

# העתיד כבר כאן לייזרים בשדה הקרב

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

רס"ן ברוך, רמ"ד לייזר רב-עוצמה



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

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

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

## הלייזר בקדמת הבמה

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

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

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

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

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

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

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

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



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



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

## לייזר - יתרונות וחסרונות הטכנולוגיה

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

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

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

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



מערכת הלייזר החדשה לירוס בלוני נפץ ותבערה

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

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

**אתגרים ומענים**

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

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

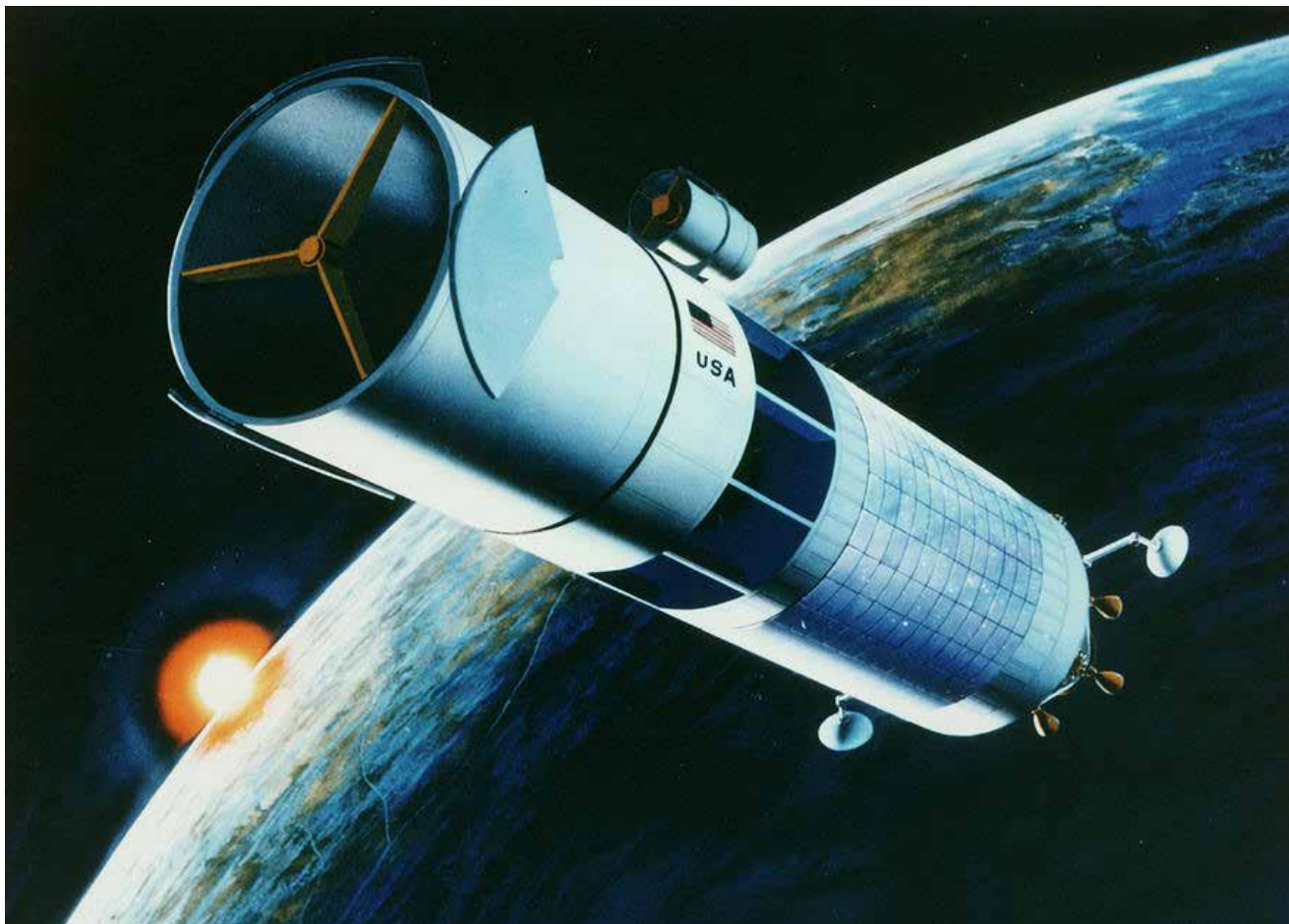
**שמירת טיב הקרן** – בעבר התקשו לרכז את אנרגיית הלייזר מכיוון שעוצמת לייזר גבוהה הגבירה את התבדרות הקרן. היום המטרה היא לשמור על טיב הקרן גם בעוצמת לייזר גבוהה.

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

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

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

מפאת רוב צבאות העולם בחרו להשתמש בטכנולוגיית לייזר סיב בזכות יתרונותיה והפוטנציאל הרב שראו בה. מפאת בשיתוף חברת רפאל לקחו את הידע שצברו בפרויקט "נאוטילוס" והמשיכו בשקט בפיתוח מערכת יירוט מבוססת לייזר שתאפשר יירוט מהיר וזול של איומי הרקטות על מדינת ישראל. אכן הושגו הישגים מערכתיים משמעותיים שאפשרו לרפאל לשלב לר"ע תעשייתי בדגם ראשוני שפיתחה, ואף בוצעו ניסויי יירוט מוצלחים בשטח ישראל. לאחר מלחמת לבנון השנייה, בצל איום הרקטות ההולך ומתממש, הוקמה ועדת נגל לבחינת מערכות לייזר רקטות.<sup>4</sup> הוועדה דנה בטכנולוגיות יירוט רבות, וביניהן גם מערכות לר"ע.



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

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

### לייזר צבאי בעולם

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

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

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

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

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



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

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

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

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

### סיכום

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

ההערות למאמר זה מתפרסמות בסוף הגיליון.

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

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

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

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

