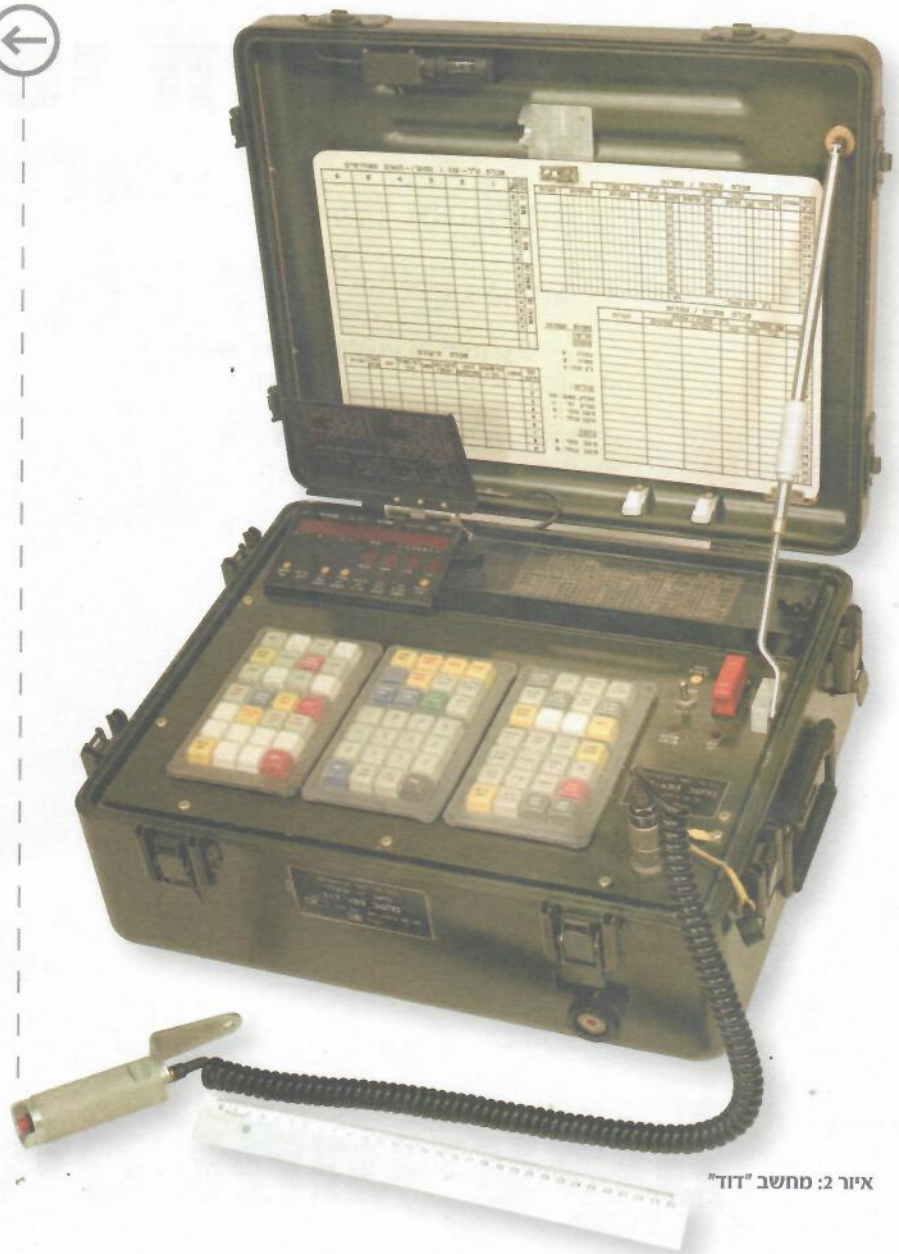


זהו סיפורו של פרויקט
 רפא"לי שנולד ערב
 מלחמת יום הכיפורים
 ונמשך למעלה
 מעשרים שנה. מוצר
 הפרויקט - מחשב קטן
 לתותחנות - היה ראשון
 מסוגו בעולם. הוא זכה
 להצלחה גדולה, בצה"ל
 ובחול"ל, והוגדר כמהפכה
 בחיל התותחנים.
 למרות זאת, לא היה
 לו המשך ברפא"ל.
 הסיפור המובא כאן הוא
 תמונת הפרויקט כפי
 שנשתמרה בזיכרונם
 של אחדים מוותיקיו,
 וכן לקחים אחדים ממנו
 הישימים גם היום



איור 2: מחשב "דוד"

פתרון טכנולוגי פוגש חלום מבצעי

בתחילת שנות ה-70 של המאה ה-20 חלה
 התפתחות מהירה בטכנולוגיות המוליכים
 למחצה: מספר הטרנזיסטורים שניתן היה לייצר
 על שבב סיליקון עלה ממאות בודדות לאלפים
 רבים, ומה שכונה LSI (Large Scale Integration)
 איפשר לייצר רכיבים מתוחכמים יותר ויותר.
 בשטח מחקר מחשבים (של אז) עקבנו אחר
 התפתחות זו והגענו למסקנה שבעתיד הקרוב
 ניתן יהיה לבנות מחשבים ספרתיים קטנים
 בהרבה (פיזית) ממה שהיה מקובל אז. התחלנו
 אפוא לחשוב היכן ניתן לנצל יכולת זו במערכות
 צבאיות, כלומר היכן יביא כושר חישוב זול יחסית
 את התועלת המרבית.

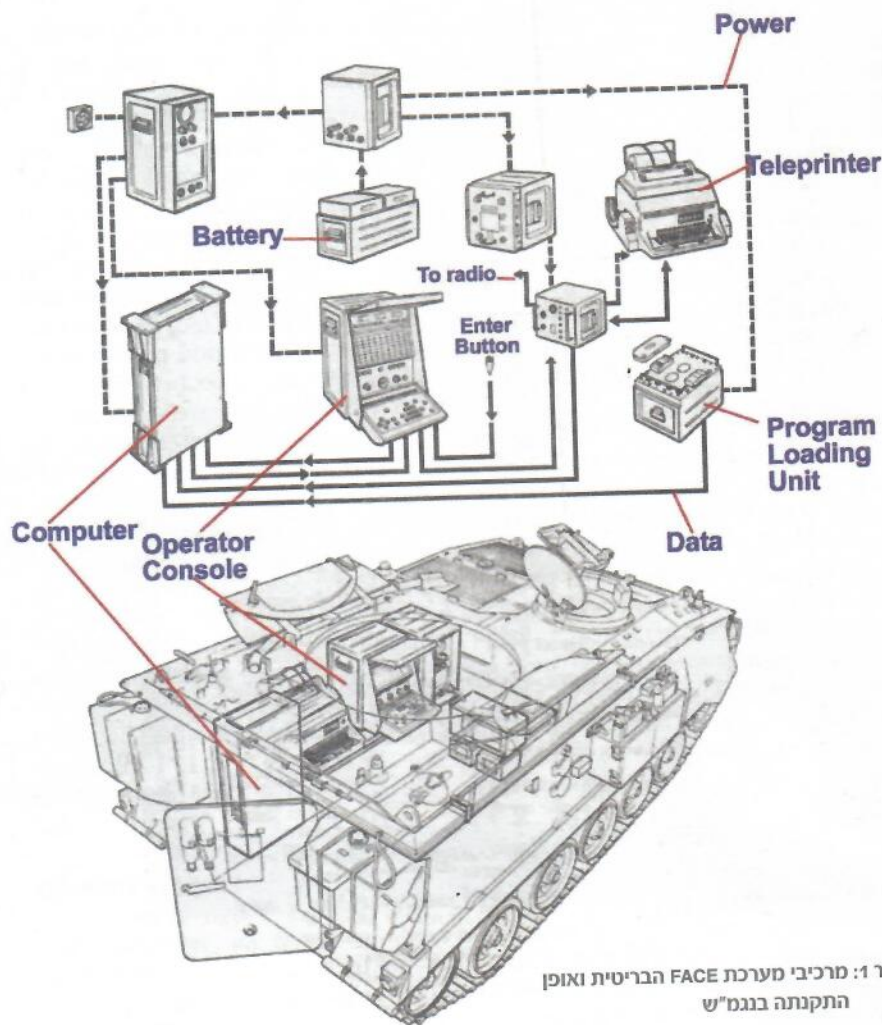
לאחר בירורים ממושכים עם גורמים רבים
 התכנסנו לחישובים לארטיילריה. תרמה לכך
 גם התפתחות טכנולוגית נוספת: הופעת
 המחשבון המדעי הראשון hp-35 בשנת 1972
 [5], שאיפשר לראשונה חישוב פונקציות
 טריגונומטריות ומעריכיות, שראינו להן שימוש
 רב בחישובי התותחנות. בספטמבר 1973 הוכנה
 הצעה לפיתוח מחשב ירי [1], מבוסס על מעבד
 המחשבון hp-35. הכנו מצגת, וגם מודל מפח
 (דומה למכונת חישוב שולחנית) שעליו הודבקו
 פתקים לייצוג מקשים, וקבענו פגישה עם קצין
 המחקר של חת"מ, סא"ל אורי קולסקי (קידר) ז"ל.
 הפגישה התקיימה במשרדי רפא"ל בתל אביב

"דוד" - מחשב קומפקטי לסוללה ארטילרית - ראשון מסוגו בעולם

ד"ר מיכאל ורנר*

כתבה 29 בסדרת כתבות על תולדות רפאל
 בעריכת ד"ר ראובן אשל

* לאורך כתבה זו ראינו המחבר כמה מוותיקי הפרויקט וכאלה שהיו קשורים אליו וביניהם: נתן אביבי, דב אלידע, אילן ביטון, גיא בריל, זן ברנע, איתמר דוד, אבי הראל, יואל מאי, חיים פולקמן, שמואל קרן, לוי רסקין ואדם שפי.



איור 1: מרכיבי מערכת FACE הבריטית ואופן התקנתה בנגמ"ש

בפרויקט להתאים את "דוד" למקבע תקני של חיל הקשר, כך שניתן יהיה להתקינו במהירות בכל רכב ולהפעילו ממצבר הרכב. הדבר התברר כיתרון גדול, כיוון שכל מה שנדרש היה התקנת מקבע נוסף ברכב מרכז הפיקוד (מפי"ק) וניתן היה להעביר את המחשב מרכב אחד לכל רכב אחר שבו קיים מקבע למכשיר קשר. לצורך העברה כזו מרכב לרכב כשהמחשב פועל, החלטנו בשלב מוקדם בפרויקט לצייד את "דוד" בסוללה נטענת, אך-כי הסוללה גרמה להגדלה משמעותית במשקל המחשב. בדיעבד התברר שזו הייתה החלטה קריטית, ולא מהסיבה שבגללה הוכנסה הסוללה: ההתקנה הרגילה של "דוד" הייתה בנגמ"ש, והתברר שמנוע הנגמ"ש מופעל אוטומטית, ללא התראה, בכל פעם שמתח המצברים יורד מתחת לסף מסוים. זרם התנועת המנוע מפיל את מתח המצברים מתחת למתח שבו "דוד" יכול לפעול, וכך - בכל פעם שהמנוע היה מופעל, הייתה פעולת המחשב עלולה להשתבש. אולם הסוללה הפנימית הבטיחה "גישור" לנפילות מתח אלה, והמחשב המשיך לפעול ללא בעיות.

בסוף יולי 1975 נמסר "דוד" הראשון לבדיקה בחיל התותחנים. תחילה נבדק דיוק החישובים ואחר-כך נמסר המחשב לניסויים "מבצעיים" שבהם נבדק בתנאי שדה. בדו"ח ביניים של ניסויים אלה נאמר: "ההתרשמות עד כה היא חיובית ביותר, והמחשב עונה על הציפיות שתלו בו. ה"דוד" מתקבל בהתלהבות רבה בכל

המערכת "צמודה" לרכב, ולא ניתן היה לניידה לרכב אחר במקרה של תקלה ברכב. איור 1 מציג כדוגמה את מרכיבי מערכת FACE הבריטית ואת אופן התקנתה בנגמ"ש.

כיוון שפתרון משוואות מסלול הפגז היה הרבה מעבר ליכולת המיקרו-מעבד, הסתמכנו ב"דוד" על מודל שפיתח ד"ר אדם שפי ממו"פ/תוכ"ן, שניתן להגדירו כקירוב פולינומי של הערכים בלוחות הטווחים. מקדמי הפולינומים חושבו במחשב החישוב המרכזי של רפאל. תחילה היו ספקות אם ניתן להשיג בדרך זו דיוק מספיק, אך בדיקות מפורטות שנעשו בהשוואת תוצאות חישובי "דוד" עם תוצאות שהתקבלו בשימוש בלוחות הטווחים, הראו ש"דוד" נתן אותה רמת דיוק; גם כתיבת התוכנה הייתה באותם ימים מסובכת מהמקובל היום. התוכנה נכתבה בשפת אסמבל, והיה צורך לפתח כל מיני כלי עזר, שפעלו במחשבי השטח: מו"ץ 2 הוותיק (מתוצרת עצמית של שטח מחשבים) PDP-11-1.

"דוד" מחליף את "גוליית"

במקביל לתכן המערכת האלקטרונית התקדם תכן הזיווד. אחת המשימות הייתה להבטיח אטימות של לוח ההפעלה, שבו הייתה מותקנת מקלדת של עשרות מקשים. היום יש לכך פתרונות מקובלים, אך אז היה זה מבצע, שבו שותפה יחידת שמחנות, אשר הכינה את הכיסויים השקופים לקבוצת המקשים (איור 2). בניגוד למתחרים בחו"ל, החלטנו בשלב מוקדם

(ברחוב הארבעה) בסוף ספטמבר 1973, וסא"ל קולסקי "נדלק" לרעיון, כאילו ציפה מזמן לדבר כזה. הוא ביקש כמה שינויים בהצעה, וסיכמו לחזור ולהיפגש לאחר שנגבש תוכנית חדשה ברוח הצעותיו. אולם כעבור ימים אחדים פרצה מלחמת יום הכיפורים, וסא"ל קולסקי נהרג על שפת תעלת סואץ ביום השני למלחמה. כך נעצר הפרויקט למשך חודשים אחדים, שבהם עסקנו בדברים דחופים יותר.

הקשר עם חת"ם חודש בתחילת 1974, בפגישה עם הנציגים החדשים של החיל, סרן (לימים תא"ל) שלמה שמיר וסרן (לימים תא"ל) שמואל ביינהוף (היום קרן). שני אלה ליוו את הפרויקט כמעט לכל אורך הפיתוח, אך לכך נשוב בהמשך. תוך זמן קצר הוכנה בחת"ם דרישה מבצעית [2], ומיד הוגשה ליחידת המו"פ של משרד הביטחון (לימים מפא"ת) הצעת פיתוח [3]. תקציב הפיתוח הוערך בכ-250,000 דולר של אז, ומשך הפיתוח 12 חודשים. בתמיכת חת"ם אושרה הצעה זו במהירות, ויחידת המו"פ הוציאה משימת פיתוח [4].

המירוץ הטכנולוגי אינו נעצר

כאמור, בתכנון הראשוני התבססנו על שימוש במחשבוני hp-35 שנכנסו אז לשימוש. אולם באפריל 1972 יצא לשוק המעבד intel 8008, וכשרכיבים אלה התחילו להגיע אלינו - גרם הדבר לשינוי כיוון בפרויקט. אמנם ברכיב החישוב של hp-35 כבר מומשו חלק מהפונקציות שנדרשו לנו (כמו פונקציות טריגונומטריות), דבר שהיה חיסכון משמעותי בתכנות. אך בינתיים התברר שהמחשב שלנו אמור לטפל במשימות נוספות רבות, שעבודן היה יתרון ל-8008 בשל היותו מעבד רב ייעודי; הוא הבטיח גמישות גדולה הרבה יותר וסלל את הדרך לאפשרויות שכלול רבות של המכונה שפיתחנו. ההחלטה על שימוש ב-8008 התקבלה בתחילת 1974 וצוינה כבר בהצעת הפיתוח [3]. אולם עד מהרה התבררו המגבלות של מעבד זה. מי שרגילים היום לזיכרון של סיליארדי Bytes בכל טלפון, יתקשו לדמיין איך פותחה התוכנה ל"דוד" במעבד שמרחב הזיכרון שלו היה 16KByte...

בכיוון קנה התותח יש להביא בחשבון גורמים רבים כמו גבהים טופוגרפיים, סוג הפגז, מהירות הלוע שלו, משקלו, כמות ההודף וטמפרטורת ההודף, מהירות הרוח וכיוונה, טמפרטורה, לחץ אוויר ולחות לאורך מסלול מעוף הפגז, ואפילו את סיבוב כדור הארץ בזמן מעוף הפגז. חישובים אלה נעשו בעבר ידנית, נמשכו דקות ארוכות ולעיתים קרובות נעשו בהם טעויות, לכן בוצעו החישובים במקביל על ידי שני צוותים, ואם התקבלו תוצאות שונות - נדרש סבב חישובים נוסף. מחשבים ספרתיים נתנו לכאורה פתרון מצויין כי ניתן היה לפתור בהם את משוואות מסלול הפגז. ואכן בשנת ה-60 של המאה הקודמת החלו צבאות שונים בעולם להטיייד במערכות כאלה, וגם בצה"ל הן הוכנסו לשימוש. כל המערכות האלה היו סדור המחשבים המבוססים על טרנזיסטורים, ולכן היו גדולים, כבדים ויקרים. לפיכך הותקנה כל מערכת כזו ברכב ייעודי, הייתה "תפורה" למשימה מסוימת והתוצאות שנתנה דרשו עיבוד ידני נוסף (שהכניס שוב טעויות), כדי להתאימן לתרגולות חיל התותחנים (חת"ם). נוסף לכל אלה הייתה



היחידות שבהן הוא מופעל ותרומתו הרבה איננה מוטלת בספק. [6]

ייצור "דוד" החל בתחילת 1976 והיה המוצר הראשון של "אלצור" - מפעל הייצור של חטיבת אלקטרוניקה. במשך השנים סופקו לצה"ל מאות יחידות, שהוטמעו תחילה בסוללות התותחים המתנייעים 155 מ"מ העיקריות ("חכב", M-109). כל המידע הספציפי לסוג זה של תותח חזק ביחידה נתקעת (plug-in unit), ובהמשך פותחו יחידות נתקעות לסוגים נוספים של קנים, שאפשרו את הטמעת "דוד" כמעט בכל יחידות האש של חיל התותחנים. נוסף לכך פותח דגם לשימוש חוליות מטאורולוגיה, שגם הוא היה מבוסס על חומרה זהה וקיצר את תהליכי הכנת הנתונים המטאורולוגיים משעות לדקות בשלב מאוחר יותר פותחו יחידות תצוגה בקנים, שאפשרו העברת נתוני הכינון לכל תותח ישירות מהמחשב לתותח, ללא מעורבות אנושית, ותוך ביסוס רוב הטעויות שקרו בעבר בהעברת נתונים אלה. היחידות הללו הוצעו לצה"ל שאף בדק אותן, אך לא רכש אותן (ראו בהמשך). אולם הן זכו להצלחה אצל לקוחות בחו"ל, שראו בהן תוספת חיונית ל"דוד". מאות יחידות "דוד" נמכרו למדינות שונות באסריקה הלטינית, רובן עם תצוגות בקנים.

מה אומר הלקוח?

חיל התותחנים הצטייד במערכות "דוד" החל משנת 1977, והן שימשו את החיל במשך כעשרים שנה. במהלך תקופה זו נעשה ב"דוד" שימוש מבצעי במבצע ליטני (1978) ובמלחמת לבנון הראשונה (1982), וכן במסגרת פעולות הביטחון השוטף. בסיום שלב ההצטיידות הראשון שלח הקתמ"ר (קצין התותחנים הראשי) מסמך לסיכום הפרויקט [7] שבסיסו נאמר:

13. הכנסת מחשבי ה"דוד" לחת"ם הביאה למהפכה [ההדגשות במקור] ביכולת החיל מן הבחימת הבאות:
א. ביצוע חישוב של נתוני ירייה מדויקים תוך הפחתה משמעותית לסיכוי של ירי בטעות גם בתנאי קרב.

14. מהפכה זו הושגה תודות לשיתוף פעולה הדוק עם רפא"ל כמפתח, אשר איפשר פיתוח מחשב ירי יעיל, אמין, קטן מימדים וזול. בכך היה צה"ל לצבא הראשון בעולם אשר הפעיל מחשבי ירי עד לרמת הסוללה. זאת בתקופה שמחשבי הירי האחרים היו מגושמים, צורכי הספק גדול ועם שיטת תפעול אשר לא התאימה באופן מיטבי לצורכי חת"ם ושיטות פעולתו.
15. לאור האמור לעיל, ניתן לדעתנו בהחלט לציין את מחשב ה"דוד" כמאמץ פיתוח יחיד במינו, אשר הצלחתו תרמה תרומה נכבדה לכושר פעולתו של חיל התותחנים.

באמצע שנות השמונים של המאה שעברה הוציא חת"ם דרישה מבצעית (דמ"ץ) למערכת חדשה: מתכ"ס (מערכת תקשורת וכינון סוללתית), שאפיונה מבוסס חלקית על יחידות התצוגה בקנה שנמסרו לניסוי, כמתואר לעיל, ומשולבת במערך ש"ב (שליטה ובקרה). ארבע חברות הגישו הצעות, וזכתה הצעה שהובילה אלביט עם רפא"ל כשותף. אולם השותפות לא התממשה, ואלביט ביצעה את הפרויקט לבדה. מערכות אלה נקלטו בחת"ם בהדרגה, ובסוף המאה הקודמת יצאו מחשבי "דוד" מהשירות. כך יצאה רפא"ל מהתמונה, ולא היה המשך לפרויקט המוצלח.

"דוד" היה אחד השימושים הראשונים בעולם למיקרו-מעבדים במערכת צבאית, והיה הדגמה בולטת של הפוטנציאל הגלום ברכיבים אלה. "דוד" ביצע את כל הפונקציות הדרושות ברמת הסוללה הארטילרית בקופסה אחת שגודלה ומחירה היו אחוזים בודדים מהגודל ומהמחיר של המערכות המקבילות שהיו בשימוש באותן שנים, ועם ביצועים זהים. במושגים של רפא"ל של אותם ימים זה היה פרויקט בינוני-קטן, אך מוצלח מאוד, וגם כניסה משמעותית לחילות היבשה, שלא היו אז צרכן מוביל של מוצרי רפא"ל.

לקחים לעתיד

לסיום, לקחים אחדים שניתן להפיק מסיפור זה:
1. קציני פרויקט מקצוענים וחיוביים הם תנאי הכרחי (גם אם לא מספיק) להצלחת פרויקט

כזה. סיפור "דוד" יכול לשמש דוגמה לשת"פ בונה בין נציגי המזמין למפתחים, והדבר כולל גם את התייחסות אנשי יחידת המו"פ במשרד הביטחון. כולם באמת רצו בהצלחת הפרויקט ואיש לא שם רגליים. אין פירוש הדבר שלא היו ויכוחים וחילוקי דעות, אך לאחר שהתקבלה החלטה - פעלו כולם לפיה ולא התעקשו להוכיח שנעשתה טעות.

2. פרויקט "דוד" הוא דוגמה קלסית למה שמכונה "Technology push" (לעומת Market pull). כפי שתואר בתחילת כתבה זו, הרעיון נולד במסגרת חיפושיו אחר שימוש למיקרו-מעבדים, שזה עתה עשו את צעדיהם הראשונים, ולא כמענה לצורך מוגדר. בחת"ם הכירו מערכות חישוב לארטילריה, אך הן שובצו בקטגוריה של גודל ומחיר שלא התאימה לרמת הסוללה, ולכן מחשב סוללתי היה אולי חלומם של כמה תותחנים, אך לא נחשב למשימה ריאלית. מצב זה הוא שהביא לכך שההצעה שלנו נפלה על אוזניים קשובות והתקבלה בהתלהבות. הלקח הוא, שלכל טכנולוגיה חדשה עדיף למצוא שימושים שכבר מצפים לבואה, ולא לנסות לכפות אותה על משתמשים לא מוכנים.

3. גם בפרויקט מוצלח אסור לנוח על זרי הדפנה, בוודאי לא כשהפרויקט מבוסס על טכנולוגיה שבה "דוד" מתחלף כל 2-3 שנים. ברפא"ל נכראה לא השקיעו מספיק בפיתוח הדור הבא ולא השכילו לוצל את דריסת הרגל שהושגה בחת"ם להמשך ההחדרה של ציוד שינצל את התפתחות הטכנולוגיה ולהרחבת ישימות המערכת. דווקא "אלביט" פרצו לסדק שנפתח, ובנו דרכו קו מוצרים שלם.

[1] הצעה למערכת חישוב "דוד" לחת"ם, מסמך רפא"ל 60-0099-00-73-02, 23/9/1973.
[2] מכונת חישוב סוללתית - דמ"ץ, מסמך מקתמ"ר מב-24712, 20/2/1974.
[3] מכונת חישוב סוללתית "דוד" - הצעת פיתוח, מסמך רפא"ל 01-05-74-050-00, 4/1974.
מס' ארכיון רפא"ל 131514 (74/84/50).
[4] מחשב ירי "דוד" - משימת פיתוח, מסמך יח"מו"פ מב-71614279, 11/6/1974.
[5] Hewlett-Packard Journal, June 1972.
[6] דוד - ניסוי אג"מי - ד"ח ביניים, מסמך מקתמ"ר מב-25879, 8/10/75.
[7] מחשב ירי ארטילרי "דוד" בחת"ם, מסמך מקתמ"ר 4/82, מס' ארכיון רפא"ל 132338 (82/99804/2001).