

איך מייצרים הודפים למנועי טילים בעזרת מערבל שוקולד...

על הקמת מתקן ה' ברפאל בשנים 1971-1974

ד"ר גלעד פורטונה

כתבה 23 בסדרת כתבות על תולדות רפאל בעריכת ד"ר ראובן אשל

מערכותינו.

הפיתוח התאפיין בחדשנות מתמדת בחומרי הגלם ובשינויים בתהליכי הייצור, במטרה להשיג שיפור מתמיד בדחף ליחידת משקל ויתר שליטה בפרופיל הדחף. שכן ביצועי מנוע משופרים הם הכרחיים כדי להתאים לדרישות המחמירות והולכות מצד מתכנני מערכות הטיילים. מאידך-גיסא, אופי הייצור בתעשייה הינו חיפוש סטנדרטיזציה ושימוש בחומרי גלם זמינים מסחרית וכל האפשר ללא שינויים. זאת כדי לאפשר ייצור הדיר וזול, תוך מינימום שינויים בחומרי הגלם ובתהליכים.

לא כל שיגעון חדשני שלנו הוא בר ייצור סדרתי

לקראת סוף שנות השישים מצאנו את עצמנו מפתחים הרכבים חדשניים של חומרי הדף, שלא ניתן היה עדיין לייצרם במתקני התעשייה. למרות העובדה שהידע הועבר לתעשייה, הובהר לנו על ידי מהנדסי הייצור שעלינו להגביל את תכנוני המערכות ליכולות הייצור של התעשייה ושלא כל שיגעון חדשני שלנו הוא בר ייצור סדרתי כראוננו. הצורך להתמודד ברפאל עם בעיית ייצור המנועים וההודפים הגיע לידי הכרה עקב הצהרה מפורשת של תעשייה על אי נכונותה לייצר את מנועי הטיל החדש "פיתון-3" בחומרים חדשים שפיתחנו.

המתקן - ציון דרך במעבר רפאל מפיתוח בלבד לייצור

סירוב זה של תעשייה הוא שהניע את מנכ"ל רפאל דאז, ד"ר זאב בונן, להחליט שאין מנוס מלהקים תשתית ייצור מינימלית ברפאל. בונן קרא לנו לתכנן מתקן ששמו, מתקן ה', העיד על הזהירות שלא לקרוא לילד בשמו המלא,



איור 2: המערבל היוקרתי תוצרת Baker Perkins



איור 1: מערבל השוקולד שנרכש ראשון בשל מחירו הזול

נפח ומשקל למערכות ההנחה והראש הקרבי, וככל שמפתחי ההודף והמנוע הרקטי שולטים יותר בטכנולוגיות התכנון והייצור, כך תגדלנה האפשרויות של מתכנני הטיילים להתאים את ביצועיהם ביתר יעילות למטרותיהם.

מהסבר קצר זה נדלג כעת אחורנית, אל סוף שנות השישים וראשית שנות השבעים

חדשנות כנגד סטנדרטיזציה

הפיתוח של חומרי ההדף והמנועים הרקטיים בשנות השישים בוצע במעבדת חומרים ואומת במתקן חצי חרושתי "פיילוט" בשטח כימיה שברפאל, ואילו הייצור בוצע במפעל "גבעון" של התעשייה הצבאית (תעשייה). באותם ימים, כל ידע חדש שפותח ברפאל הועבר לייצור בתעשיות בנושא ההודפים היינו נוסעים תכופות מרפאל לתעשייה/גבעון כדי לתאם העברת ידע על פיתוחים חדשים ולאשר את התאמת הייצור השוטף עבור

תחיל בהסבר קצר...

חומר הודף משמש כספק האנרגיה לכל מערכות הרקטות, הטיילים והלוויינים ויכול להיות מוצק או נוזל. במערכות של רפאל הוא בדרך כלל מוצק ומורכב מהדלק ומהחומר המחמצן הדרוש לבעירת הדלק. חומרי הדלק העיקריים הם פולימרים מיוחדים (תרכובות סינתטיות), המשמשים גם לחיבור כל המרכיבים ויוצרים את מבנה החומר ההודף. כלומר, שילוב של מרכיבי הפולימרים עם דלקים נוספים ועם אבקות המחמצן המוצק נתון תערובת היוצרת את הדחף למנועים בעת הבעיה.

בתכנון רקטות וטיילים חשוב למתכנן לקבל מהמנוע דחפים בעוצמות משתנות במהלך המעוף. לדוגמה, תכנון מערכת "כיפת ברזל" מחייב בעת השיגור דחף חזק מאוד, ובהמשך המעוף דחף משתנה בהתאם לשלבי היירוט. ככל שהמנוע יעיל יותר, ניתן להקצות יותר

המערך שנים רבות אחר כך. ראובן גלעד, שליחה את המתכננים בתכנון המפורט. משה (מוקי) גיל, מתכנן מנועים מדהים ואמיץ ביישום חדשנות, שתמך בפרויקט והיה שותף להתלבטויות, כמי שהכיר בצורך לאינטגרציה ולקח על עצמו את ניהול הייצור ברגעי המשבר. ניסים גואני ואדגאר נחמיאס, שני עובדי ייצור ותיקים שעצותיהם המעשיות ומסירותם ללא גבול היו חלק מהכיף ומהתחושה שכולנו משפחה אחת. בסגל הניהול יצוינו ד"ר גילי פורטונה, ראש הפרויקט ולימים ראש שטח הנהגה, אשר קבע את קונספט המתקן ושימש כאיש הקשר למשרדי התכנון; ד"ר מרסל קליין ז"ל, שהיה ראש מחלקת הנהגה וזיהה את הצורך בייצור הודפים בתוך רפאל, ומעל כולם - ד"ר זאב בונן ז"ל, מנכ"ל רפאל, בעל החזון ומי שהאמין בנו ונתן לנו, ילדים צעירים, להקים מערך ייצור ללא הרבה ידע מוקדם.

מנכ"ל התעש - כועס אבל מעריך

מנכ"ל התעשייה הצבאית היה אדם מדהים, בעל יכולות וחזון. סירובו להמשיך במודל של שימור פיתוח ההנהגה ברפאל והייצור בתעש היה מונע מהראון של שינוי מותג התעש, שכן תחשבת עובדי התעש הייתה שהופכים אותם ל"חוטבי עצים ושואבי מים" במערך התעשייה הביטחונית. בתום הקמת מתקן ה' הזמנו אותו לביקור, ולא אשכח את דבריו: "אני כועס עליכם על החלטתכם להקים את יכולות הייצור, אבל אני מעריך אתכם על דרך הביצוע היצירתית". שנים לאחר מכן, בתפקידי כמנהל חטיבת אווירומכניקה, וכממשיך יוזמתו של ראובן אשל, מנהל החטיבה לפני, זכיתי לניסיון נוסף לחדש מול התעש את המודל של פיתוח וייצור בטור. פיתחנו מערכות נשק שלמות בחטיבת אווירומכניקה ברפאל במימון של התעש, ובתמורה העברנו לתעש את ייצורן ומכירתן לצה"ל. במודל זה פותחו מספר מערכות בשנים 1978-1985. בסופו של דבר פנתה התעשייה הביטחונית להתמחויות וורטיקליות, כלומר כל גוף התמחה במערכות מסוימות, כולל אינטגרציה בבית של הפיתוח והייצור, על כל החדשנות והאיכות הנדרשות עבורי אישית היה זה שיעור בגיל צעיר המלווה אותי בתהליכי קבלת ההחלטות שנים רבות כאבן-דרך מנחה.

לקחים

הקמתו של מתקן ה' מהווה חלק חשוב במעבר של רפאל מייחידת מחקר ופיתוח ליחידה המספקת פתרונות כוללים עם יכולת מעבר מהיר מרעיון לפיתוח ולייצור באיכות, תוך שמירת יכולת החדשנות ויישומה הלכה למעשה. המסקנה היא שמפתח מערכות חייב להיות מודע ומחובר למערכות הייצור כדי שיוכל לתכנן חדשנות, אבל גם לאפשר ייצור אפקטיבי. היצרן חייב להיות בקשר הדוק עם המפתח כדי שיתיעצו בשלבי הייצור והפיתוח. בצורה זו ניתן למצות היטב את הישגי הפיתוח ואת הישגי טכנולוגיות הייצור לאופטימום לטובת המערכות ויישומן בשטח. כמו כן מבטיח המודל היזון חוזר מהלקוחות הצה"ליים למפתח לטובת דורות האמל"ח הבאים, שלא לדבר על יתרון ההנדסה המשולבת בקיצור לוחות זמנים. אין כמו אחריות כוללת.

חשיבותה של איכות...

לאור מגבלות התקציב חילקנו את הבינוי לשלבים. בשלב הראשון בינו את המבנים הקריטיים בשטח החם והסבנו את אחד המבנים כמבנה פיקוד זמני עם אפשרות הפעלה מרחוק. את פעולות ההכנה ה"קרות", המכילות את החומרים האינרטיים הלא מסוכנים, עשינו במבנה החצי חרושתי הישן. זו הייתה תקופה של חלוציות והתלהבות, כי כולנו נדרשנו למאמצים רבים של נסיעות פנימיות ואלתורים תוך עמידה בהתחייבויות כלפי יצרני הטיילים, אבל ידענו שיש לנו תוכנית ארוכת טווח והאמנו שככל שנצליח בייצור המאולתר בשלב א', כך יגדלו סיכוינו לקבלת התקציב להמשך.

לצורך הפיקוח על ההקמה שכרנו כמקובל מהנדס פיקוח מנוסה. לחץ הזמנים לסיום שלב א' היה גדול כי תחילת ייצור מנועי ה"פיתון" היה תלוי בנו כצואר בקבוק, ודווקא אז קיבלנו דיווח שריתוכי הצנרת לאורך קילומטרים רבים אינם מבוצעים ברמה הנדרשת. אנשי הקבלן טענו ש"ז לא חריגה קריטית וגם כך תחזיק הצנרת עשרות שנים". הבנו שאורך חיי הריתוכים כפי שבוצעו יהיה מוגבל. אמנם אז נראה היה שעשרות הקבלן להפסדים ואותנו לפיגור בלוח הזמנים. כינסנו דיונים פנימיים והחלטנו שגם מבחינה בטיחותית וגם להבטחת תקינות רבת שנים, חובתנו להתעקש. התברר שבכל מדינת ישראל יש רק שניים-שלושה קבלנים שיוזעים לרתך נירוסטה כזאת. לכן היה צורך להביא מומחה כזה למספר חודשי עבודה אצלנו, וכך היה. מאז חלפו ארבעים שנה, ואין ספק שההתעקשות הייתה במקום. ההתעקשות על איכות גם בביצוע הייתה נר לרגלנו בגישה לעבודה של אנשי רפאל. ל. כבר אז לא הבנו איך אפשר אחרת.

איך מפילים את החומות הארגוניות בין הפיתוח לייצור

התלבטנו מאוד איך להפעיל את מתקן ה' החדש לייצור חומרי ההדף. אופציה טבעית שבה התחלנו הייתה להשאיר את ניהול המתקן החצי חרושתי בידי קבוצת הפיתוח ולמנות מנהל למתקן החדש, וכך עשינו. תוך חודשים בודדים התברר הקושי בהפעלת מודל כזה, שבו קנאת הפיתוח לחדשנות שוב נתקלת ברצון הייצור לסטנדרטיזציה. זה היה רגע קשה כי למרות המרחק הקצר (קילומטרים בודדים) בין מתקן ה' והפיילוט הישן, נוצרו חומות ארגוניות בין הפיתוח לייצור, כמו שהיה בין רפאל לתעש. כראש השטח שיניתי את הארגון לניהול אינטגרטיבי של מתקן הפיילוט הישן עם המתקן החדש לייצור, כדי לחייב עבודת צוות משולבת בין שני המתקנים: חלוקת האחריות לפיתוח ולייצור של כל מרכיבי הייתה מעתה באחריות אחת - כך בבידודים, בהרכב ההודף ובטכנולוגיות הייצור הנבחרות לכל טיל.

מעט על האנשים שמאחורי הסיפור

לאורך כל הדרך הייתה זו עבודת צוות ששילב את הפיתוח והייצור השוטף עם בניית התשתיות החדשות בהתלהבות של עשייה ושירות למדינה. מספר שמות עולים בזיכרוני כדומינגוטיים בתרומתם לפרויקט: מנהל הביצוע של הפרויקט היה גדעון בן יוסף, הנדסאי נבון שידע לשלב את אהבת האדם עם אהבת העבודה והמשיך בניהול

כדי שלא יזוהה כמפעל לייצור הודפים. שכן באותה תקופה הייתה למשרד הביטחון מדיניות שלפיה על רפאל לעסוק בפיתוח בלבד, ואילו הייצור הסדרתי הוטל על התעשייה הצבאית ועל התעשייה האווירית. החדשות הטובות היו שעדיין נמצאו במכון דוד הרבה שטחים פנויים, ולכן נתנו לנו שטח גדול יחסית הרחק מאזורי הפיתוח במכון של סוף שנות השישים.

תכנון המתקן - מהיכן מתחילים?

מספר הנחות יסוד היו נר לרגלנו בעת התכנון של מתקן ה':

1. חלק גדול מהפעילות היא מסוכנת ולכן חילקנו את המתקן לאזור "קר", פתוח לתנועה חופשית, ולאזור "חם" שבו עשו פעולות מסוכנות המחייבות הפעלה ובקרה מרחוק, כולל מערכות טלוויזיה במעגל סגור;
2. אמנם התקציב מוגבל מאוד, אבל אנו נתכנן מראש כך שהמרחקים והשליטה יאפשרו גידול עתידי, כולל ייצור עצמי של חלק מהחומרים החיוניים, אם לא נמצא מקורות אספקה אמינים;
3. המתקנים יותאמו לטכנולוגיות הייצור הנוכחיות, אבל יתוכננו עם מרב האופציות לשרדוג הציוד והטכנולוגיות ללא השקעות בבינוי.

בשלב ראשון קיבלנו את האישור לעשות "פוגרמה" שבה ישבנו עם מתכננים אזרחיים, אבל שחקן המפתח היה מהנדס הבטיחות של רפאל שקבע לנו תקני בטיחות גבוהים, אשר קבעו במידה רבה את עלויות הבנייה. על-אף שנלחמנו עמו על הורדת העלויות, התעקשותו על תקנים בטיחותיים גבוהים מאפשרת שימוש במתקן גם היום, ארבעים שנה לאחר הקמתו!

בלית ברירה נעזרים במערבל שוקולד...

עקב מגבלות התקציב נדרשנו בשלב ההקמה הראשוני לרכוש ציוד זול. הציוד היקר ביותר והרגיש ביותר מבחינה בטיחותית של מתקנים מסוג זה הוא מערבול תרכובות ההודפים. המערבל נדרש לערבב תרכובות צמיגות מאוד, שבקושי זורמות ומחייבות מרווחים קטנים בין הסכינים לבין מכל המערבל ומערכות הנהגה מיוחדות (פלנטריות), שבהן לא רק להבי המערבל מסתובבים, אלא גם כל המערכת המחזיקה את הלהבים מסתובבת. המרווחים הקטנים חיוניים להשגת ערבוב תקין, אך פגיעה בזדפנות הכלי עלולה לגרום לבעירה ולניפוץ של הציוד. מערכת ייעודית למטרה זו, מתוצרת החברה היוקרתית Baker Perkins, הייתה אז יקרה מדי עבורנו. בלית ברירה אפינו מערכת חלופית שמשיגה את הביצועים ושכנענו מפעל לייצור מערבלי מזון תעשייתיים להתאים מערבול לייצור שוקולד לצרכינו (ראה איור 1). העלות ירדה לרבע מהמערכת הייעודית, והביצועים הנדרשים הושגו. לימים, כאשר רווח תקציב ההשקעות, התווספו למתקן מספר מערבולים יוקרתיים (כדוגמת זה המוצג באיור 2).

מערכת הבקרה מרחוק, מתוצרת חברת Foxborough, הייתה אף היא יקרה מדי. שכנענו חברת בקרה חדשה לייצר עבורנו ציוד בקרה ברבע ממחיר הציוד היוקרתי. למדנו שחוסר תקציב מחדד לעיתים את השכל ואת היכול.