

מערכות הדמאה תרמיות

רס"נ ד"ר זהר

„ומדיין ועמלק וכל בני קדם נופלים בעמק כארבה לרב... ויבא גדעון ומאה איש אשר איתו בקצה המחנה ראש האשמורת התיכונה... ויחיוקו ביד שמאלם בלפידים וביד ימינם בשופרות... וינס המחנה“ שופטים ז', 12, 19, 20, 22.

כבר בימי קדם נודע היתרון הגדול של לוחמת לילה, המעניקה למשתמש בה בתבונה את היוזמה, ההפתעה והיכולת ללחום ולנצח למרות נחיתות כמותית. אמצעי ראיית הלילה בתקופות השונות ניצלו את הטכנולוגיה הקיימת באותה תקופה. תחילה באו לידי ביטוי אמצעי הארה שונים בתחום האור הנראה ולאחר מכן בתחום האינפרא-אדום הקרוב (א"א). השימוש באמצעי תאורה א"א שאינם מת-גלים על-ידי עין אדם בלתי מזוינת, מנע את גילוי הכוח המשתמש בהם. אולם עם הזמן פותחו אמצעים פשוטים ויעילים שאיפשרו גילוי קרינת א"א ובכך אבד היתרון המשמעותי שהיה לאמצעי ראיית לילה אלה.

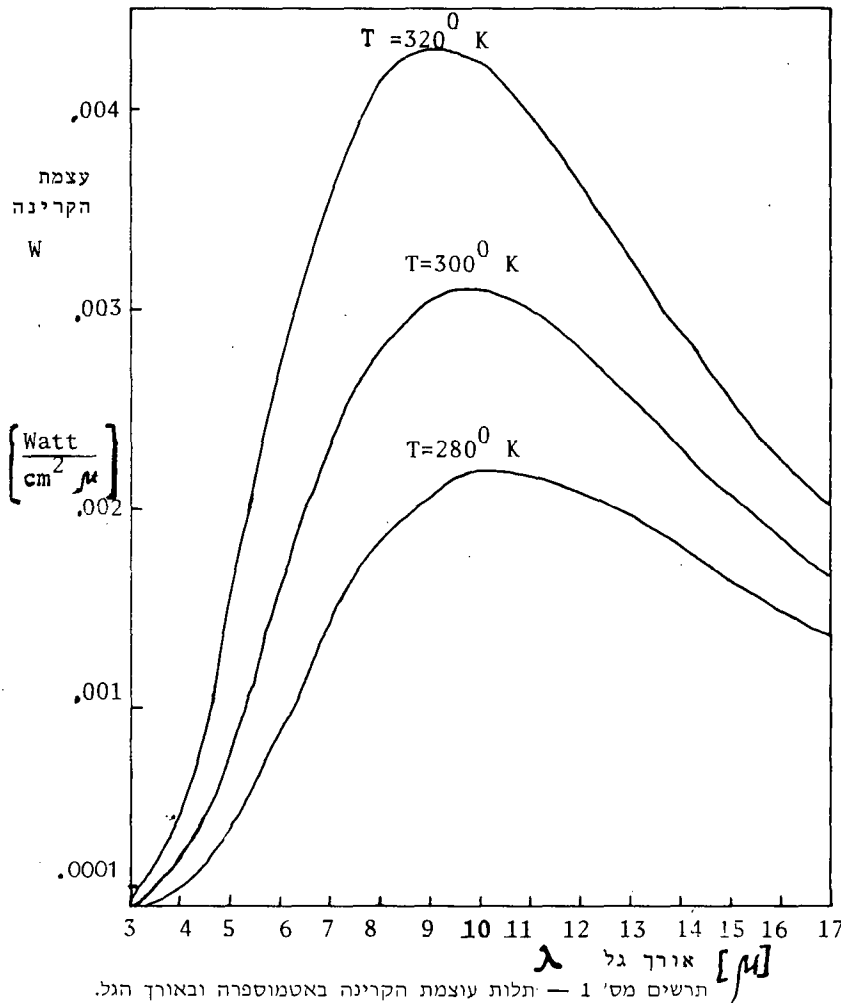
היכולת לגלות כוח המשתמש באמצעי ראיית לילה המתבססים על קרינה אקטי-בית — גם אם היא לא ניתנת לגילוי על-ידי עין אדם — הביאה לעיון מחדש בתפיסת לוחמת הלילה. התעורר הצורך באמצעים שיאפשרו לחימה בלילה ללא תאורת עזר. הפתרון הטכנולוגי שענה על דרישה מב-צעית זו ניתן על-ידי שפופרות הגברת אור. שפופרות אלו מנצלות את האור המוחזר מגופים בנוף, כדי ליצור תמונה של גוף זה. יצירת תמונה שעוצמתה מס-פקת, מתאפשרת על-ידי הגברת האור המגיע לשפופרת, והצגתו על גבי מסך זרחני. יתרון הגדול מתבטא באפשרות ללחמת לילה ללא גילוי המשתמש בהן, אולם יש להן מספר מגבלות: א. טווחי הגילוי והזיהוי תלויים הרבה בעוצמת התאורה הטבעית הנובעת מהירח והכוכבים,

שהיא חלשה יחסית. בלילות השוכים מת-קצרים הטווחים באופן משמעותי ביותר. ב. תצפית ארוכת טווח בלילה דורשת שיי-מוש בעדשות גדולות מאוד לאיסוף האור המוחזר. קוטר העדשות מוגבל ל-30 ס"מ בערך, ולכן טווחי התצפית מוגבלים לשניים עד שלושה ק"מ. ג. פנסים ותאור-רות שונות בשטח, „מסנוורים“ את המע-רכת, מאחר שהאור נאסף ללא אבחנה במקורו, וקיים חסם עליון לעוצמת התאור-רה הניתנת להגברה. בעוצמות אור גבוהות יותר, „נסגר“ המכשיר אוטומטית, כדי למנוע נזק לשפופרת.

לעומת מערכות הגברת אור המבוססות על גילוי האור המוחזר מהשטח הנצפה, מתבססות מערכות שפותחו לאחרונה על קרינה טבעית הנפלטת מגופים חמים. מערכות אלו נקראות מערכות הדמאה תרמית (FLIR) והן מתבססות על טכ-נולוגיה חדשה, מן המתקדמות בעולם.

* FLIR — Forward Looking Infra Red.

כל גוף בטבע הנמצא בטמפרטורה מעל האפס המוחלט (-273°C) פולט קרינה אלקטרומגנטית. עוצמת הקרינה גדלה עם עליית הטמפרטורה, ואילו אורך הגל בו עוצמת הקרינה מקסימלית, קטן עם עליית הטמפרטורה כמודגם בתרשים מס' 1. גוי-פים על-פני כדור הארץ הנמצאים בטמפ-רטורה הנעה סביב 20°C (293°K) פולטים קרינה בתחום אורכי גל של 3—30 מיקרון. קרינה זו נקראת קרינה תרמית. תחום אורכי הגל מסווג בתחום האינפרא-אדום הבינוני (3—6 מיקרון) והרחוק (6—30 מיקרון). עוצמת הקרינה המקסימלית של גופים בטמפרטורה זו היא באורך גל של 10 מיקרון בערך. מאחר שלגופים שונים טמפרטורות שונות, ולו במעט, הרי עוצ-מת הקרינה התרמית של גופים אלה אינה זהה, וכך גם אורך הגל בו עוצמת הקרינה מקסימלית. ההדמאה התרמית עושה שיי-מוש בעובדה הראשונה, ומתבססת על מדידת עוצמת הקרינה לצורך הבחנה בין גופים שונים. הקרינה התרמית הנפל-



תרשים מס' 1 — תלות עוצמת הקרינה באטמוספירה ובאורך הגל.

טבלה מס' 1 — סדר האירועים בהדמאה תרמית

| | | | | |
|---|---|--|--|---|
| המפעיל מנצל את נסיונו ואימונו כדי לגלות ולזהות את המטרה בצורה הטובה ביותר האפשרית בהתחשב בתנאים בהם הוא פועל. | מערכת ההדמאה מנצלת את תכונותיה להבחנה בנקודות חמות, וכך מתקבלת תמונה תרמית של הנוף. | המפעיל מאתר את המטרה ע"י כיוון שדה הראיה (צר יחסית) של המערכת אל המטרה. האיתור מתבצע לאחר היפוש וסריקת השטח הנצפה. | האטמוספירה בין המטרה ובין מערכת ההדמאה מפריעה למעבר הקרינה מהמטרה אל המערכת. | קיים הפרש טמפרטורות בין המטרה בה מעוניינים ובין הרקע. הפרש זה נובע מחילוף חום שונה עם הסביבה, חימום עצמי, כושר פליטת חום שונה וכד'. |
|---|---|--|--|---|

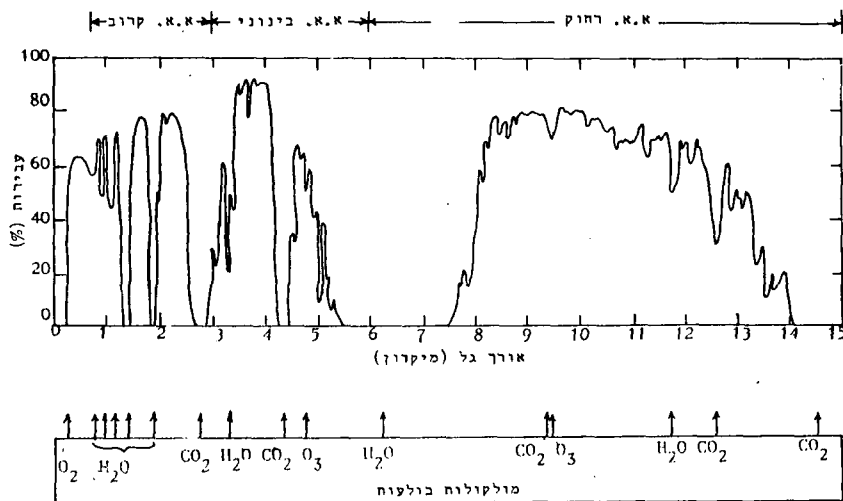
חייב הוא עצמו להיות בטמפרטורה נמוכה ככל האפשר כדי למנוע רעשים פנימיים. לכן הוא מקורר על-ידי יחידת קירור לטמפרטורה נמוכה מ- 150°C . כדי שיתאפשר קירור כנדרש, חייבים להכניס את הגלאי לתוך כלי מיוחד ממנו מריקים את האויר, וכן נעשים טיפולים מיוחדים כדי שמעבר החום מהסביבה אל הגלאי המקורר יהיה מינימלי. כלי זה מכונה דיואר (Dewar). האותות החשמליים הנוצרים בגלאי מועברים החוצה באמצעות מוליכים מתכתיים הנטועים בגוף הדיואר. הקירור עצמו מתבצע בדרך כלל על-ידי הזרמת גז או נוזל קרים במיוחד, הכולעים את החום מהגלאי ופולטים אותו לאטמוספירה. האות החשמלי המופק מהגלאי על-ידי הקרינה התרמית מועבר למערכת עיבוד נתונים. תפקידה של מערכת אלקטרונית זו הוא להגביר את האותות החשמליים, לעבדם ולהעבירם לצג הטלביזיוני.

זו מאפשרת תצפית בשדה ראייה רחב ובהגדלה קטנה, ומעבר לשדה ראייה צר והגדלה גדולה לצורך כיוון וירי. העין אינה רגישה לקרינה בתחום התרמי ולכן יש למקד את הקרינה שנוצרה במערכת האופטית על מערכת גלאים ש"תחוש" בקרינה ותאפשר עיבודה והעברתה לתחום האור הנראה. הגלאים המ"קובלים הם חצאי מוליכים המגיבים ביציגות זרם או מתח חשמלי כתוצאה מפגיעה של קרינה תרמית. על הגלאי להיות רגיש לתחום רחב ככל האפשר של אורכי גל ולהפוך לאות חשמלי בכל התחום. הגלאים רגישים לתחום צר יחסית של אורכי גל, ולכל "חלון" אטמוספרי קיימים גלאים מתאימים. הגלאי הנפוץ לתחום 3-5 מיקרון הוא אינדיום אנטימוניד (InSb) ולתחום 8-14 מיקרון הוא MCT.

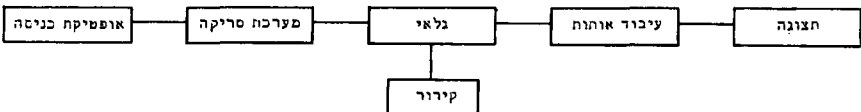
היות שהגלאי מגיב על קרינה תרמית,

ת עוברת באטמוספירה עד הגעתה למערכת הקולטת. האטמוספירה אינה מתייחסת באופן שווה לקרינה באורכי הגל השונים. למעשה נחסמים חלקים נרחבים של הקרינה התרמית על-ידי בליעה (בעיקר מולקולות מים ו- CO_2) כמודגם בתרשים מס' 2. בתרשים זה מבחינים בשני תחומים בהם עבירות הקרינה התרמית באטמוספירה טובה: 3-5 מיקרון ו-8-14 מיקרון. לאור זאת פועלות מערכות הדמאה תרמית בשני "חלונות" אטמוספריים אלו. סדר האירועים בהדמאה תרמית מוצג בטבלה מס' 1.

עקרון הפעולה של מערכת הדמאה תרמית מבוסס על מיפוי הנוף באמצעות גלאים רגישים לקרינה התרמית. אלה הם מראות הסובבות במהירות גבוהה. הגלאים ממירים את הקרינה התרמית לאותות חשמליים, במתכונת אות טלביזיוני. אותות אלו מוגברים, מעובדים ומוצגים על-גבי מסך טלביזיוני (צג). מבנה סכמטי של מערכת הדמאה תרמית בתרשים מס' 3. המערכת האופטית אוספת את הקרינה התרמית ומטילה אותה על-פני הגלאים. חוקי האופטיקה הרגילים מתקיימים בתחום התרמי באותה מידה כמו בתחום הנראה. כך ניתן לקבל תמונה תרמית של גוף על-ידי עדשות כמו קבלת תמונות רגילות במכשירים אופטיים. העדשות עשויות מחומרים מיוחדים כיוון שזכוכית רגילה אינה מעבירה קרינה בתחום זה. החומרים המשמשים בעדשות במערכות תרמיות הם גרמניום, סיליקון ועוד. המערכת האופטית קובעת את גודל שדה הראיה ואת ההגדלה. קיימת אפשרות לשנות את שדה הראיה על-ידי הכנסת עדשות נוספות בתוך מערכת העדשות הראשית. פעולה



תרשים מס' 2 — עבירות קרינה באטמוספירה באורכי גל שונים.



תרשים מס' 3 — מבנה סכמטי של מערכת הדמאה תרמית.

רונה של הסריקה המקבילה הוא בכך שאין צורך בסריקה במהירות גבוהה. חסרונה הוא בכך שאיכות התמונה המתקבלת מושפעת מהבדלים בתכונות תאי הגילוי. הסריקה הטורית מאפשרת להגיע לרגישות גבוהה יותר תוך שימוש באותו מספר תאי גילוי, והיא אינה מושפעת מהבדל בתכונות של תאי הגילוי. לעומת זאת, נדרשת כאן סריקה במהירות גבוהה. מערכות הדמאה תרמית עושות שימוש בשתי שיטות הסריקה בהתאם ליכולת ולביצועים הנדרשים. ביצועי מערכות הדמאה תרמית משתנים בהתאם לרכיבים המרכיבים את המערכת. קיימים שלושה סוגים של מערכות הדמאה תרמית: מערכות הנישאות ביד ומופעלות על-ידי חייל בודד, מערכות תצפית שניתן להתאימן לטנק, טילים נ"ט וכו' ומערכות המשמשות לתצפית ארוכת טווח, קרקעית ואוירית (ראה טבלה מס' 2).

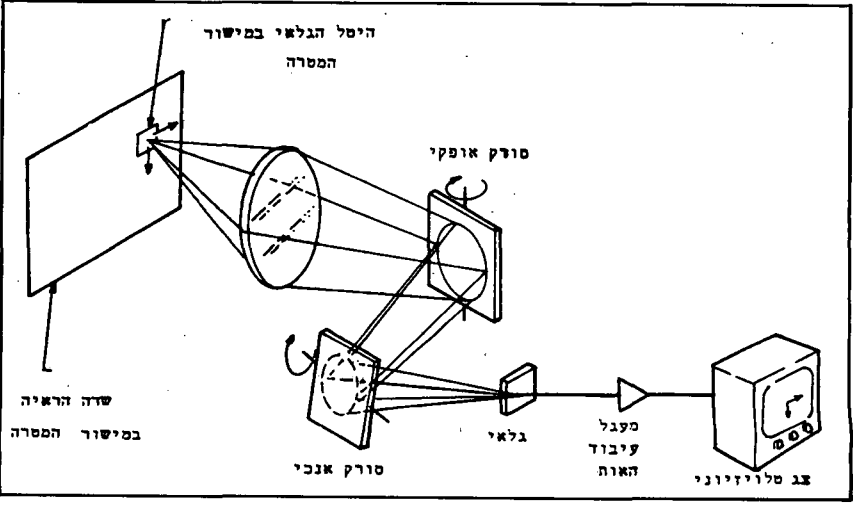
לאור העובדה שהתמונה במערכת הדמאה תרמית נוצרת על-ידי קליטת הפליטה התרמית של הגופים, מתבטלים כאן החסרונות העיקריים שיש במערכות הגברת אור: טווחי הגילוי והזיהוי אינם תלויים ברמת התאורה; אין צורך בעדשות ענק לקבלת טווחי תצפית ארוכים, פנסים ותאורות אינם מסנוורים את המערכת. יתרונות אחרים של מערכות הדמאה תרמית הם: כושר חדירה דרך אבק ועשן ויכולת לגלות גופים מוסווים; אפשרות לחבר מספר צגים טלביזיוניים וכך לאפשר לכמה אנשים להסתכל בו זמנית. חסרונם העיקרי הוא המחיר הגבוה והתחזוקה המסובכת. כמו-כן יש לציין כי התמונה המתקבלת אינה דומה בכל לתמונה טבעית אליה רגילה עין האדם, ויש צורך בהסתגלות מסוימת.

השימוש העיקרי במערכות הדמאה תרמית הוא בכוחות היבשה והאוויר. להלן שלוש מערכות שפותחו עבור כוחות היבשה: א. מערכת קלת משקל כתצפית לחייל הבודד וכשילוב עם כוונת, "דרגון". למערכת זו (AN/PAS-7) טווח אבחנה של ק"מ אחד בלבד. ב. כוונת לטנקים, טילים נ"ט וכו'. הכוונת לטנקים (AN/VSG-2) זוודה בפריטלסקופ התותחן והכוונת לטילים, "טאו" (AN/TAS-4) הותקנה על כוונת היום. מערכות אלה מאפשרות איתור וגילוי מטרות בטווח חמישה ק"מ ואבחנה בטווח שלושה ק"מ. היתרון הגדול של מער-

נוצרת תמונה אופטית מתמונה תרמית כיוון שהזות הגלאי הקשור למערכת הקירור והאלקטרוניקה היא פעולה מסובכת, מבצעים פעולה הפוכה: מגיעים את תמונת הנוף על-פני הגלאי הסטטי. הנעת התמונה מתבצעת באמצעות מערכת סריקה המורכבת ממראות נעות. במקרה של גלאי בודד, יש צורך לבצע סריקה בשני ממדים. הסריקה מתבצעת על-ידי שתי מראות מסתובבות הסורקות את שדה הראיה אחת במישור האנכי והשנייה במישור האופקי — ומשליכות את הקרינה התרמית על-פני הגלאי (ראה תרשים מס' 4). שיפור איכות התמונה המתקבלת והקטנת קצב סיבוב המראה הסורקת אופקית, מתבצעים על-ידי תוספת תאי גילוי בשורה. צורת סריקה זו נקראת סריקה טורית. כאשר גלאי מורכב מתאי גילוי המסודרים בטור ומכסה מימד אחד של שדה הראיה, יש צורך בסריקה בכיוון אחד בלבד. צורת סריקה זו נקראת סריקה מקבילה. צורות הסריקה השונות מתוארות בתרשימים מס' 5.

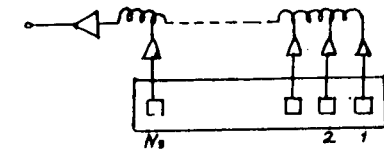
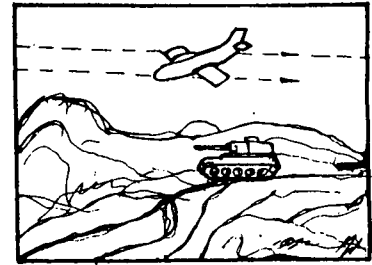
בסריקה מקבילה סורק כל תא גילוי שורה אחת בלבד. הוא קשור למגבר משלו ופועל ללא קשר עם שאר תאי הגילוי. בסריקה טורית, לעומת זאת, סורק כל תא גילוי את כל שדה הראיה. במקרה זה נופלת קרינה מכל יחידת שטח על כל אחד מתאי הגילוי לפי הסדר ומערכת אלקטרונית מסכמת את כל האותות. ית-

כדי להבין את אופן יצירת התמונה התרמית, נערוך השוואה לאופן יצירת התמונה בצילום רגיל. כאשר מצלמים שני גופים, האחד בהיר והשני כהה, מחזיר הגוף הבהיר קרינה רבה יותר מאשר הגוף הכהה. העדשה מרכזת את הקרינה על סרט הצילום. למקום המתאים לגוף הבהיר על הסרט תגיע קרינה רבה יותר מאשר למקום המתאים לגוף הכהה. סרט הצילום משחיר בהתאם לכמות הקרינה הפוגעת בו ולכן במקום המתאים לגוף הבהיר, נקבל השחרה רבה יותר של הסרט מאשר במקום המתאים לגוף הכהה. באופן זה מתקבל הנטיב. תופעה דומה מתרחשת גם במערכות הדמאה תרמית, אלא שבימקרה זה נובע הדבר מהפרשי טמפרטורה בין הגופים. גוף חם פולט קרינה רבה יותר מגוף קר. הבדל נוסף נעוץ בכך שאין משתמשים בסרט, אלא בגלאים תרמיים. התחליף הטוב ביותר לסרט הוא מערך דו ממדי של תאי גילוי סמוכים זה לזה. ה"מכסים" את כל שדה הראיה, ומביאים לקבלת תמונה של הנוף כולו. במצב הסטטי גולוגי הקיים לא ניתן הדבר לביצוע, מפני שיש צורך במערך המכיל מספר רב מאוד של תאי גילוי. מסיבה זו נוקטים בשיטה שונה, בה גלאי בודד או גלאי בעל מספר קטן יחסית של תאי גילוי סורק את שדה הראיה. המערכת האלקטרונית מעבירה את האות החשמלי שהגלאי מפיק במצב מסוים למקום מתאים על-פני הצג. כך



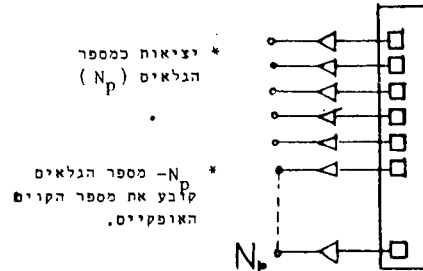
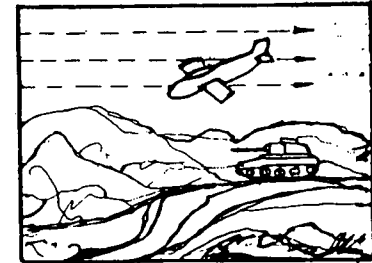
תרשים מס' 4 — מערכת סריקה המתבססת על שתי מראות.

סריקה בטור



* יציאה אחת.
* N_s - מספר הגלאים קובע את הרגישות.
כיוון הסריקה →

סריקה מקבילה



* יציאות כמספר הגלאים (N_p)
* N_p - מספר הגלאים קובע את מספר הקווים האופקיים.
כיוון הסריקה →

תרשים מס' 5 - צורות סריקה שונות

טבלה מס' 2 - סוגי מערכות הדמאה תרמית

| סוג | טווח (מטרים) | מחיר (דולרים) | משקל (ק"ג) |
|--------------|--------------|---------------|------------|
| גילוי אדם | 1,000 | — | — |
| אבחנת אדם | 500 | — | כ-3 |
| גילוי רק"מ* | 5,000 | — | — |
| אבחנת רק"מ** | 4,000 | — | כ-10 |
| גילוי רק"מ* | 10,000 | — | — |
| אבחנת רק"מ** | 6,000 | — | כ-30 |

* במערכות אלו קיימים בדרך כלל שני שדות ראייה. הגילוי מתבצע בשדה הרחב והאבחנה בשדה הצר.
** אבחנה מוגדרת כיכולת להבדיל בין סוגים שונים של רק"מ ללא יכולת לזהותם.

טבלה מס' 3 - השוואה בין הדמאה תרמית להגברת אור

| הדמאה תרמית | הגברת אור | תלות ברמת תאורה |
|---|--|---|
| לא קיימת מעל 10 אינו מושפע כמעט טובה למדי מסובכת אך ניתנת לביצוע יום ולילה עשרות אלפים מסובכת | תלות חזקה רגיש למדי גרועה פשוטה יחסית רק בלילה אלפים פשוטה | טווחי גילוי (בק"מ) סנוור מתאורה בשטח תצפית דרך אבק ועשן הסוואה כאמצעי נגד המערכת זמן פעילות מחיר (בדולרים) תחזוקה |

מערכות הדמאה תרמית מהוות פריצת דרך טכנולוגית ומבצעות. הן מאפשרות לחימה בלילה בטווחים המקובלים בלחימת יום. בעזרת מערכות אלו מקבל הביטוי „להפוך הלילה ליום“ משמעות חדשה ומעשית. מערכות אלה עונות על צרכי התצפית והכינון של מערכות הנשק ה-קיימות, ובמספר מקרים אף מעבר לכך.

כות אלה הוא באפשרות לעקוב אחר הטיל או הפגז לצורך תיקוני אש. ג. מער-כות תצפית לחי"ר, סיור וקט"קים בעלות טווח של שישה ק"מ עד עשרה ק"מ המאפשרות אתראה טקטית ויכולת טיווח תותחים. לחיל-האוויר פותחה מערכת ל-מסוקים ומטוסי תקיפה (AN/AAQ-9) המאפשרת גיווט והטסה לילית וכינון חימוש.