

## "עייט הסלע"

מערכת לוחמה אלקטרונית קרקעית, רבת עוצמה  
לחסימת מכ"מי חיפוש של האויב  
ושיבוש הנחיית טילי סוללת SA-3 כנגד מטוסינו

כתב: עמוס בן אריה<sup>1</sup>

כתבה 44 בסדרת כתבות על היסטוריית רפא"ל בעריכת ד"ר ראובן אשל<sup>2</sup>

### חקר שלל במהלך ולאחר מלחמת יום כיפור (1974 עד 1982)<sup>3</sup>

במלחמת יום הכיפורים ספג חיל האוויר אבדות כבדות ממערך סוללות טילי קרקע אוויר רוסיות בגזרות הלחימה עם מצריים וסוריה. מדובר בסוללות מסוג SA-2, SA-3<sup>4</sup>, ו-SA-6. במהלך הלחימה ואחריה הובאו לחצר רפאל חלקי מערכות של סוללות אלה שנפלו שלל לבחינה וחקירה, כדי לפתח אמצעים כנגד איומים אלה ולנטרל אותם. הידע על סוללות SA-3 היה חלקי בלבד ועל סוללות SA-6 הידע היה מועט ביותר. לרפא"ל הגיעו חלקים מסוללת טילים SA-3 וצוותים מרפא"ל, כולל וותיקים בכירים אשר עברו לטכניון, שהחלו בחקירת המערכת והטילים כפרויקט חרום שנקרא "אתרוגן".

החקירה הניבה שתי תוצאות חשובות:

(א) כבר במהלך החקירה הראשונית של פרוייקט "אתרוגן" בשנים 1973-1974, התגלה כי ערוץ התקשורת<sup>5</sup> אל הטיל SA-3 המשמש להעברת פולס החקירה להפעלת המשיב של הטיל לזיהוי מיקומו במרחב ופקודות הניהוג אל הטיל, פועלים בתדרים בתחום<sup>6</sup> L. שני דו"חות ראשונים בנושא זה, לבדיקת אפשרות שיבוש ערוץ זה של טילי SA-3 שנורו, דרך אלומות הצד של אנטנות הטיל, נכתבו ע"י מיכאל מנור ועמוס בן-אריה 1974.

(ב) במהלך הניסויים שבוצעו עם סוללת SA-3 (שנפלה שלל לידינו) כנגד מטוסי חיל האוויר בשנים 1975-1976, התגלה כי יכולת הגילוי העצמית של סוללת SA-3 כנגד מטוסים תוקפים היא נמוכה ותלויה מאוד במידע המגיע מהמערך הגילוי התומך החטיבתי שמורכב ממכ"מי גילוי P-12 ו-P-15, וכן ממכ"ם גילוי אזורי מתוצרת ברית המועצות, P-40. תדר ה-P-15 גם הוא בתחום L, ואילו P-40 פועל בתחום תדר S. ללא מידע מוקדם של מיקום מרחבי של המטוסים התוקפים רכישתם ע"י המערכת היא איטית ביותר.

אי לכך מבנה המערכת הוא כזה שקרון הבקרה והפיקוד של SA-3 כולל צג מכ"ם מובנה, המחובר למערך הגילוי החטיבתי של הסוללות שנועד לספק נתוני מיקום ראשוניים של גובה, טווח ואזימוט של המטוסים התוקפים. בהתאם, סוללות החטיבה יכניסו נתונים אלה ויתכוונו אליהם במהירות לרכישת המטרות.

המסקנה הראשית מהניסויים היו שנטרול יכולת המערך התומך של מכ"מי הגילוי החטיבתיים והאזוריים הינה בעל חשיבות עליונה. נטרולו, מוריד משמעותית את יעילות ביצועי מערכת SA-3 שיכולת הגילוי העצמי שלה נמוכה מאד.

## גיבוש הצורך המבצעי של פרויקט "עייט הסלע"

<sup>1</sup> ראש שטח מכ"ם ולוחמה אלקטרונית בשנות ביצוע הפרויקט וראש פרויקט "אתרוגן" בשנים 1976 - 1982

<sup>2</sup> בעבר סמנכ"ל רפא"ל למו"פ ובשנות האלפיים גמלאי בתפקיד ראש ענף היסטוריה של רפא"ל

<sup>3</sup> לפרטים נוספים ראה כתבה מס' 32 מאת עמוס בן אריה - כיצד התגברנו על איום SA-3, ספטמבר 2016

<sup>4</sup> סוללת טילי SA 3 מורכבת מקרון פיקוד ובקרה, תורן אנטנות וארבעה משגרים הכוללים שני טילים כל אחד.

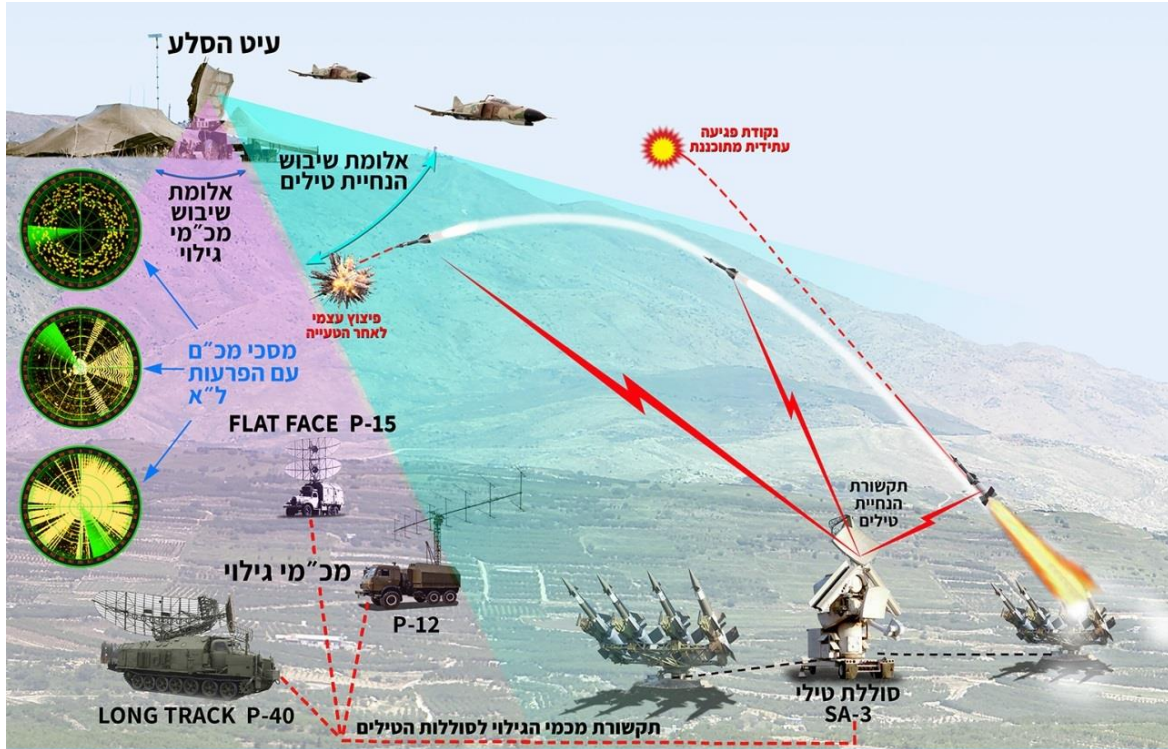
<sup>5</sup> מאחר ולטילי SA3 אין יכולת ביות עצמית, ערוץ התקשורת אל הטיל מנחה את הטיל למטרה לאחר שיגורו ע"י הסוללה הקרקעית באמצעות תקשורת אלחוטית. לצורך יצירת קשר מהסוללה אל הטיל, מפעילה הסוללה פולס חקירה אלקטרוני לגילוי מיקומו של הטיל במרחב, וזה מזדהה באמצעות משיב (טרנספונדר) שבתוכו.

<sup>6</sup> סיום תהליך לכידת המטוס ע"י הסוללה מכונה רכישת המטרה.

<sup>6</sup> תחומי תדר L ו-S הינם שני תחומי תדר בהם פועלים מכ"מי החיפוש המדוברים.

- (א) לשבש את הנחיית / ניווט הטילים בערוץ התקשורת ע"י שידור בתחום L אותות כוזבים דרך אונות הצד להגאי הטילים לאחר השיגור. צד ימין באיור 1.
- (ב) לשדר שידורי חסימה<sup>7</sup> דרך אונות הצד בתחומי תדר L, S למערך מכ"מי הגילוי ולשבש את פעולתם. צד שמאל באיור 1. (שים לב לדוגמאות חסימת צגי מכ"מי הגילוי בצד השמאלי של האיור)
- (ג) בנוסף, נכללו בתחום תדרים של מערכת "עיט הסלע" גם מכ"מי גילוי של סוללת Hawk מסוג PAR מתוצרת ארה"ב וכן מכ"מי CROTALE - מתוצרת צרפת.

שלושת הדרישות הנ"ל הביאו לדרישה מבצעית מטעם חיל האוויר לפיתוח מערכת לוחמה אלקטרונית דו-תכליתית רבת עוצמה בתחום תדרים שיכסה את האיזורים הנ"ל. איור 1 מציג תיאור סכמתי של הנדרש:



איור 1 – תיאור סכמתי והסבר של מערך "עיט הסלע" להגנה על מטוסינו מפני טילי SA-3

הסבר לאיור:

- מדובר בזירת מלחמה רווית איומים. איזור הכולל סוללות טילים מונחי מכ"מי המשמשים ליירוט מטוסים.
- מערכת "עיט הסלע" נמצאת באיור בפינה השמאלית העליונה, בנקודה השולטת על כל האזור.
- שידורי ל"א של המערכת חוסמים את שלושת מכ"מי הגילוי (אלומה שמאלית), במקרה זה סיכויי סוללות הSA3 גלולות בעצמן את המטרה נמוכים מאד.
- שלושת מסכי הגילוי עם השיבושים מוצגים בקצה השמאלי של האיור.
- כאשר סוללת SA3 מאתרת את המטוס התוקף, נועלת עליו, עוקבת אחריו ומשגרת טילי יירוט כנגדו, אלומת השיבוש<sup>8</sup> (הימנית) משבשת את מסלולי הטילים באותות כוזבים, וגורמת להם להחטיא את המטוס.

<sup>7</sup> שידורי חסימה הם אותות אלקטרוניים המשודרים ממקור חיצוני בתדרים של המכ"מי שאותו רוצים לחסום.

<sup>8</sup> רוחב אלומת הקרינה הראשית של אנטנה תלויה בממדי האנטנה: ככל שהממדים גדולים, אלומת הקרינה צרה.

בנוסף לאלומה הראשית יש לאנטנה אלומות צד צרות בעוצמות נמוכות, שלא בכיוון האלומה הראשית.

## פערי ידע ויכולות מימוש הפרויקט

פערי הידע למימוש מערכת כזו שהתגלו בחישובים הראשוניים היו גדולים:  
נדרש הספק מוקרן גבוה, שמשמעותו:

- משדרים בעלי הספק מוצא גבוה של יחידות הספק (, אחד לכל ערוץ, רחבי סרט בתחומי התדר הרלוונטיים, הכוללים שפופרות TWT<sup>9</sup> שטרם עסקנו בהם.
- שפופרות TWT רחבות סרט בתחום תדרים רחב, המסופקות ע"י יצרן יחיד ומלוות בבעיות רכש קשות.
- מערכות קירור שמן למשדרים.
- מסננים (אחד לכל ערוץ) לדיכוי הרמוניות<sup>10</sup> בהספק גבוה ביציאת המשדרים עם ניחות<sup>11</sup> ויחס גלים עומדים<sup>12</sup> נמוכים במיוחד.
- אנטנה בעלת הגבר גבוה ודיוק רב בכיוון, אלומות קרינה צרות, שגרר ממדים גדולים ודיוק רב במימוש הרפלקטור, קשיחות ועמידה בבדיקות סביבה ותנאי דרך.
- פיתוח מקטב <sup>45</sup> לעוצמת שידור גבוהה במוצא השופר<sup>13</sup> (Horn) להספקים הגבוהים שנדרשו, עם דחיסת גז חנקן ואטימה למניעת לחות מתשתית המקטב הבנויה מ"חלת דבש".
- כבלים קואקסיאליים בקוטר קרוב ל-42 מ"מ (1 5/8") להספקים גבוהים עם דחיסת גז.
- מכלול למדידת תדר מדויקת כחלק מיחידות הספק נמוך.
- המערכת תהיה בעלת ניידות גם בדרכים משובשות לצורך התקנה באתר המבצעי התורן.
- מערכת מיזוג אוויר מסיבי לספיגת החום הרב שמפוזר ע"י המערכת, וקירור חלל הקרון.

מבדיקות בספרות הגלויה וממקורות אחרים, התברר כי קיים מיכל מוטס מדגם AN/ALQ 99 המותקן על מטוס לוחמה אלקטרונית אמריקאי בשם EA-6B Prowler מתוצרת נורת'רופ – גרומאן. בבדיקות שנעשו ביחד עם חיל האוויר התברר שאין לנו שום אפשרות לרכוש את המכל המוטס הזה עקב התנגדות הממשל. אי לכך נבחר בתור דור ראשון פתרון קרקעי.

מפתרונות המימוש האפשריים שנבדקו, אמצעי שידור הספק הגבוה לתחום תדרים רחב, התבסס על שפופרות TWT (Travelling Wave Tube) רחבות סרט שכללו את תחומי תדר S, L, הנדרשים בהספק של כ-2KW (ובחלק מהתדרים אף יותר) שגם אותן היה קשה להשיג עקב בעיות "שימוש סופי" (End Use). בעיה נוספת שנתקלנו, הייתה פיתוח ספק כוח עבור שפופרות אלה עם הגנות מתאימות, כי חריגות קטנות במתח האספקה היו גורמות לנזקים לשפופרות אלה שמחירן היה רב, ופעולת ההגנות שיתקה את פעילות המערכת. כמו כן התברר כי להפעלת שפופרות שידור רחבות סרט אלה בהספקים הנדרשים, דרושה מערכת קירור בשמן.

בסיוע משה טורצ'ין ז"ל ממשלחת הרכש של רפא"ל בניו יורק, הצלחנו להגיע לשני יצרנים של ספקי כוח (LOGIMETRIC ו-AYDIN) שהיו להם מהלכים בחיל האוויר האמריקאי ובמשרד הביטחון האמריקאי, והם שהסכימו למכור לנו יחידת הספק גבוה שכללה ספק כוח ושפופרות.

## ניהול הפיתוח

הפרויקט הובל ע"י שטח מכ"ם ול"א שבחטיבת אלקטרוניקה וכלל את היחידות הבאות:

- יחידות הספק גבוה- רכש ופיקוח בארה"ב בחברת Logimetrics - פיקוח של שטח מכ"ם ול"א.
- פיתוח מסננים להספק גבוה בעלי ניחות גבוה ויחס גלים עומדים נמוך במיוחד למניעת הפסדים - רכש ומעקב בארה"ב - בפיקוח של שטח מכ"ם ול"א.
- פיתוח יחידות קירור שמן למגברי הספק גבוה - רכש בארה"ב בפיקוח של שטח מכ"ם ול"א.
- יחידת הספק נמוך – שטח מכ"ם ול"א.
- שילוב כל היחידות בקרון, כולל תקשורת ואביזרים נוספים בארץ - רפא"ל בשיתוף חיל אוויר.
- פיתוח אנטנות-שופר להספקים גבוהים ומקטב להספקים אלה – שטח אלמ"ג בחט' אלקטרוניקה.
- פיתוח וייצור אנטנת רפלקטור והרכבה המכני – מפעל "אימקו" בפיקוח של שטח אלמ"ג,
- פיקוח על תכן מכני ושילוב כללי בקרון נייד – שטח מכ"ם ול"א.

## הצוות המוביל של הפרויקט בחטיבת אלקטרוניקה

<sup>9</sup> שפופרת TWT הינה רכיב טכנולוגי חדשני החיוני לקבלת הספק שידור רב בתחומי תדר רחבים.

<sup>10</sup> הרמוניות, כמו במוזיקה, הן מכפלות של תדר היסוד. בניגוד למוזיקה, כאן הן תדרים לא רצויים.

<sup>11</sup> הפסדי אנרגיה בקווי העברת הספק, שבדרך כלל רצוי להקטין ואף למנוע.

<sup>12</sup> יחס גלים עומדים מצביע על הספק חוזר שאינו מועבר לעומס.

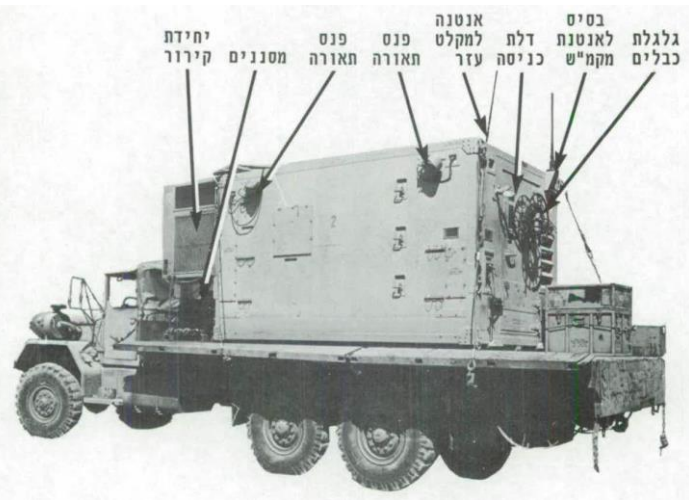
<sup>13</sup> שופר (HORN) הינו רכיב המהווה המזין אנטנה, שאליו מתחבר המשדר באמצעות כבלים מיוחדים (המכונים כבלים קואקסיאליים), להעברת האנרגיה הגבוהה המשודרת אל זן האנטנה בתחומי תדר רחבים.



## תיאור קרון הפיקוד והבקרה ופעולת המערכת באיורים 3, 4 :



איור 4 - פנים הקרון



איור 3 - קרון פיקוד ובקרה מותקן על רכב ריו M814

### הפעולות בקרון

המכלולים להספק נמוך ומכלולי SA-3 מפיקים אותות בהספקים נמוכים המזינים את מגברי ההספק. נתוני אותות אלה מופקים בהתאם לשיקולים מבצעיים ומועברים למפעיל שמזין אותם ליחידת עיבוד הנתונים. מגברי ההספק מגבירים את אותות הכניסה להספקים רבי עוצמה ומעבירים אותם לשידור דרך יחידת המסננים, וכבלים קואקסיאליים אל האנטנה המוצבת מחוץ לקרון. ראה איור 2.

כל ערוץ שידור כולל מכלול הספק נמוך, מגבר הספק, מסנן, כבל מחבר, ואת אחד מזני האנטנה. כן נכללים בקרון מערכת חיל אוויר בשם "עופרה" שנועדה לחסום את מכ"ם גילוי רוסי מסוג P12, מערכת קשר אלחוטית וקוויית, ושתי יחידות קירור: קירור שמן לצידוד ומיזוג אוויר לצוות בחלל הקרון.

### חסימת מכ"ם הגילוי

אותות החסימה עבור ארבעת הערוצים מיוצרים ע"י המכלולים הבאים:

- ארבעה מכלולים הספק נמוך
- ארבעה מגברים
- יחידת עיבוד נתוני תצוגה ובקרה ומחשב מרכזי
- יחידת ספקים
- לוח מפעיל

### שלבי שיבוש ניווט הטילים

- ארבעת ערוצי השידור נדגמים למדידת תדר השידור.
- קריאות אלו נמסרות ליחידת עיבוד נתונים, תצוגה ובקרה.
- מכלול SA-3 מייצר אותות שיבוש להסטת הטילים ממסלולם.
- פעולה זו מתבצעת באופן שוטף במשך כל זמן הפעולה.

**האנטנה ורכב המכלולים הגורר** ראה להלן איור 5 וכן איור 2 של המערך השלם בפרישה. כל המערך הינו יביל, גם בדרכים משובשות, כולל מרכב האנטנה ורכב ריו ארוך מדגם M814. הרכב גורר את מרכב האנטנה, נושא את כנפי האנטנה הצדדיות וכן את תוף הכבלים הקואקסיאליים המחברים את זני האנטנה אל מגברי ההספק בקרון. האנטנה השלמה כוללת רפלקטור פרבולי גדול להשגת הגבר גבוה. מבנה הרפלקטור רחב יותר מגבוה, נקבע כך כדי לקבל אלומות צרות בצידוד ורחבות בהגבהה. תוכנו תשעה זנים לאנטנה אשר מתוכם חמישה פעילים בו זמנית. מספר הזנים הגבוה מאפשר זווית רחבה של כיסוי בצידוד: נוצרת מעין מניפה של אלומות שהן צרות בצידוד ובעלות הגבר גבוה החופפות בקצוות אחת לשנייה. מתקבל כיסוי של גזרה שלמה מבלי לשנות פיזית את כיוון הרפלקטור וזאת ע"י בחירת זן מתאים.

פיתוח אנטנה בגודל 4x2 מטר בעלות דרישות דיוק גבוהות למימוש הפרבולה, תוך עמידה בתנאי סביבה קשים, דורש מיומנות רבה בתכן ובייצור וכן פיתוח ציוד בדיקה ייעודי.



**איור 5 - הכבלים על הגורר והאנטנה המקופלת על בסיסה הנגרר בדרך לפרישה**  
רכב ריאו ארוך (M814) משמש להובלת תוף הכבלים וכנפי האנטנה הקיצוניים, גורר את בסיס האנטנה עם הכנף המרכזית ומכלול הזנים

#### ניסויים מסכמים

בהשלמת הפיתוח בוצעו ניסויים ב"שדמה" מול מכ"ם החיפוש של ההוק - PAR בתחום S ומול מכ"ם הגילוי החטיבתי של P-15 - SA-3 בתחום L. התוצאות הראו שיבוש מרשים של יכולת הגילוי של שני מכ"מים אלה. כמו כן בוצעו ניסויים במטרה לוודא שאין הפרעות למערכות רדיו-טלפון ולמערכות ידידותיות במתארים שונים.

#### משך ומאמץ הפיתוח

שמונה שנים (1977-1985), בהם צרך כמאה שנות אדם.

#### שרות מבצעי של הפרוייקט בחיל האוויר

שתי מערכות נמסרו לחיל האוויר בשנת 1982 ויצאו משרות בו בשנת 1990, כי הייתה מסורבלת, קרקעית ובזירה בודדת. לאחר מכן המערכת פורקה ונעשה שימוש בחלקים ממנה לדורות הבאים הנמנים להלן, ונחלקם שולבו במוצבי חיל אוויר תחזוקת המערכת הייתה על חיל האוויר תוך הסתייעות ברפא"ל ביעוץ, בהדרכה, ספרות וחלפים. השרות המבצעי היה בחזית מול סוריה, אך לא נודע לנו על פעילות מבצעית.

#### דורות המשך

מערכת "עיט הסלע" שהופעלה בחיל האוויר, הייתה דור ראשון למערכות רבות עוצמה שפותחו לאחר מכן. בחלקים ממנה השתמשו במערכות מתקדמות יותר בדורות הבאים:

- דור שני היה פרויקט "כוכב חמה" לו תיוחד כתבה נפרדת בקרוב.
- רפא"ל הייתה מעורבת גם בפיתוח דור שלישי (מוטס) שהינו עדיין מסווג.
- המערכת שמשה גם בית ספר טוב לטיפול בהספקים גבוהים בתחומי תדר אלה ששימשו בפרויקטים נוספים ברפא"ל.