמר הוא נוסח מקוצר של מאמר מקיף יותר, שיפורסם בנפרד
 2 ד"ר זאב אלרון, "האטת קצב השינויים הטכנולוגיים", מו"פ ביטחוני בעולם
 (פברואר 2020), עמ' 4-8
 3 סירל פולס, **מלחמת העולם הראשונה**, מערכות, תל-אביב, 1981
 4 דאגלס אורגיל, **הטנק**, מערכות, תל-אביב, 1970
 5 תומס שלינג, **חימוש והשפעה**, מערכות, תל-אביב, 1981
 6 נורמן דיקסון, **הפסיכולוגיה של השלומיאליות בצבא**, מערכות, תל-אביב, 1976
 7 באזיל לידל-הארט, **אסטרטגיה של גישה עקיפה**, מערכות, תל-אביב, 1954
 8 ברנרד ברודי, **מרבח הקשת עד פצצת המימן**, מערכות, תל-אביב, 1966
 9 דיקסון, 1976
 10 MICHAEL HANDEL (Ed.), "CLAUSEWITZ AND MODERN STRATEGY", **THE JOURNAL OF STRATEGIC STUDIES** 9(2-3) (JUNE-SEPTEMBER 1986)
 11 צבי עופר ואבי קובר (עורכים), **איכות וכמות**, מערכות, תל-אביב, 1985

10 ירדן מיכאלי, "19 פרשות רצח ואונס שנחשבו בלתי פתירות פוצחו בזמן קצר. איך זה קרה?", **הארץ**, 15 בנובמבר 2018
 11 JAKE M. ROBINSON, ET AL., "FORENSIC APPLICATIONS OF MICROBIOMICS: A REVIEW", **FRONTIERS IN MICROBIOLOGY** 11 (2020)
 12 FELICIA FEI-LEI CHUNG & ZDENKO HERCEG, "THE PROMISES AND CHALLENGES OF TOXICO-EPIGENOMICS: ENVIRONMENTAL CHEMICALS AND THEIR IMPACTS ON THE EPIGENOME", **ENVIRONMENTAL HEALTH PERSPECTIVES** 128(1) (2020)
 13 ATHINA VIDAKI & MANFRED KAYSER, "FROM FORENSIC EPIGENETICS TO FORENSIC EPIGENOMICS: BROADENING DNA INVESTIGATIVE INTELLIGENCE", **GENOME BIOL** 18(238) (DECEMBER 2017)
 14 CHRISTOPHER ADAMS, ET AL., "BOMBS AND COCAINE: DETECTING NEFARIOUS NITROGEN SOURCES USING REMOTE SENSING AND MACHINE LEARNING", PREPRINT FROM **BIORxIV** (NOVEMBER 2019)
 15 CURT HEWITT, "DNA DEAD END? PROTEIN SEQUENCING FOR FORENSIC ANALYSIS", **THE ISHI REPORT** (2021)
 16 "בדיקה מהירה ומדויקת: בחסות המגפה מתחוללת מהפכה בתחום הריצוף הגנטי", **הארץ** (מאמר מתורגם מתוך הניו-יורק טיימס), 4 באפריל 2021
 17 [HTTPS://WWW.GINKGOBIOWORKS.COM](https://www.ginkgobioworks.com)
 18 CHENG KAI LIM, ET AL., "NOVEL MODALITIES IN DNA DATA STORAGE", **TRENDS IN BIOTECHNOLOGY** 39(10) (JANUARY 2021)
 19 BENJAMIN SHEMER, ET AL., "MICROBIAL BIOREPORTERS OF TRACE EXPLOSIVES", **CURRENT OPINION IN BIOTECHNOLOGY** 45 (2017), PP. 113-119
 20 MICHAEL CHUI, ET AL., "THE BIO REVOLUTION: INNOVATIONS TRANSFORMING ECONOMIES, SOCIETIES, AND OUR LIVES", **MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE** (MAY 2020), P. 36
 21 THOMAS A. DIXON, ET AL., "SENSING THE FUTURE OF BIO-INFORMATIONAL ENGINEERING", **NATURE COMMUNICATIONS** 12(1) (JANUARY 2021)
 22 STEFAN GRAW, ET AL., "MULTI-OMICS DATA INTEGRATION CONSIDERATIONS AND STUDY DESIGN FOR BIOLOGICAL SYSTEMS AND DISEASE", **MOLECULAR OMICS** 2 (2021)
 23 גיא פאגלין, "מרץ החידוש: טכנולוגיות מסחריות וצבאיות באמצעי לחימה – נקודת האיזון המתאימה", **קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה, המכללה לביטחון לאומי ואוניברסיטת חיפה** (ינואר 2018)

What does the dog's nose know? (עמ' 36)

1 "דוח גורמי מפתח" – מסמך פנימי
 2 KATHRYN A. BAMFORD, "CANINE OLFACTION: AN OVERVIEW OF THE ANATOMY, PHYSIOLOGY AND GENETICS", 2012, P. 4
 3 [HTTPS://BIT.LY/3aXmLHV](https://bit.ly/3aXmLHV)
 4 IBID, P. 3
 5 IBID, P. 2
 6 "דוח פרויקט מצילים" – מסמך פנימי
 7 "דוח מעבדת קרב" – מסמך פנימי
 8 HERMANN BUBNA-LITITZ, "SENSORY PHYSIOLOGY AND DOG BEHAVIOUR", 2007, IN PER JENSEN, (Ed.) **THE BEHAVIOURAL BIOLOGY OF DOGS**, CAB INTERNATIONAL, PP. 91-98
 9 "דוח תרמוגולציה" – מסמך פנימי
 10 JACK A. GILBERT, ET AL., "CURRENT UNDERSTANDING OF THE HUMAN MICROBIOME", **NATURE MEDICINE** 24(4) (APRIL 2018)
 11 "דוח מיקרוביום בכלבי עבודה" – מסמך פנימי
 12 DENNIS R. GEISER, "HYPERBARIC OXYGEN THERAPY IN EQUINE REHABILITATION", 2016
 13 [HTTPS://BIT.LY/3FzBez4](https://bit.ly/3FzBez4)
 14 רותם אליזרע, "המספרים נחשפים: כמה מרשמים לריטלין מנופקים בישראל?", **ynet**, 21 באוגוסט 2017



אודות



הוצאת הספרים



וידאו



בין המערכות

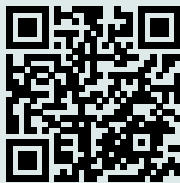


כתב העת

עולמות התוכן של מערכות

שנת ה־80 למערכות היא הזדמנות טובה לחדש ולהתרענן. זו השנה שבה הפכה **מערכות** מכתב העת וההוצאה לאור של צה"ל לבית התוכן המקצועי של צה"ל לצבא ולביטחון לאומי. התחדשנו בפלטפורמת תוכן ייחודית, שבה תוכלו לקרוא מאמרי דעה **בין המערכות**, לעיין בגיליונות **מערכות** השונים **כתב העת**, לצפות בקטעי וידאו מרתקים **וידאו** ולקבל מידע על מגוון ספרים חדשים וקלסיים שראו אור בהוצאת הספרים **מערכות** **הוצאת הספרים**. בין גיליון מודפס למשנהו אתם מוזמנים להתעדכן ולהביע דעה בעמוד הפייסבוק של **מערכות**, בערוץ הטלגרם ובטוויטר של **מערכות**.

הצטרפו לערוצים הדיגיטליים של **מערכות**



לכניסה לאתר **מערכות** סרקו את הקוד



הירשמו לניוזלטר השבועי של "מערכות", וקבלו בדוא"ל או בווטסאפ עדכון שבועי על פרסומים בנושאי צבא וביטחון לאומי. להרשמה יש לשלוח דוא"ל אל: maarachot@idf.il



ISSN 0464-2147