

יירוט טילים בליסטיים בשלב ההאצה

יהושע קליסקי אייקי חזן¹ | 13 בפברואר, 2025

יירוט טילים ורקטות בשלב המוקדם ביותר של המראתם הינה פעולה התקפית בעלת אופי הגנתי מובהק, שמטרתה מניעת נזק ממשי או אגבי במדינה המותקפת, תוך הסבת נזק מרבי לגוף התוקף. במקרה של מדינת ישראל לשיטת יירוט זו יתרון כפול ומכופל עקב שטחה הקטן, האיומים מצד איראן ושלוחיה ב"מעגל האש" הקרוב והרחוק, ופוטנציאל הנזק הרב כתוצאה מפגיעה בתשתיות אזרחיות וצבאיות. במאמר זה נסקרים האתגרים והפיתוחים הטכנולוגיים שביירוט טילים ורקטות, היבטים גיאוגרפיים רלוונטיים וכן לקחים למדינת ישראל.

מדינת ישראל היא המדינה המאווימת והמותקפת ביותר בעולם בנשק רקטי לסוגיו אשר נורה לעבר מטרות אזרחיות וצבאיות. רקטה כמוגדרת ככלי טיס הנורה ללא אמצעי הנחייה, דרך האטמוספירה אל מטרה יבשתית במסלול בליסטי. כאשר לרקטה כפי שהוגדרה לעיל יש אמצעי ניווט היא מוגדרת כטייל. טיל אשר טווח פעולתו הוא מעל 100 ק"מ מוגדר "טיל בליסטי". איראן ושלוחיה השונים, כלומר, ארגוני טרור ברחבי המזרח התיכון וכן מדינות "ציר הרשע" גילו את היתרונות הגלומים בנשק רקטי לסוגיו: מדובר באתגר טכנולוגי הדורש ידע רב-תחומי נרחב (פיזיקה, כימיה, מדע חומרים, תרמודינמיקה יכולות מחשוב בקרה ואלקטרוניקה) וכוח אדם מיומן לתכנון ולבניית מערך נשק רקטי. וכאשר מדובר הטייל מתמרן, יש צורך בידע נוסף הקשור לטכנולוגיות של הנעה וקטורית-כלומר, הטיית פליטת הגזים ממנוע הטייל לכוונים שונים ועי"כ לגרום לשינוי מסלול מעופו של הטייל לכוון המתוכנן. מדובר בטכנולוגיות זמינות, בתהליכי ייצור הדורשים חומרי גלם ואמצעי ייצור זמינים ולא מתוחכמים, בתפעול ובתחזוקה פשוטים יחסית, גמישות ופשטות יחסית בהפעלה, ללא צורך בהכשרה מיוחדת של כוח אדם מקצועי. יתרונות אלו עושים את השימוש בנשק רקטי לסוגיו לאמצעי לחימה אטרקטיבי ומסיבה זו הצטיידו אויבי ישראל בנשק רקטי קצר או ארוך טווח בכמויות אדירות לשם תקיפת מטרות צבאיות ואזרחיות בה.

האתגר בפני מדינת ישראל

יירוט טילים בליסטיים הינו אם כן אתגר טכנולוגי וביטחוני מהמעלה הראשונה עקב פוטנציאל הנזק הרב של נשק זה, פשטות ייצורו והפעלתו. מדינת ישראל מובילה בפיתוח ויישום אמצעי הגנה נגד רקטות או טילים בליסטיים באמצעות יירוט קינטי של הטייל בעת מעופו על ידי טיל

¹ אייקי חזן - התמחות בנושאי אסטרטגיה וקבלת החלטות, אוניברסיטת רייכמן, הרצליה

נגד טילים, באמצעות מערכות דוגמת מערכות "כיפת ברזל", "קלע דוד", ומערכת טילי ה"חץ". בעתיד, כחלק ממעטפת ההגנה של מדינת ישראל, חלק מהיירוטים יתבצעו אמצעות נשק [מוכוון אנרגיה \(Directed Energy Weapon\)](#), להלן נשק לייזר - כנגד איומים לטווחים קצרים, בינוניים וארוכים

שכבות ההגנה של מדינת ישראל הן גורם מכריע בהפחתת הנזק מנשק רקטי על ידי יירוט הטיל בעת מעופו, אך למרות נטרול האיום נגרם נזק עקיף בעת היירוט מעל שטח מדינת ישראל על ידי שברים של טיל המטרה או של הטיל המיירט. בנוסף, נגרם נזק כלכלי עקיף בגין השבתת פעילות באזורים המטווחים למשך זמן מסוים עקב האזעקות והצורך לשהות במרחבים מוגנים.

הסיווג המקובל והכללי ביותר של טילים בליסטיים הינו על פי טווח המעוף שלהם, כמפורט בטבלה הבאה:

טבלה מס' 1- סווג טילים בליסטיים לפי טווח המעוף שלהם

טווח, ק"מ	סוג טיל
0-1000	קצר טווח
1000-3500	טווח בינוני
3500-5500	טווח ביניים
5500-10000	טווח בין יבשתי

ישראל ניצבת בפני שני סוגי תרחישים: איום רקטי של "חגורת האש" הקרובה לגבולותיה, שכולל רקטות וטילים לטווחים של 0-250 ק"מ, ואיום של טילים בליסטיים לטווחים ארוכים מאיראן ומתימן (ואולי גם מעיראק) לטווחים של עד 2000 ק"מ. מכאן שבהתייחסות לישראל, ההתמודדות עם מגוון איומים תלויה בהגדרתה של סקלת הטווחים ובמקורו של האיום, ועל כן, חלון הזמנים ליירוט תלוי בתרחיש המבצעי.

היתרון שביירוט הטיל רחוק ככל הניתן ממטרתו הסופית הוא כפול, ועל כן, השאיפה היא ליירוט בשלב ההאצה, כלומר, בין שלב השיגור לשלב הכיבוי של המנוע והיפרדותו מגוף הטיל. מהו היתרון שביירוט טיל בשלב ההאצה? בשלב בו פועל מנוע הטיל לשם האצתו, מהירותו עדיין נמוכה יחסית, הטיל חסר כושר תמרון ומעטפת הטיל רגישה לפגיעות חיצוניות עקב העומס התרמי והמכני המופעלים על דפנותיו עקב פעולת המנוע ושריפת הדלקים בתא הבעירה. יירוט הטיל הופך מורכב יותר עם פוטנציאל לנזק אגבי רב (כולל נזק עקב שימוש בנשק גרעיני)

ככל שעובר יותר זמן לאחר כיבוי המנוע והיפרדותו מגוף הטיל. בכל מקרה, במיוחד בתרחיש של הפעלת נשק גרעיני או נשק אחר להשמדה המונית, המטרה העליונה היא להשאיר את הנזק האגבי בצד התוקף.

הרעיונות לפגיעה בטילים בשלב ההאצה הועלו כבר בשנות ה-60 של המאה הקודמת, אך בלי התקדמות משמעותית. התעניינות מסוימת בנושא החלה לאחר השקת תכנית "מלחמת הכוכבים" בזמן ממשל הנשיא רונלד רייגן והוקמה מסגרת ארגונית לטיפול בהגנה מפני טילים Strategic Defense Initiative (SDI), בדגש על יירוט בשלב ההאצה. במשך השנים הושקו בארצות הברית תכניות שונות להתמודדות עם האיום הבליסטי בשלב ההאצה, אך מעבר לניסיונות יירוט בתנאי שדה - אף תכנית לא הבשילה למוצר בעל יכולת מבצעית מוכחת.

מרבית מאמר זה מבוסס תעל המידע הנמצא בדו"ח [משנת 2022](#) של המרכז ללימודים אסטרטגיים ובין-לאומיים (CSIS), ועל בסיס [ספר יסודי בנושא](#).

יירוט בשלב ההאצה

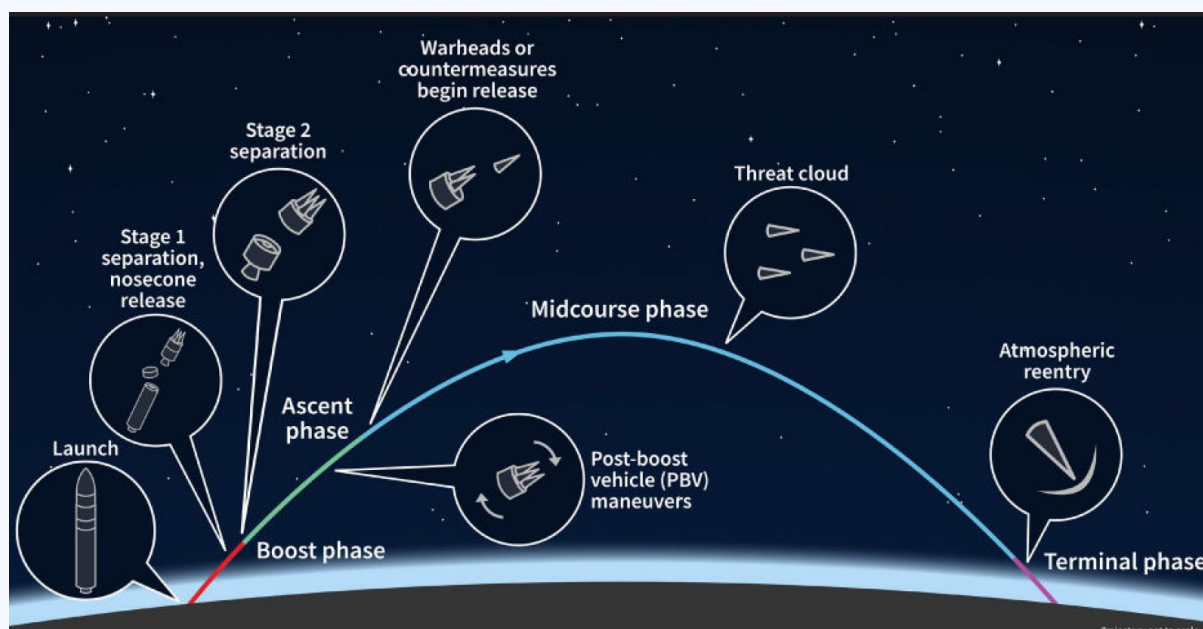
אתגר טכנולוגי

שלב ההאצה של טיל מוגדר כחלון הזדמנות של דקה עד חמש דקות, כאותו שלב שמנוע הטיל פועל לשם האצתו. בשלב זה הטיל נמצא עדיין באטמוספירה והמנוע עדיין לא נפרד מגוף הטיל, ומהירות הטיל עדיין איטית יחסית וכושר התמרון של הטיל מוגבל. יתר על כן, על שום צריכת הדלק הרבה, מרכז הכובד של הטיל משתנה במהירות וגורם אי-יציבות רבה בעת ההמראה. בעיקרון, ניתן ליירט טיל בליסטי בשלבים שונים של מעופו.

טבלה מס' 2 - שלבי הטיסה של טיל בליסטי

שלב	סקלת זמן, שניות	מאפיינים	האתגר
האצה BPI	60-300 חלון זמן קצר	אי-יציבות אווירודינמית, משטר לחצים וטמפרטורות קיצוני	ביצוע יירוט בחלון זמן קצר
שלב פוסט BPI Postboost, Predeployment (Intercept) (PBDI)	קצר ביותר, מס' שניות	מנוע הטיל לא פועל, אך עדיין לא שוחרר ונפרס מטען	התמודדות עם פריסה אפשרית של מטען מתמרון מיד לאחר כיבוי מנוע הטיל
שלב עליה והמעוף מחוץ לאטמוספירה- ascent and- midcourse	תלוי בטווח השיגור ובמהירות הטיל, בדרך כלל 15 – 20 דקות, חלון זמן ארוך יחסית	מעוף בגובה רב ובמסלול בליסטי, יכולות תמרון והטעיה מסוימות	ביצוע יירוט מחוץ לאטמוספירה, התמודדות עם תמרון והטעיה
שלב הגלישה למטרה- terminal phase-	גלישה בתחום האטמוספירי אל המטרה, חלון הזמן קצר	אי-יציבות דינמית עקב כוחות חיכוך וכבידה הפועלים על הטיל	התמודדות עם מסלולים משתנים של שברים, אמצעי הטעיה או של גוף הטיל שנושא את המטען הקרבי

איור מס' 1 - תיאור סכמתי של שלבי המעוף של טיל בליסטי:



האתגרים הטכנולוגיים בשלב ההאצה:

נכון להיום, השימוש בטכנולוגיית ה-BPI מוגבל ליישום בשל הגבלות טכניות, כלכליות וטכנולוגיות. בעתיד הקרוב עשוי יירוט הטילים בשלב ההאצה להיות אפשרי לשימוש רק באמצעות מערכות יירוט מוצבות בחלל או מערכות מוטסות הדורשות קרבה למיקום השיגור, מערכת סנסורים רגישה ומתקדמת ובעלת מינעד ספקטראלי (קרי יכולת לגלות "צבעים") נרחב, מערכות עיבוד תמונה ועיבוד אותות מהירים ויכולת לשגר מיירטים מהירים. **יש צורך בזמן תגובה מהיר הכולל איתור וזיהוי, מעקב, תיכנון תגובה, החלטה על ביצוע יירוט והערכת פגיעה, כולל הזמן הנדרש לוודא את הצלחת היירוט.** כל שלב בשרשרת השלבים הללו מהווים אתגר טכנולוגי והדבר מסוכם [בטבלה הבאה](#):

טבלה מס' 3 - שרשרת השלבים הנדרשים ליירוט טילים בשלב ההאצה

פירוט השלב	איתור	ביסוס מעקב	תכנון היירוט	זמן לקבלת החלטה	יירוט הטיל	הערכת הפגיעה
הזמן הנדרש לחיפוש לזהות את הטיל בשלב ההאצה	הזמן הנדרש לקביעת מסלולו של הטיל	הזמן הנדרש לקביעת מסלולו של הטיל	הזמן הדרוש למערכות הפיקוד, שליטה וניהול הקרב לתכנן את תהליכי היירוט	הזמן העומד לרשות מקבלי ההחלטות האם ליירט את הטיל	הזמן מרגע השיגור עד ליירוט הטיל	הזמן הדרוש לקבוע האם היירוט צלח
מה נדרש	סנסורים מתאימים ויכולת חישובית מהירה	סנסורים רגישים למעקב ומערכת לעיבוד נתונים	יכולות חישוב מתקדמות ועיבוד אותות	יכולת אישית מהירה לניתוח מצב וקבלת החלטות	מערכות יירוט מהירות כגון לייזר רב עצמה או מיירט מהיר	סנסורים ומערכות מעקב

בשל הקרבה הגדולה יותר של כלי הטיס למטרה, הדרישות הקינטיות של מיירטים מהאוויר נמוכות במידה ניכרת מהדרישות שיש ממיירטים קרקעיים. לכלי הטיס יש יכולת ליירט באמצעות מיירטים קטנים ומהירים, אשר בשונה מיירוט קרקעי הם אינם דורשים האצה מעמדה סטטית דרך האטמוספירה הצפופה הנמוכה. יתרה מכך, השימוש בכלי הטיס מאפשר גמישות ואינטגרציה פשוטה יותר בין החיפוש של המיירט לבין הפלטפורמה המשגרת, ובכך הוא מפשט את תהליך היירוט.

מכיוון שאנו מתמקדים ביירוט בשלב ההאצה ויתרונותיו, לעומת יירוט בשלבים אחרים של מעוף הטיל, יודגשו מספר נקודות:

בשלב ההאצה (boost phase) של טיל בליסטי המונע בדלק נוזלי, הטמפרטורה הממוצעת בתא הבעירה היא בסביבות $2000-3200^{\circ}\text{C}$, והלחץ הפנימי הוא 50 - 200 אטמוספירות. חישוב פיזיקלי מראה כי הכוח המופעל ליחידת שטח בתא הבעירה בעת ההאצה תלוי בהרכב של תערובת הבעירה והוא נמצא בתחום של כ-3 טון למטר מרובע- עד 1000 טון למטר מרובע עבור דלק נוזלי, ועבור דלק מוצק הלחץ עשוי להגיע לערכים מקסימליים של עד [אלפי טון למטר מרובע](#). מדובר בלחץ פנימי רב, אשר מקל על פגיעה במעטפת הטיל הנמצאת תחת משטר לחצים קיצוני בעיקר באזור המנוע, תוך גרימת כשל בלתי הפיך עד כדי התבקעות גוף הטיל בעת ההאצה וההמראה. בנוסף, שלב ההאצה מתרחש לפני שראש הקרב מתפצל מהטיל למספר רב של ראשי קרב והללו נכנסים לאטמוספירה במהירות גבוהה, שמקשה על יירוטם. מעבר לכך, יירוט בשלב מוקדם מפחית את הסבירות שחלקי טיל או ראשי קרב שנפגעו כתוצאה מהיירוט ייפלו בשטח של מדינת המטרה (לדוגמה ישראל), או בשטח של מדינה שלישית ידידותית, ויגרמו נזק אגבי. יירוט בשלב ההאצה עשוי אף הוא לגרום לחימוש שאותו נושא הטיל ליפול בשטחו של התוקף ולגרום לו נזק רב.

[האתגרים](#) הכרוכים ביירוט בשלבים מאוחרים יותר של מעוף הטיל אך מדגישים את יתרונות יירוט טילים בשלב ההאצה. לאחר שלב ההאצה, בשלב של הטיפוס לגובה ושלב מהלך הביניים עד הגעה לשיא הגובה (Ascent and midcourse), לטילים יש אמצעי הטעיה, או אפשרות לשימוש באמצעי נגד כגון שיגור מטרות דמה, משבשי אותות, חסימות מכ"ם ונורים, וכן אפשרות לביצוע תמרוני התחמקות – כל אלה פוגעים ביכולות הגילוי והיירוט של מערכות ההגנה האווירית.

קיים קושי משמעותי יותר ליירט טילים בליסטיים בין-יבשתיים מונעי דלק מוצק, בהשוואה לטילים מונעי דלק נוזלי, מכיוון ששלבי ההכנה וההאצה של טילים מונעי דלק מוצק קצרים יותר. בנוסף, [שלב ההאצה](#) של טילים בליסטיים לטווח קצר ובינוני, הנמשך בין 3-11 דקה לשלוש, קצר במידה משמעותית מזה של טילים בליסטיים בין-יבשתיים, הנמשך בין שלוש לחמש דקות. מגבלות הזמן והגובה הנמוך שבו טילים לטווח קצר ובינוני מסיימים את שלב ההאצה הופכים את יירוטם מאתגר יותר בהשוואה לטילים ארוכי טווח. לכן, יירוט בשלב ההאצה של טילים בעלי דלק מוצק ושל טילים לטווח קצר ובינוני מציב אתגרים משמעותיים ומחייב שימוש במיירטים מהירים יותר וקרבה גדולה יותר של הגוף המיירט למקום השיגור.

שיפורים בטכנולוגיות הסנסורים בתחומים ספקטראליים נרחבים, יירוט בשילוב טכנולוגיות לייזרים רבי עצמה, עם אופציה ללייזרים מוצבים בחלל או מוטסים, יאפשרו ביצועי יירוט משופרים ויירוט מהיר יותר, ויפחיתו את העלויות הכלכליות של היירוט באופן שיעשה את היירוט

בשלב ההאצה ליותר ישים ובר-קיימא. השימוש ב-BPI יכול להשתלב במערכת יירוט רב-שכבתית, תוך אינטגרציה עם מערכות היירוט הקיימות. מערכת הגנה רב-שכבתית תאפשר להתמודד עם איומים מגוונים בשלבים שונים של מעוף הטיל וכך תשפר את סיכויי היירוט ותכסה על הפערים הקיימים במערכות היירוט הנוכחיות.

פיתוחים טכנולוגיים: הווה ועתיד

יירוט קרקעי ואווירי

[השיטות הפוטנציאליות](#) המוצעות ליירוט טילים בליסטיים בשלב ההאצה הן יירוט באמצעות נשק קינטי קרקעי, באמצעות נשק קינטי אווירי, יירוט מנשק המוצב בחלל ויירוט באמצעות מערכת ליזר מוטסת. נכון להיום, אין אף מערכת קרקעית היכולה ליירט טיל בליסטי בשלב ההאצה. מערכות ההגנה האווירית האמריקאיות (THAAD, AEGIS, Patriot) והישראליות ("קלע דוד" ו"חץ") מסוגלות ליירט את הטילים הבליסטיים ארוכי הטווח באטמוספירה או מחוצה לה. במקרה של יירוט קינטי קרקעי, קרי שיגור המיירטים מהקרקע, המיירטים הקרקעיים נדרשים להיות מהירים הרבה יותר ממיירטים המשוגרים מכלים אוויריים. בשונה מיירוט מהאוויר או מהחלל, היירוט הקרקעי לא תומך בשימוש בליזר, הדורש קו ראייה ארוך טווח עם המטרה – מה שאפשרי רק בגובה רב. בנוסף, בהתחשב בעקמומיות כדור הארץ ובמסגרת הזמנים המצומצמת, אין חיישנים קרקעיים המסוגלים לאתר טילים בשלב ההאצה, כך שהיירוט הקרקעי מחייב אינטגרציה ותקשורת מהירה של מערכות השליטה והבקרה עם כלים אוויריים באטמוספירה או בחלל. למעשה, מערכת לוויינים מצוידים בחיישנים רגישים לקרינת אור וחום קיימת במסגרת תכניות ההגנה האמריקאיות - Defense Support Program (DSP) והיא זו שמגלה את שיגור הטיל ע"י [חישה מרחוק של חום המנוע בעת השיגור](#). תהליך הגילוי, שיגור האותות והעיבוד מרגע הצתת מנוע הטיל הבליסטי עורך בממוצע כ-30 שניות, ואילו הזמן הנדרש להכנת הטיל המיירט ולשיגורו מוערך בכ-100 שניות לכל היותר לאחר קבלת האות, כלומר, בטווח של ההאצה של טיל בליסטי לטווח ארוך. הנחת העבודה היא כי מהירות הטיל המיירט צריכה להיות בסביבות שבעה ק"מ לשנייה, ופירוש הדבר הוא שניתן להציבו במרחק 700 – 1000 ק"מ מאתר השיגור של האיום הבליסטי.

פיתוח מערכות יירוט קרקעיות יפחית את הסיכונים הביטחוניים וההגבלות הטכניות הקיימות שביירוט מהאוויר. יש להניח (אם כי הדבר דורש בירור בנפרד), כי אפשר שכך תופחת העלות הכלכלית של סיור אווירי שוטף של כלי טיס. היתרונות שביירוט מהקרקע יגבירו מבחינת ארצות הברית וישראל את הכדאיות שביירוט טילים בשלב ההאצה, במיוחד בזמן שגרה. יתרה מכך, פיתוח מערכות BPI המבוססות על יירוט קרקעי יאפשר שיתופי פעולה נרחבים יותר עם בעלות

ברית מזרח תיכוניות שונות, שבהן אפשר להציב את המערכות, זאת בנוסף לאפשרות למקם את המערכות בנושאות מטוסים אמריקאיות או צוללות הנמצאות במרחב.

פיתוח מיירטים אוויריים מהירים יותר עשוי לשדרג משמעותית את יכולות היירוט בשלב ההאצה, תוך צמצום משך הזמן הנדרש להשלמת היירוט. כדי להשיג מטרה זו, על הטילים המיירטים להיות קלי משקל ככל האפשר, מצוידים בגלאים רגישים לאור ולחום הנלווים לשיגור הטיל הבליסטי ובמערכות אווירודינמיות ומערכות הנעה מתמרנות לשם כוונן מדויק של הטיל המיירט לגוף הטיל הבליסטי [בסמוך לאזור "החם" של פליטת הגזים](#). פיתוח מתקדם, שעשוי להיות חלק ממערכת BPI הוצג ביוני 2023 בסלון האווירי בפריז על ידי חברת [רפאל](#). מדובר בטיל אוויר-אוויר Sky Spear, המוצג באיור הבא- בעל יכולות רכישת מטרה, ביות ותקיפתה מרחוק והוא בהחלט מיועד לפגוע בפלטפורמות התקיפות של האויב לפני השיגור.

איור מס' 2 - טיל אוויר-אוויר תוצרת חברת רפאל Sky Spear



לייזר

עיקרון הפעולה של קרן לייזר 'בניגוד לנשק קינטי' הוא חימום המטרה - מה שדורש זמן שהייה של הקרן על המטרה למשך מספר שניות עד ליצירת כשל מבני במעטפת הטיל. בנוסף, השימוש בקרן לייזר יקצר מהותית את זמן היירוט, הוא יאפשר לפגוע בטיל כמעט מידית שכן קרן הלייזר נעה במהירות האור. הלייזר הוא נשק בלתי מתכלה, על כן השימוש בקרן הלייזר עשוי להוזיל משמעותית את עלויות היירוט ולשפר את היכולת להגיב למספר שיגורים במקביל. למרות האמור לעיל, יש להביא בחשבון את מגבלות נשק הלייזר: השימוש בלייזר מוגבל לפלטפורמות אוויריות (או מהחלל, בעתיד הרחוק) בשל הצורך בקו ראייה ישיר אל המטרה, וכן

קיימות מגבלות של עבירות באטמוספירה ועיוותים אופטיים אשר מקטינים במידה ניכרת את צפיפות האנרגיה ליחידת שטח.

ללייזר כימי דוגמת ה-COIL (לייזר חמצן יוד כימי- Chemical Oxygen Iodine Laser) יש יתרון בשל הטווח הארוך שלו ועוצמתו הרבה. למרות זאת, יש לו מגבלות הנובעות מהמורכבות הכרוכה בהובלה ואחסון של הכימיקלים, חלקם בעלי רמת מסוכנות גבוהה, והאספקה והזמינות המוגבלת שלהם, באופן המגביל שימוש נרחב ודורש שימוש בפלטפורמות אוויריות גדולות. יש פיתוחים נוספים שיוכלו לייצר קרני לייזר בעלי עוצמות גבוהות, דוגמת לייזרי אלקטרונים חופשיים ולייזרי פולס אולטרה-קצרים, אך הם נמצאים בשלבי פיתוח מוקדמים ואינם בשלים לשימושים מבצעיים. בדומה ללייזר הכימי, הם דורשים שימוש במערכות מורכבות וכבדות, שלא מאפשרות את הרכבתם על פלטפורמות מוטסות קטנות. מערכות מערכת מוטסת airborne laser - ABL - הייתה מערכת לייזר COIL מורכבת במטוס בואינג 747, אשר פעלה בגובה שיוט של בערך 12 ק"מ, ולמרות זאת הייתה חשופה להפרעות דוגמת מערבולות אטמוספיריות עקב זרמי אוויר או רוחות עזות, מה שהצריך מערכות אופטיות סבוכות לתיקון עיוותים אופטיים. בנוסף, ביצועי המערכת היו ירודים ביחס להשקעה הכספית, שהוערכה בסכום של שלושה מיליארד דולר, ועל כן התוכנית הופסקה השנת 2012.

השימוש בלייזר מצב מוצק או לייזר סיב ("לייזר חשמלי") הינו בעל היתכנות ביישום על פלטפורמות מוטסות קטנות יותר, כמו חמקנים או כטב"מים. אך בשל העוצמה הנמוכה יותר שלו, יש לו מגבלות ביירוט בשלב ההאצה. הטווח שלו קצר יחסית ותלוי, שוב, בתנאי הסביבה ומזג האוויר, ובעיקרון הוא מוגבל עקב העברה אטמוספירית מוגבלת שנובעת מבליעת קרן הלייזר על ידי מולקולות מים וגזים שונים באטמוספירה, מפזורים שונים של הקרן ומתופעות של טורבולנציה באטמוספירה. כיום, קיימת התקדמות משמעותית בפיתוח לייזרי מצב מוצק ולייזרי סיב שאובי דיודות ובמקביל גם סוגים נוספים של לייזרים, אך למרות השיפור בפיתוחים הטכנולוגיים, אף מערכת לייזר לא נראית קרובה לעמידה בטווח הקרוב בדרישות היירוט בשלב ההאצה.

יירוט מהחלל

הצלחה עתידית בפיתוח מערכות ליירוט טילים בשלב ההאצה הפועלות מהחלל, שארצות הברית עשויה להשיג בעתיד הרחוק כדי להתמודד עם איומים מרוסיה וסין, עשויה לשפר באופן משמעותי את יכולות היירוט ולתרום גם לישראל. מערכות יירוט קינטיות מבוססות חלל יוכלו להימצא במיקום אופטימלי ליירוט, ללא מגבלות גיאוגרפיות. ועדיין, פיתוח של מערכת מסוג זה לא יהיה ישים בעתיד הנראה לעין בשל קשיים הנדסיים ועלות כלכלית גבוהה של הפיתוח והתחזוקה. נדרשים לוויינים רבים כדי לכסות שטח קבוע על פני כדור הארץ ועלויות הייצור

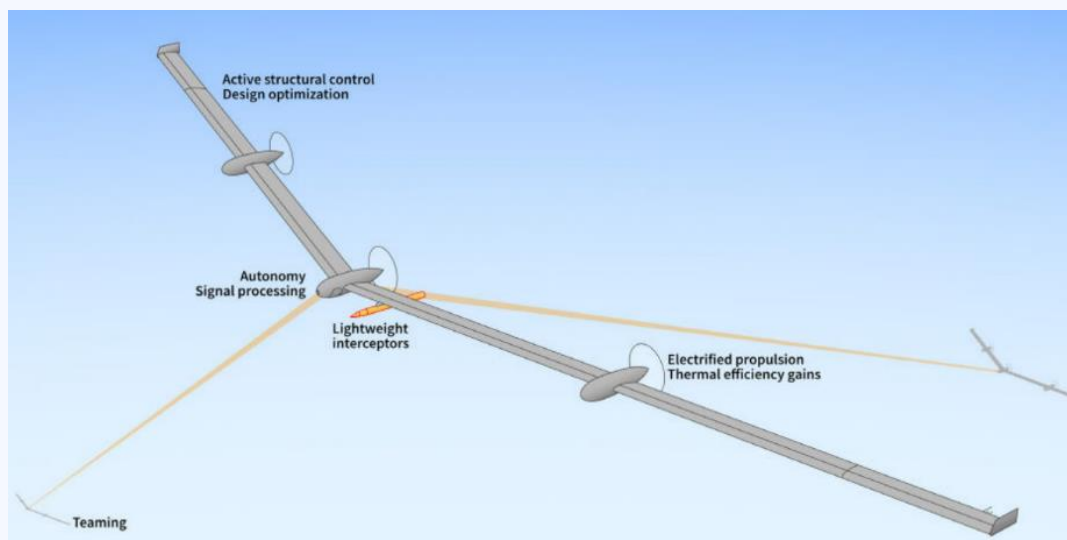
והשיגור של כל לוויין היא גבוהה. בנוסף, מערכות היירוט החלליות עשויות להיות חשופות למתקפות אנטי-לווייניות - מה שעלול לצמצם את ההיתכנות לשימוש בהן. בטווח הקצר, ניתן להשתמש בלוויינים מצוידים בחיישנים רגישים, בעיקר לאיתור השיגור של טילים בשלב ההאצה תוך אינטגרציה עם מערכות אוויריות. שיפור החיישנים בלוויינים עשוי לסייע בקיצור זמן איתור הטילים.

כטב"מים

נכון להיום, הכלים האוויריים הנוכחיים שיכולים להתאים ליירוט בשלב ההאצה הם מטוסי קרב כמו החמקן F35 ו-F15, וכן כטב"מים דוגמת איתן, גלובל-הוק וסדרת ה"הרמס". פיתוחים בתחום הכטב"מים היכולים להישאר באוויר לזמן ממושך, בגובה רב ובעלות נמוכה (HALE RPA), צפויים לשפר את הכדאיות והשימויות של השימוש בהם ליירוט טילים בשלב ההאצה. פיתוחים אלו יפחיתו את העלות הכלכלית של ייצור ותפעול הכטב"מים, ישפרו את איכות ומהירות היירוטים, ויקטינו את הסיכונים הביטחוניים הכרוכים ביירוט באמצעות כטב"מים.

השיפורים באים לידי ביטוי באווירודינמיקה משופרת של כליי הטיס, בשיפור במנוע ובצריכת הדלק ובמבנה חכם, קל ואמין יותר, שיכול להתמודד עם אתגרים מורכבים. [הדור הבא](#) של הכטב"מים האמריקאים שיירשו את כטב"מי ה"גלובל הוק" שאמור לצאת לשימוש ב- 2027 – 2029 ומערך הכטב"מים שצה"ל והתעשייה האווירית מפתחים [בפרויקט "ענני סערה"](#), ביניהם ה"ניצוץ", יכולים לשפר את הביצועים במידה משמעותית. ה

איור מס' 3 עקרון היירוט באמצעות [הדור הבא של הכטב"מים](#)



מערכת COIL המותקנת על גבי צפלין

שימוש במערכת COIL (לייזר חמצן-יוד כימי) המותקנת על גבי צפלין בגובה רב (HAA [High Altitude Airship](#)) יכול להיות אפשרי לשם יירוט טילים בליסטיים בשלב ההאצה. מערכת זו מנצלת את היתרונות של לייזר COIL, שלו טווח ארוך ועוצמה גדולה בשילוב היתרונות של השימוש בצפלין. הצפלין יכול לשמור על מיקום קבוע בגובה רב ולספק הגנה רציפה על אזור מסוים, זאת בשונה ממערכות מוטסות, שדורשות לוגיסטיקה מורכבת יותר כדי להישאר קרובות לאתר השיגור באופן קבוע.

כיום, השימוש ב-COIL או בלייזרים כימיים אחרים, אלו המבוססים על מימן פלואורי למשל, שמורכבים על פלטפורמות אוויריות, מוגבל בגלל לוגיסטיקה סבוכה הכוללת צריכת חשמל רבה לצורך משאבות ואקום וצריכת מים עבור מנגנוני קירור. סימולציות מראות כי שימוש בגז ניטרלי (buffer) בלחץ גבוה יותר מהלחץ החיצוני יוכל להחליף את השימוש במשאבת הוואקום בצפלין וכך לאפשר פעילות רציפה שלו בגובה של 20 ק"מ. בגובה זה, הלחץ האטמוספירי נמוך, העיוותים האופטיים מצומצמים ועל כן ניתן להשתמש באופטיקה פשוטה כדי לפגוע במטרה במרחק 100 ק"מ ובעלות יירוט נמוכה של \$100 ליירוט בהספק לייזר מקסימלי של 1000 קילואט. ניתן להאריך את זמן השימוש במערכת על ידי אספקת הכימיקלים מצפלין נוסף או מספינה. עם זאת, השימוש במערכת COIL המותקנת על גבי צפלין נתקל במספר חסרונות, וטרם נוסה מבצעית. המערכת חשופה לתנאי מזג האוויר במהלך ההמראה והנחיתה, ובשל קרבתה לשטח האויב וגודלה היא פגיעה לתקיפות בטילי קרקע-אוויר. כמו כן, היא מוגבלת בכמות הכימיקלים שהיא יכולה לשאת ודורשת מילוי תקופתי מחדש.

פיתוח חיישנים

פיתוח טכנולוגי, הקריטי עבור מערכת ליירוט מוקדם בשלב ההאצה, קשור ביישום שיפורים בביצועי החיישנים המיועדים לאיתור ומעקב אחרי טילים בשלב ההאצה. שיפורים אלו יאפשרו קיצור ניכר של משך הזמן לזיהוי וקביעת מסלול הטילים מרגע השיגור. חלון הזמן לביצוע יירוט בשלב ההאצה הוא קצר מאוד, בטווח של 160-300 שניות עבור טיל בליסטי בין יבשתי. האתגר הכרוך בגילוי מוקדם נובע מהנחתה של קרינת ה-IR (אינפרא אדום) בעיקר עקב נוכחות אדי מים באטמוספירה, רעש רקע שנובע מהחזרי קרינה מהקרקע וכן מעקמומיות כדור הארץ, מה שמציב מגבלות על גילוי מוקדם של המטרה. שיפורים אלו במיוחד בתחום האינפרא-אדום יפחיתו מהדרישות המאתגרות שמוטלות כיום על מערכות היירוט וכך ישפרו את ביצועי היירוט ויגדילו את ההיתכנות ליירוט בשלב ההאצה. בנוסף, שיפורים ביכולות הייצור

של חיישנים בתחומים ספקטראליים נוספים, שדרוג מכ"מים ורכיבים אופטיים יפחיתו את עלות הייצור שלהם באופן שיעשה את השימוש בהם לשישים באופן נרחב, ובמקביל יש פיתוחים בטווח הקצר-בינוני שיוכלו לאפשר זאת.

השימוש בטכנולוגיות מכ"ם חדשות, דוגמת מכ"ם מבוסס על מוליכים למחצה מסוג גליום ניטריד (GaN), עשוי לקצר את זמן הזיהוי של הטילים הבליסטיים. השימוש בגליום ניטריד מציע יתרונות משמעותיים למערכות מכ"ם בכך שהוא תומך במתחים גבוהים יותר, מגביר את היעילות האנרגטית ומשפר את יכולת החלפת התדרים. יתרה מכך, הוא מאפשר את הפחתת משקל המערכות ומשפר את הרזולוציה והטווח, מה שמוביל ליכולות מעקב מדויקות ומהירות יותר ויכולת להתקין את המכ"ם על כלי טיס יותר קטנים.

השיפורים הנוכחיים והעתידיים בחיישני אינפרא אדום ברזולוציה גבוהה מובילים לשיפור ברגישות, ברזולוציה וביעילות של החיישנים, תוך הפחתת עלויות הייצור. מערכי גלאים בטווחי הגל הקצרים (SWIR) והבינוניים (MWIR) מאפשרים גילוי מדויק ורגיש יותר של אותות מתוך רעשי רקע, בעוד שטכנולוגיות קריאה מתקדמות באמצעות מערכי הגלאים (Focal Plane FPA Arrays) מאפשרות עיבוד נתונים מהיר יותר ויכולת זיהוי ומעקב תוך התמודדות עם כמות נתונים גדולה. פיתוחים אלה, בשילוב השימוש בבינה מלאכותית, למידת מכונה ואלגוריתמים לזיהוי תמונות ברזולוציה גבוהה ומעקב מהיר יוכלו לשפר את הביצועים של חיישני האינפרא אדום ולאפשר איתור טילים בשלב ההאצה על בסיס הלוויינים הקיימים, ללא צורך לשגר לוויינים חדשים.

אתגר מדיני

האתגר המדיני והאתגר הטכנולוגי בתרחיש שמתבצע BPI שלובים זה בזה. על מנת לבצע יירוט מקדים של איום בליסטי יש צורך למקם את מערכת היירוט, מוטסת או יבשתית, במרחק אופטימלי על מנת שהטיל המיירט יפגע בטיל המטרה לפני גמר הבעירה ולפני שהאיום הבליסטי צובר תאוצה אשר עלולה לסכן את המטרה שאליה הוא מכוון. המיקום האופטימלי מהווה לעתים אתגר מדיני, במיוחד במקרה ירי טיל בליסטי ארוך טווח אל מדינה נעדרת עומק אסטרטגי, דוגמת המקרה ישראל מול איראן או המורדים החות'ים בתימן. בישראל למשל, חוסר העומק האסטרטגי מחייב יירוט מקדים בסקלת זמנים מהירה, ומצד שני המרחק הרב מציב בעיה מדינית הכרוכה בהצבת מערכת היירוט מחוץ לגבולות המדינה. ליירוט טילים בשלב ה-BPI יש יתרון עבור [מדינות](#) הנמצאות בסמיכות גאוגרפית למדינות ידידותיות או למים בינלאומיים, במיוחד כאשר הן נמצאות בסיכון מוגבר לתקיפה אווירית. מכאן מתחייבת החזקה של כלי טיס, שיסיירו באופן שוטף סמוך למדינת אויב ובכך גלומים סיכונים ביטחוניים ועלות כלכלית המוערכת בעשרות מיליארדי דולרים. לכן, הפעלת מערכות היירוט בשלב ההאצה

רלוונטיות יותר בעתיד הנראה לעין לזמני מתיחות ומלחמה או בעת קבלת התראה מודיעינית מוקדמת. מערכת יירוט המוצבת בחלל אינה נדונה כאן שכן מדובר בנושא שהוא [בעל היתכנות עתידית](#). עם זאת, בשלב ההאצה של כלי הטיס, מספר מאות קילומטרים ממרחב השיגור, השימוש ב-BPI בעתיד הקרוב לא מאיים על מדינות בעלות עומק אסטרטגי דוגמת סין ורוסיה, היכולות לשגר את הטילים מעומקן.

סיורים שוטפים של כליי טיס סמוך לגבולות מדינת אויב בזמן שגרה יכולים [להגביר את המתיחות](#) ואת הפוטנציאל להסלמה. הם יכולים להיתפס כפרובוקציה וכפגיעה בריבונות ולגרום לתקריות ביטחוניות לא רצויות. כלומר, הסיורים יכולים לייצר פער אפשרי בין כוונתם ההגנתית המקורית לבין הפרשנות שלהם כמצג שווא של מתקפה. בנוסף, כלי הטיס מתמודדים במהלך הסיורים עם מגוון איומים ביטחוניים, ביניהם מערכות הגנה אווירית, לוחמה אלקטרונית ותנאי מזג אוויר קשים. ככל שמשך השהייה באוויר אורך והיקף הפעילות גובר, כך עולה רמת הסיכון הנובעת מאיומים אלה. מצד שני, הסיורים האוויריים משפרים את היכולת של כלי הטיס לתקוף בשטח האויב והם יכולים להרתיע אותו מלתקוף מחשש לתגובת נגד. יתרה מכך, היכולת ליירט טילים בשלב ההאצה על ידי "נוכחות קדמית משופרת" של האמצעים המיירטים, להלן enhanced eFP (Forward Presence), מפחיתה משמעותית את האפקטיביות של שימוש בטילים בליסטים מצד האויב באופן היכול לייצר אפקט של [הרתעה על ידי ענישה](#), ובכך למנוע ממנו לתקוף מלכתחילה.

זמן התגובה שניתן ליירט טילים בשלב ההאצה מרגע השיגור הוא קצר, ומשאיר חלון זמן צפוף לקבלת החלטה אנושית על יירוט ובנוסף מקשה על שיתוף פעולה בזמן אמת בין מדינות. משום כך, שיתוף פעולה ביירוט בשלב ההאצה מוגבל לתיאום מראש ומחייב כל מדינה לפעול באופן עצמאי. שיפורים בתחום החיישנים יקצרו את זמן איתור הטילים ויתנו יותר מרווח זמן לקבלת החלטה אנושית.

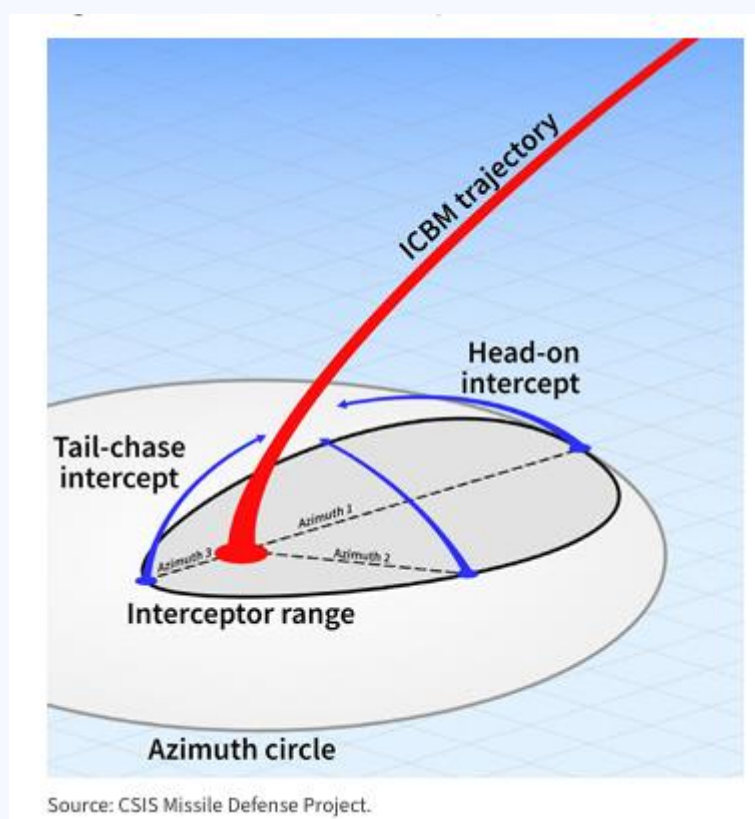
בנוגע לישראל, במקרים של שיגורים מיעדים קרובים, בפרט סוריה ולבנון, היא תיאלץ ליירט את האיום בכוחות עצמה, ואילו במקרים של שיגורים ממקומות רחוקים, דוגמת איראן ותימן, התרחיש מורכב יותר ועשוי לדרוש שיתוף פעולה אזורי. השימוש ב-BPI רלוונטי גם באזור מזרח אסיה, נגד מערך הטילים הבליסטיים וראשי הקרב הגרעיניים של [צפון קוריאה](#). הצורך המשותף והפיתוחים הקיימים ב-BPI של בעלות ברית שונות של ארצות הברית (ישראל, יפן, דרום קוריאה) יכול להוות בסיס לשיתוף פעולה בתחום המחקר ופיתוח.

היבטים מבצעיים ומדיניים: יישום הפתרון המוצע בהקשר למדינות האזור

איראן

הפעלה של מערכות לשם יירוט בשלב ההאצה (BPI) נגד איום בליסטי מאיראן הינה מאתגרת. בשל עומקה האסטרטגי, יש לאיראן יכולת לשגר טילים מעומקה באופן היכול להקשות על שימוש והצבה של מערכות BPI סמוך לגבולותיה. כדי ליירט טילים בליסטיים איראניים בשלב ההאצה, יש למקם כלי טיס שיסיירו באופן תדיר סמוך לגבולות איראן. [האיור הבא](#) מדגים את חשיבות הטופוגרפיה בתכנון מבצעי של טיל מיירט בשלב ההאצה. חשיבות רבה נודעת לכוון הזוויתי של שיגור הטיל המיירט מכיוון שיירוט אחורי (Tail-chase intercept) דורש קינמטיקה מהירה יותר מאשר יירוט קדמי (Head-on intercept) ולעתים התנאים המבצעיים מכתיבים גיאומטריה, המחייבת שימוש במיירטים מהירים מאוד. יש להניח כי ישראל תתקשה לבדה להעמיד מערך מסוג זה בשל הגבלות כלכליות והגבלות טכניות של מרחק, והיא תלויה במקרה זה בארצות הברית.

איור מס' 4- הדגמת הקונצפט של יירוט אחורי ויירוט קדמי



נושאות מטוסים אמריקאיות הסמוכות לאיראן במפרץ הפרסי [ומדינות הקרובות אליה](#) – ערב הסעודית, איחוד האמירויות [ואזרבייג'ן](#) (ממנה המטוסים יחוגו מעל הים הכספי סמוך לאיראן) – יכולות לשמש בסיס להמראת כלים אוויריים בעלי יכולות ירוט. אפשרות נוספת היא שימוש בנושאות מטוסים או צוללות. בשל העלות הכלכלית הגבוהה, ההגבלות הטכניות והסיכונים הביטחוניים המשמעותיים, ההיתכנות להפעלת כלי טיס סמוך לשטח איראן באופן שוטף הינה נמוכה. עם זאת, בזמן מתיחות, מלחמה, או כאשר ישנן התראות מודיעיניות ברורות, דוגמת המתקפות האיראניות על ישראל ב-14 באפריל וב-1 באוקטובר, יש היתכנות גבוהה יותר ליירוט בשלב ההאצה באמצעות כלי טיס המשוטטים בסמוך לאזורי השיגור.

החות'ים בתימן

בשל קרבתו של המעוז החות'י בתימן לערב הסעודית וקרן אפריקה והיעדר עומקו האסטרטגי ביחס לאתרים אלו, המקרה החות'י מהווה יעד קל יותר ליירוט טילים בשלב ההאצה. מאידך גיסא, עקב העלות הגבוהה ביחס לתועלת שההחזקה של כלי טיס באופן שוטף סמוך לתימן, ההיתכנות של יירוט מן האוויר בזמן שגרה נמוכה. למרות זאת, התראה מודיעינית מוקדמת על שיגור יכולה לאפשר מבצעי יירוט נקודתיים של טילים בשלב ההאצה.

לפי [דיווח](#) של עיתון "אל-אח'בר", ישראל, איחוד האמירויות ערב הסעודית ומדינות נוספות מתכננות שיתוף פעולה צבאי על הארכיפלג "סוקוטרה" הנמצא סמוך לתימן. מצוין כי ישראל בונה בסיס צבאי באי עבדול קורי שבארכיפלג. בסיס עתידי זה יוכל לשמש להמראות של כלי טיס ישראלים בעלי יכולת ירוט אפקטיבית בהינתן התראה מודיעינית מוקדמת. כמו כן, סומלילנד, ישות מדינית הנמצאת בקרן אפריקה, יכולה לשמש בסיס עבור חיל האוויר הישראלי. לפי [דיווח](#) של האתר "Middle East Monitor", סומלילנד, בתיווך איחוד האמירויות, הביעה נכונות לאפשר לישראל להקים בסיס צבאי בשטחה בתמורה להכרה ישראלית בריבונותה, כינון יחסים דיפלומטיים והשקעות כלכליות מצד ישראל. מיקומים פוטנציאליים נוספים הם בסיס חיל הים האמריקאי "[מחנה למונייה](#)" בג'יבוטי, ואריתריאה שעל פי [דו"ח](#) של חברת סטרטפור, לישראל יש בה נוכחות צבאית. בנוסף, בשל קרבתה של ערב הסעודית לתימן, היא עשויה להוות שותפה למאמצי היירוט.

סוריה ולבנון

הודות לקרבתם של סוריה ולבנון לישראל, יירוט טילים מהאוויר בשלב ההאצה על ידי כטב"מים תוקפים ומטוסי קרב ישראלים יהיה ישים יותר. יירוט זה רלוונטי במיוחד בזמן מלחמה או מתיחות בעקבות הימצאותם של כלי טיס רבים באוויר, אך הוא גם רלוונטי לזמן שגרה. למרות זאת, משך שלב ההאצה של טילים בעלי טווח קצר ובינוני המשוגרים מאזורים אלו קצר במיוחד, מה שנכון להיום, מציב אתגר טכנולוגי משמעותי ליכולת היירוט האווירית. בדיעבד, שילוב טקטיקת היירוט בשלב ההאצה כחלק מאסטרטגיה התקפית היה יכול לסייע לישראל להתמודד עם

מערך הטילים המדויקים של [חזבאללה](#) ושל [הצבא הסורי](#) כחלק ממערכת הגנה רב שכבתית, ביחד עם מערכות ה"חץ, ו"קלע דוד". מכיוון שעתיד החזית הצפונית לא ברור, אופציית היירוט בשלבי ההאצה רלוונטית גם לחזית זו.

המלצות ולקחים לישראל

ישראל היא המדינה המאוימת ביותר בעולם בנשק רקטי וטילים מכל הסוגים. מטרת האיומים היא הקפת ישראל בטבעת אש, על פי הדוקטרינה שהוביל מפקד משמרות המהפכה האיראניים קאסם סולימאני, במקביל למלחמת התשה על ידי ארגונים לא-מדינתיים, שלוחיה של איראן, שמטרתה הסופית היא השמדת מדינת ישראל. מדינת ישראל מתמודדת עם האתגר הרקטי לטווחים שונים, המאיים על תשתיות אזרחיות וצבאיות בשטחה, באמצעות שכבות הגנה שונות, כאשר מערכת ליירוט טילים בשלב ההאצה בתוספת יתרונותיה המבצעיים מהווה שכבת נוספת במעטפת ההגנה. ליירוט בשלבי ההאצה יתרון בכך ששברי טילים מיירטים, חלקי מנוע או שברים של גוף הטיל או הרקטה המשוגרת, ומטען חומר הנפץ של הרש"ק נופלים בשטח האויב – מה שמונע נזק ישיר ו"אגבי" לאוכלוסיית ישראל. יתרון נוסף ביירוט מוקדם בשטח האויב הוא מניעת צורך לשלוח אוכלוסיות מאזורים נרחבים למרחבים מוגנים, הכרוך בנזק כלכלי ופסיכולוגי ניכר.

בתכנון מערכת ליירוט מוקדם יש צורך בהערכת המסלול העתידי של הטיל המיירט על מנת לחסוך בעלויות של יירוט טילים בעלי מסלול שאיננו מכון לאתרים מאוכלסים או אתרים אסטרטגיים. [בעתונות המקומית](#) דווח פיתוח טיל "מואב" בידי חברת רפאל למטרות יירוט מוקדם של רקטות וטילים עוד בשנת 1995, אך מלבד דווח על אודות קשיים מסוימים, אין מידע על התקדמות הפרויקט. לאור יתרונות היירוט המוקדם בשלב ההאצה, מומלץ לשקול שימוש באמצעי זה כמעטפת הגנה אקטיבית, אשר בלי ספק תקל את ביצועי המערכות הקיימות. גם הטיל Sky Spear עשוי להיות פתרון, אך יחייב שילוב במערכות גילוי ומעקב רגישות בתחומים ספקטראליים מיוחדים ובעלות יכולת עיבוד נתונים מהירה, שכן חלון ההזדמנויות ליירוט בשלב ההאצה הוא קצר. בהתבסס על יתרונות היירוט בשלב ההאצה ולאור מגוון האיומים על מדינת ישראל על מערכת הביטחון להקצות משאבי מחקר ותקציב לנושא ובמקביל לשקול את ההיבטים הצבאיים והמדיניים הכרוכים ביישום מהיר האופציה של יירוט טילים ורקטות בשלב ההאצה.

עורכי הסדרה: ענת קורץ ואלדד שביט