



פיתון-3

טיל קרבות אוויר שהדביק את חזית הידע בעולם

דן רוזן

כתבה 31 בסדרת כתבות על תולדות רפא"ל בעריכת ד"ר ראובן אשל

של הדור הבא ייגזרו ממגבלות הטכנולוגיה. אי לכך הותנעו ברפא"ל כבר ב-1968 מחקרי היתכנות למימוש החלום.

המשמעות ההנדסית של הפיכת החלום למציאות

עד מהרה התברר כי הצורך המבצעי ליירי ברגע זיהוי המטרה בקשר-עין מיתרגם למשמעויות הנדסיות מאתגרות:

- פיתוח ראש ביות הכולל חיישן תרמי רגיש שיבחין במטרה מכל כיוון, כלומר גם בגוף החם של מטוס האויב ולא רק בלהבת מנועו.
- פיתוח אופציה של שיעבוד ראש הביות למנגנון ציון המטרה שבמטוס, עוד בהיות הטיל נישא על ידי המטוס המיירט, וזאת בזוויות פזילה גבוהות ככל שניתן.
- הבאת הטיל בזמן קצר מאוד למהירות ולכושר תמרון גבוהים, תוך שמירת ממדים ומשקל.
- פיתוח מערכת השמדה שתותאם למגוון רחב של זוויות ומהירויות חליפה בין הטיל למטרה, ותכיל ראש קרב גדול בעל כיוון רסס ייחודי, מרעום קירבה "חכם" ומנגנון "הדחה" שיגרום לטיל בשלב מעופו הסופי לסטות מנקודת הביות שלו אל עבר תא הטייס.

פיתוח ראש הביות - כאשר קר לו, ראייתו משתפרת

בדיקת היתכנות מערכת הביות וההנחיה החלה ב-1968 בהובלת משה גלמן. במקביל תוכנן בקבוצת המכניקה בראשות גיורא שלגי אב-טיפוס של מערכת עם גימבלים חיצוניים וגלאי ניה, אשר אמורה לשאת את הרכיבים האופטיים. פתרון זה הוחלף ב-1969, עת הוחל בתכנון גרסה עם גימבלים פנימיים שממנה נולד ראש הביות הסופי של פיתון-3. פיתון-3 הדרושה לחיישן רגיש היא לעבור למערך גלאי 3-5 מיקרון (כולל רכיבים אופטיים לשקיפות בתחום ספקטרום זה) וכן להשיג רגישות קליטה מרבית על ידי הגדלת שטח האיסוף של אופטיקת ראש הביות. אורך הגל החדש חייב שימוש בגלאי אינדיום-אנטימוניד (InSb) שהינם בעלי תכונה "מצערתי": יש להפעילם בטמפרטורה של מינוס 196 מעלות צלזיוס.

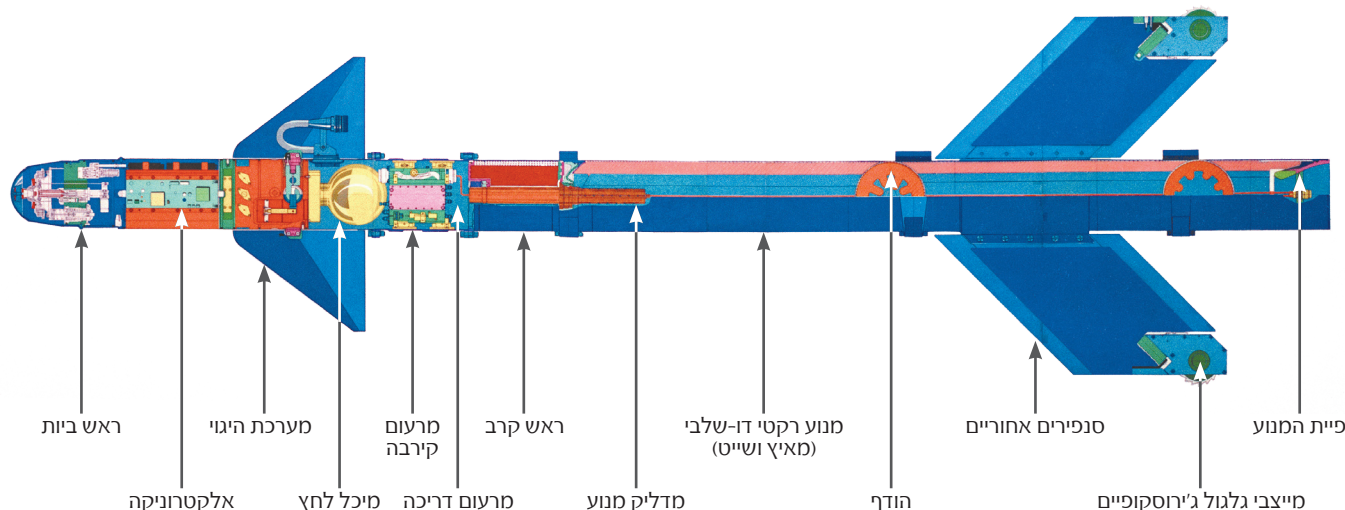
הייחוד של טילי אוויר-אוויר דור ג'

במלחמת שלום הגליל (1982) נלחם חיל האוויר בזירה הסורית כשהוא מצויד לראשונה בטילי אוויר-אוויר מהדור השלישי: פיתון-3 הישראלי לצד טילים אמריקניים. ההצלחה הדהימה את העולם: לסורים הפילו 80 מטוסים (מהם 69 מטילי אוויר-אוויר) ולח"א לא הופל אף מטוס². כיצד קרה הבלתי ייאמן?

עד כניסת טילי דור ג' לשימוש הצריך קרב אווירי את תהליך ה-Dog fight, המוכר מסרטי מלחמת העולם, אשר בו נבחנת יכולת הטייסים ומטוסיהם להתייצב זה מאחורי זנבו של יריבו.

כך היה גם בטילי שפיר-1³ ושפיר-2⁴ ומקביליהם הזרים. התרגילים האווירובטיים הנדרשים בתהליך זה עשויים לדרוש דקות ארוכות במפגש בין כוחות שקולים. זמן זה, שבמהלכו מפעיל הטייס את המבער האחורי ומבצע תמרונים חריפים בתאוצה של מעל 5g, גורם לכך שלעיתים קרובות מונעת היתקלות כזו מהטייס את ביצוע משימתו העיקרית - הפצצה או צילום. לא אחת מסתיים קרב כזה ללא הכרעה בניתוק מגע עקב אובדן דלק, מהירות וגובה בעת תמרוני הקרב, שלא לדבר על הצורך בהשלכת מכלי הדלק והמטענים החיצוניים בעת הקרב.

אחרי מלחמת ששת הימים התפתחו קרבות אוויר "המוניים", שבהם השתתפו לעיתים מעל עשרה מטוסים מכל צד. קרבות אלה הציפו את בעיית חשיפתו של הטייס, העסוק בקרב אוויר, להתקפה על ידי מטוסי האויב האחרים שבזירה. באופן טבעי עלתה משאלת הלב המבצעית למערכת נשק מסוג "ראית-ירית", שבה אחרי זיהוי המטרה ילחץ הטייס על מתג הירי ללא צורך בתמרון כלפיא, וימשיך במשימתו המקורית, תוך כדי התביינות אוטונומית של הטיל למטרתו. בשנות ה-60 לא היה בעולם טיל קרבות-אוויר כזה. משמעות הגשמת חלום מבצעי כזה הינה העברת תפקיד קרב האוויר מהטייס והמטוס אל הטיל המיירט. צורך מבצעי כזה היה בשעתו רחוק מהיכולת למימוש טכני והבהיר כי התכונות המבצעיות



מכלולי פיתון-3

- מעבר להודפים מודרניים אשר להם צפיפות ואימפולס ספציפי גבוהים (235 שניות) עם תכונות מכניות טובות בכל תחום הטמפרטורות: ממינוס 54 עד פלוס 71 מעלות צלסיוס.
- לראשונה ברפאל תכנון הודף הדבק לדופן המנוע. עד אז ההודף נוצק בנפרד והושחל לתוך צינור המנוע.
- מעבר מפלדת 4130 לפלדה חדישה וחזקה שתאפשר ייצור מכל דק דופן (1.37 מ"מ) בטכנולוגיית לחצנות.
- מפעל ההודפים ברפאל[®] נבנה בשעתו בעיקר עבור פיתון-3. בעקבות עסקאות ייצוא שונות הורחב המפעל לממדי הנוכחיים.

קשיי הפיתוח של מרעומי הקרבה (מק"ר)

מרעום הקרבה הינו חלק חיוני להשמדת המטרה במקרה של אי-פגיעה ישירה בה. בהתאם לתנאי השיגור, עשוי הפיתון להגיע ולחלוף ליד המטרה מכל כיוון, ובהתאם לכך גם במגוון רחב של מהירויות חליפה בתחום 250 - 1200 מ'שנייה. תנאים קשים אלה מחייבים מק"ר "חכם" שיידע לגרום להפעלת ראש הקרב בנקודה המיטבית של מסלול החליפה. בעיה מעשית שמקשה מאוד על תכנון המק"ר היא שקשה ביותר ליצור בניסוי מעבדה את תנאי החליפה האמיתיים הצפויים בהפעלה מבצעית. הבחינה האמינה הראשונה שלו היא במסגרת ניסויי ביות על מטרת מטוס נהוג מרחוק, ודבר זה מתרחש בהכרח רק בשלבים סופיים של פרויקט הפיתוח שבהם מאוד לא נעים להיווכח בכשל תכנוני. מסיבה זו הוחלט לפתח במקביל שתי טכנולוגיות: מק"ר המבוסס על מכ"ם דופלר, ומק"ר המבוסס על החזרת קרן לייזר מהמטרה. המק"ר היה המכלול היחידי שזכה ליתירות זו בפיתוח הפרויקט.

ניסויי הביות - מבחן התוצאה

ביצוע ניסויי הביות מחייב יכולת לבצע ירי על מטרה מתמרנת מטווחים קרובים ובזוויות צידוד⁹ גבוהות (90 מעלות ומעלה). בתחילת הפיתוח היו בח"א רק מטרות נגרות ששימשו בניסויי שפירי. ניסיון לבצע פניית תמרון גרם לרוב לקריעת כבל הגרירה. היה ברור שיש צורך להשתמש במטוסי מטרה שיוכלו לבצע תמרונים ברמה של 5g. הבחירה נפלה על מל"ט BQM34 של חברת Teledyne שיותאם לתמרון של 5g וכונה "שדמית". כתוצאה מעיכובים שונים בח"א זכינו לבצע ניסוי ביות ראשון עם "שדמית" רק ב-1975. לפיכך בוצעו שתי הסדרות הראשונות של ניסויי הביות מול המטרת הנגרות.

סדרת ביות 1 (חורף 1972/73) כללה ירי 5 טילים. מטרתה הייתה לבחון בהקדם האפשרי את טיב הביות של הפיתון, שבניגוד לשפירי התבסס לראשונה על חוג עקיבה מרטט אשר איפשר את ויסות מקדם הביות. כדי להגיע לסדרת ניסוי זו בהקדם האפשרי הוחלט לבצע עם מנוע רקטי של שפירי-2 ועם עין לא מקוררת (עין שפירי עם יכולת עקיבה מוגדלת), אך עם התצורה האווירודינמית, סרוו ההגאים והאלקטרוניקה של פיתון-3. המטרה הייתה עדיין נגרת! בפענוח התברר כי לא רצוי לעבוד במוד של

כבר בשלב התיכון המוקדם פנינו למעבדת המיקרואלקטרוניקה של הטכניון, בראשות פרופסור יצחק קדרון, בבקשה לפתח גלאי כזה. הם אכן הצליחו לעמוד באתגר⁶, והחל בסדרת ניסוי ביות 3 הוכנס גלאי זה לטילים. עם גמר הפיתוח בטכניון הועברה הטכנולוגיה למפעל התקני מצב מוצק (המ"ם) של רפאל⁷, שממשיך מאז לספק גלאים אלה ואחרים. הצורך בקירור הגלאי הביא לפיתוח של דיואר זכוכית (מעין מכל תרמוס זעיר שבו מזווד הגלאי בתנאי ואקום). במרכזו של דיואר זה ממוקם מקרר קריאוגני⁷ זעיר אשר יוצר את הטמפרטורה הנדרשת על ידי התפשטות חנקן נוזלי שנלקח ממכל החנקן שבנושא הטילים במטוס. הטכנולוגיות למימוש גלאי ה-IR והשימוש בהן החלו ביוזמת הפרויקט והביאו לקפיצת מדרגה של האלקטרואופטיקה ברפאל⁸ ובישראל כולה.

תכונה נדרשת נוספת של טיל קרבות האוויר היא יכולתו להשתעבד לפני שיגורו לכיוון ההצבעה של כוונת הקסדה של הטייס, או לכיוון הצבעתו של מכ"ם המטוס. הכנסת תכונה זו דרשה תכנון מערכת שחרור ראש הביות מנעילתו אל ציר הטיל, הוספת מדי זווית פזילה, הגדלת זווית הפזילה המרבית ל-40 מעלות לפחות והגדלת מהירות העקיבה עד ל-20 מעלות לשנייה.

תכן התצורה האווירודינמית - תמרון חריף תוך יציבות

קביעת התצורה האווירודינמית (על ידי אברהם דוידוביץ' ואורי פלד) אמורה לספק את התכונות הקינטיות הנדרשות - פרופיל מהירות וכושר תמרון, תוך שמירה על יציבות אורכית ויציבות גלגול של הטיל. הרצון להגיע לביצועים הנדרשים תוך שדרוג מכלולי שפירי-2 הביא להחלטה לשמור על קוטר הפיתון כקוטרו של שפירי-2 (160 מ"מ). דבר זה היה אמור להקל בהרבה את התאמת מכלולי השפירי השונים לדרישות החדשות, אך בדיעבד התברר שדרישות הביצועים הגבוהות, שהפיתון נאלץ להתמודד עימן, לא אפשרו כמעט ניצול של מכלולי השפירי, וכל מכלול דרש תכנון מחדש, כולל האלקטרוניקה (בהובלת יוסף שלזינגר). פתרון התצורה התכנס לאחר סדרת ניסויי מנהרת רוח בצרפת ובטכניון, ושלוש סדרות של ירי טילי תצורה, המתוכננים לתמרון על-פי פקודות שעות. הפתרון אכן הניב יכולת תמרון גבוהה מאוד (עד 35g) בכל מעטפת הטיסה, עם זוויות התקפה עד 17 מעלות!

אתגרי פיתוח המנוע הרקטי

כדי לאפשר את מעטפת השיגור הנדרשת, היה צורך לפתח מנוע רקטי בעל פרופיל דחף שבייא את הטיל בזריזות למהירות גבוהה אשר תאפשר לו יכולת תמרון גבוהה לטובת השיגורים בטווחי המינימום, ולאחר מכן פרק זמן של דחף נמוך - לשמירה על מהירות שיוט לטובת שיגורים בטווחים מרביים. נוסף לכך היה חשוב להגיע למשקל מינימלי, דבר שחייב השגת דחף סגולי מרבי ותכן מכני חדש של כל רכיבי המנוע. דרישות אלה הביאו לתכן מנוע מתקדם, בהובלת מוקי גיל וגילי פורטונה, אשר דרש פריצות דרך שלא היה בהן ניסיון קודם ברפאל⁹:

למצוא את התמרון החזק ואת החתימות האינפרה-אדומות, המכ"מיות והאופטיות, המדמות מטוס קרב לצורכי ההנחיה, ההדחה והמק"רים. עם תחילת ביצוע השיגורים של סדרה זו התברר כי תפעול ה"שדמיות" הינו תהליך מייגע ומסובך אשר הופך את ביצוע הניסויים לצוואר הבקבוק של הפרויקט. מעתה ועד סיום הפיתוח התנהל מאבק מתמיד להוציא לפועל עוד שיגור ועוד שיגור. ההפסקות בין השיגורים נקבעו לרוב על ידי האילוצים החיצוניים, ועדכונים הפיתוח התבצעו באותן תקופות כמעט כבדרך אגב.

פיתון-3 כקטר טכנולוגיות

הטכנולוגיות שפותחו במהלך הפרויקט תרמו בהמשך רבות הן לרפא"ל והן לקידום ענפי הייטק במישור הארצי. מבין הטכנולוגיות העיקריות שהפרויקט יזם וקידם נשבו ונזכיר את תחום האלקטרואופטיקה (ובו גלאי מקורר, קוצץ אופטי בעל רזולוציה של 20 מיקרון, כיפת IR מגבישי ספיר, לייזר GaAs, עדשות פלסטיות וציפויים אופטיים רב-שכבתיים). בתחום האלקטרוניקה נציין הקמת מעבדה למיקרואלקטרוניקה, זיווד אלקטרוניקה היברידית, הקמת מרכז חישוב היברדי ופיתוח וייצור סוללות תרמויות. בתחום ההנעה הרקטית נציין שימוש בפלדות חדישות לייצור מכל המנועים בלחצנות, כמו גם פיתוח יכולת יציקת הודפים דבוקי-דופן. כמו כן ראוי לציין את תרומת הפרויקט לתנופת הפיתוח הגדולה של שדה הניסויים "שדמה".

סוף דבר

על-פי התוכנית המקורית של הפיתוח אמורים היו להתבצע במסגרתו 35 ניסויי ירי (לבד מניסויי הקבלה). למעשה הסתיים הפיתוח עם 29 שיגורים: 7 טילי שעון, 11 שיגורים על מטרה נגרת ו-11 שיגורים על "שדמית". נוסף לכך נורו עד פברואר 1977 שמונה טילים במסגרת ניסויי קבלה במעטפת קיצונית של תנאי השיגור. חודש לאחר מכן כבר צוידה טייסת ראשונה של חיל-האוויר ב-11 טילי פיתון ראשונים לסד"כ, ובהמשך הייתה אספקה מסיבית של טילים הן לחיל האוויר והן למדינות ייצוא. ההפעלה המבצעית הראשונה של פיתון-3 אירעה ב-27.6.79 מול מיגים סוריים בשמי לבנון. בהמשך רשם פיתון-3 לזכותו הפלה של עשרות מטוסי אויב במלחמת של"ג (1982). הטכנולוגיות שפותחו במסגרת פיתון-3 ממשיכות לתרום עד היום לפרויקטים רבים בארץ, וברפא"ל בפרט.



"שדמית" - טיל מטרה לניסויי ביות

- [1] דן רוזן שימש כראש פרויקט "פיתון 3" מתחילתו ועד ניסיונות לשירות מבצעי.
- [2] להשוואה יצוין שבקרב על בריטניה זכו הבריטים בניצחון היסטורי על הגרמנים ביחס הפלות של 2:1.
- [3] חיים סלעי, "שפריר-1", רפאל שלנו, גיליון 16, ספטמבר 2010.
- [4] אורי פלד וחיים סלעי, "שפריר-2", רפאל שלנו, גיליון 17, אפריל 2011.
- [5] זוית פזילה היא הזוית שבין כיוון טיסת המטוס המיירט לבין קו ראייתו את המטרה.
- [6] גיורא שלגי, "להיות רואה ובלתי נראה", רפאל שלנו, גיליון 15, אפריל 2010.
- [7] קריאוגניקה עוסקת בתהליכים פיזיקליים בטמפרטורות שמתחת למינוס 180 מעלות צלזיוס.
- [8] גילי פורטונה, "איך מייצרים הודפים - מתקן ה", רפאל שלנו, גיליון 22, ינואר 2013.
- [9] זוית הצידוד מוגדרת כזוית שבין ציר המטרה לבין קו הסתכלות המטוס המיירט עליה.



זוג טילי פיתון-3 על כנף מטוס "קורנס" (פנטום)

ריטוט הגאים. מסקנה נלווית ברוכה - אפשרות הקטנת מכל הלחץ הפנימי ובעקבות כך קיצונו של הטיל.

סדרת ביות 2 כללה ראש ביות עם גלאי מקורר, אלקטרוניקה היברידית באופן חלקי, מרעום קרבה אלקטרומגנטי, נושא טילים מבצעי וירי ממטוס "קורנס". תכנון הניסויים המקורי התבסס על מנועים רקטיים של שפריר, אך התקדמות פיתוח המנוע של פיתון והצורך בפרופיל דחף אמיתי גרמו להחלטת הפרויקט לנסות להגיע עם מנועי פיתון כבר לסדרה 2.

אחרי שני השיגורים הראשונים בסדרה זו פרצה מלחמת יום כיפור ועימה עיכוב של תשעה חודשים. הניסויים חודשו רק בסוף יוני 1974. בין שאר הממצאים משיגורי סדרה זו התגלתה בעיה עקרונית של הפעלות שווא במק"ר האלקטרומגנטי. בעקבותיה פיתחה קבוצת המק"ר בחטיבת אלקטרוניקה, בהובלתו של יוסי לינהרט, שינוי בעיבוד האות של המק"ר. במקביל זורז גמר פיתוח המק"ר האלקטרואופטי וניסויי הירי הבאים בוצעו עימו. גם בו התגלו הפעלות שווא שפענחון הצריך ירי מיוחד של עוד שני טילי שעון. ירי זה גילה כי בזוויות הגה מסוימות פוגעת אלומת שידור הלייזר של המק"ר בהגאי הטיל. שינוי קל בזווית השידור פתר את הבעיה. בסופו של דבר נפתרו גם בעיות המק"ר האלקטרומגנטי. נראה שההחלטה לפתח במקביל שני מק"רים הצדיקה את עצמה.

אנקדוטה, הקשורה לביצועי מערכת ההדחה, אירעה בניסוי האחרון מסדרה זו: במערכת ההנחיה של הטיל שולבה מערכת הדחה שתפקידה להסיט קדימה את מסלול הטיל סמוך לרגע הפגיעה, כך שהפגיעה לא תהיה באזור מנוע המטוס אלא סמוך לתא הטייס. עם החליפה נפלה המטרה הנגררת ומסוק נשלח לאתרה ולהביאה לאבחון. התברר שהסיבה לנפילת המטרה הייתה חיתוך כבל הגרירה שלה על ידי הטיל, קדימה מהחרטום שלה, בדיוק במרחק שהוכתב למנגנון ההדחה. מאז קיבל בעיינו המושג "עדות חותכת" את משמעותו האמיתית.

סדרת ביות 3 החלה עם הירי הראשון על מטרת "שדמית" ב-10.6.75. מטרותיה היו לבדוק בירי את המערכות הסופיות של פיתון-3 עם דגש על מערכות ההדחה והמק"ר, וכן לבדוק את שיטת הביות כנגד מטרות מתמרנות בעוצמה גבוהה. לצורך כך נזקקנו כמונבן ל"שדמית" בה קיוונו