

המפגש בין הצורך לפתרון

התוצאה של ניתוח הצרכים היא רשימה של מאפיינים עקרוניים. רשימה זו היא בסיס להצעת פתרונות ותכן קונספטואלי של המוצר או המערכת. המפגש בין הצורך לפתרון הוא נושא מורכב שמחייב הסתכלות מכמה כיוונים. לצורך הצגת הנושא נשתמש בדוגמה של טלפון חכם. טלפון חכם הוא מערכת מורכבת הכוללת מכלולי תצוגה, תוכנה, חומרה, תקשורת, אספקת אנרגייה (סוללה) ועוד. המכלולים המרכיבים את הטלפון החכם הם לעיתים מערכות בפני עצמם. מערכת התוכנה של הטלפון החכם כוללת את מערכת ההפעלה; אפליקציות מובנות, כמו שיחה, שליחת הודעות, צילום ועוד; אפליקציות נוספות שניתן להתקין עליה; המשתמש ועוד. מערכת החומרה של הטלפון החכם כוללת מעבד, זיכרון, התקני תקשורת, אנטנת RF ומכלולים נוספים. אך הטלפון חכם הוא חלק ממערכת גדולה יותר המספקת שירותי תקשורת סלולרית. חלקים נוספים במערכת זו הם אתרי שידור וקליטה, תוכנת בקרה וניטור לרמת הרשת, מוקדי תמיכה למשתמשים ועוד.

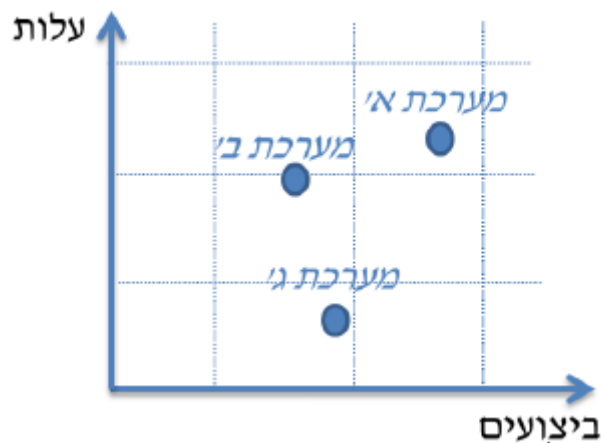
להנדסת מערכות יש משקל רב בכל רמה מערכתית: ברמת המכלול של הטלפון החכם, ברמת הטלפון החכם עצמו או ברמת מערכת שירותי התקשורת. בכל שלב מתבצע תיחום של המערכת והגדרה של הביצועים בהתאם לדרישות. שילוב מערכתי של המכלולים מרכיב את המערכת שיכולה להשתלב כאבן בניין ברמה הגבוהה יותר. מהות התפקיד של מהנדס המערכות היא לגרום לכך שהאמצעים המפותחים והנרכשים עונים לדרישות, מתוך הבנה עמוקה של הצרכים. אחד הכלים להתמודד עם משימה זו הוא ביצוע מפת דרכים טכנר מערכתית. במהלך הניתוח הטכנולוגיה אמורה לפגוש את הצורך באמצעות ניתוח דרכיוני מלמעלה למטה ומלמטה למעלה, כפי שמובא באיור להלן. בתהליך הניתוח מלמטה למעלה (כלומר מהטכנולוגיה אל רמת המערכת) בוחנים את האפשרויות הטכנולוגיות הזמינות. לדוגמה נתמקד בתחום של מערכות הגנה לרכב קרבי משוריין (רק"ם) מפני טילים נגד טנקים. שתיים מהמערכות הידועות בתחום זה הן מערכת מעיל רוח (מתוצרת חברת רפאל) ומערכת חץ דורבן (מתוצרת חברת אלביט-תעש).

הטכנולוגיות הבסיסיות הזמינות למערכות הגנה בתחום של גילוי שיגורי טילים נגד טנקים הן טכנולוגיות אופטיות, למשל SWIR (Short-Wave Infra-Red) או גלאי תרמי, מכ"מיות (מכ"ם סורק או מכ"ם בוהה) ואחרות. כל טכנולוגיה ניתנת לשילוב (בדרך כלל באמצעות חברה או מכון מחקר) לכדי מוצר או תת-מכלול, וניתן לבחון גם שילובים שאינם קיימים עדיין. לאחר שלב המכלולים מגיעה רמת המערכת שבה יש הקצאה לתחומים פונקציונליים. במקרה של מערכות הגנה יכולים תחומים אלו להיות הגילוי, הנטרול, הבקרה ועוד. בחירה של טכנולוגיית נטרול לדוגמה, מיירט (במערכת "חץ דורבן") או רסס (במערכת "מעיל רוח") עשויה לאלץ תכן מסוים ולהשליך על כלל הפרמטרים המערכתיים והמבצעיים.



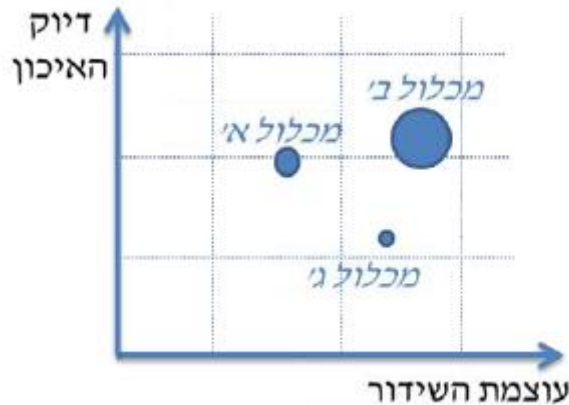
בתהליך הניתוח מלמעלה למטה מתחילים מהגדרת הצורך המבצעי, ובהתייחס למערכות הגנה צורך אפשרי הוא "מעבר רכב קרבי משוריין בסביבה רוויית טילים נגד טנקים". הצורך אמור להיות מוגדר במושגים המנותקים מהפתרון. אם הצורך מנוסח כך, יאפשר הניסוח בחינה של כמה גישות מלבד מערכת הגנה, כמו שיפור יכולות המודיעין והאש. אולם הצורך אמור להיות גם תחום יחסית, אחרת הגדרה, כמו "הכרעה בתמרון היבשתי" עשויה להביא לדיון רחב מדי ולא תוכל לשמש לניתוח הנדסי יעיל.

הגדרה מדויקת וממוקדת של הצורך מאפשרת בחינה של מערכות אפשריות והתועלת המבצעית שלהן ברמת על ולאחר מכן ירידה לפרטים של מכלולים וטכנולוגיות. בסיכום של תהליכי הניתוח מלמעלה למטה ומלמעלה למטה אמורה להתקבל אותה מפת דרכים שמאפשרת לראות את כל הפתרונות האפשריים ולנווט אל החלופה האופטימלית תוך שקלול כל האפשרויות האחרות. כל חלופה כזו תהיה מורכבת משילוב של מכלולים. לדוגמה, חלופה מערכתית א' יכולה לכלול מכלול גילוי אופטי המבוסס על טכנולוגיית SWIR. חלופה ב' יכולה לכלול מכלול גילוי המבוסס על מכ"ם סורק ומכלול יירוט מבוסס רסס, וחלופה ג' יכולה לכלול גלאי תרמי ומיירט הלם. התצוגה הגרפית של הרמה העליונה (המערכתית) במפת הדרכים היא תרשים של עלות מול ביצועים הדומה לאיור הבא.



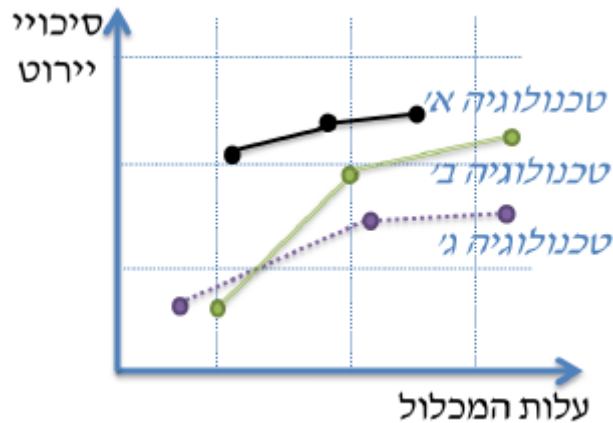
מפת דרכים: תרשים עלות מול ביצועים

כמובן שכחלק ממפת הדרכים יש אפשרות לייצר תרשימים דומים ברמות נמוכות וטכניות יותר. למשל אם מדברים על מכלול גילוי מכ"מי, אפשר להציג גרף של דיוק האיכון מול עוצמת השידור ואולי אפילו לייצג את העלות היחסית של כל חלופה באמצעות גודל הנקודה בתרשים, כמו באיור הבא. גודל העיגול עבור כל מכלול מייצג את העלות היחסית שלו. כאן, כמו באיור הקודם, הקווים האופקיים והאנכיים שולבו לצורך סיוע בבחירה בין חלופות. תמיד נעדיף חלופה הנמצאת גבוה יותר מחלופה אחרת על אותו קו אנכי. באופן דומה, בהנחה ששאר הפרמטרים שקולים, אין הגיון בבחירת חלופה הנמצאת שמאלה יותר מחלופה אחרת על אותו קו אופקי. כמובן שכמו שכבר ראינו בכמה דוגמאות לעיל, הבחירה איננה תהליך טכני בלבד ויש להתחשב בכל הפרמטרים ובתרחישי השימוש.



מפת דרכים - דיוק האיכון מול עוצמת השידור

דוגמה נוספת נמצאת באיור הבא. כאן התרשים מציין את התלות בין ביצועי היירוט (בהנחות מסוימות על מאפיינים אחרים של המערכת, כמובן) מול עלות המכלול המבוסס על אחת משלוש הטכנולוגיות בתרשים. בצורה דומה ניתן לערוך תרשימים של כל פרמטר רלוונטי כדי להגיע לחקר ממצה של חלופות.



מפת דרכים - סיכויי יירוט מול עלות המכלול

הצורך מתפתח עם התקדמות הפתרון, והפתרון משתנה יחד עם ניתוח הצורך. לכן התהליך המיטבי בהנדסת מערכות נדרש להיות איטרטיבי ודרכיוני מלמעלה-למטה ומלמטה-למעלה. מצד אחד כדאי לאתגר כל דרישה ולשאול את השאלות: מה המינימום שיספק את הלקוח? מה מקור הדרישה? והאם ניתן להסתפק במוצר מדף, אפילו אם הוא לא עונה על חלק מהצורך? מצד שני יש לעקוב אחרי הזדמנויות טכנולוגיות ולעדכן במידת הנדרש את האפיון והארכיטקטורה של הפתרון.

דוגמה לאתגור דרישה מוצלח אפשר לראות בפרויקט "אלומה" שבוצע בפיקוד העורף. מערכת "אלומה" מיועדת לאיתור לכודים על בסיס איכון מכשירי סלולר מתחת להריסות בהסתברות מסוימת. הסתברות זו מוגדרת, כמו במערכות גילוי רבות, באמצעות הפרמטרים האלה: הסתברות לגילוי לכוד שאכן נמצא מתחת להריסות, הסתברות לאיגילוי של אותו לכוד והסתברות לגילוי שווא. דרישות אלו מכתיבות, בין היתר, את משך העבודה בכל אתר הרס, שהוא פרמטר קריטי, מכיוון שרוב הסיכויים לחילוץ לכודים חיים הם ב"יממת הזהב" - 24 השעות הראשונות ממועד קרות האירוע.

ברור שאם מקטינים את זמן הסריקה של כל אתר בתרחיש רעידת אדמה, אפשר להגיע לניצולים רבים יותר. לכן אם עושים ניתוח תרחיש נכון ומאתגרים את הדרישה, אפשר להתייחס למערכת מכיוון אחר ולדרוש למשל שלילת הימצאות לכודים בהסתברות מסוימת תוך זמן נתון. אם, לצורך העניין, צפוי שב-90% מהאתרים לא יהיו לכודים, ואפשר להגיע לשלילת הימצאות לכודים תוך זמן קצר הרבה יותר ממחזור החיפוש המלא של המערכת, אזי אפשר יהיה להגיע לקצב מהיר יותר של סריקת שטחים גדולים. דוגמה טובה לבחירה בין חלופות טכנולוגיות בשלבי ייזום היא מערכת "כיפת ברזל". שתיים מההצעות שהוגשו בשלבים הראשוניים של ניתוח המערכת במשרד הביטחון היו שדרוג וירי אנכי של טילים נגד טנקים מצד אחד והתאמות של רקטות ארטילריות גדולות מצד שני. מלבד ההצלחה הברורה של המערכת הנוכחית שנבחרה לבסוף, כל בחירה אחרת של טכנולוגיה, מכלול ומוצר בסיס הייתה משנה את ביצועי המערכת באופן משמעותי.

קביעת פרמטרי תכן מרכזיים

קביעת פרמטרי תכן מרכזיים היא משימה שבה מהנדס המערכות מעבד את המאפיינים שנקבעו למוצר או למערכת, ומייצר חבילות עבודה ומכלולים עקרוניים הנדרשים למילוי המשימה. פעמים רבות פרמטרי התכן קשורים בדרישות הפונקציונליות מהמוצר, כגון אופן ההנעה (חשמלי, מבוסס מנוע בעירה פנימית או פניאומטי). פרמטרים נוספים מתייחסים להתאמה למשתמש, נוחות תפעול וממשקים. נושא חשוב בתכן מערכות הוא גישת תכן לעלות - DTC (Design To Cost). בגישה זו עלות הייצור והמוצר הסופי נכללת בין השיקולים לבחירות בין מכלולים ומרכיבים כבר מהשלב ההתחלתי של התכן. בספרות המקצועית יש מקורות רבים המתארים קבוצות של דרישות ממוצרים ומערכות. אנו נביא את הרשימה הבאה, לפי תקן iso-iec-ieee-29148:2011:

1. דרישות פונקציונליות;
 2. דרישות ביצועים;
 3. דרישות שימושיות (כחלק מדרישות ביצועים);
 4. דרישות ממשקים;
 5. אילוצי תכן;
 6. דרישות תהליך;
 7. דרישות לא פונקציונליות, כולל דרישות איכות ודרישות גורמי אנוש.
- מול משפחות דרישות אלו המשימה של מהנדס המערכות בשלב זה היא לבנות רשימה של מאפיינים או פרמטרים מרכזיים במערכת. גורמים אלו צריכים לבטא בצורה טובה את הארכיטקטורה העקרונית של המערכת והפונקציונליות שלה, אך להיות ממוקדים למספר מועט של נושאים. בתלות במהות ובמורכבות

המערכת, נהוג לעבוד בדרך כלל עם חמישה עד עשרה מאפיינים מרכזיים. לצורך הדוגמה נתבונן בפרמטרי תכן מרכזיים עבור פיתוח רחפן חדש. המשימה היא לפרוס במספר מאפיינים מצומצם את שיקולי התכן המרכזיים. שיקולים אלו נגזרים כמובן מניתוח הצרכים, כמו זמן מעוף, נוחות תפעול ואיכות צילום. לפיכך הפרמטרים שיקולים להופיע במקרה זה הם אופן ההנעה (מספר מנועים), שיטת התקשורת מיחידת השליטה לרחפן, שיטת השליטה (אמצעי הניהוג למפעיל) והשיטה לשמירת גובה (בהיעדר פקודות מהמפעיל).

המיקוד בקביעת פרמטרי תכן מרכזיים הוא משימה שדורשת ידע וניסיון מערכתי לצד בקיאות טכנית במאפיינים של הפתרונות. הפרמטרים צריכים לבטא פונקציונליות ולא שמות למכלולים ספציפיים. למשל הפרמטר המתאים באפיון טלפון סלולרי הוא פקדים ותצוגות ולא מסך מגע.

הצגת מרחב הפתרונות - טבלה מורפולוגית

טבלה מורפולוגית היא שיטה המאפשרת לייצר חלופות מערכתיות בצורה שיטתית. זהו תרשים המאפשר להציג בצורה ויזואלית את עיקרי המכלולים הפונקציונליים במערכת ולבחון שילובים שונים של מכלולים. הכותרות בשורות הטבלה הן המאפיינים המערכתיים. סדר המכלולים בטבלה עשוי להיות בסדר החשיבות, סדר הפעולה או סדר משמעותי אחר.

מול כל מאפיין מופיעות אפשרויות המימוש, כלומר מכלולים שעשויים למלא את הפונקציה הנדרשת. לדוגמה, עבור מאפיין של תאורה החלופות יכולות להיות נורות ליבון, תאורת LED, פלואורסצנט ועוד. ניתן לערוך את הטבלה בצורה מילולית, אך מקובל לקבוע צלמית (אייקון) או תמונה בכל משבצת ולציין את שם המכלול מתחתיו.

דוגמה לטבלה מורפולוגית עבור פרויקט פיתוח רחפן מובאת בטבלה להלן.

חלופות					מאפיין
8	6	4	2	1	הנעה (מס' מנועים)
	לוויינית	חוטית	WiFi	סלולר	תקשורת
	מציאות מדומה (VR)	ג'ויסטיק	מחשב לוח	טלפון חכם	שליטה
	עיבוד תמונה	אינרציאלי (INS)	לוויני (GPS)	ללא	שמירת גובה

הטבלה המתקבלת מכילה מפה של הפתרונות האפשריים למשימות הפונקציונליות. כעת ניתן לגבש חלופות מערכתיות באמצעות בחירה של מכלול אחד (או יותר) עבור כל פרמטר. מספר החלופות הכולל עשוי להיות גבוה מאוד - טבלה של 5x5 מכילה מעל 3000 חלופות וטבלה של 10x10 מכילה למעשה לפחות 10^{10} אפשרויות שונות. לכן יש להתמקד בחלופות המבטיחות ביותר מבחינת יעדי המערכת.

חלופות כאלו יכולות להיות מבוססות על רכיבים קיימים, בעלות ביצועים מיטביים, מחיר נמוך או עם הדגש על פרמטר או אילוץ אחר רלוונטי. אפשר להתמקד בפרמטרים שהם בעלי השפעה קריטית על אופן הפעולה ולבחור פרמטרים שבהם אין שונות גדולה בשלב מאוחר יותר. מקובל שטבלה מורפולוגית תכלול עד 10 מכלולים או מערכות שונים לכל מאפיין. חלופות מתקבלות באמצעות בחירת מכלול או מספר מכלולים עבור

כל מאפיין. התצוגה הוויזואלית של החלופות היא מסלולים על התרשים.

חלופות				מאפיין
8	6	4 ★	2 ◇	1 ■
	לויינית	חוטית	WiFi	סלולר
	VR	ויסטיק	טאבלט	טלפון חכם
	עיבוד תמונה	INS	GPS	ללא

- חלופה א'
- ★ חלופה ב'
- ◇ חלופה ג'

גיבוש חלופות בטבלה המורפולוגית

בגיבוש החלופה ניתן לבחור יותר מרכיב אחד בכל פרמטר, כשם שניתן לבחור גם מזגן וגם תנור חימום כשיטות חימום בבניית בית חדש. כך, חלופה ב' כוללת גם מחשב לוח וגם ג'ויסטיק כאמצעי שליטה ברחפן. כמובן שעבור כל קונספט פתרון נדרש לבחון את תפיסת ההפעלה שלו, כדי לוודא שמדובר בשילוב הגיוני של רכיבים. החלופות שהתקבלו מהטבלה המורפולוגית מובאים בטבלה הבאה:

מאפיין	חלופה א'	חלופה ב'	חלופה ג'
הנעה (מס' מנועים)	1	4	2
תקשורת	סלולר	WiFi	לויינית
שליטה	VR	מחשב לוח וג'ויסטיק	מחשב לוח
שמירת גובה	עיבוד תמונה	ללא	GPS

התרומה המרכזית של הטבלה המורפולוגית היא ביכולת לאפשר פתרונות יצירתיים ויעילים. הצורך להציג כמה מכלולים אופציונליים מול כל מאפיין תכן מחייב חשיבה שונה מהקיים ומהאינטואיטיבי. גיבוש קונספטים לפתרון מאפשר בחינה השוואתית ביניהם. צורת הצגה זו מחדדת את היתרונות והחסרונות של כל חלופה ומאפשרת מיזוג של החלופות ליצירת קונספט פתרון אופטימלי.

ניתוח חלופות - טבלת PUGH²⁴

טבלת PUGH, או בשמה המלא, שיטת PUGH לבחירת חלופות (PUGH Concept Selection Method) היא שיטה כמותית לדירוג של חלופות בהתאם לקריטריונים מרובים. השורות בטבלת PUGH הן המאפיינים שעל־פיהם תישפטנה החלופות. העמודות הן החלופות עצמן. בביצוע טבלת PUGH למערכת שלמה ניתן להתייחס לפרמטרים של ביצועים, לוחות זמנים, עלות, סיכונים ופרמטרים נוספים לפי הצורך. ניתן גם להוסיף השוואה או הערכה כללית למקרה שיש פרמטרים איכותניים משמעותיים. כמו כן ניתן לציין משקל לכל מאפיין ולשקלל את הציונים בהתאם.

²⁴ הטבלה נקראת על שם ממציאה, Stuart Pugh.

דוגמה לטבלת הערכה בין חלופות מופיעה להלן:

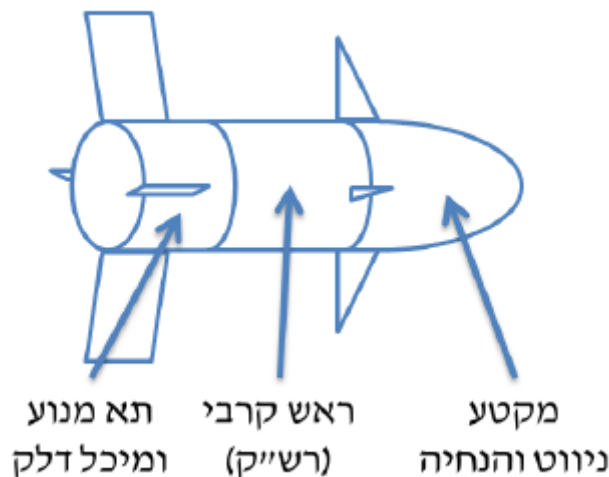
פתרונות				משקל	מאפיין
...	פתרון ג'	פתרון ב'	פתרון א'		
				30%	ביצועים
				20%	לוחות זמנים
				...	עלות
				...	סיכונים
			
				סיכום הערכה	
				הערות נוספות	

לא כל מאפיין מתאים לטבלת PUGH. יש חלופות ארכיטקטוניות שנדרש לבררן מול הצורך והתרחישים לפני פירוטן למאפיינים. לדוגמה, פרויקט מתקן אימונים לכוחות רפואה של פיקוד העורף עבור תרגול אירועים עם נפגעים רבים. במקרה זה החלופות העקרוניות למימוש הן פיתוח עצמי או מיקור חוץ, שימוש במבנה קיים או הקמת מבנה חדש, שימוש במתקן אימון נייח או הקמת יכולת לאימון נייד. נדרש לבחור מבין חלופות עקרוניות במקרה זה על בסיס התרחישים ורק לאחר מכן לקבוע את המאפיינים. נהוג לכלול בטבלת PUGH השוואה לחלופת ייחוס (המכונה DATUM - נתון - צורת היחיד של המילה האנגלית הידועה DATA). בדרך כלל נהוג לקחת בתור חלופת ייחוס את הפתרון הקיים או את אחד הפתרונות הממוצעים. מול כל דרישה תקבל החלופה +2, אם היא טובה הרבה יותר מחלופת ה-DATUM או +1, אם היא מעט טובה יותר ממנה. אם החלופות דומות, הציון יהיה 0. אם החלופה מעט פחות טובה מהקיים, היא תקבל -1, ואם היא משמעותית פחות טובה הציון שלה יהיה -2 באותו הפרמטר. בתחתית הטבלה יסוכם הציונים ויתקבל ציון כולל עבור כל חלופה. דוגמה לטבלת PUGH עבור פיתוח רחפן חדש מופיעה בטבלה להלן. בטבלה זו מופיעות שלוש החלופות שנוצרו בטבלה המורפולוגית לצד עמודת DATUM - במקרה זה מוצר ייחוס קיים ומוכר (DJI Phantom 4 Pro). החלופות מקבלות ציון יחסי לחלופת ה-DATUM לפי שלושה מאפיינים: איכות שליטה, קלות ניהוג ואיכות שידור. סימון '+' מציין מזכה ב-2 נקודות עבור תכונה זו, (+) שווה נקודה אחת, (-) שווה 1- נקודות וסימון '-' שווה 2- נקודות עבור תכונה זו. השורה התחתונה מציגה את הניקוד עבור החלופות. לפיכך חלופה ב' היא המועדפת מאחר וקיבלה את הציון המרבי (2).

DATUM - Dji Phantom 4 Pro	חלופה ג'	חלופה ב'	חלופה א'	מאפיין
4	2	4	1	הנעה (מס' מנועים)
WiFi	לוויינית	WiFi	סלולר	תקשורת
ג'ויסטיק וטלפון חכם	מחשב לוח	מחשב לוח וג'ויסטיק	VR	שליטה
GPS	GPS	ללא	עיבוד תמונה	שמירת גובה
0	-	+	+	איכות שליטה
0	0	-	(-)	קלות ניהוג
0	(-)	0	(-)	איכות שידור
0	-1	2	0	סה"כ

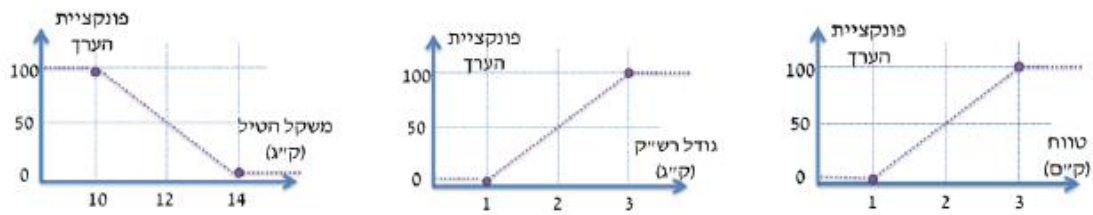
העבודה עם טבלת PUGH אינה מסתיימת בבחירת החלופה שקיבלה את הציון הגבוה ביותר. הניתוחים ההנדסיים והתצוגות משמשים לדיון ולהערכה של החלופות. מתחיל תהליך חשיבה שמטרתו מיזוג פתרונות מיטביים. התהליך מיועד לעידון הקונספט ושילוב אלמנטים מקונספטים אחרים היכולים לשפר אותו. לבסוף, לאחר גיבוש החלופה הנבחרת, מבוצע סיכום ואישור תוכנית עבודה למימוש. ניתוח חלופות תלוי באופן הדוק בעלויות של המערכת. הרחבה בנושא חשיבה כלכלית בהנדסת מערכות הופיעה מוקדם יותר בספר במאמר מאת חיים ברגר.

דוגמה לניתוח מערכתי: פיתוח טיל לחיל הרגלים:



תיאור סכמתי של טיל

משקל הטיל צריך להיות נמוך למדי, כדי שהחייילים יוכלו לשאת אותו למרחקים. הטיל נדרש לפגוע במטרות בטווחים מסוימים המתאימים למתאר הייחוס בלחימה של חיילי חי"ר. לבסוף הטיל נועד לייצר אפקט הרג מסוים בעת הפגיעה, כלומר לשאת רש"ק בגודל שיאפשר פגיעה במטרות הרלוונטיות.



פונקציות ערך עבור פיתוח טיל

בפרויקט מציאותי סביר להניח שהמאפיינים אינם בלתי תלויים בינם وبين עצמם. טווח הטיל תלוי במשקל, והמשקל תלוי בכמות חומר נפץ. כדי להביא כמות זהה של חומר נפץ לטווח גדול יותר או כמות חומר נפץ גדולה יותר לטווח זהה נדרש להגדיל את כמות הדלק למנוע, כלומר את משקל הטיל. כמות חומר נפץ משפיעה על רדיוס הרג הקשור, בין היתר, למנגנון הביות: ניתן להקל בדרישות הדיוק בתנאי שיש יותר חומר נפץ שישמיד את המטרה גם אם הפגיעה תהיה בסמוך אליה, נניח במרחק של מטר או שניים.

אם נתבונן בפונקציית הערך עבור טווח הטיל בדוגמה שלנו, נראה שערך הפונקציה הוא 100% אם הטיל פוגע במטרות במרחק 3 קילומטרים או למעלה מכך. אם הטיל מגיע ל-1 ק"מ או פחות, פונקציית הערך היא 0%. בין 1 ק"מ ל-3 ק"מ פונקציית הערך היא ליניארית: למשל, הערך עבור 2 ק"מ הוא 50%. פונקציות הערך עבור גודל הרש"ק בנויה בצורה דומה: 0% עבור 1 ק"ג רש"ק ומטה, 100% עבור 3 ק"ג רש"ק ומעלה, וקו ליניארי בין ערכים אלו. הפונקציה עבור משקל הטיל בנויה בצורה הפוכה, כי המטרה היא לצמצם את המשקל: 0% עבור 14 ק"ג ומעלה, 100% עבור 10 ק"ג ומטה, וקו ליניארי בין ערכים אלו.

כעת, נבנה את התכנון האופטימלי של המערכת. לצורך הדוגמה נניח הנתונים האלה:

הוספת משקל רש"ק מחייבת הגדלת מנוע והוספת דלק באותו יחס; כלומר הוספת 1 ק"ג במשקל רש"ק גוררת עליה של 1 ק"ג במשקל הדלק ובהתאם עליה כוללת של 2 ק"ג במשקל הטיל ללא שינוי טווח; הוספה של כל 1 ק"מ טווח ללא שינוי גודל רש"ק גוררת עליה של 2 ק"ג במשקל הטיל הכולל (הגדלת מנוע והוספת דלק).

נקודת העבודה הבסיסית לצורך הדוגמה היא: טיל במשקל של 10 ק"ג מביא רש"ק של 1 ק"ג למרחק 1 ק"מ. הגדלה של רש"ק או טווח גוררת עליה במשקל בהתאם לנתונים למעלה. בהנחה זו ניתן לבנות חלופות עקרוניות שמובאות בטבלה הבאה, כולל שביעות רצון בהתאם לפונקציות הערך. בחלק הימני של הטבלה ('אפשרויות') מובאות כמה חלופות של משקל, גודל רש"ק וטווח שמולן בחלק השמאלי של הטבלה ('שביעות רצון') מובאת פונקציית הערך הרלוונטית.

שביעות רצון			חלופות		
טווח	רש"ק	משקל	טווח (ק"מ)	רש"ק (ק"ג)	משקל (ק"ג)
0%	0%	100%	1	1	10
0%	50%	50%	1	2	12
50%	0%	50%	2	1	12
0%	100%	0%	1	3	14
50%	50%	0%	2	2	14
100%	0%	0%	3	1	14

מהטבלה נראה מצב אופייני בפרויקטים מציאותיים: לא ניתן להשיג שביעות רצון מלאה בכלל הפרמטרים יחדיו.

בנוסף לכך, אם כל שלושת הפרמטרים (משקל, גודל רש"ק וטווח) זהים בערכם, לכאורה אין הבדל בשביעות הרצון הכללית מבחינת הלקוח (שמסתכמת ב-33% עבור כל אחת מ-6 החלופות). בפרויקט מציאותי יש פרמטרים רבים נוספים היכולים להשפיע על הבחירה, כמו אמינות, בטיחות או ייצור, היכולים להיות שונים מהותית בין החלופות. לעיתים לאורך הפרויקט מחליטים החלטות איכותניות המכוונות את הפיתוח. למשל שינוי פונקציות הערך המקוריות בעקבות הנחיית לקוח לטווח המקסימלי האפשרי כדי להתמודד עם איומים עתידיים או משקל מינימלי בגלל ציוד נוסף שהחייל נדרש לשאת. המשקל של כל פרמטר הוא בדרך כלל שונה - אם הוא נקבע באופן איכותני ואם הוא נקבע לאחר תהליך NGT או QFD.

במקרה הכללי, הקשרים בין הפרמטרים הם מורכבים יותר, ופונקציות הערך הן לא ליניאריות. ייתכן שהגדלת טווח ב-1 ק"מ עבור טיל במשקל התחלתי של 10 ק"ג תגרור הוספת 2 ק"ג למשקלו, אך אם הטיל שוקל 12 ק"ג, תידרש תוספת של 3,4 או אפילו 5 ק"ג כדי להגדיל את הטווח במרחק זהה.

תהליך ניתוח הצורך - המעבר מצרכים למאפיינים - הוא שלב מהותי בהנדסת מערכות. שיטת בית האיכות מאפשרת לקבוע את המאפיינים של המוצר או המערכת ואת ערכי היעד שלהם. מודל QFD מיועד לאפשר מקסימום ערך בהתאם להשפעה של מאפיין מסוים על הצורך בהתחשב בפונקציית הערך. ניתוח בית האיכות שייך לעולם ניתוח הצורך, ולכן מומלץ להימנע ככל האפשר מהיצמדות לפתרונות ספציפיים. הצלחת השיטה תלויה במעורבות של כלל בעלי העניין הרלוונטיים בניתוח הצרכים, גיבוש המאפיינים והערכתם.

כל צורך הוא פתרון ברמה גבוהה יותר. בדוגמה של הטיל הצורך של פגיעה מדויקת במטרות לטווח קצר-בינוני, שממנו התחלנו את התיאור, יכול להיענות באמצעות מוצרים שונים מעבר לטיל מדויק עבור חיל רגלים. לדוגמה, ניתן להשיג את המטרה באמצעות ירי מרגמה מדויקת. אפשרות אחרת היא טילים מדויקים מהאוויר.

המפגש בין הצורך והפתרון מכניס אלמנטים נוספים למשוואה. כעת ניתן להתייחס להזדמנויות טכנולוגיות שונות היכולות לשפר את הביצועים של אחד או יותר מהמכלולים. למשל ניתן לחשוב על מנגנון הנעה חדשני עם צריכת דלק קטנה יותר שעשוי לאפשר להגדיל את הרש"ק ללא פגיעה בפרמטרים טכניים אחרים אך אולי

יעלה את מחיר הטיל. יכולת אפשרית אחרת מבחינה מערכתית היא העברת מנגנון ההנחיה למשגר - לדוגמה טיל מונחה קרן לייזר ולא מתביית אוטומטית. לתצורה זו תהיינה השלכות מבחינת תורת ההפעלה. למשל לא ניתן יהיה להשתמש ביכולת "שגר ושכח", אלא הכוון יצטרך להיות נעול על המטרה במשך כל זמן המעוף. כדי להעריך את החלופות, יש להגדיר מדד כמותי שיבטא את טיב ההתאמה של כל חלופה ליעדי המערכת, ולבחור את החלופה המתאימה ביותר. המפגש בין הצורך לפתרון מציינ למעשה את המעבר בין משפך האפשרויות למנהרת המימוש, כפי שהוצג קודם לכן בספר. זהו נושא מהותי להגדרת המערכת שקובע במובנים רבים את התאמתה למשימה והצלחתה באופן כללי. לפני המעבר לפרק הבא העוסק באפיון מערכתי, חשוב לחזור ולעייין בתהליך הניתוח המערכתי שנעשה עד כה, להתייעץ, ליישם לקחים מהעבר ולעדכן את נקודת העבודה במידת הצורך. עם תחילת תהליך המימוש של החלופה המומלצת מרחב האפשרויות לביצוע התאמות יורד והעלויות של כל שינוי עולות משמעותית.

הרחבה: ILS כחלק אינטגרלי של הנדסת מערכות/עמי הראל²⁵

הנדסת מערכות מעצם הגדרתה עוסקת באופטימיזציה. אומנות החלופות (The Art of Tradeoffs) היא האחריות המקצועית של מהנדס המערכות. קונספט של מוצר חדש שזה עתה נולד, דורש איזון עדין בין כל ממדיו. דרישות Time To Market קצר, ובלשון של מוצרים ממשפחת אמל"ח: מימושו המהיר של צורך, עלולים לדחוף מוצר לא בשל לשימוש בידי הלקוח. הצלחה של רגעי שימוש ראשוניים עלולה להביא להתעלמות מחלק חשוב של אורך או מחזור החיים ובסופו של דבר לקונספט שאינו אופטימלי. מגוון הקונספטים לאחזקה הוא רחב מאוד, ולכן יש להגדיר את הקונספט המתאים ממש בתחילת המסע. לפיכך אחזקה היא צורך שאינו חשוב יותר או פחות מכל הצרכים האחרים היוצרים את מערך הצרכים האופטימלי שמאפיין מוצר. על-פי המדריך להנדסת מערכות:²⁶ "מהנדסי מערכות צריכים לשקול נושאים כמו אחזקות, ייצוריות (יכולת ייצור) ותמיכתיות (יכולת תמיכה) עם תחילת הפרויקט בשלב הקונספט. מאוחר מדי להוסיף את אלה בשלב הייצור". קונספט אחזקה שנבחר בטעות, או תכן מושלם שהזניח אחזקה, עלול להפוך אותו ל"חוליה החלשה" במערכת שאינה אופטימלית, והיא עשויה לאבד את השוק למתחרים. חבילה מתאימה של Integrated Logistics Support - ILS (תמיכה כוללת במוצר - תכ"ם) מכסה כל היבט הקשור לחיי השירות של המוצר ומכילה את כל ההיבטים שאינם המוצר עצמו. השוק מצפה למוצר טוב. לעומתו, המידע אודות מוצר רע הוא ויראלי! היעדר חבילת ILS מתאימה משפיע על המוניטין של החברה ובהתאם על התוצאות העסקיות ועל רצף הזמנות ההמשך. חבילת ILS מתאימה היא גורם הכרחי להצלחה של מוצר.

אופטימיזציה של פיתוח מוצר שאינו זקוק לאחזקה ("נטולי אחזקה" או 'Maintenance-free') מאתגר מאוד בצורך באיזון נכון בין אורך חייו המתוכנן לכשל הראשון הצפוי. מוצרים "נטולי אחזקה" יהיו רק אחוז קטן ממגוון המוצרים. גישה בוגרת תביא בחשבון כשלים כחלק טבעי במחזור החיים של המוצר. השאלות הרלוונטיות הופכות להיות: "איך המוצר ייכשל" "באילו תנאים ייכשל?" ו"מתי הוא ייכשל?". או אז יש לנסות להגדיר את

²⁵ אל"ם (מיל) עמי הראל הוא מהנדס מערכות בכיר, בעל רקע בהובלת פרויקטים בתעשיות ביטחוניות בארץ ומול לקוחות בחו"ל. בין תפקידיו בשירות הצבאי פיקד על יחידות אחזקה בשדה ובמרכז השיקום והאחזקה.

²⁶ The SE Handbook, 4th Edition, Wiley 2015, 3.6.5.3 p. 46: "Systems engineers need to consider issues like maintainability, producibility, and supportability at the project outset in the concept stage. It is too late to add these in during the production stage. One must keep in mind that it 'cannot be right if you did not design it to be'".

אופני הכשל ולהכין פתרונות להגדלת משך התקופה החופשית מכשל חדש, וההגדרה דורשת איזון עדין בין כל הממדים של קונספט.

חוסר נתונים או מידע משירות של מוצר בשימוש מבצעי מאפיין את תקופת שירותו הראשונה. בתקופה ראשונה זו היעדר המידע עלול לבסס את בחירת קונספט האחזקה על הנחות שגויות. קושי זה מתגבר אם המוצר נטול עקיבות (תיעוד עוקב אחר המוצר) ו"היסטוריה מתועדת", ללא תיעוד ייצור, ובדרך כלל ללא תיעוד אחזקה, עקב היעדר אירועי אחזקה שטרם אירעו. מכאן עולה החשיבות הגדולה של איסוף המידע מייד עם השקת המוצר והטמעתו בשירות.

היבט נוסף הוא המורכבות והקושי בחיזוי מחזור החיים של המוצר בפרופיל משימה ספציפי, בסביבה ספציפית ובכל אופני הפעולה העתידיים, שלעיתים חורגים מאופני פעולה שהוגדרו בתחילה. ביצועים, כשלים, כל אופני הכשל, וקצב הכשלים קשים מאוד לחיזוי. נתוני שדה העשויים לתמוך בחיזוי כזה אינם זמינים בשלב הראשוני של שימוש במוצר חדש. נתוני השדה המצטברים עלולים להיות שונים מנתוני השדה האופייניים או הממוצעים שנצברו במשך כמה שנים. גם נתוני השדה של דור המוצרים הקודם, המודל המוקדם, חסרים לעיתים או כלל לא זמינים.

העידן הנוכחי עתיר סנסורים ואופני צבירת מידע וחישוב, והוא מאפשר ניתוח מתמיד של נתונים אודות המוצר בשימוש, אודות המשתמש, אודות פרופיל המשימה ואודות הסביבה. המידע מאפשר הגעה לאמינות גבוהה תוך צבירה מתמדת של מידע שירות ומידע שדה, והמוצר יכול להיות מוגדר, מתוכנן ומיוצר להיות אמין.

ILS נועד להביא בחשבון את כל הנדרש עבור חיי מוצר מוצלחים לאחר השקתו על-מנת לאפשר לבעלי העניין להפיק תועלת ממנו בביצועיו המלאים בכל פרופיל המשימה, ולא פחות חשוב, למנוע ירידה בלתי צפויה בביצועים והפסקת השימוש.

המרכיב העיקרי של ILS הוא נושא האחזקה שכולל שלושה חלקים חיוניים, ואלה הם:

1. חלקי חילוף שמישים בתצורה המתאימה למוצר המאוחק;
2. כלים מקטגוריות שונות, כמו ציוד בדיקה וציוד תמיכה;
3. ידע מעודכן הנדרש כדי לבצע בהצלחה את תהליך האחזקה המתחיל מזיהוי אם יש כשל, ומהו הכשל, ומסתיים בבדיקת שמישות לאחר השלמת תהליך האחזקה.

חבילת ה-ILS מתחשבת הן במספר המוצרים בשימוש והן בתפוצה הגיאוגרפית שלהם, וזאת עוד בשלב התכנון והאישור של תקציב התוכנית. איזה נתח מהתקציב הכולל יוקצה לרכישת מוצרים (ציוד הונינרכש), כמה יוקצה עבור אספקה ולוגיסטיקה (כמו מכלי גז במכשיר "סודה סטרים", מסננים במכשיר "תמי 4", מחסניות דיו למדפסת או פגזים עבור טנק לשדה הקרב), וכמה יוקדש לחבילת ILS.

בדרך כלל חבילת ה-ILS מאפשרת לספק לקבל הכנסות נוספות, זמן רב לאחר אספקת האחרונה שבין סדרות הייצור ללקוח. ILS עשוי גם לספק מידע עסקי יקר לצורך שיפור השירות והשגת יתרון תחרותי, שיוביל לקבלת הזמנות נוספות.

מדיניות הרכש של חברות או אפילו של ממשלות, שמפרידות בין התקציב של ציוד עיקרי רכשהוני לבין תקציב האחזקה שלו, גורמת לספקים לעיתים למזער למינימום את חבילת ה-ILS המוצעת. זה מאפשר לספקים אלה לסמן את שורת ה-ILS ברשימת התיג במכרז עם מחיר רכישה נמוך ואטרקטיבי יותר ולזכות בתחרות. הגישה ההפוכה, לספק ללקוח חבילת ILS מתאימה שתאפשר הקמה של יכולת אחזקה עצמאית לקונספט האחזקה הרצוי לו ורמת האחזקה לה הוא זקוק, תעלה מחיר גבוה יותר. אם שני מתחרים כאלה מגישים את

הצעותיהם, הלקוח עשוי להתפתות לבחור את ההצעה הזולה יותר, לעומת ההצעה היקרה יותר שאותה הוא צריך.

חלק מהלקוחות ינסו לחסן את העסקה העתידית שלהם כנגד רכישה של חבילת ILS שאינה מתאימה. אי התאמה זו עלולה לנבוע משני סוגים של כישלון: חבילת ILS גדולה מדי או חבילת ILS קטנה מדי. פתרונות שגויים, כמו הימנעות מחבילת ILS או לקוח המכתיב הכנת חבילת ILS שאינה מתאימה בשל חוסר מידע רלוונטי, יפגעו באיזון העדין הדרוש שהלקוח מעוניין להשיג. גישה אגרסיבית של לקוחות מנוסים מאוד מיועדת לרסן ספקים העלולים להציע חבילת ILS שאינה מתאימה אחזקתית, אך יש לה אטרקטיביות עסקית עבורם. אחת משיטות הריסון החדשניות ביותר עליה שמעתי הייתה: הגדרת "שער בקרה (Gate) לחלקי חילוף" מספר שנים (שלוש, חמש או שבע שנים) מיום החתימה על החוזה או מתאריך האספקה הראשון מסדרת הייצור. עד "שער הבקרה לחלקי חילוף" זה מוטלת על הספק החובה החוזית לספק ללקוח ללא תשלום כל חלק חילוף, שהיה חסר בהצעה המקורית ובהסכם שנחתם בעקבותיה; ובאותו "שער בקרה לחלקי חילוף" כל רזרבה בלתי מנוצלת של חלקי חילוף מעל סף מינימום מוגדר מראש, על הספק לרכוש בחזרה במלוא מחירו המקורי שנקבע בחוזה.

פתרון טוב של "בית הספר הישן" הוא המחויבות החיונית של הלקוח העתידי לחלוק נתונים עם הספק. על תמונת הנתונים המפורטת שתצטבר בידי הספק להקיף את כל מהלך החיים של מוצר, החל משלב פיתוח עסקי ושיווק, דרך ביצוע פיתוח, ייצור, אספקה והטמעה של מוצרים רב-דיסציפלינריים ומתן שירות ואחזקה. יש לחייב את הלקוח בשיתוף הנתונים מלכתחילה, כבר בשלב ייזום ה"חלום". חובה זו שנדרשת מהלקוח משולבת כבר בהצעה המוגשת לו, ולאחר מכן בהתאמת המחויבות החוזית של הלקוח למסירה סדורה של הנתונים לספק, לרבות כל דיווחי הכשל. מחויבות הלקוח מוגדרת היטב בתבנית 8D (מודל שמונה דיסציפלינות הוא שיטה מובנית לפתרון בעיות ותיעוד התהליך) עבור כל כשל של המוצר. נתונים אלה משמשים החל מאבחון ראשוני וכלה בתיקון ברמה גבוהה יותר ולניתוח סטטיסטי כחלק מ-RIW (Reliability Improvement Warranty), פנימי או חיצוני, המונע על-ידי ערכי MTBF (זמן ממוצע בין כשלים).

מקרה בוחן א': חיוניותו של איסוף הנתונים וההשפעה בניהול אחזקה במשק במחסור

רקע

הקמה של יחידת אחזקה למערכות רב-דיסציפלינריות במשק בעל חלקי חילוף ספורים ומעט ציוד בדיקה. התפלגות הלקוחות הגדולה ופיזורם הגיאוגרפי לא אפשרו להציב טכנאי אחזקה באתרים רחוקים בקרבת המשתמש/הלקוח למתן שירות. קונספט אחזקה חייב התאמה למחסור בכל מדד ממדדי האחזקה. היעדר טכנאים הציג רמה נוספת של מורכבות בשל תהליך ההכשרה הארוך מאוד שחייב ידע מוקדם.

ניתוח גישה ויישום שינוי

הוגדר פתרון המבוסס על אופטימיזציה של זמינות המוצרים לנוכח הפריסה הגיאוגרפית של המוצרים בשימוש וצפי הצמיחה של המסגרת המשתמשת בהם. הוגדרו מרחבים גיאוגרפיים, ובהם הוגדרה אחריות של ראשי כל מרחב. בכל מרחב הוקמו קבוצות וקבוצות משנה של טכנאים שנקלטו והוכשרו. כל חלקי החילוף חולקו והופקדו תחת אחריותה של כל קבוצה במרחב שלה, בעוד שהמיקום של הקבוצה הותאם לאזור הגיאוגרפי שבו המוצרים פרוסים. כל קבוצה מוקמה במרכז המרחב כדי להקל על הגישה למוצרים.

בכל מרחב נבחר מנהל מלאי. מנהל המלאי עודכן בזמן אמת בכל הפערים ובמיקומם המדויק במרחב, בקבוצה ובתת-הקבוצה, וכך התאפשר לו למזער את הזמן הלוגיסטי ולאחר את חלק החילוף הנדרש בדקות ספורות. זאת גם אם הוא נמצא ברשותה ובאחריותה של קבוצה אחרת, מאחר שלמנהל המלאי שבמרחב הייתה גישה לאותו סוג מידע בכל המרחבים האחרים. במקרה של חוסר בחלק חילוף במלאי שלו, הנפיק המנהל בקשה לחלק החילוף הזהה, שאוחסן בקבוצת האחות במרחב האחר, שברשותה היה חלק חילוף זה זמין. תחילת המסע של השילוח המהיר מנקודה לנקודה מקבוצת האחות החל מייד במטרה לספק למנהל המלאי את חלק החילוף החסר. הטכנאי קיבל "פקודת עבודה לאחזקה", כולל הגדרה האם חלק החילוף הדרוש יהיה זמין בקבוצה שלו או יגיע בקרוב מן המחוז האחר ומתי בדיוק יגיע.

הטכנאי הכין והוביל את חלקי החילוף וכן את כל ציוד הבדיקה והתמיכה האחר שברשותו על-פי "פקודת העבודה לאחזקה". הוא קיבל את חלק החילוף החסר, ביצע את כל תהליך תיקון המוצר, ארז בזהירות והוביל את הפריט הפגום בארזתו של חלק החילוף החדש שזה עתה הוחלף, עם דוח 8D המפרט את כל הידוע אודות הכשל אל מנהל המלאי. הפריט הפגום התווסף לפריטים פגומים אחרים שהוא וטכנאים אחרים העבירו למנהל המלאי.

כל הפריטים הפגומים שנצברו הועברו למעבדת התיקון המרכזית שהשתמשה בדו"ח הכשל 8D כדי לתעדף את תיקון הפריטים הפגומים ולאפשר שימוש במידע של האבחון הראשוני בדרג התיקון הגבוה יותר. שילוח מהיר יחד עם תמונה גלובלית ושקופה של כל המלאי העדכני בזמן אמת, סטטוס תיקון חלקי חילוף ותעדוף התיקון שלהם בכל עת, שימשו היטב להפחתת רמת המלאי המצטברת של כל המרחבים וביחידה כולה.

מסקנות

גישה זו הפחיתה ומפחיתה עד היום את הייצור או הרכש של חלקי חילוף במידה ניכרת ואת רמת המלאי האיטי או המלאי המת. עבור כמה וכמה סוגי מוצרים יש לפתרון זה יתרונות משמעותיים. הצלחת השיטה תלויה בצבירת נתונים על כל כשל של מוצר, על כל חלק חילוף ומיקומו, על כל ניתוח כשל יעיל ועל הסטטיסטיקה של הכשלים, כדי לשמור על סדרי עדיפויות בתיקון וברכש או ייצור של חלקי חילוף נוספים. שמירה על מערכת איסוף נתונים כזו עם מאפייני זמן אמת כבר לפני כמה עשורים הייתה מהלך עתיר השקעה שחייב צוותים יקרים, אשר עשו כל שיכלו לשם ביצוע משימתם בשלמות בשל מקצועיותם ומסירותם.

מקרה בוחן ב': דרישה מחמירה לקומונליות - השפעה על תפעול, אחזקה והיבטים עסקיים

רקע

בפרויקט רב-דיסציפלינרי לחיל-האוויר של מדינה זרה כללה תכולת העבודה של הפרויקט שני סוגים של מטוסים, שונים מאוד זה מזה, שהיו אמורים לשאת ולהפעיל את אותו המוצר הרב-דיסציפלינרי המתוחכם שפותח. בתכולת העבודה נדרשה אינטגרציה של המוצר בשני סוגי מטוסים. הפעלת מוצר זה מתבצעת על ידי צוות האוויר מתא הטייס, והמוצר הוא חיצוני לגוף המטוס ומתמשק במספר ממשקים למטוס, כמו ממשק מכני, חשמלי, אותות, פיקוד ושליטה ועוד. למבנה המוטס חיצונית לגוף המטוס הייתה השפעה שונה על האווירודינמיקה של כל אחד מסוגי המטוסים. כך גם ההשפעה האלקטרומגנטית יכולה הייתה להיות שונה עבור כל אחד משני המטוסים. באחת הפגישות הראשונות עם הלקוח הועלתה שאלה לגבי תצורת המערכת (הן באשר לתצורת המוצר והן באשר לתצורת המטוס). תשובת מקבל ההחלטות של חיל-האוויר

הזה קבעה בפסקנות: "אני עומד על כך שהמוצר שתספק לכל מטוס יהיה בעל אותו מספר חלק" (תצורה זהה לשני סוגי המטוסים).

ניתוח גישה ויישום שינוי

אומנם בהצעה המקורית ובחזרה שנחתם אחריה, לא היתה כל התחייבות או אזכור של דרישה כזו, אך היענות לדרישה המאתגרת הסתברה כבעלת חשיבות גדולה ביותר. שילוב של מוצר אחד לשני סוגי המטוסים חייב יצירת ממשק מתוחכם של המוצר עם ממשק מכני כפול, ספק כוח כפול, שתי קבוצות של פרוטוקולי נתונים, שני מודולים של חומרה ותוכנה הכלולים במוצר. כל אלה אפשרו תפקוד המוצר עם שני המטוסים או בחירה בתת-מודולים בהתאמה לכל אחד משני המטוסים. הנכונות הראשונית להתמודד עם אתגר מורכב כל כך והצלחה ביישום הממשק האחד למוצר (אותו מספר חלק) עבור שני סוגי מטוסים שונים לחלוטין יצרו שינוי קונספטואלי בתפיסת הלקוח: היכולת לממש את החלום התפעולי הלוגיסטי של הלקוח.

לאחר כשנתיים שבהן הלקוח השתכנע ביכולת להוכחת החלום, ושבהן הוא גם השתמש בהרחבה במוצר שהותקן באחד מסוגי המטוסים, החל משא ומתן בנוגע למטוס שלישי, והמשא והמתן הסתיים בחתימה על חוזה שלישי. המטוס השלישי היה שונה מאוד מהשניים הראשונים בכל הנוגע לכל הממשקים בין המוצר למטוס. גם בו חזרה הדרישה הברורה: מספר החלק של המוצר שהותקן על המטוס השלישי, יהיה זהה למוצר שהותקן בשניים הראשונים. חריג יחיד לדרישה זו היה "אישור זמני" לשימוש בתצורה הראשונה עבור שני סוגי המטוסים הראשונים, עד שכל המוצרים הקיימים בשירות ישודרגו לתצורה החדשה שתשמש את שלושת סוגי המטוסים.

לאחר שנה נוספת התקיים משא ומתן לשדרוג המטוס הרביעי, והחזרה נחתם אחריו. עברו עוד שנתיים והחזרה למטוס החמישי נחתם. גם חוזה שישי נחתם בהמשך וחוזה גדול מאוד נחתם לאחרונה, ובו אותה דרישה המכסה באותה תצורה של מוצר בעל אותו מספר חלק את כל סוגי המטוסים. הניסיון המוצלח הראשון שבו היה אתגר בלתי שגרתי, גרם ללקוח לבחור שוב ושוב את הפתרון בשל כל ההיבטים הקשורים לשירות המוצר, בעוד שההיבטים של קומונליות של ILS היו חלק משמעותי בהחלטה.

היתרון הגדול של החלטות אלה היה ירידה בכמויות בכל הממדים עקב צמצום סוגי הציוד, תוך הגדלת כמות של כל סוג בכל סוגי המטוסים. בנוסף נוצרה גמישות תפעולית ואחזקתית, המאפשרת לכל סוגי המטוסים ששודרגו במערכת זו לקבל שירות בכל אחד מבסיסי חיל-האוויר, לרבות אלה של סוגי מטוסים אחרים. לא פחות חשוב הוא הכשרת הטייסים והצטברות הניסיון המבצעי המשותף בחיל-האוויר של אותו לקוח זה, למרות ההבדלים בהפעלת המוצר בכל אחד מסוגי המטוסים. הסתבר שלהחלטה זו היו גם השלכות עסקיות, בהשפעה הדרמטית של הקומונליות על שיקולי לקוח זה בהמשך רכישה של המוצר האחד, בכל עת שהועלתה אפשרות לבחינה של חלופות של המתחרים.

מסקנות

קומונליות מלאה מאפשרת בנוסף ליתרונות התפעוליים המובנים מאליהם, גם מערכת ILS אחידה עם חלקים זהים, מעבדות אחזקה זהות, ידע זהה והכשרה זהה של טכנאי אחזקה. השיפור באיסוף הנתונים וניתוח סטטיסטי, עקב הירידה במספר המשתנים הנצברים, גם הוא גורם משמעותי.

שימוש יעיל בנתונים עונה על צרכים רבים במהלך מחזור חיי המוצר. בתקופתנו אין צורך בהזנה ידנית של נתונים. הנתונים יכולים להיאסף באופן אוטומטי ולהיות זמינים כנדרש ללא כל מאמץ או ללא חשש מכישלון כתוצאה מטעות אנוש, רשלנות או הזנחה אנושית. ניתן להשתמש במגוון רחב של חיישנים, כמו צבירת זמן

השימוש במוצר ובתת-מערכות שלו, באמצעות שיעון פנימי ונקודות מדידה המהוות המשמשות מלכתחילה חלק מתצורת המוצר.

בתצורה זו האמצעים לחישוב ולניתוח עצמי של התוצאות, הסקת מסקנות וקבלת החלטות יכולים להיות בסיס לאמצעים למשוב ופעולות מתקנות אוטומטיות לחלוטין בזמן אמת. תהליכים אלו עשויים להחליף תיעוד (Documentation) בנתונים (Data).

מגוון של חבילות תיעוד הקשורות למוצר, עם מגוון פורמטים, וכל שינוי או תיקון של אחד אינו משפיע על תיקון האחר, יכולים כעת להפוך למסד נתונים יחיד שבו כל שינוי משפיע באופן אוטומטי על כל הנתונים האחרים במסד נתונים יחיד זה ויוצר אוטומטית דוחות נחוצים בלבד. החלטות המתקבלות במחלקת הפיתוח, כמו עדכון החלטות, מאפשרות להשפיע השפעה אוטומטית על הנתונים הזמינים בקו הייצור של קבלן משנה, מגדירות החל מאיזה מספר סידורי בסדרת הייצור שינוי התצורה משפיע על המוצר המשודרג, על שינוי בדיקת הקבלה שלו בצידוד הבדיקה ועל שינוי נוהל האחזקה באמצעות חלקי החילוף המשודרגים שלו. כל אלה מבוססים על תהליך אוטומטי שלם הממקסם יעילות, קצב התקדמותו של תהליך, תנובה, חיזוי כשלים וגמישות בעדכון כל תהליך בשלביו של חיי המוצר.

בעולם האזרחי שיטות אחזקה מתקדמות מבוססות על חיישנים שאוספים את נתוני התפקוד התקין של מכונת. כל סטייה ממצב תקין זה מחושבת במשך מיקרו-שניות בודדות ומאפשרת משוב בזמן אמת על מערכות המכונת. ניטור מתמיד מתריע למפעיל (נהג) כי המכונת צריכה להיכנס לביצוע אחזקה, בין אם היא "אחזקת שבר" (כדוגמת חוסר אוויר בצמיגים או לחץ שמן נמוך במנוע) ואף "אחזקה מונעת" (לאחר צבירת שעות עבודה או קילומטרים מעל המוגדר).

אלו הם מרכיבים במערכת רחבה אשר עשויה לאפשר CBM (אחזקה מותנית מצב - Condition Based Maintenance).
CBM על-פי המדריך להנדסת מערכות²⁷ היא אסטרטגיה לשיפור אמינות המערכת באמצעות הפחתת הזמן שהמערכת אינה זמינה בעת ביצוע אחזקה שגרתית או אחזקת שבר.

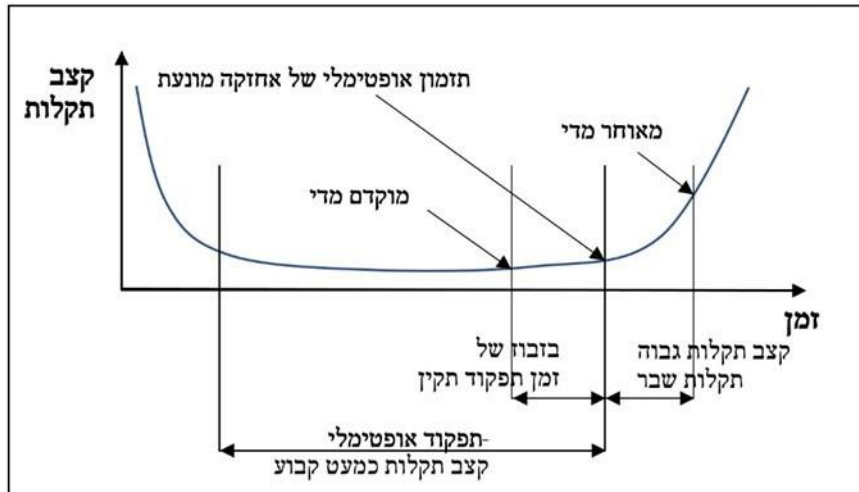
מערכות מתוכננות היטב כוללות שימוש יעיל בחיישנים (למשל חיישנים למדידה של זרימת אוויר, רטט, טמפרטורה, צמיגות) ויכולות תמיכה משולבות המבוססות על ניתוח, על-מנת לקבוע או לחזות את הצורך בפעולות אחזקה הנדרשות למניעת כשל.

מסמכים טכניים של המערכת יכללו תיאור של יכולות אחזקה מותנית מצב (CBM) המשובצות בהן, וכיצד תבוצענה פעולות האחזקה. יתרון נוסף שיש לשקול הוא חיסכון בשני הקצוות של הזמן שנבחר עבור ביצוע משימות אחזקה: מועד מוקדם מדי (לעיתים קרובות מדי) או מועד מאוחר מדי (תכיפות נמוכה מדי). במקרה "מוקדם מדי" בזבוז של "תקופת השימוש במוצר שמיש" שאבדה. במקרה "מאוחר מדי" כשל המוצר הוא חסרון הרבה יותר חמור.

עקומת האמבטיה הקלסית נוחה לתיאור קצב התקלות במחזור חיי מוצר. הקצב התקלות הקבוע כמעט מתחיל לעלות בתלילות כעבור זמן שימוש רב במוצר, וזו העת לבצע משימות אחזקה. עיתוי זה הוא האופטימלי: הקדמת האחזקה תגרום לבזבוז "מצב שמיש" של המוצר ואיחור בביצוע אחזקה מעלה את הסיכוי לכשל המוצר שיצריך "אחזקת שבר".

חיזוי העיתוי האופטימלי הוא קושי מהותי שמחייב חישה של המצב האחזקתי של האמצעים. מערך של חיישנים המשרת CBM, המייצר משוב אודות מצב המוצר בזמן אמת, הוא הפתרון המתאים שרותם את יתרונותיה של המהפכה התעשייתית 4.0 לייעול האחזקה.

²⁷ SE Handbook, 4th Edition, Wiley, 2015, 4.13.2.3 p. 100.



עקומת האמבטיה הקלסית, עם סטייה מעיתוי אופטימלי של אחזקה מונעת

איזון עדין בין שני המקרים הקיצוניים עם קצב או תדירות מתוכננים מראש של פעולות אחזקה, חשוף תמיד לחיזוי שאינו מדויק. אי דיוק זה עשוי להיות תוצאה של שינויים בפרופיל המשימה ותנאי הסביבה, לעומת התכנון והתכן הנומינלי שיושם, וכן טולרנסים של ייצור המוצר. את שני מקרי הקיצון לעיתוי משימות אחזקה, ניתן למנוע ב־CBM מתוכנן ומיושם היטב, שיאפשר משוב וניטור מתמשך של נתוני אחזקה ובסופו של דבר עלייה בכשירות המערך ובזמינותו.