

לייזר רב עוצמה ליירוט רקטות וטילים בשדה הקרב העתיד - מצב הפיתוח בעולם ובישראל

יהושע קליסקי ואנה סוקולנקו¹ | 21 במאי, 2025

הקדמה

המאמר סוקר את הפיתוחים השונים במדינות שונות באסיה, כולל ישראל, באירופה וכן בארצות הברית בנושא לייזרים רבי עוצמה ככלי נשק בשדה הקרב העתידי. **מטרת המאמר היא העמקת הידע של הציבור ומקבלי החלטות בדבר ההתפתחויות החשובות בתחום אמצעי הלחימה בשדה הקרב העתידי.**

לקרן הלייזר יש תכונות ייחודיות המאפשרות יישום מגוון של יתרונותיה בשדה הקרב. השדרוג של מערכות הלייזר להספקים גבוהים – קילוואטים (אלפי ואטים) ומגה-וואטים (מיליוני ואטים) – מאפשר השמדת איומים אוויריים כגון רקטות, כטב"מים ורחפנים, ובתנאים מסוימים גם השמדת טילים בליסטיים. מרבית המדינות מפתחות נשק לייזר בהספקים של קילוואטים אחדים עד 100 קילוואט כנגד איומים רקטיים, ארטילריים או כטב"מים. מעצמות כגון ארצות הברית, רוסיה וסין מתכננות גם מערכות לייזר רב עוצמה לטווחים ארוכים, כדי לפגוע ולהשמיד מטרות בחלל.

מדינת ישראל נמצאת בחזית פיתוח מערכות נשק לייזר מתקדמות עם פיתוחים ייחודיים, המאפשרים להביא את קרן הלייזר העוצמתית אל המטרה בדיוק מרבי תוך גרימת נזק למטרות עוינות.

על מדינת ישראל להמשיך לשדרג את מערכת נשק הלייזר להספקים גבוהים ולפלטפורמות מוטסות כדי לייצר מגוון רחב של איומים, כולל אלה של טילים בליסטיים ארוכי טווח ממדינות 'המעגל השלישי', וזאת כחלק בלתי נפרד ממעטפת ההגנה של מדינת ישראל מפני איום רקטי או טילי.

תקציר טכנולוגי

- הרעיון של שימוש בקרן לייזר רבת עוצמה כנגד איומים או אויבים אינו חדש, אך מימוש התעכב בגלל חסמים טכנולוגיים-הנדסיים. בשני העשורים האחרונים חלו התפתחויות משמעותיות בפיתוח מקורות ללייזרים רבי עוצמה תוך שמירה על התכונות הייחודיות

¹ אנה סוקולנקו מתמחה בנושאי ביטחון.

של קרן הלייזר, והדבר מאפשר את יישום התכונות הייחודיות של קרן הלייזר כנשק. המאפיינים העיקריים של נשק הלייזר הם: באופן כללי, כל לייזר (וכמובן לייזר צבאי) הוא מקור אור **נראה או בלתי נראה, נע במהירות האור (300 אלף ק"מ בשנייה), מוגדר ומוגבר**, בעל יכולת לייצר קרינת אור אנרגטית למרחקים ארוכים, מכוונת היטב וממוקדת.

- קרינת הלייזר יכולה לגרום כשל מכני במטרה שבה היא פוגעת בצפיפות אנרגיה של אלפי ואטים ליחידת שטח, על ידי חימום המטרה.
- נשק הלייזר זול לתפעול ובלתי מתכלה, וניתן לשימוש חוזר במהירות.
- בשל המהירות האין-סופית נשק הלייזר יעיל כנגד מטרות עוינות שנורות מטווח קצר, או מטרות מנמיכות טוס הנמצאות בקו ראייה עם המטרה.
- נשק לייזר הוא נשק אסטרטגי – מפיק הספק של מיליוני ואטים (מגה-ואטים) כנגד טילים וטילי שיוט; אמצעי טקטי – מפיק הספק של אלפי ואטים (קילוואטים) כנגד רקטות, ארטילריה, רחפנים וכטב"מים או פצצות מרגמה.
- ניתן לייצר קרינת לייזר בתנאים מסוימים בלבד, ומחומרים ספציפיים ("תווך לזר").

סוגי לייזר בעלי פוטנציאל לשימוש כנשק

- לייזר כימי – שבו התווך הלזר הוא תערובת גזים שיוצרת תרכובת כימית חדשה המפיקה קרינה רבת הספק, בתחומי המגה-ואט, כתוצאה מריאקציה כימית. לייזר כימי הוא מערכת מורכבת שדורשת מאגרים גדולים של המרכיבים הכימיים ואמצעים מיוחדים מרובי הספק לייזום התהליך הכימי, לפינוי תוצרי הריאקציה הכימית לאחר תהליך הלזירה, וכן מערכות לפינוי חום רב הנוצר בעת התהליך הכימי.
- לייזר מצב מוצק – שבו התווך הלזר הוא גביש מוצק המכיל אטומים בעלי יכולת להפיק קרינת לייזר. זוהי מערכת מורכבת אך קומפקטית ויעילה יותר מן הלייזר הכימי אך מפיקה הספקים נמוכים יותר, בתחום של מאות קילוואטים, ונדרשות מערכות לפינוי החום שנוצר בעת תהליך הלזירה.
- לייזר סיב אופטי – שבו התווך הלזר הוא סיב אופטי המכיל אף הוא אטומים בעלי יכולת להפיק קרינת לייזר. זוהי מערכת גמישה, קשיחה, קומפקטית, יעילה יותר מלייזר מצב מוצק, עם רמת הספקים של מאות קילוואטים ואפשרויות לפינוי חום פסיבי או אקטיבי כתלות ברמות ההספקים הנדרשים.

- הפשטות של מערכת לייזר סיב או תצורות מיוחדות של לייזר מצב מוצק באה לידי ביטוי משמעותי ביעילות המערכת, קרי, ביחס גבוה יחסית בין הספק קרינת הלייזר המופקת לבין ההספק החשמלי הכולל שמושקע במערכת. מדובר ביעילות בסדר גודל של 30%-40%, כך שההשקעה במערכות החשמל מאפשרת הקטנת ממדי המערכת ומשקלה.
- הקטנת הממדים והמשקל של סוגי הלייזר הנדונים מאפשרת גמישות בהפעלה ושימוש בפלטפורמות נוספות על פלטפורמה יבשתית.

לנשק הלייזר יש מספר מגבלות הנובעות מתנאי סביבה וממזג האוויר (אבק, עשן, גשם, עננות, ערפל), פיזור או מגבלות של עבירות או עיוותים אופטיים במסלול הקרן באטמוספירה. מגבלות אלו תלויות בחלקן בסוג הלייזר וב"צבע" (או אורך גל) של הקרינה שמפיק מכשיר הלייזר. המגבלות השונות נובעות בעיקר מהעובדה שקיימים באטמוספירה תחומי עבירות, קרי חלונות אטמוספריים, לצבעים (אורכי גל) מסוימים. סוגי מגבלות הלייזר, מהותן והדרכים להתגבר עליהן מסוכמים בטבלה הבאה:

המגבלה	מהותה	דרכי התמודדות
עבירות אטמוספירית	הנחתת קרינה עקב בליעת קרינה, או פיזור אור מחלקיקים באוויר	בחירת סוג לייזר שקרינתו עוברת בחלון אטמוספרי מתאים
תנאי סביבה	פיזור קרינה, אבק, עשן, עננות, גשם, ערפל	בחירה מתאימה של סוג לייזר שקרינתו לא מושפעת מהמגבלה
אפקטים אוויר-אופטיים: מערבולות אוויר (טורבולנציה), רוח, גלי הלם	שינויים בצפיפות ובטמפרטורה של שכבות שונות באטמוספירה גורמים להתבדרות הקרן	שימוש במודלים מתמטיים לניבוי, בשילוב רכיבים אופטיים ייחודיים – עדשות מתכוונות (אופטיקה אדפטיבית)
נהירות תרמית Thermal blooming	חימום האטמוספירה במעבר הקרן רבת העוצמה גורם לעיוות המסלול האופטי	שימוש בלייזר משואה (beacon) שדוגם את מסלול הקרן ושולח משוב לשם תיקון המסלול
יצירת פלזמה (חלקיקים טעונים חשמלית ואלקטרונים) באוויר וסביב המטרה	לייזר רב עוצמה גורם לפירוק אטומים ומולקולות, יוצר חלקיקים טעונים חשמלית ואלקטרונים וגורם להסטת קרן הלייזר מהמטרה	שימוש בלייזר מתאים יפחית את ההשפעה השלילית של יצירת הפלזמה על תכונות הקרן הפוגעת
פילמנטציה – יצירת אזורים עם מיקוד עצמי גבוה	מאפיינת לייזרים פולסיים מהירים ובהספק גבוה	שליטה על משך פולס הלייזר

חשוב להדגיש כי ברמות ההספק הנוכחיות ובמגבלות הנובעות מהפעלת מערכות קרקעיות, נשק לייזר הוא נדבך משלים לנשק הקינטי.

לנשק הלייזר יש מאפיינים ודרישות בהתאם לסוג המטרה, כפי שמפורט בטבלה הבאה:²

סוג המטרה	טילי שיוט, כטב"מים	רקטות, פגזים, ארטילריה	טילים בליסטיים*
גודל הכתם הנדרש	100 מ"מ	60 מ"מ	14X14 ס"מ
טווח פעולה	6-15 ק"מ	3-0.5 ק"מ	150 ק"מ
זמן שהייה על המטרה	8-6 שניות**	כחות מ-20 שניות	70 שניות
ההספק הנדרש	20 קילוואט	150-100 קילוואט	3-1 מגה-ואט
יכולת שמירת הכתם על נקודת הפגיעה	נדרש דיוק בסדר גודל של אלפית המעלה או כחות	נדרש דיוק בסדר גודל של אלפית המעלה או כחות	דרישת דיוק נמוכה יותר, בסדר גודל של מספר אלפיות המעלה

*הנתונים עבור טילים בליסטיים הם של לייזר כימי מוטס
 ** זמן השהייה תלוי בחומר שממנו בנויה המטרה

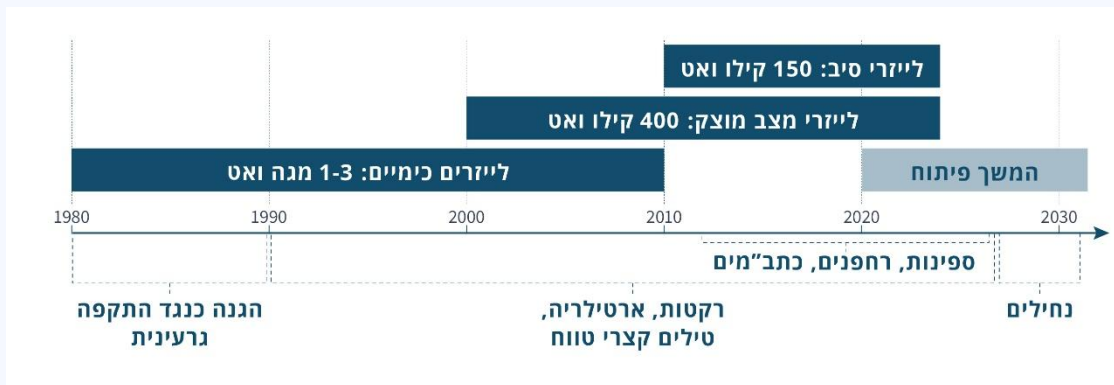
סקירה היסטורית³

מאמץ הפיתוח הטכנולוגי העיקרי של נשק הלייזר החל בארצות הברית עוד בשנות ה-70 של המאה ה-20, והוא הואץ עם ההכרזה על תוכנית 'מלחמת הכוכבים' של הנשיא רייגן בראשית שנות ה-80, תוך התמקדות בפיתוח לייזר רב עוצמה כנשק אסטרטגי כנגד איום טילים בליסטיים נושאי רש"ק גרעיני.

סקלת הזמנים של פיתוח נשק לייזר כנגד איומים מוצגת באיור הבא.

² מבוסס על: Titterton, *Military Laser Technology and Systems*, p. 240

³ Jeff Hecht, *Lasers, Death Rays, and the Long, Strange Quest for the Ultimate Weapon*, Prometheus Books, 2019.



ההתמקדות ביישומים ברמה הטקטית החלה עם הפחתת האיום הגרעיני והגברת האיום של כלי נשק קונוונציונליים בעלי פוטנציאל נזק הרסני, כגון פגזי ארטילריה לטווחים שונים, רקטות וטילים לטווחים קצרים ארוכים, ספינות תקיפה קלות, כתב"מים ורחפנים. בראשית שנות ה-2000 החלה התפתחות ניכרת בפיתוח לייזר מצב מוצק, כשיעד ההספק להשמדת המטרה היה 400 קילוואט לפחות, ובמקביל נמשכו מאמצי פיתוח של לייזר כימי רב הספק, בדגש על מערכות מוטסות. במקביל לכך, בסביבות שנת 2010 הייתה התפתחות חשובה בנושא של טכנולוגיות הכרוכות בפיתוח לייזר סיב אופטי, כאשר ההספק הנוכחי המרבי המופק ממערכות המתוכננות להיות מבצעיות הוא עד 150 קילוואט, עם יעד של עד 500-600 קילוואט.

[לסיכום](#), ההתפתחויות הטכנולוגיות הבולטות היו במספר וקטורי פעילות:

1. פיתוח מקורות חדשים ויעילים ללייזר המבוסס על גבישים (לייזר מצב מוצק) או על סיבים אופטיים מאולחים (doped) ברכיבים כימיים, שמסוגלים להפיק קרינת לייזר (לייזר סיב). טכנולוגיות אלו מחייבות מאמץ וידע רב-תחומיים. במקרה של לייזר מצב מוצק מדובר בטכנולוגיות ייחודיות של גידול, ייצור ועיבוד אופטי מתוחכם של הגבישים והרכיבים האופטיים המתאימים. במקרה של סיבים אופטיים מדובר בתהליכים מורכבים של יצירת הסיבים האופטיים המאולחים ברכיבים הכימיים המתאימים.
2. פיתוח מקורות שמספקים אנרגיה ביעילות לתווך המבצע את פעולת הלזירה. פעולה זו נקראת בלשון המקצועית 'שאיבה' (pumping).
3. פיתוח שיטות לפינוי חום יעיל מהמערכת הלזירת. יעילות מערכות הלייזר אינה גבוהה. רק חלק מהאנרגיה המושקעת הופך לקרינת לייזר, ואילו שאר האנרגיה הופכת לאנרגיית חום, שאותו יש לפנות. בהספקי לייזר נמוכים הפינוי נעשה בצורה פסיבית על ידי פינוי עצמי של החום לסביבה, ובהספקים גבוהים הפינוי נעשה בצורה אקטיבית על ידי מערכות עזר לפינוי חום.
4. פיתוח שיטות יעילות לאריזת המערכות האלקטרוניות והאופטיות על מנת לצמצם את הנפח והמשקל של המערכות המבצעיות.

מצב הפיתוח של מערכות לייזר רב עוצמה בעולם

בפרק זה נדון בפיתוח מערכות לייזר רב עוצמה בעולם. נציג בפירוט את מגמות הפיתוח בארצות הברית, שכן תהליכי המחקר והפיתוח האמריקאיים בתחום מהווים מודל לפיתוחים דומים במדינות שונות. לאחר מכן נציג בצורה תמציתית מגמות פיתוח במספר מדינות נוספות.

ארצות הברית

כלי

ארצות הברית מובילה בפיתוח נשק לייזר רב עוצמה או רב הספק מאז הפעלת הלייזר הראשון בשנת 1960. הפיתוחים התמקדו בסוגים שונים של לייזר – לייזר גזי, לייזר מצב מוצק ולייזר סיב, הנישאים בפלטפורמות יבשתיות, אוויריות וימיות. נתמקד בפיתוחים האחרונים בנושא. מערכת [לייזר מצב מוצק AN/SEQ-3 Laser Weapon System or XN-1 LaWS](#) מודגמת בתמונה להלן. זוהי דוגמה ללייזר של 30-50 קילוואט שהוצב כבר בשנת 2014 לבחינת מבצעותיו על אחת מספינות הצי במפרץ הפרסי, Ponce, לשם הגנה על ספינות מפני תקיפות של כטב"מים או כלי שיט בלתי מאוישים.



מערכות נשק לייזר מוטסות

בעבר הובילה ארצות הברית בפיתוח מערכות לייזר כימי מוטסות ברמות הספק של מגה-ואטים (ABL – Airborne Lasers), אך פעילות זו הופסקה בגלל עלותה הגבוהה. גם פרויקטים אחרים שקשורים [להצבת מערכות לייזר על מטוסים](#) בוטלו לאחרונה. הפרויקט הראשון שבוטל הוא הצבת מערכת מסוג Shield⁴ על גבי מטוסי קרב אמריקאיים, לטובת יירוט טילי קרקע-אוויר, אוויר-אוויר וטילים בליסטיים שמכוונים על ארצות הברית. תוכנית זו בוטלה במאי 2024. הפרויקט השני שבוטל היה הצבה של מערכת מסוג AHEL⁵ על מטוס הפצצה כבד מסוג לוקהיד AC-130. הגורמים לביטול נובעים מקשיים טכנולוגיים והנדסיים שמקורם בקושי בהצבת מקור אנרגיה יעיל בעבור מערכות הלייזר על גבי המטוסים ובחוסר היציבות של המערכת הלייזר בעת הטיסה – דבר שאינו מאפשר מיקוד של אנרגיית הלייזר על גבי המטרה.

מערכות נשק לייזר יבשתי יביל

1. דוגמה למערכת לייזר יבשתי נישאת על גבי משאית בהספק מתוכנן של 300 קילואט בשם [Valkyrie](#) מוצגת בתמונה להלן. מדובר במשפחת לייזרים בטווח הספק של 20-300 קילואט, המיועדים להגנה מפני רחפנים וכטב"מים.



⁴ Self-Protect High-Energy Laser Demonstrator

⁵ Airborne High Energy Laser system

2. דוגמה ל**מערכת נשק לייזר יבשתי** שקיבלה משוב שלילי היא מערכת לייזר אינטגרלית הנקראת DEM-SHORAD.⁶ למערכת זו הספק של 50 קילוואט והיא הוצבה על רכבי Stryker בצבא אמריקאי. המערכת כוללת תת-מערכות לזיהוי, עקיבה ובקרת אש. האמריקאים בנו את המערכת בניסיון למצוא פתרון נייד ומשתלם יחסית שידע להתמודד עם רחפנים, רקטות, ארטילריה ומרגמות, אך בניגוד לבדיקות המעבדה המוצלחות המערכת המבצעית לא הוכיחה את עצמה, בעיקר **עקב קשיי תפעול בתנאי שדה**.
3. **על פי דיווח נוסף** שלא אושר רשמית על ידי הפנטגון, נראה כי צבא ארצות הברית עשה שימוש במערכות לייזר במהלך לחימה במזרח התיכון, כנראה נגד החות'ים, אך דוח זה אינו מספק פרטים רבים על המקרה.
4. חברת בואינג האמריקאית הדגימה בתרגיל שהתקיים בערב הסעודית את מערכת הלייזר היבשתית הקומפקטית שלה בשם **CLWS**. המערכת התמודדה בהצלחה עם כטב"מים במשקל של עד 600 ק"ג המצוידים בטכנולוגיה מתקדמת, אשר מהווים אתגר רציני למערכות הגנ"א קונוונציונליות. באמצעות לייזר של חמישה קילוואט המערכת הגיבה תוך מספר דקות על האיומים שנקלטו במערכות המכ"ם, והדגימה את יכולתה להגיב לאיומים משתנים שקיימים בעולם האמיתי. המערכת הוכיחה את עצמה בניסויים נוספים והתמודדה עד כה בהצלחה עם נחילי 500 כטב"מים. הממשק של המערכת קל ונגיש, וניתן להכשיר מפעיל להשתמש במערכת לאחר כשעה של הכשרה. המערכת מאפשרת למפעילים להתמודד עם איומים בטווח של עד 2.5 ק"מ, והיא יכולה לפעול הן במצב סטטי והן תוך כדי תנועה.
5. בנובמבר 2024 התקבלה ידיעה כי צבא ארצות הברית פיתח והציב ארבע מערכות **נשק לייזר מסוג Locust** מתוצרת חברת BlueHalo במקומות מסווגים ברחבי העולם. משקל המערכת 1,540 ק"ג, מידותיה 2.1x2.1 מטרים והיא יכולה להינשא על ידי רכב סטרייקר 8x8. ללייזר שלה יש טווח של כ-800 מטרים והוא מיועד לשימוש כנגד כטב"מים בסוריה, ועכשיו גם באוקראינה.
6. **דוח עדכני** על ביצועי מערכת ה-Locust: הפעלת הלייזר בשדה ניסויים בניו מקסיקו בהספק של 26 קילוואט ויירוטים מוצלחים של 50 רחפנים במשקל עד

⁶ Directed Energy Maneuver Short-Range Air Defense

25 ק"ג. טווח היירוט המדויק לא מצוין, אך בדוח נאמר כי היירוטים בוצעו בטווח של מספר קילומטרים.

מערכות נשק לייזר ימי

1. ארצות הברית, המודאגת מהנוכחות הסינית במרחבי האוקיינוס השקט, שלחה ליפן ספינת קרב המצוידת במערכת נשק לייזר [HELIOS](#). מדובר במערכת לייזר של 60 קילואט, עם יכולת פגיעה בכטב"מים ובסירות קטנות. הלייזר מסוגל גם לעזור ראשי ביות אופטיים של טילי אויב וחיישנים אופטיים על ספינות וכלי טיס עוינים.
2. בשנת 2030 יושק דור המשחתות הבא של ארצות הברית, [שייקראו DDG\(X\)](#). אחד ההבדלים בין הדור הישן לדור החדש כולל תוספת של מערכת לייזר [רב עוצמה שתוצב על המשחתות](#). תוספת זה תגרור גם שדרוג של מערכות האנרגיה של המשחתות, אשר על פי התכנונים יהיו מסוגלות לתמוך לפחות בשני נשקי לייזר על כל ספינה. נוסף על הדור החדש, צבא ארצות הברית מצייד משחתות קיימות במערכות לייזר בקצב מואץ. פיתוחים של לייזרים רבי עוצמה נישאים על גבי מגוון פלטפורמות – יבשתיות, אוויריות וימיות – מבוצעים על ידי חברת [לוקהיד מרטין](#).

מצב הפיתוח במדינות אחרות

מצב הפיתוח של מערכות לייזר רב הספק במדינות אחרות מסוכם בטבלה הבאה:

מדינה	שם הנשק	הספק בקילוואט	הישג	הערות
קוריאה הדרומית	I-block	20 (טווח של שניים עד שלושה ק"מ)	התחלת ייצור המוני של גרסה ראשונה ודיווחים על הצלחות ביירוט כטב"מים	פיתוח גרסאות מתקדמות עד 100 קילוואט ויותר
יפן			פיתוח מערכות ליירוט כטב"מים וביצוע ניסויי שדה	תוכנית הביטחון של יפן לשנים 2023-2027 מתמקדת בפיתוח נשק לייזר רב עוצמה כנגד כטב"מים
בריטניה		50	מתוכנן שילוב בספינות עד 2027, ושילוב על גבי פלטפורמות שונות והפעלה מבצעית מלאה עד 2030	קיימת טענה על דיוק רב ביותר – כגיעה במטרת מטבע ממרחק קילומטר
		15	לייזר יבשתי נישא על כלי רכב משוריין	מטעמי ביטחון אין פרטים על מפרט וביצועים
אוסטרליה	Portable High Energy Laser Fractl		דיווח על יכולת להשמדת מטרות במרחקים של 500 עד 1,000 מטרים. בשני הדיווחים חסר סימוכין מצד הגוף המדווח	יחידות קלות משקל וניידות
האיחוד האירופי		15	מאמץ לפתח נשק לייזר בהספק עד 100 קילוואט עד 2030	אין פרטים על המערכת, מדובר בהישגים עתידיים
סין	Shen Nung 3000 Silent Hunter	10-30 (טווח ארבעה ק"מ)	דיווחים על פריסה באיראן של מערכת ה-Shen Nung 3000	זמן פעולה כ-200 שניות, עם יכולת לזיהוי כטב"מים במרחק חמישה ק"מ
רוסיה	Zadira		דיווחים לא מאומתים על הפעלת נשק לייזר להשמדת כטב"מים באוקראינה. מתוכננות מערכות לייזר להשמדת מטרות בחלל	אין ראיות להפעלה מבצעית

הודו	I-block	20 (טווח של שניים עד שלושה ק"מ)	פיתוח מערכות לייזר עד שני קילואט כנגד רחפנים וכטב"מים	פותח לייזר לא מבצעי בהספק של 100 קילואט
גרמניה			מתמקדים בפיתוח מערכות לייזר ימיות	אין פרטים על המערכת, צפי למבצעים בתוך חמש-שש שנים
צרפת	I-block	טווח של שלושה ק"מ	המערכת עברה בהצלחה ניסויי שדה	מיועדת לפגיעה בכטב"מים
טורקיה		טווח של 750 עד 1,500 מטרים	שימוש עיקרי כנגד כטב"מים	המערכת מצוידת באמצעי מעקב אחרי 100 מטרת בו-זמנית
אוקראינה	I-block	50 (טווח של שני ק"מ)	שימוש כנגד כטב"מים ורחפנים	דיווחים לא מאומתים על יירוטים של כטב"מים
ישראל		(100, טווח אפקטיבי עד כשבעה ק"מ)	המערכת נבדקה בהצלחה בשנת 2022 וצפויה להיות מבצעית בסוף שנת 2025	המערכת מיועדת כרגע בעיקר למטרות קצרות טווח, ומשלימה את מעטפת ההגנה של ישראל

קוראיה הדרומית

פיתוח מערכות לייזר בקוראיה הדרומית נמצא בשלבים מתקדמים, כפי שמפורט בקצרה להלן:

- החלו בייצור המוני של מערכת ה-I-BLOCK – מערכת לייזר ניח של 20 קילואט, בעלת יכולת לנטרל כטב"מים קטנים ורחפנים תוך 10-20 שניות, על ידי פגיעה בחלקים הפנימיים שלהם באמצעות לייזר שמחמם את המטרה העוינת לטמפרטורה גבוהה (700°C) עד כדי התכתה וגרימת כשל מכני. [לפי הפרסום הדרום-קוראני](#) מדובר בלייזר סיב המכונה Skylight ומיועד להגן על סיאול מפני איומים קצרי טווח כגון כטב"מים ורחפנים בעלות הפעלת לייזר מינימלית של 1.50 דולר. השקת מערכת הלייזר היא [בעלת חשיבות אסטרטגית למדינה](#), בייחוד לנוכח האיומים המתמשכים מקוראיה הצפונית.

- בניסוי שבוצע בטווח הפעולה של המערכת, שניים-שלושה ק"מ, שיעור ההצלחה [בהשמדת הכטב"מים היה 100%](#). חשוב להדגיש כי למרות שהמערכת יעילה בהגנה מפני איומים בטווח קרוב כמו כטב"מים ורחפנים, היא אינה מיועדת להגנה מפני טילים בליסטיים בין-יבשתיים או מפני נחיל של כטב"מים רבים. כמו כן, היעילות של המערכת פוחתת בתנאי מזג אוויר לא מתאימים, וזמני היירוט מתארכים כאשר מדובר בתקיפה של כטב"מים רבים.
- בהמשך מתכננים לשדרג את יכולות המערכת ל**גרסת ה-BLOCK II** וגרסאות מתקדמות יותר מבחינת טווח ועוצמה מעל 100 קילואט, עם פוטנציאל לשילוב בכלי טיס ושיט.

יפן

- בתוכנית הביטחון של יפן לשנים 2023-2027 מושם דגש רב על פיתוח נשק [לייזר רב עוצמה כאמצעי נגד כטב"מים](#). סביר להניח שאחת הסיבות לכך היא החשש של ממשלת יפן מתקיפה של הסינים באמצעות נחילי כטב"מים, עקב חילוקי דעות טריטוריאליים בין שתי המדינות. תעשיית הלייזר ביפן מפותחת ונרכש ניסיון רב ביישום סוגים שונים של לייזרים רבי עוצמה בתעשיית הרכב לחיתוך ולריתוך חלקים שונים, ועל כן סביר להניח שהיישום הצבאי לא ייתקל בקשיים מיוחדים.
- ראוי לציין כי כבר במארס 2023 הציגו חברות התעשייה הכבדה של מיצובישי וקוואסקי אבות טיפוס למערכות לייזר שמסוגלות ליירט כטב"מים ואמרו כי חלק מהמערכות מוכנות לשימוש מבצעי.

בריטניה

- בחודש אפריל 2024 פרסם שר ההגנה הבריטי תוכנית פיתוח של נשק הלייזר Dragonfire. התוכנית [תתקצב ב-350 מיליון ליש"ט עד אפריל 2027](#). על פי התכנון ישולבו מערכות ה-Dragonfire בספינות הצי המלכותי הבריטי בתחילת שנת 2027, וזאת במטרה להשיג יכולת הפעלה מלאה של המערכת על גבי פלטפורמות שונות עד שנת 2030. כמו כן נטען כי ביכולתה של קרן הלייזר העוצמתית לנטרל כטב"מים וטילים באמצעות פגיעה במטרה וחימומה עד כדי כשל מכני. העלות של ירי בודד תהיה כ-10 ליש"ט. נוסף על כך נטען כי המערכת תהיה [מדויקת עד כדי כך שתוכל לפגוע במטבע ממוחזק של קילומטר](#).
- עוד דווח כי בחודש דצמבר 2024 ביצע הצבא הבריטי ניסוי [בלייזר בהספק של 15 קילואט](#) בתחום האינפרה-אדום, שהורכב על כלי רכב משוריין מצויד בחיישנים ובמערכות עקיבה מתקדמות. בניסוי נבדקו בהצלחה יכולות הלייזר כנגד כטב"מים ורחפנים, כמוזגם [בתמונה](#) להלן.



אוסטרליה

- חברת סטארט-אפ הלייזר AIM Defence האוסטרלית פיתחה נשק לייזר חדשני ליירוט רחפנים בשם [Portable High Energy Laser Fractl](#), אשר לטענתה (ללא דיווח על ביצועים השוואתיים) נחשב לנשק הלייזר הנייד החזק ביותר כיום. הדוח האוסטרלי על ניסוי מבצעי מדבר על השמדת רחפן בגובה 500 מטרים, ללא פרטים נוספים. על פי הנתונים הטכניים המדווחים בצמצום מדובר כנראה בלייזר המבוסס על סיב אופטי. טענה נוספת ללא כל סימוכין היא כי מערכת לייזר זו נעזרת במערכות האופטיקה והמעקב המתקדמות ביותר בעולם, ובאמצעותן היא יכולה לפגוע במטרות הנעות במהירות של עד 100 קמ"ש ובמרחק של 1,000 מטרים באמצעות קרן לייזר [בממדים של מטבע](#) – דבר שפירושו המעשי הוא צפיפות אנרגיה רבה ליחידת שטח. המערכת מסוגלת להתכוון ולפגוע בצורה אוטומטית בחלקים שונים של כלי הטיס כמו המצלמה, המדחפים, המנוע, החייסטים או המסה המרכזית של הרחפן. המערכת גמישה לתפעול וניתנת לשילוב במערכות הגנה קיימות תוך יכולת נטרול חלקים שונים ברחפן בתוך שניות. משקל היחידה הוא פחות מ-50 ק"ג, ולכן היא ניידת ביותר ונוחה לשימוש בתרחישים תפעוליים שונים. חברת AIM אף טענה כי מערכת זו מהווה רק עשירית מהגודל והעלות של מערכות לייזר אחרות הזמינות כיום בשוק. למערכת יתרונות נוספים כמו היכולת לפריסה בקלות והשימוש באנרגיה

מסוללה או ממקור חשמל נייח – דבר שמקנה לה גמישות תפעולית ומקנה לה יעילות בהגנה מפני רחפנים.

האיחוד האירופי

מאמצי הפיתוח של הקרן ההגנה האירופית הם המשך פיתוח מערכות לייזר טקטיות TALOS (Tactical Advanced Laser Optical Systems) [בהספק של 100 קילואט בשנת 2030](#). המאמץ של מדינות האיחוד האירופי כולל פיתוחי יכולות טכנולוגיות שיאפשרו ייצור עצמאי של מקורות לייזר מסוגים שונים בתחום האינפרה-אדום למגוון יישומים, שחלקם אינם מפורטים.

סין

- בסין קיימת תשתית מפותחת של ייצור לייזר מסוגים שונים ורכיביהם. מסיבה זו סין מתקדמת מאוד בפיתוח מגוון רחב של לייזרים, כולל מערכות לייזר מרובות הספק שניתנות להפעלה על גבי פלטפורמות יבשתיות או ימיות. המטרה האסטרטגית של הסינים היא השמדה או סנוור לוויינים בחלל באמצעות [לייזרים רבי עוצמה שמוצבים על צוללות](#).
- הסינים פיתחו מערכת לייזר כנגד רחפנים וכתב"מים הידועה כ-silent hunter. מערכת זו סופקה ככל הנראה לערב הסעודית ולאיראן. חלק מהמומחים טוענים כי מערכת הלייזר שסופקה לאיראן חדשה יותר – [Shen Nung 3000](#). למערכת זו זמן פעולה רציף של 200 שניות, יכולות [זיהוי כתב"מים למרחק של עד חמישה ק"מ](#) עם הספקים של 10-20 קילואט, יכולת פגיעה וסנוור חיישני כתב"ם ממרחק של שלושה ק"מ ולפגיעה פיזית במטרות שנמצאות במרחק של עד קילומטר וחצי.

רוסיה

ברוסיה קיימת תשתית לייזר מפותחת, תעשייתית ומחקרית, בדומה לארצות הברית ולסין. מטרות פיתוח נשק הלייזר ברוסיה הן אסטרטגיות – סנוור או [השמדת לוויינים בחלל](#), ומטרות טקטיות כגון השמדת כתב"מים ורחפנים.

• מערכות נשק לייזר מוטסות

הרוסים מתכננים להתקין מערכת לייזר על גבי מטוס קרב היפרסוני [MiG-41](#), שתשמש להשמדת טילי שיוט היפרסוניים ולנטרול לוויינים בחלל. מדובר בפרויקט עם אתגרים טכנולוגיים רבים שכרגע עודנו רחוק ממימוש.

• מערכות נשק לייזר יבשתי יביל

הרוסים דיווחו על פיתוח והפעלה מבצעית של לייזר רב הספק בשם Zadira, אשר נישא ומופעל על גבי פלטפורמה יבשתית, כנגד כטב"מים באוקראינה. הדיווח הרוסי – שאינו מלווה בתיעוד או בהוכחה להפעלה והצלחה מבצעית או באישור ממקורות ביון אמריקאיים – טוען לפגיעה הרסנית בכטב"ם ממרחק של חמישה ק"מ במשך חמש שניות, שזה זמן שהיית קרן הלייזר על המטרה. באותה הזדמנות מזכירים הרוסים כי ברשותם לייזר רב הספק בשם Peresvet, שביכולתו לסנוור ולגרום להרס תרמי של סנסורים של לוויינים עד מרחק של 1,500 ק"מ. בכל הדיווחים הרוסיים לא מציינים את סוג הלייזר שעליו הם מדווחים, אך מגדירים אותו כ"נשק סודי".

הודו

הודו משקיעה מאמצים רבים בפיתוח [מערכות לייזר משלה](#), ולשם כך נרתמו למשימה חברות פרטיות רבות וארגונים ממשלתיים. המאמץ הניב תוצאות, וכבר ב-2001 הופעל לייזר רב הספק של 100 קילוואט, פרי פיתוח תעשיית הלייזר ההודית, על מטרת מתכת. ההודים פיתחו גם מערכת בעלת הספקים נמוכים יותר של שני קילוואט, כנגד כטב"מים ורחפנים. דיווחים נוספים מעידים על כך שמערכות לייזר מסווגות, כמו KALI⁷ ו-DURGA⁸ כבר נפרסו בצבא ההודי.

גרמניה

התאגידים ריינמטל [MBDA-I \(Rheinmetall\)](#) הודיעו בחודש ספטמבר 2024 על שיתוף הפעולה ביניהם בפיתוח מערכות לייזר ימי שתהיה [מבצעית תוך חמש עד שש שנים](#), וזאת במטרה להחליף את טילי ההגנה האווירית היקרים המוצבים כיום על ספינות, להגנה מפני איומים כמו טילים וכטב"מים. יכולות מערכת הלייזר כבר נוסו בהצלחה, והיא השלימה בהצלחה [יותר מ-100 ניסויי יירוט](#) שכללו הדמיות של תרחישים שונים בשדה הקרב, שבהם נבדקה יכולתה של המערכת להתמודד עם מגוון איומים מהירים ומורכבים.

צרפת

מערכת נשק לייזר שפותחה בצרפת מוכוונת בעיקר כנגד כטב"מים ומטרתה לאבטח אתרים רגישים, בסיסים צבאיים, תשתיות חיוניות ומקומות ציבוריים החשופים למתקפות טרור. מערכות אלו מבוססות על הידע הרב והניסיון של תעשיית הלייזר והאלקטרואופטיקה בצרפת. [HELMA-P](#) היא מערכת נשק לייזר חדשה המופעלת ביעילות באמצעות מקורות אנרגיה מרשת החשמל או מסוללות, היא בעלת הספק של מספר קילוואטים (הערך המדויק לא נמסר),

⁷ Kilo Ampere Linear Injector

⁸ Directionally Unrestricted Ray-Gun Array

טווח פגיעה וגרימת נזק עד שלושה ק"מ, עם יכולת לפעול במרחב זוויתי של $\pm 180^\circ$ ובתחום טמפרטורות נרחב. מערכת לייזר זו מצוידת באמצעי חישה כגון LIDAR,⁹ לשם זיהוי מהיר ויעיל של איומים והשמדתם.

טורקיה

בטורקיה מתבצע מאמץ נרחב לפיתוח לייזר רב הספק כחלק ממעטפת ההגנה, שכוללת גם מערכות טילים בשם 'כיפת פלדה'. לאחרונה דווח על התקדמות משמעותית של טורקיה בפיתוח מערכות נשק לייזר. [למערכת YESS של חברת ALKA](#) הספק של 2.5-10 קילוואט וטווח של 750-1,500 מטרים, עם יכולות העסקת 100 מטרת בו-זמנית. המערכת משמשת להגנה על מתקנים צבאיים מפני נחילי כטב"מים מתאבדים ובנויה לפעולה ביום ובלילה.

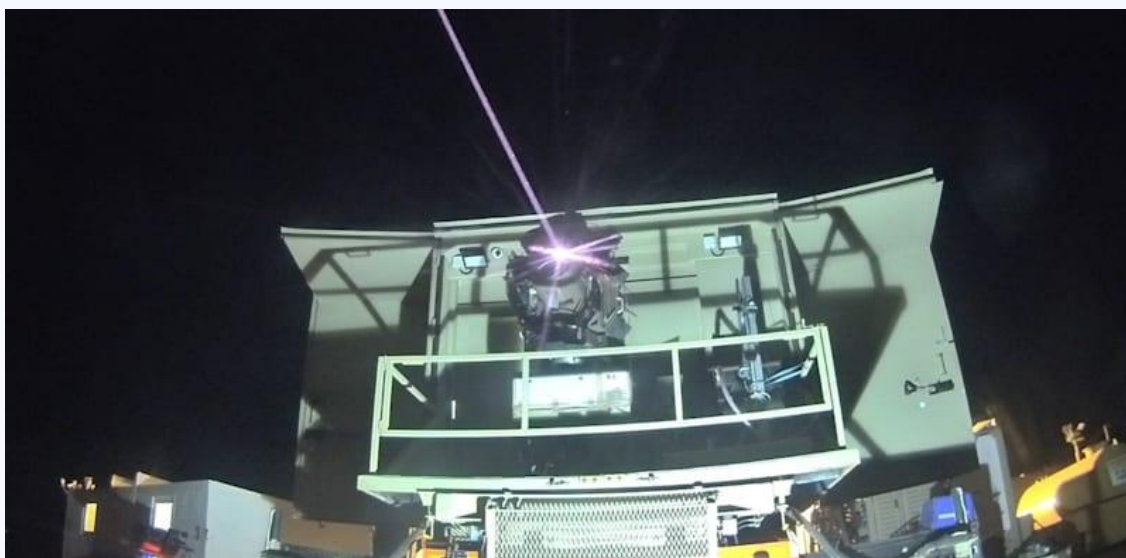
אוקראינה

צבא אוקראינה החל לאחרונה בהפעלה מבצעית של [מערכות לייזר כנגד כטב"מים](#) המופעלים בידי הצבא הרוסי. בדיווח לא מאומת נמסר על יירוט כטב"מים מדגם 'שהאד' בגובה שני ק"מ על ידי מערכת לייזר Trizub עם הספק של 50 קילוואט. לא נמסרו פרטים טכניים, אך ההערכה היא שמדובר במערכת הדומה למערכת הבריטית Dragonfire.

מצב הפיתוח בישראל

[מערכת 'מגן אור' של רפאל](#) היא מערכת הגנה אקטיבית מבוססת לייזר בעוצמה של 100 קילוואט, המיועדת להגנה מפני רקטות, טילים, פצצות מרגמה בטווחים קצרים, כלי טיס מאוישים ובלתי מאוישים, לרבות גלשני אוויר עד טווח של כשבעה ק"מ. מדובר במערכת הפועלת במגוון טכנולוגיות פורצות דרך, כאשר כיוון הפיתוח המרכזי ויעד ההספק המבוקש מתאימים למגמות הפיתוח בעולם, ובייחוד בארצות הברית. יתרון מרכזי של המערכת הוא יכולתה לפעול ולבצע ירי בלתי מתכלה כתלות אך ורק במקור אנרגיה זמין. במערכת 'מגן אור' משולבים פיתוחים ייחודיים שמאפשרים ריכוז הספק מרבי ליחידת שטח על המטרה. זאת ועוד, עלויות המערכת נמוכות יחסית ועלות כל יירוט היא רק [כשני דולר, לעומת מערכת כיפת ברזל שעלותה 40-50 אלף דולר](#) לכל טיל או יירוט. חיסרון של המערכת – בדומה למערכות לייזר רב הספק אחרות – הוא שיעילותה נפגעת בתנאי ראות ומזג אוויר כמו עננות, ערפל גשם וכדומה. כמו כן, המערכת מיועדת במפרט הנוכחי בעיקר למטרות קצרות טווח, ולכן ככל הנראה אינה יכולה להחליף באופן מלא את מערכת כיפת ברזל לחלוטין. המערכת [\(ראו תמונה\)](#) נבדקה בהצלחה בשנת 2022 וצפויה להיות מבצעית בסוף שנת 2025.

⁹ light detection and ranging



מגן אור / צילום: דוברות משרד הביטחון

[אתגר חשוב בפיתוח המערכת](#) הוא הפחתת משקל ונפח תוך שמירה על צריכת הספק ויעילות ברמה גבוהה. חברת אלביט, בשיתוף פעולה עם רפאל, עושה צעדים ממשיים בפיתוח מערכת נשק מבוססת לייזר עבור כלי טיס, שיכולה להיות אפקטיבית בתנאים של שהייה מעל תנאי עננות ואבק, בשונה ממערכת מגן אור יבשתית. השקת מערכת זו צפויה בשלבים מאוחרים יותר.

סיכום כללי ומסקנות: מגמות בעולם ובישראל

מגמות בעולם

מגמות פיתוח נשק לייזר בעולם כפי שעולות מניתוח הפעילות העולמית הן כדלקמן:

1. כטב"מים ורחפנים מסוגים שונים הפכו לאיום רציני על כוחות היבשה ועל תשתיות ומתקנים אסטרטגיים, בגלל תכונותיהם הייחודיות ועלות נמוכה של ייצור ותפעול.
2. האיום האסטרטגי הנגזר מהיכולות של הכטב"מים והרחפנים הוא הסיבה לכך שרוב המדינות מתמקדות בתקופה הנוכחית בפיתוח מערכות לייזר רב הספק כנגדם.
3. האתגר ביירוט כטב"מים ורחפנים הוא כפול: האתגר העיקרי הוא בגילוי וזיהוי המטרה, ולאחר מכן ביצוע היירוט.

4. למרות שכטב"מים ורחפנים מהווים איום טקטי ואסטרטגי בעימותים הנוכחיים, לא בטוח שהם יהוו איום עתידי. מכאן שפיתוח נשק לייזר כנגד כטב"מים ורחפנים הוא פתרון חלקי למלחמות העבר, בפרט כשגם נשק קינטי הוא פתרון יעיל.
5. מבט עתידי נמצא בפיתוחים של מעצמות כמו ארצות הברית, רוסיה וסין, שמתמקדות גם בלייזר רב הספק עם יכולות פגיעה ושיתוק לוויינים מגביהי טוס או טילי שיוט היפרסוניים.
6. לנשק הלייזר במפרט הנוכחי יש מגבלות הספק ומרחק פגיעה, שנובעות מתנאי סביבה, מזג אוויר, בליעות באטמוספירה ועיוותים אופטיים של קרן הלייזר במעבר דרך האטמוספירה אל המטרה.
7. נשק הלייזר שמפותח במדינות שונות מיועד להיות מורכב על פלטפורמות יבשתיות או ימיות, בשאיפה להרכבה במערכות מוטסות כדי להתגבר על הפסדים שנובעים מתוון אטמוספרי. השאיפה היא להגיע למערכת בעלת הספק לייזר של 100 קילואט שמשקלה הכולל יהיה 500 ק"ג, לעומת משקל של טונות אחדות כיום עבור מערכת זהה.
8. מרבית המדינות אינן מספקות פרטים טכניים על ביצועים או על סוג הלייזר שהן מפתחות. הפרטים הטכניים הידועים על נשק לייזר רב עוצמה שמפותח בארצות הברית מלמדים כי מדובר במערכות לייזר מרובות הספק, קרי, לייזר מצב מוצק (Solid state lasers) או לייזר סיב (Fiber optic lasers), המורכבים על מגוון פלטפורמות.
9. הצפי הוא להגיע להספקים של עד 400 קילואט או 500-600 קילואט בלייזר מצב מוצק ובלייזר סיב, בהתאמה. מדובר בבעיה הנדסית בלבד, שניתנת לפתרון תוך שמירה על משקל ונפח שיאפשרו יבילות אווירית.

מגמות בישראל

1. מדינת ישראל נמצאת בחזית פיתוח מערכות נשק לייזר מתקדמות, עם פיתוחים מערכתיים ייחודיים שמשתלבים במגמות הפיתוח בעולם ומאפשרים להביא את קרן הלייזר העוצמתית אל המטרה בדיוק מרבי, תוך גרימת נזק למטרות עוינות.
2. על מדינת ישראל לשאוף לפיתוחים בנושא במסגרת שיתופי פעולה טכנולוגיים עם מדינות ידידותיות ולהמשך שיתוף הפעולה הפורה עם ארצות הברית, על מנת להבטיח ביצועי מערכת מיטביים בשדה הקרב העתידי.

3. על מדינת ישראל להמשיך לשדרג את מערכת נשק הלייזר להספקים גבוהים ולפלטפורמות מוטסות כדי לייצר מגוון רחב של איומים, כולל אלה של טילים בליסטיים ארוכי טווח או טילי שיוט היפרסוניים, וזאת כחלק בלתי נפרד ממעטפת ההגנה של מדינת ישראל מפני איום רקטי או איום טילי.
4. יש צורך בשדרוג מעטפת ההגנה של מדינת ישראל מפני איומים רקטיים או בליסטיים באמצעות מערכות לייזר נוספות, שייתנו פתרון למגבלות סביבתיות או למגבלות מזג אוויר.
5. יש צורך בשילוב מערכות לייזר רב הספק בכוחות היבשה (חי"ר, שריון או צוות קרב חטיבתי) כחלק ממערך הלחימה וההגנה ברמה הטקטית.
6. על מדינת ישראל לפתח סוגים שונים של לייזר רב עוצמה הנישאים על גבי פלטפורמות יבשתיות, ימיות או מוטסות, כחלק בלתי נפרד ממעטפת ההגנה האווירית של המדינה ו"יכולות ההגנה האווירית הרב-שכבתית, בדגש על **ההגנה מול האיום ממעגל שלישי**",¹⁰ כדי למצוא מענה למגוון רחב של איומים, כולל איומי המעגל השלישי ושלוחיו.

¹⁰ הוועדה לבחינת תקציב מערכת הביטחון ובניין הכוח בראשות תא"ל (מיל.) פרופסור יעקב נגל, 2024, עמ' 7.