



מרכז אלרום לחקר מדיניות
ואסטרטגיית אוויר וחלל
אוניברסיטת תל אביב

התמודדות עם הגנה אווירית

מגמות ומשמעויותיהן לחיל האוויר ולתעופה האזרחית

אסף הלר

מחקר (0222) : יוני 2022

התמודדות עם הגנה אווירית

מגמות ומשמעויותיהן לחיל האוויר ולתעופה האזרחית

אסף הלר

מחקר (0222) : יוני 2022



מרכז אלרום לחקר מדיניות
ואסטרטגיית אוויר וחלל
אוניברסיטת תל אביב

מרכז אלרום לחקר מדיניות ואסטרטגיית אוויר וחלל

אוניברסיטת תל אביב הקימה את מרכז אלרום לחקר מדיניות ואסטרטגיית אוויר וחלל בשיתוף עם חיל האוויר על מנת לרתום את תחומי המחקר האקדמיים לפיתוח ולקידום תשתית מחקרית אינטרדיסציפלינרית בתחומי אוויר וחלל.

המרכז מקדם מחקר תיאורטי ויישומי עם חוקרים מהדיסציפלינות האקדמיות השונות, כמו גם עם חוקרים ממערכת הביטחון בכלל ומחיל האוויר בפרט. מטרתו העיקרית של המרכז הן להוות מוקד למידה ומחקר לחוקרים ולסטודנטים מהפקולטות השונות העוסקים בתחומי אוויר וחלל, למסד בישראל עיסוק אקדמי בר־קיימא בנושאי מדיניות ואסטרטגיית אוויר וחלל ולפתח עתודה של חוקרים ואנשי אקדמיה בכירים שמחקרם עוסק בהיבטים שונים של נושאים אלה.

**Confronting Air Defense:
Trends and Implications for
Israel's Air Force and Civil Aviation**

Research (0222), June 2022
Assaf Heller

**התמודדות עם הגנה אווירית:
מגמות ומשמעויותיהן לחיל האוויר
ולתעופה האזרחית**

מחקר (0222), יוני 2022
אסף הלר

הלר, א. "התמודדות עם הגנה אווירית: מגמות ומשמעויותיהן לחיל האוויר ולתעופה האזרחית", מחקר (02), יוני 2022, אוניברסיטת תל אביב.

Heller, A. "Confronting Air Defense: Trends and Implications for Israel's Air Force and Civil Aviation" [in Hebrew], Research (02), June 2022, Tel Aviv University.



מרכז אלרום לחקר מדיניות
ואסטרטגיית אוויר וחלל
אוניברסיטת תל אביב

© יוני 2022

כל הזכויות בעברית שמורות לאוניברסיטת תל אביב

אין להעתיק, לשכפל, להקליט, לתרגם, לאחסן כמאגר מידע או להפיץ מסמך זה או קטעים ממנו בשום צורה ובשום אמצעי, אלקטרוני, אופטי או מכני (לרבות צילום והקלטה), ללא אישור בכתב מהמוציא לאור.

העמדות המופיעות במסמך הן של המחבר(ים) בלבד ואינן משקפות את עמדות המרכז.

מרכז אלרום לחקר מדיניות ואסטרטגיית אוויר וחלל

ראש המרכז: פרופסור אביתר מתניה
חיים לבנון 30, תל אביב 6997801
airspace@tauex.tau.ac.il

עורכת תוכן: אסנת זילברמן

עיצוב גרפי: יעל כפיר ומיכל סמויקובץ, המשרד לעיצוב גרפי, אוניברסיטת תל אביב

ISBN

לחיל האוויר הישראלי ולתעופה האזרחית אל ישראל וממנה ישנה חשיבות אסטרטגית רבה. במהלך העשור האחרון מתפתחות שתי מגמות מרכזיות העלולות לפגוע בחופש הטיסה ובחופש הפעולה של חיל האוויר ושל התעופה האזרחית, ולכן עשויות לשאת השלכות אסטרטגיות מרחיקות לכת.

מגמת שינוי אחת היא ברובד הטכנולוגיות של מערכות ההגנה האווירית. מזה עשרות שנים מתקיימת תחרות בין הכוח האווירי לבין ההגנה האווירית. לעתים גוברת יכולת ההגנה האווירית, כמו לאחר מלחמת ההתשה שבה "הטיל כופף את כנף המטוס" (כדברי עזר ויצמן, מפקד חיל האוויר לשעבר), ולעתים גוברת יכולת הכוח האווירי, כמו במלחמת לבנון הראשונה ובמלחמת המפרץ הראשונה שבהן הוכרעה ההגנה האווירית מן האוויר. בעשור האחרון גדלים משמעותית יעילותם וטווחיהם של מגוון מרכיבי ההגנה האווירית: אמצעי גילוי, טק"א, שיבוש, מטוסי יירוט ואמצעי הגנה אווירית בספינות. אוסף השינויים יוצר עליית מדרגה, המאיימת לשנות את מאזן הכוחות בין הגנה אווירית וכוח אווירי בתהליך הדרגתי אשר יפרס על פני העשורים הקרובים.

מגמת שינוי שנייה היא ברובד הדוקטרינרי של הפעלת הגנה אווירית. הולכת ומתעצבת דוקטרינה של שימוש בהגנה אווירית בשגרה כחלק מדיאלוג אסטרטגי, על מנת להשיג הרתעה ולעצב כללי משחק להגבלת הפעלה של כוח אווירי. חלק גדול מיישומה הוא באמצעות כלים "רכים" לשיבוש ולהטרדה ללא הפלת כלי טיס (בפרט אי הפלת מטוסים מאוישים) כדי לצמצם את הסיכון להסלמה. התווך האווירי נוח להפעלת כלים כאלה, ומדינות כמו רוסיה, סין ואיראן עושות בו שימוש.

שתי מגמות אלו עלולות להוביל לשינוי אסטרטגי בשגרה כבר במהלך העשור הנוכחי. הגדלת הטווחים והיעילות של ההגנה האווירית, יחד עם נכונות להפעילה, יציבו איום על חופש הטיסה של מטוסי חיל האוויר באזורים הנחשבים כיום ל"נקיים" מאיום – מעל שטח ישראל ומעל הים. כדי לשמר את חופש הטיסה, חיל האוויר יידרש לפתח יכולות חדשות: כלים "רכים" לשיבוש מערכות הגנה אווירית ולמניעת שיבוש מצידן, אמצעים להגנה מרחבית על כלי טיס הפועלים בשטח ישראל ומעל הים, ובעיקר יכולת מערכתית לנהל מערכה רצופה לשימור חופש הטיסה, אשר תכלול גם מרכיבים שאינם "פנים חיל אוויריים" כגון דיפלומטיה, הסברה וקשרים עם שותפים.

אל"מ (מיל') ד"ר אסף הלר הוא מנהל מחקרים במרכז אלרום לחקר מדיניות ואסטרטגיית אוויר וחלל באוניברסיטת תל אביב. שירת בחיל האוויר ובאגף המודיעין בצה"ל בתחומי מחקר מודיעין וחקר ביצועים. בעל דוקטורט בפילוסופיה מאוניברסיטת תל אביב.

שינוי אסטרטגי מקביל עלול להתחולל בשל איום על תעופה אזרחית. הטווחים הגדלים של אמצעי ההגנה האווירית וזמינותם גם לארגוני טרור ולארגונים פארא־צבאיים יאפשרו לאלה להציב איום ממשי על תעופה אזרחית בעומק ישראל ובנתיבי הטיסה אליה וממנה. מענה לאתגר יצריך ראייה ארגונית שאינה רק בתחום חיל האוויר, שהוא הגוף היחיד העוסק כיום באיום ההגנה האווירית.

ההשלכות האסטרטגיות של מגמות השינוי בהגנה האווירית משמעותיות במיוחד בשל המאפיינים הייחודיים לישראל, בשונה, למשל, מארצות הברית וממדינות מערב אירופה: ישראל מדינה קטנה, וניתן להציב את מערכות הטק"א והשיבוש סמוך לגבולותיה תוך יצירת איום ממשי על כלי טיס בעומק שטחה.

שינוי אסטרטגי עלול להתפתח לאורך זמן גם ביכולתו של חיל האוויר לשמש מרכיב מרכזי במלחמה. עליית מדרגה ביכולות ההגנה האווירית, שתוביל לשינוי מאזן הכוחות בין הגנה אווירית לבין כוח אווירי, תשליך על האפשרות להפעיל את חיל האוויר במתכונתו הנוכחית – חיל שיכולת התקיפה שלו מבוססת בעיקר על מטוסי קרב מאוישים הנושאים חימוש כבד. שינוי ההגנה האווירית הנדרש לצורך כך צפוי רק בעוד 2–3 עשורים, ולכן יש זמן להיערך אליו. תפיסות אמריקניות המפותחות נגד ההגנה האווירית העתידית מתבססות במידה רבה על מלאי גדול של טילים ארוכי טווח, סד"כ נרחב של כטמ"מ דלי חתימה, מטוסי "דור 6" ויכולת תקיפת מערכות הגנה אווירית בסייבר. הצטיידות במלאי גדול של טילים ושל כטמ"מ דלי חתימה ובמטוסים מתקדמים דורשת משאבים רבים. הפתרון המתאים עבור ישראל משלב בין התפיסה המבצעית הנוכחית, הכוללת מהלך פתיחה להשגת עליונות אווירית ופעולה בנוכחות איום מופחת לאחרי, לבין הפתרונות הטכנולוגיים מן התפיסה האמריקנית. ניתן לבסס מהלך פתיחה להשגת עליונות אווירית מספקת על הפתרונות הטכנולוגיים החדשים, במטרה לאפשר הפעלת כוח אפקטיבי בהמשך הלחימה מטווחים קצרים יותר ובמשאבים פחותים.

המגמות הטכנולוגיות אינן מציבות רק סיכונים, ומזמנות גם הזדמנויות חדשות. הישענות ההגנה האווירית על רשתיות ועל תוכנה מספקת מגוון הזדמנויות לייצור מודיעין ולישיבוש יכולות ההגנה האווירית. טכנולוגיות מידע, קישוריות, אוטונומיות, מזעור ולחימה בממד הסייבר הם כלים חשובים בפיתוח יכולות ההגנה האווירית, אך גם כלים חשובים בפיתוח יכולות ההתמודדות עימה.

*

מחקר זה מהווה חלק מתוכנית מחקר העוסקת בבניין הכוח של חיל האוויר לקראת העשור הבא, ומבקשת להניח תשתית ידע מעמיקה לתהליכי קבלת החלטות בתחום. תוכנית זו כוללת מחקרים המנתחים את השינויים הצפויים בתפיסותיהם, באופני פעולתם וביכולותיהם של אויבים ויריבים, ואת השלכותיהם על תפיסותיו ועל יכולותיו המבצעיות של חיל האוויר; מחקרים המנתחים את השפעתם של תהליכי בניין הכוח בצה"ל על חיל האוויר, על הדרישות

ממנו ועל ההזדמנויות העומדות בפניו; ומחקרים המנתחים שינויים טכנולוגיים מרכזיים ואת השלכותיהם הרחבות על מאפייני הלחימה האווירית.

תוכן עניינים

7	מבוא
8	פרק א: התפתחויות דוקטרינריות בהגנה האווירית
16	פרק ב: מגמות טכנולוגיות במערכות הגנה אווירית
28	פרק ג: דיון ומסקנות
39	רשימת מקורות

בעשור החולף חל שינוי ניכר ביכולות ההגנה האווירית במדינות המזרח התיכון, ולזירה נכנסו מערכות מודרניות, עם טכנולוגיות חדשות ועם יכולות משופרות בהרבה לעומת מערכות מיושנות. מערכות אלו כוללות טק"א מודרני, מכ"מים דיגיטליים בתחומי תדר מגוונים, מטוסי קרב מתקדמים, שבשי"ל"א ומערכות שליטה ותקשורת המאפשרות שימוש יעיל יותר באמצעי הגילוי והאש. מגמה זו צפויה להימשך, ובעשור הבא חיל האוויר הישראלי צפוי לפגוש מערכי הגנה אווירית בעלי יכולות משופרות בהרבה מאלו שהוא פוגש כיום.

מטרת המחקר להצביע על השינויים האסטרטגיים הצפויים לאור מגמות השינוי בטווח של 2-3 עשורים קדימה, הן מנקודת המבט של חיל האוויר הישראלי והן מנקודת המבט של התעופה האזרחית בישראל, ולהצביע על כיווני מענה אפשריים.

מתודולוגיה

שאלת המחקר מתמקדת בנקודת המבט הישראלית, אולם הערכת מגמות השינוי מחייבת ראייה רחבה בהרבה. רוב מערכות ההגנה האווירית במזרח התיכון מפותחות ומיוצרות במדינות שמחוץ למזרח התיכון, על בסיס תפיסות מבצעיות ודוקטרינות במדינות אלו.

ראשית, המחקר מתמקד ברובד הדוקטרינרי של ההגנה האווירית, בהנחה שהבנת רובד זה חשובה כדי לעמוד על השיקולים בבניית מערכי הגנה אווירית ובהפעלתם. הגישה המקובלת כיום היא לראות את ההגנה האווירית כמשרתת את דוקטרינת A2/AD בעת מלחמה. המחקר בוחן באופן ביקורתי גישה זו, ומציע גישה אלטרנטיבית.

לאחר מכן המחקר מנתח את מגמות השינוי הטכנולוגי במערכות הגנה אווירית בעולם בחלוקה למרכיביה המרכזיים של הגנה אווירית: מערכות גילוי, טק"א, מטוסי יירוט, אמצעי שיבוש ומערכות הגנה אווירית ימיות. תהליכי בניין הכוח האופייניים מלמדים שעיקר הסד"כ של מערכות הגנה אווירית שנפגוש במזרח התיכון בעשור הבא יתבסס על סוגים שנמצאים כבר כיום בשימוש ברחבי העולם או שנמצאים בשלבי פיתוח מתקדמים. לכן ניתן להציע הערכה מבוססת של יכולות ההגנה האווירית ושל הטכנולוגיות הרלוונטיות עימן נידרש להתמודד בעשור הבא.

בהתבסס על שני יסודות אלה – מגמות השינוי הדוקטרינריות ומגמות השינוי הטכנולוגיות – מתקיים הדיון על השינויים האסטרטגיים האפשריים. הדיון בוחן את הנחות היסוד שבבסיס הפעלת הכוח האווירי כיום, ואת האופן שבו מגמות השינוי ישפיעו על הנחות היסוד ויעצבו מגרש משחקים חדש. השינויים האסטרטגיים נדונים משתי נקודות מבט: ההקשר האסטרטגי של מאפייני העימות – שינויים הרלוונטיים לעת שגרה, למלחמה ולפעולה במסגרת מב"מ, וטווח הזמן שבו צפויים השינויים האסטרטגיים להתרחש.

התפתחויות דוקטריניות בהגנה האווירית

A2/AD

הגישה המקובלת בעשור האחרון במערב מכלילה את ההגנה האווירית ככלי בדוקטרינה רחבה יותר, A2/AD, אשר מנסה להקשות על חופש הפעולה ההתקפי של האויב בשני רבדים: Anti-Access שנועד למנוע מהאויב להביא את כוחותיו למרחב הלחימה, ו־Area-Denial שנועד למנוע את חופש הפעולה של האויב במרחב הלחימה עצמו. הגישה פותחה כהסבר להתעצמות הסינית ב־20 השנים האחרונות, ובהמשך הורחבה למדינות אחרות (רוסיה, איראן ואף כדוקטרינה אפשרית עבור ארה"ב ובעלות בריתה). על פי הניתוח האמריקני, לסין מדיניות אגרסיבית הכוללת הפעלת כוח צבאי בסביבתה, בטיוואן, בים סין הדרומי ובים סין המזרחי, והיא מוטרדת מהיכולת האמריקנית לשבש את הפעלת הכוח הסינית (כפי שהומחש במשבר מצרי טיוואן, 1995–1996). כמענה לכך פיתחה סין תפיסה של יצירת "בועת הגנה", שבחסותה תוכל לממש מדיניות אגרסיבית, מבלי שארה"ב תוכל להתערב באמצעות הקרנת כוח (Terrance, 2016). באופן זה סין יכולה להעלות את המחיר שארה"ב תשלם על התערבות צבאית, ולשלוט בהסלמה (Gompert, 2016; Henley, 2006).

הקרנת הכוח האמריקנית מבוססת על יכולות שניתן להפעיל הרחק מארה"ב: צי חזק (הכולל ספינות, מטוסים וצלולות), יכולת תקיפה אווירית מתקדמת, אמצעים אוויריים דלי חתימה, ארסנל גדול של טילים מדויקים ומערך איסוף מגוון. המענה הסיני כולל מגוון מרכיבים:

- א. בניית תמונה ימית ואווירית בטווחים גדולים: מכ"מים, איסוף לווייני, מטוסי C4ISR.
- ב. יכולת פגיעה בספינות בטווחים גדולים: טילים בליסטיים (ASBM), טילי שיוט (ASCM), צוללות וצי ספינות.
- ג. טק"ק ארוך טווח לתקיפת בסיסי טיסה אמריקניים באיים באוקיינוס ובמדינות סמוכות.
- ד. מערך הגנה אווירית משולב במטרה להפיל מטוסים, כטמ"מ וטילי תקיפה המגיעים לקרבת סין: טק"א ארוך טווח ולטווחים קצרים יותר, מטוסי יירוט מודרניים (דורות 5, +4) חמושים בטילי אוויר-אוויר ארוכי טווח, מערכות ל"א ויכולות שו"ב.
- ה. פגיעה ביכולות איסוף באמצעות הגנה אווירית ארוכת טווח אל מול מטוסי איסוף ובאמצעות יכולות נטרול לוויינים ASAT (Anti-Satellite).
- ו. יכולות סייבר, בפרט נגד יכולות האיסוף ויכולות השליטה.

ההתעצמות הסינית זוהתה כאיום על הקרנת הכוח האמריקנית, ומתוך כך כאיום בעל משמעות אסטרטגית אשר עלול לשחוק את ההרתעה האמריקנית, לפגוע במיצובה של

ארה"ב מול מדינות מזרח אסיה ולאפשר לסין להתקדם לעבר השגת הגמוניה אזורית (Gompert, 2016).

סין אינה המדינה היחידה שמפתחת את אבני הבניין הטכנולוגיות המאפשרות לממש את תפיסת A2/AD. גם רוסיה מפתחת מכ"מים ארוכי טווח, טק"א ארוך טווח, טילים מודרניים נגד ספינות, טילים בליסטיים וטילי שיוט מדויקים, ומערכות שליטה ובקרה מודרניות. מדינות רבות מצטיידות ביכולות הללו, וחלקן (בפרט איראן) גם מפתחות אותן בעצמן. לאור זאת התגבשה בארה"ב הגישה לפיה תפיסת A2/AD מדריכה את בניין הכוח של יריבותיה בעולם.

לפי גישה זו, רוסיה הקימה בעשור החולף מערך A2/AD מול נאט"ו, שמטרתו לאפשר לה לקדם מהלכים צבאיים אגרסיביים באזורים סמוכים: המדינות הבלטיות, אוקראינה והים השחור. זאת תוך יצירת "בועת הגנה" של A2/AD שייעודה למנוע התערבות אפקטיבית של ארה"ב או של נאט"ו. על פי הגישה, המערך הרוסי כולל בדומה למערך הסיני מכ"מים, טק"א ארוך טווח, טק"ק מדויק וטילי שיוט לתקיפת מטרות קרקעיות, וכן טילים נגד ספינות (Bonds, 2017). בעוד שבמקרה הסיני המרכיב הימי של A2/AD הוא המרכזי, במקרה הרוסי המאיים ביותר מכלל מרכיבי A2/AD הוא ההגנה האווירית, אשר מציבה איום על יכולת ההפעלה של כוח אווירי – היתרון הצבאי העיקרי של נאט"ו (Bronk, 2020).

האיום הסיני והאיום הרוסי על חופש התמרון של ארה"ב, כלומר איום A2/AD, תופס מקום מרכזי בתפיסת האיום האמריקנית מצד מדינות אלו (Hagel, 2014), ו-A2/AD מהווה דוגמה מרכזית בהצדקת הצורך באסטרטגיית ה-Third Offset.

מקורות אמריקניים מתייחסים גם למדינות אחרות ככאלו המצטיידות באמצעים על מנת לממש תפיסת A2/AD, כמרכיב במימוש אסטרטגיה הגנתית מול איום אמריקני על המדינה והמשטר, ולא כחלק מאסטרטגיה התקפית. בין מדינות אלו איראן, צפון קוריאה וסוריה (Kelley, 2016). המושג הפך שגור, ומשמש גם על מנת לתאר בניין כוח של מדינות נוספות, כגון אלג'יריה אשר בונה בשנים האחרונות מערך הגנה מודרני גדול הכולל טק"א מגוון (300/400-S, 22/17-SA, 9-HQ), ל"א מודרני (קראסוחה), מכ"מים ארוכי טווח (רזוננס), שו"ב מודרני ומטוסים מתקדמים כגון Su-30 ומיג-29 (Colom-Piella, 2021). דוקטרינת A2/AD מתוארת אף כמסבירה את בניין הכוח של גופים תת-מדינתיים דוגמת חזבאללה, חמאס והח'ותים בתימן, אשר מצטיידים בטילי קרקע קרקע מדויקים, טילים נגד ספינות וטילים נגד מטוסים על מנת למנוע מכוחות אויב להגיע למרחב הלחימה ועל מנת לצמצם את חופש הפעולה של כוחות אלה במרחב הלחימה (Samaan, 2020).

האמנם A2/AD?

דוקטרינת A2/AD, כפי שמנוסחת במערב, מתאימה כנראה למקרה של סין מול ארה"ב באזור ים סין, אך נראה שאינה מייצגת את הדוקטרינה של רוסיה ושל מדינות אחרות. הדוקטרינה הרוסית, כפי שמנוסחת על ידי כותבים רוסים ועל ידי חלק מחוקרי רוסיה במערב, רואה את

תפקיד ההגנה האווירית הרוסית במלחמה כהגנתית. לפי גישה זו, רוסיה לא בנתה את ההגנה האווירית שלה כדי לאפשר מהלכים התקפיים, אלא כדי להתמודד עם "בליצקריג" אמריקני של מטוסי תקיפה מתקדמים ושל טילים מדויקים (Kofman, 2019). התפיסה הרוסית, כפי שתוארה על ידי גנרל אנדריי גונצ'רוב (שכיום אחראי על המשרד למחקר טכנולוגיות מתקדמות במשרד ההגנה), מניחה שבתחילת מלחמה נגד רוסיה יבוצעו תקיפות אוויריות אינטנסיביות על ידי מטוסים וחימוש מדויק לעבר מרכזי פיקוד ושליטה (פּו"ש), מערכי גילוי ומודיעין, בסיסי חיל אוויר, תשתיות חיוניות ללחימה ואמצעי תקיפה רוסיים אסטרטגיים (Goncharov, 2014). בחינת יכולות מערכי ההגנה הרוסיים מעלה כי הם אינם יכולים למנוע הגעת כוח התקפי אמריקני מודרני למרחב (באמצעות כלי Anti-Access), ואף אינם יכולים למנוע את התקיפה עצמה (באמצעות Area-Denial). כך למשל, "בועת A2/AD" ברדיוס 400 ק"מ סביב קלינינגרד (טווח מרבי של מערכת S-400) אינה מתארת את יכולת ההגנה בפועל מפני מטוסים וטילים בגובה נמוך אופייני, ומעטפת ההגנה מול אלה מצומצמת בהרבה (Dalsjo, 2019). הרוסים מודעים למגבלות אלו, ותפיסת ההגנה הרוסית אינה מבוססת על "בועת" בלתי חדירות אלא על ראייה מערכתית של הגנה ו"הגנה אקטיבית" (תקיפה לצורך הגנה): שיבוש מסוים של התקיפות בתחילת לחימה על ידי פגיעה במרכזי כובד, ושחיקה הדרגתית של הכוח התוקף לאורך לחימה. קרב ההגנה בראייה הרוסית הוא קרב שחיקה בין מסה של כוח מגן לבין מסה של כוח תוקף (Kofman, 2019).

המלחמה באוקראינה היא מקרה בוחן חשוב להבנת התפיסה הרוסית והיכולות הרוסיות. המלחמה חשפה את מגבלות יכולת התקיפה הרוסית בעומק, אשר אינן מאפשרות מימוש Anti-Access – הרוסים לא הצליחו למנוע את פעולת חיל האוויר האוקראיני הקטן יחסית על ידי תקיפת שדות התעופה האוקראיניים, כתוצאה מהיעדר מלאי מספיק של טילים ארוכי טווח ברשות רוסיה, רמת דיוק נמוכה של טילים אלה וחוסר נכונות להפעיל מטוסי קרב לתקיפת שדות תעופה אוקראיניים (כנראה בשל איום ההגנה האווירית האוקראינית). ניתוח לקחי המלחמה עודנו בראשיתו, אך ניתן להניח שהגישה המקובלת במערב לגבי דוקטרינת A2/AD רוסית תשתנה.

בניין הכוח של ההגנה האווירית ברוסיה נובע בעיקרו משיקולים הגנתיים. במדינות אחרות, כגון איראן, סוריה וצפון קוריאה, ההגנה האווירית אינה מערך שמאפשר אסטרטגיית התקפית במלחמה אלא מערך שתפיסתו הגנתית, גם על פי הטקסטים האמריקניים שמתארים את דוקטרינת A2/AD. היערכות ההגנה האווירית סביב מרחבים אסטרטגיים באיראן (טהראן), איספהאן, בושהר ובנדר עבאס) ובסוריה (דמשק, חומס וחלב), כמו גם היעדר פעילות קרקעית תוקפנית נגד שכנותיהן בחסות אמצעי הגנה אווירית (הגנ"א), מלמדים כי תפקידה העיקרי של ההגנה האווירית הוא להגן על המדינה מפני איומים חיצוניים, ופחות להגן על מהלכי כוח התקפיים.

דוקטרינה אסימטרית להפעלת הגנה אווירית

בשלושת העשורים האחרונים התפתחה דוקטרינה של הפעלת הגנה אווירית בלחימה באופן אסימטרי, באמצעות כוח הגנה אווירית חלש יחסית למול כוח אווירי חזק, שמטרתה ליצור איום ממושך המפריע לחופש הפעולה של התוקף ללא הפעלה אינטנסיבית של ההגנה האווירית. הפעלת ההגנה האווירית בדוקטרינה זו מכוונת לשרידות לאורך זמן, על חשבון יכולת פגיעה פיזית בכלי טיס תוקפים. כך הופעלה ההגנה האווירית במלחמת קוסובו (1999), וכך היא מופעלת על ידי הח'ותים בתימן, וכך היא נבנית על ידי חזבאללה בלבנון. הכלים לצורך הפעלה אסימטרית הם טקטיקה של חשיפה מזערית ("מוד מארב") יחד עם מערכות המותאמות לטקטיקה זו (קטנות וניתנות להסוואה ולהתממה, כמו טילי 358 האיראניים). קיים הבדל בין חשיפה מבוקרת של מערכות הגנה אווירית במסגרת דוקטרינה הגנתית מקובלת, ובין חשיפה מזערית במסגרת דוקטרינה אסימטרית. בדוקטרינה המקובלת, ההגנה האווירית תפעל במידה שתאפשר לה לסכל ככל הניתן את הכוח האווירי התוקף, גם אם הטקטיקה כוללת חשיפה מבוקרת על מנת לשמר את שרידות ההגנה "א", למשל באמצעות צמצום שידורי מכ"ם בטק"א והקצאת מטרות לסוללות ברשת שליטה ובקרה (שו"ב). בדוקטרינה אסימטרית, החשיפה המזערית באה על חשבון סיכול מרב התקיפות, ומכוונת להשגת אפקט תודעתי של תחושת איום. דוקטרינה אסימטרית אינה נקודת עבודה סבירה למדינות המחזיקות מערך הגנה אווירית חזק בתרחישי עימות הדורשים את הפעלתו. גם איראן, המציידת את שלוחיה במערכות הגנה אווירית בעלות חתימה נמוכה, מצטיידת במערכות טק"א סטנדרטיות ומייצרת מערכות אלו.

דוקטרינה התקפית בשגרה

הדוקטרינה שביססה עד כה את בניין הכוח של ההגנה האווירית במדינות האזור היא הגנתית, הן בשגרה והן בלחימה: הגנה מפני חדירת כלי טיס לאיסוף ולתקיפה, והגנה מפני טילים. אולם לצדה יש סימנים באותן מדינות להתפתחות של דוקטרינה נוספת, גם אם לא זו הוגדרה באופן פורמלי: הפעלת בשגרה של הגנה "א" כדי לדחוק כוח אווירי עוין אל מחוץ למרחב מסוים (מעין Area Denial).

דוגמה בולטת לכך היא השימוש הרוסי בתווך האווירי ליצירת חיכוך לצורך השגת הישגים אסטרטגיים מבלי להגיע להתנגשות חמורה. רוסיה פעלה בגישה זו מול כלי טיס של נאט"ו וארה"ב בים הצפוני, בים הבלטי ובים השחור כחלק מתפיסת פעולה שלמה של עימות בשגרה. גם במזרח התיכון החלה רוסיה לעשות שימוש במערכות הגנה אווירית למטרות אסטרטגיות. רוסיה פרסה בשנים האחרונות בחוף סוריה הגנה אווירית הכוללת טק"א ארוך טווח מסוג S-400, טק"א קצר טווח מסוג SA-22, אמצעי ל"א ומטוסי קרב ליירוט ולתקיפה. כוחות רוסיים ("קבוצת ואנגר") מפעילים בלוב SA-22, ובמהלך שנת 2020 פרסה רוסיה ללוב מטוסי קרב לסיוע אווירי ולהגנה אווירית (Bermudez, 2020). עד לאחרונה התפתחה

גישה לפיה בעתיד רוסיה תרחיב את הפריסה בלב, ותפרוס הגנה אווירית גם בסודאן כחלק מהקמת בסיס ימי בפורט סודאן (Pierini, 2021).

מטרת היערכויות אלו אינה רק הגנה על כוחות משלוח אלא גם, ואולי בעיקר, הקרנת כוח והצבת איום פוטנציאלי על חופש הפעולה האווירי של כוחות אחרים, בפרט של ארה"ב ונאט"ו, בחלקים מן הים התיכון ומן הים האדום. איום פוטנציאלי זה נועד לאפשר (עד כה, וייתכן שגם בעתיד) חופש פעולה לכוחות רוסיים באוויר, בים וביבשה (בדומה לרעיון שעומד בבסיס דוקטרינת A2/AD, אם כי בהקשר אסטרטגי של שגרה). ההגנה האווירית הרוסית נפרסה באזורים אלה בסד"כ קטן אך מגוון (מעט מטוסי קרב, מעט טק"א ארוך טווח וקצר טווח, מעט אמצעי גילוי ומעט מערכות ל"א). סד"כ שכזה אינו מאפשר לחימה אינטנסיבית, אך בהחלט מתאים כדי למנוע פעילות אווירית של כוח צבאי אשר אינו מוכן ליטול סיכון ברובד הטקטי ואינו מוכן ליטול סיכון של הסלמה. בראייה זו, ההגנה האווירית אפקטיבית גם אם יעילותה בהפלת כלי טיס נמוכה, כמו במקרה של הפעלת שיבוש GPS על ידי מערכות רוסיות בסוריה (Kube, 2018). הפעלה זו של הגנה אווירית לצורך התקפי תואמת את התפיסה הרוסית של הפעלת כוח צבאי כחלק ממלחמה היברידי, ומאפשרת חיכוך מתחת לסף מלחמה, בפרט על ידי אמצעי הגנה אווירית לא קטלניים כגון הפעלת ל"א וסייבר, יירוט מטוסים ללא הפלה ונעילות טק"א. לאור מקומה המרכזי של לחימה היברידי בתפיסה הצבאית הרוסית (לפחות עד כה), התאמת ההגנה האווירית לצורך זה צפויה להימשך.

דוקטרינה התקפית דומה של Area Denial בשגרה על ידי כוח הגנה אווירית מצומצם מופעלת על ידי איראן במפרץ הפרסי, שם הופל בשנת 2019 כטמ"מ MQ-4A על ידי מערכת טק"א (ההפלה הייתה מחוץ לשטח איראן, אך לטענתה במרחב האווירי שלה (Berliner, 2019)). היערכויות טק"א מצומצמת שכזו לא תהיה אפקטיבית מול הפעלה נרחבת של כוח אווירי אמריקני בלחימה. הפלה זו נועדה כנראה לשבש הפעלה יעילה של איסוף אווירי אמריקני בשמי המפרץ בשגרה. גם ארגון חזבאללה מיישם בשנתיים האחרונות דפוס פעולה דומה על ידי הפעלת טק"א בהיקף מצומצם ביותר, במטרה לאלץ את חיל האוויר הישראלי להימנע מטיסות איסוף מעל שטח לבנון. היקף כה מצומצם לא יספיק כדי למנוע הפעלה נחושה של חיל האוויר במלחמה, אך יכול להספיק להשגת מטרה צנועה יותר בשגרה – צמצום האיסוף האווירי של ישראל בהתבסס על ההנחה שהיא מבכרת להימנע מחיכוך ואינה מוכנה לקחת סיכון של נפילת מטוס, ולו סיכון קטן, משיקולים אסטרטגיים.

לנוכח הצלחת דפוס הפעולה, ניתן להניח שדפוס פעולה דומה ימשיך לשמש את חזבאללה בעתיד, כמו גם מיליציות פרו-איראניות בסוריה או כוחות סמי-צבאיים אחרים סביב ישראל, כדי לשבש הפעלת כלי טיס בשגרה באזורים שבהם לא היה איום עד כה. פעולות אלו יכולות להיות מופנות לא רק לשיבוש איסוף אווירי, אלא גם לשיבוש טיסות אימונים שגרתיות בים התיכון ובשטח ישראל. הן גם יכולות להיות מופנות לשיבוש תעופה אזרחית.

עקרונות בניין היכולות בהגנה האווירית

הגנה אווירית, במובן המשמש במחקר זה, היא במובן הרחב של מערך, אשר נועד למנוע או לשבש הפעלת כוח אווירי נגד הצד המתגונן. היא משלבת מספר מרכיבים: סנסורים לגילוי האיום האווירי (מכ"מים, סיגינט, מערכות אופטיות), אמצעי יירוט (מטוסים, טק"א, תותחים), אמצעי שיבוש (ל"א וסייבר), ויכולות בקרה ושליטה להפעלה משולבת של כלל המרכיבים.

תהליכי בניין כוח של הגנה אווירית בעולם חושפים עקרונות משותפים להגנה אווירית במקומות שונים, לצד מאפיינים ייחודיים מקומיים. גם אלה וגם אלה חשובים כאשר אנו מנסים לשרטט את מאפייני ההגנה האווירית במזרח התיכון בעשור הבא.

הגנה אווירית נבנית כמערך להתמודדות עם מגוון איומים בתווך האוויר, לאור התפתחות יכולות התקיפה האווירית. בעבר כלל איום התקיפה מהאוויר מטוסי תקיפה מאוישים, וכיום הוא כולל גם כלי טיס לא מאוישים אשר יכולים להטיל חימוש (מרחפנים ועד מל"טי HALE), וכן פצצות גולשות ארוכות טווח, טילים בליסטיים, רקטות וטילי שיוט. הצורך בהגנה מפני מגוון איומים מקבל מענה על ידי הרחבת יכולת ההתמודדות ברמת מערכת הנשק היחידה. כך, במערכות טק"א רבות המיועדות להתמודד עם כלי טיס בטווחים ארוכים משולבת יכולת הגנה מפני טילים בליסטיים, כגון SA-20, ASTER-30, HQ-9 ופטריוט. מערכות טק"א קצרות טווח מותאמות גם להעסקת כלי טיס וגם להגנה מפני טילי שיוט, כגון SA-22, SA-15 ו-Sky-Sabre הבריטית. מערכות שפותחו להגנה מפני טילים, כמו "כיפת ברזל", מותאמות גם ליירוט מטוסים ומל"טים. על בסיס גיוון היכולות במערכות נשק ועל בסיס שילוב מערכות נשק שונות, מערכי הגנה עתידיים צפויים לתת מענה לאיום משולב של מטוסים, טילים וכטמ"מ: מערכי (IAMD, Integrated Air & Missile Defense (Kaushal, 2021).

הגנה אווירית מספקת מענה דיפרנציאלי במרחבים שונים, כך שהמרחב האווירי של מדינה מחולק לאזורי מטרות שבהם יש למנוע תקיפה אווירית ולאזורים שבהם יש למנוע מעבר של כוח אווירי בדרך אל המטרות. כוח אווירי שמגיע לתקוף במדינה גדולה יפגוש, ככלל, קו הגנה קדמי המורכב מטק"א ארוך טווח וממטוסי יירוט חמושים בטילים ארוכי טווח, האפקטיביים עד למרחק מאות קילומטרים מגבולות המדינה. לאחר מכן יגיע לאזור שחיקה שבו ההגנה האווירית דלילה יחסית ומורכבת מטק"א ארוך טווח וממטוסי יירוט. לבסוף יגיע הכוח האווירי אל אזורי המטרות, שם הוא צפוי לפגוש הגנה אווירית צפופה – הגנה על אתרים ספציפיים (הגנת נקודה), הגנה מרחבית על מרחבים אסטרטגיים או הגנה מרחבית על כוחות צבא. זהו המבנה המרחבי העקרוני של ההגנה האווירית הסינית, הרוסית והאיראנית.

הגנה אווירית מנוהלת בכל מרחב כמשימה אחת עם מגוון האמצעים הנדרשים לה. מרחב כזה יכול להיות סביבת מטרופולין גדולה (מוסקבה), סביבה של אתר אסטרטגי (כשאן), גזרת לחימה (רמת הגולן) או מרחב היערכות של כוח קרקעי (הגנה על דיביזיה). בכל מרחב ישנו מרכז שליטה המנהל מגוון אמצעים באזור לצורך המשימה. בראייה עתידית, סביר שלפחות חלק ממרכזי השליטה יפעילו את כלל האמצעים למשימת ההגנה: לגילוי, ליירוט ולשיבוש.

שליטה באמצעי הגנה אווירית מגוונים למול תמונה אווירית המשתנה במהירות מחייבת עבודה רשתית: יכולת לבנות תמונה אווירית בזמן אמת על בסיס מגוון סנסורים, ולנהל באופן אפקטיבי את האמצעים להתמודדות עם האיום. רשתיות כזו קיימת ברובד של מסגרת אורגנית כגון סוללת טק"א, ברובד מרכז שליטה השולט על אמצעים שונים, וברובד השליטה הארצית. הרשתיות נשענות על מערכות שליטה ובקרה ועל מערכות תקשורת המחברות בין הרכיבים השונים בהגנה האווירית: בתוך המסגרות האורגניות, בין מרכז השליטה לאמצעים תחתיו, ובין מרכז השליטה לדרג היררכי מעליו.

ניידות הפכה עם השנים למרכיב מרכזי יותר ויותר ביכולתן של מערכות הגנה קרקעיות – טק"א, מכ"מים ואמצעי ל"א. לא רק מערכות קצרות טווח ניידות; כל מערכות הטק"א ארוך הטווח החדשות מותקנות על כלי רכב, כך שהן ניידות עצמאית ולא נגרות: בארה"ב (THAAD), ברוסיה (S-500), בסין (HQ-19), באירופה (ASTER-30) ובאיראן (BAVAR-373). ניידות של מערכות הגנה אווירית נתפסת בישראל כמענה לצורך בשרידות ההגנה האווירית, מכיוון שהיא מבילה את היכולת הישראלית להשיג עליונות אווירית. מובן שלניידות תרומה חשובה לשרידותן של מערכות הגנה אווירית, אך הצורך בניידות נובע ראשית כל מהצורך להפוך את ההגנה האווירית ליעילה יותר. ניידות מקנה גמישות על מנת להתאים את היערכות ההגנה מול האיום המשתנה ובעקבות שחיקה של מערך ההגנה, וכן הגנה על כוחות ניידים. היא מאפשרת שמירת עתודות, ויסות משאבים, סתימת פרוצות בהגנה וסגירת נתיבי חדירה חדשים. ניידות היא חיונית במערכה מתמשכת להגנה מפני איום אווירי לאורך זמן, ולא נכון לראות בה אמצעי שרידות בלבד לשיבוש מהלך מהיר לצורך השגת עליונות אווירית.

הגנה אווירית מהווה יעד מרכזי לתקיפה על מנת לאפשר חופש פעולה של כוח אווירי. בהתאם, פותחו תפיסות ויכולות להגנה על ההגנה האווירית: סיכול והפלת מטוסי איסוף, מטוסי תקיפה, כטמ"מ וחמוש. בנוסף לכך מקובל השימוש באמצעי הונאה והסוואה. ברוסיה הפעלתם של אמצעים אלה היא חלק מתפיסת "מסקירובקה", הכוללת הפעלת דמיים מסוגים שונים להטעיית סנסורים לאיתור מערכות הגנה אווירית. הטכנולוגיות החדשות מאפשרות לשפר את שרידות ההגנה האווירית: ניידות מאפשרת שינוי היערכות מהירים יותר, ודורשת מהתוקף זריזות רבה יותר; המזעור מאפשר ליצור כלים קטנים יותר מבלי לפגוע באפקטיביות שלהם, כך שהחתימה שלהם נמוכה יותר וקשה יותר לגלותם; הפחתת החתימה מושגת גם על ידי יכולות גילוי פסיביות (אלקטרואופטיית וסיגינטיות) ועל ידי מכ"מים שקשה יותר לגלותם (LPI); השימוש ברשת להפצת תמונה אווירית מאפשר להחזיק את מערכות האש (טק"א ומטוסים) זמינות לפעולה מבלי שיצטרכו להפעיל את המכ"מים שלהן ולהיחשף.

כדי לצמצם את יעילותם של מערכי הגנה אווירית מקובל שימוש באמצעים שונים, וביניהם הרוויה בתקיפה (ריבוי כלי טיס, חימושים ודמיים), שיבוש ל"א במרחב גדול (ל"א מנגד ול"א להגנה הדדית) ושיבוש ל"א להגנה עצמית (למשל מול מערכות מכ"ם ומול מערכות IR). כמענה לכך, מוקנות להגנה האווירית יכולות התמודדות ברובד הרכיב וברובד המערך: ראשית, התמודדות עם ריבוי מטרות על ידי ניהול יעיל יותר של ההגנה באמצעות מערכות

שו"ב מתקדמות, שימוש בטילי "שגר ושכח" עם ראשי ביות (רב"תים) אקטיביים (בטילי קרקע-אוויר ובטילי אוויר-אוויר) והגדלת מספר המטרות הנעקבות במכ"ם (מ-1 בסוללת SA-5 ל-4 ב-SA-10, ל-12 ב-SA-20 ול-16 ב-SA-21). שנית, ישנו גיוון בשיטות הגילוי והביות, כך שבמערכות עקיבה של טק"א ושל מטוסי יירוט נעשה שימוש גם במכ"ם וגם במערכת אופטית, ובטילי קרקע-אוויר ואוויר-אוויר נעשה שימוש בראשי ביות מכ"מיים, אופטיים ומתבטיי קרינה (AR). גישות אלו פחות נפוצות בישראל ובאמל"ח אמריקני, אך נפוצות מאוד בסין (למשל רב"ת IR ורב"ת AR בטק"א HQ-9), באיראן (רב"תים מגוונים ובתחומי תדר שונים בטק"א) ובמטוסי דור 4+ בכל העולם (מערכות IRST לצד מכ"ם).

הגנה התקפית, קרי תקיפה לצורך הגנה אווירית על ידי פגיעה בפוטנציאל התקיפה, אינה רעיון חדש. מבצע "מוקד" נועד להגנה על ידי צמצום איום התקיפה ממטוסים, והפצצת מסילות השיגור של V-1 נועדה לצמצם את איום התקיפה בטילים. תקיפה במסגרת רציונל של שיפור ההגנה האווירית מכוונת בעיקר לשלבי הלחימה הראשונים כחלק ממכה מקדימה או ממהלך פתיחה. הגנה התקפית מהווה מרכיב חשוב גם בדוקטרינות העדכניות בעולם. הדוקטרינה הסינית כוללת במסגרת ההגנה ההתקפית תקיפה מקדימה של שדות תעופה, אמצעי איסוף מודיעין, מוצבי שליטה ובסיסי טילים, באמצעות טילים מדויקים ארוכי טווח ובאמצעות תקיפה מקדימה בסייבר. תקיפה כזו נועדה לנטרל את היכולת המערכתית של האויב, העושה שימוש בטכנולוגיות מתקדמות ובכוח אש חזק (Cheng, 2015; Shugart, 2019; Johnson, 2015). גם הדוקטרינה הרוסית כוללת במסגרת הגנה פעילה מכה מקדימה, שמטרתה לנטרל את היכולת המערכתית של האויב לבצע תקיפה ארוכת טווח. האמצעים המשמשים לכך הם גם טילים ארוכי טווח וגם אמצעי ל"א, סייבר ובעתיד נשקי אנרגיה. בתפיסה הרוסית מכה מקדימה יכולה לשמש גם ככלי לפגיעה ביכולות האויב אם הלחימה מסלימה, וגם כאמצעי הרתעה (Kofman, 2021). הנוכחות הרוסית במזרח התיכון והקשרים המתהדקים בין סין ובין חלק מהמדינות בהקשרי שיתוף פעולה טכנולוגי ומכירת אמל"ח יובילו, כנראה, להופעה של תפיסת ההגנה ההתקפית גם במדינות המזרח התיכון.

מגמות טכנולוגיות במערכות הגנה אווירית

הגנה אווירית מהווה לאורך שנים אתגר להפעלת כוח אווירי. היו שנים שבהן "הטיל כופף את כנף המטוס" והיתרון היחסי של ההגנה האווירית גבר, כמו בתום מלחמת ההתשה ובמלחמת יום הכיפורים, והיו שנים שבהן היתרון היחסי עמד לצד הכוח ההתקפי שהכריע את ההגנה האווירית, כמו במלחמת לבנון הראשונה ובמלחמת המפרץ. המגמות הטכנולוגיות בשנים האחרונות מובילות לשינוי יסודי ועמוק ביכולות של מגוון מרכיבים בהגנה האווירית. מערכי גילוי ושלטה מגוונים ורשתיים מאפשרים לבנות תמונה אווירית מדויקת יותר ולקבל החלטות מהירות יותר בהגנה, טק"א ומטוסי יירוט הפוכים ליעילים יותר וטווחי השפעתם גדלים, ויכולות שיבוש באמצעות ל"א ובעיקר באמצעות סייבר הופכות לאפקטיביות יותר. הטמעתן של טכנולוגיות אזרחיות – מערכות מבוססות תוכנה, מזער וטכנולוגיות מידע – מאפשרת למערכי הגנה אווירית לקלוט ולהפעיל אמצעים מגוונים שמאפייניהם ניתנים לעדכון במהירות, באופן שמקשה במיוחד על פיתוח מענה ועל השגת מודיעין טכנולוגי הנדרש לצורך כך. צירוף המגמות הטכנולוגיות מייצר פוטנציאל לשינוי לא לינארי ביכולת ההגנה האווירית, אשר משנה את המאזן בין יכולות ההגנה וההתקפה בתווך האווירי.

בפרק זה נבחנות מגמות השינוי ברובד מרכיבי ההגנה האווירית וברובד מגמות הרוחב הטכנולוגיות, ומסומנים השינויים המרכזיים שלהם פוטנציאל השפעה גבוה במיוחד על היכולת המבצעית של ההגנה האווירית.

בניית תמונה אווירית

בניית תמונה אווירית שלמה ומדויקת היא הבסיס להפעלה אפקטיבית של הגנה אווירית. שני האתגרים המרכזיים אשר מובילים לשיפור יכולת בניית תמונה אווירית הם איום כלי הטיס דלי החתימה, ואיום הטילים הבליסטיים וטילי השיוט. אתגרים אלה מציבים דרישות גבוהות במיוחד, והתמודדות מוצלחת עמם תגרור יכולת משופרת גם מול איומים אחרים. שני המרכיבים המרכזיים בשיפור היכולת הם שיפור הסנסורים, והקניית יכולת היתוך תמונה על בסיס גילוי סנסורים רשתי.

מכ"מים הם הסנסורים העיקריים לבניית תמונה אווירית בשל הכיסוי הרחב שלהם, וסביר שהם ימשיכו להיות סנסורים עיקריים גם בעתיד. שינוי אחד שנועד לשפר את גילויים של כלי טיס דלי חתימה ושל טילים הוא הורדת תדר המכ"ם לתחומים נמוכים שבהם קשה להקטין את שטח החתך המכ"מי (תחומי VHF ו-LVHF). מכ"מים בתחומי תדר נמוכים קיימים עשרות שנים. בעשורים האחרונים נכנסו לשימוש גם מכ"מי תדר נמוך גדולים מאוד הקבועים בקרקע (לדוגמה "רזוננס" הרוסי, "רדיר" האיראני ו"אולטרא" הישראלי),

אשר מקנים טווח גילוי גדול ביותר. לצידם מפותחים מכ"מי Phased Array בתדר נמוך, המאפשרים להשיג טווחים גדולים ויכולות נל"א טובות בזכות אונות צד נמוכות גם במכ"מים קטנים וניידים (כמו המכ"מים הסיניים JY-26, JY-27A).

התפתחות נוספת היא שילובם של מכ"מים מולטיסטטיים, אשר נמצאים בשנים האחרונות בפיתוח ועדיין אינם תופסים מקום משמעותי במערכים מבצעיים. התאמת המבנה של כלי טיס ושל טילים היא מענה מרכזי להקטנת השח"מ שלהם. זו מתוכננת מול מכ"מים מונוסטטיים, כלומר במטרה להקטין את האות המוחזר מכלי הטיס אל המכ"ם ששידר אותו. מכ"מים מולטיסטטיים מאפשרים מענה טוב יותר, בפרט מול כלי טיס דלי חתימה, מכיוון שהם מגדילים את מספר ההזדמנויות לקלוט החזר אות מכ"מים מכלי הטיס, ומפחיתים את האפקטיביות של הקטנת שח"ם גאומטרית. פריסת מערכי קליטה פסיביים מאפשרת לשפר את הכיסוי הגאוגרפי בעלות נמוכה יותר, מכיוון שהמכ"מים הפסיביים זולים מהמכ"מים האקטיביים. את המכ"מים הפסיביים קשה יותר לגלות ולתקוף מכיוון שאינם נחשפים בשידור, אולם הם נסמכים על מכ"מים משדרים שאותם אפשר לאתר. פתרון לנקודת תורפה זו מצוי בטכנולוגיית PCL (Passive Coherent Location), המאפשרת גילוי פסיבי על סמך שידורים של קורנים חיצוניים (כמו שידורי טלוויזיה ומכ"מים אחרים) תוך חיסכון במשאבים ותוך שיפור הכיסוי הגאוגרפי. גילוי PCL נמצא בפיתוח במספר מקומות בעולם ובפרט בסין, ועשוי להיות רלוונטי בזירה בעשור הבא (Bronk, 2020).

אחד מכיווני ההתפתחות המדוברים כיום הוא מכ"ם קוונטי. תאורטית, שימוש בטכנולוגיה יכול לשפר את רגישות החישה (SNR) עד 6dB, כלומר להקנות יכולת גילוי עדיפה במידה מסוימת של מטרות דלות שח"מ, והגדלת טווחי גילוי מטרות בכ-40%. לשיפורים אלה השפעה מוגבלת על יכולות הגילוי המכ"מי, ולכן פוטנציאל נמוך לתרומה מבצעית לפי הערכת משרד ההגנה האמריקני. כמו כן, המחקר הבוסרי בנושא מכ"ם קוונטי מעלה כי לא תתפתח יכולת מבצעית ראשונית לפני העשור הבא (Parker, 2020; DoD, 2019). מכאן שמכ"ם קוונטי אינו צריך להיכלל בין הנושאים עמם יידרש חיל האוויר להתמודד ב-20 השנים הקרובות.

מערכות ESM לגילוי פסיבי של קורנים משמשות מזה שנים רבות חלק ממערך סנסורים לתמונה אווירית. הן אמנם מוגבלות לגילוי שידור בלבד (שידור מכ"ם או שידור תקשורת), אך יש להן יתרון רב בגילוי מטרות שלהן שטח חתך מכ"מי קטן. השימוש הגובר בתקשורת מגוונת ורחבת סרט בכלי טיס ובטילים על מנת לאפשר שיתוף מידע והכוונה מדויקת מגדיל את ההזדמנויות של מערכות ESM לגלותם. השיפור במכ"מים בכלי טיס ובטילים מגדיל את מספר ההזדמנויות של מערכות ESM לגלותם בטווחים גדולים, גם מעבר לטווח הגילוי המכ"מי. השיפור בטכנולוגיות הגילוי הפסיבי (מזעור ושיפורי דיוק) מאפשר לבנות מערכים פסיביים יעילים יותר, אשר מקנים יכולת בניית תמונה אווירית מדויקת מספיק גם מול כלי טיס דלי חתימה שקשה לגלותם במכ"מים. גם אם דיוק האיכון במערכות ESM נמוך מדיוק הגילוי במכ"ם, במערכי גילוי מקושרים דיוק הגילוי הסיגינטי יכול להספיק כדי

להפנות סנסורים מכ"מיים אל תא הנפח שבו התגלתה מטרה קורנת, ולשפר את יכולת הגילוי המכ"מי.

מערכות אלקטרואופטיות משמשות זה שנים לגילוי כלי טיס, אולם טווחי הגילוי שלהן קצרים. השיפורים ביכולות הסנסורים בהיבטי מזעור ושיפור רזולוציה יובילו בשנים הבאות להגדלת טווחי הגילוי. מערכות אלקטרואופטיות במטוסים (IRST) ובטק"א (כמו מערכת SNIPER בסוללות פטריוט) מאפשרות כבר כיום גילוי מטוסים בטווח של עשרות ק"מ. היכולת לגלות מהקרקע מוגבלת יותר מהגילוי האווירי בשל עננות בגובה נמוך ובשל עבירות אטמוספירית נמוכה יותר בגובה נמוך מעל לקרקע, ולכן סביר שגם בהמשך סנסורים אלקטרואופטיים קרקעיים יהיו מוגבלים בטווחי הגילוי. הם יכולים להיות אפקטיביים בגילוי איומים אוויריים באזורים מתוחמים, כמו בהגנה על אתרים אסטרטגיים או בסגירת פערי כיסוי בגובה נמוך, ויש להם גם תרומה ביכולת הזיהוי המשלימה את התמונה האווירית.

השיפור הדרמטי ביותר בשנים האחרונות בבניית התמונה האווירית הוא בגילוי הרשתי: הפעלת מספר רב של סנסורים שונים, היתוך הגילויים שלהם לתמונה שלמה והקצאת יעילה יותר של משאבי איסוף לטיוב התמונה המתקבלת. גילוי רשתי מאפשר לשפר את הכיסוי המרחבי המתקבל (מספיק גילוי של חלק מהסנסורים), מאפשר לשפר את סיכויי הגילוי (אוסף גילויים חלקיים שאף אחד מהם "אינו עובר סף גילוי" מתורגמים לגילוי משולב), ומאפשר להתמודד עם אמצעי נגד (במקום להתמודד עם סנסור אחד, המטרה צריכה לספק מענה לכולם). בנוסף לכך, הרשת מאפשרת להפיץ את התמונה האווירית אל מי שמקצה משימות לאמצעי ההגנה האווירית. רשת כזו כבר קיימת במערכי הגנה אווירית בעולם, וסביר שבשנים הבאות היא תשתכלל במובן של מתן תמונה אווירית שלמה יותר ומדויקת יותר. שיפור תקשורת במערכות קרקעיות ובקשר קרקע-אוויר יאפשר לקשר למערכת הבונה תמונה אווירית גם סנסורים של סוללות טק"א ושל מטוסים, כך שמספר הסנסורים הבונים תמונה אווירית יגדל, ובהתאם התמונה תהיה שלמה ומדויקת יותר.

מערכות יירוט קרקעיות

מערכות יירוט קרקעיות מאורגנות בתפיסה של "קליפות הגנה": הגנה בטווח גדול של מאות ק"מ באמצעות טק"א ארוך טווח (או טק"א "אסטרטגי"), הגנה מרחבית בטווח קצר יותר באמצעות טק"א לטווח בינוני, והגנת מקומית על אתרים או על כוחות ניידיים באמצעות מערכות לטווח קצר של מספר ק"מ – טק"א קצר טווח, תותחים וטילי כתף. זוהי אמנם חלוקה ותיקה, אך היא נשמרת גם במערכות קרקעיות חדשות. במערכות טק"א אלו משולבות יכולות נוספות: התמודדות עם טילים בליסטיים משולבת ברבות ממערכות הטק"א ארוך הטווח, תוך ניצול יכולתם של המכ"מים לגלות בטווחים ארוכים הנדרשים מול טילים בליסטיים, וניצול יכולתם של הטילים ליירוט בגובה. התמודדות עם טילי שיוט מנמיכי טוס משולבת במערכות טק"א קצר טווח, בשל הצורך בריבוי מערכות לשיפור יכולות גילוי ויירוט בגובה נמוך.

ישנן מספר מגמות התפתחות ביכולותיהן של מערכות יירוט קרקעיות, המשותפות למגוון מערכות.

הטווחים של מערכות טק"א הולכים וגדלים באמצעות שיפורים במכ"מים ובטילים. הטווח המרבי של טק"א ארוך טווח גדל, כמו המעבר מ-S-300 (200 ק"מ) ל-S-400 (400 ק"מ) או HQ-9 (מ-200 ק"מ ל-300 ק"מ עם טיל משופר בעל רב"ת IR בגרסת HQ-9B), אך טווח 400 ק"מ הוא המקסימום הסביר מול מטוסים, מכיוון שהוא טווח הגילוי המכ"מי מול מטוסים בגובה רב אופייני. טילים לטווח ארוך יותר, כמו 77N6 ב-S-500 או HQ-19, נועדו ליירוט חוץ-אטמוספרי ולא ליירוט מטוסים. לצד הארכת הטווחים, סוללות טק"א ארוך טווח מצוידות גם בטילים לטווחים קצרים יותר על מנת לייעל את יכולותיהן בטווחים אלה (כמו טילי 9M96 במערכות S-400 וטילי 9M82 במערכות Antey-2500). גם הטווחים של מערכות טק"א לטווח קצר ולטווח בינוני גדלים, כמו ב-SA-22 (מ-20 ל-40 ק"מ), ב-HQ-17 הסיני (מ-40 ל-70 ק"מ) ובטילי ציאד האיראניים (מ-60 ל-100 ק"מ, ואף ל-200 ק"מ). כך ההגנה המרחבית מכסה שטחים גדולים יותר בצפיפות.

מגמה שנייה היא שיפור התמודדות הטילים עם יכולות התגוננות של כלי הטיס. מגמה זו מושגת על ידי שיפור ביכולות המכ"מים, שיפור ביכולות הטילים ואוטומציה של תהליכי קבלת החלטות תוך צמצום התלות במפעילים אנושיים. מכ"מי AESA מאפשרים יכולות גילוי ועקיבה משופרות בזכות ניהול משאבים יעיל יותר. מכ"מים דיגיטליים מאפשרים עיבוד אות טוב יותר וגמישות רבה יותר במאפייני השידור, ולכן יכולים לטפל טוב יותר בהפרעות ל"א ולגלות טוב יותר מטרות על רקע קלאטר, כולל מטרות דלות שח"מ.

שיפור הטילים מושג על ידי שיפור רב"תים. הולך וגובר השימוש במכ"ם אקטיבי, אשר מאפשר עצמאות לטילים בטווחים גדולים ובמצבים שבהם הסוללה המשגרת אינה מצליחה לעקוב אחר המטרה בדיוק מספיק. דוגמאות לכך במערכות ארוכות טווח הן טילי 9M96 וטילי 40N6 במערכת S-400 או הטילים של מערכת HQ-19 הסינית. אולם רב"תים אקטיביים משולבים גם במערכות לטווחים קצרים יותר, כמו ציאד האיראני והגרסה החדשה של טילי SA-17: מערכת Viking. בנוסף מותאמים לטילים קיימים רב"תים שונים, המאפשרים להם יכולות ביות חדשות על מטרות דלות שח"מ או על מטרות המפעילות ל"א, כמו רב"ת דואלי מכ"מי+תרמי או רב"ת מתביית קרינה בגרסת הייצוא של HQ-9 הסינית (FT-2000). טכנולוגיות המזעור והעיבוד מאפשרות לשלב רב"תים שונים באותו טיל באופן פשוט יותר מבעבר, ולהקשות על ההתמודדות עם הטיל.

מגמה שלישית היא שיפור העבודה ברשת בתוך הסוללה ועם מסגרות סמוכות על בסיס תקשורת ויכולות עיבוד לצורך בניית תמונה אווירית משותפת. בעתיד, סביר שישולבו תכנון וקבלת החלטות אוטומטיים, אשר יאפשרו לקצר את תהליכי השליטה והבקרה בעבודה הרשתית. עבודה רשתית מקנה יכולת לבצע העסקה מתואמת של מטרות רבות, משחררת

את יחידות האש מהצורך לבנות לעצמן את התמונה האווירית על מנת שיוכלו ליירט ביעילות, ומאפשרת ליחידות האש אפקטיביות תוך צמצום חשיפה.

בשנים האחרונות הולך ומתפתח תחום חדש של טכנולוגיות יירוט – שימוש בנשקי אנרגיה, בעיקר לייזר רב עוצמה אך גם HPM. בעבר, מערכות לייזר מצב מוצק (להבדיל מלייזר כימי), הנוחות לשימוש מבצעי, היו בעלות עוצמה חלשה מדי אשר מנעה טווח אפקטיבי מספק. אולם הטכנולוגיה הולכת ומשתפרת, וכבר כיום אמצעי יירוט לייזר משמש במערכות נגד רחפנים, אשר נדרשות לנטרל כלי טיס פגיעים בטווחים קצרים (ק"מ ספורים). המשך פיתוח הטכנולוגיה עשוי להציב את הלייזר כאמצעי יעיל להגנה אווירית, לפחות בטווחים קצרים, גם נגד כלי טיס וגם נגד חימוש. יירוט באמצעות לייזר זול בהרבה מיירוט באמצעות טק"א, וחסין מול חלק מפתרונות ההגנה נגד טק"א. אפשר שבעשור הבא יופיעו מערכות לייזר ראשונות לצרכי הגנה אווירית, גם אם יכולותיהן עדיין יהיו מוגבלות.

מטוסי יירוט

אחד הפערים הגדולים ביותר בין היכולות הקיימות כבר עתה לבין השלכותיהן מנקודת מבט ישראלית הוא בתחום מטוסי היירוט. כיום, האיום האווירי בזירות הלחימה של ישראל (איראן, סוריה ולבנון) נחות משמעותית מהיכולות הישראליות ומהיכולות הזמינות לרכישה בעולם. לעומת זאת, למדינות אחרות במזרח התיכון – מצרים, סעודיה, מדינות המפרץ, אלג'יריה – כבר יש בסד"כ מטוסים מתקדמים, אשר עלולים לאתגר את העליונות הישראלית. מטוסי יירוט הם מרכיב חשוב בהגנה האווירית, ומדינות במערב רואות בהם איום על העליונות האווירית ועל יכולת הפעלת הכוח (Heginbotham, 2017; Bronk, 2018). בעולם מסתמנות שלוש מגמות מרכזיות בתחום מטוסי הקרב.

המגמה הראשונה והמרכזית היא שיפור יכולותיהם של מטוסים קיימים מדור 4 (דור 4+) והקניית מגוון גדול של יכולות גילוי, העסקה ושרידות. זוהי מגמה מרכזית בעיקר משיקולי עלות: המטוסים קיימים, מחיר רכישתם והפעלתם נמוך משל מטוסי דור 5, והיכולות המוקנות מהוות עליית מדרגה של ממש בתועלת המבצעית. רוב סד"כ חילות האוויר בעשור הבא צפוי להיות מטוסי דור 4+. המטוסים בקבוצה זו הם ברובם אמריקניים (F-15/16/18), אירופיים (Rafale, Typhoon), רוסיים (בעיקר משפחת Su-30), ומטוסים סיניים (משפחות J-10, J-11) שתפוצתם מחוץ לסין עדיין נמוכה אך עשויה לגדול.

המגמה השנייה היא שילוב מטוסי דור 5 בסד"כ. ככלל, מטוסים אלה יקרים יותר לרכש ולתחזוקה ויכולת הנשיאה שלהם מוגבלת (מבלי לפגוע בשח"מ), ולכן הם לא יהוו את כלל הסד"כ אפילו בחיל האוויר האמריקני (Insinna, 2021). במדינות אחרות הם יהוו חלק קטן מהסד"כ, לכל היותר. הדגמים בעשור הבא יכללו כנראה את הקיימים ואת אלה שבפיתוח: F-35 האמריקני, J-20 הסיני, וכן Su-57 או Su-75 הרוסיים. יתרונם על מטוסי דור 4 הוא בשרידות בשל שח"מ נמוך. סביר שיכולות הגילוי וההעסקה שלהם לא יהיו טובות יותר,

ואולי אף פחות טובות בשל אילוצי תצורת השח"מ (בהנחה שיכולות של סנסורים וקישוריות הקיימות במטוסי דור 5 יוקנו למטוסי דור 4+).

המגמה השלישית היא כניסה ראשונית של מטוסי דור 6, אשר נמצאים בפיתוח במספר מדינות בעולם, וסביר שלא נפגוש אותם במדינות המזרח התיכון בעשור הבא. כיווני הפיתוח שונים מאוד זה מזה – ממטוס דל חתימה למשימות יירוט (NGAD של USAF או F-X היפני), דרך מטוס רב-משימתי (F/A-XX של USN), ועד לתפיסה חדשה של מטוסים שיפעלו בערכות עם כטמ"מ (כמו קונספט FCAS האירופי או Tempest הבריטי).

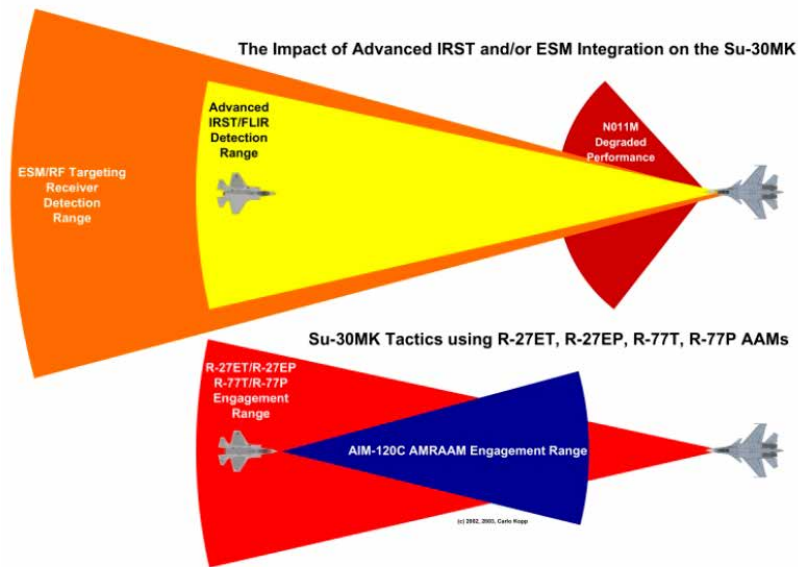
להלן נתמקד במטוסי דור 4+, שכאמור צפויים להוות נתח עיקרי בסד"כ חילות האוויר בעשור הבא. השיפורים השונים נועדו לקרב את יכולותיהם לאלו של מטוסי דור 5 בהיבטי סנסורים ורשת תקשורת, וכן לשפר את יכולותיהם ביירוט ובהגנה מאיומים.

חליפת הסנסורים במטוסי דור 4+ המתקדמים כוללת כבר כיום מכ"מי AESA, מערכותIRST וסנסורי סיגינט (במטוסים רוסיים טרם שולב מכ"ם AESA, להבדיל ממטוסים אמריקניים, סיניים ואירופיים). סביר שבעשור הבא יכולות אלו יהיו סטנדרט במטוסי דור 4+. מכ"מי AESA מאפשרים בניית תמונה אווירית בטווח גדול, העסקת מספר מטרות בזמנית וחסיונות משופרת להפעלת ל"א. מערכותIRST מאפשרות גילוי פסיבי של מטוסי קרב מטווח עשרות ק"מ, וסנסורי סיגינט הם בעלי פוטנציאל טוב לגילוי שידורי מכ"ם של מטוסים דלי שח"ם, ובעתיד גם לגילוי תקשורת (בדומה ליכולת של מערכות סיגינט קרקעיות). הסנסורים הפסיביים,IRST וסיגינט, מאפשרים גילוי בטווחים ארוכים גם של מטוסים דלי שח"ם. לכן הם מצמצמים את היתרון של מטוסי דור 5 על פני דור 4+ ביכולת "לראות ראשון ולירות ראשון". ערוץ נוסף לצמצום היתרון היחסי של מטוסי דור 5 על פני דור 4+ הוא פיתוח מכ"מים חדשים למטוסים. במטוסי Su-35 ברוסיה מותקנים בשפות ההתקפה של הכנפיים מכ"מים הפועלים בתחום L (1-2 GHz), בנוסף על מכ"ם בקרת האש באף. בתחום תדר זה למטוסי דור 5 אין, ככלל, שח"מ נמוך, ולכן הם עשויים להתגלות בדומה למטוסי דור 4 (Koop, 2009).

תקשורת בין מטוסים היא מרכיב מרכזי ביכולתם לבנות תמונה אווירית ולנהל את הלחימה בזמן אמת. בדומה לרשת התקשורת במערכות יירוט קרקעיות, גם באוויר הרשת מאפשרת לשלב גילוי ממספר מטוסים לכדי תמונה שלמה, מאפשרת לכל מטוס לקבל תמונת מטרות ואיומים סביבו גם באזורים שבהם אין לו גילוי, ומאפשרת להתמודד בעילות גבוהה יותר עם אמצעי ל"א.

החימוש העיקרי המפותח ומיוצר עבור מטוסי קרב הוא טילי אוויר-אוויר עם רב"ת מכ"ם אקטיבי. הטילים האקטיביים מגיעים כיום לטווח 100-120 ק"מ בטילים סטנדרטיים ועד לכ-300 ק"מ בטילים ארוכים המיועדים ליירוט מטוסי איסוף וסיוע הפועלים מנגד (כמו R-37 הרוסי ו-PL-15 הסיני). בשל גודלו הקטן, רב"ת אקטיבי רוכש את המטרה כאשר הוא קרוב יחסית אליה (במרחק 20-30 ק"מ ממנה), וברוב הדרך הוא נשען על עדכון שוטף ב-

uplink. לאור זאת, ולאור הדינמיקה של מטוסים במפגש אווירי, לגילוי הרשתי יש תפקיד חשוב ביכולת ההעסקה עבור מטרות בטווחים גדולים. בדומה לטק"א, גם בטילי אוויר-אוויר יש מגמה של שילוב יכולות ביות דואליות: מכ"ם יחד עם ביות אלקטרואופטי או עם ביות על שידורי מכ"ם (RF פסיבי). השילוב של סנסורים, עבודה רשתית וטילים ארוכי טווח מאפשר למטוסים הרוסיים הקיימים (ולמקביליהם הסיניים), עימם יידרש חיל האוויר הישראלי להתמודד בעוד מספר שנים, זרוע ארוכה ביחס למטוסים האמריקניים, כמוצג בתרשים הבא. לצד טילי מכ"ם ארוכי טווח צפוי להישמר מקומם של טילים אלקטרואופטיים קצרי טווח. השינוי הצפוי הוא גידול בתפוצה של טילים עם רב"ת הדמאתי אופטי או תרמי, להבדיל מטיילי חום בעבר. ההשפעה המרכזית של רב"תים אלה היא קושי ליצור נגדם אמצעי נגד פשוטים כמו נורים.



Su-30 מול מטוס דור 5 – השפעת הסנסורים והטילים (Koop, 2012)

המענה המשלים ליכולת היירוט הוא יכולת ההתגוננות של המטוסים. יכולת ההגנה העצמית הקיימת כיום שונה מאוד מזו שהייתה במטוסים עימם התמודד חיל האוויר הישראלי בעבר. ראשית, השתפרה יכולת ההתמודדות עם מכ"מים ועם טילי מכ"ם. למטוסים מתקדמים יש כבר כיום מערכות הגנה עצמית אינטגרליות, הכוללות מענה בתחום המכ"ם (ל"א אקטיבי) ובתחום התרמי (נורים ושבים). חלק מטכניקות הל"א מכוונות לנצל נקודות תורפה גטריות של הטיילים, כמו טכניקת XPOL המיושמת ברוסיה באופן נרחב במטוסים ממשפחת Su-30 בפודי קצה כנף (Koop, 2012).

מערכות שיבוש

בעשורים האחרונים התפתחו במערב שלוש יכולות ששינו באופן ניכר את האפקטיביות של כוח אווירי ועושות שימוש בתווך האלקטרומגנטי. הראשונה היא תקיפה רחבה ומדויקת, המבוססת על רשת GPS ועל מגוון סוגי חימוש שמנווטים ופוגעים במטרות לפי איכון GPS, אשר הייתה מרכיב מרכזי בתפיסת RMA (Revolution in Military Affairs). השנייה היא תקשורת לוויינים גלובלית ובספיקה גבוהה, המאפשרת איסוף ותקיפה בטווחים גדולים מאוד תוך שליטה אפקטיבית בהפעלת הכוח בזמן אמת. השלישית היא לחימה מבוססת רשת, המתבססת על רשת תקשורת בין מרכיבי הכוח הצבאי, על מנת לגבש מודעות מצבית משותפת בין מרכיביו של כוח צבאי מבוזר, ולאפשר הפעלה מסונכרנת שלהם להשגת התכלית המוגדרת (Alberts, 1999). ההתפתחות הנרחבת של אמצעי תקשורת ומערכות עיבוד מידע מובילה להמשך פיתוח היכולות הרשתיות של הכוח האווירי, ויחד איתן לתלות הולכת וגוברת ברשת ובמערכות ממוחשבות בתהליכי הפעלת הכוח.

התפתחויות אלו ביכולות המערביות הובילו לגיבוש מענה, שהוא נרחב ומקיף בהרבה מיכולות ה"א בעבר. כמענה ליכולות GPS פותחו מגוון אמצעי שיבוש נגד מקלטי GPS בכלי טיס ובטילים, על ידי חסימת הקליטה של אות הלוויינים ועל ידי הטעייה של המקלט. אמצעים אלה נמצאים כבר עתה בתפוצה רחבה במדינות העימות. בדומה לתהליך ההתפתחות ההדדי של ל"א ונל"א במכ"מים ובתקשורת אלחוטית, גם בתחום ניווט GNSS צפוי להימשך פיתוחם של יכולות שיבוש ושל אמצעי התמודדות מגוונים (צימוד למערכות ניווט אחרות, אלגוריתמים לסינון אותו שיבוש, אנטנות מסתגלות, שימוש במספר מערכות GNSS שונות).

לנוכח הרחבת השימוש בתקשורת לוויינית מפותח מענה, כחלק מתפיסה שלמה מול לוויינים, הכולל אמצעים לשיבוש התקשורת ואמצעים לפגיעה פיזית בהם באמצעות יירוט. תפוצתם של אמצעים לשיבוש ולנטרול לוויינים מוגבלת כיום למספר מדינות אשר פיתחו אותם. סביר שיכולות אלו יהיו זמינות בתפוצה רחבה יותר בעתיד. ככל שטכנולוגיית שיגור למסלול לווייני תהפוך לזמינה יותר, גם יכולות יירוט לוויינים יהיו נפוצות יותר.

מבין האמצעים לשיבוש היכולת האווירית, פוטנציאל השינוי הגדול ביותר טמון בתקיפות סייבר (הכוונה לתקיפות, CNA, ולא לריגול או להשפעה בתווך הקיברנטי). תקיפת הרשת המבצעית של הכוח האווירי יכולה להשיג תוצאות מערכתיות רחבות, משיתוק כולל של יכולות מודיעין, לוגיסטיקה, תכנון ושליטה, ועד למיקוד בהשגת אפקט מסוים בזמן מסוים. הדוגמה הסינית היא המגוונת ביותר להבנת משרעת השימוש של CNA. סין עושה מזה שנים שימוש בתקיפות סייבר ככלי בעימותים בשגרה. היא גם מפתחת את היכולת לפגוע במערכות פו"ש מרכזיות, ושילוב יכולות אלו בתוכניות מבצעיות מתורגל כבר למעלה מ-15 שנים (Ball, 2011). הפוטנציאל לגרימת נזק מכריע במערכות שליטה הוביל לשילוב הסייבר ההתקפי בתפיסה הסינית של מכה מקדימה ושל הרתעה אסטרטגית (Jiang, 2019). בארה"ב סייבר

התקפי נתפס כאחד המרכיבים בהרתעה אסטרטגית, לצד יכולות גרעיניות וחלק מהיכולות הקונבנציונליות (DoD, 2015).

בנוסף לתקיפת רשתות לצורך פגיעה משמעותית ביכולות השליטה של היריב, מתפתח גם רובד טקטי של תקיפות סייבר. מספר מדינות משלבות ל"א וסייבר כחלק מיכולת מבצעית שלמה, כמו בתפיסה המאוחדת הסינית INEW (Ball, 2011). תקשורת RF מאפשרת נקודת חדירה לתקיפת סייבר של מקלט במערכת נשק. מכיוון שהמקלט מחובר לכלל מערכת הנשק, ובמקרים מסוימים מחובר באמצעות רשת תקשורת למערכות אחרות, ניתן לתקוף בטכניקות CNA גם את מערכת הנשק וגם את המערכות המקושרות אליה. תקיפות סייבר דרך תווך RF במטרה לגרום ל־soft-kill של מערכת נשק מוצעות היום למכירה על ידי חברות שונות¹. תקיפת סייבר בתווך RF מספקת כלי חשוב במערך הגנה: היא מאפשרת נטרול אמצעי איסוף או תקיפה, מבלי להידרש לתקיפת סייבר של מערכות שו"ב, אשר עלולה להיחשב מדרגת הסלמה.

במבט לעשור הבא, תקיפות סייבר צפויות להיות מרכיב מרכזי של יכולת הגנה במספר רבדים: החל מיכולת נקודתית מול אמצעי שמגיע לאזור המוגן לאיסוף או לתקיפה, ועד לפגיעה רחבה במערכות מודיעין, לוגיסטיקה, תכנון ושליטה. המנעד הרחב של תקיפות סייבר, והיכולת לבצען בחתימה נמוכה, מאפשרים להפעיל תקיפות סייבר גם במלחמה רחבה, גם במבצעים במסגרת מב"מ וגם כחלק ממצב שגרה. הרחבת יכולות הרשת והתקשורת, אשר צפויה להימשך בחיל האוויר גם בעתיד, מייצרת סיכונים הולכים וגדלים בשל ריבוי ערוצי חדירה למערכות ובשל הגידול בתלות ברשת.

הגנה אווירית בים

חיל האוויר הישראלי מתמקד בהגנה אווירית המוצבת ביבשה, שם נמצאת כיום ההגנה האווירית של מדינות העימות. אולם בספינות בציים בעולם מותקנים אמצעי הגנה אווירית מתקדמים לא פחות. הצורך ביכולות הגנה אווירית מתקדמות בספינות נובע מחשיבותו האסטרטגית של כוח ימי, מאימי התקיפה על ספינות אשר הולכים ומשתפרים (מטוסים, טילי שיוט וטילים בליסטיים), ומהצורך של כוח ימי להגן על עצמו בעת שהוא רחוק מההגנה האווירית של ארצו.

הגנה אווירית בספינות, כמו הגנה אווירית ביבשה, מבוססת על אמצעי גילוי, אמצעי יירוט ואמצעי שיבוש. בספינות גדולות מותקנים מכ"מים שנועדו לספק תמונה אווירית לצורך הגנת הספינה וכוחות ימיים בסביבתה מפני מטוסים ומפני טילים. למערכות טק"א קרקעיות יש נגזרת ימית, כמו Shtil-1, S-300FM ו־Pantsir-ME הרוסיות (נגזרות של SA-17, SA-22 ו־

1 SIGNET של אלביט מבטיחה various RF interception kits שמספקים smart, low-profile, soft-kill capabilities https://elbitsystems.com/ ראה. WIFI תקשורת דרך למערכות חדירה

SA-20 לטווחים ארוך, בינוני וקצר), HHQ-9 ו-HHQ-16 הסיניות (נגזרות של HQ-9 ו-HQ-16 לטווח ארוך ולטווח בינוני), CAMM הבריטית ו-ASTER-30 הצרפתית. חלק מהמערכות הן ייעודיות להגנה אווירית ימית, כמו SM-2 האמריקנית או "ברק" הישראלית.

בדומה למערכות הגנה אווירית קרקעיות, גם מערכות הגנה אווירית ימיות משתפרות בהיבטי הגדלת הטווח, התמודדות עם אמצעי נגד (שיפור רב"תים ואמצעי נל"א) ועבודה רשתית בין אמצעי גילוי ואמצעי העסקה. אמנם הטווחים של מערכות ימיות בדרך כלל קצרים מאלה של המקבילות ביבשה², אולם טווחי ההשפעה של ההגנה האווירית בים הולכים וגדלים. יכולות ההגנה האווירית הימיות משמשות לעתים כחלק ממערך הגנה אווירית ליבשה, כמו Aegis Combat System שנועדה לשמש חלק ממערך הגנה מפני טק"ק בליסטי, או כמו השימוש בהגנה אווירית אינטגרלית של ספינות להגנה על אזורי החוף, למשל היערכות סירות טילים רוסיות חמושות בטק"א S-300F להגנה על כוחות רוסיים בטרטוס ובחמימים שבסוריה באמצע העשור הקודם (Delanoe, 2020).

מגמות רחב טכנולוגיות

פיתוח מערכות הגנה אווירית מתקדמות, הכוללות סנסורים, טילים, אמצעי שיבוש ומערכות שליטה, נשען על מספר טכנולוגיות מרכזיות, המשותפות למגוון מערכות ההגנה האווירית. בעבר, הטכנולוגיות המשמשות מערכות צבאיות פותחו לצרכים צבאיים. כיום, וכך צפוי גם בעתיד, חלק ניכר מהטכנולוגיות הללו מפותח לצרכים אזרחיים, וההתקדמות הטכנולוגית המהירה ביכולות ההגנה האווירית תושג בזכות ההתפתחות הטכנולוגית בשוק האזרחי.

במערכות הגנה אווירית מודרניות, כמו בהרבה מערכות אחרות כיום, **תהליכי קבלת ההחלטות מבוססים על תוכנה**: ניהול השידור במכ"ם, עיבוד האותות הנקלטים במכ"ם ובאמצעי התקשורת, גילוי וסיווג מטרות, סינון רעשי ל"א, תכנון מסלול הטיילים וכדומה. תוכנה, להבדיל מרכיבים אנלוגיים בעבר, מאפשרת להטמיע לוגיקת פעולה מורכבת יותר במערכת ולשפר את ביצועיה תוך גמישות רבה בהתאמת לוגיקת הפעולה לצרכים משתנים באמצעות גרסאות תוכנה חדשות. לכן, ככלל, מערכות נשק המבוססות על תוכנה צפויות להיות מגוונות יותר, וניתן לעדכון בקצב מהיר יותר. שני מאפיינים אלה הופכים את ההתמודדות עם מערכות מבוססות תוכנה למאתגרת יותר – פיתוח אמצעי נגד מערכת מבוסס על מודיעין אודות מאפייני המערכת, ועל התאמת המענה. רבים מאמצעי הנגד היעילים, בפרט יכולות ל"א, רגישים מאוד למאפיינים ספציפיים של המערכת שנגדה פותחו, ובמקרים אלה הופעת מערכות חדשות ושינויים במערכות קיימות מחייבים פיתוח או התאמה של אמצעי הנגד. על כן מערכות הגנה אווירית מבוססות תוכנה מהוות אתגר בהיבט השגת המודיעין על שינויים במערכות ובהיבט הקצב שבו נדרש מענה חדש.

2 הטווח של SA-N-20 הימי הוא 200 ק"מ, בעוד שטווח המערכת הקרקעית 250 ק"מ. טווח HQ-9 הימית 150 ק"מ, בעוד שטווח HQ-9 200 ק"מ

מזעור רכיבים משפיע במידה רבה מאוד על מערכות הגנה אווירית, כמגמה משלימה להתבססות על תוכנה. מזעור של רכיבי מחשב ושל חיישנים מאפשר להשיג ביצועים דומים ואף טובים יותר במערכות קטנות יותר. החיסכון באנרגיה המושג במערכות קטנות יותר מאפשר לעבור למקורות אנרגיה קטנים יותר, תוך מזעור נוסף של המערכות. רכיבי שידור ועיבוד קטנים יותר הם בסיס לאנטנות AESA המשיגות אפקטיביות גבוהה יותר של מכ"מים, חיישנים אלקטרואופטיים קטנים יותר מאפשרים ליצור רב"תים הדמאתיים לטילים, ואנטנות קטנות יותר יחד עם חיישני תנועה קטנים יותר מאפשרים להקטין את הטילים מבלי לפגוע באפקטיביות שלהם, ולחלופין להגדיל את טווחיהם.

מערכי הגנה אווירית נשענים במידה רבה, אשר הולכת וגדלה, על **טכנולוגיות מידע**. תקשורת בין רכיבים, היתוך תמונת סנסורים לתמונה אווירית שלמה בזמן אמת ושיקוף תמונת אמצעי ההגנה בזמן אמת הם מרכיבים שקיימים כבר כיום במערכי הגנה אווירית, ברבדים היררכיים שונים: מהרובד הארצי, דרך הרובד הגזרתי (מרכזי גילוי ושליטה, חטיבות טק"א, שייטת ספינות, ערכת מטוסים) ועד לרובד המסגרת היחידה (סוללת טק"א, ספינה, מטוס). המגמה הטכנולוגית של שילוב AI במגוון מערכות תגיע, מן הסתם, גם למערכות הגנה אווירית. שילוב AI בתהליכי קבלת החלטות יאפשר לצמצם את התלות בפעולות אנושיות במרכזי שליטה ובקרה, תוך יצירת תהליכי קבלת החלטות מהירים יותר ומסונכרנים יותר בין המערכות השונות המרכיבות את מערכי ההגנה האווירית. הגנה אווירית שבה קבלת ההחלטות תבוסס על תהליכים ממוכנים תוכל לספק מענה מהיר יותר ומותאם יותר לאיומים.

תהליכים רשתיים ותהליכים ממוכנים במערכי הגנה אווירית מהווים גם נקודת תורפה: רכיבי התקשורת בין המערכות ברשת מייצרים פרצות שדרכן ניתן לחדור לתוך הרשת, והחיבור הרשתי הנרחב עשוי לאפשר את ניצול הפרצות הללו כדי להגיע לאזורים נרחבים ולמרכזי הכובד של קבלת החלטות – בין אם החלטות אנושיות ובין אם החלטות ממוכנות. הרשת מהווה גם סיכון וגם הזדמנות למי שמתמודד עם מערכי הגנה אווירית.

לאורך עשרות שנים רוב הסנסורים המשמשים להגנה אווירית היו מכ"מים שפעלו בתחומי תדר אופייניים: ככלל, מכ"מי תמונה אווירית מתחום VHF ועד S, מכ"מי טק"א מתחום C ועד X, ומכ"מים מוטסים ורב"תים בטילים בתחום X. שילוב טכנולוגיית הפחתת שח"מ במטוסי קרב, במפציצים, בכטמ"מ ובטילי שיוט בעשורים האחרונים, כמו גם הצורך בגילוי טק"ק בליסטי בטווחים ארוכים, הובילו למעבר **לטכנולוגיות מכ"ם חדשות**, בעיקר ירידה לתדר נמוך שבו טיפולי שח"מ אופייניים אינם אפקטיביים. בשנים האחרונות הולכים ומתפתחים מכ"מים מולטיסטטיים, להם פוטנציאל גבוה משל מכ"מים מונוסטטיים בגילוי כלי טיס דלי שח"מ, מכיוון שטיפולי השח"מ האופייניים אינם מתאימים מולם (Terje, 2020).

במכ"מי חיפוש בולטת ירידה לתחומי תדר נמוכים, בעוד שבראשי ביות מכ"מיים של טילים אקטיביים בולטת מגמה מנוגדת: מעבר לתחומי תדר גבוהים, Ku ובהמשך Ka. טילים עם רב"ת בתחום Ku קיימים במערכות קרקעיות ואוויריות (למשל בטיל ההודי ASTRA),

ובחלק מסוגי הטילים הדורות הבאים כבר כוללים רב"ת אקטיבי בתחום הגמ"מ הגבוה (למשל בטיל ASTER-30 block 1NT). היתרון של שימוש בתחום תדר גבוה הוא ביכולת להקטין את האנטנות תוך שמירה על הביצועים, או להשאיר את האנטנות בגודלן הקודם תוך השגת טווח גדול יותר ודיוק הצבעה טוב יותר. טווחי הגילוי של מכ"מים בתחום גמ"מ קצרים יחסית בשל הבליעה של הגלים באטמוספירה. אולם לטווחים הקצרים הנדרשים עבור רב"תים של טילים הגמ"מ נותן מענה מספק, וסביר שמשקלם היחסי של טילים אקטיביים בתחום גמ"מ ילך ויעלה בעשור הבא.

השיפור בטכנולוגיות החיישנים האלקטרואופטיים מאפשר לנצל במערכות הגנה אווירית את יתרונות **התחום האופטי**: גילוי ועקיבה אחר מטרות ברמת דיוק גבוהה ועם יכולת זיהוי טובה יותר מאשר במכ"ם. הקטנת החיישנים מאפשרת ליצור מערכי סנסורים המספקים הדמאה של המטרה. בטילים נגד מטוסים ונגד טילים, רב"תים הדמאתיים מקנים יכולת גילוי משופרת יחסית לרב"תים תרמיים בעבר, דיוק רב יותר בעקיבה אחר המטרה וחסיונות משופרת מול נורים. טילי אוויר-אוויר חדשים הם הדמאתיים כיום באירופה (AIM-132 ASRAAM, IRIS-T, MICA-IR), בארה"ב (AIM-9X) ובסין (PL-10). זמינותם של חיישנים אלקטרואופטיים אזרחיים תאפשר בעתיד התקנת רב"תים IIR גם בטילים המיוצרים במדינות אחרות. שיפור החיישנים יאפשר גם סנסורי גילוי טובים יותר, הן באוויר (מערכותIRST מוטסות) והן מצלמות קרקעיות. סנסורים אלקטרואופטיים בעלי טווח גדול ורזולוציה טובה יהוו נדבך חשוב ביצירת התמונה, מכיוון שיש להם יכולת סיווג וזיהוי טובה יותר מאשר מכ"ם (בזכות הרזולוציה בתדר האופטי) ויכולת לגילוי כלי טיס ללא תלות בשח"מ (טיפול להפחתת חתימה אופטית נמצא בשלבים בוסריים בהרבה יחסית לטיפול להפחתת שח"מ).

להתפתחויות בדוקטרינות של מערכי הגנה אווירית וביכולות אמצעי ההגנה האווירית צפיות השלכות מרחיקות לכת. פרק זה בוחן את ההתפתחויות האסטרטגיות הצפויות בשגרה מנקודת המבט של חיל האוויר הישראלי ומנקודת המבט של התעופה האזרחית, ולאחר מכן את ההתפתחויות האסטרטגיות מנקודת המבט של חיל האוויר, הרלוונטיות להקשרי מלחמה ותקיפות במסגרת מב"מ. בסוף הפרק מובא דיון בסיכונים ובהזדמנויות נוכח מגמות הרחב הטכנולוגיות.

התפתחות איום אסטרטגי על חופש הפעולה של חיל האוויר בשגרה

הפעילויות המבצעיות העיקריות בשגרה הן בעיקר משימות איסוף, ולצדן פעילויות לא מבצעיות כמו אימונים ותובלה אווירית. פעילויות אימונים ותובלה ופעילויות איסוף מוטס מנגד נערכות תחת הנחה שגם אם יש לאויב יכולת לאיים עליהן, אין לו כוונה לאיים עליהן – טיסה בשטח המדינה או מחוץ לאזורים שבריבונות אחרת. כדי לצמצם את מידת הסיכון, הטיסות הן לרוב מחוץ לאזור המאיים בצפיפות על ידי טק"א, באזור שבו יכולת ההעסקה היא באמצעות טק"א ארוך טווח או מטוסי יירוט. כמענה לפעילויות איסוף בשטח מאיים משמשים לוויינים או כלי טיס בעלי חתימה נמוכה שקשה לגלותם (דוגמת RQ-170/180), ושגם אם הם מתגלים קשה ליירט אותם.

כבר במהלך העשור הנוכחי עלול להתפתח איום אסטרטגי על חופש הפעולה של חיל האוויר בשגרה. התפתחות האיום היא תוצאה של שיפור יכולות מערכות ההגנה האווירית לאיים על כלי טיס בטווחים גדולים יותר ובאופן אפקטיבי יותר, לצד שינוי בכוונות להפעיל מערכות הגנה אווירית בדוקטרינה התקפית על ידי מדינות באזור, מעצמות וארגונים פארא־צבאיים. הטיסה מעל שטח ישראל ומעל אזורים, הנחשבים כיום "נקיים מאיום", עלולה להפוך לטיסה באזור מאיים.

ההקשר הגאוגרפי של מדינת ישראל הופך את האיום האסטרטגי על חופש הטיסה של חיל האוויר הישראלי לשונה מזה של חיל האוויר האמריקני או של חילות אוויר במערב אירופה, למשל. מכיוון שישראל קטנה ואפשר להפעיל מערכות הגנה אווירית סמוך לגבולותיה, ניתן להציב איום מעשי על חופש הטיסה בעומק שטח ישראל. להבדיל, האיום על חופש הטיסה של מטוסי חיל האוויר האמריקני או של מטוסי חילות אוויר במערב אירופה הוא פריפריאלי, ובא לידי ביטוי כאשר הם מתקרבים לאזורים מאוימים. אין איום על חופש הטיסה בשטחן של מדינות אלו.

במהלך העשור הנוכחי צפוי להתפתח איום אפקטיבי מעבר לטווחים האופייניים כיום לטק"א בינוני (מספר עשרות ק"מ). האזורים הנמצאים תחת איום פוטנציאלי ילכו ויתרחבו כתוצאה מהארכת הטווחים האפקטיביים של הטק"א ושל האיום ממטוסי יירוט. פוטנציאל האיום מצד הגנה אווירית באזורי הים יגבר אף הוא עם הגדלת הטווחים והתפוצה של מערכות הגנה אווירית על ספינות ועם הגדלת טווחי הגנה אווירית מהיבשה, ואי אפשר יהיה להתייחס אל הים כאל אזור נקי מאיום על כלי טיס. גם כיום קיים איום פוטנציאלי על מטוסים מעל הים, אך יש הבדל רב בין איום מצד מעט סוללות טק"א לטווח 250 ק"מ לבין איום טק"א אפקטיבי לטווח 400 ק"מ, הפועל יחד עם מערך טק"א צפוף יותר לטווח 100 ק"מ ומטוסי יירוט עם טילים ארוכי טווח. במהלך העשור הנוכחי סביר שהאיום יהיה מוגבל בהיקפו, אולם ההיקף המצומצם יספיק לצרכי הפעלת כוח בשגרה.

גם האיום על כלי טיס דלי חתימה יגבר בשל השיפור באפקטיביות, בגיוון וברשתיות אמצעי הגילוי, עד כדי אובדן היכולת להסתמך על חשאיית כלי טיס דלי חתימה לצורך הגנתם. עם זאת, לכלי טיס דלי חתימה צפויה שרידות טובה יותר מאשר לכלים אחרים, בשל הקושי לגלותם ברציפות ולרכוש אותם במערכות היירוט ובשל מגבלות הטיילים ליירט כלים בעלי שח"מ נמוך.

לצד העלייה ביכולת של ההגנה האווירית יש להניח שתחול עלייה גם בנכונות להפעיל אותה בשגרה באופן התקפי. זאת, כתוצאה משני תהליכים: תהליך אחד הוא הצטיידות של כוחות פארא־צבאיים כמו חזבאללה, חמאס, מיליציות פרו־איראניות וייתכן שאף ארגונים קטנים יותר (למשל דאע"ש בעבר) במערכות גילוי ויירוט קטנות אך אפקטיביות ובעלות טווח גדול יחסית. חלק מארגונים אלה מרוסנים פחות ממדינות, והסבירות שיפעילו את מערכות ההגנה האווירית בשגרה גבוהה יותר.

תהליך שני הוא עלייה בהיקף השימוש במערכות הגנה אווירית כאמצעי לחיכוך עם ישראל מצד מדינות האזור ומצד מעצמות, כחלק מדיאלוג אסטרטגי בשגרה ועל מנת לדחוק את הכוח האווירי הישראלי מאזורים מסוימים. חיכוך בתווך האווירי ניתן לייצר באמצעים "רכים" (קרי, ללא הפלה) כמו הפעלת ל"א וסייבר, נעילות טק"א ויירוט על ידי מטוסים מתקדמים, בהפעלה מהאוויר, מהיבשה ומהים. התווך האווירי מתאים במיוחד ליצירת חיכוך לצורך השגת הישגים אסטרטגיים מבלי להידרדר להסלמה. גם אם יהיה לחיל האוויר הישראלי יתרון טקטי שיאפשר לו לגבור על כוח שמאיים עליו, למשל סוללת טק"א S-400 רוסית בסוריה או בסודאן, מערכת ל"א מסוריה, ל"א מספינה איראנית או מטוסים טורקיים מעל הים, סביר שמענה קטלני מול אמצעים "רכים" יהיה מחוץ לכללי המשחק בשגרה, וחיל האוויר לא יוכל להביא לידי ביטוי את היתרון הטקטי שלו. לקושי זה עלולות להיות השלכות אסטרטגיות שליליות בשל חוסר יכולת להגיב על הפעלת כוח, גם אם היא באמצעים "רכים".

שמירה על חופש פעולה אווירי בשגרה בעתיד תצריך, כבר בתוך מספר שנים, גיבוש תפיסה שלמה וניהול מערכה רצופה. חיל האוויר יידרש לפתח מספר כלים מרכזיים:

1. ניהול מערכה רצופה בשגרה, אשר חורגת מגבולות התווך האווירי. בתוך כך יידרשו בניית מודעות מצבית על מגוון גורמי הכוח במרחב, יכולת לשלב כלים צבאיים, דיפלומטיים ותקשורתיים, יכולת לנהל דיאלוג עם יריבים בזמן אמת, ושיתוף פעולה אפקטיבי עם בעלי ברית באזור נגד פרובוקציות. הפעולות הרוסיות בסוריה בשנים האחרונות מדגימות תפיסה מערכתית רחבה כזו. בעקבות הפלת איליושין-20 רוסיה על ידי SA-5 סוריה (2018) רוסיה שילבה כלים דיפלומטיים ותקשורתיים להשגת הישג מערכתי מול ישראל. בעקבות הפלת מטוס רוסי על ידי מטוס טורקי (2015) הפעילה רוסיה כלים דיפלומטיים ותקיפות סייבר נגד טורקיה, על מנת לעצב את יחסי הכוחות עם טורקיה בצפון סוריה באופן שיתאם לצרכיה (Murgia, 2015).
2. כלים "רכים" להפעלה בתווך האווירי. התווך האווירי הוא תווך נוח להפעלת כוח באמצעים "רכים" (בדומה לתווך הימי), כפי שאפשר ללמוד מדוגמאות כגון טיסת מטוסי יירוט רוסיים בסמיכות רבה למפציצים אמריקניים (Starr, 2020), סינוור טייסים אמריקאים על ידי מערכות לייזר סיניות (Mehta, 2018) וטיסת כטמ"מ איראני מעל ספינות אמריקניות (Starr, 2016). במפגש עם כוח עוין המפעיל אמצעים "רכים" חיל האוויר יזדקק למנעד כלים רחב, שאינו רק "להפיל או לנתק מגע". הכלים ה"רכים" יכללו גם אמצעי הגנה (כמו חסינות מול אמצעי ל"א, סייבר ולייזר) וגם אמצעי תקיפה. כלים "רכים" כאלה יאפשרו גמישות ברמה הטקטית ויישאו משמעות אסטרטגית ככל שהפעלת כוח "רכה" בתווך האווירי תהיה כלי מקובל בסביבתנו.
3. אמצעי הגנה מרחביים להגנה על כלי טיס בשטח ישראל, הזמינים להפעלה רציפה בשגרה. הרתעה מהווה כיום מרכיב מרכזי בצמצום כוונות לנסות להפיל כלי טיס של חיל האוויר, וסביר שהיא תמשיך להתאים מול מדינות. לעומת זאת, איום מצד ארגונים פארא-צבאיים מחייב פתרון שאינו מבוסס בעיקר על הרתעה, אלא על שלילת יכולתם להפיל כלי טיס. האיום מצד ארגונים כאלה צפוי להתאפיין בהתמשכות פוטנציאל איום לאורך זמן רב, בסבירות נמוכה להפעלה בכל נקודת זמן מסוימת, ובהיקף מצומצם מאוד בעת הפעלה (שיגור טיל אחד או שניים, למשל). הרחקת נתיבי טיסה ומרחבי אימונים מקו הגבול, כמו גם הימנעות מטיסה ממושכת באזור מאוים, לא יהיו מענה קביל בשל הטווחים הגדלים של האיומים. לנוכח מאפייני האיום, יש יתרון לאמצעי הגנה מרחביים בעלי זמינות גבוהה להפעלה, אשר יספקו הגנה על כל כלי טיס באזור המאויים, ויחסכו את הצורך במערכת הגנה עצמית לכל כלי טיס. אמצעים מרחביים יכולים להיות מערכות שיבוש מרחביות או מערכות יירוט זריזות. הגנה על כלי טיס בשטח המדינה יכולה לנצל את העובדה שכלי הטיס שעליהם מגינים נמצאים קרוב יחסית למערכות המגינות עליהם.
4. איסוף אווירי באזורים שבהם הגנה אווירית אפקטיבית: המעבר לאיסוף לווייני מפחית את הצורך באיסוף אווירי, אך איסוף אווירי יישאר צורך חשוב במקרים שבהם נדרש איסוף רצוף לאורך זמן ושבהם יש דרישות ייחודיות לאיסוף, כמו כיווני הסתכלות על המטרה או מטע"דים מיוחדים. לא בכדי גם מדינות עם יכולת איסוף לווייני נרחבת, כמו

ארה"ב, ממשיכות לפתח את יכולות האיסוף האווירי. לאור השיפור ביכולות הגילוי במגוון היבטים, נכון להניח שלא תהיה חשאיות לכלי טיס. נדרש לפתח רמת שרידות גבוהה לאמצעי האיסוף, בדומה לתפיסה שאפיינה הפעלה של איסוף אווירי בעבר כמו מטוסי צילום ומל"טים מהירים. שרידות גבוהה יכולה להישען במידה רבה על חתימה נמוכה, אך לא רק עליה. היא תצריך שילוב של חליפת הגנה עצמית יחד עם תמיכה מערכתית שפוגעת באפקטיביות של מערכי ההגנה האווירית.

התפתחות איום אסטרטגי על תעופה אזרחית

איום בשגרה אינו מוגבל רק למטוסי חיל האוויר. יש להתכונן לאפשרות שהאיום מצד ארגוני טרור וארגונים פארא-צבאיים יופנה גם כלפי תעופה אזרחית בשטח ישראל או בנתיבים לישראל. הגדילה בטווחי הטק"א והשבשים מגיעה לכדי עשרות ק"מ למערכות קטנות יחסית, ונותנת בידי ארגונים המחזיקים בהם יכולת להפיל כלי טיס אזרחיים, ולכן גם יכולת להציב איום קונקרטי על תעופה בישראל ואל ישראל.

מטוסים אזרחיים אמורים לפעול בסביבה שבה האיום אפסי, ועצם קיומו של סיכון ממשי, גם אם נמוך, עלול לגרור הימנעות מטיסה. שיבוש התעופה האזרחית לאורך זמן בתוך ישראל, ובעיקר אליה וממנה, יישא השלכות אסטרטגיות חמורות. להבדיל ממטוסי חיל האוויר, למטוסים אזרחיים אין מערכות הגנה, וטיסתם אינה מפוקחת על ידי מנגנון שליטה שמקבל תמונת מודיעין רצופה ויכול להפעיל מערכות הגנה בעת הצורך.

האחריות על המענה השלם לאיום על מטוסי חיל האוויר נתונה כיום בידי חיל האוויר. התפתחות איום ממשי על תעופה אזרחית תצריך הסדרה ארגונית מתאימה, כמו גם התאמה של תפיסת ההתרעה המודיעינית ושל תפיסת ההגנה המרחבית, כך שיתאימו לתעופה האזרחית.

השלכות על הפעלת כוח אווירי בלחימה

הפעלת כוח אווירי אפקטיבי בלחימה מחייבת עליונות אווירית, המספקת חופש פעולה מול מערך הגנה אווירית ברציפות ולאורך זמן ממושך. מגמות השינוי ביכולותיהם של מגוון מרכיבי ההגנה האווירית יוצרות פוטנציאל למהפכה במאזן הכוחות שבין ההגנה האווירית לבין הכוח האווירי התוקף. יכולתה של הגנה אווירית לבנות תמונה מדויקת ושלמה, ולהפעיל באופן רשתי מגוון אמצעים שהם גם יעילים יותר וגם קשים יותר לאיתור ולתקיפה, מציבה אתגר מורכב בפני בוני הכוח האווירי.

ראשית נביט על הגישות הקלאסיות לעליונות אווירית, לאחר מכן נבחן את המענה התפיסתי המתפתח במערב, ולבסוף נשוב לנקודת המבט הישראלית בטווח הזמן של העשור הנוכחי ובטווח הזמן של תום העשור הבא.

ישנן שתי גישות מרכזיות להשגת עליונות אווירית: דיכוי (SEAD: Suppression of Enemy Air Defense) והשמדה (DEAD: Destruction of Enemy Air Defense). תפיסת הדיכוי מניחה שבכל פעם שכלי טיס או חימוש תוקף מגיעים לאזור מאויים, יש לספק להם הגנה באמצעות מספר "קליפות הגנה": שיבוש יכולות הגילוי והשליטה במערך ההגנה האווירית באמצעות ל"א מרחבי, שיבוש יכולות ההעסקה באמצעות ל"א מרחבי והרוויה, הגנה עצמית באמצעות הפחתת חתימות, ל"א וחיסון מפני שיבוש, ולבסוף יצירת איום על מערכות ההגנה באמצעות נשק מתאים (למשל ARM). כמענה לסיכון הנשקף למטוסים מאוישים כוללת תפיסת SEAD שילוב של חימוש לטווח ארוך המאפשר למטוסים לפעול במרחק מאזורי של איום צפוף, לצד הפעלת כלי טיס לא מאוישים בתוך האזור המאויים.

תפיסת ההשמדה (DEAD) מניחה שהדיכוי כמענה בלעדי יקר מדי ואינו יעיל במערכה ממושכת המתנהלת באזור מוגדר, מכיוון שבכל פעם נדרש להשקיע מחדש משאבי דיכוי רבים, ועם הזמן האויב יכול ללמוד אותם ולשכלל את המענה שלו. כתחליף לכך, התפיסה גורסת שיש להשמיד את הרכיבים המרכזיים במערכי ההגנה האווירית (מפקדות, סנסורים, טק"א, מטוסי יירוט) מהר ככל האפשר בתחילת לחימה, כך שבזמן קצר יחסית תושג עליונות אווירית נדרשת כדי לפעול באזור בחופש פעולה מספק, לאחר שמערך ההגנה האווירית נשחק, כאשר הוא מאויים ונרדף, ולמולו גם משאבי הגנה מוגבלים יהיו אפקטיביים. לאחר השמדת עיקר האיום נדרשת יכולת לפעול ברמת שרידות מספקת תחת הגנה מרחבית (והגנה עצמית על פלטפורמות יקרות), לצד שימור היכולת לתקוף בזריזות סד"כ הגנה אווירית שיורי שצץ וסד"כ שנוסף לזירת הלחימה.

נקודת העבודה בין תפיסת הדיכוי ותפיסת ההשמדה היא גמישה – גם השמדה מחייבת דיכוי לצורך הפעלת אמצעי איסוף ותקיפה, וגם לאחר השמדה חלקית של המערך נדרשת "קליפת" דיכוי מספקת מול איומים צפים. התפיסה האמריקנית של עליונות אווירית הייתה לאורך שנים רבות SEAD, ואילו בישראל ניתנה קדימות לתפיסת DEAD בשל מאפייני הזירה: צורך להפעיל את הכוח האווירי ברציפות לאורך זמן באזור מתוחם בחזית הלחימה סמוך לגבול.

כיווני המענה במערב עולים בהמלצותיהם של גופי המחקר RAND בארה"ב ו־RUSI בבריטניה. על פי מחקר של RAND (Kelley, 2016), בעימותים עם סין בים סין ובעימותים עם רוסיה במזרח אירופה בעשור הנוכחי האיומים העיקריים על מטוסים אמריקניים מצד מערכי A2/AD הם טק"א ומטוסי דור 5, האיומים על איסוף הם בעיקר סייבר ותקיפות נגד לוויינים (אך לא ל"א), וקיים איום שישגור טק"ק לבסיסי טיסה. כמענה לכך, המחקר ממליץ על מספר אבני יסוד שיאפשרו תפיסה מתאימה מול הגנה אווירית בעתיד: טילים לתקיפה מדויקת מטווח מאות ק"מ כתחליף לחדירת מטוסים לאזור מאויים; כטמ"מ רבים, מהירים, דלי חתימה וזולים מספיק המשוגרים ממשגרים רבים ופשוטים, אשר יתמכו את מטוסי הקרב במשימות איתור, תקיפה והרוויה (בארה"ב מפותחים לצורך כך גם כטמ"מ יקרים יחסית בתפיסת loyal wingman); יכולות סייבר לתקיפת רשתות; ומערכי הגנה מטילים שיתבססו

על טכנולוגיות חדשות להגנת נקודה באמצעות תותחי לייזר ותותחים אלקטרומגנטיים (rail-guns). ככלל, ההערכה היא ששיפור ההגנה העצמית על פלטפורמות הוא כיוון יקר מדי עד שיופיעו טכנולוגיות הגנה חדשות.

מחקר של RUSI (Bronk, 2020) מדגיש את שילובם של מספר מרכיבים כבסיס ליכולת פעולה מול הגנה אווירית: חימוש לתקיפה מנגד; חדירת מטוסי תקיפה המתבססת על הפחתת החתימה, אשר תקצר את טווחי ההגנה האווירית ותאפשר ליצור מסדרונות חדירה עבור מטוסי תקיפה; יכולת השמדת טק"א תוך הישענות על סנסורים Stand in לייצור מטרות טק"א; אמצעי שיבוש הכוללים ל"א Stand in-Stand off (כמו MALD, SPEAR-EW) וטילי ARM (AARGM); ולבסוף מודגשת חשיבות הסייבר כמענה להגנה אווירית, אך הם מצביעים על מגבלותיהם האניהרנטיות בשל היכולת ללמוד אותו ולתקן את הכשלים שהוא מנצל, עד כדי הפיכתו לאמצעי one shot. המחקרים של RAND ושל RUSI מדגישים את ההתמודדות עם מערכי הגנה אווירית כאשר הם פועלים באופן אינטנסיבי במסגרת עימות רחב.

ובחזרה לישראל. אפיון המענה לאתגר ההגנה האווירית צריך להביא בחשבון את מאפייניו הייחודיים של מרחב הלחימה של חיל האוויר הישראלי, את התפתחות האיום על ציר הזמן ואת ההיבטים המשאביים של עלות יכולת תקיפה מהאוויר.

מרחב הלחימה הרלוונטי לחיל האוויר הישראלי נמתח מהחזית ועד לעומק הרחוק. לחימה בחזית ובעורף החזית מתאפיינת בלחימה ממושכת במרחב מוגבל יחסית. ככל שטווח הפעולה של הכוח האווירי גדל, כך גדלים מרחבי הטיסה ורצף הפעולה פוחת. במרחבים הקרובים יחסית – חזית, עורף החזית ואף העומק הקרוב, יש היגיון בשימור התפיסה הנוכחית המחלקת את המערכה לשני שלבים מנקודת המבט של השגת עליונות אווירית: מהלך פתיחה ובו מאמץ להשיג עליונות אווירית מספקת תוך מיקוד בהשמדת מרב רכיבי הגנה אווירית, ושלב שימור העליונות האווירית, שבו מופעלים אמצעים לאיתור ולהשמדה מהירים של רכיבי הגנ"א ("ציד") שישרדו את שלב הפתיחה או שיגיעו לזירת הלחימה. דילול מהיר של ההגנה האווירית בתחילת לחימה יאפשר להמשיך להפעיל את הכוח האווירי תוך שימוש בחימוש המוני קצר טווח וזול יחסית, ותוך שימוש בחליפת הגנה מספקת על ידי אמצעים שאינם מתכלים ולכן מאפשרים שימוש לאורך זמן בעלות הפעלה סבירה (כגון הגנה עצמית ול"א מרחבי).

היתרון העקרוני של השמדה מהירה של הגנה אווירית על פני פעולה ממושכת תחת איומים, תוך הסתמכות על דיכוי ועל אמצעי הגנה למטוסים, נובע מהרובוסטיות, מוודאות הפתרון ומעלותן של שתי החלופות. היתרון של השמת הגנה אווירית על פני דיכוי צפוי אף לגדול בעתיד: תפיסת הדיכוי תהיה קשה יותר למימוש, מכיוון שיעילותה הגדולה של ההגנה האווירית תעלה את הסיכון למטוסים ולכטמ"מ בנוכחות מערך פעיל; הטווחים הגדולים יותר של ההגנה האווירית יחייבו חימוש יקר לצורך שיגור מנגד מטווח ארוך יותר; והטכנולוגיות של גילוי רשתי, עיבוד באמצעות תוכנה, גיוון סנסורים וגיוון טילים יקשו מאוד על פתרונות דיכוי אפקטיביים

מול משרעת האיומים הגדולה. ההשקעה בתקיפת הגנה אווירית בתחילת לחימה היא יקרה, אך עלותה של פעולה רצופה בנוכחות איום היא גם גבוהה וגם לא רובוסטית. עם זאת, יידרש מרכיב של דיכוי הגנה אווירית על מנת לאפשר הפעלת אמצעים לאיתור ולהשמדת טק"א בשלב השגת העליונות האווירית. כמו כן יידרש מרכיב של הגנה על המטוסים מפני איום ממזמן מצד ההגנה האווירית לאחר השגת העליונות.

הפעלת כוח אווירי בעומק הרחוק תצריך איזון שונה בין השמדת רכיבי הגנה אווירית לבין אמצעים לדיכוי ולהגנה על כלי הטיס. ככל שהכוח האווירי חוזר פחות פעמים לאותם מרחבים, כך פוחת היתרון של מאמץ להשגת עליונות אווירית על ידי השמדת ההגנה האווירית, ועולה היתרון של דיכוי ושל הגנה על כלי טיס. בטווחי העומק יהיה יתרון להשמדת רכיבי הגנה אווירית בעלי מרחבי השפעה גדולים.

מגמות השינוי בהגנה האווירית צפויות להוביל בעשור הקרוב לשינוי אשר יצריך התאמה של טכניקות הפעולה בהשגת עליונות אווירית. בטווח של 20 שנים ויותר המגמות עלולות לחולל מהפכה של ממש. עוצמת האיום והטווחים שבהם הוא אפקטיבי יעמידו בספק את היכולת להפעיל את חיל האוויר כפי שהוא כיום. מטוסים מאוישים עלולים להידחק לטווחים רחוקים מאוד ממרחב הלחימה על מנת לפעול ברמת סיכון סבירה. הצורך בשלב השגת עליונות אווירית בתחילת לחימה ייוותר בעינו, אולם הכלים המאפשרים אותו יצטרכו להשתנות. הגישה האמריקנית מכוונת לתת מענה למצב זה: בניין כוח הכולל טילים ארוכי טווח מעבר לטווחי ההגנה האווירית, מערכים גדולים של כטמ"מ זול יחסית ובעל חתימה נמוכה, והפעלת אמצעי הרוויה ואמצעי סייבר לשיבוש יכולות ההגנה האווירית. לחימה ממושכת של תקיפה מטווחים גדולים תהיה כנראה יקרה מאוד. אולם בניין כוח אשר יכלול שימוש בכלים אלה על מנת לתקוף את ההגנה האווירית במהלך פתיחה, ולהשיג עליונות אווירית מספקת לתקיפה מטווחים קצרים יותר לאחר מכן, יאפשר מיצוי משאבים יעיל יותר. חיל האוויר הישראלי צריך להיערך לעתיד זה כדי שיוכל להמשיך למלא את תפקידו ככוח אש מרכזי ואפקטיבי במלחמה.

השלכות על מבצעי תקיפה בשגרה

תקיפות מב"מ הן מרכיב מרכזי בפעילותה הצבאית של ישראל בעשור האחרון. מאפיינים דומים מתקיימים בפעילויות צבאיות באזורים אחרים בעולם, כמו מבצעים אמריקניים בסוריה ובתימן, מבצעים הודיים בפקיסטן ומבצעים של איראן ושלוחיה בסעודיה ובמדינות המפרץ. לאור מגמה זו אפשר להניח שגם בעתיד הנראה לעין תקיפות מהאוויר בשגרה יתפסו מקום חשוב בפעילות הצבאית. מבצעי תקיפה בשגרה מתאפיינים במשך קצר וביכולת של התוקף לבחור את העיתוי הנוח לו. ההתמודדות עם הגנה אווירית יכולה להיות קצרה וממוקדת, ולהתבסס על תכנון מדוקדק של המשימה שמאפשר לנצל את נקודות התורפה של מערכי הגנה אווירית (מגבלות גילוי, מוכנות בשגרה, זמני תגובה) כדי לטוס באופן שבו יכולתם לפגוע בכלי הטיס נמוכה מאוד. המרכיבים המשלימים לתכנון המדוקדק

הם תקיפה מנגד באמצעות חימוש בעל טווח ארוך מספיק, המאפשר למטוסים המשגרים לפעול בסיכון נמוך, או שימוש בכלי טיס דלי חתימה, אשר יכולים לחדור לאזור מוגן ולתקוף ברמת שרידות גבוהה (כמו nEUROn האירופי ו-S-171 האיראני).

גם בעתיד יישמר היתרון של הצד היוזם במבצעים בשגרה, מכיוון שהיוזמה מאפשרת לנצל את נקודות התורפה של המגן באמצעות מבצעי תקיפה קצרים וממוקדים. השינויים במערכי ההגנה האווירית צפויים לצמצם במידה מסוימת את היתרון המשמעותי שיש כיום לצד התוקף. אתגר מרכזי ראשון נובע משיפור יכולות הגילוי ומהגדלת האוטומציה בתהליכי קבלת החלטות על גילוי והעסקה, אשר צפויים להקדים את ההתרעה לצד המגן ולקצר את זמני התגובה של מערך ההגנה האווירית. בנוסף לקיצור זמני התגובה, יכולת הקצאת מטרות וזמינות אמצעי שיבוש יציבו אתגרים מורכבים על הגעת חימוש לתקיפה. השימוש בכלי טיס דלי חתימה לאיסוף מודיעין לקראת תקיפה ולביצוע תקיפה יאותגר על ידי שיפור יכולות הגילוי, אשר יפגעו בשרידותם של כלים דלי חתימה ויצמצמו את חופש הפעולה שלהם באיסוף ובתקיפה.

ניתן להמשיך לשמר את היתרון של הצד התוקף על ידי ניצול נקודות התורפה האינהרנטיות של תהליכי הגילוי והשליטה ושל אמצעי היירוט והשיבוש: ריכוז מאמץ שמביא ליתרון מקומי של הכוח התוקף על פני הכוח המגן, טיסה בגובה נמוך המנצלת את מגבלות הגילוי, עיכוב תהליכי הגילוי וקבלת ההחלטות על ידי שימוש בכלים בעלי חתימה נמוכה, ל"א וסייבר. מגוון הפתרונות האפשריים גורמים לכך שמגמות השינוי במערכי ההגנה האווירית אינן צפויות למנוע את היכולת לתקוף במסגרת מב"מ.

סיכונים מרכזיים לעליונות האווירית בעקבות התפתחויות טכנולוגיות

ברובד שמתחת לתפיסות ההתמודדות ישנם מספר סיכונים פוטנציאליים עיקריים אשר יכולים לשנות במידה רבה את תמונת האיום (game changers). לא ברור מתי ואיך סיכונים אלה יתממשו לכדי יכולות בפועל של האויב. בניין כוח לצורך מענה מלא לכולם יהיה יקר עד כדי לא מעשי. לכן אופן הטיפול המתאים הוא בחינה סדורה של חומרתו הפוטנציאלית של כל אחד מהם, פיתוח אבני יסוד טכנולוגיות למענה עבורו, ובניין כוח בפועל על בסיסן כאשר מתברר שהסיכון מתממש וכיצד הוא מתממש.

פוטנציאל סיכון מרכזי הוא בתחומי לוחמת מידע, ל"א וסייבר. הסיכון הוא פגיעה במגוון מערכות: שיבוש תשתית המערכות הממוכנות והתקשורת, ביניהן בעורף – תקיפה שנמצאת כיום בתפיסה המבצעית של מעצמות, ומרכיבים שלה עלולים לשמש גם בעימות עם ישראל; שיבוש תקשורת לכלי הטיס ולחימוש, בדגש על תקשורת לוויינים, לנוכח המיקוד של מעצמות בפיתוח יכולות נגד לוויינים (ASAT); ולבסוף פגיעה בכלי טיס ובחימושים על ידי שיבוש ניווט, סנסורים ותקשורת, ובאמצעות תקיפות סייבר מרחוק על ידי שידור אות

אל הרכיב (Cyber Over RF). פוטנציאל הנזק של תקיפות כאלו רב ביותר, והוא יכול לשבש מרכיבים מרכזיים ורוחביים ביכולת הפעולה של הכוח האווירי.

פוטנציאל סיכון שני מגיע מכיוון נשקי אנרגיה, ובעיקר לייזר. כשם שטכנולוגיה של לייזר מצב מוצק מייצרת הזדמנות עבור מערכי הגנה מטילים, כך היא מהווה סיכון עבור הצד התוקף. טווחי הלייזר יהיו מוגבלים בשל עוצמה, פיזור ובליעה, ולכן יכולתו נגד מטוסים במתארים מבצעיים סבירים צפויה להיות מוגבלת. לעומת זאת, לצורך הגנת שטח מפני חימוש תוקף ולהגנה מפני כטמ"מ קרוב עשויה להיות לו יכולת אשר משנה את הפעולה מהאוויר. סביר שאיום נשק לייזר קטלני לא יהיה רלוונטי בעשור הקרוב, וייתכן שאף לאחריו. אולם השפעתו הפוטנציאלית הגדולה מחייבת לפתח תשתית טכנולוגית להתמודדות עמו, אשר עשויה לדרוש זמן ממושך.

פוטנציאל סיכון שלישי הוא בתחום אוויר-אוויר. לא מדובר בהפתעה עולמית, אלא בשינוי משמעותי בנקודת המבט הישראלית, שעד כה מתעלמת מההתפתחויות שכבר קיימות בעולם ויכולות להופיע במדינות העימות בתוך שנים ספורות. חיל האוויר נהנה לאורך שנים מעליונות מכרעת מול מדינות העימות. הגעתם של מטוסים מתקדמים מדור 4+, עם יכולות רשת, סנסורים, ל"א וטילים מתקדמים ארוכי טווח, תשנה באופן ניכר את המצב, ותציב בפני חיל האוויר יכולות דומות לשלו. האוטומציה הרבה במערכות הנשק, ובהמשך גם בתהליכי קבלת ההחלטות, תצמצם את חשיבות היתרון האנושי (השפעת הטייס על יכולתו של טיל אקטיבי מתקדם פחותה מכפי שהייתה השפעתו על הצלחת יעף תותח). נקודת תורפה מרכזית של מטוסים הייתה ונתרה השימוש בשדות תעופה, וגם בעתיד תקיפתם יכולה להיות מרכיב מרכזי בתפיסה המבצעית להתמודדות עם מטוסי יירוט. אולם היא אינה מספיקה, ויידרשו פתרונות לשמירה על יתרון גם במפגשים באוויר, לרבות בניית מודעות מצבית שלמה, יכולת הפלת מטוסים בעלי מערכות הגנה מתקדמות ויכולת התגוננות מפני מגוון סוגי טילים.

פוטנציאל סיכון רביעי נובע מהגיוון הרב ומהשינויים המהירים במאפייני מערכות מבוססות תוכנה. הוא צפוי להערים קושי רב על היכולת להשיג תמונת מודיעין טכנולוגי ולבסס עליה את פיתוח המענה לאיומים. מאפיינים אלה מצריכים לגבש תפיסה חדשה עבור מודיעין טכנולוגי ועבור הממשק בינו לבין תהליכי פיתוח מערכות נשק ותפיסות מבצעיות.

הזדמנויות

הישענות ההגנה האווירית על הרשת לצורך בניית תמונה משותפת ושליטה יעילה באמצעי המערך מהווה נקודת עוצמה חשובה, כמו גם נקודת תורפה אשר יוצרת הזדמנות בעלת פוטנציאל תועלת גדול. חדירה לרשתות מאפשרת ליצור מודעות מצבית טובה יותר, גם על מיקום רכיבי ההגנה האווירית לצורך ייצור מטרות לתקיפה וגם על כוונות ההפעלה של ההגנה האווירית לצורך התרעה והפעלת אמצעי שיבוש.

התבססותן של מערכות הגנה אווירית על תוכנה מאפשרת להן להיות גמישות יותר לשינויים ומגוונות יותר, ולכן אפקטיביות יותר. מצד שני, היכרות עם התוכנה מאפשרת לדעת מראש את לוגיקת הפעולה של המערכות, ומאפשרת לפתח מענה התמודדות יעיל גם מבלי "לגעת" במערכות עצמן. ככל שמערכות הגנה אווירית מתבססות יותר על תוכנה, כך נכון להגדיל את המשקל היחסי של איסוף ומחקר המודיעין על מרכיב התוכנה במערכות ההגנה.

בצד הכחול, **יכולות מתפתחות בסייבר ושילוב סייבר ול"א** יאפשרו תקיפה מרחוק של הרשת לצורך שיבוש תהליכי הגילוי, בניית התמונה, השליטה והפעלת הכוח בהגנה אווירית, ואף לפגיעה ישירה במערכות הנשק. לפיתוח יכולות סייבר לצורך התמודדות עם הגנה אווירית יש נקודת תורפה מרכזית של היעדר רובוסטיות, אשר נובעת מחוסר ודאות לגבי נגישות עתידית, חוסר ודאות בנוגע לאפקט המושג, רגישות לשינויים קטנים במערכות, ובמקרים רבים גם יכולת של האויב לזהות כשלים ולתקנם בפשטות יחסית. לכן נדרש איזון בין פיתוח יכולות סייבר ול"א בעלות פוטנציאל רב לבין פיתוח יכולות רובוסטיות יותר. הפוטנציאל הרב מצדיק הסטת משאבים משמעותיים לסייבר, וכתנאי מוקדם לכך – פיתוח מתודולוגיה להערכת הישג, ולאורה ניהול נכון של משאבי בניין כוח המוקצים לסייבר.

רשתות תקשורת רחבות סרט שבהן חברים כלי טיס רבים, **יחד עם טכנולוגיות לעיבוד המידע** הרב שנאסף על ידי כלל החברים ברשת, יאפשרו בנייה שלמה יותר, מהירה יותר ומדויקת יותר של תמונת איומים, גם מול מערך הגנה אווירית שפועל תוך חשיפה מועטה של רכיביו. בהמשך התהליך המבצעי, הרשתות ויכולות העיבוד מאפשרות תהליכי קבלת החלטות מורכבים במהירות, וכך סנכרון יעיל יותר של הפעולה מול מערכי ההגנה האווירית, למשל הפצת תמונת איומים מהירה כדי שכל אחד מהחברים ברשת יוכל להתאים את נתיב טיסתו לתמונה העדכנית, סנכרון הפעלת סנסורים על מנת להגיע למיצוי מיטבי, וסנכרון הפעלת אמצעי ל"א כדי להשיג אפקטיביות של פעולה משולבת ("ל"א ברשת") באופן שמסונכרן עם צרכי ההגנה על כלי טיס שברגע זה נמצאים תחת איום.

יכולות אוטונומיות משופרות, המבוססות על בינה מלאכותית (AI), הן תשתית טכנולוגית שתאפשר הפעלה של כלי טיס רבים באופן מתואם ("נחילים", "להקות") להשגת מטרה משותפת. בהקשר של התמודדות עם מערכי הגנה אווירית, גישה זו יכולה לאפשר איסוף יעיל ושרידות מערכתית. כדי למצות את היכולת האוטונומית יש לפתח את מרכיב **הבינה המלאכותית**. זו אינה רק טכנולוגיית AI למיצוי מידע מסנסורים רבים, כפי שאופיינית ליישומים בתחום המודיעין, אלא טכנולוגיית AI לצורך קבלת החלטות, ניהול משאבים, תכנון טיסה והחלטה על הפעלת אש.

מזעור סנסורים מאפשר להצטייד במספר גדול של סנסורים זולים יותר, כך שניתן להתקין אותם על הרבה פלטפורמות, בפרט פלטפורמות קטנות Stand in, כדי לייצר תמונת איומים ומטרות מדויקת יותר תוך שמירה על שרידות מערכתית של יכולת ייצור המטרות.

מזעור של מערכות ל"א, יחד עם **למידה מהירה** של מאפייני האויב (בזכות הקלטה מדויקת וטכנולוגיית עיבוד) **ועדכון מהיר בתוכנה** של מענה הל"א המשודר (להבדיל ממערכות בעבר), מאפשרים יחד מספר כיווני פעולה אפקטיביים. דוגמה אחת היא מערכות הגנה עצמית גם לכלי טיס שבעבר לא קיבלו הגנה כזו, בפרט כטמ"מ וטילים, שבעתיד יתמודדו עם מערכי הגנה אווירית אפקטיביים יותר. היכולת להקטין את השח"מ של כלי טיס קטנים ושל חימוש מאפשרת להשיג הגנה אפקטיבית גם באמצעות מערכות ל"א ממוזערות (המזעור הופך אפשרות זו למעשית יותר; ועדיין, החלופה של ל"א מרחבי תהיה אטרקטיבית יותר באזורים של פעולה אינטנסיבית). דוגמה שנייה היא יישום הרווייה אפקטיבית של תמונת השמיים מול מערך ההגנה האווירית, על ידי שימוש במספר רב יחסית של מקורות שידור ל"א בכלי טיס ובחימושים. הרווייה היא שיטה רובוסטית יחסית, ומכאן היתרון העקרוני שבהפעלתה. דוגמה שלישית היא הבנה מהירה של מאפייני ההגנה האווירית במהלך לחימה, ועדכון של מערכות הל"א במהירות תוך כדי לחימה.

נשק לייזר, שבמערכות הגנה על הקרקע מייצר איום על חימוש אווירי, כטמ"מ ואולי אף מטוסים, יכול לשמש בסיס למערכות הגנה עצמית של כלי טיס מול טילים ומול מטוסים — לא רק לסינוור ולשיבוש, אלא לפגיעה פיזית. לצד המורכבות הטכנולוגית של השגת עוצמה, ייצוב האלומה על הטיל המאיים וכיסוי מרחבי מספק, להגנה עצמית מבוססת לייזר חזק יש יתרון על אמצעים מתכלים ועל הגנה "קשה" נגד טילים בכך שהוא רב פעמי, ויש לו עדיפות על מערכות ל"א ומתכלים קונבנציונליים בהתמודדות עם טילים אלקטרואופטיים מתקדמים.

יכולת לוויינית במגוון סנסורים ובתדירות כיסוי גבוהה על ידי קונסטלציות לוויינים קטנים תאפשר איסוף בטווחים גדולים, תוך צמצום הצורך של כלי טיס לחדור ולאסוף בתוך אזורים מוגנים. עם זאת, היכולת הלוויינית תהיה מוגבלת באפשרות ליצור כיסוי רציף, ובעתיד צפויים איומים על יכולת זו — בין אם פגיעה בלוויינים ובין אם פגיעה ביכולת התקשורת עמם.

טכנולוגיה קוונטית מפותחת כבר כיום בכיוונים שיכולים לספק מענה יעיל מול מערכי הגנה אווירית. התחום הבשל ביותר בהקשר זה הוא בסנסורים רגישים המאפשרים לשפר את חסינות הניווט מול שיבוש GNSS, ובכלל זה מדי תאוצה רגישים, שעונים ומדי שדה מגנטי. אפשר שתוך מספר שנים יימצאו סנסורים מבצעיים כאלה. תחום נוסף, שיבשיל כנראה מאוחר יותר, הוא תקשורת מוצפנת על בסיס שזירה קוונטית. יכולת כזו הודגמה במספר מקומות בעולם, כולל תקשורת לוויינית בסין (Parker, 2020).

- Ball Desmond (2011), "China's Cyber Warfare Capabilities", *Security Challenges*, Vol. 7
- Bonds Timothy et al (2017), *What Role Can Land-Based, Multi-Domain Anti-Access/Area Denial Forces Play in Deterring or Defeating Aggression?*, RAND
- Bronk Justin (2018), *Next Generation Combat Aircraft Threat Outlook and Potential Solutions*, RUSI
- Bronk Justin (2020), *Modern Russian and Chinese Integrated Air Defence Systems*, RUSI
- Cheng Dean (2015), *China's Newest Defense White Paper Suggests Fundamental Change in Perspective*, The Heritage Foundation
- Colom-Piella Guillem (2021), "An A2/AD in the Western Mediterranean? Is Algeria developing anti-access/area-denial capabilities?", *Defense Studies*
- Berlinger Joshua et al (2019), "Iran shoots down US drone aircraft, raising tensions further in Strait of Hormuz", *CNN* 21/6/2019
- Dalsjo Robert et al (2019), *Bursting The Bubble*, FOI
- Davis Alberts D. et al (1999), *Network Centric Warfare*, DoD
- Delanoe Igor (2020), *Russian Naval Forces in the Syrian War*, FPRI
- Gompert David et al (2016), *War With China*, RAND
- Goncharov Andrey (2014), "In the future - anti-space operation", *BK* 15/6/2014 (Russian)
- Hagel Chuck (2014), *Secretary of defense speech*, Reagan National Defense Forum, US DoD, 15/11/14
- Henley Lonnie (2006), "War Control", *Shaping China Security Environment*, SSI, USAWC
- Heginbotham Eric et al (2017), *US and Chinese Air Superiority Capabilities*, RAND
- Insinna Vallerie (2021), "The F-22 Will Go Away, eventually, But not before the Air Force gets comfortable with its successor", *Defense News* 13/5/2021
- Johnson James (2019), "China's vision of the future network-centric battlefield", *Comparative Strategy*
- Kaushal Sidharth et al (2021), *The Future of NATO's Air and Missile Defence*, RUSI
- Kelly Terrane et al (2016), *Smarter Power, Stronger Partners, Volume I*, RAND
- Kofman Michael (2019), "It's Time to Talk About A2/AD: Rethinking the Russian Military Challenge", *War on the Rocks*, 5/9/2019
- Kofman Michael et al (2021), *Russian Military Strategy: Core Tenets and Operational Concepts*, CNA
- Kopp Carlo (2009), "Assessing the Tikhomirov NIIP L-Band Active Electronically Steered Array", *Air Power Australia*
- Kopp Carlo (2012), "Sukhoi Flankers - The Shifting Balance of Regional Air Power", *Air Power Australia*

- Kube Courtney (2018), "Russia has figured out how to jam U.S. drones in Syria, officials say", *NBC News*, 10/4/2018
- Mehta Aaron (2018), "Two US airmen injured by Chinese lasers in Djibouti, DoD says", *Defense News* 3/5/2018
- Murgia Madhumita (2015), "Could Cyberattack on Turkey be a Russian retaliation?", *The Telegraph*, 18/12/2015
- Parker Edward (2020), *Commercial and Military Applications and Timelines for Quantum Technology*, RAND
- Pierini Marc (2021), *Russia's Posture in the Mediterranean: Implications for NATO and Europe*, Carnegi Europe
- Rakov Daniel, Heller Assaf, Fainberg Sarah (2022), *Boo or Boom? Russia's Air Strikes on Ukraine on the First Day of War*, ASPIRE, Tel Aviv University
- Samaan Jean-Loup (2020), *Nonstate Actors and Anti-Access/Area-Denial Strategies: The Coming Challenge*, SSI, USAWC
- Shugart Thomas (2017), "Has China Been Practicing Preemptive Missile Strikes against US Bases?", *War on the Rocks*, 6/2/2017
- Starr Barbara (2016), "Iranian surveillance drone flies over U.S. aircraft carrier in Persian Gulf", *CNN*, 29/1/2016
- Starr Barbara (2020), "2" Russian aircraft make 'unsafe' intercept of US Air Force B-52 bomber", *CNN*, 30/8/2020
- Tianjiao Jiang (2019), "From Offense Dominance to Deterrence: China's Evolving Strategic Thinking on Cyberwar", *Chinese Journal of International Review* Vol.1
- Terje Johnsen and Olsen Karl Erik (2020), *Bi- and Multistatic Radar*, Norwegian Defence Research Establishment, FFI
- US DoD Defense Science Board (2015), *Task Force Report: Resilient Military Systems and the Advanced Cyber Threat*
- US DoD Defense Science Board (2019), *Applications of Quantum Technologies: Executive Summary*