

# הנדסת מערכות אמל"ח

אלכס בלכמן





# הנדסת מערכות אמל"ח

אלכס בלכמן



# Weapon Systems Engineering

ALEX BLEKHMAN

עריכת לשון: א. שרביט, כתיבה מקצועית  
גרפיקה ועיצוב עטיפה: יע"ל

ליאנה אשתי היקרה,  
ולילדיי יאיר, אסף, הדר וזיו

שממלאים את עולמי  
ומאירים את ימיי

ולהורי היקרים  
שמלווים אותי תמיד

## תוכן העניינים

7	הקדמה
8	הקדמת המחבר
11	מבוא להנדסת מערכות
21	תהליך הנדסת מערכות
35	חשיבה מערכתית
47	מיצוי צרכים וניתוחם
69	המפגש בין הצורך לפתרון
87	אפיון הפתרון ומימושו
121	אחרית דבר: סוף מעשה במחשבה תחילה
122	נספח: מונחים מרכזיים בהנדסת מערכות

סגולה מיוחדת היא באדם שאין הוא יכול להתקיים אלא אם כן הוא צופה אל העתיד

ויקטור פרנקל, האדם מחפש משמעות: מבוא ללוגותרפיה, דביר, 1970

## הקדמה

אל"ם משה שפריר, שכונה בפשטות בפי כולנו - פקודיו, מפקדיו ועמיתיו - "שפריר", היה אדם צופה פני עתיד. שפריר חלם על מערכות ועל הנדסת מערכות. לפני מותו בטרם עת החל לכתוב ספר שינגיש את התחום לאלה שעושים בו את צעדיהם הראשונים.

שפריר החל את מסלולו בחיל החימוש בהתנדבות לשירות צבאי, שלא היה מחויב בו, והמהלך סימן כבר אז את תחילת דרכו המיוחדת שתוביל אותו בהמשך לתפקיד בכיר - ראש מחלקת מנ"ש (מערכות נשק), שהייתה אז המחלקה שעסקה בטכנולוגיות המתקדמות ביותר בכוחות היבשה.

לאורך שירותו עסק שפריר במגוון מערכות מתקדמות ביותר, בעיקר במערכות הדמיה תרמית שהיו משנות השמונים מרכיב מכריע ושובר שוויון בלוחמת היבשה. הקרובים אליו ידעו שמלבד עיסוקו בטכנולוגיה עסק שפריר בעיקר באנשים.

שפריר פיתח וטיפח אותנו כמהנדסי מערכות. לתפיסתו הנדסת מכונות, חשמל או אווירונאוטיקה היו רק בסיס ראשוני לפיתוח התמחויות מורכבות יותר, מערכתיות יותר, שהן הכרחיות בעת שעוסקים במערכות נשק מתקדמות המשלבות תחומים טכנולוגיים רבים. המילה "אינטגרציה" חדרה למילון היומיומי שלנו וכך גם "אפיון מערכת", "בדיקות מערכת", "תפיסה מערכתית" ועוד. ותמיד, תמיד, תפס הגורם האנושי - הלוחם, איש האחזקה, המהנדס המתכנן ואחרים - חלק מרכזי בתכנון ובחשיבה שלו.

שפריר היה איש של אנשים. נעים הליכות ועם זאת נחוש, לעיתים שנון וציני אך תמיד עם הומור ואופטימיות. "אנחנו פושעים..." (תמיד בגוף ראשון והוא מכניס עצמו לעניין) נהג לומר בתחילת משפט שבהמשכו הופיעה תוכחה על משהו שהשתבש. התוכנית הגדולה שלו הייתה תוכנית של אנשים. החץ שסימן לפני שנים רבות התגשם בדמות מערכת אנושית שכיום משפיעה על מערכת הביטחון והתעשייה הביטחונית כולה, הרבה מעבר לגבולותיו של צה"ל.

שפריר לא הספיק להשלים את ספרו. הקדשת ספר זה לזכרו היא סגירת מעגל מבורכת. מי ייתן ויהיה כלי בידם של מהנדסי המערכות של המחר.

אני מאחל לקוראים וללומדים שיפיקו את המיטב מספר זה. הלוואי שדרכו וגישתו של שפריר ז"ל תהיינה דוגמה ומופת למהנדסי המערכות של העתיד.

תא"ל (מיל) ירון ליבנת<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> מהנדס מערכות מנוסה שהוביל פיתוח מערכות ביטחוניות מורכבות מאוד. חתן פרס ביטחון ישראל, ביצע מגוון תפקידי פיתוח הנדסי בחיל החימוש ועמד בראש מנת"ק (מנהלת תוכנית טנק המרכבה) בין השנים 2008-2013.

## הקדמת המחבר

מהנדסי המערכות הראשונים היו אנשי האשכולות והמדענים פורצי הדרך לאורך ההיסטוריה. אנשים בעלי כישרון וחשיבה יוצאת דופן תכננו ובנו מערכות ששינו את העולם עוד לפני שהנדסת מערכות הייתה לתחום הנדסי ומקצועי. כך הגיעו לעולם המצלמה הראשונה, המטוס הראשון ומערכות חשובות נוספות בכל תחומי החיים.

המערכות של היום מורכבות, רבת-תחומיות ומשוכללות מאוד. בימינו, יחיד סגולה או צוות מצומצם של עמיתים אינם יכולים לפתח ולתכנן מערכות גדולות באופן עצמאי. המצלמה המודרנית כוללת עשרות רכיבים אלקטרוניים, מכניים ואופטיים העובדים יחד בשליטה מרכזית של תוכנת בקרה, עיבוד ותצוגה. המצלמה גם אינה עוד מכשיר בודד, אלא היא משולבת בטלפון נייד או במחשב נישא ופועלת בממשק עם תוכנות הפעלה, אחסון מידע ושיתוף תכנים. הטכנולוגיה נגישה לכול, והצלחת המערכת מושפעת מגורמים רבים נוסף על העלויות והביצועים: נוחות שימוש, ממשקים, תצוגות ועוד.

מהנדס מערכות הוא איש האשכולות המודרני. בעולם המתפתח בקצב מעריכי, אלו האנשים המובילים צוותי מומחים בינתחומיים בבניית הדור הבא של המערכות הטכנולוגיות וההנדסיות. אלו הם המובילים הטכנולוגיים שעוסקים בִּתְכּוּן, בפיתוח ובייצור. אלו הם המהנדסים העומדים מאחורי מבנים וגשרים עצומים, מערכי תחבורה, מערכות תעופה, חלל, רפואה, אמצעי לחימה ועוד. אלו גם האנשים העובדים מול לקוחות, ספקים ושאר בעלי העניין וכל זאת במטרה אחת - להביא להצלחה של המערכת בהתאם לצורך של המשתמשים ולשביעות הרצון של הלקוחות.

כדי להצליח בהנדסת מערכות רצוי להיות מהנדס פיתוח מוכשר עם ידע טכנולוגי רחב והשכלה בתחומי הנדסה או מדעים, אך זה בהחלט אינו מספיק. מעבר לידע ולניסיון המקצועי שמהנדס המערכות נשען עליו, הוא נדרש לדעת להפריד בין הצורך לבין הפתרון, לאתגר את הצורך, לגבש חלופות מערכתיות, להעריך אותן ולבחור חלופה מיטבית. כדי שהפרויקט יצליח, מהנדס המערכות נדרש "לנצח" על מקהלה של מהנדסי פיתוח, לכוון ולסנכרן אותם מול היעדים המערכתיים. מעל לכול, מהנדס המערכות נדרש לראות את השלם, לקבוע יעדים מתוך צרכים מערכתיים ולשאוף אליהם תוך שינויים מתחייבים מהסיכונים ומההזדמנויות הטכנולוגיות לאורך שלבי המימוש.

ספר זה מיועד להקנות את הרקע, הכלים והראייה המערכתית שיאפשרו למהנדס המערכות לגבש את היעדים המערכתיים, לנתחם ולממשם מול הדרישות ובהתאם לפתרונות הטכנולוגיים. הספר שם הדגש על התהליכים בשלבי הייזום והתכנן הקונספטואלי שבהם נקבעים רוב התכונות והמאפיינים של המוצר. הספר מציג תהליכי ניתוח וחשיבה מובנים שמהנדס המערכות נדרש להפעיל בצורה שיטתית ומחזורית לאורך שלבי הפרויקט.

הספר מתאר את תהליכי הנדסת מערכות מנקודות מבט שונות. חלק מהתהליכים מוצגים בראייה של מפתח המערכת בתעשייה. חלק אחר מתוך התחומים המערכתיים ניתן מנקודת המבט של מאפיין המערכת בצה"ל ובמשרד הביטחון. הדוגמאות בספר מגיעות הן מהעולם המסחרי והצרכני והן מהעולם הביטחוני.

מערכות אמל"ח הן לרוב מערכות רבת-תחומיות, מתקדמות מבחינה טכנולוגית, משולבות ויש להן השלכות רבות בעולמות רחבים, כמו אימונים, הדרכה והכשרה, אחזקה לאורך זמן ועוד. הלימוד מתוך עולמות האמל"ח מדגים עקרונות כלליים בהנדסת מערכות ועשוי לסייע למהנדס מערכות העוסק בכל תחום.

הספר מתחיל במבוא להנדסת מערכות. בפרק זה מובא דיון בנושא תפקיד מהנדס המערכות ותפיסת תפקיד



מהנדס המערכות. בסיום הפרק מובאים כמה כלים שיסייעו למהנדס המערכות בתהליך הכניסה לתפקיד. הפרק הבא עוסק בתהליך הנדסת מערכות. הפרק מציג לעומק את תהליך הנדסת המערכות לאורך הפרויקט: ייזום והתארגנות למימוש; פיתוח, ייצור והצטיידות; קליטה, הטמעה וניהול משק. הדגש מיוחד ניתן בשלבים המוקדמים של הגדרת המערכות, והוא משקף את רמת ההשפעה שיש למהנדס המערכות בשלב זה.

שני הפרקים הראשונים מרכיבים את הבסיס לפרק השלישי העוסק בחשיבה מערכתית. בפרק זה מובאים מאמרים קצרים העוסקים, בין היתר, בראייה שלמה בהנדסת מערכות, הנדסת מערכות בצד הלקוח ובצד הספק והגדרת מערכות מול הנדסת מערכות לאורך הפרויקט. נושאים אלו מבטאים את לב העבודה המהותית של מהנדס מערכות אמל"ח ומהנדס מערכות באופן כללי. הפרק הבא עוסק במיזוי ובניתוח הצורך כבסיס להגדרת דרישות נכונה שתביא את הערך המרבי ללקוח. בין הנושאים הנידונים: ניהול בעלי עניין, תרחישי שימוש וניתוח פונקציונלי. הפרק מציג שיטות למידול מערכת, תעדוף צרכים ותרגום הצורך למאפייני מערכת. הפרק הבא של הספר דן במפגש בין הצורך לפתרון. בין הנושאים הכלולים בפרק נמצאים: קביעת פרמטרי תכן מרכזיים, הצגת מרחב הפתרונות וגיבוש חלופות, ניתוח חלופות והשוואה ביניהן. בסוף הפרק מובאת דוגמה לימודית לתהליך ניתוח צורך והערכת חלופות.

הפרק האחרון של הספר עוסק בהרחבה באפיון הפתרון הנבחר ובמימושו. הכנת האפיון המערכתי והעבודה מולו היא אחת המשימות המרכזיות של מהנדס מערכות. בחלק זה ניתן מבנה של אפיון מערכתי ותהליך הכנתו שישמשו את מהנדס המערכות בניהול המשימות הקשורות להגדרת מערכות. ברמה המערכתית יש משמעות רבה להגדרה של נושאי המעטפת מלבד הביצועים הישירים, ולעיתים דווקא נושאים אלו הם המשמעותיים בהצלחה של המערכת. פרק זה יסייע למהנדס המערכות להפעיל מומחים ומהנדסים בכלל התחומים הדרושים לאפיון מלא של המערכת.

הספר מיועד למהנדסי מערכות באשר הם לאורך הדרך המקצועית. מהנדס צעיר בשלבי כניסה לעולם הנדסת מערכות וניהול פרויקטים יוכל להיעזר בספר ללימוד התהליך לניתוח מערכתי ואפיון טכני. מהנדס מתחיל יוכל גם ללמוד מניסיונם של אחרים - ניסיון המובא בדוגמאות הכלולות במתודולוגיה ובמאמרים. מהנדס מערכות מנוסה עשוי למצוא בספר נושאים מתקדמים שיאפשרו לו לעשות את הצעד הבא מבחינה מקצועית. עם צבירת הניסיון בתכן ומימוש מערכות וביצוע פרויקטים מהנדס הבכיר יוכל להעריך לעומק תפיסות בנושא הגדרת מערכות, ערך המערכת, הנדסת מערכות וחשיבה כלכלית. האתגר לבנות את המערכת הנכונה הוא מורכב יותר, בהרבה, מאשר לבנות את המערכת נכון, והמהנדס המנוסה ימצא בספר את השאלות המנחות שיוכלו לעזור לו בכך.

גם הקורא הכללי עשוי למצוא עניין בדוגמאות ובלקחים מפרויקטים, בתיאור תהליכי הנדסת המערכות ובמאמרים הכלולים בספר. חשיבה מערכתית היא תחום רחב בהרבה מעולמות ההנדסה והפרויקטים. ניתוח צרכים מול הפתרונות, מיקוד בתרחישי השימוש וניתוח פונקציונלי הם רק חלק מהכלים המופיעים בספר שמתאימים למצבים של גיבוש חלופות, קבלת החלטות ותהליכי ניתוח והערכה באופן כללי. למותר לציין, שהנאמר בספר נוגע למהנדסות המערכות באותה מידה כמו למהנדסי המערכות, והניסוח במין זכר נעשה לשם קיצור ופשטות הקריאה בלבד.

אני תקווה שהתפיסות, השיטות, הכלים והדוגמאות בספר זה יהיו בסיס איתן בידי הקוראים לאורך דרכם המקצועית בכל ארגון, מול כל סוג פרויקט ובכל תחום עיסוק.



*The Systems Engineering process must begin by discovering the real problem that needs to be solved; the biggest failure that can be made in systems engineering is finding an elegant solution to the wrong problem.*

INCOSE Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)<sup>2</sup>

## מבוא להנדסת מערכות

בשנות ה-60 של המאה ה-20 הוחלט בשבדיה על פיתוח של מטוס קרב חדש. החשש אז היה, בין היתר, מפני מתקפה של הרוסים שתשתק את שדות התעופה. כדי להתמודד מול תרחיש זה הוחלט להכשיר כמה קטעי כביש שיוכלו לשמש בשעת חירום מסלולי המראה חלופיים. לצורך התאמה לקטעי הכביש הקצרים נקבעה למטוס דרישה מאתגרת ביותר לאותם זמנים: יכולת המראה ונחיתה ממסלול באורך של 500 מ' לכל היותר. כדי לעמוד בדרישה זו, מהנדסי חברת סאאב (SAAB) תכננו למטוס מנוע ייחודי וחסר תקדים בעולם בזמנו. המנוע כלל מנגנון הגברת האצה (After Burner) ומנגנון היפוך דחף (Thrust Reversal). המטוס קיבל את השם Viggen, ולמרות האתגר ההנדסי העצום, הפרויקט עמד בציפיות ובסך הכול נחשב להצלחה גדולה. לכאורה, ההשקעה האדירה במחקר ופיתוח, בניסויים ובהמשך לאורך מחזור החיים של המטוסים השתלמה.



מטוס ה־Viggen

באחד הכנסים הבינלאומיים להנדסת מערכות הגיעה אליי עדות על מהנדס צעיר שהחל את עבודתו בחברת סאאב (SAAB) בשנות ה-80. אותו מהנדס התעניין בשאלה הבאה: מה היה קורה אילו המטוס היה נבנה ללא מנגנוני הגברת האצה והיפוך דחף, מבלי לשנות את שאר פרמטרי המנוע. לפי החישובים שלו מטוס עם מנוע דומה ללא מנגנוני הגברת האצה והיפוך דחף היה יכול להמריא ולנחות ממסלול של 550 מ', מול הדרישה המקורית של 500 מ'. נראה לכן, שבדיעבד ההשקעה במנוע מתקדם ומורכב

---

<sup>2</sup> BKCASE Editorial Board. 2019. *The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)*, v. 2.0, R.J. Cloutier (Editor in Chief), Hoboken, NJ: The Trustees of the Stevens Institute of Technology. Accessed September 1 2019. [www.sebokwiki.org](http://www.sebokwiki.org). BKCASE is managed and maintained by the Stevens Institute of Technology Systems Engineering Research Center, the International Council on Systems Engineering, and the Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society.

הביאה לקיצור מרחק ההמראה והנחיתה ב־50 מ' בלבד...

הדוגמה של המנוע מטוס ה־Viggen ממחישה את ההבדל בין "לבנות את המערכת הנכונה" לבין "לבנות את המערכת נכון". לאחר שערך היעד של המראה ונחיתה ממסלול של 500 מ' נקבע כדרישה, כל שנותר הוא לבצע את הנדסת המערכות המיטבית, ואין ליצרן את מרחב התמרון והיכולת לבחון שוב את ההנחות המבצעיות הרלוונטיות.

הנדסת מערכות איננה רק תהליך של מימוש דרישות ועמידה בלוחות זמנים, בתקציב ובביצועים, כמו שנהוג להגדיר ולמדוד פרויקט. יש דוגמאות רבות לפרויקטים שעמדו בכל היעדים מבחינת עלות, ביצועים ולוח זמנים, ולמרות זאת הם לא הצליחו להביא את הערך שציפו לו מבחינת הלקוח. הערך של המערכת היא המהות והתכלית של פעולתה מעבר לביצועים, לתקציב וללוחות הזמנים בפרויקט. שאלת הערך של המערכת, המוצר או השירות היא השאלה שנמצאת בלב ליבה של אמנות הנדסת המערכות. אנו נפגוש שאלה זו ונתבונן בה מזוויות שונות לאורך הפרקים השונים של הספר. אך תחילה נפנה לכמה הגדרות בסיסיות בעולמות הנדסת המערכות.

## הנדסת מערכות - מהי?

בעולם של ימינו המערכות נעשות מורכבות יותר ויותר ומשלבות עולמות תוכן שונים. מטרת מהנדס המערכות היא להגיע לאפיון ולבחירה נכונה של החלופות בהתאם לביצועים הנדרשים. מהנדס המערכות נדרש לעמידה ביעדי עלות המוצר ולוחות הזמנים לפיתוח תוך התחשבות בתפעול ואחזקה לאורך חיי המוצר. על כן העיסוק האופייני של מהנדסי המערכות איננו מחקר ופיתוח עצמאי, אלא הגדרת דרישות, אפיון, חקר ביצועים הנדסי וניהול פרויקטים.

"מערכת היא מבנה או אוסף של מרכיבים שונים שמביאים לתוצאות שאינן ניתנות להשגה על־ידי המרכיבים בנפרד"<sup>3</sup>. מערכות בכלל ומערכות מורכבות בפרט כוללות תכונות מתהוות (emergent properties) - תכונות של המערכת אשר אינן קיימות במרכיבים שלה. במערכת של גוף האדם קל להבחין בתכונות של הגוף השלם שאינן קיימות באיברים לעצמם. דוגמה נוספת היא עוצבה (=אוגדה) בצה"ל. עוצבה היא יחידה צבאית המכילה את כל המרכיבים שנדרשים כדי לאפשר לה לפעול באופן עצמאי ולנהל מערכה, ותכונה זו אינה קיימת באף מיחידות המשנה שמהן מורכבת העוצבה, כמו חטיבות שריון, חיל רגלים ויחידות לוחמות ולוגיסטיות נוספות.

נהוג להבחין במבנה, בהתנהגות ובפונקציה של מערכות. מבנה המערכת הוא אוסף המרכיבים הנכללים בה: מודולי חומרה, תוכנה, מתקנים מכניים ואמצעים נוספים. התנהגות המערכת היא האופן שבו המערכת פועלת לאורך זמן ובהתאם לאינטראקציה עם סביבתה. הפונקציה של המערכת היא אוסף המשימות שהמערכת אמורה לבצע ולשמן נוצרה.

בשנים האחרונות נפוץ המונח מערכת של מערכות (System of systems). הכוונה היא לאוסף גדול של מערכות הקשורות זו בזו או המשתפות פעולה לצורך ביצוע משימה מסוימת וקבלת יכולות שאינן אפשריות במערכת אחת. דוגמה למערכת של מערכות היא שדה תעופה שבו מטוסים, מערכות בידוק, מערכות לוגיסטיות ומערכות תחבורה עובדות יחד כדי לספק שירות לנוסע. כל אחד מאלו הוא מערכת בפני עצמה המורכבת

<sup>3</sup> תורגם בידי המחבר על־פי המועצה הבינלאומית להנדסת מערכות - INCOSE International Council on Systems Engineering :www.incose.org

ממכלולים שונים.

"הנדסת מערכות היא גישה בִּינתחומית ואמצעים שמאפשרים מימוש של מערכות מוצלחות"<sup>4</sup>. הנדסת מערכות עוסקת בהגדרת צורכי הלקוח והפונקציונליות הנדרשת בשלבים המוקדמים של תהליך הפיתוח, תיעוד הדרישות ולאחר מכן תיכון ואימות בראיית כלל ההיבטים של הבעיה השלמה: אופן הפעולה, ביצועים, בחינה, ייצור, עלות ולוחות זמנים, אימון ותמיכה, גריטה.

הנדסת מערכות משלבת את כלל עולמות התוכן (דיסציפלינות) וקבוצות ההתמחות למאמץ צוותי משולב. מאמץ זה יוצר תהליך פיתוח מובנה שמתקדם מקונספט לפיתוח והפעלה. ההתייחסות של מהנדס המערכות היא לכלל ההיבטים העסקיים והטכניים של הלקוחות במטרה לספק מוצר איכותי שמתאים לצורכי המשתמש.

## תפקיד מהנדס המערכות

מהנדס מערכות הוא "המנכ"ל של המהנדסים". מדוע מנכ"ל - מנהל כללי - נקרא כך? מכיוון שהוא אינו שייך לאף אחת מהיחידות המקצועיות ה"לא-כלליות" בחברה, כמו שיווק, פיתוח או ייצור. ברמות זוטרות יותר תיאור תפקיד העובדים ביחידות אלו הוא מוגדר וממוקד: נציג שירות לקוחות, ראש צוות שירות לקוחות ואפילו סמנכ"ל שירות לקוחות. המנכ"ל, לעומת זאת, מתאם את הגופים המקצועיים כולם, אינו שייך לאף אחד מהם ולכן הוא מכונה - "כללי".

בדומה למנכ"ל בארגון, מהנדס המערכות נדרש לנהל ולהנחות את עבודת צוותי ההנדסה בפרויקט או בחברה. לעיתים קרובות מהנדס המערכות מגיע מאחד התחומים המקצועיים המשתתפים בפרויקט. למרות זאת וככלל, הוא איננו עוסק עוד בביצוע משימות פיתוח בתחומי השכלתו. תפקידו בפרויקט כולל הקצאת דרישות מערכתיות וניהול מימוש של המשימות על-ידי מהנדסי הפיתוח.

בעולם מקובל להשתמש בהמחשה גרפית המכונה "מודל ה-T" להצגת היחס בין תחומי הידע והמקצועיות של מהנדס מערכות. המלבן האנכי המרכיב את בסיס האות T הוא עולם התוכן ההנדסי שממנו הגיע מהנדס המערכות. הגובה של המלבן האנכי - ה"רגל" של האות T - מייצג את עומק הידע והניסיון המעשי שיש למהנדס בתחום המקצועי שלו. הממד הצר של המלבן האנכי מייצג את התחום המצומצם יחסית שבו אותו מהנדס שולט שליטה מלאה.

המלבן האופקי העליון הוא הידע הרחב שמהנדס המערכות נדרש לו לצורך עבודה והנחיה של כלל המהנדסים מעולמות תוכן אחרים. כשם שמלבן זה ממוקם מעל ה"רגל" של האות T, המייצגת את המקצועיות הבסיסית, כך היכולת של מהנדס המערכות להבין ולהנחות מהנדסים מעולמות תוכן אחרים נסמכת על הידע והניסיון בתחום שלו.

כדי להמחיש את תחומי האחריות של מהנדס מערכות מול תחומי האחריות של מהנדס פיתוח, נשתמש בדוגמה מעולם הסלולר. נתבונן במהנדס מחשבים העובד על תכן של מסך טלפון חכם חדיש. בהתאם לחברה שבה הוא עובד, המהנדס עשוי לעסוק בכתיבת תוכנה למעבד בקרת מסך, ביצוע סימולציות תכן חומרה להגדלת קצב ריענון המסך, בדיקות תאימות והפעלה מול תקני וידיאו שונים, תכנון מארז פלסטיק חדשני וכדומה.

לעומת מהנדס הפיתוח, מהנדס מערכות של הטלפון החכם מנהל צוות של מהנדסים ומומחים. כל אחד מהם

<sup>4</sup> תורגם בידי המחבר על-פי המועצה הבינלאומית להנדסת מערכות - INCOSSE: <http://www.incose.org/AboutSE/WhatIsSE>

אחראי על אחד מהתחומים המקצועיים: חומרה, תוכנה, זיוד, עיצוב מוצר ועוד. מהנדס המערכות מבצע הקצאת דרישות, הגדרה של המוצר, אופטימיזציה מערכתית ותיעוד בין פרמטרים. לדוגמה, הוא עשוי להחליט על הורדת רזולוציה של המסך כדי לשפר את ביצועי הסוללה של המכשיר. כך הוא עשוי להעלות את הערך הכללי של המוצר ולו גם במחיר של ויתור על ערך מיטבי של אחד הפרמטרים.

התוצרים של עבודת מהנדס המערכות יכולים להיות ניתוח דרישות, הגדרת משימה, ניתוח חלופות לאורך מחזור החיים, ארכיטקטורה של המערכת, תוכנית בדיקות ותוצרים רבים נוספים. לסיכום, מהנדס הפיתוח עוסק בתכנון ופיתוח של רכיבי הפתרון: אלגוריתם, פתרון טכנולוגי ועוד. לעומת זאת, מהנדס המערכות עוסק ברמה הטכנית הרחבה של הגדרת מאפייני הפתרון, המוצר או השירות.

רמת המומחיות הטכנית הנדרשת ממהנדס הפיתוח היא גבוהה מאוד. בה בעת המומחיות הטכנית של מהנדס המערכות היא רחבה ומקיפה תחומים רבים, אך לעיתים היא אינה ברמת ההעמקה של מהנדס הפיתוח. רמת השפעה מערכתית של מהנדס הפיתוח בדרך כלל מצומצמת לכדי מילוי דרישות מפרט ועמידה ביעדים. לעומת מהנדס הפיתוח, רמת ההשפעה של מהנדס המערכות היא גבוהה יותר.

החשיפה של מהנדס הפיתוח ללקוחות ולצרכיהם היא בדרך כלל מצומצמת יחסית ונעשית בעיקר באמצעות ראשי צוותים ומפרטים כתובים. העבודה של מהנדס המערכות מול הלקוחות היא משמעותית ולעיתים קרובות ישירה.

הכניסה לתפקיד מהנדסי מערכות יכולה להתרחש תוך זמן קצר ובכמה אופנים. הרחבה נוספת בנושא כניסה לתפקיד מהנדס מערכות ניתנת בהמשך פרק זה.

## כניסה לתפקיד מהנדס מערכות

הכניסה לתפקיד הנדסת מערכות יכולה להיות מהירה מאוד. הדבר יכול לקרות בצורה של קבלת משימות מערכתיות במקום העבודה הנוכחי, קידום או מעבר למקום עבודה חדש בתפקיד בכיר יותר. לעומת זאת, הידע והניסיון הדרושים לביצוע תפקיד מהנדס המערכות נצברים לאורך שנים רבות.

**תפקיד** הוא נשיאה באחריות לתחום מסוים ואוסף המשימות והפעילויות שנדרש לבצע לצורך כך, אם הוגדרו מראש ובאופן מפורש, ואם לאו.

**תפיסת תפקיד** היא האופן שבו העובד מבין את המצופה ממנו ויחסו לפעולות הנדרשות ממנו.

תפקיד מהנדס המערכות כולל מרכיבי ניהול, תכנון ובקרה עצמית. לעיתים אין הגדרה ברורה של מרכיבי התפקיד והמשימות הנדרשות ממהנדס המערכות. האתגרים בכניסה לתפקיד ראשון בהנדסת מערכות דומים במקצת לאתגרים בכניסה לתפקיד ראשון אחרי קורס קצינים. אם הקידום לתחום הנדסת מערכות נעשה בחברה שעבדת בה לפני כן, מתעורר אתגר בהטלת משימות ועבודה מול עובדים שהיו עמיתך עד לא מזמן. אם הקידום הוא בחברה חדשה - אזי נדרש להתמודד עם עובדים ותיקים ולהוכיח ידע מקצועי שאינו בהכרח קיים עדיין. כך או כך, קיימים אתגרים רבים בהפנמה של היעדים הנדרשים ושל ההיכרות עם המסגרת בכניסה לתפקיד.

כדי להקל על המעבר לתפקיד הנדסת מערכות נביא להלן מובאות דוגמאות לכמה אירועים אפשריים בכניסה לתפקיד. כן יוצגו ניתוחי גורמים אפשריים והצעות לכיווני התמודדות.

## היעדר חניכה או הגדרה מדויקת של תחומי אחריות

כניסה למקום עבודה או תפקיד חדש במצב שבו אין מוגדרות הגדרות ברורות של ציפיות ומדדי הצלחה,

עשויה להתרחש אם נדרשת תחילת עבודה "תוך אפס זמן", למשל כחלק מפרויקט קיים ומתפקיד הדורש להציג תפוקות שוטפות.

המצב עשוי להיווצר גם על-ידי מנהל פרויקט שמפזר מטלות הנראות אקראיות ואינן ממוקדות. בעבודה של מהנדס מערכות קיים קשר מול עמיתים ובעלי עניין רבים, ויכולה להיווצר סיטואציה שבה כל אחד מהם אומר לעשות משהו אחר, בלי להגדיר תיעדוף או הירארכיה ברורה.

גורם אפשרי למצב זה הוא לחץ בעבודת המנהל או הממונה שאינו מתיר לו זמן וקשב לחניכה. גורם אפשרי נוסף הוא מנהלים עם תפיסת עולם של "לזרוק למים" הנמנעים מחניכה באופן מכוון ומצפים שהעובד ילמד הכול לבד. יש גם מצבים של חוסר תיאום בארגון, אם אין עבודה מוגדרת, ויש תרבות שבה "כולם עושים הכול".

כיווני התמודדות אפשריים למצב זה:

1. **"חתימה למגע" ובקשה אקטיבית של חניכה.** אומנם זה נשמע טריוויאלי, אבל פעמים רבות עובדים נוקטים בשיטה של המתנה להנחיה, בקרה וחניכה. להבנתם הן צריכות להגיע מתוקף העובדה שהם חדשים, "מישהו" צריך להראות להם מה עושים ועוד.

ההנחה שלפיה צריכה לבוא חניכה, אינה מתקיימת בהכרח מסיבות שונות. לכן כדאי למצוא את הדרך הנכונה ליזום ו"לרדוף" אחר תשומת הלב וההכוונה. לגיטימי לחלוטין לבקש לקבוע מועדים מוגדרים עבור מסגרת חפיפה ביומן הממונים. השורשים להצלחה מקצועית ניטעים במידה רבה בתקופה הראשונה, ויהיה קשה עד בלתי אפשרי להשלים פערים מקצועיים שנוצרו בשבועות ובחודשים של המתנה, שלא לדבר על הרושם הפאסיבי והנבון העלול להיווצר.

2. **פנייה לחניכה ועזרה במעגל רחב.** כבר ציינו למעלה שיש מצבים שבהם הממונה הישיר או החונך האידיאלי לא יהיו זמינים. זו אינה סיבה לוותר - אפשר להרחיב את מעגל המקורות לקבלת מידע רלוונטי לתפקיד ולכלול בו לא רק את הממונים אלא גם מוקדי ידע, מומחים ותיקים, עמיתים ועוד. אנשים אלו יוכלו להאיר את הסביבה המקצועית מזוויות שונות ואולי לכוון לאפיקי עשייה יעילים יותר.

3. **לימוד עצמי.** כשם שאנשים מסוימים מתקשים מטבעם בלימוד עצמי, כך גם יש אחרים הנמנעים מהשקעת זמן מרובה במעבר על תיעוד שהוא "משעמם", "ארוך", "מסורבל" ועוד. עם זאת, בכניסה לתפקיד חדש הרבה פעמים אין מנוס מעבודה רבה בהשלמת פערי ידע - קריאת מסמכים, לימוד מפרטים ועוד. לא תמיד חייבים "לשבור את הראש לבד" - מותר ואף רצוי לשתף ולבקש עזרה מעמיתים או אפילו מחברים מחוץ לארגון, אם הדבר אפשרי ורלוונטי. בכל מקרה, אם אין מקבלים רקע טוב ויסודי בתקופה הראשונה - אולי אף פעם לא ימצא לזה זמן. בסיס מקצועי חלש או היכרות שטחית עם חומרים ועם אמצעים זמינים עשויים להשפיע על הביצועים ועל התחושות לאורך שנים רבות בתפקיד.

## מהנדס צעיר מול עמית בעל ניסיון

"אורח לרגע רואה כל פגע" - אדם המצטרף לצוות או לפרויקט קיים נוטה לשאול שאלות או להטיל ספק בנורמות קיימות. עובד חדש עשוי גם להציע פתרונות חדשניים על סמך חשיבה שאינה מקובעת לכללים הנהוגים או על סמך ידע טרי מהאוניברסיטה. יחד עם זאת, לעיתים קיימת מגמה של הצעת רעיונות בלי להכיר לעומק את הבעיה ואת הפתרונות שכבר נוסו ונדחו. מצב כזה הוא מתכון לקונפליקט "קלאסי" בין עובד צעיר, שאפתן ויצירתי ובין עובד "שמרן" ובעל ניסיון.

מה עושים כדי לקדם בכל זאת את השינוי? אם הרעיון, ההצעה או היוזמה יוצרים התנגדות או רתיעה של עובדים ותיקים ומנוסים, כדאי ללמוד לעומק את הנושא ואת המצב הקיים. כדי להקטין את ההתנגדות בכל מקרה רצוי לא לפסול מראש "את מה שיש" אלא להגיש פתרונות חלופיים בתור הצעות לבחינה. את הפנייה להצעת השינוי כדאי לעשות בנועם ובנחת וגם לבקש "תסביר לי את הפתרון הקיים" כדי לדעת להתמודד טוב יותר עם טענות נגדיות. לבוגר לימודים טרי קשה לעיתים להתבסס על ניסיון מקצועי בהצעת השינוי, אך ידע מעודכן מהאקדמיה יכול לשמש בסיס טוב לא פחות. כמובן, ניתן במידת הצורך ועם הזהירות המתבקשת לפנות לבעלי עניין נוספים ולממונים כדי לקדם את הנושא.

### "מבחן רצינות": קבלת משימות קשות או משימות שאינן מקצועיות

יש מנהלים הנוקטים בגישה של הצבת אתגרים והטלת משימות קשות לעובד חדש כדי "לבדוק מה הוא שווה". אחרים נוהגים להטיל משימות שאינן רלוונטיות לעיסוק המקצועי המרכזי, כדי "לחבר למסגרת", להציג תמונה רחבה של עיסוקי החברה או פשוט לנסות את העובד החדש במילוי משימות באופן כללי ולהתרשם מהיכולות. סיבה נוספת לעומס משימות מסוגים שונים או שינויים תכופים במשימות ויעדים היא הרצון לבדוק אלו משימות מתאימות לעובד החדש, ומה הוא מבצע הכי טוב. תרגול כזה יכול להיות גם חלק מהכשרה טכנית או בחינת התאמה לנהלי הארגון.

בכניסה לתפקיד אין מנוס מתקופה שבה העובד החדש נדרש להוכיח את עצמו, בין היתר, תוך השקעה מרובה ולימוד עצמי. יחד עם זאת, כמו בדילמה הראשונה שהוצגה לעיל, אפשר וגם רצוי "לחתור למגע", להעלות את הנושא מול הממונים ולבקש באופן אקטיבי מטלות משמעותיות ורלוונטיות יותר. כדאי שתהליך החניכה יעבור לא בדרך חד-צדדית של קבלת משימות ומילוי, אלא תוך דיאלוג עם הממונים, קביעה של מסגרות זמנים ויעדים בתהליך החפיפה.

בעבודת הנדסת מערכות יש להיזהר מהשקעה של זמן ומשאבים במשימות מיותרות. כדי להבין במה דברים אמורים, ניזכר בכך שפרויקט מוגדר באמצעות לוח זמנים, ביצועים ותקציב. מכאן אפשר לדעת מתי אין פרויקט - אם אחד מהשלושה איננו.

נושא התקציב הוא ברור יחסית, בהנחה שהפרויקט מיועד להשגת מוצר או שירות ממשי שהוא בר קיימא ולא דו"ח, סקירת ספרות וכדומה. אם משימה נמשכת זמן רב ללא העמדת תקציב מתאים - סימן שהמשימה איננה צפויה לצאת אל הפועל.

נושא לוחות הזמנים הוא מורכב יותר אם לפרויקט אין לוחות זמנים או אין אדם הבודק אותו, סימן שהפרויקט איננו נחוץ יתר על המידה. בדרך כלל השאיפה היא לקבל את הפרויקט או המוצר "אתמול", או לכל הפחות מהר ככל האפשר (כמו בפיתוח מכשיר סלולרי חדש שצריך להגיע לשוק כמה שיותר מהר, פיתוח טיל שמיועד להסיר איום משודרג של האויב ועוד). נדיר המצב שבו יש זמן מוגדר מראש להכנה, לתכנון ולביצוע הפרויקט (כמו למשל בהיערכות לאולימפיאדה שמתוכננת להתקיים בעוד כמה שנים).

בתחום הביצועים - מצב שבו אין הגדרה מפורשת או משתמעת של התכולות הוא נדיר, אבל אם אין הגדרה מפורטת מספיק שמתאימה לבעל העניין המיועד - מדובר, שוב, בסימן שהפרויקט איננו נחוץ.

לא פשוט לזהות מצב של משימה המתבצעת בחוסר של אחד מהמרכיבים שהוזכרו: לוח זמנים, ביצועים ותקציב, בוודאי לא בשלבי ייזום שממילא כוללים רמה גבוהה של אי ודאות. אך אם מצב כזה בכל זאת נוצר, והוא נמשך מעבר לזמן סביר כלשהו ללא התקדמות, חשוב לפתור זאת כדי לא לבזבז זמן ומשאבים.



## הרחבה: הנדסת מערכות בעולם של מערכים/סרגיי טוזיק<sup>5</sup>

טיל מודרני הוא מערכת לחימה מורכבת ביותר. הטיל כולל תתי מערכות רבות, רכיבים אלקטרוניים ומכניים וחומרים מיוחדים, אמצעי הנחיה וביות, ממשקים ועוד. פיתוח של טיל חדש הוא משימה מורכבת הדורשת משאבים רבים ועבודה של עשרות ומאות אנשים.

אלא שטיל הוא רק חלק ממערך גדול יותר. מערך זה כולל את המפעילים, כלי הרכב, השיט או הטיס הנושאים את הטיל, אמצעי אחזקה, אמצעי הדרכה ומרכיבים רבים נוספים. כדי שיכולות הטיל יבואו לידי ביטוי בשדה הקרב, יש לשלב ביחידה צבאית המפעילה מגוון כוחות ואמצעים לביצוע משימותיה והשגת המטרות המבצעיות.

כל מערך מיועד לספק יכולת מבצעית, ובמקרה של הטיל היכולות הן יכולות תקיפה או יירוט, גם אם לעיתים עובר זמן רב מקבלת מערכת או אמצעי טכנולוגי אחר מהחברה המפתחת ועד השגת כשירות מבצעית מוכחת ביחידות הקולטות. למהנדס הניגש לפרויקט של מערכת או אמצעי יש משימה חשובה - להבטיח את השילוב של המערכת בתוך התמונה הגדולה - המערך שכחלק ממנו היא עתידה לפעול.

### על בעיות בתכנון משלמים באינטגרציה

באחד מהפרויקטים הראשונים שלי כקצין צעיר, הגדרתי את המפרט למכרז רכש מערכת להקלטת וידיאו עבור תחקור טיסות כלי טיס מאוישים מרחוק (כטמ"מ) של חיל האוויר. הוגדרו כל הפרמטרים הנדרשים, מלבד הגודל והמשקל. הסיבה לכך הייתה כי מערכות של היצרנים המובילים היו דומות מאוד מבחינת מאפיינים אלו, ולכאורה נתון זה לא היה שיקול למכרז.

מה רבה הייתה הפתעתי כאשר ספק לא מוכר זכה במכרז עם הצעה זולה מאוד. הבעיה הייתה, כמובן, המשקל והממדים של המכשיר שהיו גבוהים בכ־30 אחוזים מהמוצרים המקבילים. שילוב המוצר הזוכה בתחנות כטמ"מ דרש תכנון וייצור מגרות חדשות במסדי התחנה. בנוסף, המשקל הכבד של המכשיר העיקר רבות על הטכנאים שהיו רגילים למכשירים קטנים וקלים יותר שהתקין היצרן המקורי של מערכת כטמ"מ אחרת, חדשה יותר.

במקרה אחר נדרשה החלפת מערכת תקשורת במערך כטמ"מ, ללא מעורבותו של היצרן המקורי של מערך הכטמ"מ עצמה. הקליטה של מערכת התקשורת החדשה ארכה כמעט שנתיים וכללה פתרון בעיות ממשקים עם התחנה הקרקעית, התאמת התשתיות באתרי הפריסה, שילוב על גבי נגרר ועריכת ניסויי דרך, כתיבת נוהלי אחזקה, הדרכת טכנאים ומפעילים ועדכון תורת ההפעלה. במבט לאחור ברור, שמדובר היה באינטגרציה מערך טיפוסית שלא תוכננה מראש ככזאת!

### מערכות, מערכים ויכולות

כבר באמצע שנות ה־70 הבחין מנכ"ל רפאל דאז ד"ר זאב בונן בשוני מהותי בין מערכות טכנולוגיות לבין מערכים צבאיים. ההבדל המהותי מתבטא בתהליכי ההתפתחות השונים שלהם. במאמרו בכתב העת מערכות, <sup>6</sup> ד"ר בונן מגדיר כך:

מערכת ברמה מסוימת, המורכבת מתת-מערכות (מכלולים), מהווה בעצם תת-מערכת של מערכת ברמה גבוהה יותר (וחוזר חלילה). [...] מערכת מתפתחת, בעיקר על-ידי "התחלפות" הדורות. דהיינו, אם לנושא

<sup>5</sup> סרגיי טוזיק הוא בעלי חברת Scioint להכשרה ואימון אינטגרטורים מערכתיים; מהנדס מערכות המתמחה באינטגרציה ובדיקות מערכתיות, בעל ניסיון של יותר מ־20 שנים. בוגר תואר שני בפיסיקה שימושית במכון ויצמן למדע ותואר שני בהנדסת המערכות בטכניון, חבר פעיל ב-INCOSE\_IL ובלשכה לטכנולוגיות המידע בישראל.

<sup>6</sup> ד"ר זאב בונן (1975), "בעיות בהתפתחות מערכים צבאיים", מערכות, גיליון 245, עמ' 2-6, יולי 1975.

מסוים יש אורך חיים סופי, נקרא לו "מערכת". כל "מערכת", לאחר שפותחה ויוצרה ביחידה אחת או בכמויות, עוברת בדרך כלל במהלך חייה שיפורים, שיפוצים, והסבות. אולם לאחר שהתיישנה, היא "עוברת" מן העולם ומחליף אותה הדור הבא שפותח בינתיים, ושכולל תכונות חדשות בתכלית. לדוגמה: מטוס, טיל, תותח.

ד"ר בונן ממשיך וקובע:

מערך - לעומת זאת - כולל מספר רב של מערכות מסוגים שונים, המופעלות על-ידי אנשים רבים בצורה משולבת. המערך מתפתח באופן הדרגתי על-ידי שינויים חלקיים, תוספות, צירוף ולעתים גם "כריתת" חלקים. מערכים כמעט שאינם "מתים" ועוברים מן העולם, משום שבכל עת ימצאו בהם מרכיבים בעלי גילים ורמות פיתוח שונות, שצירופם יחד נראה, לעתים, מוזר. לדוגמה: מערך-קשר, רשת-רכבות, מערך חי"ר מחופר, ועוד.

המונח העברי "מערך" הקדים ביותר משני עשורים את המונח הלועזי System-of-Systems שהחל להשתרש בשיח ההנדסי והניהולי החל מאמצע שנות ה-90 כמענה להתפתחות מערכות מורכבות מבוססות טכנולוגיות מידע. ד"ר בונן<sup>7</sup> זיהה שוני בתפקידי המפתחים והצבא בפיתוח מערכים לעומת פיתוח אמצעי לחימה. עיקר הפעילות המעשית בפיתוח אמצעי לחימה מתנהלת אצל המפתחים - החל ביצירת הרעיונות וכלה בביצוע הפיתוח עצמו - ואילו הצבא מגדיר את הצורך, מאשר את המפרטים, עוקב אחרי הפיתוח ומפקח עליו. לעומת זאת, בפיתוח מערכים הצבא ממלא את התפקיד העיקרי, הן ביצירת הרעיונות והן בתהליך פיתוח המערך, ואילו המפתח תורם להבנת הפרטים הטכניים, היכולות והביצועים של אמצעים החדשים ובהצעת עזרים משלימים למערך.

בעשורים האחרונים התגבשה במערכות הביטחון המערביות התובנה שיש להעביר את המיקוד מפיתוח מערכות ואמצעי לפיתוח יכולות מבצעיות (mission capabilities). כל מדינה מגדירה באופן שונה את המרכיבים שמהם מורכבות היכולות המבצעיות,<sup>8</sup> אך אין שוני מהותי בין ההגדרות האלו. כך, לפי משרד ההגנה הבריטי היכולות נוצרות בשילוב של אימון, ציוד, כוח-אדם, מידע, תפיסות ודוקטרינה, ארגון, תשתית ולוגיסטיקה. משרד ההגנה של ארה"ב מגדיר את מרכיבי היכולת בניסוח שונה: דוקטרינה, ארגון, אימון, אמצעים, הכשרת מנהיגים, כוח-אדם ותשתיות. בצה"ל מקובל לדבר בהקשר זה על חמשת אבני בניין הכוח: תורת לחימה, אמצעים, כוח-אדם, אימון והכשרה ותשתיות.

### מערכת ליכולת מבצעית: תהליכי שילוב אמצעי לחימה במערך

קליטת אמצעי לחימה חדשים בצה"ל מתמקדת ביצירת היכולת להוציא לפועל משימות מבצעיות מסוג מסוים ושמירת היכולת הזאת לאורך הזמן. לקראת כל משימה מתארגן מערך משימתי זמני המשלב את כלל האמצעים (אמצעי לחימה, אנשים, מידע ועוד) הנדרשים כדי לבצע את המשימה. כך, משימת תקיפה קרקעית באמצעות מטוסי קרב משלבת את הטילים המיועדים לתקיפה, מטוסי קרב שיובילו את הטילים, צוותי אוויר שיבצעו את המשימה, צוותי קרקע והציוד שלהם הנדרש להכנת הטילים והמטוסים, המידע המודיעיני, תכנון המשימה הכולל הגדרת מטרות לתקיפה ומרכיבים רבים נוספים. הוצאת המשימה לפועל תלויה בזמינות מרכיבי המערך המשימתי וביכולת מוכחת של היחידה הצבאית

<sup>7</sup> בונן (1985), עמ' 41-44.

<sup>8</sup> Anteroinen, Jukka, (2012) "Integration of existing military capability models into the comprehensive capability meta-model", 2012 IEEE International Systems Conference SysCon 2012, 1-7: doi:10.1109/SysCon.2012.6189479

להתארגן למשימות בזמן ובאיכות הנדרשים. שני אלה הם התנאים לאישור כשירות משימתית של היחידה. שמירת הכשירות לאורך הזמן מחייבת קיום שני מערכים נוספים וקבועים - המערך התחזוקתי הלוגיסטי המיועד לשימור זמינות הציוד והמערך ההדרכתי המשמר את הידע של האנשים. המערכים התומכים האלה משלבים מרכיבים שונים מאלה של המערך המבצעי - מחסנים, ציוד בדיקה, טכנאים, מדריכים, חומרי הדרכה, כיתות, סימולטורים ואמצעים נוספים.

סיום הפיתוח ובדיקות המערכת רק מתחיל את המסע ליצירת היכולת המבצעית הניתנת להפעלה בשדה הקרב. ניתן לראות את תהליך מבצוע המערכת כסדרה של אירועי אינטגרציה, וכל אחד מהם מוסיף למערכת אלמנטים חדשים הנדרשים לשילובה במערך המבצעי. כל אחד מאירועים אלו מחייב למידה - גם צבירת הידע והניסיון על-ידי המשתמשים במערכת, גם למידה ארגונית המתבטאת בשינוי התהליכים הארגוניים והנהלים, וגם שינויים והתאמות במערכת עצמה ובמערכות האחרות.

### מהצלחת המערכת להצלחת המערך

הצלחת כל פרויקט מערכתי נמדדת בסופו של דבר בהקמה של יכולת מבצעית חדשה או משופרת, קרי בשילוב ובהטמעה של האמצעים הטכנולוגיים החדשים בתוך המערך המבצעי, התחזוקתי וההדרכתי. באופן מפתיע למעורבות של מהנדסי המערכות הצבאיים בפיתוח של המערכות יש משקל נמוך יחסית בהצלחת שילוב המערכת במערך, על אף אחריותם כמפקחים על הפיתוח, על בקרת עמידה בדרישות וייצוג צורכי הלקוח מול המפתח לצד ממשקים של המערכת המפותחת עם מערכות אחרות ועם המשתמשים העתידיים שלה.

מסתבר כי המהנדסים הצבאיים תורמים הרבה יותר להצלחה המבצעית אם הם מתמקדים בהתאמה הדדית בין המערכת הנקלטת לבין המערך הקולט, באינטגרציה של המערכת המפותחת עם מערכות האחרות, עם התשתיות ועם המשתמשים והמאחזקים העתידיים שלה.

מהנדסי המערכות הצבאיים מתפקדים כ"מהנדסי מערכים". משימתו של מהנדס המערכים היא לתרגם היטב את צורכי המערך למאפייני המערכת בשלב הגדרת המערכת, כולל צורכי שימור הכשירות של הציוד והידע (אחזקה, תיעוד, הדרכה והכשרה).

חשוב לא פחות להתייחס להטמעת המערכת כפרויקט לכל דבר שמתקיים במקביל לפרויקט פיתוח המערכת, ולהקצות משאבים וזמן לאינטגרציה נאותה בשלבי הקליטה כולל הקצאת המשאבים להכנת המערך הקולט לשינויים הכרוכים בקליטת המערכת החדשה. כחלק מתפקידו, על מהנדס המערכים לתווך באופן רצוף בין מפתחי המערכת לבין המערך הקולט מהשלבים המוקדמים ביותר, לטובת התיאום ובשילוב בין פרויקט הפיתוח ופרויקט ההטמעה, בדרך להקמה והוכחת היכולת המבצעית המיוחלת.

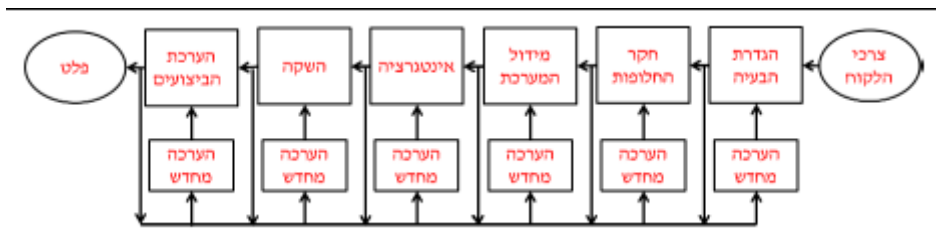
מנקודת המבט של המפתח, מערכת מוצלחת עונה היטב על דרישות המפרט. עם זאת, מנקודת המבט של הלקוח המבצעי, מערכת מוצלחת היא המערכת שמשתלבת היטב במערך הקולט ומקדמת את יכולותיו. מהנדסי המערכות מטעם הלקוח צריכים לפעול כמהנדסי המערכים האחראיים על בניית המערכים העוטפים את המערכות ואת אמצעי הלחימה הנרכשים, ובכך יוצרים את היכולות המבצעיות המיוחלות.



## תהליך הנדסת מערכות

הנדסת מערכות מבוססת על חשיבה מערכתית - "ראיית השלם" שהוא מעבר לאוסף חלקים והיבטים. חשיבה מערכתית עוסקת בתפקוד המערכת לאורך זמן בסביבתה תוך אינטראקציה עם מערכות חיצוניות. ההתייחסות למכלולים המרכיבים את המערכת והאינטראקציות ביניהם היא בראייה של התכונות המתהוות של המערכת כולה.

תהליך הנדסת מערכות<sup>9</sup> הוא תהליך בינתחומי שמיועד להבטיח כי הצרכים של הלקוח ובעלי העניין מתמלאים בדרך איכותית, אמינה, יעילה מבחינת העלות ותואמת ללוח הזמנים לאורך כל מחזור החיים של המערכת. התהליך העקרוני של הנדסת מערכות<sup>10</sup> כולל שבעה שלבים: הגדרת הבעיה, חקר החלופות, מידול המערכת, אינטגרציה, השקת המערכת, הערכת הביצועים ובחינה והערכה מחדש. שמות השלבים באנגלית יוצרים את ראשי התיבות SIMILAR: State the problem, Investigate alternatives, Model the system, Integrate, Launch the system, Assess performance, and Re-evaluate.<sup>11</sup> חשוב לציין כי תהליך הנדסת מערכות אינו רצוף, אלא הפונקציות מבוצעות באופן מקבילי ואיטרטיבי:



תהליך SIMILAR להנדסת מערכות

בשלב הגדרת הבעיה נדרש להגדיר מתוך צרכי הלקוחות את הפונקציות ואת ההתנהגויות המרכזיות של המערכת ברמת-על ובמונחים של מה נדרש לבצע, ולא איך לבצע זאת. הגדרת הבעיה צריכה לבטא את דרישות הלקוח במונחי תפקוד או התנהגות הנדרשים מהמערכת, הגדרת תפיסת תפעול או תיאור של פער הנדרש לטיפול. ההגדרות מתבססות על מידע המגיע ממשתמשי קצה, מפעילים, מתכננים, ספקים, קונים, בעלים, סוכנויות רגולטוריות, נותני חסות, יצרנים ובעלי עניין אחרים המשפיעים או המושפעים מהמערכת. הגדרת הבעיה כוללת בדרך כלל דרישות חובה שהמערכת מחויבת לעמוד בהן ודרישות רצויות שהעלות מול התועלת של העמידה בהן תיבחן בהמשך בתהליך איתור החלופות המועדפות.

בשלב חקר החלופות נדרש להעריך גישות שונות לפתרון הבעיה מול הדרישות ובהתאם לקריטריונים של עלות, ביצועים, לוח זמנים וערך ללקוח. בדרך כלל אין חלופה שהיא הטובה ביותר בכל הפרמטרים, ולכן יש להשתמש בשיטות ניתוח ושקלול מול מספר רב של משתנים כדי להגיע אל החלופות המועדפות. הערכת החלופות היא תהליך מתמשך שנדרש לבצע באופן מתמיד ובכל עת שמתקבל מידע חדש על המערכת במהלך האפיון, התכן והייצור. מידע זה עשוי להגיע מנתוני מידול וסימולציה, מבחינת אב הטיפוס המערכתי ומבחינה של המערכת האמיתית בסביבתה.

בשלב מידול המערכת נדרש לגבש אוסף מודלים של התהליך והמוצר שיבטא את מבנה המערכת, את

<sup>9</sup> מבוסס על חומרי המועצה הבינלאומית להנדסת מערכות.

<sup>10</sup> על-פי המועצה הבינלאומית להנדסת מערכות.

<sup>11</sup> From A. T. Bahill and B. Gissing, Re-evaluating systems engineering concepts using systems thinking, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 28 (4), 516-527, 1998

התנהגותה, ממשקים עם מערכות בסביבה וכדומה. קיימים מודלים מסוגים שונים, כמו תרשימי בלוקים, תרשימי זרימה, מודלים מונחי עצמים, תרשימי מצבים ועוד. המודלים של החלופה הנבחרת יורחבו וישמשו לאורך כל מחזור החיים הן עבור התכנן ההנדסי והן עבור השוואה מול חלופות אפשריות בכל עת שמתגלה מידע חדש לאורך הפרויקט.

בשלב האינטגרציה נדרש לשלב את תתי-המערכות למערכת אחת תוך בדיקת הממשקים בין המרכיבים ובין המערכת לסביבתה. בסיום שלב האינטגרציה המערכת משלבת אנשים ותהליכים עסקיים ומוכנה לשימוש בסביבה האמיתית.

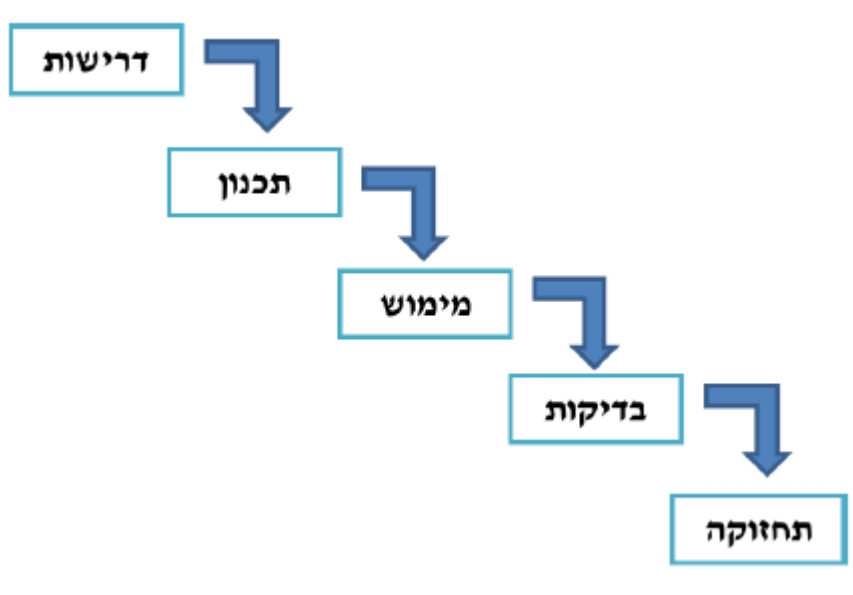
בשלב השקת המערכת - המערכת מופעלת בשלמותה ומבצעת את המשימה שלשמה נוצרה. בשלב הערכת הביצועים המערכת נבחנת לאורך זמן מול הדרישות ומול הציפיות של הלקוח בתחומים טכניים, כלכליים ואחרים. הערכת הביצועים כוללת פרמטרים טכניים (נפח, משקל, צריכת אנרגיה ועוד) לצד פרמטרים של שביעות רצון משתמשים, סוגי פניות לתמיכה ודיווחי תקלה ועוד. תהליך הבחינה וההערכה מחדש הוא אולי הפעולה החשובה ביותר מבין כל השלבים בתהליך הנדסת המערכות. הבחינה וההערכה מחדש מלווה את תהליך הנדסת המערכות לכל אורכו ומאפשרת שיפור ושינוי של המערכת על בסיס משוב והערכה.

## מודלים לתהליך הנדסת מערכות

תהליך הנדסת המערכות כולל שלבים של ייזום, תכנון, פיתוח, ייצור ותפעול המערכת. המודלים לתהליכי מחזור החיים בפיתוח מערכות התפתחו לאורך השנים, וכיום מקובל להבחין בשלוש גישות עקרוניות לתהליך הנדסת מערכות ולתהליך הפרויקט בכלל:

1. **תהליכים סדרתיים** (Sequential): תהליכים שבהם הפעולות מבוצעות בסדר עוקב מייזום לייצור ותפעול; מודל מפל המים ומודל V הם דוגמאות לתהליכים סדרתיים;
2. **תהליכים מחזוריים** (Iterative): תהליכים שבהם מבוצעים מספר מחזורי תכן ומימוש, ובכל מחזור נוסף מבוצעת התאמה של המערכת להערות של הלקוחות והמשתמשים;
3. **תהליכים זריזים וגמישים** (Agile): תהליכים שבהם שלבי התכנון מצומצמים והדרישות מתפתחות יחד עם תכן המערכת או המוצר לאורך הפרויקט; בפיתוח זריז התכולות מחולקות לחבילות עבודה קטנות, והצוותים מגיעים מהר יחסית למוצר ראשוני.

אחד המודלים הוותיקים והנפוצים ביותר לתהליך פיתוח סדרתי הוא מודל מפל המים. המודל הגיע מתחום התוכנה, אך רלוונטי גם למערכות כלליות. במודל זה מתקיים תהליך פיתוח אחד רצוף שבו הדרישות, התכנון, המימוש, הבדיקות והתחזוקה מתבצעים באופן טורי. מודל מפל המים מחייב איסוף פרטני של כל הדרישות לפני המעבר לשלב התכן וביצוע תכן מפורט ומלא לפני תחילת הייצור. התארכות שלבי אפיון ותכן הם סיכון בולט בניהול פרויקטים לפי מודל מפל המים. חיסרון נוסף של תהליכים המתבצעים על-פי מודל מפל המים הוא ששינויים בתהליך התכן מתגלות בשלב מאוחר מאוד. שלב הבדיקות מגיע רק אחרי שלב המימוש, ואם נמצא שהמוצר אינו מתאים למפרט או לייצור - נדרש לשנות את המערכת שכבר יוצרה.

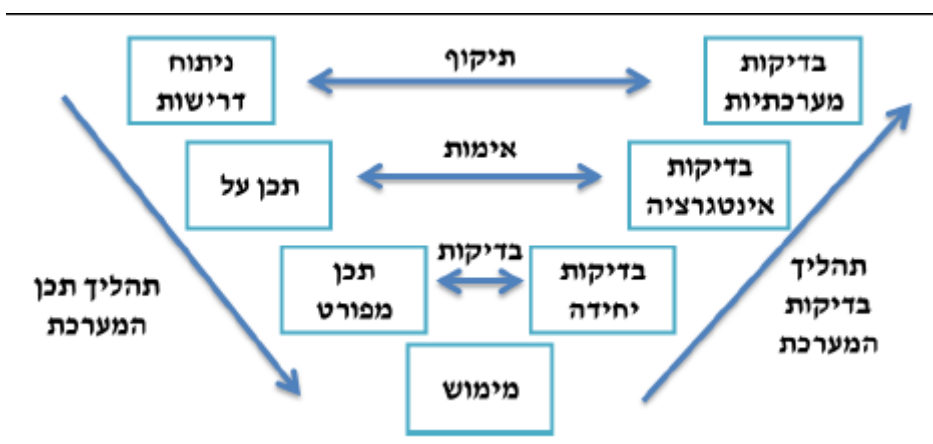


מודל מפל המים לתכן מערכות

מודל פיתוח סדרתי מאוחר יותר המבוסס על מודל מפל המים הוא "מודל ה-V". הכינוי ניתן למודל על-פי צורתו הגרפית.

תהליכי ניתוח הדרישות, התכן והמימוש במודל זה דומים למודל מפל המים. לאחר שלב המימוש מתחילים שלבי הבדיקות לאימות ותיקוף ביצועים ברמת יחידה, מכלול ומערכת מול התכן והדרישות המקבילים בכל רמה. לדוגמה, ברכב בדיקות ברמת היחידה יכולות להיות אימות ביצועים של מד הדלק במכל שיבוצעו במעבדה. בדיקות אינטגרציה יכולות להיות בדיקות הרצה של מנוע כמכלול שלם.

בדיקות מערכתיות עשויות להתבצע בצורה של נסיעת מבחן של הרכב המורכב כולו. כמו במודל מפל המים, גם כאן מוצג תהליך סדרתי אחד. לעומת מודל מפל המים, מודל V מוסיף הדגש לביצוע הבדיקות ברמות מימוש שונות, והדבר מיועד לאפשר תהליך מובנה לגילוי מוקדם יותר של תקלות אפשריות.

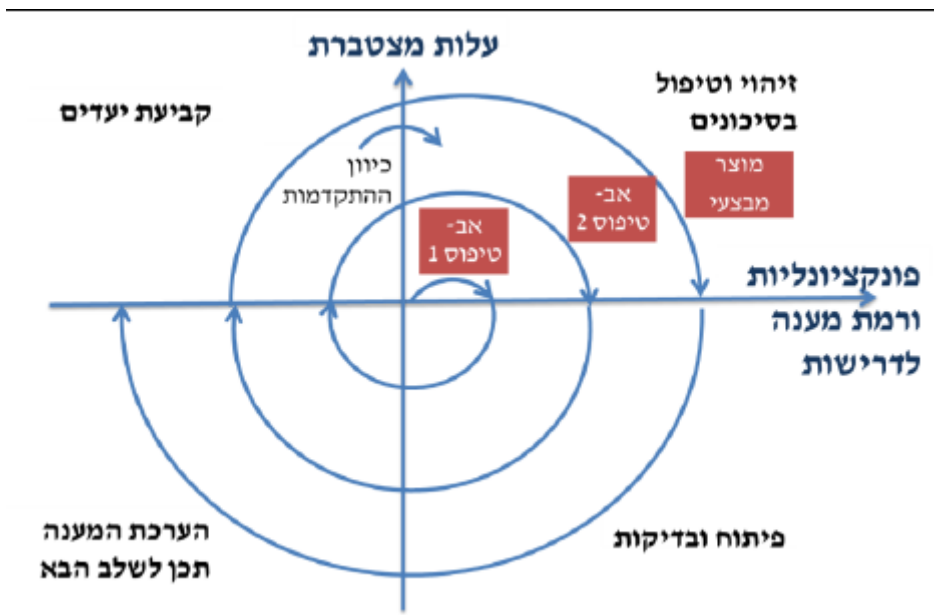


מודל ה-V לתכן מערכות

התהליכים הסדרתיים מחייבים תכנון מלא כתנאי להתקדמות לפיתוח וייצור. היתרון של שיטה זו הוא הדיוק בהגדרת המאפיינים הנדרשים והתאמה מלאה של המערכת הסופית למפרט המקור. החיסרון הגדול של השיטה הוא הזמן שנדרש לצורך ביצוע התכן, איבודאות בהגדרת הצורך שלעיתים אינה מאפשרת להכיר את

כלל הדרישות מראש, ואי-היכולת להגיב לדרישות שייווצרו כתוצאה מהכנסת המערכת לשימוש. גישה שנייה לתהליכי הנדסת מערכות היא תהליך מחזורי או איטרטיבי. בגישה זו מבוצע תכנון חלקי לפי הידוע בשלב זה והעברה לשימוש, גם אם מדובר במוצר חלקי שאינו מספק את מלוא הפונקציונליות. על בסיס הלקחים והתובנות של המשתמשים מבוצעת התאמה ותוספות. היתרון של שיטה זו הוא המהירות למבצוע והיכולת לצבור התייחסות באופן מהיר. החיסרון הוא הצורך בפיתוח חוזר והתאמה של פיתוחים לדרישות חדשות.

אחד המודלים הראשונים לתהליך פיתוח איטרטיבי הוא המודל הספירלי לתהליכי פיתוח. המודל שהציע בואהם (B. Boehm) בשנת 1986<sup>12</sup> משנה את ההסתכלות על תהליך הפיתוח כעל תהליך אחד ורצוף. במקרים רבים בשלב ההתחלתי של הפרויקט אין ודאות בנוגע לדרישות המדויקות של המשתמשים או באשר לאופן שבו המערכת תשתלב בסביבתה. העיקרון המנחה במודל הספירלי הוא ביצוע תהליך של כמה סבבי פיתוח מהירים בדרגות עומק הולכות וגדלות. התוצר של איטראציות ראשונות הוא מערכת שבתחילה אינה ממלאת את כלל הדרישות, אך היא מאפשרת להתרשם מהתצורה והביצועים העתידיים. החשיפה המוקדמת של המערכת למשתמש מאפשרת גמישות בהגדרת הדרישות ותורמת להורדת סיכוני הפיתוח. סבבי המימוש העוקבים מיועדים להשלים את הפונקציונליות המלאה ואת העדכונים שנדרשים לאורך הדרך. המודל הספירלי מובא באופן סכמתי באיור הבא. הציר האנכי באיור הוא עלות מצטברת של הפרויקט הגדלה עם כל איטראציה, והציר האופקי הוא הפונקציונליות ורמת מענה לדרישות. זיהוי וטיפול בסיכונים מוצר מבצעי אב-טיפוס 2 אב-טיפוס 1 קביעת יעדים כיוון ההתקדמות הערכת המענה תכן לשלב הבא פיתוח ובדיקות



המודל הספירלי לתכנון מערכות (עלפי Boehm)

בשנים האחרונות יותר ויותר חברות עושות שימוש במודל פיתוח "זריז וגמיש" (Agile). הגישה החלה בתחומי הנדסת תוכנה ועברה במהרה לתחומים נוספים ובהם הנדסת מערכות. התפיסה היסודית במודלים אלו היא ביצוע מהיר של אבות טיפוס לצורך הצגתם ללקוח וקבלת משוב. השיטה מובילה לצמצום שלבי האפיון עד

<sup>12</sup> Boehm B, "A Spiral Model of Software Development and Enhancement", ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, ACM, 11(4):14-24, August 1986.



כדי ביטולם לחלוטין. עבודה משותפת עם הלקוח בסבבים קצרים מצמצמת את אי-הוודאות, משפרת את הסיכויים להצלחת הפרויקט ומקצרת זמנים. עם זאת, מימוש מהיר מחייב לעיתים עבודה במספר סבבים על אותו נושא, אם יש צורך לשכתב קוד שנכתב במהירות לצורך הצגה במעבר למערכת הסופית. כל שלושת סוגי המודלים (תהליכים סדרתיים, איטרטיביים וזריזים) נמצאים היום בשימוש בתעשייה. הבחירה בין המודלים מתבצעת בהתאם לצוות, ללוחות הזמנים ולמשימה. מיזוג והתאמה של מודלי הפיתוח מול הצרכים והאילוץ הוא חלק ממשימות הנדסת המערכות שיש בהן כדי ליצור השפעה גדולה על הפרויקט.

אחד המודלים המשולבים לתהליך הנדסת מערכות שפותח בארץ הוא מודל שיטת תכן קונספטואלי משולב מוכוון לקוח - Integrated, Customer Driven, Conceptual Design Method (ICDM). את התהליך פיתחו עמי הרי, מנחם וייס ואביגדור זוננשיין, והוא עוסק בפיתוח מובנה וכמותי של הקונספט המערכתי. התהליך כולל עשרה שלבים החל מזיהוי הלקוחות וצורכיהם ועד לבחירת הקונספט הסופי. השיטה הוצגה לראשונה בכנס הנדסת מערכות בשנת 1996,<sup>13</sup> ומאז היא יושמה בעשרות פרויקטים.

### משימות מרכזיות בתהליך הנדסת מערכות

אחד הנהלים שמציגים היטב את התהליך העקרוני להנדסת מערכות הוא הוראה של צה"ל בנושא ייזום, פיתוח הצטיידות וקליטה של אמצעים ומערכות.<sup>14</sup> השלבים בהוראה זו מפורטים בראייה מערכתית כללית, והם רלוונטיים לפרויקטים המנוהלים בכל תחום. התהליך המוצג הוא תהליך סדרתי היכול לשמש בסיס למודלי פיתוח מחזוריים וזריזים. חלק מהמונחים הכלולים בנוהל, כמו תורת לחימה או דרישה מבצעית, מגיעים מעולם התוכן הצבאי, אך אלו שקולים למושגים מקבילים בעולם האזרחי והעסקי, כמו תפיסת ההפעלה או צורך עסקי.

מודל מחזור החיים של הפרויקט בצה"ל הוא מודל רחב הכולל נושאים רבים מלבד שלב הפיתוח, שבו מתרכזים חלק מהמודלים האחרים. המודל מפרט נושאים הקודמים לשלב הפיתוח, כמו ניתוח הצורך, גיבוש חלופות שונות למענה, הערכתן ובחירה של החלופה הנבחרת. המודל של צה"ל כולל גם תהליכים המתרחשים לאחר סיום הפיתוח, כמו תהליכי הייצור, הקליטה וההטמעה - השימוש המעשי במערכת ובדיקת ביצועיה בסביבה הטבעית לאורך זמן. תהליך הפרויקט בצה"ל מורכב משלושה שלבים מרכזיים: ייזום והתארגנות למימוש הפרויקט; מימוש הפרויקט - פיתוח, ייצור והצטיידות; קליטה והטמעה.

### ייזום והתארגנות למימוש הפרויקט

תחילת שלב הייזום וההתארגנות למימוש הפרויקט היא בהגדרת הצורך המבצעי. צורך מבצעי הוא יכולת, כושר, תפוקה מבצעית, אמצעי או משאב שגורם מוסמך קבע כנחוצים כדי לעמוד בהישג הנדרש בלחימה. בעוד שכל גוף (אזרחי או צבאי) או חייל רשאי להצביע על קיום פער מבצעי, הגורם שהוסמך לכך בזרוע או באגף יבחן וישקול את מהות הפער המבצעי שהובא בפניו, ויחליט אם להגדירו כצורך מבצעי. הגדרת הצורך המבצעי נובעת מתוך תפיסה מבצעית ומראייה שלמה של יכולת.

לאחר אישור הצורך המבצעי מתקיים 'אישור רעיון מרכזי' לפרויקט. זהו אישור ראשוני של המרכיבים

<sup>13</sup> M. P. Weiss, A. Hari, A. Zonnenshain, *Design of the concept of a new system using Integrated, Customer Driven, Conceptual Design Method (ICDM)*, Proc. of the 12<sup>th</sup> Annual International Symposium of the International Council on Systems Engineering (INCOSE), August 1996.

<sup>14</sup> הוראת קבע אגף התכנון 10/1, ייזום, פיתוח הצטיידות וקליטה של אמצעים ומערכות, צה"ל 2016.

העיקריים בתוכנית או בפרויקט שהם אלה: תפיסה, כיווני מענה אפשריים, כיוון המענה המומלץ ומשמעויות ראשוניות.

הצגת 'אישור רעיון מרכזי' לפרויקט תכלול את הנושאים האלה:

1. תפיסה מבצעית;
  2. כיווני מענה אפשריים: תוכניות קיימות וחדשות, מענה בתפיסת הפעלה ועוד;
  3. תפיסת הפעלה ראשונית, לרבות הערכת התפוקה מהפרויקט;
  4. הערכת עלויות ראשונית, לרבות כיווני מקורות תקציב אפשריים;
  5. הערכת לוחות זמנים למימוש;
  6. התייחסות משפטית ראשונית במידת הנדרש;
  7. נושאים נוספים עקרוניים רלוונטיים, אם יש, אשר יש להם פוטנציאל להשפיע על אחד ממרכיבי מימוש המענה (עלויות, לוחות זמנים, כוח-אדם ועוד).
- כחלק מייזום הפרויקט ולאחר 'אישור רעיון מרכזי' תבוצע בדיקת מערכת. בדיקת מערכת היא בחינה של מרכיבים בפרויקט בהסתמך, בין היתר, על התפיסות הראשוניות שגובשו. בדיקה זו נועדה לצמצם את פערי הידע לקראת החלטה על אישור הפרויקט.
- ניתן למקד את בדיקת המערכת לנושאי בחינה על-פי רלוונטיות ופערי הידע על הפרויקט. את עיקרי תוצרי בדיקת המערכת יש להציג בהמשך תהליך אישור הפרויקט. להלן חלק מנושאים מרכזיים לבחינה בבדיקת מערכת:

1. הצורך המבצעי, ההישג הנדרש, משמעויות מבצעיות והתפיסה המבצעית;
  2. היתכנות טכנולוגית והנדסית, חלופות למענה ואפקטיביות על פני ציר הזמן;
  3. משמעויות בהיבטי תשתית ופריסה, לרבות שמירה על רציפות התפקוד;
  4. משמעויות כוח-אדם (לרבות כוח-אדם לפיתוח, להצטיידות, לתפעול ולאחזקה);
  5. היבטי תקינה, תאימות, קישוריות וארכיטקטורת התקשוב;
  6. לוחות זמנים;
  7. עלויות פיתוח והצטיידות, ניתוח ראשוני של עלות מחזור חיים (Life Cycle Cost - LCC);
  8. אפשרויות רכש או פיתוח, כולל אפשרויות לפיתוח בתוך צה"ל ולפיתוח בתעשייה;
  9. הערכת סיכונים משלב הפיתוח ועד להשגת יכולת מבצעית;
  10. משמעויות בהיבטי אימונים והדרכה, משמעויות לוגיסטיות ומשמעויות ארגוניות;
  11. היבטים נוספים, כמו הגנת הסביבה, יעילות אנרגטית ונושאים נוספים בהתאם לצורך.
- אישור עקרוני הוא אישור הפרויקט על כלל מרכיביו, תיאום עם כלל הגורמים הרלוונטיים, תקצוב הפרויקט ומתן אישור לנהל משא ומתן מול התעשייה. הצגת הפרויקט לאישור עקרוני כוללת תכנון מלא של החלופה הנבחרת בהתאם לנושאים שנבחנו בבדיקת מערכת ונושאים נוספים בהתאם לאופי הפרויקט, לרבות נושאים כמו עיקרי הצורך המבצעי, תכולת הפרויקט הנדרשת והמתוכננת, פירוט עלויות הפרויקט ואילוצים. להלן פירוט של נושאים אלו:

1. עיקרי הצורך המבצעי, המענה הקיים כיום בצה"ל לצורך המבצעי המוצג (סדר הכוחות, תפיסת

הפעלה, ארגון, פריסה ועוד), הפער המבצעי, עיקרי המסקנות וההמלצות מבדיקת המערכת (החלופות שנבחנו, המענה המועדף והפער הנותר), עיקרי הלקחים שהופקו בפרויקטים דומים או קודמים המיושמים בפרויקט.

2. **תכולת הפרויקט הנדרשת והמתוכננת**, לרבות היקף ההצטיידות באמצעי המפותח, ביצועים עיקריים של האמצעי, בינוי ותשתיות, לרבות שמירה על הציפות התפקוד, מרכיבי תמיכה לוגיסטית כוללת (ILS - Integrated Logistic Support) ומידת הכיסוי לפער המבצעי.

3. **פירוט עלויות הפרויקט**, לרבות השקעות קודמות בפרויקט, ניתוח עלויות משוערות לפיתוח, הצטיידות וקליטה, כולל השקעות נדרשות בחלקי חילוף, ציוד בדיקה, מדמים, אמצעי הדרכה, ספרות טכנית, תשתית, פריסה ובינוי, פילוח עלויות לפי עלויות חדפעמיות ועלויות לכל פריט (NRE - Non Recurrent Expenses, RE - Recurrent Expenses). פירוט העלויות יכלול ניתוח מלא של עלות מחזור החיים (LCC) של הפרויקט והשלכות הפרויקט על עלויות הקיום השוטף.

4. **אילוצים, התניות ומגבלות שיידרשו בחוזה**, לרבות נקודות יציאה מהפרויקט וקנסות, אופציות המתוכננות בחוזה להמשך פיתוח והצטיידות (מהות ותכולת האופציה, כמויות וזמני הספקה), משמעויותיהן התקציביות, מועד תקפותן ומשמעויות אי-מימושן.

לאחר אישור עקרוני לפרויקט מתחילה כתיבת האופיון הטכני ותקני בחינה של האמצעים הנגזרים משימת הפרויקט. הגורמים המקצועיים הרלוונטיים לפרויקט יבאו לידי ביטוי במסמך האופיון הטכני ובמסמך תקני הבחינה את ההנחיות או המדיניות בתחומי הרכב, ביטחון המידע, התחמושת, החשמל, התאימות האלקטרומגנטית, הבטיחות והבריאות ובתחומים נוספים בהתאם לצורך.

אישור סופי של הפרויקט מתבצע עם סיום משא ומתן וסיכום כלל ההיבטים של היציאה לפרויקט. בשלב זה מוצגים למקבלי ההחלטות הסיכומים במשא ומתן ושינויים עיקריים, אם היו, מהאישור העקרוני. עם חתימת החוזה מול הספק מתחיל שלב מימוש הפרויקט.

#### **מימוש הפרויקט: פיתוח, ייצור והצטיידות**

לכל פרויקט יש תוכנית פיתוח המתאימה לאופי הפרויקט, סוג, הסיכונים בו ומאפיינים נוספים. באופן כללי תוכנית הפיתוח כוללת פיתוח אב-טיפוס, ניסויי מפתח, הקפאת תצורת דגם לניסויים, יציאה לרכש פריטים בעלי זמן רכש ארוך (LLI - Long Lead Items), פיתוח וייצור דגמים הנדסיים, כתיבת תקני ניסויים, ניסויי בטיחות וגהות, ניסויים טכניים ומבצעיים ואישור דגם.

כחלק מבקרת הפרויקט יבצע קצין הפרויקט, על בסיס מסמך תכולת העבודה וכפי שסוכם בחוזה עם היצרן, סקרים, בהתאם לצורך. בין סקרים אלו עשויים להופיע סקר דרישות מערכת (SRR - System Requirements Review), סקר תיכון ראשוני (PDR - Preliminary Design Review), סקר תיכון קריטי (CDR - Critical Design Review), סקר בטיחות ובריאות ועוד.

ניהול סיכונים יתבצע במקביל לתהליך הפיתוח מתחילתו ועד סיום הפרויקט. תיכתב תוכנית ניהול סיכונים לפרויקט, והיא תעודכן מעת לעת על-פי הצורך והתקדמות הפרויקט.

**ניסויי מפתח** - המפתח או היצרן יבצע ניסויי מפתח להוכחת הביצועים הנדרשים מהאמצעי, בהנחיית נציג צה"ל ובהתאם לתנאי החוזה. המפתח או היצרן יישם את לקחי הניסויים באמצעי המפותח עד לעמידתו בביצועים הנדרשים.

**הקפאת תצורת דגם לניסויים** - לאחר עמידת האמצעי בניסויי המפתח תבוצע הקפאת תצורת דגם האמצעי לקראת הניסויים הטכניים והמבצעיים שיבוצעו בהמשך.

**פיתוח וייצור של דגמים הנדסיים** - המפתח או היצרן ייצר, במידת הצורך ובהתאם לתנאי החוזה שנחתם, דגמים הנדסיים לשם ביצוע הניסויים המבצעיים והטכניים.

**עריכת ניסויי בטיחות, בריאות והגנת הסביבה** - יבוצעו ניסויי בטיחות, בריאות והגנת הסביבה בהתאם לתקני הניסויים שנכתבו. לאחר שהאמצעי עמד בדרישות הבטיחות, הבריאות והגנת הסביבה, יפרסמו נציגי צה"ל אישור על בטיחות, בריאות והגנת הסביבה (לאחר קבלת אישורי הגופים הרלוונטיים). האישור הוא תנאי לעריכת ניסויים טכניים ומבצעיים.

**עריכת ניסויים טכניים ומבצעיים** - תקני הניסויים הטכניים והמבצעיים יכללו את הניסויים שיש לבצע על מנת לוודא את עמידת האמצעי בדרישות האופיון הטכני והאופיון המבצעי. בהתאם לדוחות הניסויים ישם המפתח או היצרן את לקחי הניסויים בהתאם לתנאי החוזה שנחתם, ובמידת הצורך יבוצעו ניסויים חוזרים. **אישור דגם** - בהתאם לתוצאות הבדיקות תינתן המלצה לאשר את דגם האמצעי. ההמלצות תתייחסנה גם למוצרי התמיכה הכוללת ולמאמנים. אישור דגם, המשמש אישור לשימוש באמצעי, יגדיר את תצורת הדגם המאושר וכן תנאים ומגבלות להפעלת האמצעי, לעמידתו בתנאי הסביבה ולתאימותו האלקטרוניקה, במידת הצורך.

### **ייצור והצטיידות**

שלב הייצור וההצטיידות כולל את הקמת קו הייצור לייצור סדרתי של האמצעי (לאחר אישור הדגם) על-פי החוזה והספקתו לצה"ל. השלב מתחיל עם היערכות לייצור ולהקמה של קו ייצור ואישור קו ייצור על-ידי צה"ל. לא עמד קו הייצור בבחינה - ההסתייגויות ממתן אישור יועברו ליצרן שיפעל להתאמת קו הייצור לדרישות ויזמן את נציגי צה"ל לבחינה חוזרת. בקו הייצור שהוקם ואושר, ייוצרו ראשי סדרה שהם הפריטים הראשונים המופקים מקו הייצור על בסיס הדגם שתצורתו הוקפאה במסגרת אישור הדגם.

נהוג לבצע בחינת קבלה מורחבת (בק"ם) לראשי הסדרה שיוצרו, כדי לוודא את התאמת ראשי הסדרה לדגם שיוצרו, ואת עמידתם בביצועים הנדרשים מהאמצעי. לא עמדו ראשי הסדרה בבק"ם - יבחנו היצרן ונציגי צה"ל את הסיבות לכך ויבצעו פעילות מתקנת בהתאם, לרבות ביצוע בק"ם חוזרת, חלקית או מלאה, או יתנו אישורי חריגה במידת הצורך.

ייצור סדרתי - לאחר עמידה בבק"ם יעבור היצרן לייצור סדרתי בהיקפים ובלוחות הזמנים שנקבעו בחוזה. תבוצע בחינה לאמצעים שיוצרו, ובמסגרתה יבוצעו בדיקות שמטרתן בחינת התאמת האמצעים לדגם שיוצרו. לא עמדו האמצעים בבחינה - יבחנו היצרן ונציגי צה"ל את הסיבות לכך ויבצעו פעילות מתקנת בהתאם, לרבות ביצוע בחינה חוזרת, חלקית או מלאה, או יתנו אישורי חריגה במידת הצורך.

הספקה סדרתית והספקת מוצרי תמיכה היא התהליך הסופי של העברת האמצעים שיוצרו, לרבות אמצעי התמיכה הכוללת, לצה"ל, בהתאם לכמויות, ללוחות הזמנים ולאופן ההספקה שנקבעו בחוזה.

### **קליטה והטמעה**

תוכנית הקליטה וההטמעה כוללת שני היבטים מרכזיים: קליטה מבצעית וקליטה לוגיסטית. עבודת מטה בנושא משמעויות הקליטה המבצעית תשמש בסיס להוראת קליטה מבצעית העוסקת, בין היתר, בעניינים אלה:

1. תורת לחימה והוראות - הוראות רלוונטיות, תפיסת הפעלה, ארגון ושיטות, ספרות מבצעית, תפעול האמצעי, הוראות בטיחות, הוראות הפעלה, כולל תנאים ומגבלות משפטיים, מודיעין ושליטה ובקרה;

2. תכנון משאבים (ארגון, תקינה ותשתיות) - ארגון, תקינת כוח־אדם, תקינת אמצעים, בינוי, פריסה והקצאת אמצעים;
3. כוח־אדם, הדרכות ואימונים - קורסי הדרכה, מארזי הדרכה, מאמנים ואמצעי הדרכה, סיוע וחניכה, אימונים, תיקי תרגיל, משאבים ושמירת כשירות;
4. חסינות הפרויקט, ניטור ובקרה - הוראות הגנת מידע, היבטי ביטחון מידע וחשיפת האמצעי, סיווג הפרויקט, הרשאות שימוש.  
הוראת קליטה לוגיסטית תעסוק, בין היתר, בעניינים האלה:
1. תורה והוראות - תפיסת אחזקה, הוראות אחזקה רלוונטיות, שגרת טיפולים, דרגי תיקון, הוראות שינוע ואחסנה, הוראות בטיחות, פריסה, הפעלת ריתוק משקי, ביצוע אחזקת חוץ (במידת הצורך);
2. תכנון משאבים (ארגון, תקינה ותשתיות), ארגון, תקינת כוח־אדם, תקינת אמצעים, חוזה אחזקת חוץ, טבלאות תקינה, תשתית לוגיסטית לאחזקה בכלל הדרגים, בינוי, אמצעי שינוע, אמצעי בטיחות ובריאות, תשתית להחסנה יבשה, חלקי חילוף, כלי עבודה, זיוד, הנחיות לעיתוד, אריזות, ציוד בדיקה (צב"ד), קטלוג, הובלה, ציוד תוכנה ותשתית;
3. הדרכות ואימונים הגדרת מקצועות, הדרכה והכשרה, ספרות טכנית לכל דרגי האחזקה, מארזי הדרכה, מאמנים, תוכנית חניכה ותוכנית אימונים.

### ניהול משקי

תהליך הקליטה וההטמעה מסתיים במעבר של האמצעים לניהול משקי. ניהול משק הוא מכלול הפעילויות הטכניות והניהוליות שנועדו לשמר, לפתח ולשפר את המשקים בראיית מחזור חיים ומתוך מגמה להביא לאפקטיביות המבצעית הנדרשת במינימום עלות.

מטרת הניהול המשקי היא הגברת האפקטיביות המבצעית של הצבא ומוכנותו לביצוע משימותיו השונות. הכוונה במוכנות ליכולת של כוחות ושל יחידות לעמוד בהישגים נדרשים כדי למלא משימות שלשמן אומנו, או להיערך לפעולה בלא עיכובים. יכולת זו כוללת גם הפעלת מערכות נשק וציוד כדי להפיק מהם ביצועים ותפוקות שלצרכיהם נועדו ויוצרו.

במרכז הפעילות קיים הרצון להגיע למצב של איזון המשק לאורך זמן. מצב זה יאפשר קבלת החלטות מושכלות ומובנות בפעולות מתקנות ומתונות שיבטיחו איזון בטווח הארוך תוך חלוקת המשאבים על־פי סדרי עדיפויות.

ניהול המשק מונע מהמענה לבעיה מבצעית, תפעולית או לוגיסטית, ועשוי לדרוש לבצע בתאם לצורך את הפעילויות האלה, חלקן או כולן:

1. חידוש - פיתוח והתעצמות באמצעות רכש פריטים חדשים שונים מהקיימים במשק או רכש פריטים דומים לצרכים חדשים;
2. הצערה והשבחה - שינויים ושיפורים באמצעים קיימים;
3. קביעת מדיניות העיתוד - הצטיידות בחלקי חילוף;
4. שימור ואחזקה - ביצוע שגרת הטיפולים והאחסנה בסדיר ובחירום;
5. גריטה - מכירה או השמדה של הפריטים המרכיבים את המשק בסוף חייהם או עם ירידה באפקטיביות.

ניהול המשק דורש מיפוי של תמונת המצב הכוללת לשם ניתוח הערכת מצב תוך הגדרת נקודת עבודה מבצעית תחת אילוצי תקציב. זהו תהליך שבו נבנית תמונת מצב משקית במטרה לחזות לטווח של 5-10 שנים מגמות בתחום השימוש, הטכנולוגיה, האמינות הטכנית והיציבות הלוגיסטית שישפיעו על מתן מענה לצורך המבצעי, לבטיחות, לזמינות ולעלות האחזקה והמלאי וינחו את תהליכי העבודה והקצאת המשאבים לניהול המשק בעתיד.

תוצאת הערכת המצב היא בסיס לזיהוי הפרה באיזון המשקי מראש, וכך תתאפשר מציאת פתרונות רלוונטיים. דוגמאות להפרה באיזון המשקי:

1. חוסר התאמה של האמצעי לייעודו או ירידה באפקטיביות האמצעי עד פגיעה בתפקוד מבצעי או לוגיסטי;

2. עלייה בעלות הקיום, לרבות עלויות פיתוח, רכש, שינויים ושיפורים (שו"שים), אחזקה שוטפת, הוצאה משימוש ועוד.

תוצאת הערכת המצב היא חלופות לביצוע בתחומי הפיתוח, ההצטיידות, ההשבחה והגריטה. באחריות מנהל המשק להביא לידי ביטוי את מכלול הגורמים המשפיעים על החלטות המתקבלות בנושא מרכיבי המשק, ולא רק המענה המשקי המידי עבור פעילות. כמויות ומגוון האמצעים לרכש ושיקום נקבעים על סמך הערכת המצב המשקית ובהתאם לסדר העדיפות המבצעי.

### הרחבה: הנדסת מערכות בפרויקט שדרוג בלוני תצפית/אנדריי בסין<sup>15</sup>

בלון תצפית הוא מערכת מתוחכמת ומורכבת. הבלון מעוגן עם כבל ליחידה קרקעית ונושא מערכת צילום מתקדמת. אם הבלון מתנתק, הוא עולה במהירות לגובה רב בגלל כוח העילוי של הליום הממלא אותו. לאחר מכן הבלון מתפוצץ בגובה בגלל הפרשי לחץ אוויר. כמובן שבמקרה כזה המטען הייעודי (המטע"ד) שנושא הבלון מתרסק מגובה רב, והדבר מוביל לאובדן ציוד יקר וגם מסכן חיי אדם.

הבלונים הראשונים נכנסו לשירות במהלך שנות ה-2000. מאז, במהלך השימוש המבצעי, אירעו כמה תקלות, ובעקבותיהן בוצעו שינויים ושיפורים במערכת. כל אירוע כזה, בייחוד אם מדובר באובדן הבלון והמטע"ד, הוא מקור ללמידה והפקת לקחים, שכמה מהם נראה בהמשך.

#### בלון מס' 1: חסינות התכן

במהלך הפיתוח ולאורך כל חיי הפרויקט נבחנו חלופות רבות להתמודדות עם הסיכון של הינתקות כבל העגינה. שיקול תכן מרכזי בבלוני הליום הוא משקל המערכת שעולה לאוויר, כיוון שנתון זה גוזר את כמות ההליום הנדרשת להפרחה.

נבחן פתרון של הכפלת כבל העגינה, אך פתרון זה לא יושם בשל משקל רב שמוסיף הכבל הנוסף, וסיבוכיות גדולה בהפרחה עם שני כבלים. כיוון פתרון נוסף שנבחן היה הנחתת הבלון, אם והכבל התנתק, באמצעות שחרור מבוקר של הליום. בסופו של דבר חלופות אלו לא יושמו בגלל מורכבות הנדסית, הערכת עלות מול תועלת גבוהה ושיקולי בטיחות של מנגנונים אלו.

<sup>15</sup> רס"ן אנדריי בסין הוא ראש מדור בחטיבה הטכנולוגית ליבשה בצה"ל. בעבר שימש ראש מדור מערכות איסוף מיוחדות האחראי על תחום הבלונים. בעל תואר שני בהנדסת מערכות ותואר ראשון בהנדסת חשמל.



בלון תצפית

הבלון הראשון פרח, ומטוס ריסוס שטס בגובה נמוך ושלא הבחין במערכת, חתך את כבל הבלון. אומנם מקרה זה הוא דוגמה לטעות אנוש מובהקת של הטייס, אך אפשר ללמוד ממנו לקח הנדסי: התכנון הכולל של הבלון מבוסס על נקודת כשל בודדת - פגיעה של המטוס בכבל הביאה להינתקות הבלון והתרסקות המטע"ד.

### בלון מס' 2: לא לשכוח את המפעיל.

כבל העגינה יורד מהבלון ומלוּפף על הגלגלת. הכבל נושא גידים המשמשים להזנת מתח לבלון ושידור וידיאו לאחור. למעשה, קצה הכבל אינו קשור לגלגלת אלא מחובר לקרון השליטה. חיבור זה חלש מכנית יותר מהכבל עצמו, ובוודאי שהוא אינו עומד בכוח העילוי של בלון הליום ובמשבי רוחות. לכן לכבל יש יתירות אורך גדולה, ו-50 המטרים האחרונים של הכבל אינם אמורים בשום מקרה לצאת מתוף האיסוף. כך מלמדים בקורס המפעילים ומדגישים ברענונים תקופתיים. אתם כבר יכולים לנחש מה קרה לבלון השני. אחד המפעילים שחרר את הכבל - את כולו... זה קרה באחת ההפרחות הראשונות שלו לאחר שהגיע ליחידה. למפעיל לא הפריעה העובדה ש-100 המטרים האחרונים של הכבל מסומנים בדיוק כדי שמפעילים ישימו לב לנעשה... כך פרח לו עוד בלון בעלות של מיליוני שקלים.

### בלון מס' 3: על המפעיל כבר דיברנו?

בניגוד למפעיל הקודם, המפעיל של הבלון השלישי היה מיומן ומנוסה. הוא ידע שעוברות דקות מספר עד שהבלון עולה לגובה המבצעי. הוא גם הכיר את מנגנון הבטיחות של ידית ההפעלה. המנגנון מפסיק את העלאת הבלון ונועל את הכבל ברגע שעוזבים את הידית. בכוונה תחילה, כדי שהבלון יעלה או ירד צריך להפעיל כוח קבוע ללא הפסקה, אחרת הפעולה נפסקת. המפעיל היה כאמור מתוחכם ומצא שדרוג מעניין למנגנון: הוא קשר לבנה לידיית ההפרחה, כדי שהוא לא יצטרך להפעיל כוח ולהימצא ליד יחידת השליטה באותן דקות שבהן הבלון עולה לאוויר. גם כאן לא קשה לנחש את המשך הסיפור: כשהמפעיל נזכר לחזור לעמדה, נותר לו רק לראות את הבלון שלו עף לשמיים...

לפעמים רק תאונות מראות באופן מובהק ומוחשי שהמערכת היא הרבה יותר מהאמצעי עצמו. הצלחת

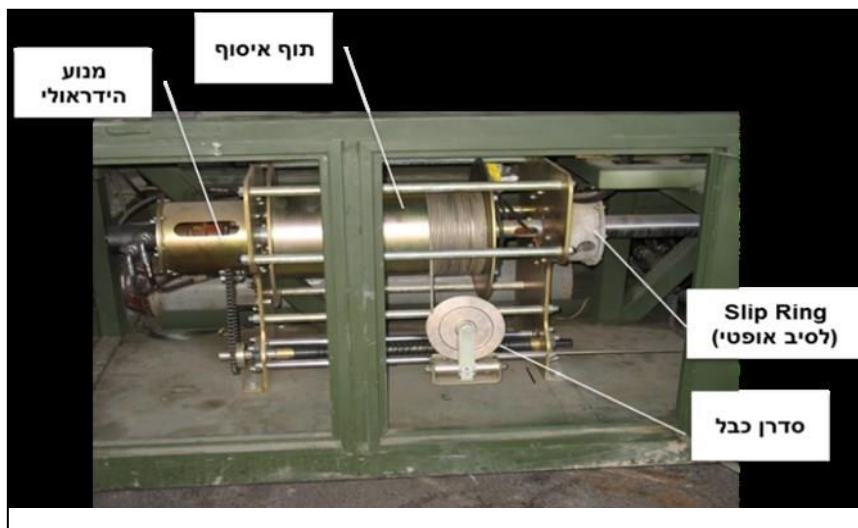
המשימה כוללת את המפעילים. לפעמים כל ההוראות, האזהרות, ההדרכות והסימונים אינם יעילים, ואם משאירים בידי המפעיל סיכון או אפשרות כלשהי לתקלה - הם עשויים להתממש.

### ש"שים (שינויים ושיפורים)

לאחר כמה שנים בשירות הבלונים עברו שדרוג לצורך שיפור ביצועי המערכת והגדלת גובה הפרחה. הגדלת הגובה תוך שמירה על איכות התמונה חייבה שינוי במבנה הכבל: הוחלט להחליף שני גידי מתכת ששימשו להעברת האותות בכבל, לסיבים אופטיים. גידי המתכת ששימשו להעברת מתח למטע"ד נותרו ללא שינוי. השינוי יצר בעיה במקום לא צפוי: מתברר שכבל עם סיבי זכוכית הוא חלש יותר מכנית מכבל עם גידי מתכת. כתוצאה מכך עצם החביקה של הסיב על הגלגל, המתרחשת בגלל מתיחות משתנה של הכבל בכל רגע בגלל רוחות הנושאות את הבלון, גרמה למעיכה של הסיבים האופטיים ולפגיעה באיכות התמונה עד ניתוק מלא וקריעה של הסיבים האופטיים.

כדי להתמודד עם הבעיה הוכנסו שני ש"שים מכניים נוספים:

1. מנגנון סידור של הכבל על הגלגל - המנגנון עורך באופן סדור את הכבל על הגלגל כדי שלא תהיינה כליבות של הכבל ולא תהיה אפשרות לעיוות ושבירה של הסיבים;
2. מנגנון כננת חיכוך - קפסטיין - לשמירה על מתיחות קבועה של הכבל; המנגנון מורכב מכמה גלגלות שנמצאות בין הבלון לגלגל ומונע אפשרות של שינוי מתיחות בעקבות משב רוח פתאומי.



מנגנון משודרג - לאחר ש"ש

### תהליך בדיקת התצורה החדשה

לטובת אישור תצורת המערכת החדשה בוצעו בדיקות טכניות רבות.

1. בדיקה מכנית למערכת הפרחה
  - א. בקרת איכות - בדיקת התאמת תיק שרטוטים ודוחות לתתי-מכלולים (לאחר ייצור);
  - ב. בדיקות הרכבת מכלולים ותפעול פונקציונלי;
  - ג. בדיקה בטיחותית לכננת הראשית - בדיקת עומסים סטטית ודינמית;
  - ד. בדיקה בטיחותית לכננות העזר - בדיקת עומסים סטטית ודינמית;
  - ה. בדיקת אוזני הרמה של תחנת העגינה.



2. בדיקת מערכת החשמל.

3. מערכת ההידראוליקה.

4. כשירות סידור כבל ההפרחה על גבי תוף האיסוף.

5. בדיקות אחזקתיות (יכולת אחזקה) ושילוט.

כל הבדיקות בוצעו לפי הנוהל לאישור המערכת בדומה למערכת הישנה. לא נלקחו בחשבון התאמה של הבדיקות לתכן החדש, אלא ההסתכלות על המערכת הייתה כעל מערכת דומה מאוד למערכת הישנה. לדוגמה, בוצעה בדיקה לירידה בכוח קריעה של הכבל כתוצאה ממחזורי עבודה, והכבל עבר 1000 מחזורים, אבל דרך שתי גלגלות בלבד ולא דרך מנגנון קפסטיין.

#### בלון מס' 4

השינויים והשיפורים פתרו את בעיית החביקה של הסיבים. הבלונים עלו לגובה רב יותר וסיפקו מידע חשוב למפעילים. אלא שלאחר כחצי שנה של עבודה אירעו בהפרש של שבוע שני מקרים של קריעת כבל ופיצוץ הבלון.

המקרה הראשון העמיד את המומחים בבעיה: כיוון שנבדק כוח הקריעה של הכבל ונמצא תקין, לא הייתה שום סיבה נראית לעין לבריחת הבלון.

אחרי סריקה של תחנת העגינה של אחד הבלונים שאבדו נמצא מפתח שבדי מעוקם בתא הגלגלת. נצפתה גם מעיכה תואמת לצורת המפתח על אחת הגלגלות. לאור זאת הועלת השערה שהמפתח שנשכח בטעות באזור הגלגלת, נכנס לאזור מהלך הכבל, פגע בחוזק הכבל ובגלל הסיבה הזו הכבל נחתך. אלא שאז, תוך כשבוע, עף עוד בלון...

#### בלון מס' 5

לאחר התקלה השנייה ברצף בוצע קרקוע של כל המערך וחקר תקלה מעמיק שממנו עלה כי הכבל החדש, עם הסיבים האופטיים, נחלש משמעותית אחרי שלושה חודשים ולא עמד בכוחות שפועלים עליו.

לפי הנוהל השגרתי, לפני שינוי המערכת, כל שלושה חודשים ניטלו שלושה מטרים מהקצה של הכבל של כל בלון. קצה הכבל נשלח לבדיקת חוזק הכבל על בסיס קריעת הכבל. התוצאה בכל הבדיקות הייתה תקינה. בדיקה של הקצה מהכבל הקרוע העלתה גם היא ערכים תקינים.

הנקודה שלא נלקחה בחשבון בבדיקות, היא שחלקי הכבל שנבדקו נלקחו מהחלק הצמוד לבלון עצמו. אומנם אותם שלושה מטרים מהקצה של הכבל עומדים בכוח הקריעה הנדרש, אך חלק זה אינו עובר בגלגלת ואינו מקבל מאמצים רדיאליים שהם הרסניים עבור כבל מהסוג הזה. כאשר בדקו את חלקי הכבל שעבר בגלגלות, התברר שעומס הקריעה ירד משמעותית אל מתחת לסף הלחצים הנגרמים מעילוי הבלון עצמו וממשבי רוח בעוצמה בינונית, וזה גרם לקריעת הכבל.

#### ראייה מערכתית מהי?

הנדסת מערכות מחייבת חשיבה כוללת בכל שלבי הפרויקט. שינוי של מרכיב אחד במערכת עלול לגרום לתקלות מערכתיות, אם בתהליך הבדיקות מסתכלים על אותו רכיב ולא על המערכת כולה. למעשה, לאורך פרויקט שדרוג בלונים תצפית אירעו כמה תקלות המדגימות את האופן שבו ראייה מערכתית צריכה לבוא לידי ביטוי בתהליך הבדיקות, בתהליכי האחזקה ובמנגנוני בטיחות, ומה קורה אם עקרונות אלו אינם מיושמים.

מהנדס המערכות הוא האחראי לבניית מערכות מוצלחות. ההצלחה כוללת הסתכלות על כל המערכת ועל מרכיביה, כמו על המפעיל ותחומים רבים נוספים. אומנם מהנדס מערכות אינו בעל ידע מעמיק בחלק מהתחומים, ולשם כך הוא מפעיל מומחים, אך עם זאת מהנדס המערכות הוא לפעמים היחיד הרואה את התמונה השלמה של פעולת המערכת בסביבתה.

במקרה של שדרוג הבלון כשהחליפו את גידי הנחושת לסיב אופטי, לא התחשבו בהשפעה על מרכיבים אחרים במערכת. כדי שבעיה זו תיפתר נדרש היה להוסיף מנגנונים מכניים מורכבים שלא תוכננו קודם לכן. ולאחר שמרכיבים אלו נוספו, אף אחד לא יכול היה לנחש שהדבר יביא לפגיעה בחוזק הכבל - תחום שגם שנבדק היטב בבדיקות תקופתיות.

לקח חשוב קשור לנקודת המבט של האמצעי הנבדק וסביבתו. בדיעבד, תהליך הבדיקה של הכבל היה תהליך שלא התחשב בפרופיל הפעולה ובתהליך שבו משתמשים בכבל. אילו בחנו את המערכת בראייה שלמה, היה אפשר לראות שחלקים שונים של הכבל עוברים עומסים מסוגים שונים: החלק הקטן והצמוד לבלון עובר עומסים אורכיים, ואילו רוב הכבל מלוּפף על הגלגלות ועובר עומסים רדיאליים. לכן רצוי היה לבחון את הכבל בשני חלקים אלו.

ראייה מערכתית נדרשת להתבטא בכמה מישורים. לדוגמה, במקרה הנתון המישורים הם תכנון נכון של תהליך הבדיקות, תהליכי האחזקה ומנגנוני בטיחות.

תכנון נכון של תהליך הבדיקות - כחלק מניסוי החזרה לכשירות בוצעה בדיקה מערכתית של כל מערכת הבלון. הבדיקה כללה 100 מחזורים של הפרחה וקרצוע של הבלון במתאר השימוש המבצעי. לאחר בדיקה כזו אפשר היה להגיד בוודאות שהאמצעי כמערכת יעמוד בפרופיל המשימה הנדרש, לפחות למשך הזמן הנבדק.

בתהליכי האחזקה בוצע שינוי בנוהלי האחזקה התקופתיים של הבלון, והוראת האחזקה שונתה מבדיקה של שלושה מטרים מהכבל לבדיקה של עשרה מטרים.

במנגנוני בטיחות אל מול הגדלת סיבוכיות - נוספו מדידים נוספים המשביתים את המערכת אם נכנס עצם זר לגלגלות ההפרחה.

## חשיבה מערכתית

תהליך הפרויקט מתחיל לכאורה בהגדרת הצורך, והוא מסתיים באפיון הפתרון העונה לצורך. דוגמה אחת לפרויקט מסוג כזה היא מערכת למעקב ובקרה אחר דליפת חומרים מסוכנים. עבור מערכת מסוג זה מוגדרת תחילה צורך רלוונטי הכולל את סוגי החומרים לגילוי, אופן מתן ההתרעה, ותקציב זמנים לפעולה. על בסיס ניתוח הדרישות מתבצע חקר חלופות וגיבוש פתרונות מערכתיים, ונבחרת ארכיטקטורה מערכתית הכוללת חיישנים, תקשורת ומכלולים נוספים. בהמשך נכתב אפיון מערכתי המסכם את כלל המאפיינים הנדרשים מהמערכת.

במקרים רבים התהליך בפועל הוא דווקא הפוך, והטכנולוגיה היא היוצרת את הצורך. דוגמה ידועה לכך היא הטלפונים הסלולריים. היום אי אפשר לדמיין את עולמנו ללא טלפונים ניידים. לעומת זאת, בתחילת הדרך היצרנים התקשו לשווק את הטלפונים הסלולריים, בעיקר בגלל המחיר, שהיה גבוה יחסית, אך גם מאחר שהיה מדובר במוצר חדש שהערך שלו למשתמש לא היה ברור עדיין.

אכן, טלפונים קוויים היו בשימוש, ורבים תהו מדוע עליהם להיות זמינים לטלפון לא רק בבית או במשרד. חברות הסלולר היו צריכות "לחנך" את הצרכן ולבנות את תרחישי השימוש המתאימים (עבור אנשי עסקים, למשל, שיוכלו לשוחח בזמן נסיעה ברכב או להיות זמינים בחופשה) - כל זאת לאחר שהטכנולוגיה והמוצרים כבר היו קיימים.

התהליך חזר על עצמו פעם נוספת עם טלפונים חכמים ורשתות דור 3 שאפשרו גלישה מהירה מטלפון נייד. עד להשקת דגם האיפון הראשון של אפל בשנת 2007 רובנו כלל לא ידע שאנחנו זקוקים לטלפון חכם - מוצר שהפך לסטנדרט מובן מאליו תוך שנים ספורות. גם פריסת תשתית אינטרנט מהיר לגלישה בכל זמן ומכל מקום לא הייתה רלוונטית לחלק מהאנשים בתחילת הדרך.

היום, כידוע, מירב נפח הגלישה הוא ממכשירים ניידים, והאפליקציות האינטרנטיות המופעלות ממכשיר נייד - ווטסאפ, ויזי ואחרות - ממלאות תפקיד חשוב בחיי מיליארדי אנשים.

דוגמה נוספת למוצר שהביא אחריו את הצורך הוא הרחפן. הרחפנים הופיעו בתחילה כצעצועים לחובבנים - מעין "טיסנים משוכללים". רק לאחר שהרחפנים הפכו לזמינים, אמינים וזולים מספיק, נבנו עבורם תרחישי שימוש וצרכים מגוונים הרבה מעבר להטסה פשוטה לשם שעשוע או משחק. הצרכים החדשים שהופיעו כוללים צרכים אזרחיים של צילום נופים, אירועים, תיעוד גלישת סקי או הדמיית נוף לצורכי שיווק בבניינים חדשים. גם צרכים צבאיים לא איחרו לבוא, למשל שימוש ברחפן לצורך כניסה לא מאוישת למבנים ומנהרות ומעקב אחר הפגנות ומרדפים.

### הנדסת מערכות "רכה" והנדסת מערכות "קשה"

הנדסת מערכות "קשה" היא תכן ופיתוח של אמצעים, מערכות ושירותים המיועדים לעמידה ביעדים ברורים, מוגדרים היטב וכמותיים. דוגמה להנדסת מערכות "קשה" היא תכן מנוע בהספק של 100 כוחות סוס שצריכת הדלק שלו היא מינימלית.

הנדסת מערכות "רכה" עוסקת במענה ליעדים שאינם מוגדרים היטב. דוגמה להנדסת מערכות "רכה" היא משימת פיתוח של רכב נוסעים חדש. המורכבות, מגוון האפשרויות וריבוי בעלי עניין מחייבים קודם כל הגדרה של המשימה עצמה, וממנה ניתן יהיה לגזור את היעדים ההנדסיים. משימת פיתוח רכב חדש יכולה לכלול היבטים של נוחות שימוש, ביצועי מנוע, מיתוג ויוקרה והיבטים רבים נוספים. ההתנגשות בין חלק מהמאפיינים מול אילוצי לוחות זמנים, תקציב וביצועים נדרשים בהכרח תאלץ בחירה של פרמטרים טכניים וממשקים מתוך

מרחב האפשרויות. בחירה זו תקבע במידה רבה את התאמת המערכת לצרכים, ובסופו של דבר את ההצלחה ההנדסית והמסחרית של המוצר. הרכבים בימינו הם תוצאה של הנדסת מערכות מול ניתוח צרכים של הלקוחות, מודל עלות וביצועים, כפי שנראה באיור הבא. הדגמים הרבים של הרכבים רק מראים את החשיבות של ארכיטקטורות פתרון שונות, שמקורן בהנדסת מערכות "רכה".



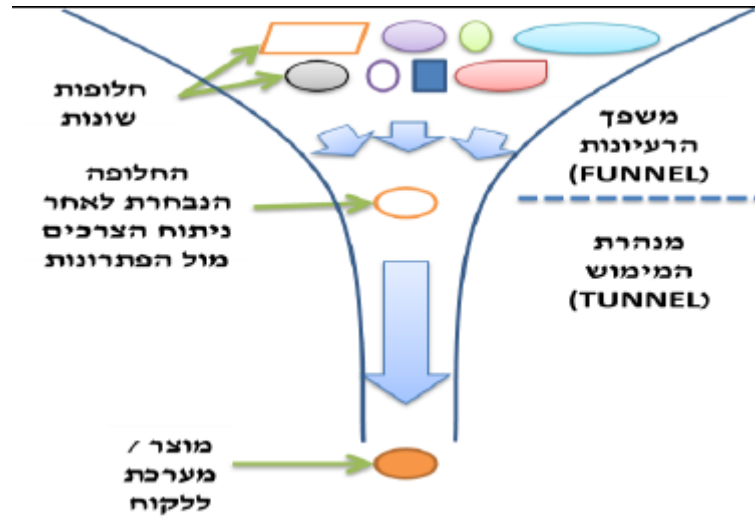
דגמים שונים של רכבי נוסעים מקטגוריות שונות

המעברים בין הנדסת מערכת "רכה" להנדסת מערכת "קשה" וחזרה הם חלק בלתי נפרד מעבודת מהנדס המערכות. בכל שלב של הפרויקט יש מקום לשילוב בין הנדסת מערכת "רכה" והנדסת מערכת "קשה". גם בבניית מנוע בהספק של 100 כוחות סוס (הנדסת מערכת "קשה") יש חלופות עקרוניות רבות (הנדסת מערכת "רכה"). למשל הבחירה בין מנוע בעירה פנימית ובין מנוע חשמלי או היברידי מושפעת מתרחישי השימוש ומפרופיל הנסיעה של מערכת העל - הרכב כולו. גם ההתחשבות בפרמטרים "קשים" כחלק מהנדסת מערכות "רכה" היא חשובה. ידע מדויק על המאפיינים הטכניים של כל סוג מנוע היא משמעותית לבחירה ביניהם, בוודאי בהתאמה למאפיינים מערכתיים אחרים. הנדסת מערכות "רכה" היא חשיבה מערכתית, ראיית התמונה השלמה, ניתוח הבעיה והגדרת החלופות המתאימות למימוש בהתאם להזדמנויות הטכניות. הנדסת מערכות "קשה" משלימה אותה ומאפשרת את בניית המערכת באופן אופטימלי בהתאם לחלופה המתאימה ביותר לפתרון. תהליך הנדסת המערכות הוא תהליך איטרטיבי המשלב לסירוגין חלקים של הנדסת מערכות "רכה" והנדסת מערכות "קשה".

## משפך הרעיונות ומנהרת המימוש

שני מונחים הקשורים לתחומי הנדסת מערכות רכה והנדסת מערכות קשה הם משפך הרעיונות ומנהרת המימוש. משפך הרעיונות הוא כינוי לתפיסות, תצורות וחלופות עקרוניות לתכנן המערכת או מכלוליה, ומתוכנן נבחרת התצורה למימוש. מנהרת המימוש מתחילה עם הגדרה מדויקת של המוצר הנדרש, ובשלב זה מבוצע תכנן, ייצור והקמה של אותו מוצר עם שינויים והתאמות קטנות של שלב הפיתוח. תיאור בקווים כלליים של משפך הרעיונות ומנהרת המימוש מובא באיור הבא.

לצורך הדוגמה נתבונן במערכת מידע עבור טכנאי שירות למכשירי אלקטרוניקה. המערכת מיועדת למכנ את תהליך העבודה של הטכנאי ולהחליף רישום פתקי בדיקה וחשבוניות בכתב יד. המערכת מתוכננת לסייע לטכנאי להגיע למידע טכני רלוונטי לאבחון התקלה ולתיקונה במידת הצורך, להקל על הזמנות החלפים וניהול מלאי בחברה ולאפשר בקרה וניתוח מידע על התקלות.



משפך הרעיונות ומנהרת המימוש

משפך הרעיונות מתחיל ממיקוד הצורך במערכת המידע. אם מרכיב החיסכון בעלות חלקי חילוף הוא האלמנט המוביל, המערכת יכולה לכלול מנגנון בקרה אחרי צריכת החלפים, קריאת ברקוד בעת שימוש בחלק ומדרג אישורים להחלפה של פריטים יקרים. אם נושא הדיאגנוסטיקה הוא החשוב, אפשר לקבוע תהליך מובנה לאיתור תקלה על בסיס רשימת תיג שבלעדיו לא תתאפשר החלפת פריט. אם פרמטר של איכות ורמת השירות הוא המרכזי, המערכת דווקא יכולה להציע החלפה של מכלול שהסבירות שהוא יגרום לתיקון, היא הגבוהה ביותר, גם אם עלותו גבוהה או אם חלק מההחלפות יהיו החלפות שווא. יכול להיות שהמערכת תציע גם החלפות מנע של מכלולים כדי לחסוך ביקורי טכנאי בעתיד ולשפר את זמינות המערכת, למשל אם מדובר בחוזי שירות לטווח ארוך ובמערכות שזמינותן קריטית.

גם הפתרונות הטכנולוגיים הם חלק ממשפך הרעיונות. קריאת ברקוד, קוד QR, RFID, עיבוד תמונה או אולי הקלדה פשוטה של מספר קטלוגי ומספר סידורי הם אמצעים אפשריים למעקב אחרי פריטים. כל אחד מאלו מאפשר יכולות מסוימות ומשליך על אופן התפעול, קלות השימוש במערכת, משך הזמן הנדרש לביצוע המשימות ומערכים תומכים ביחידות האחסנה והרכש בחברה.

מנגנוני תמיכה ואישור במטה החברה יכולים להיות טלפוניים, מקוונים או מובנים על בסיס אינטליגנציה מלאכותית ללא צורך בהתערבות חיצונית. המערכת יכולה לכלול מודלי תלת-ממד של פירוקים והרכבות הנדרשים מהטכנאי, והיא יכולה לכלול קטלוג חלקי חילוף סטנדרטי או להתמקד בהזנת טפסי בדיקה ולא לכלול מידע טכני כלל.

הגדרות היקף המשימה, התכולות, לוחות הזמנים והתקציב מתהוות ומתגבשות בשלב הייזום. תהליך הגדרת המערכות מתחיל בשלב משפך הרעיונות עם הגדרת הצורך בשלב הייזום, ממשיך עם ניתוח הצורך, ניתוח הפתרונות והתאמת הפתרונות לצורך, והוא מסתיים עם בחירת החלופה המובילה ואפיון מלא שלה.

בשלב זה המיקוד עובר לשלב מנהרת המימוש שבו מתקיימים תהליכי הביצוע של התכנון הנבחר. במהלך שלב משפך הרעיונות אפשר שייבחר מכלול מסוים שמנהרת המימוש עבורו תחל עוד לפני קביעת נקודת העבודה המערכתית. בה בעת לאחר קביעת אפיון המערכת למימוש עשוי הספק להתחיל את העבודה על הפרויקט ממשפך רעיונות למימוש מאפיין טכני מסוים.

בדומה להנדסת מערכות רכה והנדסת מערכות קשה, משפך הרעיונות ומנהרת המימוש הם שלבים איטרטיביים החוזרים פעמים רבות לאורך הפרויקט ברמות שונות.

## ראייה שלמה בהנדסת מערכות

במקרים רבים הפתרון השלם בהנדסת מערכות כולל מרכיבים נוספים מלבד המוצר או השירות המפותח. מרכיבים אלו יכולים לכלול תפיסות הפעלה ושימוש, כוח-אדם להפעלה ואחזקה והכשרתו ועוד. מרכיבים אלו קובעים במידה רבה את הערך של הפרויקט ומשפיעים על הצלחתו. כדי להבין את ראיית השלם בהקשר של המוצר או השירות עבור הלקוח אפשר להסתכל על המונח הצבאי "מרכיבי בניין הכוח (הצבאי)".<sup>16</sup> נהוג לציין בין מרכיבי בניין הכוח את הנושאים הבאים: תורת לחימה, ארגון, כוח-אדם, אמצעים, אימונים ותשתיות. ההתאמה של מרכיבי בניין הכוח לעולם האזרחי היא קלה למדי. לרוב הנושאים יש מקבילות ישירות בעולם האזרחי. למשל המונח 'תורת הלחימה' מכונה בעולם האזרחי 'תפיסת הפעלה', ולכן הראייה של מרכיבי בניין הכוח שתפורט להלן רלוונטית בהחלט לכל סוג של פרויקט.

**תורת הלחימה** ותפיסת ההפעלה של האמצעים והמסגרת המפעילה אותם משמשות בסיס שממנו נגזרים תרגולות וטכניקות הפעלה, מבנה ארגוני, אופן הכשרת כוח-אדם והדרכתו, דרישות מאמנים, ציוד בדיקה וכלי עבודה נדרשים, משמעויות שינוע ועוד.

תחום אמצעי התצפית הוא דוגמה לתחומים שבהם תפיסת הפעלה משפיעה על הנדסת המערכת. אם מדובר בהפעלה באמצעות חוליות קטנות שכנראה תוכלנה להגיע לטווחים קרובים מול האויב, התכן המועדף יהיה של מערכת תצפית ניידת, קלה ובסיסית יחסית מבחינת ביצועים. לעומת זאת, בתרחיש של תצפית ניחת לטווח ארוך כנראה שיידרש לממש מערכת תצפית יקרה וכבדה לכל עמדה.

הארגון של היחידה או המסגרת הוא רלוונטי למבנה הנדרש עבור ההפעלה והמענה הלוגיסטי. אין משמעות לפיתוח מערכת שלא תוכל לקבל תמיכה באמצעות מבנה ארגוני מתאים. הכנסה לשירות של מערך חדש של כלי טיס מאוישים מרחוק (כטמ"ם) תחייב כנראה יצירה של מסגרת ארגונית חדשה להפעלתם ולאחזקתם, והיא גם תשפיע על מסגרות קיימות בתחומים דומים. דוגמה נוספת להשפעה של הארגון היא תרשימי הקשר של היחידות המבצעיות, שמהם נגזרות חלק מהדרישות ממכשירי הקצה.

כוח-אדם, כולל מקצועיות, איכות, הכשרה ויכולת איוש, משפיע במידה רבה על מידת האוטומציה הנדרשת מהמערכת, כמו על סוג ממשק המשתמש שיידרש. הייעוד של מערכות רבות הוא צמצום בכוח-אדם הנדרש לעיבוד מידע, תצפית ובקרה. אפשר להשיג זאת, למשל באמצעות היתוך מידע ובניית תצוגה ידידותית. פיתוח מערכת הדורשת מפעילים או מאחזקים נועד לכישלון אם אלו לא יהיו זמינים בעת השקת המערכת. האמצעים הם שם כולל לנושאים רבים בעלי משמעויות פיתוח מערכתיות: משמעויות משקיות, עלות מחזור חיים (רכש ואחזקה), מלאי נדרש, חלפים, ציוד נלווה, ציוד קשר ועוד. דוגמה אחת היא הצטיידות במערכות תצפית נישאות לוחם. פרויקט כזה משפיע על כמות הסוללות הנדרשות לכוננות ביחידה, ריענונים תקופתיים ושטחי אחסון. כמובן שזה משפיע על המשקל שהלוחם יצטרך לשאת, ואולי הוא יידרש לוותר על ציוד אחר כדי לפנות מקום למערכת התצפית.

אימונים, הכשרות והדרכה הוא נושא משמעותי הכולל תכנון האימונים, עלויות נלוות של ההכשרה, פיתוח הדרכה, אמצעים להדרכה וסימולציה, קורסים והכשרות. בעבר לכל אמצעי ומערכת היה נהוג לבנות קורס, מארז הדרכה וספרות. כיום הנטייה היא לעבור למערכות אינטואיטיביות שדורשות הדרכה מינימלית, אם בכלל. הדרכה ייעודית וממושכת יכולה להתאים רק במקרה של מערכות מקצועיות ייחודיות או אלמנטים בטיחותיים מובהקים. למשל אם נדרש זמן רב כדי לצבור מיומנות בהפעלת אמצעי מסוים, זה לבדו יכול להוות גורם משמעותי שישפיע על אישור הפרויקט או דחייתו.

<sup>16</sup> להרחבה ראו למשל בין הקטבים, גיליון 6 (בניין הכוח חלק א'), צה"ל, מרכז דדו, ינואר 2016.

נושא הסימולטורים ואמצעי ההדרכה מוכר בתחום התעופה שבו חלק משעות הטיסה הנדרשים באימוני טייסים נצבר בסימולטור. דוגמה למערכת מסוג שונה הדורשת אמצעים להדרכה היא מערכת לפריצת דלתות עבור צוותי משטרה וצבא. כדי שהכוחות יהיו מיומנים בהפעלת האמצעי במצב אמת, נדרש להתאמן על פריצת דלת. במקרה זה מתעוררת בעיה. אם משתמשים בדלת רגילה של בית - לאחר פריצה אחת של היא כנראה תינזק באופן קשה ולא תוכל לשמש עוד לאימון נוסף. לכן בונים "סימולטור" להפעלת המערכת - דלת מיוחדת ומחוזקת לאימוני פריצה שבה הרכיב היחיד שנשבר בעת פריצה, הוא הלשונית של הבריח. כך אפשר לבצע אימונים רבים ללא צורך בהחלפה של הדלת.

תשתית לוגיסטית ותפעולית היא חלק חשוב מכל פרויקט. כל מטוס קרב חדש גורר אחריו שובל לוגיסטי של דיר תת־קרעי ואמצעים לאחזקה. כל טנק חדש דורש הקצאה בעת הצורך או רכש של מוביל טנקים, שיבוץ בלוח הטיפולים השנתי ועוד. כל אלו הם חלק מהפרויקט ויש להתחשב בהם כדי להבטיח בסופו של דבר את אותם ביצועי הטיסה והירי שלשם נוצרה המערכת.

### הנדסת מערכות בצד הלקוח ובצד הספקי<sup>17</sup>

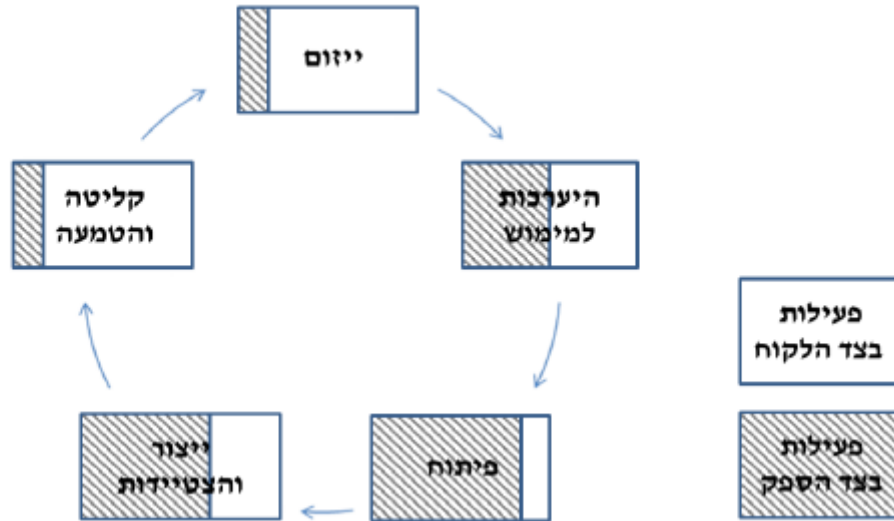
יש שיטות שונות לסווג פרויקטים. אל"ם (מיל") משה שפריר הציג את אחת הדרכים הכוללת שלושה סוגי פרויקטים: פרויקט פנימי, פרויקט יצרן־צרכן ופרויקט ספק־לקוח. לצורך הפשטות נציג להלן את הממשקים והתפקידים הניהוליים במהלך פרויקט ספק־לקוח, שהם דומים בעיקרם לנעשה בפרויקט פנימי. בפרויקט יצרן־צרכן התקשורת בין המפתח והמשתמש היא מצומצמת יותר ומתבצעת בשלב מאוחר יותר. יחד עם זאת, התהליכים שמתקיימים הם דומים באופן עקרוני.

פרויקט ספק־לקוח הוא פרויקט המבוסס על תהליך התקשורת, כמו שנעשה במקרים רבים מול תעשיות ביטחוניות. התהליך האופייני בפרויקט מתחיל בשלב הייזום הכולל את בניית הארכיטקטורה והקונספט המערכת.

בשלב הייזום וההיערכות למימוש מבצע הלקוח את עיקר הפעילות של הגדרת הבעיה, חקר החלופות וגיבוש אפיון מערכת. מהנדסי הלקוח מגדירים את הפתרון שיידרש ליישום באמצעות התעשייה לאחר ביצוע ההתקשרות (במכרז או מול ספק יחיד). מהנדס הלקוח מבצע בחינה של נושאים וממשקים רחבים הרבה מעבר לטכנולוגיה או למערכת עצמה, כמו הגדרה של שילוב במערך טכני קיים, תרומה לביצוע משימה וכדומה. על סמך ניתוח זה מגבש מהנדס הלקוח את הדרישות שעל־פיהן תפותח המערכת, ושמהן יתחיל מהנדס המערכות בתעשייה את שלב מיצוי הדרישות.

בשלב הפיתוח רמת המעורבות היחסית של הספק והלקוח משתנה. אם מדובר במערכות צבאיות, צה"ל הוא הלקוח או המשתמש הסופי של החברות האמורות לספק מוצרים או שירותים לארגון. ממלאי התפקידים בצבא מובילים את הפעילות בתחילת חיי הפרויקט (בשלב הייזום וההתארגנות למימוש). מעורבות אנשי הצבא בשלב הפיתוח היא נמוכה יחסית. בשלב זה ההובלה עוברת למהנדסים בתעשייה העוסקים בתכן של המערכת, והלקוח מלווה את הפרויקט ליווי מצומצם יחסית. בשלבי הקליטה וההטמעה חוזרת ההובלה ללקוח הקולט והמתפעל את המערכת, ואילו מעורבות הספק היא נמוכה יותר. תיאור עקרוני של מידת המעורבות של ממלאי התפקידים בצד הלקוח ובצד הספק לאורך חיי הפרויקט ניתן לראות באיור הבא:

<sup>17</sup> המחבר הציג את המונח "הנדסת מערכות בצד הלקוח" (לעומת ראייה מסורתית של הנדסת מערכות בצד הספק) במאמר שהוצג בכנס הבינלאומי השמיני להנדסת מערכות, הרצליה 2015: אלכס בלכמן, "אתגרי הנדסת מערכות בצבא - מבט מצד הלקוח", 2015.



פעילות בצד הלקוח ופעילות בצד הספק

דוגמה להגדרת פרויקט בצד הלקוח היא ניתוח חלופות לרכבי כוננות עבור יחידות חילוץ. האפיון הסופי כלל הגדרה של רכב עם יכולת עבירות גבוהה ועם לפחות חמישה מקומות לנוסעים ומקום למטען כבד של אמצעי חילוץ. הרכב נדרש להיות מתאים לרישיון ב' ולכלול הכנה לזיורוד של אמצעי קשר. כמה מהחלופות שנידונו בצד הלקוח היו רכבים ובהם 8-9 מקומות לנוסעים או עם נפח מטען רב יותר. בסך הכול בין החלופות היו עשרות דגמים של רכבים רלוונטיים. את השקלול בין החלופות עשה הלקוח על בסיס פרמטרים של מחיר ועלות מחזור חיים, התאמה לפרופיל המשימה של היחידה ואפילו התאמה עתידית לנשיאת כפות לפינוי שלג בעת הצורך. לכל חלופה היו יתרונות וחסרונות. לדוגמה, אוטובוס עם מספר מקומות רב יכול לשפר את היכולת לפנות אוכלוסייה במקרה הצורך. לעומת זאת, העבירות ויכולת התמרון שלו במרחב עירוני צר ורחובות עם שברים או פסולת, כמו בתרחיש של רעידת אדמה, מוגבלת.



רכב חילוץ: חלופות מצד הלקוח

לאחר שגובשה החלטה בצד הספק על הפתרון הנדרש, גובש האפיון שמגדיר את החלופה המערכתית הנדרשת על-ידי הלקוח. בדרישות האפיון הייתה דרישה להנעה כפולה (4X4), נפח מטען נדרש ועוד. לכן חלק מהחלופות העקרוניות שנידונו נפסלו על הסף ולא יכלו לגשת למכרז. מהו אם כך מרחב ההחלטות של הספק? התשובה המובנת מאלה היא הצעה של דגמים שונים של רכבים. גם אם צמצמנו את הבחירה לרכבי 4X4 עם חמישה מקומות, יש דגמים מסוגים שונים המתאימים לצורך, כפי שמופיע באיור הבא:



רכבי 4X4: חלופות בצד הספק



בחירת הרכב עצמו היא רק חלק מתוך מרחב החלופות. חלופות נוספות כוללות תצורות שונות של זיווד, וההבדל במחיר בין תצורות אלו יכול להגיע לעשרות אלפי שקלים לרכב. הבחירה בצד הספק במאפיינים אלו, ופרמטרים רבים נוספים גם מתעדכנת לרוב לאורך הפרויקט, ככל שמגיע מידע חדש או במקביל להתפתחות התכנן.

## הגדרת מערכות מול הנדסת מערכות

הגדרת מערכות היא ניתוח וקביעה של ייעוד המערכת, תכולות, תכונות ועוד. הנדסת מערכות היא תחום הנדסי העוסק במימוש מיטבי של מערכות בהתאם להגדרתן.

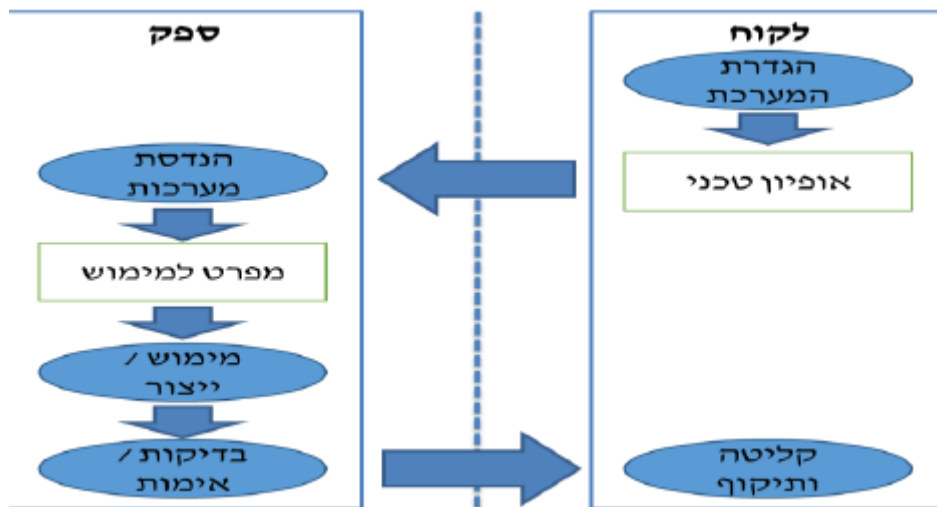
בפרויקט ספק-לקוח המבוסס על תהליך התקשרות, כמו פיתוח טיל או מטוס על-ידי תעשייה ביטחונית עבור שימוש הצבא, הלקוח מבצע את הגדרת המערכת. לרוב כך גם הדבר בפרויקט פנימי. בפרויקט יצרן-צרכן, כמו פיתוח של מכשיר טלפון נייד חדיש, צוות של היצרן מבצע את הגדרת המערכת, והוא מנסה בשיטות שונות לדמות ולאפיין את הדרישות והרצונות של הקונה.

פרויקט יכול להתחיל ברמות שונות ואצל אנשים שונים. זו יכולה להיות הנחיה של ההנהלה, רעיון יצירתי שעלה אצל אחד העובדים או מוצר מתחרה שיצר שאיפה לשינוי. המשותף לכל אלה הוא הרעיון הראשוני הנמצא בבסיס הפעילות והיכול להופיע ברמת רכיב, מכלול, מערכת ואפילו תפיסה מופשטת או חזון רחוק. לאחר זיהוי הרעיון מתחיל שלב של בדיקות ראשוניות. בדרך כלל היוזם או כמה אנשים מסביבו מבצעים באופן עצמאי שלב זה ללא השקעה משמעותית של זמן וכסף, על בסיס חיפוש באינטרנט, ניסיון מקצועי אישי או של מכרים וידידים. עומק הניתוח נע מהרמה הבסיסית ביותר - רמה של רכיב או מכלול - עד רמה מערכתית של הפרויקט כולו. הנה חלק מהשאלות האפשריות בשלב זה: האם הפרויקט ניתן למימוש מבחינה טכנולוגית? האם נראה שיש פוטנציאל רווח? האם הוא עומד בחוקים בתקנות? מה השיפור מול המצב הקיים? והאם יש מניעה לכניסה לשוק?

לאחר גיבוש קונספט ראשוני שעומד בתנאי סף של כדאיות ושימויות, מגיעה העת לקבל אישור רשמי יותר לפעילות. האישור הראשוני נדרש כדי לקבל את המשאבים שיידרשו להמשך בחינה והערכה ולמימוש - תקציב, כוח-אדם וקדימות מול משימות אחרות. בחברה מסחרית האישור יכול להיות של מנכ"ל, מנהל פיתוח או ראש צוות, בהתאם לאופי והיקף המשימה. בארגון ממשלתי או צבאי ייתן קצין בכיר או מנהל את האישור הצורך או הרעיון. מהות האישור היא תיקוף הצורך והמתכונת העקרונית של המענה, התאמה ליעדי הארגון, רלוונטיות לתוכנית העבודה ולמסגרת המשאבים.

בפרויקטי ספק-לקוח מבצע הלקוח בשלב בניית הארכיטקטורה והקונספט המערכתי זה את עיקר הפעילות של הגדרת הבעיה, חקר החלופות וגיבוש אפיון מערכתי. מהנדסי הלקוח מגדירים את הפתרון שיידרש ליישום על-ידי התעשייה לאחר ביצוע ההתקשרות (במכרז או מול ספק יחיד). מהנדס הלקוח מבצע גם בחינה של נושאים וממשקים רחבים הרבה מעבר לטכנולוגיה או למערכת עצמה, כמו הגדרה של שילוב במערך טכני קיים, תרומה לביצוע משימה וכדומה. על סמך ניתוח זה מהנדס הלקוח מגבש את הדרישות ועל-פי דרישות אלו תפותח המערכת. דרישות אלו מסוכמות בהגדרת המערכת, בדרך כלל בצורה של מסמך אפיון. בשלב הפיתוח הספק מנתח את מסמך האפיון ומגבש לעצמו מפרט טכני. מפרט זה משמש בתהליך המימוש והייצור, כמו גם כבסיס לתהליך הבדיקות והאימות. לאחר שהספק ווידא שהמערכת מתאימה למוגדר במפרט, הלקוח מבצע תיקוף של התאמתה לאפיון ולפעולה בסביבה שאליה היא מיועדת.

תהליך עקרוני של הגדרת המערכת והנדסת המערכות בפרויקט מובא באיור הבא. באיור זה, אליפסה מלאה מציינת תהליך ומלבן ריק מייצג מסמך או מפרט.



תהליך עקרוני של הגדרת המערכת והנדסת המערכות

תהליך הפרויקט המלא משלב בדרך כלל לפחות שלושה גופים מרכזיים, ואלה הם:

1. **המשתמש** העתיד לקבל לידי את המערכת או להפעיל אותה;
2. **הלקוח, הצרכן או מזמין המערכת** שמבצע את ההתקשרות ומשלם את תמורת הפרויקט או מקצה את המשאבים הנדרשים עבורו;
3. **הספק או היצרן** שאחראי על הפיתוח והייצור.

הצלחת הפרויקט נקבעת במידה רבה באמצעות היכולת של הספק לזהות את הצורך של המשתמש, ולהתאים עבורו פתרון מתאים. התהליך של אישור עקרוני, אישור ראשוני וסופי מיועד לבנות מסלול איטרטיבי שבו משולבים המשתמש, הלקוח והספק. לאורך התהליך הצרכים והמערכת מתבררים ברמות פירוט הולכות וגדלות, ורמת אי הוודאות יורדת בהדרגה עם ההתקדמות בתכנון המערכת.

### דוגמה להגדרת מערכות - מערכת שליטה ובקרה לרשויות מקומיות

בחלק מהרשויות המקומיות קיימת מערכת שליטה ובקרה המאפשרת תצוגת נתונים על גבי מפה, ניהול של יחידות הפיקוח, ביצוע פעולות והעברת דיווחים. יחידות הקצה של המערכת הם מחשבים ניידים מוקשחים. באחת מהרשויות המקומיות עלה הצורך לרכוש 100 יחידות קצה עבור מערכת השליטה והבקרה. יחידות אלו נועדו להחליף יחידות קיימות שלא התאימו לגרסת מערכת חדשה וממילא היו זקוקות לרענון.

לכאורה מדובר במשימה פשוטה של רכש מנה נוספת של מחשבים מוקשחים מדגם חדיש יותר. אלא שניתוח של פרופיל העבודה עם אמצעי קצה למערכת השליטה והבקרה העלה שרוב הזמן העבודה של המשתמשים כוללת צפייה בתצוגה גרפית ומבוססת מפה ולא כתיבה או הקלדה. לכן עלתה חלופה של שימוש במחשב לוח מוקשח שזול משמעותית יותר ממחשב נייד מוקשח.

יתר על כן, התברר שרוב הזמן יחידת הקצה נמצאת ברכב על מעמד ייעודי, ובמעט הזמן שלוקחים אותה לסביבה המבצעית, היא איננה חשופה לתנאי סביבה קשים. לכן עלתה האפשרות לוותר, לפחות חלקית ולפחות לחלק מהאמצעים, על דרישות של עמידות מלאה בתנאי סביבה. אמצעים חצי מוקשחים עולים פחות מאמצעים מוקשחים, שלא לדבר על מחשבים ומחשבי לוח שאינם מוקשחים כלל, אלא עומדים בתנאי סביבה של מכשור ביתי.

### דוגמה להגדרת מערכות התרעה בשלטי חוצות

מיצוי וניתוח צרכים מאפשר פישוט תהליכים ורידוד דרישות, עד כדי ויתור על הפרויקט כולו. פרויקט התרעה בשלטי חוצות הוא דוגמה לניתוח מצב קיים וההבדל בין מה אפשר לעשות מול מה נדרש לעשות. היום ההתרעה במקרה של אירוע חירום מתבססת בעיקר על צופרים, אך מכלול ערוצי ההתרעה מתרחב וכולל כיום רדיו, טלוויזיה, אינטרנט ועוד. ניתן להוסיף גם ערוץ התרעה נוסף, כמו התרעה בשלטי חוצות, ונניח שבנושא זה אין שאלה של היתכנות טכנולוגית, וברור שהתרעה בשלטי חוצות זה היא ערוץ נוסף שאינו מחליף ערוצי התרעה קיימים, כמו צופרים או הודעות מתפרצות בטלוויזיה הביתית.

עם זאת, בניתוח המצב הקיים נדרש לבחון את הערך המוסף המצופה מביצוע הפרויקט, למשל לאמוד את מספר האנשים שייחשפו להתרעה בשלטי חוצות ולא היו נחשפים לשום ערוץ התרעה אחר (בהנחה שמספיק ערוץ אחד בלבד). אם מבצעים ניתוח כזה, ייתכן ויובהר שאין כדאיות בביצוע הפרויקט בהיבט התועלת השולית שלו מול העלות הצפויה.

### דוגמה להגדרת מערכות - הקמת גדר ליישוב

הגדר ההיקפית באחד היישובים התבלתה, נפלה בכמה נקודות, ובמקטעים נוספים נפערו בה חורים ובורות שמאפשרים כניסה של אדם. נדרש לחדש את הגדר ולייצר מכשול חדש בשטח ההיקפי של היישוב. פרויקט הקמת גדר ליישוב הוא פרויקט פשוט לכאורה. יש קבלנים רבים המתמחים בתחום, בארץ נעשו אלפי פרויקטים דומים, התמחור ולוחות הזמנים הם סטנדרטיים, והסיכונים מועטים. אלא שהחלטות החשובות בפרויקט זה, כמו בפרויקטים רבים מאוד, שייכים לתחום הגדרת המערכות. גובה הגדר יכול להיות שניים, שלושה או חמישה מטרים. הבדלי המחירים בין גדרות בגבהים שונים עשויים להגיע למיליוני שקלים, אם מדובר בהיקף יישוב של מספר קילומטרים. מלבד גובה הגדר יש שאלות רבות שהגדרתן משפיעה דרמטית על הפרויקט, כמו אלה:

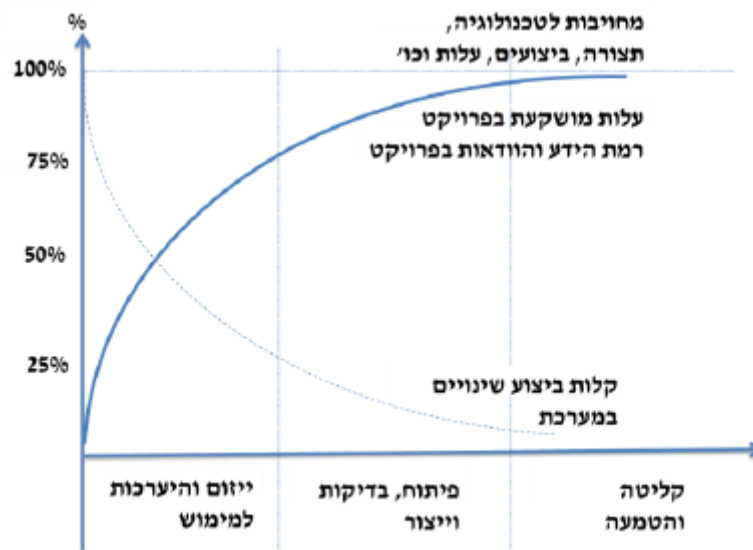
1. האם נדרשת גדר תלתלית מעל הגדר או על הקרקע?
2. האם נדרש מכשול לרכב? ואם כן, מאיזה סוג?
3. האם נדרשת יכולת התרעה? מאיזה סוג?

### חשיבות הגדרת המערכת

דוגמאות אלו ממחישות את מרחב הפעולה הקיים בכל משימת פיתוח ורכש. שלב הגדרת המערכות הוא השלב העיקרי שבו נקבעים היקף המשימה, התכולות, לוחות הזמנים והתקציב. זהו גם הזמן שבו מתקבלות רוב החלטות המשמעותיות של הפרויקט ומתגבשות התחייבויות לחלופה הנבחרת ולאופן המימוש. בסוף שלב הגדרת המערכות קיימת מחויבות לתצורת הפתרון, לעלות ולטכנולוגיה.

שלב הגדרת המערכות נדרש לשלב בין ניתוח הצרכים לבין הערכת משמעויות מערכתיות של הטכנולוגיות והפתרונות השונים. אולם גם שלב הנדסת המערכות נדרש להתייחס לניתוח הצורך והגדרת המערכת ולוודא התאמה לדרישות האמיתיות של הלקוח. עבודה נכונה של מהנדס המערכות עשויה לחסוך זמן ומשאבים רבים וכך להגדיל את סיכויי הצלחה של השירותים והמוצרים בפיתוח. בשלבים המוקדמים של הפרויקט, כאשר העלות שהושקעה ורמת הידע על הפרויקט היא נמוכה, קל יחסית לבצע שינויים. ככל שהפרויקט מתקדם לשלבי התכנון המפורט, הייצור וההטמעה, הוודאות באשר לעלות המערכת הסופית ולעמידה בדרישות עולה. בד בבד עולה המחויבות לטכנולוגיה ספציפית או לשיטת העבודה שנבחרה, ויחד עם אלו היכולת

לבצע שינויים הולכת וקטנה. תרשים שמדגים את הנושא הוצג על-ידי B.S. Blanchard & W.J. Fabrycky.<sup>18</sup>



עלות מול ודאות לאורך הפרויקט (לפי B.S. Blanchard & W.J. Fabrycky)

התובנה המרכזית מן האיור היא החשיבות של שלב הייזום והיערכות למימוש. בשלב זה הגדרות היקף המשימה, התכולות, לוחות הזמנים והתקציב הן חלקיות ורק מתהוות ומתגבשות. עם זאת, זה גם הזמן שבו מתקבלות רוב ההחלטות המשמעותיות של הפרויקט ומתגבשות התחייבויות לחלופה הנבחרת ולאופן המימוש. כבר בסוף שלב התכן הקונספטואלי קיימת מחויבות גדולה לתצורת הפתרון, לעלות ולטכנולוגיה. בה בעת חלק גדול מהיכולת לשינוי אבד. המצב מחמיר לקראת סוף שלב התכן הפרטני. עוד לפני תחילת הייצור, ההרכבות, הבחינה והאספקה יכולת השינוי יורדת משמעותית, והמחויבות לפתרון הספציפי היא כמעט מוחלטת. בסוף שלב התכן הקונספטואלי רמת הידע על המערכת היא נמוכה מאוד ועולה רק מעט בסוף שלב התכן הפרטני.

### הרחבה: חשיבה מערכתית כלכלית/חיים ברגר<sup>19</sup>

חשיבה מערכתית היא תחום המתקשר בדרך כלל לביצועים הטכניים של המערכת. עם זאת, ראייה רחבה וחשיבה מערכתית משלבת במקרים רבים היבטים של ערך ללקוח ולמשתמש לצד העלות של המוצר או השירות. חשיבה מערכתית כלכלית כוללת בחינה רחבה מעת לעת של המצב הקיים, הצרכים, ההזדמנויות הטכנולוגיות והחלופות למענה כדי להגיע למוצר היעיל והאפקטיבי ביותר בעלות המינימלית. ניתן לשייך תהליכי חשיבה מערכתית שמביאים להתייעלות מהותית בעיקר לרידוד או שינוי דרישות, כמובן תוך חדשנות וחשיבה יצירתית. מאחר שחשיבה מערכתית מתבססת על ניסיון רב-שנים ובקיאות טכנית, הדרך הטובה ביותר להצגת הנושא היא מתוך כמה דוגמאות בולטות להתייעלות וחשיבה מערכתית כלכלית שבוצעו בצה"ל בשנים האחרונות.

בהנדסת מערכות קיים המונח (Good Enough System) GES. זאת מערכת או שירות שיענה על כל הצרכים אך לא מעבר לכך. שאלת הערך של מערכת או שירות היא שאלה מרכזית שחייבת להישאל, גם במשימות שהן

<sup>18</sup> From B.S. Blanchard & W.J. Fabrycky, *Systems Engineering and Analysis*, 3rd Ed., Prentice Hall, 1998, Figure 2.11.  
<sup>19</sup> חיים ברגר הוא ראש היחידה להתייעלות תקציבית באגף התקציבים במשרד הביטחון. שירת 29 שנים בחיל האוויר (2014-1985) בתפקידים טכנולוגיים בשדה ובמטה והשתחרר בדרגת סא"ל.

לכאורה רכש המשך של מוצר זהה. כמו כן מומלץ במידת האפשר לרכוש מוצרי מדף במקום לפתח מוצרים חדשים שבהכרח אנו משלמים על הפיתוח שלהם. מהלך הביניים הוא רכישת מוצר מדף וביצוע התאמות נדרשות. להלן כמה דוגמאות של בחינה של המצב הקיים והצעה של פתרונות חדשניים על בסיס הזדמנויות טכנולוגיות או חשיבה "מחוץ לקופסה", גם אם הצרכים לא השתנו.

#### **חיל הים - רכש שידות גנריות לכלי שיט**

בחיל הים קיימות ספינות מסוגים רבים, והן נבדלות ביניהן בגודל, במשקל וכמובן בייעוד המבצעי. בין ספינות החיל אפשר למצוא ספינות טילים מדגמי "סער 4.5" ו"סער 5", אוניות עזר וספינות סיוור. בגשר הספינה ממוקמות שידות המכילות מסכים ויחידות שליטה ובקרה על מערכות שונות. עד 2013 הייתה לכל סוג של ספינה בחיל הים שידה ייעודית שפותחה במיוחד עבורה. עם הידרדרות מצב האחזקה של השידות והתייקרות אחזקתן הוחלט בחיל הים לבצע שינוי עקרוני. לצורך כך היה צורך לשנות את המפרט וליצור שידה גנרית שתתאים לכל סוגי הספינות. בזכות עיקרון המודולאריות שיושם בשידה הגנרית, מתאפשרת הסבה וחליפיות שידה מתצורת תפעול אחת לשנייה. בכך הושג ניצול משאבים מיטבי והקטנת הצורך בחלקי חילוף שונים. דוגמה לחיסכון שהושג בזכות הקונספט החדש: הסבת שידות שליטה ובקרה לשידות בקרת מנוע תוך חיסכון בעלויות פיתוח שידה חדשה, מלאי חלקי חילוף, הכשרות טכנאי וכי"ב עבור מערכת זו. בגין מהלך זה חסך חיל הים בשנים 2016-2017 תקציב של כ-5 מיליון שקלים.

#### **זרוע היבשה - רכש גרביים אנטי-בקטרליות**

המפרט הטכני של גרביים ללוחמים כלל תכונות ייחודיות וסיב נחושת למניעת חיידקים, פטרת וריחות שאינם נעימים. עד שנת 2014 רכשה זרוע היבשה גרביים מספק אחד. הוא לא היה ספק יחיד, אבל בפועל הוא זכה באופן קבוע, כיוון שכמות היצרנים שמייצרים את הגרביים עם סיבי נחושת היא קטנה יחסית בשוק. ביוזמת משלחת הרכש של משרד הביטחון בניירורק ואגף הטכנולוגיה והלוגיסטיקה הוחלט לפעול ליצירת תחרות בין כמה ספקים החל ב-2014. הדרך לכך הייתה להרחיב את המפרט הטכני ולאפשר הגשה למכרז גם של מוצרים המבוססים על סיב כסף. בעבר הייתה טענה שסיב כסף הוא נחות לעומת סיב נחושת, כלומר הוא יורד ומכתים, והיעילות שלו פחות טובה. עם התקדמות הטכנולוגיה עלתה האיכות של סיבי הכסף, והיום אין הבדל משמעותי בביצועים בין סיבי כסף ובין סיבי נחושת. כאשר לראשונה בוצע מכרז בין שני ספקים שעמדו בכל הדרישות, במכרז זכה ספק חדש שהציע גרביים עם סיבי כסף במחיר נמוך משמעותית. במהלך זה חסכה זרוע היבשה סכום השווה ערך לכ-5 מיליון שקלים.

#### **פיקוד העורף - רידוד מפרט צמיג מוגן ירי (רנפלט)**

מחלקת מיגון בפיקוד העורף אחראית לספק צמיגים עבור אוטובוסים ממוגנים ליישובים. הגלגלים עבור אוטובוסים אלו הם מסוג Run Flat Tire, "רנפלטים", כלומר צמיגים עמידים בפני נקר. מובן שצמיגים אלו יקרים בהרבה מצמיגים רגילים. עד שנת 2016 הוזמנו וסופקו 9 רנפלטים עבור כל אוטובוס ממוגן (כלומר 8 צמיגי נסיעה ועוד צמיג אחד רזרבי). במהלך שנת 2016 בוצעה ביוזמת פיקוד העורף הערכת מצב והתייעצות עם גורמי משרד התחבורה והחטיבה הטכנולוגית ליבשה. אחד הנושאים שעלה בהערכת המצב היה הצמיג הרזרבי, שכמובן אינו משמש לנסיעה אלא לגיבוי בעת הצורך. השימוש בצמיג הרזרבי הוא במקרה של תקלה בלבד.

מקרה כזה הוא נדיר מאוד, ורוב הסיכויים שהתקלה אינה קשורה לנסיבות ביטחוניות. גם במקרה של אירוע ביטחוני, החלפת גלגל באוטובוס היא אירוע מורכב מבחינה טכנית, ובכל מקרה כזה מוזעקים כוחות מבצעיים לעזרה. למעשה מתברר שבכל תרחיש מבצעי אין משמעות האם הצמיג הרזרבי הוא "רנפלט". בסופו של דבר סוכם כי ניתן להוריד את המפרט של הגלגל הרזרבי ללא פגיעה במענה הרצוי. בזכות החיסכון הכספי כתוצאה מרידוד הדרישות ניתן היה לצייד מספר רב יותר של אוטובוסים בצמיגים עמידים בפני תקר באותה עלות.

### **פיקוד העורף - רידוד חוזה אחזקה למערך התרעה**

פיקוד העורף מאחזק מערך להפצת התרעה באמצעות ספק חיצוני. עלות אחזקת המערך נגזרת מדרישות אמנת השירות (Service Level Agreement- SLA). המרכיבים באמנת השירות הם משך הזמן לתיקון לתקלה, רמת הגיבויים ועומקם ועוד. בשעת חירום מערך ההתרעה הוא מערך קריטי, ולכאורה כל גיבוי אפשרי הוא נחוץ ונדרש. הבעיה היא שכל זה עולה כסף, והרבה כסף. רידוד דרישות מחייב ניהול סיכונים ולעיתים אומץ, במיוחד אם מדובר בויתור על מוצר או שירות שהיו זמינים בעבר. לאחר דיון מעמיק בשאלת הערך והתועלת של כלל המרכיבים באמנת השירות מול הסיכון שמערכת לא תפעל בשעת חירום, הוחלט בפיקוד העורף לרדד את תכולות החוזה ללא פגיעה בדרישות המבצעיות. הדרך הייתה ביטול והסרת חלק ממשדרי הגיבוי הפזורים בארץ, ביטול עמדות חירום וקביעת אמנת שירות מרודדת. לאור מהלך זה חסך פיקוד העורף בחוזה בשנים 2017-2018 כ-2 מיליון שקלים.

### **אגף כוח האדם - הורדת עלויות תקציב הדואר בצה"ל**

בכלל צה"ל משתמשים בשירותי דואר ישראל, כמו מכתבים, צווי גיוס ומילואים, מכתבי שחרור, הפצת עיתונים וגיליונות, רישיונות צבאיים ועוד. ב-2016 הוחלט לצמצם את עלויות הדואר באמצעות שימוש בדוא"ל, במסרונים ובאתרי אינטרנט. במקביל החלה אכיפה בכמה דרכים.

1. עדכון מדיניות הדואר הרשום וצמצום הפצה באמצעות דואר בנושאים שאין בהם צורך מחייב על פי חוק, כמו צווי מילואים ותלושי שכר.
  2. הגברת בקרה על הגופים ושימוש בהנחה על דואר כמותי.
  3. בקרת חיובים חריגים ודרישה של הגופים להסבר או להעברת תקציב.
- מהלך נוסף שבוצע היה מעקב מבוקר והגשת תביעות לדואר ישראל לזיכויים כספיים בגין עסקאות דואר שבגינן הייתה זכאות להנחה שלא מומשה או עסקאות שכלל לא התממשו בפועל. מהלך זה חסך למערכת הביטחון כ-15 מיליון שקלים בשנים 2016-2017.

### **זרוע היבשה - סוללות נטענות**

חיילי צה"ל משתמשים במכשירי קשר ותצפית שונים בעת שהותם בשטח. מכשירים אלו הופעלו עד שנת 2015 באמצעות סוללות חד-פעמיות. בשנה זו קיבלה זרוע היבשה הלוואת התייעלות ורכשה עבור כל צה"ל סוללות נטענות. נרכשו 160 אלף סוללות מסוגים שונים, והן החליפו סוללות חד-פעמיות מאותו סוג. העלות הממוצעת של סוללות נטענות היא כ-320 שקלים, ואילו העלות הממוצעת של סוללה חד פעמית היא כ-230 שקלים. העלות השנתית להחלפת בלאי סוללות היא 2.5 מיליון שקלים, והעלות של מטענים היא 6 מיליון שקלים, כל 5 שנים. בניכוי ההוצאות המוזכרות לעיל, זרוע היבשה צפויה לחסוך כ-93 מיליון שקלים במהלך התוכנית הרב-שנתית "גדעון" (כ-19 מיליון שקלים לשנה).

### **סיכום**

בתקופה הנוכחית הטכנולוגיה ושוק המוצרים מתפתחים ומשתכללים בצעדי ענק. כל גוף עסקי או ציבורי חייב לעקוב אחר שינויים אלו ולמצות אותם כמנוף להתעצמות ולצד זאת גם להתיעלות וחיסכון.

*The formulation of a problem is often more essential than its solution, which may be merely a matter of mathematical or experimental skill. To raise new questions, new possibilities, to regard old problems from a new angle requires creative imagination and marks real advances in science*

Albert Einstein, Leopold Infeld, in *Evolution of Physics*, Cambridge University Press, 1938.

## מיצוי צרכים וניתוחם

חלק מהותי בעבודת מהנדס המערכות הוא הגדרת הדרישות ועבודה מול בעלי העניין: המשתמש הסופי והצורך האמיתי שלו, לקוחות, ספקים ועוד. כדי להביא את הערך המרבי ללקוח נדרש לבצע תהליך מקיף של ניתוח הצורך מול המענה הטכני האפשרי. רק אז ניתן להגיע לבחינה נכונה של החלופה המערכתית המיטבית. המשתמש, הלקוח ויתר בעלי העניין הרלוונטיים צריכים להיכנס כשותפים לתוך מעגל התכן, הגדרת הדרישות והנדסת המערכות.

השלב הראשון בהנדסת מערכות הוא מיצוי צרכים וניתוחם. הצרכים של הלקוח עשויים לכלול כמה היבטים: נושאי ביצועים, בטיחות, ממשק למערכות קיימות ועוד. לצד דרישות הלקוח יש אילוצים הנובעים מהצורך בהתאמה למערכת על מבחינת גדלים, מידות או ממשקים למכלולים קיימים, מגבלות של חוקים ותקנות, התבססות על טכנולוגיית פיתוח או ייצור קיימת ועוד. הדרך הפשוטה למיצוי הצרכים היא עבודה על בסיס מסמך כתוב של הלקוח. שיטות נוספות למיצוי צרכים כוללות שאלונים לצרכנים (במיוחד בפרויקטי יצור צרכן) ותצפית בתהליך קיים. בכל מקרה, חשוב להגיע לסביבה האמיתית שבה המערכת מיועדת לפעול. כך ניתן לקבל מידע באופן בלתי אמצעי מהאנשים שמיועדים להפעיל את המערכת ולתמוך בה. שיטות לאיסוף צרכים כוללות את המשפחות האלה:

1. **שיטות ישירות:** ראיונות עם משתמשים, לקוחות ובעלי עניין; שאלונים; קבוצות מיקוד; סיעור מוחות;
2. **שיטות עקיפות** (הסקה מתוך המצב הקיים והקשר) ביקורים בשטח, בחינת תיעוד טכני קיים;
3. **המחשה:** סימולציה והדמיה של סביבת הפעולה הנוכחית או העתידית עם או בלי שילוב המערכת המוצעת; מידול מערכות ובניית אבות טיפוס; לעיתים משולב עם שיטות ישירות (הצגה של הדמיה ללקוח או בעל עניין לקבלת התייחסות);
4. **עריכת תרשימים:** תרשימי תרחישי שימוש ופעילות, שימוש בכלי ניתוח הנדסי, למשל FFBD (Functional Flow Block Diagrams) או QFD (Quality Function Deployment).

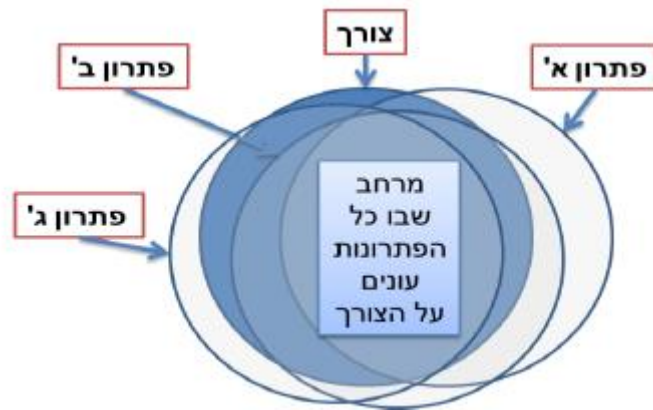
## צורך או פתרון?

כל מוצר או מערכת טכנולוגית נועדו למלא צורך כלשהו. בשפת היומיום לעיתים קרובות מגדירים את הצורך באמצעות הפתרון. אנשים אומרים בדרך כלל שהם צריכים רכב, בעוד שהצורך הוא למעשה להתנייד ממקום למקום. אם אכן זה הצורך, קיימות חלופות רבות נוספות, כמו רכבת, אופנוע, אופניים חשמליים, מונית ועוד. לעיתים הצורך עולה רק לאחר שהפתרון הטכני מופיע. הפתרון אינו מתאים תמיד בכל מאת האחוזים לצורך, וחלק מהצורך נותר ללא מענה. עם זאת, ייתכן שהפתרון מעניק יכולות נוספות שלא עלו כחלק מהדרישה המקורית, כפי שנראה באיור הבא:



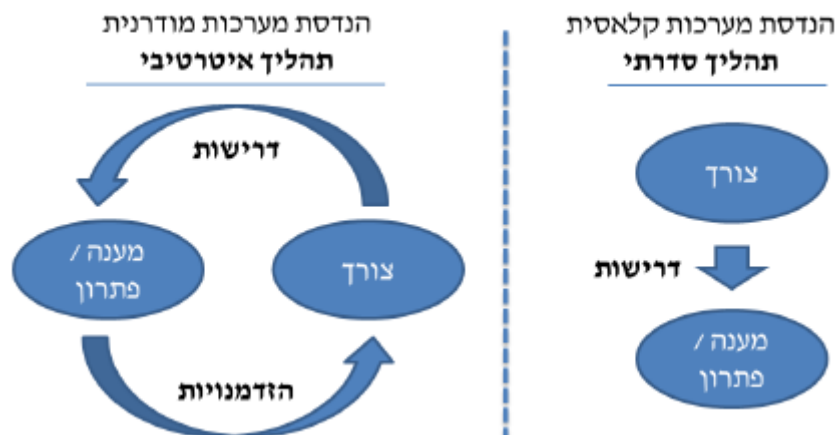
צורך מול פתרון

בעולם של ימינו חלק ניכר מהמערכות בנויות על בסיס רכיבים מסחריים מהמדף - מוצרי COTS (Commercial off the shelf). השימוש ב-COTS מקצר את זמן הפרויקט ומוזיל עלויות. השימוש ברכיבים אלו לעיתים אינו מאפשר התאמה מלאה לצורך של הלקוח, כפי שהיה קורה אילו פותח המוצר באופן ייעודי. פעמים רבות הבחירה היא בין רכיבים העונים על חלק מהצרכים. לעיתים כל פתרון עונה על הצורך בצורה אחרת, ולכל פתרון יש תחומים שבהם הוא אינו עונה על חלק מהצורך או מביא מאפיינים נוספים על הדרישה המקורית.



בחירה בין פתרונות שונים

תהליך הנדסת המערכות משתנה מתהליך סדרתי ומובנה שמתחיל בהגדרת הצורך ומסתיים באפיון הפתרון המתאים, לתהליך איטרטיבי שבו הדרישות מכתיבות את הפתרון ומרחב הפתרונות משפיע על הצורך.



הנדסת מערכות: מתהליך סדרתי לתהליך איטרטיבי



ניתוח הצרכים הוא שלב יסודי בתכנון מערכת. הגדרת המערכת היא שלב המגיע אחרי הגדרת הצורך ומתבסס על ניתוח הצרכים. בכל שלב בפיתוח המערכת כדאי לחזור ולבדוק האם המערכת נותנת את המענה המתאים לצרכים. הבעיה הגדולה היא לזהות מתי "פתרון" מתחזה לצורך, ולחזור שלב אחד אחורה כדי לבדוק פתרונות אחרים שיכולים להיות יותר יעילים עבור הבעיה.

דוגמה לתהליך של מיצוי צרכים והפרדה בין הצורך לפתרון היא פרויקט IOREF. זהו פרויקט לפיתוח אפליקציה של פיקוד העורף המיועד לענות על שלושה צרכים עיקריים, ואלה הם:

1. **העברת מידע לאזרח:** עדכון של מנויי האפליקציה על בסיס מיקום גיאוגרפי בדבר סכנה או מידע חשוב הרלוונטי להם;
2. **לחצני מצוקה:** דיווח של מנויי האפליקציה כי מצבם תקין, וכי הם אינם זקוקים לסיוע (כדי להפחית את העומס על גורמי ההצלה בעת אירוע);
3. **קבלת מידע מהאזרח (לאחר עיבוד וזיקוק)** בדבר התרחשותו של אירוע חירום (כמות נפגעים, אופי פציעה, איתור נעדר וכדומה).

בסוף 2015 פותחה אפליקציית IOREF בלוק 1 שתוכננה להעביר הודעות דחופות לאזרח (למשל בעת ירי טילים). בלוק 2, שעיקר יעדו היה מעבר ממונולוג לדיאלוג עם האזרח, היה בדיונים זמן רב ולא התקדם למרות שלא הייתה בעיה טכנית לממש את הדרישות, ובאותה עת כבר היו אפליקציות דומות לתחומים אחרים. כדי להתקדם עם הפרויקט ערכנו סדנה שבה פורטו מחדש כלל בעלי העניין והלקוחות של האפליקציה. הלקוחות העיקריים שצוינו היו האזרחים, פיקוד העורף וארגוני חירום נוספים שהיו עשויים להשתמש בפלטפורמה לתקשורת עם האזרח בעת שגרה.

לאחר מכן בוצע מיפוי הצרכים של בעלי העניין. בתהליך המיפוי הגענו להבנה משותפת שבפרויקט יש כמה בעיות מהותיות. האפליקציה מיועדת לשימוש בחירום, ובשגרה למעשה אינה מתפקדת. מצב זה מהווה אתגר באחזקה והתאמה שוטפת למכשירים חדשים וגרסאות של מערכות הפעלה. בנוסף קיים קושי לשכנע את האזרח להתקין את האפליקציה, מאחר שכאמור היא אינה משמשת אותו ביומיום. מצד שני, אם מתרחש אירוע חירום, תידרש התמודדות עם בעיות טכניות רבות כאשר תגענה בבת אחת מאות אלפי הורדות חדשות ופניות באמצעות האפליקציה.

הפרויקט הוא פרויקט יצרן-צרכן ולא פרויקט לקוח-ספק, כמו רוב הפרויקטים בצבא. התברר, שאחת הדרכים לקידום הפרויקט היא לייצר ערך בשימוש באפליקציות אזרחיות בשגרה, למשל על-ידי שיתוף פעולה עם ארגונים נוספים כמו משטרת ישראל, מגן דוד אדום, נציבות כבאות והצלה וכדומה.

התובנה שהתגלתה לאחר כחמש שעות של סדנה היא שמתווה הפרויקט כיום אמנם נוסח בשפה של צורך אך למעשה זהו פתרון. המילים "פיתוח אפליקציה" מנתבים מיידית לאפיק פתרון מסוים, בעוד שקיימים לפחות שני פתרונות נוספים: עבודה עם אפליקציות קיימות של אתרי חדשות, רשתות חברתיות וכדומה והעברת מסרים באמצעותן או פיתוח גרסה נגזרת של אפליקציות חירום קיימות עבור פיקוד העורף.

כמובן שבפתרונות אלו יש סיכונים. בפתרון הראשון מתעוררות סוגיות של התמודדות עם איומי סב"ר (הפצת התרעות כוזבות בשם פיקוד העורף או הצפת פיקוד העורף בדיווחים שגויים), נכונות של החברות והאפליקציות לעבוד עם פיקוד העורף, מידת המחויבות של הספקים החיצוניים (מה קורה אם אפליקציה מסוימת מפסיקה את השירות, ומה האחריות של פיקוד העורף לגבי הזמינות והשרידות של אפליקציה חיצונית), תלות בחברות אזרחיות לצד שמירה על מיתוג וצביון רשמי של פיקוד העורף, אופן הסדרת תשלום ועוד. לאחר תהליך החשיבה לעיל, הכיוון העקרוני שגובש לפתרון הוא פנייה פתוחה לכמה אפליקציות, ללא תשלום או תשלום מינימלי. ההנחה שנקבעה היא שבשעת חירום כל אפליקציה רלוונטית תרצה לדווח

הודעות רשמיות של פיקוד העורף. אם אפליקציה מסוימת לא תרצה לשתף פעולה, ותהיה אפליקציה אחרת שתספק את השירות - בוודאי שזה ישפיע על הרייטינג והתפוצה של האפליקציות, כך שהסיכוי לשיתוף פעולה הוא כנראה גבוה מאוד. אם אחת האפליקציות תקרוס - תישארנה אפליקציות נוספות. פיקוד העורף יאשר את האפליקציות שיתממשקו אליו תוך בדיקה של מנגנוני חסינות ועוד.

### ניהול בעלי עניין

בעלי העניין בפרויקט הם מגוונים - משתמש סופי, מפעיל, מאחזק, ספק, איש רכש, יצרן, לקוח, רגולטור, מתחרה או שותף. ניהול נכון של בעלי העניין הוא הכרחי להצלחת הפרויקט. לאחרונה העיסוק בנושא גובר. בין היתר, נושא ניהול בעלי עניין התווסף כתחום ידע נפרד החל מהמהדורה החמישית (2013) של גוף הידע לניהול פרויקטים (PMBOK).

דוגמה להבדלי גישות בין בעלי עניין אפשר לראות במערכת "עגלת קנייה חכמה". עגלת קניית חכמה מזהה את הפריטים המוכנסים אליה באופן שלא נדרש מעבר בקופות לצורך התשלום. המשתמשים במערכת הם הקונים בחנות. הצרכים שלהם ברורים יחסית: מערכת אמينة, קלה לתפעול ולא דורשת לימוד, עם חיוויים ברורים ועוד. הלקוחות של פיתוח המערכת הם למעשה בעלי החנויות שמקווים באמצעותה לצמצם את כוח האדם הנדרש בקופות. צורך נוסף של לקוחות המערכת (ולא של הלקוחות בחנות!) הוא להגדיל את המכירות באמצעות הפניית תשומת לב הקונה למבצעים במדפים הקרובים למיקום העגלה. במקרה הזה הצרכים של בעלי החנויות הם, למשל, דיוק מיקום טוב, יכולת מערכתית לניתוח הרגלי צריכה ועוד. קל לראות שההתנגשות בין צורכי המשתמשים וצורכי בעלי החנויות היא בלתי נמנעת. למשל בתקציב פרויקט נתון, ההחלטה האם להשקיע בהקמת מערכת תוכנה לניתוח הרגלי קנייה, עשויה לבוא על חשבון עיצוב ממשק משתמש מתקדם. מפת השפעה ועניין היא שיטה מעשית לניהול בעלי עניין. זוהי סכמה המחלקת את כלל הגורמים הרלוונטיים לפרויקט על-פי שני קריטריונים: מידת ההשפעה על הפרויקט ורמת העניין בפרויקט.



ניתוח בעלי עניין: מפת השפעה ועניין

המפה יוצרת חלוקה של בעלי העניין לארבע קטגוריות. בטבלה להלן מובא פירוט של ארבע הקטגוריות בהתאם למידת ההשפעה על הפרויקט ורמת העניין. אל קטגוריות אלו צורפו דוגמאות והמלצה לאופן הניהול הרצוי הנובע מהמאפיינים של בעל העניין.

רמת עניין	רמת השפעה	דוגמה לבעל עניין	אופן הניהול הרצוי
גבוהה	גבוהה	לקוחות (מנקודת מבט הספקים), ספקים (מנקודת מבט הלקוחות), מנהלים, כפופים, אנשי מפתח בחברה ומחוצה לה	ניהול צמוד, עדכון שוטף
גבוהה	נמוכה	לקוחות (בפרויקט יצרן-צרכן), אנשי שיווק של היצרן	עדכון תקופתי, מעקב שביעות רצון
נמוכה	גבוהה	אנשי פיתוח בחברה, גופי תקינה, רשויות	עדכון מעת לעת, מעקב אחר ביצוע משימות רלוונטיות
נמוכה	נמוכה	מתחרים, אנשי תמיכה והטמעה	מעקב ועדכון מינימלי על-פי הצורך

יש לציין שרמת ההשפעה והעניין של בעלי העניין משתנה לאורך שלבי הפרויקט ותלויה בסיטואציה הפרטנית של כל פרויקט. לדוגמה, בשלבים מסוימים של פרויקט שדרוג מערכת מידע ארגונית, מטמיע או איש תמיכת תוכנה יכולים להיות בעלי השפעה ועניין גבוהים. בפרויקט אחר, כדוגמת פיתוח אפליקציה חדשה, רמת עניין ומידת השפעה של ממלאי תפקידים אלו יכולה להיות נמוכה בהרבה.

#### מעורבות בעלי עניין כחלק מהצלחת הפרויקט

אמרה ידועה היא, שלצלחה אבות רבים, והכישלון הוא יתום. אפשר להשתמש בכלל הזה גם בפרויקטים: אם לפרויקט כלשהו יש אבות רבים, אז אפשר להעריך שהוא נחשב להצלחה בעיני רבים. מעורבות גבוהה וחיובית בפרויקט היא חלק מהותי בהצלחה. כדי להגיע למצב זה, נדרש למפות את בעלי העניין ולקדם את הפרויקט מולם.

בעלי עניין אלו יכולים להיות גורמים בתוך הארגון, ממלאי תפקידים בצד הלקוח ועוד. בתהליך זה תהיה צבירה של דרישות, הנחיות ותובנות רחבות שיוכלו להזין את התכנן ולשפר את המערכת. כמובן שנדרש לבצע את התהליכים תוך שמירה על איזון סביר וגבולות גזרה, חיסיון עסקי בהתאם לצורך, התייחסות להיבטים אישיים של המעורבים ועוד.

#### מודל קאנו

פותח בשנות ה-80 של המאה הקודמת על-ידי הפרופסור היפני נוריאקי קאנו.<sup>20</sup> המודל המוצג באיור הבא מתאר בצורה גרפית את שביעות הרצון של הלקוח ממילוי הצרכים באמצעות המאפיינים או התכונות של המוצר. על-פי מודל קאנו צורכי הלקוחות נחלקים לשלוש קבוצות עיקריות: צרכים בסיסיים, צרכים חד ממדיים (או מאפייני ביצועים) וצרכים מלהיבים.

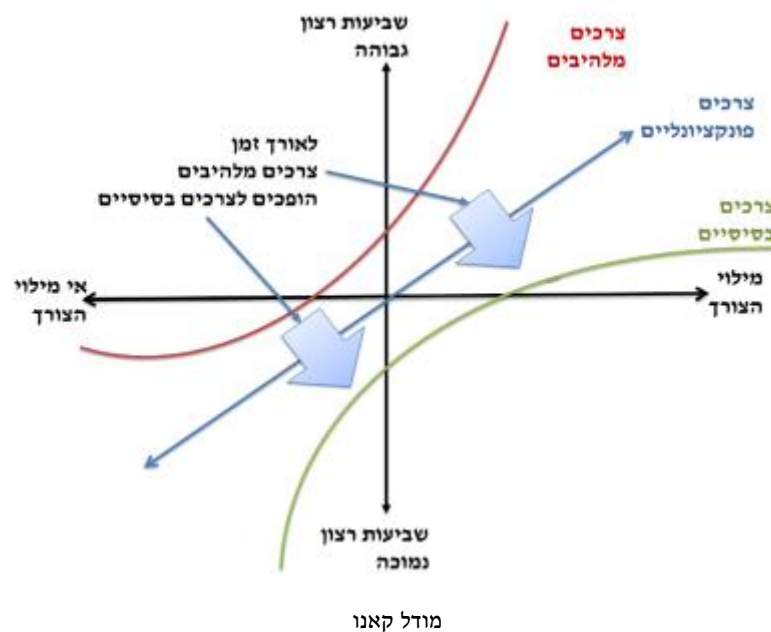
**צרכים בסיסיים.** בבחינת מובן מאליו בעיני הלקוח, ולכן לעיתים הלקוח עשוי לא לצייןם באופן מפורש. צרכים בסיסיים מגדירים מאפייני סף: מוצר ללא תכונות אלו יתקשה להיכנס לשוק או להישאר בו. אם מאפיינים העונים לצרכים אלו אינם משולבים במוצר, אי שביעות הרצון של הלקוח היא גבוהה. אם הם

<sup>20</sup> להרחבה ראו: <http://www.six-sigma-material.com/Kano.html>.

נכללים במערכת, שביעות הרצון היא בינונית, כמצופה מפרמטר מובן מאליו. דוגמה לצורך בסיסי ברכב הוא שהגלגלים לא יתפרקו מהרכב במהלך נסיעה. בכל רכב ישנם כמה בורגי הידוק שמתוכננים למומנט סיבוב מדויק שמונעים השתחררות לא רצויה של הגלגל במהלך הנסיעה. עם זאת, העובדה שהגלגלים אינם מתפרקים בזמן נסיעה היא מובנת מאליה בעיני הלקוח הסביר, והיא אינה מוסיפה לשביעות רצונו מהרכב. אבל אם יקרה ולו פעם אחת מקרה שבו הגלגל יתפרק בנסיעה, הלקוח, אם ייצא בחיים מהעניין, לא יוכל להשלים עם זה.

**צרכים חדממדיים או מאפייני ביצועים.** צרכים המקיימים קשר ליניארי בין שביעות הרצון ובין הביצועים. לדוגמה, סוללה עם קיבול גבוה יותר תביא ככל הנראה לשביעות רצון גבוהה יותר של הלקוח שעשויה להתבטא בנכונות לשלם יותר עבורה.

**צרכים מלהיבים.** תכונות שהלקוח אינו מצפה או בכלל לא יודע שאפשר לקבל. צרכים מלהיבים גורמים לשביעות רצון רבה אם הם מיושמים, והם אינם גורמים לאכזבה אם הם אינם נמצאים.



צרכים שבעבר נחשבו מלהיבים, עם הזמן והתקדמות הטכנולוגיה, הופכים להיות תכונות ביצועיים, ולאחר מכן, צרכים בסיסיים וטריוויאליים. כך מערכות בטיחות ברכב, כמו כריות אוויר, ABS ועוד, שבתחילה שולבו ברכבי יוקרה בלבד, היום נמצאים בכל רכב חדש ואף נכנסו לתקינה בנושאי בטיחות בדרכים. דוגמה נוספת היא היכולת של הטלפון החכם לזהות את זווית הנטייה של המכשיר ולהחליף בין תצוגה אופקית לתצוגה אנכית. תכונה זו נחשבה לתכונה מלהיבה בתחילת עידן הטלפון החכם.

בעבר זה היה בבחינת "גימיק" נחמד - תכונה ש"לא חייבים" ושהצרכנים לא ביקשו במיוחד, אך גורמת לשביעות רצון גבוהה אם היא קיימת. היום תכונה זו היא בבחינת תכונה בסיסית: קשה לחשוב על טלפון שייצא לשוק ללא התאמה אוטומטית של כיוון התצוגה. הוא הדין עם זיהוי מספר המתקשר - בימינו זה מובן מאליו, אך בעידן הטלפונים הביתיים תכונה זו הייתה נחלתם של מעטים (בעיקר במשרדים), ולאחר מכן הייתה כרוכה בתשלום נוסף על דמי המנוי החודשיים.

## תרחישי שימוש

צרכים נגזרים מתרחישי שימוש במערכת בסביבה הרלוונטית. במערכות מודרניות יש דרישות רבות ותרחישי שימוש מגוונים. הגדרה נכונה של מערכת מתחילה בתיאור תרחישי השימוש והתיעודף ביניהם. בדיקה נכונה של המערכת בעת קבלתה צריכה להתאים לתרחישי השימוש. ניתן להציג תרחישי שימוש גם ללא שימוש במתודולוגיית מידול מיוחדת, בצורת טבלה או תיאור מילולי. לדוגמה, נתבונן בתרחיש שימוש במקרן נייד. בתרחיש זה, מדריך או מורה משתמש במקרן הנייד לצורך העברת "שיעור בדשא" מול תלמידים.

השימוש במקרן מתחיל עם פריסת לוח ההקרנה והעמדתו, חיבור המקרן למחשב הנייד והדלקת המחשב הנייד. לאחר מכן המורה מציג את השקפים הרלוונטיים להדרכה. תוך כדי כך הוא מצביע על התמונה המתקבלת מהמקרן ועונה לשאלות התלמידים. בסיום התרחיש המורה מכבה את המכשיר ואורז אותו.

אחת השיטות לתיאור תרחישי שימוש היא בשפת UML (Unified Modeling Language) ונגזרתה להנדסת מערכות SysML (Systems Modeling Language) מטרת התיאור הוא הצגת האינטראקציה של המשתמש עם המערכת תוך ציון גבולותיה, תהליכי עבודה מרכזיים, קבוצות של רכיבים וממשק עם ישויות חיצוניות.

תרחישי השימוש מיוצגים בתרשים באמצעות אליפסה. גבולות המערכת מיוצגים באמצעות מלבן המכיל את תרחישי השימוש המערכתיים. המשתמשים בשפת SysML מכונים "שחקנים" - Actors - ומיוצגים באמצעות ציור קווים של דמות. קבוצת השחקנים כוללת לא רק אנשים אלא ארגונים, מערכות וכלל הדברים המשתתפים בפעולה עם המערכת. תרשים תרחישי שימוש אינו מביע את כלל המורכבויות וההסתעפויות בכל תרשימי הזרימה האפשריים, אלא הוא מציג תמונת על של תפקוד המערכת ופעולתה מול המשתמש והישויות המרכזיות הרלוונטיות אליה.

תיאור משלים לתרשים תרחיש שימוש הוא טבלת מצבים ואירועים. טבלה כזו מתארת את רצף המצבים במערכת לאורך תרחיש השימוש יחד עם ציון פרטים שונים הקשורים למצבים אלו, אינטראקציה עם השחקנים השונים והסביבה. דוגמה לטבלת מצבים ואירועים מובאת להלן עבור תרחיש מפגש חולה עם רופא בקופת חולים.

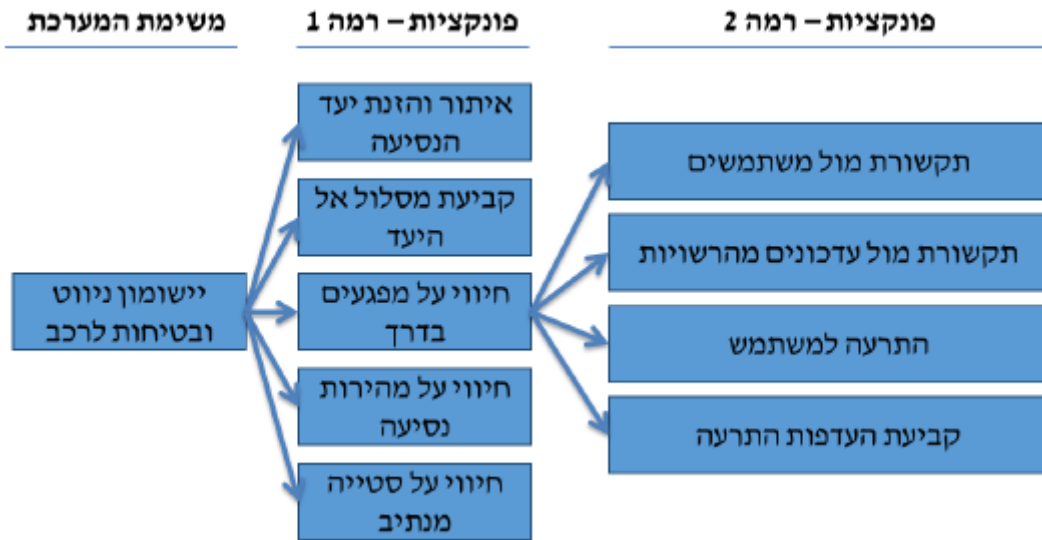
מצב נוכחי	תיאור	תנאי קדם / קלט	שחקנים משתתפים	טריגר למצב הבא	מצב הבא	פלט
1	הגעת חולה לקופת החולים	הוזמן מראש תור לרופא	החולה, מערכת זימון תורים	החולה מעביר כרטיס בעמדה	2	פתק עם חדר הרופא ומס' תור
2	המתנה לרופא	הרופא הודיע שסיים טיפול בחולה הקודם	החולה, מערכת זימון תורים	המערכת מציגה שתור החולה להיכנס לרופא הגיע	3	
3	החולה מתקבל אצל הרופא	-	החולה, מערכת זימון תורים	הרופא מעדכן שהחולה נכנס	4	
4	המערכת מעבירה את תיעוד התור לגביה עבור הביקור	-	מערכת זימון תורים	- (סיום התרחיש)		

טבלת מצבים ואירועים: מפגש חולה עם רופא בקופת חולים

תיאור של תרחיש שימוש מיועד להעלות צרכים מפורשים וצרכים נרמזים של המשתמש והלקוח באמצעות התבוננות בסביבת ההפעלה האמיתית של המערכת. בדוגמה של המקרן צרכים אלו עשויים לכלול את לוח ההקרנה כחלק משלים ובלתי נפרד מהמערכת. נוסף על כך, לפי התרחיש, אותו הלוח נדרש לאמצעים לפריסה והעמדה בשטח, ללא קיר או משטח לתלייה. צורך נוסף לדוגמה הוא עוצמת הארה גבוהה לשימוש בימי שמש. חשוב לזכור שקיימים תרחישים רבים לכל מערכת, וכל תרחיש עשוי לתרום להבנת הצרכים. תרחישי לוגיסטיקה, אחזקה, התקפת סב"ר ועוד עשויים להאיר באור נוסף את המערכת ולהוסיף צרכים נוספים.

### ניתוח פונקציונלי

שיטה לפירוק של המערכת על-פי הפונקציות שהיא מיועדת למלא. דוגמה לקטע מניתוח פונקציונלי של יישומון ניווט ובטיחות לרכב נתונה באיור הבא, בו מוצגים משמאל לימין פונקציות של המערכת ברמת פירוט הולכת ועולה.



קטע מניתוח פונקציונלי ליישומון ניווט ובטיחות לרכב

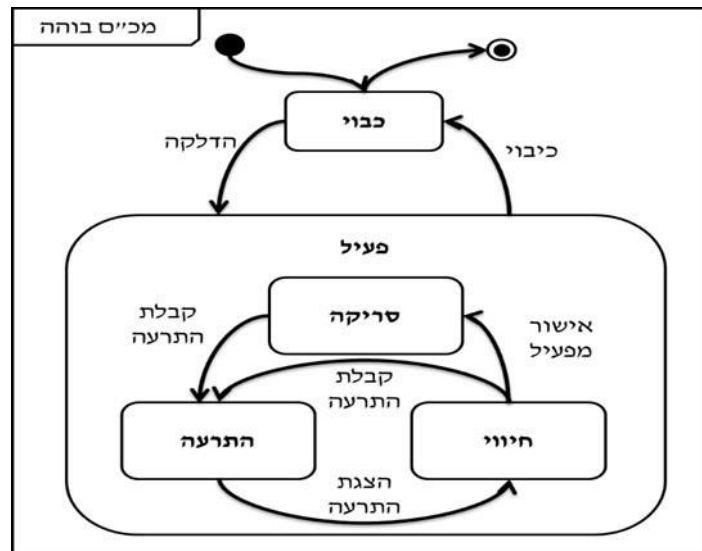
תרשים הניתוח הפונקציונלי יכול לשמש לאיתור צרכים ומאפיינים נדרשים עבור המערכת. בדוגמה לעיל פונקציית תקשורת מול עדכונים מהרשויות מחייבת בנייה של ממשק מתאים. נושא זה אינו בהכרח אחת מהדרישות המרכזיות, והוא גם עשוי לא לעלות כחלק מדרישת הלקוח. הניתוח הפונקציונלי מאפשר לקבל נקודת מבט שלמה על המערכת ולעלות על צרכים חשובים שלא בהכרח עלו בדרך אחרת.

### הנדסת מערכות מבוססת מודלים

עם עליית המורכבות ההנדסית של המערכות וריבוי הממשקים בינן ובין עצמן והסביבה, פותחה גישה מבוססת מודלים, ובה ניתן דגש על ייצוג גרפי של המערכת בסביבתה באמצעות מודל או תרשים כבסיס לאפיון הנדסי. יש המשתמשים בתרשימים בפורמט חופשי כדוגמת מפת מושגים, אך בשנים האחרונות מתרחב השימוש בתרשימים פורמליים. נתאר שלושה סוגי תרשימים דינמיים בשפת הניתוח המערכתית – SysML. **תרשים רצף** - מציג את היחסים בין עצמים לאורך ציר הזמן. העצמים והתהליכים מיוצגים על קווים אנכיים שמתארים את משך הזמן שבו הם פעילים. חץ מלא בתרשים מייצג הודעה סינכרונית, וחץ מקוקו מייצג הודעה אסינכרונית.

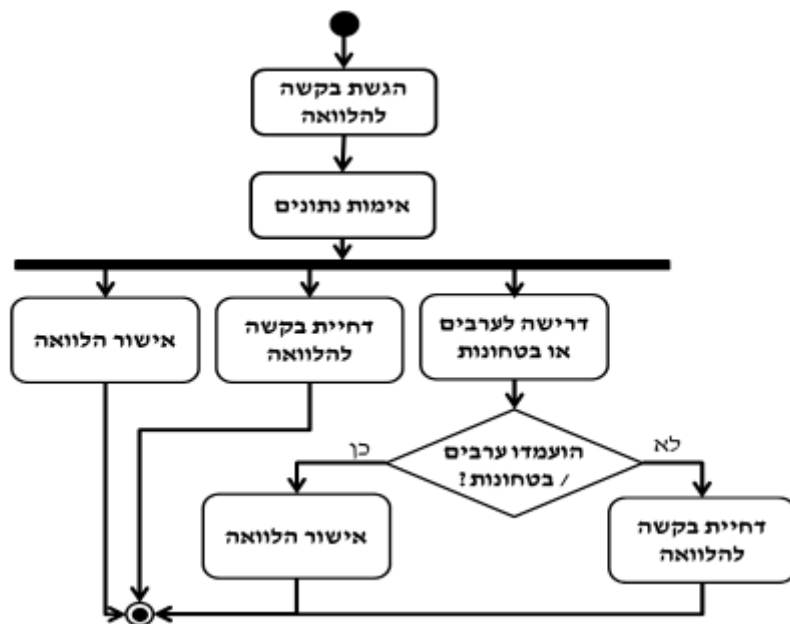
**תרשים מכונת מצבים** - מבטא את מצבי המערכת והמעברים ביניהם. העיגול המלא בתרשים מייצג את המצב ההתחלתי והעיגול עם הנקודה השחורה מייצג את המצב הסופי.

**תרשים פעילות** - סוג של תרשים זרימה מובנה המייצג תהליך או רצף של פעולות. התרשים יכול לכלול תיאור של תהליכים חישוביים וארגוניים, זרימת מידע בין פעולות, בחירה בין חלופות וחזרה על פעולות. בתרשים הפעילות מייצגים מלבנים מעוגלים את הפעילויות; מעוינים מייצגים בחירה; ופסים אופקיים מייצגים פיצול או חיבור של פעילויות מקבילות.



תרשים מכונת מצבים: מל"ם בוהה

כמו בתרשים מכונת מצבים, העיגול המלא מייצג את המצב ההתחלתי והעיגול עם הנקודה השחורה מייצג את המצב הסופי. באיור הבא מובאת דוגמה לתרשים פעילות פשוט עבור תהליך בקשת הלוואה בבנק.



תרשים פעילות עבור תהליך בקשת הלוואה בבנק

### קביעת חשיבות יחסית של צרכים - NGT

שיטת NGT (Nominal Group Technique) היא שיטה פשוטה לקבלת החלטות. היא מתאימה לביטוי של דעות שאינן חלק מצוות הפיתוח, ומונעת השתלטות של דעה מובילה או תפיסה שלטת. ניתן להשתמש בשיטה לצורך קביעת חשיבות יחסית של צרכים, במיוחד במצב של תכנון בתנאי משאבים מוגבלים. בתהליך NGT משתתפים מספר בעלי עניין, כמו נציגי משתמשים, לקוחות, מפתחים ועוד. אם אין משתמש מוגדר, למשל בפרויקט יצרן צרכן, נהוג שאחד מאנשי הצוות ייצג את דעת המשתמשים על בסיס סקרי שוק, ראיונות ועוד. כל אחד מהמשתתפים בתהליך NGT מקבל 100 נקודות ומחלק אותן בין הצרכים שנראים לו חשובים. בשקלול הסופי של הדעות המשתמשים ונציגי הלקוח מקבלים עדיפות בתור אלה המכירים באופן הטוב ביותר את



הצורך והשימוש הסופי של האמצעי. נהוג לתת לבחירה של הלקוחות והמשתמשים משקל יחסי של פי שניים או פי שלושה לעומת אנשי הפיתוח.

לאחר התהליך נוצרת טבלה כדוגמת הטבלה להלן. הצרכים שהוכנו לטבלה שייכים לרמה הראשונה של הניתוח הפונקציונלי בדוגמה הקודמת של יישומון ניווט ובטיחות לרכב. בטבלה להלן נוספו גם קריטריונים של מחיר מערכת ואמינות טכנית. בסיכום ההצבעות נוצרת עמודה של סטיית תקן. סטיית תקן גבוהה מצביעה על אי הסכמה בין המעורבים בפרויקט. כדי לנסות להגיע להסכמה ניתן לקיים סבב של התייעצויות שבו כל בעל עניין מנסה להסביר את ההצבעה שלו, במיוחד במקרה של ערכים חריגים. לאחר הסבב מתבצעת הצבעה נוספת מתוך שאיפה להגיע לאיזון של צרכים שיהיה מקובל על כל בעלי העניין.

שיטה וותיקה ומורכבת יותר היא שיטת AHP (Analytic Hierarchy Process). השיטה מיועדת לקבוע משקלות לקריטריונים באמצעות השוואה של זוגות קריטריונים.

משה (פיתוח)	אבי (לקוח)	שלומי (שיווק)	רעות (משתמשת)	שרית (ניהול)	ממוצע	סטיית תקן	
1	3	1	3	1			משקל יחסי
20	30	10	20	30	23.3	5.3	קביעת מסלול אל היעד
25	0	20	10	10	9.4	8.8	חיווי על מפגעים בדרך
20	0	10	10	10	7.8	6.7	חיווי על מהירות נסיעה
10	40	20	50	10	34.4	16.7	חיווי על סטייה מנתב
5	10	30	5	30	12.2	10.3	מחיר נמוך
20	20	10	5	10	12.8	7.1	אמינות טכנית גבוהה
100	100	100	100	100	16.7	9.2	סך הכול

טבלת NGT עבור יישומון ניווט ובטיחות לרכב

### תרגום משפת הלקוח לשפת ההנדסה - QFD

שלב מיצוי וניתוח צרכים מסתיים עם גיבוש תמונה מלאה של התרחישים, הצרכים וחשיבותם היחסית. השלב הבא הוא גיבוש רשימה של מאפיינים הנדסיים על בסיס התרחישים והצרכים. שלב זה הוא תחילת

התרגום משפת הלקוח לשפת ההנדסה.

לצורך הדוגמה נתייחס לפיתוח מדיח כלים בחברת מוצרי אלקטרוניקה ביתיים. נניח שהדרישות המרכזיות מהמדיח (בשפת הלקוח) הן אלה:

*איכותי בשטיפה; מהיר; נוח להפעלה; חסכוני בהפעלה.*

דרישות אלו אינן בלתי תלויות. הדחה מהירה משפיעה על איכות השטיפה ועל חיסכון במים ובחשמל. מדיח קל להפעלה יכול כמות מצומצמת של תוכניות, אך הדבר יכול להשפיע על החיסכון במים ובחשמל. התאמה אוטומטית של תוכנית ההדחה לסוג הכלים והלכלוך תשפר את קלות ההפעלה, אך היא יכולה לפגוע באיכות השטיפה במקרה של זיהוי שגוי. במקרה הכללי מדובר בעשרות פרמטרים תלויים ביניהם. בחירה של נקודת העבודה תשפיע בדרך כלל על מחיר המוצר או המערכת, והדבר ישפיע על ההצלחה העסקית של הפרויקט או ההתאמה לצורך המבצעי, במקרה של מערכות בעולם הביטחוני.

נשאלת השאלה מהו הערך המיטבי בכל פרמטר בהתייחס לציפיות של הלקוח? בדוגמה של המדיח, האם 30 דקות נחשב פרק זמן מהיר עבור הדחה אחת? אולי גם פרק זמן של 60 או 90 דקות עולה על הציפיות של רוב הצרכנים?

כדי לענות על השאלה הזו נדרש לבצע את המשימות האלה: לקבוע את הצרכים הקריטיים עבור הלקוחות; לקבוע את התכונות והמאפיינים המרכזיים המשפיעים על המענה לצרכים; לקבוע את ערכי היעד למאפיינים אלו.

אחת השיטות הידועות לתרגום הצרכים למאפייני תכן היא QFD (Quality Function Deployment).

QFD היא שיטה שפותחה ביפן לצורך תרגום דרישות לקוח למאפיינים טכניים של המוצר או המערכת. השיטה מאפשרת הקצאה של דרישות פונקציונליות לאלמנטים של המערכת. ההחלטה על הצרכים, המאפיינים והקשרים ביניהם מתבצעת בדרך כלל במסגרת סדנת QFD עם משתתפים רבים המייצגים את כלל בעלי העניין בפרויקט.

מרכיב מרכזי בשיטה הוא בית האיכות (HOQ - House of Quality). בית האיכות מאפשר לדון ולהציג את הקשרים בין צורכי הלקוחות ומאפייני המוצר. תוצרי בית האיכות הם העדפות הצרכים של הלקוחות מול מוצרי הייחוס, חשיבות יחסית של המאפיינים הטכניים וערכי יעד לפיתוח המוצר. לצורך הדוגמה של מדיח הכלים, בטבלה הבאה מובאים כמה מאפיינים של מוצרי ייחוס רלוונטיים.

מוצר ייחוס א'	מוצר ייחוס ב'	מוצר ייחוס ג'	
סימני לכלוך קלים ב-1 מתוך 10 שטיפות, נדרשת שטיפה של שאריות מזון	שטיפה נקיה ב-99% מהמקרים, נדרשת שטיפה של שאריות מזון	שטיפה נקיה ב-99% מהמקרים, אין צורך בשטיפה של שאריות מזון	<b>איכותי בשטיפה</b>
150 דקות בתוכנית חסכונית	30 דקות בתוכנית חסכונית	100 דקות בתוכנית חסכונית	<b>מהיר</b>
3 תוכניות הדחה, הגדרה ידנית	5 תוכניות הפעלה, הגדרה ידנית	7 תוכניות הפעלה, הגדרה ידנית	<b>נוח להפעלה</b>
1.5 קו"ט ר-15 ליטר מים להדחה בתוכנית חסכונית	3 קו"ט ר-15 ליטר מים להדחה בתוכנית חסכונית	1.5 קו"ט ר-22 ליטר מים להדחה בתוכנית חסכונית	<b>חסכוני בהפעלה</b>
3,000 שקלים	2,000 שקלים	2,500 שקלים	<b>מחיר ממוצע לצרכן</b>
אפשרות לשירות טכני מרחוק (IoT)		זיהוי אוטומטי של מדף ריק (לחיסכון במים)	<b>הערות</b>

טבלת מאפיינים עבור מוצרי ייחוס לפרויקט פיתוח מדיח כלים

לעיתים יש צורך ליצור רשימות ערכים בפרמטרים איכותניים או מורכבים. על בסיס נתוני מוצרי הייחוס בדוגמה של המדיח נקבעו ארבע רמות איכות בשטיפה:

- שטיפה נקייה ב-99% מהמקרים ללא צורך לשטוף את הכלים משאריות מזון לפני ההדחה (מוצר ייחוס ג');
- שטיפה נקייה ב-99% מהמקרים עם צורך לשטוף את הכלים משאריות מזון לפני ההדחה (מוצר ייחוס ב');
- שטיפה נקייה ב-90% מהמקרים ללא צורך לשטוף את הכלים משאריות מזון לפני ההדחה;
- שטיפה נקייה ב-90% מהמקרים עם צורך לשטוף את הכלים משאריות מזון לפני ההדחה (מוצר ייחוס א').

גיבוש רשימת המאפיינים מסתמך על הידע ההנדסי של מהנדס המערכות. מאפיינים נפוצים כוללים דרישות פונקציונליות, דרישות למרכיבי המערכת, אילוצי תכן, עמידה בתנאים חיצוניים, נושאי תמיכה ואחזקה ועוד. צרכים של הלקוח עשויים לקבל מענה במאפיין טכני יחיד.

בה בעת עשויים להידרש מספר מאפיינים טכניים עבור מימוש צורך או תרחיש יחיד. חשוב שהמאפיינים אלו יהיו טכניים במהותם ויציינו מידות, משקלים, דיוקים וזמנים.

מונחים איכותיים ניתן למפות לרמות ביצועים, למשל אוטומטי, למחצה וידני. על המאפיינים לבטא את הצורך ללא קשר לפתרונות הטכניים.

אין צורך להכניס לניתוח מאפיינים שאין לגביהם בחירה לאור אילוצים, למשל הוראות של גופים ממשלתיים, חוקים ותקנות או עקב התאמה פונקציונלית נתונה מראש (למשל מהירות מעבד מינימלית לעמידה ביכולת חישוב מסוימת).

ניתן ורצוי להוסיף מאפיינים שמשפיעים על התכן על סמך ידע וניסיון הנדסי, גם אם הם אינם נובעים באופן מפורש מהצרכים. המאפיין "נפח מועיל של המדיח", למשל, לא הוזכר בתרחישי השימוש, בצרכים או בטבלת מוצרי הייחוס. עם זאת, אם מאפיין זה מהותי להבחנה בין גישות שונות לפתרון, ניתן להכניס אותו לרשימה. בית האיכות הוא טבלה המסייעת לקביעת פרמטרי תכן על בסיס הצרכים ובהשוואה למוצרי ייחוס.

הצעד הראשון ביצירת בית האיכות הוא יצירת טבלה שבה התרחישים והדרישות מהמוצר או המערכת מופיעים בשורות האופקיות והמאפיינים והתכונות הטכניות מופיעים בראש העמודות. הקשר בין כל דרישה לכל מאפיין יצוין במשבצות המטריצה בעיגול עם נקודה, עיגול ריק או משולש בהתאם להשפעה שיש לקביעת ערך המאפיין על המענה לצורך, דרישה או תרחיש, כפי שמופיע באיור הבא:

- קביעת ערך המאפיין משפיעה בצורה **חזקה** על המענה לצורך
- קביעת ערך המאפיין משפיעה בצורה **בינונית** על המענה לצורך
- △ קביעת ערך המאפיין משפיעה בצורה **חלשה** על המענה לצורך

דוגמה למטריצת הקשרים בין הצרכים למאפיינים מובאת באיור הבא:

קו"ט להדחה	כמות מים להדחה	נפח מועיל	אופן הפעלה	משך ההדחה	רמת הניקיון	חשיבות (מתוך 100%)
△	○				●	40%
○	○	△		●	●	30%
			●	△	○	10%
●	●	●			○	20%

בית האיכות (HOQ) מטריצת הקשרים בין צרכים למאפיינים

בדוגמה זו, לפרמטר של רמת הניקיון יש השפעה חזקה על צרכים של איכות השטיפה ומשך ההדחה והשפעה בינונית על קלות להפעלה וצורך בחיסכון במים ובחשמל. הסיבה לכך שרמת הניקיון משפיעה על קלות ההפעלה, היא בגלל נושא שטיפת הכלים משאריות המזון לפני ההדחה.

מקובל לוודא שלכל מאפיין יש קשר חזק עם לפחות אחד הצרכים, כלומר שיש לפחות עיגול עם נקודה אחד בכל עמודה. אחרת כנראה שהמאפיין אינו קשור בקשר משמעותי עם אף אחד מהצרכים, ולכן ניתן לוותר עליו. כן מקובל לוודא שלכל צורך יש קשר חזק עם אחד המאפיינים, כלומר שיש לפחות עיגול אחד עם נקודה בכל שורה. אם אין המצב כך, כנראה שהמאפיין הרלוונטי לצורך אינו מופיע ברשימת המאפיינים, ויש לבדוק האם נדרש להוסיף אותו. לחילופין, ייתכן שהצורך אינו משמעותי מספיק או מנוסח בצורה בעייתית ונדרש לעדכנו. בצד ימין של רשימת הפרמטרים נוספת עמודה של הערכת ביצועים של מוצרי הייחוס בהתאם לכל אחד מהצרכים. מדובר בהערכה של איכות המענה בסולם של 1 (מענה מצוין) עד 5 (מענה חלש).

כעת ניתן לבצע הערכה כמותית של החשיבות היחסית של המאפיינים. לצורך החישוב, קשר חזק (עיגול עם נקודה) מחושב כ-9, קשר בינוני (עיגול ריק) מחושב כ-3 ומשולש מחושב כ-1. בשורת החשיבות הגולמית בעמודה של כל מאפיין מופיע סכום המכפלות של רמת הקשר בין המאפיין לצורך בחשיבות היחסית של הצורך. למשל המאפיין 'משך ההדחה' קשור בקשר חזק (9) לצורך 'מהיר' (חשיבות יחסית 30) ובקשר חלש (1) לצורך 'נוח להפעלה' (חשיבות יחסית 10). לכן החשיבות הגולמית של המאפיין תהיה כך:  $10 \times 1 + 9 \times 30 = 280$ . החשיבות היחסית של המאפיינים מחושבת על-ידי חלוקת החשיבות הגולמית של כל מאפיין בסכום החשיבות הגולמית בכל העמודות. לאחר מילוי עמודות החשיבות היחסית בבית האיכות ממלאים בטבלה את ערכי המאפיינים של מוצרי הייחוס. לבסוף, קובעים את ערכי היעד של המאפיינים.

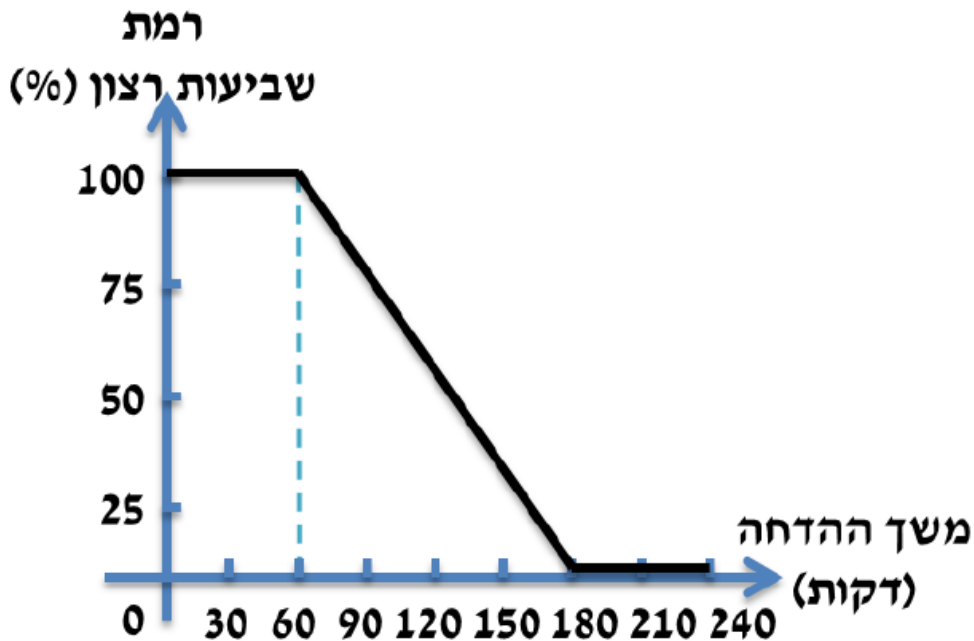
	חשיבות (מתוך 100%)	רמת הניקיון	משך ההדחה	אופן הפעלה	נפח מועיל	כמות מים להדחה	קו"ט להדחה	הערכת מוצרי הייחוס
								5 4 3 2 1
איכותי בשטיפה	40%	●				○	△	■ ★ ◇
מהיר	30%	●	●		△	○	○	■ ★ ◇
נוח להפעלה	10%	○	△	●				■ ★ ◇
חסכוני בהפעלה	20%	○			●	●	●	■ ★ ◇
חשיבות גולמית		720	280	90	210	390	310	■ מוצר ייחוס א'
חשיבות יחסית	36%	14%	4.5%	10.5%	19.5%	15.5%		★ מוצר ייחוס ב'
מוצר ייחוס א'		4	150	3 תוכי'	35	15	1.5	◇ מוצר ייחוס ג'
מוצר ייחוס ב'		2	30	5 תוכי'	20	15	3	
מוצר ייחוס ג'		1	100	7 תוכי'	30	22	1.5	
ערכי יעד		1	45	אוט'	30	15	1.5	
יחידת מידה		רשימה	דקות	-	צלחות	ליטר	קו"ט	

בית האיכות לפרויקט מדיח כלים

קביעת ערכי היעד היא משימה חשובה שנסמכת על ידע הנדסי ועל פרמטרים כלכליים, שיווקיים ועסקיים. מאפייני הפתרון מוגדרים לעיתים קרובות בהתאם למוצרי הייחוס, אך אין מניעה שערכי היעד בחלק מהפרמטרים לא יהיו הטובים ביותר מבין מוצרי הייחוס, אלא יאפשרו פיתוח של מוצר אמין ונוח במחיר תחרותי. דוגמה לכך היא ערך היעד עבור משך ההדחה שנקבע ל-45 דקות.

מדובר ביעד שאיננו הטוב ביותר מבין מוצרי הייחוס. המיומנות של מהנדס המערכות באה כאן לידי ביטוי בקביעת ערך יעד מציאותי מבחינה טכנולוגית, מתאים לפיתוח וייצור בלוחות הזמנים של הפרויקט ורלוונטי מבחינת התאמה לצרכים ולרצונות של המשתמשים והלקוחות. אולם ייתכן שתופיע טכנולוגיה חדשה שבגללה ניתן יהיה לקבוע מאפיין בערך שונה מהותית מהערכים של כל המתחרים. לדוגמה, ערך היעד של אופן ההפעלה נקבע לאוטומטי, בעוד שהמוצרים של כל המתחרים מופעלים באופן ידני.

פונקציית הערך היא כלי העשוי לסייע בקביעת פרמטרי היעד. הפונקציה מתארת את הערך עבור הלקוח עבור רצף של ערכי יעד. הגיבוש של פונקציית הערך נדרש להיעשות באמצעות סקר שוק, ריאיונות עם צרכנים, השוואה עם מוצרי ייחוס וידע וניסיון הנדסי.



דוגמה לפונקציית הערך - משך ההדחה

בדוגמה שבאיור נראה שיש תחום התחלתי שבו שביעות הרצון היא מלאה. כלומר, צמצום משך ההדחה מתחת ל-60 דקות לא יעלה את שביעות הרצון ועל כן אינו נדרש. כמו כן יש תחום מעל 180 דקות שבו הצרכן אינו מוכן לקבל את המוצר ורמת שביעות הרצון באזור זה היא 0%.

אין הכרח לקבוע את כל הפרמטרים לרמת שביעות רצון של 100%. ייתכן שיהיו פרמטרים שבהם כלל אין אפשרות לשביעות רצון מלאה, כמו לדוגמה משך הטיפול אצל רופא שיניים. המטרה היא לקבוע תמהיל של ערכים שיניב בסך הכול מוצר אטרקטיבי לצרכן ושיענה על הצורך. אנו מציגים את פונקציית הערך עבור כל מאפיין בנפרד אך ברור שיש משקל ומשמעות לקורלציה בין המאפיינים. לדוגמה, רכב שמאיץ מ-0 ל-100 קמ"ש ב-3 שניות יהיה אטרקטיבי יותר מרכב שעושה זאת ב-10 שניות.

עם זאת, אם נניח שהמשמעות של מאפיין זה היא שני מקומות ישיבה בלבד (כמקובל ברכב ספורט), יכול להיות שהאטרקטיביות הכללית תרד ל-0 עבור רוכש מסוים, לדוגמה בעל משפחה עם ילדים.

### מרעיון למערכת: תכן קונספטואלי

**תכן קונספטואלי** הוא תהליך שבו מפתח או מאפיין המערכת בונה תפיסה (קונספט) של המערכת העתידית. הקונספט נבנה בהתאם לצרכים, לדרישות ולרצונות של הלקוחות והמשתמשים. הקונספט מתבסס גם על היכולות הטכנולוגיות הזמינות והמכלולים הרלוונטיים. התוצר של תכן קונספטואלי הוא ארכיטקטורה מערכתית: הגדרה עקרונית (קונספטואלית) של המערכת, תכונותיה ואופן פעולתה. **ארכיטקטורה מערכתית** היא תכן ברמת-על, המדגיש את הערטילאי על פני הפרטני (מודולי תוכנה וחומרה, תזמונים מדויקים ועוד). התכן הקונספטואלי מבוצע מוקדם בתהליך התכן, כאשר חלק מהפרטים על המערכת

ושימושיה אינם ידועים.

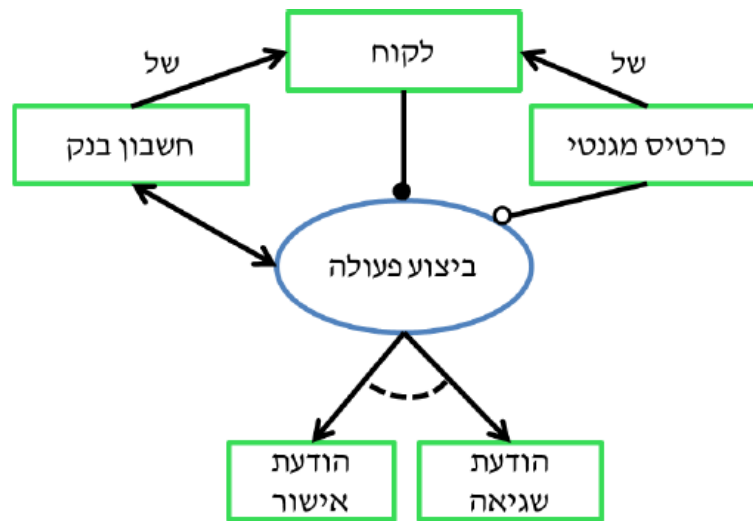
החלטה ארכיטקטונית היא הבחירה, למשל בין חלופות הנעה לרכב: מנוע בנזין, הנעה חשמלית או אחרת. מאפיינים חשובים של הפתרון נקבעים בעצם הבחירה בארכיטקטורה. לדוגמה, הבחירה במנוע בנזין מחייבת תכנון של מערכת הולכת הדלק, מיקום מכל ופתח מילוי ועוד - דברים שעובדים אחרת לגמרי במנוע הנעה חשמלית. בה בעת בשלב זה אין התייחסות לפרמטרים טכניים של הפתרון. לדוגמה, מפרט הסוללה החשמלי לרכב, מנגנון ההטענה וחיווי הבדיקה והבקרה טרם הוגדרו ויקבלו מענה בשלבים מאוחרים יותר של התכן. דוגמאות להחלטות ארכיטקטוניות נוספות:

1. שיטת גילוי אנשים ורכבים בפרויקט בקרת שטח: מכ"ם בוהה, מכ"ם סורק או מצלמה תרמית;
2. אופן נטרול טילים נגד טנקים: מיירט הלם, רסס או לייזר;
3. שיטת פרסום מועדפת: רדיו, טלוויזיה, אינטרנט.

### כלים למידול קונספטואלי

בדומה לניתוח הצורך, מידול קונספטואלי יכול להיעשות בדרכים שונות, החל מאיורים ושרטוטים בלתי פורמליים, כדוגמת מפות מושגים (Concept maps), ועד שיטות מידול מובנות. פגשנו כמה דוגמאות למודלי SysML בפרק ניתוח הצורך, וניתן להשתמש בשיטה זו גם למידול קונספטואלי של הפתרון. שיטה נוספת היא מתודולוגיית עצמים-תהליכים - OPM (Object - Process Methodology).

דוגמה לתרשים OPM בסיסי מובאת באיור הבא:



תרשים OPM לתהליך משיכת מזומן בכספומט (תרשים חלקי)

תרשים זה מתאר חלק מתהליך משיכת כסף בכספומט. בתהליך זה ביצוע הפעולה מול חשבון הבנק נעשה על-ידי הלקוח באמצעות כרטיס מגנטי ומייצר הודעת אישור או הודעת שגיאה. כל תרשים OPM מלווה בתיאור טקסטואלי בשפת עצמים-תהליכים OPL (Object Process Language). כיום, תוכנות העריכה של תרשימי OPM מחוללת את הטקסט באנגלית.

**תרשים  $n^2$**  - מתאר קשרים בין מרכיבי המערכת (חלקים פיזיים) או בין פונקציות המערכת (חלקים לוגיים). התרשים עשוי לשמש בשלבי התכן הקונספטואלי כדי להראות את יחסי הגומלין בין מכלולים או פונקציות ולאפשר ביצוע שינויים במערכת כדי לצמצם את התלות ההדדית. התרשים בנוי בצורת מטריצה שמידותיה

כמספר המכלולים או הפונקציות שנדרש לתאר. מכלולים או פונקציות אלו מרכיבים את אלכסון המטריצה. הריבועים מעל ומתחת לאלכסון כוללים תיאור של הממשק בין כל מכלול למשנהו בחלוקה לממשקי קלט (מעל האלכסון הראשי) וממשקי פלט (מתחת האלכסון הראשי).

דוגמה לתרשים N<sup>2</sup> עבור מערכת עם 10 פונקציות מובאת באיור הבא:

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
F1		F1->F2	F1->F3							
F2			F2->F3	F2->F4		F2->F6				
F3		F3->F2								
F4			F4->F3							
F5	F5->F1	F5->F2	F5->F3	F5->F4		F5->F6		F5->F8		F5->F10
F6				F6->F4	F6->F5		F6->F7		F6->F9	
F7		F7->F2								
F8	F8->F1			F8->F4						
F9	F9->F1					F9->F6				
F10		F10->F2								

דוגמה לתרשים N<sup>2</sup>

התרשים מאפשר להתרשם בצורה קלה ומהירה מהיקף הצימודים בין רכיבי המערכת. עיקרון המודולריות בתכן מערכות מנחה להפריד בין מכלולים בלתי קשורים ובין צמד מרכיבים. מיפוי הממשקים באמצעות תרשים N<sup>2</sup> מאפשר לקבץ מכלולים ליחידה פיזית או פונקציונלית אחת ולשנות תכן כדי להפריד בין יחידות בעלות צימוד רופף. לדוגמה, באיור הקודם ניתן להבחין בצימוד הדוק בין F1, F2, F3 שבא לידי ביטוי בריבוי הקשרים ביניהם. דוגמה נוספת לתרשים N<sup>2</sup> עבור מחשב שולחני מובאת באיור הבא. האיור מדגים את הכיווניות של הקשרים. לדוגמה, המסך מקבל קלט לוגי מהמעבד ואינו מזין את המעבד בקלט. העכבר והמקלדת מקבלים הזנה מהמעבד באמצעות ממשק USB ומעבירים אליו אותות לוגיים חזרה. ניתן כמובן להתרשם מהמקום המרכזי של המעבד במערכת המחשב שמעביר קלט לכלל המכלולים.

	מעבד	מסך	מקלדת	עכבר	סביבה
מעבד		לוגי (HDMI)	הזנה (USB)	הזנה (USB)	לוגי (רשת)
מסך					
מקלדת	לוגי (USB)				
עכבר	לוגי (USB)				
סביבה	הזנה (V220), לוגי (רשת)	הזנה (V220)			

תרשים N<sup>2</sup> עבור מחשב שולחני



## הרחבה: תכן קונספטואלי עם מתודולוגיית עצמים-תהליכים (OPM)/דב דורי,<sup>21</sup> חנן כהן<sup>22</sup>

פיתוחים רבים במדע ובהנדסה מתחילים בשרבוט רעיונות ראשוניים על מפית או על פיסת נייר. בעבר נהגו ממצאים להתחיל מסקיצה בסיסית כזו ולפתח אותה בהדרגה עד לקבלת שרטוט מפורט. כיום, מאחר שתכן הנדסי ותכנון בכלל מתרחשים בספירה הדיגיטלית ומשלבים חומרה, תוכנה, בני אדם ורגולציות למיניהן, גובר הצורך בתכנון קונספטואלי מקיף. מטרת תכנון זה - להבהיר את מבנה המערכת ואת התנהגותה כך שתספק את התועלת הצפויה מפיתוחה. לפיכך השלב הראשון של הנדסת מערכות מבוססת מודל<sup>23</sup> הוא מידול קונספטואלי של המערכת, המוצר או השירות החדש.

תכן קונספטואלי הוא שלב ייחודי בתהליך הפיתוח. מצד אחד זהו שלב מוקדם שבו אי הוודאות היא גדולה, דבר עדיין לא נקבע, מרחב הפתרונות גדול, ויש אפשרויות רבות לקביעת הארכיטקטורה שתוביל למימוש המערכת. מן הצד האחר החלטות שנקבעות בשלב זה קשה מאוד לשנות אחר כך, ואם אין מתחשבים בכל תהליך העבודה, תרחישי השימוש, הפונקציונליות והממשקים העתידיים - אפשר לקבל מערכת שמחטיאה מהותית את צורכי הלקוחות. לכן שלב זה, המתבצע לאחר הגדרת הדרישות, הוא שלב קריטי שיש להקדיש לו תשומת לב רבה ולהשקיע בו משאבי חשיבה ותכנון שיחסכו בעיות רבות בהמשך הדרך.

בשנים האחרונות מתרחב השימוש בשפה ייעודית למידול קונספטואלי - OPM (Object-Process Methodology). מתודולוגיית עצמים-תהליכים היא גישה הוליסטית לניתוח מערכות ולפיתוחן, המשלבת את היבטי תפקוד, מבנה והתנהגות של המערכת במודל יחיד, ויזואלי וטקסטואלי במקביל. המודל מורכב מקבוצה קשורה במבנה של עץ תרשימי עצמים-תהליכים ובמקביל מטקסט בשפת OPL (Object-Process Language), שהיא תת-קבוצה של אנגלית טבעית או של כל שפה טבעית אחרת. משפט OPL נוצר אוטומטית ושקול במדויק למבנה ספציפי ב-OPD. משנת 2015 OPM הוא תקן בינלאומי ISO19450.


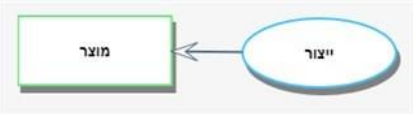

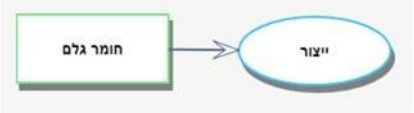

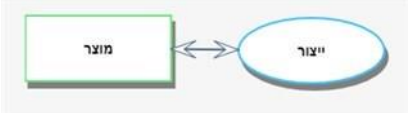
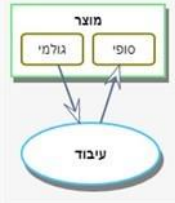
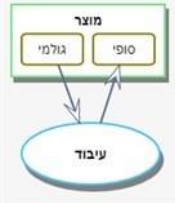

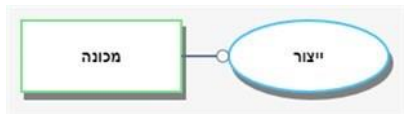

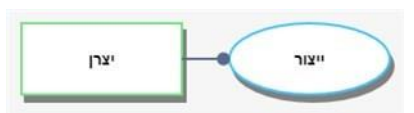
מתודולוגיית OPM אינה רק שפה למידול אלא, כשמה כן היא, גם מתודולוגיה. כך למשל, כאשר ניגשים למדל (להפוך למודל) מערכת פתרון לבעיה, לא מתחילים במידול הפתרון מייד, אלא קודם כל מגדירים את הקריטריונים לפתרון מוצלח. בוחרים לפחות שלושה פתרונות מסוגים שונים ואחרי מידול שלהם בוחנים אותם אל מול הקריטריונים להצלחה שקבענו עוד לפני פיתוח הפתרונות. כל זה על-מנת שלא ייווצר מצב של בחירת הפתרון מראש, שאינו מתאים. לדוגמה, אם הבעיה היא שימור מזון, נקבע קריטריונים של "אורך זמן השימור", "עלות השימור" או קריטריונים נחוצים אחרים, כמו שטח אחסון. פתרון אחד לבעיה שהגדרנו יהיה קירור, פתרון שני יהיה שימור במלח, ופתרון שלישי יהיה חומרים משמרים. אם נגדיר את הבעיה "שיהיה מזון זמין" ולא דווקא "שימור המזון", ניתן יהיה אף להגדיר פתרון אחר, כמו ייבוא מזון.

מודל OPM מבטא את הארכיטקטורה של המערכת ברמות פירוט שונות, החל במבט ממעוף הציפור ועד לפרטי פרטים. ניתן אף לבצע סימולציה חזותית של המודל כדי לבחון את פעולת המערכת ולוודא את תקינותה הלוגית כבר בשלב ראשוני זה, שבו מתורגמות הדרישות מן המערכת בדרך להפיכתה למוצר ממשי. השיטה מבוססת על העיקרון שלפיו אפשר לבנות מודל של כל מערכת שהיא, בכל תחום ובכל רמת מורכבות, על בסיס מספר מצומצם של אבני בניין: עצמים בעלי מצבים ותהליכים שיוצרים או משנים את מצבי העצמים. בשיטה זאת עצמים מתקיימים לאורך זמן, ואילו תהליכים משנים את מצב העצמים.

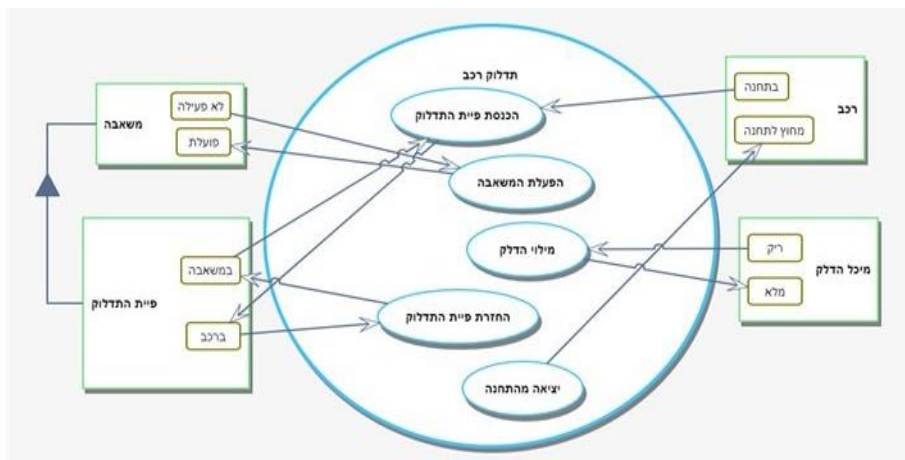
<sup>21</sup> פרופ' דב דורי הוא ראש המעבדה למידול מערכות בפקולטה להנדסת תעשייה וניהול בטכניון ופרופסור אורח ב-MIT. המציא ופיתח את שיטת OPM למידול קונספטואלי וניתוח מערכות.

<sup>22</sup> חנן כהן הוא דוקטורנט, חבר צוות מחקר במעבדה למידול מערכות בפקולטה להנדסת תעשייה וניהול בטכניון.

<sup>23</sup> הנדסת מערכות מבוססת מודלים היא שימוש מובנה במודלים כדי לתמוך בדרישות המערכת, תכנון, ניתוח, אימות ותיקוף החל משלב התכנון הקונספטואלי והמשך לאורך כל שלבי הפיתוח ומחזור החיים (הגדרה לפי INCOSE).

תיאור	סימן גרפי	דוגמה
<b>קשר יצירה</b> מציין הפקת אובייקט שלא היה קיים קודם לכן.		
<b>קשר צריכה</b> מציין חיסול אובייקט שחדל להתקיים עם תחילת התהליך		
<b>קשר השפעה</b> מציין שינוי של מצב האובייקט על-ידי התהליך ללא פירוט מצב המוצא והיעד.		
<b>זוג קשרי קלט/פלט</b> מציין שינוי של מצב האובייקט על-ידי התהליך עם פירוט מצב המוצא והיעד.		
<b>קשר כלי</b> האובייקט הוא אמצעי הנדרש לביצוע התהליך אך הוא אינו עובר התמרה.		
<b>קשר סוכן</b> האובייקט הוא מפעיל/סוכן אנושי הנדרש לביצוע התהליך אך הוא אינו עובר התמרה.		

קשרים תהליכיים בשפת OPM



תהליך תדלוק רכב - תרשים OPM

## השקילות בין טקסט למודל

למודל OPM יש שני אופני ייצוג שקילים: האחד הוא גרפי והשני לשוני. האופן הגרפי מתבטא בקבוצה של תרשימי עצמים-תהליכים (OPDs - Object Process Diagrams). כללי התחביר הגרפי של OPD מנתיבים את הדרכים הנכונות והעקביות שבהן ניתן לקשור ישויות (דברים - עצמים, תהליכים ומצבים), ולכל סוג קשר כזה יש סמנטיקה חד-משמעית. אופן הייצוג הלשוני של מודל OPM הוא Object Process Language (OPL). שפת OPL, המוגדרת על-ידי דקדוק נטול הקשר, משרתת שתי מטרות משלימות: האחת היא הבנת המערכת באמצעות תת-קבוצה של שפה טבעית על-ידי בני אדם המעורבים בפיתוח המערכת או המוצר, והשנייה היא עיבוד מחשב באמצעות שפה פורמלית. כשפה טבעית, OPL היא תת-שפה של אנגלית או כל שפה טבעית אחרת, עם אילוצים מסוימים המאפשרים פורמליות. לכן היא מאפשרת למומחי תוכן (נציגי הלקוח) ולמהנדסי מערכות לתקשר ולשתף פעולה בניתוח ותכנון מערכות. כל מבנה OPD ניתן לביטוי על-ידי משפט או פסקה ב-OPL. כשפה פורמלית OPL מאפשרת יצירה אוטומטית, מונחית כללי מיפוי, יישומים או ממשקים ליישומים. תכונה זו הופכת את מודל ה-OPM למערכת חיה המשפיעה על כלל מערכות הארגון ומושפעת מהן. לדוגמה, באיור הקודם מודגם מודל של תהליך תדלוק מכונית. תת-התהליך של מילוי דלק משנה את מצב מכל הדלק מריק למלא. המשפט שהתוכנה יוצרת באופן אוטומטי הוא זה:

תהליך מילוי הדלק משנה את מצב מכל הדלק מריק למלא. כמובן שאוטומטית נוצרים משפטים רבים המבטאים את התרשים בשפת OPL. משפטים אלו יכולים להוות בסיס פורמלי לתקשורת בין בעלי העניין בפרויקט.



## 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 אנרגיה (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.

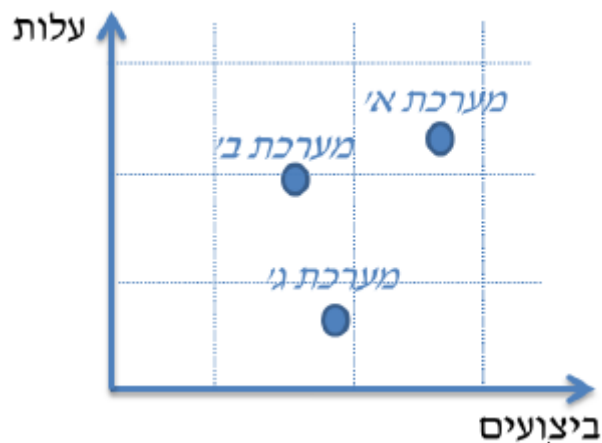
להנדסת מערכות יש משקל רב בכל רמה מערכתית: ברמת המכלול של הטלפון החכם, ברמת הטלפון החכם עצמו או ברמת מערכת שירותי התקשורת. בכל שלב מתבצע תיחום של המערכת והגדרה של הביצועים בהתאם לדרישות. שילוב מערכתי של המכלולים מרכיב את המערכת שיכולה להשתלב כאבן בניין ברמה הגבוהה יותר. מהות התפקיד של מהנדס המערכות היא 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.



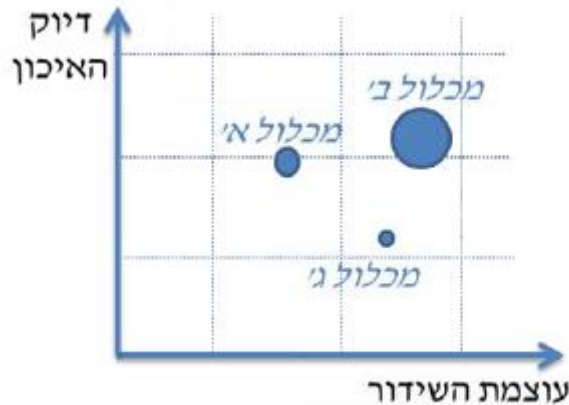
בתהליך הניתוח מלמעלה למטה מתחילים מהגדרת הצורך המבצעי, ובהתייחס למערכות הגנה צורך אפשרי הוא "מעבר רכב קרבי משוריין בסביבה רוויית טילים נגד טנקים". הצורך אמור להיות מוגדר במושגים המנותקים מהפתרון. אם הצורך מנוסח כך, יאפשר הניסוח בחינה של כמה גישות מלבד מערכת הגנה, כמו שיפור יכולות המודיעין והאש. אולם 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.



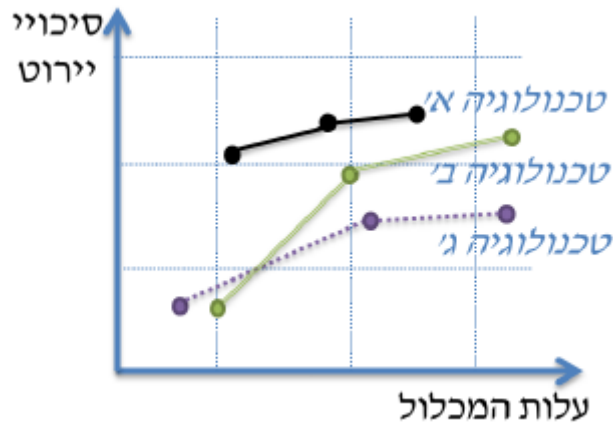
מפת דרכים: תרשים עלות מול ביצועים

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 PUGH<sup>24</sup>

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.

<sup>24</sup> הטבלה נקראת על שם ממציאה, Stuart Pugh.

דוגמה לטבלת הערכה בין חלופות מופיעה להלן:

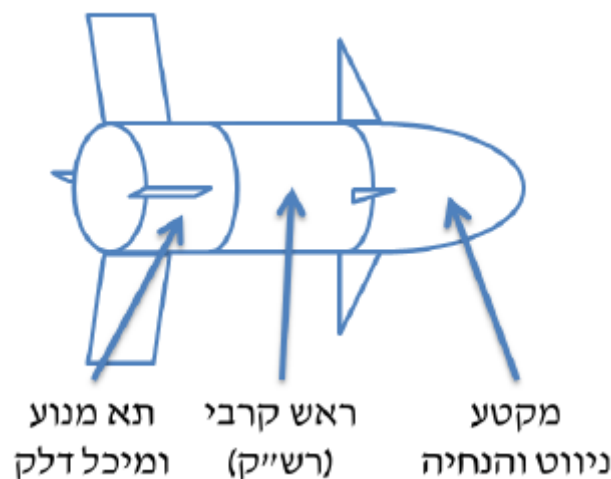
פתרונות				משקל	מאפיין
...	פתרון ג'	פתרון ב'	פתרון א'		
				30%	ביצועים
				20%	לוחות זמנים
				...	עלות
				...	סיכונים
				...	...
					סיכום הערכה
					הערות נוספות

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 נייד 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

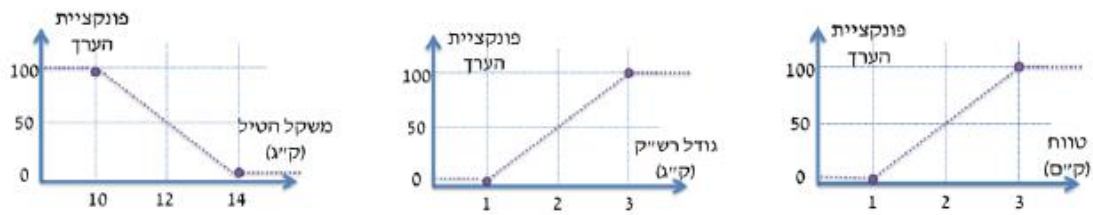
העבודה עם טבלת PUGH אינה מסתיימת בבחירת החלופה שקיבלה את הציון הגבוה ביותר. הניתוחים ההנדסיים והתצוגות משמשים לדיון ולהערכה של החלופות. מתחיל תהליך חשיבה שמטרתו מיזוג פתרונות מיטביים. התהליך מיועד לעידון הקונספט ושילוב אלמנטים מקונספטים אחרים היכולים לשפר אותו. לבסוף, לאחר גיבוש החלופה הנבחרת, מבוצע 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 הראל<sup>25</sup>

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:<sup>26</sup> "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

<sup>25</sup> 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.

<sup>26</sup> 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 חלקי 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 מערכות<sup>27</sup> היא אסטרטגיה לשיפור אמינות המערכת באמצעות הפחתת הזמן שהמערכת אינה זמינה בעת ביצוע אחזקה שגרתית או אחזקת שבר.

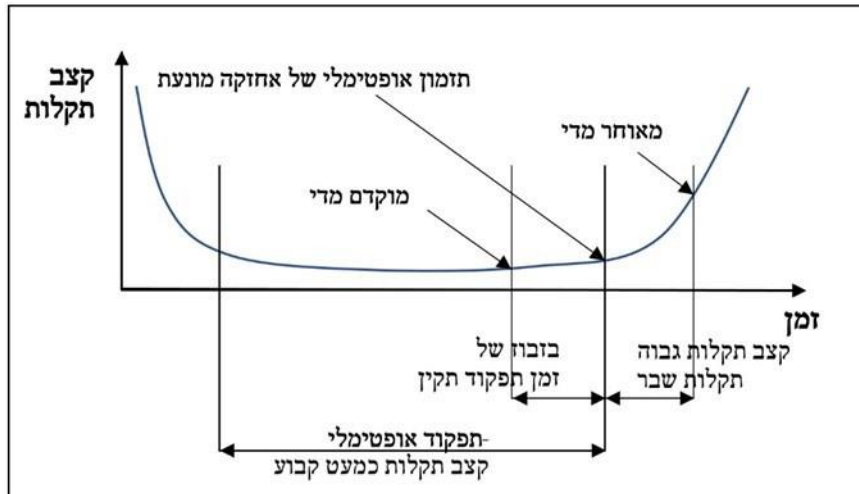
מערכות מתוכננות היטב כוללות שימוש יעיל בחיישנים (למשל חיישנים למדידה של זרימת אוויר, רטט, טמפרטורה, צמיגות) ויכולות תמיכה משולבות המבוססות על ניתוח, על-מנת לקבוע או לחזות את הצורך בפעולות אחזקה הנדרשות למניעת כשל.

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.

<sup>27</sup> SE Handbook, 4<sup>th</sup> 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.



## אפיון הפתרון ומימושו

האפיון המערכתי הוא השלב הסופי של תהליך ייזום והיערכות למימוש הפרויקט. האופיון מתאר את החלופה שנבחרה למימוש לאחר ניתוח הצורך ובחינת מרחב החלופות האפשריות.

הכנת האופיון המערכתי והעבודה מולו הן אחת המשימות המרכזיות של מהנדס המערכות. אפיון מערכתי מגדיר את הביצועים של המערכת, תצורתה ואופן פעולתה, לצד נושאים כמו בטיחות, אחזקה ועוד, שנדרשים להיות משולבים היטב בתהליכי התכן והנדסת המערכות. באפיון מערכתי יש תחומי ידע רבים שמהנדס המערכות נדרש להתייחס אליהם: אמינות, אבטחת מידע, איכות הסביבה, חיים בצוותא, בטיחות, אחזקה, זמינות ותחומים רבים נוספים.

מהנדס המערכות איננו בהכרח מומחה תוכן או מתמצא בכל אחד מנושאים אלו. אולם נושאים אלו הם חשובים להצלחה של המערכת, לא פחות מהדרישות הפונקציונליות. האתגר הגדול של מהנדס המערכות הוא בשילוב עבודה של מומחים רבים בהתאם לתחומי אחריותם. התוצר הסופי נדרש להיות אפיון מערכתי ברור, תמציתי ועקבי שיאפשר לקבל מוצר המתאים לדרישות ובאיכות גבוהה.

### מסמכי הפרויקט

מסמכי הפרויקט, או מסמכי ההתקשרות, שונים במבנה ומתכונת בין תחומים שונים. באופן עקרוני הם כוללים את המסמכים האלה:

1. החוזה או מסמך ההזמנה מגדיר נושאים משפטיים וכספיים, כמו תנאי תשלום, אופן התשלום, ביטחונות, הצמדות וכדומה;
2. האפיון המערכתי מגדיר את ה"איך", כלומר את הדרישות המערכתיות והאופן שבו המערכת תבצע את משימתה: הביצועים הנדרשים של המוצר;
3. מסמך תכולת עבודה - מגדיר את ה"מה" וה"מת": כמויות, מועדי אספקה, תהליך הפיתוח, אבני דרך ועוד.

נהוג שההזמנה או החוזה קובעים את התכולות המרכזיות ומפנים להרחבה למסמכי אפיון. המסמכים מופיעים לעיל על-פי סדר הקדימות הנפוץ למקרה של סתירה ביניהם. בדרך כלל החוזה הוא בעל הקדימות הגבוהה ביותר ומסמך תכולת עבודה - sow - הוא האחרון בסדר הקדימות.

### תהליך הכנת האופיון

תהליך של אפיון מערכתי, בוודאי עבור מערכת מורכבת או מערכת של מערכות, הוא משימה מורכבת. נושא מרכזי בהכנת אפיון הוא הבנה של הצורך והדרישות המערכתיות בהתאם לסביבת ההפעלה ולדרישות בעלי עניין. לצד זאת נדרש להגדיר היטב את הביצועים של המערכת ואופן בדיקתם, אך לא פחות חשוב מכך, את כלל הנושאים הנלווים - זמינות, אמינות, אמצעים לאחזקה ולאיוונים ועוד.

לפיכך יש להתייחס לכתיבת האופיון כאל פרויקט בפני עצמו. היעד בפרויקט כתיבת האופיון הוא מסמך מקיף ואיכותי. אבות הטיפוס הם הטיוטות להתייחסות. אבני הדרך על-פי לוחות הזמנים הם, למשל דיוני סטאטוס והצגה לבכירים. מלבד שעות העבודה של מהנדס המערכות לעיתים נדרש גם תקציב ממשי למשימה, בעיקר אם האפיון נעשה בשילוב מומחים חיצוניים.

אפשר להסתכל על מסמך האפיון המערכתי כעל מוצר בפני עצמו. האפיון כולל הגדרה מקיפה של מוצרים

או שירותים לפיתוח או רכש. מכאן שאפיון מובנה, מקיף, ממוקד ואיכותי הוא הכרחי לתכן של מוצר המביא את הערך הדרוש ללקוח. לדוגמה, פעמים רבות משרדי ממשלה, ארגונים ביטחוניים וגם חברות פרטיות מפתחים ומייצרים המערכות נדרשות באמצעות ספקים חיצוניים. אם האפיון לא יתאר היטב את הנדרש מהמערכת - המערכת שמפותחת בחברה חיצונית כנראה לא תתאים לייעודה.

אפשר להמשיך את האנלוגיה של האפיון המערכתי למוצר באמצעות סקירת מחזור החיים שלהם. בתהליך הפיתוח מוצר נהוג להבחין בשלבים של הגדרת דרישות, תכן, ייצור, בחינה ואחזקה. גם באפיון מערכתי מתקיימים שלבים דומים. למשל שלבי התכן והייצור בהקשר למסמך האפיון הם שלבי החשיבה, ההיערכות והכתיבה. שלב הבחינה הוא תהליך אישור המסמך ווידוא עמידה בכל הדרישות של בעלי העניין השונים. שלב האחזקה הוא שלב השינויים וההתאמות של מסמך האפיון לפני הפרויקט ובמהלכו, כתוצאה משינויי דרישות או אילוצים טכניים.

מומלץ להתחיל את האפיון המערכתי מדף חלק או מתבנית ריקה, ולא על בסיס אפיון קודם או חומרי רקע. רק לאחר שמגבשים באופן ראשוני את הדרישות הפונקציונליות המרכזיות ומבנה עקרוני, ניתן לשלב חומר קיים, לרכז נושאי מעטפת ועוד.

הדרך ההפוכה - "דרך הקיצור" שהיא התחלה מאפיון דומה או קודם וביצוע שינויים והתאמות - עשויה להתגלות בסופו של דבר כדרך ארוכה יותר שגם לא תביא לתוצר הרצוי. אפיון מערכתי נעשה הרבה פעמים למערכות השונות מהותית מהקיים, ואלמלא כן לא היה צורך בכתיבת מסמכים חדשים. אם מתחילים ממסמך קיים, רב הפיתוי לשנות מעט ככל האפשר ולהיצמד להגדרות ישנות ולמבנה הישן של המערכת. זאת דרך בטוחה לאבד בסופו של דבר חלק מהיכולות הנדרשות במערכת החדשה. במקרים רבים אם מתחילים מאפיון ישן, מזהים את הבעיה בשלב כלשהו במהלך העבודה, ואז מתחילים מ"דף חלק", אך כבר לאחר שהושקעו זמן ומאמץ לחינם.

הכנת אפיון למערכת שאינה טריוויאלית מחייבת ריכוז של כלל החומר הזמין והתייעצות עם גורמים מקצועיים רבים. כאמור, אפיון המערכת כולל נושאים מגוונים שאינם בהכרח בתחום ההתמחות הספציפי של מהנדס המערכות. לכן חשוב להתייחס לכל ההיבטים במידת האפשר על בסיס חומר מקצועי עדכני ומומחי תוכן לנושא. מלבד נישות מקצועיות ספציפיות בתחומי ביצועים ותכונות, כמו סייבר, חומרים וכדומה, הדבר אמור גם לנושאי "מעטפת", כמו בטיחות, בדיקתיות וכדומה.

### אופיון ביצועים מול מפרט טכני

קיימות שתי גישות עקרוניות להגדרת מערכות: אופיון ביצועים מול מפרט טכני (באנגלית: Build to Spec vs. Build to Print).

**אופיון ביצועים** מגדיר את הביצועים שנדרשים מהמערכת ולא את הפתרון הטכני. במקרה כזה האחריות לפיתוח המערכת ועמידתה במשימות שהוגדרו באופיון, מוטלת על הספק.

**מפרט טכני**, לעומת זאת, כולל הגדרה מדויקת של השרטוטים והדגמים הנדרשים. במקרה זה כל עוד המוצר עומד במה שהוגדר במפרט, מוטלת האחריות לתקינות ולשמישות של המערכת על הלקוח שפיתח את המוצר והעביר את מפרטי הייצור לספק.

אופיון ביצועים אינו כולל פרטים טכניים שהספק יפתחם ויגדירם בשלב המימוש. בפרויקטי פיתוח נחוץ לרוב שהספק יקבל את האחריות המלאה לתכן ולעמידה של המערכת הסופית במתאר הפעולה הנדרש, ולכן עיקר האופיון הוא על בסיס ביצועים. בה בעת אם לא מגדירים במדויק, למשל את דגם המחשב, אלא מגדירים את הביצועים הנדרשים וממדי המארז - פרטים המתארים את מתאר הפעולה, האחסנה ועוד - מקבלים



דגמים ומידות שונים ממה שהתכוונו. לכן אם נדרש ציוד מסוג מסוים ומפורש, למשל לצורך תאימות עם מערכות קיימות מאותו סוג ודגם, יש להגדירו בצורה מפורשת (מפרט טכני) ולא באמצעות אופיון ביצועים.

### **מכשולים באפיון - אפיון יתר ואפיון חסר**

שתי מכשולות גדולות הקיימות בכתובת האופיון הן אפיון יתר ואפיון חסר. אפיון יתר כולל מספר רב של פרטים טכניים ואינו מאפשר פתרונות שונים ויעילים יותר. אפיון יתר מוביל לאופיון מקיף וסבוכה המתבטא בסופו של דבר גם במוצר יקר ומסורבל. סיכון נוסף בדרישות רבות ומפורטות הוא הצורך בשמירה על עקביות הדרישות מול השינויים באופיון לאורך הזמן. יש לשים לב שאפיון יתר אינו דומה להגדרת דרישות שאפתניות או אתגריות, והוא יכול להופיע גם בדרישות לרכש מוצרים פשוטים ויומיומיים.

אפיון חסר אינו כולל פרטים ואילוצים חיוניים לפעולת המערכת. פשטות היא ערך חשוב שעשוי להוזיל את המוצר, אך לא על חשבון אי מיצוי דרישות ומאפיינים. במונח אפיון חסר אין כוונה לציין שהדרישות הן "חלשות" או נמוכות ממה שאפשר להשיג.

### **מהי דרישה טובה?**

דרישה טובה היא דרישה המובנת היטב לקורא האופיון, והבנתו הולמת באופן מלא את כוונת הכותב. יש כמה מקורות המגדירים את המצופה מדרישה טובה. אחד מהם הוא תקן iso-iec-ieee-29148:2011 שמגדיר בסעיף 5.2.5 מאפיינים של דרישות טובות. בטבלה להלן נביא פירוט לנושא עם התאמות, עדכונים ודוגמאות למערכות באופן כללי:

מס'	מאפייני דרישה טובה	תיאור
1.	מדויקת מול צורך	מתארת מאפיין או גודל שנגזר מהמשימות או התרחישים שהמערכת צריכה לקיים. לדוגמה: "האפליקציה תאפשר קבלת התרעה על אירוע חירום ברדיוס של 300 מטר מהמכשיר".
2.	ברת בדיקה ואימות	הדרישה תהיה מנוסחת כך שניתן יהיה לבדוק האם המערכת עומדת בה או מקיימת את המבוקש בניסוי, הדגמה, אנליזה או בחינה. לדוגמה: "הטיל יפגע באזור בגודל של 1x1 מ' ממרחק 3 ק"מ בהסתברות של 90%".
3.	מוגדרת היטב	<p>הדרישה תוגדר חדמשמעית כאחת מאלה:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. דרישת סף מחייבת;</li> <li>2. דרישת MUST (חייבת באישור לקוח במקרה של חריגה);</li> <li>3. דרישה אופציונלית (בקשה בגדר NICE TO HAVE);</li> <li>4. תיאור, רציונל, הסבר.</li> </ol> <p>לדוגמה:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. (תיאור): המארזים מיועדים לאחסון ואיסוף ציוד.</li> <li>2. (דרישה מחייבת): המארז ייוצר בישראל.</li> <li>3. (דרישת MUST): מספר המארזים לא יעלה על 4.</li> <li>4. (דרישה אופציונלית) בעדיפות - מספר המארזים לא יעלה על 3.</li> </ol>
4.	מנוסחת היטב	מובעת בניסוח החלטי בגוף שלישי בזמן עתיד. לדוגמה: "המערכת תחשב YYY".
5.	חדערכית	<p>דרישה אחת בכל משפט. לדוגמה:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. "המערכת תורכב משלושה מכלולים.</li> <li>2. שלושת המכלולים של המערכת יעמדו בגשם לפי מפרט xxx.</li> <li>3. שלושת המכלולים של המערכת יעמדו בפרופיל נסיעה לפי מפרט YYY".</li> </ol>
6.	חדמשמעית	<p>לא ניתנת לפרשנות ולא משתמעת לשתי פנים. לדוגמה:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. "המערכת תעמוד בתקני הנדסת אנוש xxx".</li> <li>2. "ההסתברות לתקלה קטסטרופלית במערכת תהיה נמוכה מ-1 ל-10<sup>6</sup>".</li> </ol>
7.	עקבית	אינה סותרת דרישות אחרות במסמך.
8.	כמותית	כוללת פרמטר מספרי שמולו ניתן לבצע את התכן והאימות. לדוגמה: "המבנה יכיל חדר הרצאות עם 40 כיסאות. הכיסאות יסודרו ב-4 שורות של 10 כיסאות בכל שורה". (בהמשך יופיע פירוט דקדקני לכלל הפרטים הרלוונטיים).
9.	שלמה	כוללת את כל הפרטים הנדרשים. לדוגמה: "הגובה הכולל של המערכת (מבסיס הזחל עד קצה האנטנה) יהיה 1.80 מ'".

כדי להבין טוב יותר כיצד לנסח דרישות טובות, חשוב ללמוד לזהות ולנתח דרישות שאינן מתאימות לקריטריונים. להלן דוגמאות לדרישות בניסוח טעון שיפור עם הסברים לטעויות בהגדרת הדרישה:

מס'	דוגמאות לדרישות לקויות	הסבר לטעויות בהגדרת הדרישה
1.	"על החברה לעמוד בתקני איכות פנימיים"	מיותר מול חברה שממילא אמורה לעמוד בתקנים של עצמה, גם בלי שהלקוח יכתוב לה זאת. מיותר עוד יותר בשלב המכרז, כאשר לא ברור מה תהיה החברה ומהם הנהלים בה.
2.	"המערכת תהיה בטיחותית לשימוש"	לא ניתן לבדיקה. האם הכוונה לשימוש על-ידי מפעיל מיומן או אולי על-ידי כל עובר אורח? מה זמן ההכשרה? מה קריטריון הבטיחות?
3.	"המערכת תתוכנן למינימום סיבוכיות"	כנראה שאין הרבה מערכות שמתוכננות בכוונה תחילה להיות מורכבות או מסובכות. מאחר שהסיבוכיות אינה מוגדרת, הספק יוכל לטעון שלשיטתו המערכת פשוטה ביותר ולהתעלם מהדרישה.
4.	"המכלול יהיה תואם לתקני הנדסת אנוש מקובלים"	כותב האופיון כנראה אינו בקי בתקני הנדסת אנוש ומנסה להעביר את הטיפול בנושא לספק. לאיזה חלק במערכת מתייחסים? מהם התקנים האמורים?
5.	"למוצר נדרש אישור לבטיחות פעולה באתר הרס"	בטיחות באתר הרס אינה מוגדרת היטב, ובין היתר לא ידוע על מעבדה המוסמכת באופן ייעודי לנושא. האם הסכנה היא נפילה, התחשמלות או סכנה אחרת?
6.	"יש להשתמש בפרוטוקול סטנדרטי".	חברות רבות משתמשות בפרוטוקולים סטנדרטיים או מקובלים מבחינתן שהם פנימיים או חסויים, כלומר אינם מפורטים ואינם נגישים. מהם הפרוטוקולים הסטנדרטיים מבחינת כותב האופיון?
7.	"המערכת תופעל בצורה פשוטה וקלה"	קשה למצוא ספק שמתכנן מערכת להפעלה מסובכת וקשה. ניסוח חליפי לדוגמה: "ההפעלה תהיה באמצעות 2 פעולות לכל היותר", "המערכת תופעל באמצעות מסך מגע", "התפריטים יהיו בעברית".

לאחר סיום כתיבת האופיון, יש כמה שאלות מנחות שיעזרו להעריך את איכות המסמך ובהירותו. אם התשובה לאחת השאלות היא חיובית, נדרש לעדכן את המסמך ובמידת הצורך חלקים נוספים הקשורים לאותה דרישה. השאלות הן אלה:

1. האם המערכת שאופיינה מתאימה לדרישות הלקוח?
2. האם האפיון מכיל את כל המידע הנדרש לספק?
3. האם ניתן לבדוק את כל הדרישות?
4. האם יש דרישות המגבילות את מרחב הפתרונות?

5. האם כל הדרישות הן הכרחיות?
6. האם יש דרישות הפוגעות באמינות או באחזקת המערכת? האם דרישות אלו נחוצות?
7. האם יש סתירות בדרישות?

## אפיון מערכתי - מבנה ותכנים

קיימות כמה תצורות לאפיון מערכתי. בפרויקטים קטנים או בשוק הפרטי אפשר לפגוש אפיונים מינימליים, אפילו של 3 עד 5 עמודים. לעיתים מסמכים אלו כוללים בתוכם גם את החוזה ואת ה-SOW. באותה מידה במסמכי אפיון של מערכות מורכבות רק תוכן העניינים, הקדמות, תיאורים ותקצירים יכולים להתפרס על עשרות עמודים והאופיון בפני עצמו יכול להיות מחולק למסמכים רבים. המבנה הכללי של האופיון שאנו מציגים כאן מבוסס בין היתר על תקן MIL-STD 961E ומתודולוגיית החטיבה הטכנולוגית ליבשה בצה"ל (חט"ל). המבנה העיקרי כולל שישה פרקים ראשיים, ואלה הם:

1. פרק כללי;
2. הגדרות ומסמכים ישימים;
3. דרישות טכניות;
4. דרישות אימות ביצועים;
5. דרישות למסירת המערכת;
6. הערות.

הנושאים המרכזיים המטופלים באפיון המערכתי הם נושאי דרישות ביצועים ואימות של המערכת (פרקים 3 ו-4). לפני פרקים אלו מופיעים נושאי רקע והקשרים נדרשים לצורך הדיון במערכת (פרקים 1 ו-2). לאחר הפרקים המרכזיים מצויים נושאי מסירה של המערכת והערות כלליות (פרקים 5 ו-6). להלן נביא תיאור קצר של נושאים מרכזיים בפרקים השונים. בתיאור להלן אין כוונה לנתח לעומק את כלל ההיבטים הרלוונטיים לכל סוג מערכת. קרוב לוודאי שאפיון של מערכת מורכבת ידרוש הרחבה בהיבטים רבים שלא התייחסנו אליהם. בנוסף, כל תחום או סעיף הוא מקום לידע וניסיון ארוך שנים ואין הכוונה למצות כאן את הדיון על הנושאים השונים. מטרת ההצגה היא סקירת עיקרי התחומים המדוברים בהקשר לשאר סעיפי האופיון ומתן הנחיות מעשיות לדרישות רלוונטיות.

## פרק כללי

בפרק זה מובא תקציר מנהלים המציג את המידע הנדרש להבנת הצורך בפרויקט ועקרונות המוצר הנדרש. זהו פרק חשוב להגדרה ולמיקוד המערכת. לעיתים זהו פרק שמגיע לבעלי עניין בכירים, ולכן והתיאור בו נדרש להיות תמציתי וממוקד.

התיאור מתחיל בדרך כלל בהצגת רקע, מצב קיים, ניתוח הבעיה והפער המערכתי שבגינו נדרש הפיתוח או הרכש. לאחר מכן מוצג ייעוד המערכת ואופן פעולתה בסביבה המבצעית או מול תרחישים עיקריים. לאחר מכן מגיע שלב של תמצית פרטים מערכתיים מרכזיים ותתי-מערכות על-פי הצורך. לבסוף מוצגים פרטים או שיקולים נוספים היכולים להיות רלוונטיים עבור המערכת ומקבלי החלטות. למילים יש כוח רב, ולכן התיאור צריך להיות ממוקד ומובחן. לדוגמה, להלן שני קטעים מתוך תקצירים

העוסקים בנושא תחבורה עתידית הכוללים תיאור רקע, התייחסות למצב קיים והפער המערכתי שהמערכת מיועדת למלא.

1. נפח התחבורה העולה בשנים האחרונות אינו מאפשר עוד שימוש ברכב מאויש בתצורה המוכרת. המערכת מהווה אמצעי נידות אוטונומי, אישי, קומפקטי ובטיחותי בעלות שתאפשר תפוצה רחבה.
2. מערך התחבורה הקיים הוא בלתי יעיל - רוב הזמן הרכבים אינם בשימוש וחונים ליד הבית או בעבודה. המערכת מאפשרת אוטומציה גלובאלית של מערך התחבורה והקטנה של שטח החנייה הנדרש על בסיס אפליקציית שיתוף רכבים, ללא צורך בשינוי כלשהו ברכבים הקיימים.

כפי שנראה משתי הפסקאות מעלה, משפט או שניים מספיקים כדי להציג בצורה מובנת ותכליתית את המערכת. אולם התיחום הניתן לפרויקט הוא שונה לגמרי בשני התיאורים. בסך הכול כמה עשרות מילים מכוונות את המערכת למקומות שונים מאוד: בפסקה הראשונה מדובר על אמצעי פיזי לניוד מתקדם ובפסקה השנייה מדובר על אפליקציה.

תיאור ממצה וקצר של המערכת ניתן לעשות בשלושה חלקים בדומה למודלים לכתובה מדעית.<sup>28</sup> כל חלק עשוי לכלול משפט או שניים בהתאם לצורך:

1. **תיאור הרקע או המצב הקיים** תוך הדגשת חשיבות הנושא או פרטים על המערכות והשיטות הקיימות;
  2. **תיאור הפער או הצורך במערכת לעיתים תוך השוואה למצב הקיים**;
  3. **הגדרת תפקיד המערכת והמצב החדש** - אופן מילוי הפער או יכולות מרכזיות. דוגמה לתיאור מערכת מידע לטכנאים לפי מודל זה:
1. ביצוע פעולות אחזקה מחייב דיווח על בסיס טופס מובנה, עבודה בהתאם לנהלי בדיקה ושימוש במידע טכני, ספרות וקטלוגים;
  2. הדיווחים כיום מבוצעים באופן ידני ואינם מאפשרים בקרה יעילה; המידע הטכני אינו זמין כיום לאנשי האחזקה בתנאי שדה, דבר המוביל, בין היתר, להחלפות שווא של מכלולים;
  3. נדרש לפתח מערכת תמיכת ביצועים באחזקה שתאפשר מילוי ממוחשב של טפסי טיפול בסמוך לכלי ויסייעו לטכנאים באיתור תקלות לצד מימוש המעקב אחר זמינות אמצעי הלחימה.

## הגדרות ומסמכים ישימים

### הגדרות וקיצורים

בפרק זה מובאות הגדרות למונחים וראשי תיבות שמשמשים בהם במסמך. למרות מיקומו בתחילת מסמך האופיון, זה פרק שמוסיפים אותו לקראת סיום הכתיבה (בדומה לתוכן העניינים). הפרק אמור לסייע למקבל האופיון (כלומר, ספק או יצרן), להבין מושגים וקיצורים שייתכן שהם מובנים מאליהם בחברה או בארגון האחראי על האופיון.

בפרק זה יש להגדיר רק קיצורים ומונחים המופיעים במסמך. יש להימנע מהגדרה של מושגים מובנים מאליהם. כמו בכל המסמך, גם בהגדרות ראוי להימנע במידת האפשר משימוש בראשי תיבות. למעט מקרים חריגים, חלק זה אינו אמור להיות ארוך מעמוד אחד. יש לסדר את המונחים והקיצורים על-פי סדר הא"ב.

<sup>28</sup> John M. Swales, *Genre Analysis: English in Academic and Research Settings*, Cambridge UP, 1990

על-פי הצורך ניתן להפריד את הפירוט לשתי רשימות - באנגלית ובעברית.

**מסמכים ישימים** - מסמכים קיימים שהאופיון המערכתי מפנה אליהם, אך הם אינם נכללים בו. נהוג לחלק את הרשימה למסמכים פנימיים, מסמכים חיצוניים ותקנים.

**מסמכים פנימיים** - מקורם במפעל, בחברה או במשרד של כותב האופיון. דוגמאות למסמכים רלוונטיים הם נהלי הבטחת איכות ותהליכי בחינה, אופיונים משלימים של מכלולים, תתי-מערכות ועוד.

**מסמכים חיצוניים** - מקורם הוא מחוץ לארגון שאליו משתייך האחראי על כתיבת האופיון ואינם מוכרים כתקן.

**תקנים ("סטנדרטים")** - מפרטים או שיטות מקובלים שמסתמכים עליהם לצורך אחידות, נוחות או מכורח תקנה או חוק. דוגמאות לתקנים ידועים בתחומי מערכות צבאיות הם MIL-STD 810E (תקן לבדיקות תנאי סביבה) ו-MIL-STD 461C (תקן לתאימות אלקטרו מגנטית). כמובן שקיימים תקנים טכניים רבים כמעט בכל תחום, הנכתבים על-ידי ארגונים כמו ISO, IEEE ואחרים.

אומנם פרק המסמכים הישימים נראה פשוט מאוד, אך קל מאוד גם לטעות בו, והטעות תהיה בולטת מאוד לעין. להלן נפרט כמה שגיאות אופייניות בנושא מסמכים ישימים וההפניה אליהם מהאופיון:

**חוסר היכרות עם המסמכים:** לפעמים קיימת נטייה לבצע העתקה של החומר ממסמכי אפיון קודמים והדבקה ללא בדיקה. לעיתים מציינים בתחילת הכתיבה מספר רב של מסמכים ישימים כדי לא לשכוח חומר היכול להיות רלוונטי, ואין חוזרים לאחור מכן כדי לוודא סגירות מול תוכן המסמך העדכני. לפעמים רושמים את כל המסמכים הידועים כדי "שהמסמך יראה מקצועי" או "שהספק יחשוב שאנחנו מקצועיים".

אין זה נדיר למצוא אופיונים לרכב ממוגן שמפנים לפרופיל נסיעה של טנקים ושיטות בדיקה של מזגנים ביתיים... קורא המסמך אינו יכול להיות מודע לכוונות הכותב ולגלגולים שעבר המסמך. הקורא מניח שלכאורה המסמך נכתב ונבדק היטב, וכולל מסמכים ישימים משמעותיים ורבי ערך. הכלל הוא פשוט מאוד: אם לא קראת את המסמך הישים - אל תשלבם באופיון. אופיון הכולל שגיאה גסה במסמכים ישימים הוא לכל הפחות מביך ובוודאי אינו נראה מקצועי.

**ציון מסמכים שאין אליהם הפניה מהאופיון:** אם אין הפניה למסמך בגוף האופיון - המסמך אינו נכלל בדרישות, ולכן הוא מיותר. הדבר מעיד על חוסר תשומת לב של כותב האופיון או על שימוש בתבנית לא רלוונטית.

**הפניה שאינה מפורטת למסמכים ישימים:** ההפניה למסמך בגוף האופיון נדרשת להיות ממוקדת לסעיף מסוים. דוגמה להפניה ממוקדת: "בדיקת אטימות תבוצע על-פי MIL-STD 810E Method XXX, משך הבדיקה - YYY". במקרים נדירים יכולה להיות הפניה כללית למסמך, כמו עמידה בתקן איכות על-פי ISO 9000:2008. במקרים אלו המסמך הישים עצמו נדרש לכלול פירוט של קריטריונים לתאימות, כלומר אופני האימות והבדיקה לוודא שהמערכת, המכלול או הרכיב תואמים למסמך או התקן. בהיעדר קריטריון תאימות במסמך הישים נדרשת הפניה מפורטת.

**מסמך ישים שלא ניתן להעביר לספקים:** מסמכים ישימים הם חלק בלתי נפרד מהאופיון ונדרשים להיות מועברים לספקים יחד איתו. לפיכך, אין לציין או להסתמך על מסמכים פנימיים, מסווגים, שאינם זמינים או שלא ניתן להעביר לספקים מסיבה אחרת.

אם מציינים מסמך ברשימת המסמכים הישימים, יש להקפיד לציין את המספר המזהה, המהדורה המחייבת ותאריך הפצת המסמך. כאמור, יש לשלב מסמכים נדרשים בלבד, אשר כותב האופיון מודע היטב לתוכנם ונושא אחריות על הרלוונטיות שלהם לשימוש הספציפי במערכת.

אם נדרשת התייחסות לחלק מהמסמך בלבד, מומלץ לפרטו ולהפנות אליו. אם נדרשת התייחסות לכמות מזערית של מידע מתוך המסמך, מומלץ פשוט לגזור את הדרישות הספציפיות לתוך האופיון ולחסוך מהספק נבירה מיותרת בערימות מסמכים שאין כוונה או צורך להשתמש בהם.

## דרישות טכניות

### הנדסת דרישות

חלק מרכזי בעבודת מהנדס המערכות הוא יצירת אופיונים ומפרטים טכניים. עריכה של מסמך דרישות נראית פשוטה במבט ראשון. לכאורה נדרש בסך הכול ליצור תיאור ברור של הפונקציה והמאפיינים הנדרשים מהמערכת, המוצר או השירות מבוקש. עם זאת, בתהליך האפיון מגיעים מהר מאוד לתיאור של עשרות ומאות פרטים טכניים ואחרים, מצבי הפעלה, ממשקים ועוד. תיאור תפקיד המערכת והרכיבים מתברר עד מהרה כמורכב ביותר, באופן ששמירה על ראייה מערכתית ברורה לצד הימנעות מסתירות הופכת להיות אתגר אמיתי.

עם התקדמות העבודה, בעקבות הערות מעמיתים, מנהלים או לקוחות, השינויים נכנסים באופן בלתי נמנע למסמך ברמות שונות, החל מתצורה ורכיבים ברמה גבוהה וכלה ביחידות מדידה, משקלים ועוד. שינויים אלה משפיעים על תנאי הקבלה ותוכנית הבדיקה, מחייבים הוספה של דרישות חדשות או הסרה של כמה תיאורים ישנים. לפעמים יש מצבים שהפרויקט מוקפא זמנית, ולאחר מכן העבודה עליו מתחדשת. מסמך יכול להיבדק על-ידי עמית עם סגנון אישי וראייה שונה שיבואו לידי ביטוי בשינויים ובהערות. שינויים בלתי נמנעים אלה בטקסט משאירים מעט סיכוי למסמך להישאר עקבי ומדויק.

כתיבה של מסמכים טכניים ועריכתם באופן שיטתי ומובנה מחייבת התייחסות כאילו המסמך עצמו היה מוצר או מערכת. כשמתחילים לעבוד על מערכת, נדרש לציין תחילה את "סיבת הקיום" שלה - המטרה העיקרית של בנייתה. אם מדובר על מסמך, נדרש להגדיר עבורו את ההיקף, המטרה, היעדים, בעלי העניין ואת התועלת הצפויה או הערך עבור כל בעל עניין, לעיתים בהתייחס לחומר קודם רלוונטי.

לאחר סיום שלב הגדרת המסמך, התהליך הבא הוא תכנון המסמך, המקדים את שלב הביצוע - כלומר שלב הכתיבה עצמה. בעולם של מסמכים טכניים התוצאה של שלב זה היא טיוטת המסמך הטכני. האם הטיוטה ערוכה היטב, מתאימה ורלוונטית? זה המקום שבו בדיקת המסמך ממלאת תפקיד חשוב. הבדיקה מאפשרת לבדוק את הטיוטה מול התכנון הראשוני.

בשלבם מאוחרים יותר אחזקה של מסמך טכני לאורך זמן דומה לאחזקה של מערכת. המסמך הטכני צריך לכלול עדכונים הנובעים מדרישות משתנות, יכולות חדשות נדרשות וטכנולוגיות חדשות. אלו דורשים שינוי מתמיד של המוצר (המסמך), וכתוצאה מכך שינוי של התכנון.

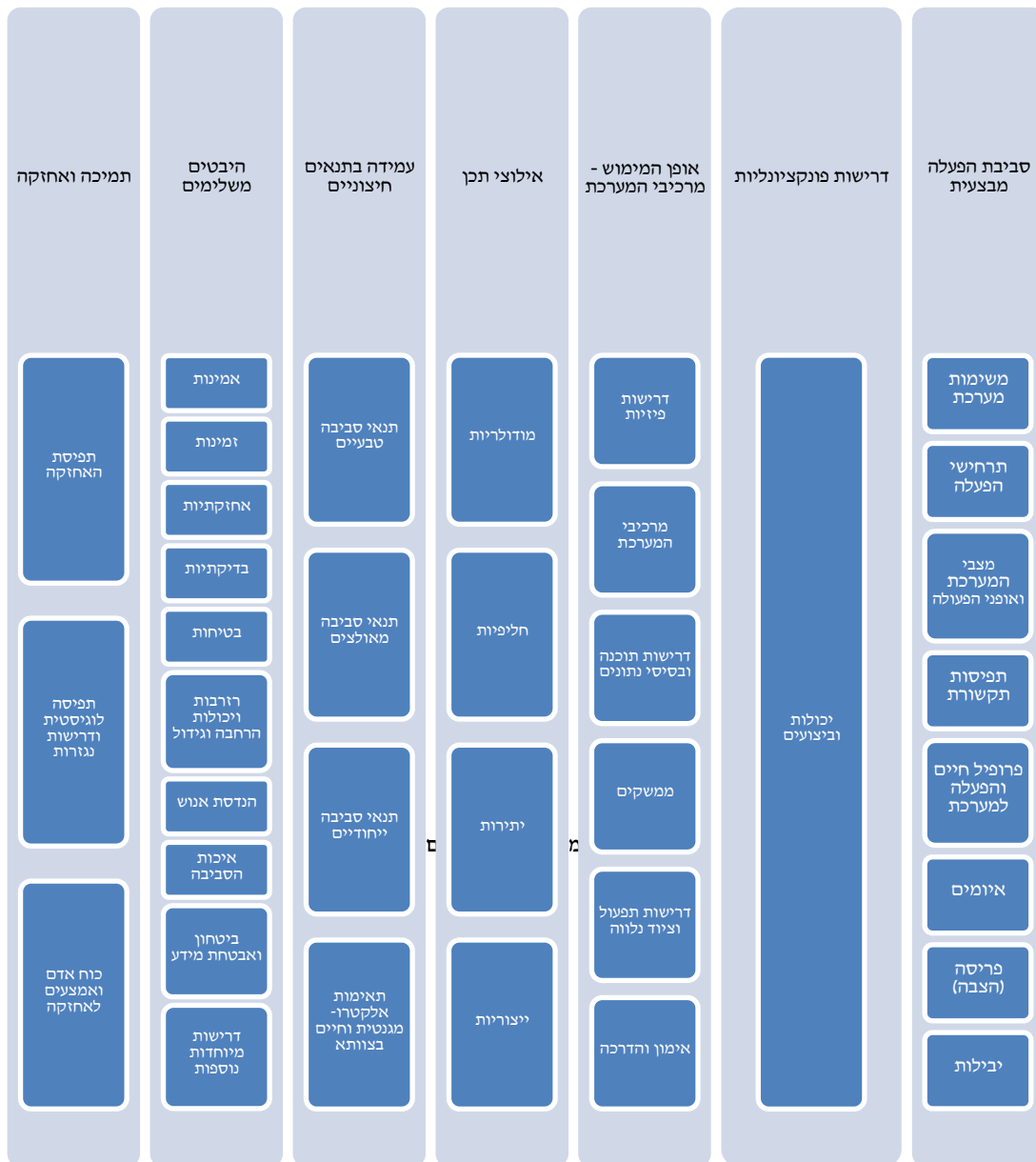
### היכר סעיפי הדרישות

הגדרה של כל מערכת, ובוודאי של מערכת מורכבת, דורשת פירוט של מספר רב של דרישות, מאפיינים ונושאים. בדרך כלל בוחרים להתחיל את הצגת הדרישות בנושאים הנוגעים לסביבה המבצעית ולצורך. לאחר מכן ממשיכים אל הפתרון והמאפיינים השונים שלו. לבסוף מוצגים נושאי מעטפת שמשלימים את האפיון. בהמשך לרציונל לעיל וכדי להקל על המיקוד, הדרישות חולקו לשבע קבוצות עיקריות. סעיפי הדרישות הטכניות מובאים בהתאם לסעיפים מתוך התקן MIL-STD 961E ומתודולוגיית החטיבה הטכנולוגית ליבשה בצה"ל (חט"ל), עם התאמות והרחבות על-פי הצורך.

להלן שבע הקבוצות העיקריות של הדרישות:

1. סביבת הפעלה מבצעית;
2. דרישות פונקציונליות;
3. אופן המימוש - מרכיבי המערכת;
4. אילוצי תכן;
5. עמידה בתנאים חיצוניים;
6. היבטים משלימים;
7. תמיכה ואחזקה.

הקבוצות העיקריות של הדרישות הן קבועות יחסית ומופיעות באפיונים רבים, אם כי לעיתים בסדר שונה. באיור הבא נביא מיפוי של נושאים מרכזיים הקשורים לדרישות אלו. לאחר מכן נתאר באופן פרטני את הנושאים הנדרשים בכל אחד מתחומי האפיון הספציפיים.





## סביבת הפעלה מבצעית

### משימות המערכת

משימות המערכת הם המענה של המערכת לצרכים של המשתמש, כלומר פעולות ויעדים שהמערכת מכוונת לעמוד בהם ולשם מילויים היא נוצרה. מלבד הייעוד המרכזי, משימות המערכת כוללות בדרך כלל מגוון רחב של נושאים קשורים המרחיבים את התיאור שמהם ניתן לגזור דרישות לתכן. לדוגמה, המשימה המרכזית עבור מערכת תצפית עשויה להיות העברת חוזי איכותי לטווח מסוים ביום ובלילה. משימות משלימות של מערכת תצפית יכולות לכלול הכוונת ציון לייזר של מטרות, גילוי תנועה או מיפוי שטח.

### תרחישי הפעלה

תרחישי הפעלה נגזרים מתפיסת ההפעלה (Concept of operations). תפיסת ההפעלה היא תכנון ברמת-על של האופן שבו המוצר או המערכת יפעלו בסביבתם המיועדת למילוי הצרכים של הקוחות. תפיסת ההפעלה מתוארת בדרך כלל כרצף של תהליכים לאורך זמן.

תרחישי הפעלה הם רצף של פעולות או מצבים שבהם מתרחשת אינטראקציה בין המערכת לסביבתה, בדרך כלל בשילוב המפעיל או המשתמש ובהקשר ליעד או המשימה של המערכת. תרחישי הפעלה מאפשרים להציג את הפונקציונליות של המערכת כולה בסביבה המיועדת לה. מכאן נובעת חשיבות תרחישי השימוש ככלי מרכזי לתקשורת בין לקוחות, משתמשים ומתכננים. במידה וקיימות תצורות מערכת שונות או שימושים שונים למערכת, יש לספק תרחישי הפעלה המבוססים על כל התצורות או השימושים.

### מצבי המערכת ואופני הפעולה

מצבי המערכת הם הגדרות לתפקודים מובחנים של המערכת והאינטראקציה שלה עם סביבתה לצורך ביצוע המשימה ולאורך מחזור החיים. מצבי היסוד של מערכת אופיינית הם: אחסנה, אחזקה, אימונים, הובלה, הכנה לפעולה, הפעלה (כולל התארגנות, נסיעה, הפעלה, חזרה לאחסנה). דוגמאות נוספות למצבי פעולה הן: אוטומטי, ידני, ביצועים מלאים וביצועים מופחתים בעת תקלה.

אחד ממצבי המערכת הנפוצים שקל "לפספס" הוא מצב סרק - IDLE. במצב זה המערכת נמצאת בהיכון וממתנה לאות הפעלה. אם ניקח כדוגמה מערכת גדר התרעה אלקטרונית, נראה כי המערכת נמצאת בשלב זה רוב זמן החיים. התרעה בעת אירוע חדירה, שהיא ייעודה המרכזי, מופעלת רק לעיתים נדירות. מכאן נובעת החשיבות של אפיון פעולת המערכת בתרחיש שימוש זה ובחינתה. בהקשר לגדר התרעה - למשל עמידות בתנאי סביבה של גשם ורוח, אמינות, בדיקות ועוד.

דוגמה למערכת נוספת עם מרכיב מהותי של מצב IDLE היא מערכת "מעיל רוח". "מעיל רוח" היא מערכת הגנה אקטיבית לרק"ם המיירטת איומים הנורים לעברה. בעבר דווח לפחות על מקרה אחד<sup>29</sup> שבו המערכת יצאה ממצב IDLE באופן שגוי ו"..." זיהתה נגמ"ש של גולני כגורם עוין - וחומר נפץ נפלט מהטנק והתפוצץ בשטח פתוח".

אופני הפעולה מתארים את התהליכים המרכיבים את התפקוד של המערכת, ובדרך כלל התיאור מופיע בחלוקה למצבי המערכת השונים. החלוקה בין מצב מערכת ואופן הפעולה אינה חד-משמעית וניתנת להגדרה על-פי התפיסה של מאפיין המערכת. לדוגמה, אופני הפעולה עבור מערכת הגנה מפני טילים במצב מבצעי עשויים להיות גילוי, עקיבה, שיערוך, העברת מידע למכלול היירוט ועוד. אולם חלק מאופני פעולה אלו עשויים להיות מוגדרים כמצבי מערכת בפני עצמם, ואז עומק הפירוט יגדל בהתאם.

<sup>29</sup> <http://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-4439221,00.html>. אוחר ב-11/10/13.

בסעיף מצבי המערכת ואופני הפעולה חשוב להגדיר את התנאים למעברים בין המצבים ואופני הפעולה. מומלץ לחזור מעת לעת לסעיף זה במהלך כתיבת האופיון ולוודא שכלל הדרישות שנגזרות ממצבים ואופני הפעולה שולבו במסמך. כל צמד של מצב ואופן פעולה יכול לייצר דרישות פונקציונאליות ייחודיות, ויש להתייחס לכך במידת הצורך בהגדרת הדרישות בסעיפים הבאים.

נוח לערוך טבלה מסכמת עם תיאור כלל המצבים ואופני הפעולה של המערכת, על השלכותיהם על הדרישות מהמערכת. דוגמה לטבלת מצבים ואופני פעולה עבור מערכת תצפית המותקנת בשטח ולא מחוברת לאנרגייה חיצונית מובאת להלן:

שידור לאחור	מערכות צילום	צריכת אנרגייה	אופן פעולה / מצב
אין	לא עובדות	נמוכה	המתנה
יש	עובדות	גבוהה	צילום

### תפיסות תקשורת

תקשורת ומערכות שליטה ובקרה ממלאים בימינו תפקיד מרכזי במערכות רבות. בסעיף זה נדרש לציין דרישות מיוחדות לנושא. חשוב לציין מערכות ומכשירים הנדרשים להתממשק למערכת תוך הצגת תפיסת הקישוריות השלמה. אפשר שהסעיף לא יכלול דרישות מחייבות כלל, אך נדרש להציג את תמונת הקישוריות שתאפשר הצגה של המענה המתאים ביותר על־ידי המפתח.

### פרופיל חיים והפעלה למערכת

פרופיל חיים והפעלה הוא תיאור של הסביבה שבה אמורה לפעול המערכת, וציון משכי הזמן הרלוונטיים. מערכות מסוימות, כדוגמת טילים, מיועדות לתקופת אחסנה ממושכת, ולאחריה לשימוש מבצעי רגעי. מערכות אחרות, כמו מערכות ניטור וידיאו או גדר חכמה, מיועדות לפעול באופן מלא לכל אורך חייהן. מכאן נובעת החשיבות של הנתונים בסעיף זה, והם משמשים בסיס לחישובי זמינות ואמינות בהמשך האופיון.

דוגמה לפרופיל חיים של משקפת:

1. שינוע באריזה על כבישים סטנדרטיים מהמפעל למחסן הלקוח (צה"ל).
2. אחסנה לוגיסטית במחסן מרכזי עד 20 שנה.
3. במהלך תקופת האחסנה הלוגיסטית - ניפוק למחסן גדודי לאחסנה מבצעית למשך ממוצע של כשנה והחזרה למחסן מרכזי לאחר מכן.
4. במהלך אחסנה מבצעית - ניפוק לחייל להפעלה מבצעית בתנאי שטח הרריים.
5. החזרה לבדיקה, אחזקה ואחסנה מבצעית לגדוד.

### איומים

איומים על המערכת הם גורמים שעשויים לפעול או מצבים העשויים להתרחש ולהביא לשיבוש פעולתה התקינה. אין הכוונה לגורמים שמולם המערכת מיועדת לפעול: טיל שמערכת יירוט אמורה ליירט איננו איום עליה אלא איום ייחוס שהמערכת מתוכננת לפעול מולו. איום על המערכת עשוי להיות למשל חסימת GPS שתפגע בדיוק המיקום העצמי וכתוצאה מכך תשבש את הנתונים המופקים ממנה.

### פריסה (הצבה)

סעיף זה מתאר את אופן הפיזור של המערכות בשטח, למשל בחלוקה גיאוגרפית או שיוך ארגוני. פריסה של

מכשירי קשר טקטיים, למשל, יכולה לכלול עשרות יחידות ברמת הגדוד, בחלוקה למסגרות השונות ולסוגים (נישא, מותקן ברכב ועוד). הפריסה משפיעה בין היתר על ההיערכות לאחזקה, יכולת עמידה ביעדי זמינות ועוד.

### **יבילות**

יבילות בהקשר של אפיון מערכתי היא אופן ההתאמה של המערכת להובלה, והמתקנים הרלוונטיים הכלולים במערכת. מכיוון שהובלה לעיתים קרובות משלבת אמצעים חיצוניים, כמו מנופים או משטחים, יש לתת את הדעת בסעיף זה על הגדרת ממשקים לאמצעים אלו.

### **דרישות פונקציונליות**

הגדרת פונקציונליות במונחי יכולות וביצועים היא לבליבו של האפיון. יחד עם זאת, השונות בין אופנים שונים של הגדרת הדרישות היא גבוהה ותלויה במידה רבה במערכת המפותחת. חשוב להימנע מהגדרות שאינן תואמות את התכונות המצופות מדרישה טובה. "מינימום זמן", "ידידותי למשתמש" ושאר ניסוחים עמומים אינם מתאימים לסעיף זה.

הפורמט להגדרת הדרישות הפונקציונליות אינו קבוע. יש המגדירים דרישות פונקציונליות בפורמט של טבלה עם סעיפים וערכים, ויש העורכים רשימת דרישות ממוספרת. כך או כך, חשוב לוודא ציון מדויק לכל דרישה כדי שתהיה אפשרות להתייחס אליה בפרק האימות (פרק 4).

### **אופן המימוש - מרכיבי המערכת**

#### **דרישות פיזיות ותיאור פיזי**

בסעיף זה יש לציין מידות, משקלים ופרמטרים אחרים הנדרשים מהמערכת. חשוב לזכור שבאפיון ביצועים יש לציין רק את הדרישות שהן הכרחיות, למשל עקב ממשק למערכת אחרת או מגבלת משקל נשיאה של חייל.

#### **מרכיבי המערכת**

בסעיף זה מובאת החלוקה של המערכת לתתי-מערכות עם תיאור תתי-מערכות ותכונותיהם. נהוג לשאוף שהחלוקה לתתי-מערכות תתאים ככל האפשר לחלוקה פונקציונלית. ריבוי תתי-מערכות יוצר בלבול ופוטנציאל לבעיות אינטגרציה. מיעוט מכלולים מקשה על מודולריות של המערכת ויכולת גידול עתידית. עבור כל מרכיב יש לצרף הגדרה תמציתית הכוללת בין השאר ייעוד, תיאור כללי (ארכיטקטורה, תצורה), פונקציונאליות או תפקוד למימוש היעד המערכתי, ציון האם הם חלק מהמערכת או מרכיב חיצוני, ואילוצים רלוונטיים אחרים.

מומלץ לדרוש שהצימוד בין מרכיבי המערכת השונים, בוודאי עם מערכות אחרות, יהיה רופף. אומנם עלות הפיתוח הראשונית עשויה להיות גבוהה יותר, אך תתאפשר גמישות ויכולת גידול עצמאית לכל אחד מהמרכיבים, ובנוסף עלויות האחזקה צפויות להיות נמוכות יותר.

בבחירת המרכיבים ומכלולי המערכת יש לתת משקל משמעותי להיות המרכיב או המכלול בשימוש במשק. לרכיב או מכלול הנמצא כבר בשימוש נרחב יהיה יתרון גדול על רכיב או מכלול מקביל בעל תכונות דומות.

## דרישות תוכנה ובסיסי נתונים

רוב המערכות בימינו הן משולבות תוכנה, והתוכנה מציבה לעיתים דרישות ייחודיות. כדי לאפשר יכולת שינוי עתידית נהוג להקפיד על הגדרת שכבות תוכנה - נתונים, לוגיקה ותצוגה, באופן ששינוי תצוגה, למשל, לא ידרוש שינוי אורכי בכל המערכת אלא התאמה של המודולים הגרפיים בלבד.

במידת האפשר נהוג להגדיר מערכת פתוחה וארכיטקטורה פתוחה ולעיתים גם קוד פתוח. במערכת פתוחה מימוש דרישות נוספות יהיה נדבך נוסף מעל לפיתוח הקיים ולא יהיה צורך לפתח מחדש או לשנות מרכיבים שפותחו בגרסאות קודמות.

**מערכת פתוחה** היא מערכת התומכת בסטנדרטים שיאפשרו לה לעבוד בשיתוף עם מערכות אחרות, והמאפשרת הגירה קלה של מערכות ממנה ואליה. המשמעויות של עבודה בשיתוף והגירה ממדדים על-פי שני מאפיינים:

1. תמיכה ב־Interoperability - היכולת להחליף מידע ולעשות שימוש במידע שהוחלף;
2. ביצוע Porting של מערכות מהמערכת הפתוחה למערכת אחרת ולהפך - התאמת קוד תוכנה מסביבת העבודה שבה הוא נכתב לסביבה חדשה; לדוגמה, הרצה על מערכת הפעלה חלונות של מערכת שיועדה ללינוקס.

**ארכיטקטורה פתוחה** היא תכנון המאפשר שינוי, שדרוג והחלפת מכלולים בקלות. לדוגמה, מחשב שמאפשר החלפה של כרטיסי הרחבה. ארכיטקטורה פתוחה מתאפשרת באמצעות שימוש בממשקים סטנדרטיים. להשוואה, שינוי של מערכת הבנויה בארכיטקטורה סגורה לרוב אינו אפשרי, ואם הוא אפשרי, נדרש שינוי משמעותי באמצעות טכנאי של החברה, תשלום דמי רישיון ועוד. לדוגמה, רוב מחשבי השולחן בנויים ברמת החומרה ארכיטקטורה פתוחה, ורוב מחשבי המחברת, מחשבי הלוח והטלפונים החכמים בנויים ברמת החומרה בארכיטקטורה סגורה.

**קוד פתוח** הוא קוד המקור המפורסם עם רישיון לשנות ולהפיץ את התוכנה לכל אחד ולכל מטרה. קוד פתוח אינו מחייב שהמערכת או הארכיטקטורה תהיה פתוחה: יכולה להיות מערכת סגורה עם קוד פתוח. בהגדרת דרישות התוכנה במערכות משובצות-מחשב יש לשלב דרישות למערכות הניהול של המערכת. יש לאפיין כיצד תתבצע הקונפיגורציה למערכת, ומה סוג המידע שאותו ירצה המפעיל או המשתמש לקבל בזמן ריצה, למשל מידע על התראות, תקלות או סטטיסטיקות. אם הדבר רלוונטי, יש להוסיף דרישות לגבי בסיסי הנתונים. יש להתייחס בדרישות, ככל הניתן, להיבטים המבצעיים, כמו היקפי המידע המבצעי הנדרשים לאגירה, יכולות שליפה ואחסון, קצבי טיפול במידע, יכולות מיון וסינון מידע מבסיסי הנתונים, רגישויות לטיב המידע, משכי הזמן הנדרשים לאגירה ודרישות גיבויים ושמירת המידע.

## ממשקים

נהוג לציין שני סוגים של ממשקים: ממשקים חיצוניים וממשקים פנימיים. ממשקים חיצוניים הם ממשקים מכניים ואלקטרוניים של המערכת מול סביבתה ומול מכלולים חיצוניים. הגדרה מקיפה של ממשקים חיצוניים חשובה להתאמה טובה של המערכת לסביבתה וליכולת עתידית לשדרוג ללא צורך בשינוי פנימי אלא בהתאמה להגדרת הממשק בלבד. הגדרה מדויקת של ממשקים חשובה גם בנושאים שהם לכאורה מתואמים, ושלא צפוי שהם יוחלפו. לדוגמה, הגדרת הממשק לכלי הרק"ם בתכן של מערכת הגנה אקטיבית לטנקים יכולה לאפשר בעתיד הסבה פשוטה יותר לכלים אחרים, כמו רכבים ממוגנים, דחפורים ועוד.

ממשקים פנימיים הם ממשקים בין מכלולים במערכת. הגדרה מפורטת של ממשקים פנימיים יכולה לשחרר

מתלות ברכיב מסוים ולהקל על מעבר לספקים אחרים, לטכנולוגיה חדשה ועוד. תכונה הקושרת בין ממשקים פנימיים למכלולים היא מודולריות - גישת תכן שבה המערכת מורכבת מכמה מכלולים המתאימים לפונקציות השונות של המערכת. שמירה על מודולריות מאפשרת שינוי במכלול אחד ללא צורך בעדכון שאר המכלולים, ושימוש במכלולים קיימים או עתידיים ללא צורך בשינויים החורגים מהממשק. חשוב להשקיע מאמץ ולהקפיד על הגדרה של ממשקים באופן כללי, וממשקים פנימיים באופן מיוחד. עם זאת, מכיוון שמדובר באופיון ביצועים ולא במפרט, יש להיצמד להגדרה של ממשקים סטנדרטיים ככל הניתן ולא להיכנס עמוק מדי להגדרות פנימיות שאינן רלוונטיות ברמה של מערכת או תתי-מערכות.

### דרישות תפעול וציוד נלווה

**תפיסת התפעול (Operations Concept)** הוא האופן שבו המערכת מממשת את תפיסת ההפעלה (Concept of Operations). תפיסת התפעול עשויה לכלול תיאור של אופן ביצוע משימות, צורת שמירת המידע ואבטחתו ועוד.

כוח-אדם לתפעול הוא חלק מהנושאים שנדרש לתת עליהם את הדעת ביציאה לפרויקט. דוגמה למערכת שבפיתוחה נדרשת התחשבות בנושא, היא אפליקציה לדיווחי אזרחים. בחלק מהרשויות המקומיות קיימות אפליקציות, וחלקן מאפשרות תקשורת ודיווח בין האזרח למוקד העירוני, כלומר משלוח הודעות על מפגעים ומענה של המוקד.

רשויות שאין ברשותן אפליקציות, מבינות היטב שמערכת כזו צפויה לשפר במידה גדולה מאוד את המענה לתושבים. ברור גם שלא קיימת מניעה טכנית לביצוע הפרויקט, שהרי יש מערכות דומות ברשויות מקומיות אחרות.

יחד עם זאת, נושא התפעול הוא הגורם המרכזי לכך שברשויות רבות טרם מוסדו אפליקציות לדיווחי אזרחים. לצורך תפעול ולמענה באמצעות האפליקציה נדרש כוח-אדם רב. אם כוח-אדם זה אינו זמין - אין ערך רב למערכת, ומוטב מלכתחילה שלא להיכנס לפיתוח.

עבור כוח האדם המתוכנן להפעיל את המערכת יש להגדיר: מקצועות נדרשים, מיומנות נדרשת ומספר המפעילים על-פי מקצוע.

ציוד נלווה לתפעול המערכת כולל אמצעים הנדרשים לצורך הפעלת המערכת, אך הם אינם מהווים חלק ממנה. בדרך כלל הכוונה היא לפריטים כמו כפפות, אביזרי שמע, אנטנות, מנשאים ועוד. חשוב לכלול התייחסות מפורשת לאמצעים אלו כחלק מהפרויקט - אם לא תתאפשר הפעלה תקינה של המערכת מהיום הראשון, סיכויי ההצלחה של המערכת ייפגעו.

### אימון והדרכה

האמצעים הטכניים הנדרשים לצורך האימון וההדרכה הם מכלולים, רכיבים ופונקציונליות מיוחדת המאפשרת תרגול בסיטואציות הדומות למשימה המבצעית אך מדמות או מבצעות סימולציה עבור חלקים שלא הגיוני, כלכלי או אפשרי לבצעם למטרות אימון והדרכה בלבד. למשל אפשרות לשימוש בכדורים חסרי קליע למטרות אימון או סימולציה למטוס המתגלה במכ"ם ללא צורך להזניק מטוס לאוויר בפועל.

מערכות רבות מיועדות לפעול בתרחישי חירום שלשמחתנו אינם מתרחש לעיתים קרובות. הדבר מציב אתגר הדרכת בהכשרה של המפעילים, ובמקרים רבים אין יכולת להתאמן באמצעי אלא בסביבה סימולטיבית. במקרים כאלו הסימולטורים וסביבת ההדרכה באופן כללי הם חלק מהפרויקט, והם משפיעים רבות על ההצלחה שלו. גם בפרויקטים פשוטים יותר יש להקפיד על אופן ההסמכה וההדרכה של המפעילים כדי

למצות את מלוא הפוטנציאל של הפרויקט.

מערכות הגנה אקטיבית - "חץ דורבן", "מעיל רוח" ואחרות - מתוכננות להתמודד עם תרחיש של ירי טילים על הרכב המשוריין שעליו הן מותקנות. הפעם הראשונה שבה המפעיל ייתקל בתרחיש כזה הוא בקרב, ולכן מערכות אלו הן דוגמאות למערכות שמציבות אתגר באימון ובהדרכה. דוגמה מעניינת נוספת בנושא אימון והדרכה היא מערכת "אלומה" - מערכת מתקדמת לאיתור לכודים במתארי הרס, אסון וכדומה. המערכת מבצעת איכון של טלפונים סלולריים על בסיס ההנחה שהימצאות טלפון סלולרי באזור אסון, למשל מתחת להריסות, מעידה בסבירות גבוהה על הימצאות לכוד בסביבתו. מערכת "אלומה", כמו מערכות דומות המיועדות לשימוש בתרחיש קיצון בלבד, מציבה אתגרים בתחום הבדיקות והאימון. במערכות נשק, למשל, אפשר להתאמן ולירות במטווח לפני היציאה למשימה מול האויב. לעומת זאת, במערכת "אלומה" אין יכולת לבצע אימון ואפילו בדיקת ביצועים בצורה סדורה. לכן במסגרת פרויקט "אלומה" נרכשו אמצעים מיוחדים לצורך אימון ובדיקת הביצועים. אמצעים אלו הם... צינורות ביוב. הצינורות הונחו במבנה שיועד לאימונים בטרם הריסתו. זה אפשר הכנסה של טלפונים סלולריים פנימה אל תוך אתר ההרס והוצאה החוצה ממנו באמצעות חבלים. במצב כזה ניתן להתאמן בהפעלת המערכת וגם לבדוק את ביצועי האיכון של המערכת מול מכשירים אמיתיים במיקומים ידועים. האימון מתבצע בתנאים של בניין שקרס בפועל, בין השאר בהיבטי ניחות אות סלולרי, והדבר מגדיל את הרלוונטיות לתרחיש הצפוי במציאות.

## אילוצי תכן

### מודולריות

מודולריות היא גישת תכן שבה המערכת מורכבת מכמה מכלולים המתאימים לפונקציות השונות של המערכת (במקום להיות במבנה אחד או עם צימוד הדוק). שמירה על מודולריות מאפשרת שינוי במכלול אחד ללא צורך בעדכון שאר המכלולים ושימוש במכלולים קיימים או עתידיים ללא צורך בשינויים החורגים מהממשק. לדוגמה, מערכת גילוי מודולרית המורכבת ממכלולי מכ"ם, עיבוד מידע, תצוגת נתונים, ממשקי תקשורת ועוד. זאת לעומת מערכת שבה, למשל אין הפרדה מודולרית בין מרכיבי החישוב, התצוגה והתקשורת, וכל אלו ממומשים במחשב יחיד.

הגדרת מודולריות מיועדת לאפשר שימוש במרכיבי המערכת כיחידות נפרדות במערכות אחרות, שילוב בעתיד של מודולים שאינם מפותחים בשלב זה ללא שינויים משמעותיים במערכת הנוכחית, שימוש במודולים קיימים ומעל הכול - יכולת הכנסת שינויים במרכיב מסוים בלי לשנות מרכיבים אחרים במערכת. חשוב לדרוש שהחלוקה למודולים מבחינת חומרה וזיוד תהיה זהה ככל האפשר לחלוקה הפונקציונלית.

### חליפיות

חליפיות היא גישת תכן שבה ניתן להחליף מכלולים זהים בין מערכות (לעומת גישה שבה המכלולים של המערכת מתאימים אך ורק למכלולים של אותה המערכת, ולא ניתן להחליף בין מכלול השייך מערכת מסוימת למכלול זהה השייך למערכת אחרת). לדוגמה, במערכת גילוי ניתן לדרוש יכולת להחליף שני מכלולי מכ"ם בין שתי מערכות שונות. אם אין מגדירים חליפיות - ייתכן שמערכת מכ"ם של ערכה מסוימת תהיה מתוכננת לעבור אך ורק עם מערכת מחשב מאותה ערכה. במידת האפשר יש לדרוש כי החלפת פריטים לא תצריך כיוונים וכיולים (חשמליים או מכניים). חליפיות אמורה לא להיות תלויה ביצרן, כלומר חלקים עם אותו מספר קטלוגי יהיו חליפיים זה לזה פיזית ותפקודית (בתוכנה ובחומרה) ללא קשר לגורם שייצר אותם.

## יתירות

יתירות היא הכללה של אמצעים במערכת שאינם בשימוש באופן רגיל, וייעודם הוא גיבוי מכלולים אחרים להגדלת החסינות והאמינות של המערכת. מערכת ניווט שנייה במטוס שאינה מופעלת, אלא מהווה גיבוי למערכת הראשית (הזהה לה) ונכנסת לפעולה רק בשעת תקלה, היא דוגמה למערכת שמיועדת להעניק יתירות למכלול קריטי.

יש להגדיר האם נדרשת יתירות למערכת, ובאיזה אופן. האם היתירות אמורה להיות אקטיבית - המערכות מחוברות ופועלות במקביל או לחילופין יתרות פסיבית - חלק מהמערכות פועלות, והאחרות נמצאות בהמתנה. בדרישות היתירות יש להגדיר את פרק הזמן הנדרש למעבר למערכת האלטרנטיבית. אם היתירות היא פסיבית, יש להגדיר כי כל הנתונים הנדרשים צריכים להופיע בכל המערכות ולאפיין מהם אותם נתונים נדרשים.

## ייצוריות (יכולת ייצור)

דרישות ייצור מתייחסות להתאמה של המערכת לתהליכי ייצור וחומרים רלוונטיים. דרישות ייצור באופיון ביצועים נכללות רק במקרה שיש תהליך ייצור מוגדר שיידרש בוודאות, או אם המערכת נדרשת לעיבוד נוסף שאינו חלק מההגדרה באופיון.

## עמידה בתנאים חיצוניים

נושאי התאמה לתנאים חיצוניים נדרשים להגדרה עבור כלל פרופיל המשימה של המערכת, כולל שינוע, התקנה, הפעלה, אחסנה ועוד.

### תנאי סביבה טבעיים

תנאי סביבה טבעיים כוללים תנאי מזג אוויר, כמו טמפרטורה, שמש, גשם, רוח ועוד. חשוב לא להפריז בהגדרה של תנאי סביבה ולדרוש רק את מה שרלוונטי באופן ספציפי למערכת. למשל עבור מערכות שמיועדות להתקנה חיצונית בארץ בלבד, אין הגיון לדרוש עמידה בטמפרטורות נמוכות מ-20°C, אפילו אם בארצות אחרות דורשים עמידה גם ב-40°C. הגדרות חופשיות מדי של תנאי סביבה מייקרות את המערכת שלא לצורך ופוגעת בכושר התחרות שלה.

חשוב להתאים את תנאי הסביבה לייעוד של המערכת. עבור מחשב נייד המיועד לשימוש בטנק נדרשת עמידה בהלמים וברעידות המתפתחים בזמן הנסיעה. עבור מחשב נייד זהה המיועד לשימוש במוצב או בחמ"ל - דרישות אלו מיותרות ומייקרות את המערכת שלא לצורך.

### תנאי סביבה מאולצים

תנאי סביבה מאולצים כוללים גורמים מלאכותיים המצויים בקרבת המערכת או המשפיעים עליה, למשל כתוצאה מהניוד בשטח, מעצם ההפעלה (בתלות במערכת עצמה) ומהשפעת מערכות נוספות היכולות להיות בסביבת ההפעלה. דוגמאות לגורמים כאלו הם חום וקרינה ממערכות סמוכות, תאוצות ורעידות בשינוע, רעש, קרינה מכל הסוגים ועוד.

### תנאי סביבה ייחודיים

תנאי סביבה ייחודיים הם תנאים חיצוניים שלא פורטו בשני הסעיפים הקודמים. למשל במערכות צבאיות יש להתייחס לתנאי הסביבה שהאויב גורם להם, או מצבים ותנאים שעלולים לקרות, ולמערכת צריכה להיות

יכולת להמשיך ולתפקד באופן תקין תוך כדי עמידה בכל הדרישות, גם אם יתרחשו. דוגמאות לתנאי סביבה הנגזרים מפעולות האויב הם אווירת שדה קרב (פיצוץ, ירי וכדומה), חסימות תקשורת GPS, חומרי לחימה בלתי קונבנציונליים ועוד.

### תאימות אלקטרומגנטית וחיים בצוותא

בסעיף זה מוגדרות דרישות שעל־פיהן המערכת נדרשת לא להפריע למערכות אחרות, ושהמערכות הנוספות בסביבה לא תפרענה לפעולת המערכת, כל עוד קרינתן נמצאת בטווח שהוגדר.

כדי לא להפריע למערכות בסביבתה, הפליטה האלקטרומגנטית של המערכת תוגדר להיות נמוכה מסף מסוים בטווח תדרים כלשהו. על־מנת שמערכות נוספות בסביבה לא יפריעו לפעולת המערכת, המערכת נדרשת לתפקד באופן תקין מול הגדרה של עוצמות ותדרי שידור RF שנמדד או חזוי בסביבה המבצעית שלה.

תאימות אלקטרומגנטית שונה מממשק RF, שהיא דרישה הנכללת במסגרת דרישות ממכלולי המערכת. דרישות מממשק RF יכולות לכלול, לדוגמה, הגדרת פרוטוקול שהמערכת נדרשת לממש או לקיים.

### היבטים משלימים

#### אמינות

אמינות היא ההסתברות שהמערכת תפעל באופן תקין במשך זמן מסוים. האמינות היא מונח סטטיסטי במהותו, וניתן להגדיר אותה במונחי זמן ממוצע בין תקלות - זמב"ת (MTBF - Mean Time Between Failures). עבור רכבים ניתן לדרוש ממוצע של קילומטרים בין תקלות (MKBF) ולהגדיר פרמטרים רלוונטיים בהתאם לאופי המערכת ומשימתה. לצד האמינות החזויה המוגדרת בשלב התכנון, יש להתייחס למדידת נתוני האמינות בפועל לאחר תקופת הפעלה מבצעית משמעותית ועדכוני תכנון נדרשים אם ערך זה נמוך מהדרוש. נהוג להגדיר תוכנית אמינות שמפרטת את הפעילויות המבוצעות כדי להבטיח עמידה בכל דרישות האמינות המוגדרות. במסגרת התוכנית מבצעים באופן חלקי או מלא פעולות אלה:

1. קביעת קריטריוני תיכון לאמינות: בחירת רכיבים, רכש רכיבים, תיאום בין רכיבים, תחום טמפרטורה של רכיבים, הפחתת מאמצים חשמליים ומכניים, תיכון תרמי והפחתת מאמצים תרמיים, יתירות, אפיצויות (טולרנסים), התעייפות ואורך חיים, שיקולי זיוד, ריכוזי מאמצים, סדקים, קורוזיה, התאמה לתנאי סביבה, בחירת חומרים.
2. פיתוח מודלים לאמינות; הקצאת אמינות - בהתאם למרכיבי המערכת השונים; חיזוי אמינות - הגדרת יכולת המערכת לעמוד בדרישות אמינות בהתאם להתקדמות התכנון; ניתוחי מאמצים - חשמליים ותרמיים.
3. ניתוח אופני כשל (FMECA - Failure Modes Effects and Criticality Analysis).
4. תהליך הוכחת אמינות - על־פי MIL-HDBK-781 או בגישה אחרת;
5. תוכנית גידול אמינות; הערכת אמינות באמצעות השוואת תהליך התקדמות האמינות עם מודל מתוכנן של גידול אמינות.
5. איסוף נתוני תקלות, אירועים וכשלים שיארכו במהלך הניסויים המתבצעים לפי תורת הניסויים.



## זמינות

זמינות היא חלק הזמן שבו המערכת תקינה ומוכנה לפעולה או פועלת באופן תקין. פרקי זמן הפוגעים בזמינות הם זמני תיקון תקלות, אחזקה מונעת ועוד.

### אחזקתיות (יכולת אחזקה)

מידת ההתאמה של המערכת לביצוע משימות אחזקה. היכולת להחליף חטיבת כוח בטנק בשטח בעת תקלה היא יכולת שהוגדרה כדי להעלות את האחזקתיות של המערכת. עם זאת, אם כדי לבצע משימה נפוצה ברכב, כמו להחליף מצבר, נדרש לפרק את רצועת התזמון (טיימינג) - האחזקתיות היא כנראה נמוכה.

מונח הקשור לנושא האחזקתיות הוא הזמן הממוצע לתיקון - MTTR - Mean Time to Repair. כמובן שיש לשקול נתון זה מול דרג התיקון הנדרש. מערכת עם MTTR נמוך יחסית עשויה להיות אטרקטיבית יותר מבחינת המשתמש מאשר מערכת עם MTTR גבוה בתנאי שהתיקון יכול להתבצע ברמת המפעיל שדורש פעולת טכנאי או מסירת המערכת למעבדה.

חלק מנושא האחזקתיות הוא תפיסת האחזקה ואופן התמיכה והתיקון של המערכות. לדוגמה, תפיסת האחזקה של צבא ארה"ב שונה מאוד מתפיסת צה"ל, מכיוון שדרגי האחזקה שלהם מרוחקים מאוד משדה הקרב, ונדרשת יכולת עצמאית לתיקון מירב התקלות.

כמו כן, יש הבדל גדול בין מערכות לשימוש כללי ובתפוצה רחבה (כמו טלפונים חכמים, שעונים ועוד) לבין מערכות ייעודיות שמשמשות כוח-אדם מיומן ומוכשר (כמו תוכנה להפעלת ציוד בדיקה אלקטרוני). לדוגמה, ההבדלים בפריסה של המערכות והמיומנות הייעודית של המפעילים גוזרים דרישות שונות ליכולות האחזקה המתאפשרות בדרג המפעיל ולדרישות לוגיסטיות הרלוונטיות למערך התמיכה במערכות. במערכות צבאיות יש אפשרות להגדיר שיטת אחזקה שונה בהתאם למערכת ולדמינה למערכות אזרחיות רלוונטיות. למשל רכב סופה שהוא נפוץ מאוד, דומה לרכב אזרחי, אינו אמצעי עיקרי בלחימה וקל לשנעו, מתאים לאחזקה אזרחית יותר מטנק שכנראה אין אפשרות לאחזקו מלבד אחזקה צבאית.

חשוב להגדיר בסעיף זה דרישות שתאפשרנה גמישות ונוחות בהתקנה בשטח. דוגמאות: פרק זמן סביר להתקנה, משקל המתאים להרמה באמצעות אמצעים בשטח, היעדר תשתיות ייעודיות להתקנה כמו מתח של 110v, נגישות - מרווחי אחזקה, פתחי גישה וחיפויים, יכולת פירוק מכללים, גישה לנקודות בדיקה, מהירות ביצוע כיוונים וכיולים, הנחיות לצמצום כוח-אדם נדרש לאחזקה, ידיות ואזורי אחיזה, התחשבות במשקל מותר להרמה על-ידי אדם, תכנון המערכת כך ששינוי או עדכון נתונים ייעשה ללא צורך בפרוק כרטיסים ורכיבים ועוד.

אם הדבר רלוונטי, יש לפרט בסעיף זה גם את הדרישות להתקנת התוכנה ואחזקתה. ניתן להתייחס בין השאר לנקודות האלה:

1. יכולת לשכפל, להפיץ ולהתקין את גרסאות התוכנה, כולל יכולת שכפול והתקנה על מספר יחידות מחשוב; יכולת להגדיר ולהתקין מערכת אחת ולהעתיק בקלות לאחרות;
2. מנגנון הפצה אוטומטי של טעינה מרחוק למערכות עם יחידות קצה מרוחקות;
3. שדרוג אוטומטי של הנתונים במעבר לגרסה מתקדמת;
4. אפשרות נסיגה עבור כל שדרוג גרסה.

**בדיקתיות (יכולת בדיקה)** - היכולת לבצע גילוי יעיל של מצב המערכת ובידוד מקורות הכשל והתקלה במקרה הצורך. נהוג להגדיר רמות בדיקה מובנית (BIT - Built-in test) במערכת: בדיקה עצמית מחזורית (CBIT - Continuous

(BIT), בדיקה עצמית התחלתית (IBIT - Initial BIT), בדיקה עצמית יזומה על-ידי מפעיל או טכנאי ועוד. לכל אחת מבדיקות BIT נהוג להגדיר את הסתברות הגילוי של התקלה הרלוונטית וסיכוי לדיווחי שווא. חשוב לזכור שבדיקות קשורה לאמינות - ריבוי מכלולים מוספים לצורך מימוש מנגנוני BIT פוגעת באמינות הכוללת של המערכת.

דרישות בדיקות כלליות עשויות לכלול התייחסות לציוד בדיקה נדרש, פירוט המצבים שבהם נדרשת בדיקה, הגדרת תנאים מיוחדים הנדרשים לצורך ביצוע הבדיקה, קיום נקודות בדיקה וכניסות לציוד בדיקה והתוצאות המבוקשות בבדיקות, אופן הניתוח והצגת התוצאות.

מומלץ לדרוש שביצוע בדיקות ה-BIT לא יפגע בפעילות השוטפת של המערכת. יש לוודא תאימות בין הגדרת הבדיקה ליכולות ציוד הבדיקה. מומלץ להגדיר את משך הזמן שבו תשמר היסטורית התקלות, באיזה פורמט, ועל איזו מדיה.

נגישות להיסטוריה צריכה להיות זמינה ואפשרית גם לאחר שדרוג גרסאות. בתכנון אמצעי הבדיקה והסימולטורים יש לתכנן אפשרות ליצירת מצבי כשל ולא רק אופציה לבדיקת הנתונים המתוכננים ללא תקלות.

### בטיחות

מערכות רבות מיועדות להגדיל את הבטיחות בביצוע המשימה או לאפשר ביצוע סביר במקומות שביצוע המשימה אינו אפשרי ללא המערכת. גם בהפעלת המערכות יש לרוב אלמנט של בטיחות עבור המפעיל, המאחזק והאנשים הנמצאים בסביבה.

הגדרות בטיחות כוללות לעיתים קרובות דרישות הארקה, אמצעים המונעים הפעלה בשוגג או הפעלה בזמן שאדם נמצא באזור סכנה ועוד. הבטיחות תלויה בתרחישי השימוש, ויש להגדירה בהתאם לגורמי הסיכון הספציפיים בכל אופן הפעלה.

התחומים הנדרשים להתייחסות הם לפחות אלה:

1. בטיחות מפעילים בכל מצבי המערכת;
2. בטיחות גורמים חיצוניים למערכת - הן למערכות הפעלה מבצעיות שכנות והן לסביבה אחרת (אזרחית למשל) - העלולים להיות מאוימים עקב הפעלת המערכת ומרכיביה;
3. בטיחות גורמי האחזקה והלוגיסטיקה בכל הרמות ובכל מצבי האחזקה;
4. בטיחות המערכת במקרה שהתרחשו כשלים טכניים או פגיעה במרכיבי המערכת במהלך תפקודם המבצעי או בכל מצב אחר במהלך חיי המערכת;
5. בטיחות בהיבטי שימוש בחומרים מסוכנים;
6. בטיחות של מקורות אנרגיה.

### זרבות ויכולות הרחבה וגידול

יכולות גידול הן משאבים והכנות במערכת שאינם בשימוש כיום, אך צפוי כי ייעשה בהם שימוש בעתיד כחלק מרצף שדרוגים מתוכנן, עקב התפתחות טכנולוגית או מסיבה אחרת. בתכן של מערכות מחשב נהוג להגדיר יתירות זיכרון מסוימת כדי להימנע מהצורך בשדרוג חומרה בעת הוספת תוכנות או משימות חדשות, שלעיתים אינן מוגדרות בשלבי האפיון של המערכת.

מצד אחד אין ודאות שהרזרבות תנוצלנה בעתיד, ויכול להיות מצב ששדרוג עתידי יהיה זול יותר מהכנה

מראש של רזרבות. מצד שני אי התייחסות לצרכים עתידיים יכולים להשבית את המערכת עם כל גרסת תוכנה או מערכת הפעלה חדשה שדורשת זיכרון נוסף.

### הנדסת אנוש

דרישות הנדסת אנוש הן נושאים המגדירים את אופן ההתאמה של המערכת להפעלה על-ידי אדם ואת נוחות ההפעלה ויעילותה. למרות שדרישות הנדסת אנוש הן לרוב מובנות מאליהן ומוגדרות היטב בתקנים הרלוונטיים, יש להתייחס לנושא בהתאם לפרויקט הספציפי. לדוגמה, הדרישה לתפריט בעברית, ממשק אינטואיטיבי ועוד היא דרישה סטנדרטית בכל אפיון לפיתוח מערכת חדשה, במיוחד במערכת המיועדת לשימוש כוחות הביטחון. לעומת זאת, מערכת "אלומה" לאיתור טלפונים סלולריים מתחת להריסות, שכבר פגשנו, היא מערכת מסוג שונה. נוחות ההפעלה במערכת "אלומה" היא פרמטר משני מאחר שהמערכת היא יחידנית ואינה מיועדת למערך רחב, ולכן ממשק המשתמש יכול להיות מורכב מאוד ובשפה האנגלית. המערכת מיועדת ממילא להיות מופעלת על-ידי מומחים ואף מהנדסים שיעברו את ההדרכה המתאימה בחברה. לכן אין צורך לפתח תפריטים מיוחדים ומפושטים, בייחוד אם ברור שהמפעילים יצטרכו לעבוד חלק גדול מהזמן עם המידע הגולמי.

בדרישות להנדסת אנוש יש להתייחס, בין השאר, לגורמים האלה:

1. אינדיקציות למשתמש לגבי מצב המערכת, סטאטוס הפעולות והתראות על תקלות;
  2. הכוונה לשימוש נכון בכל הפונקציונאליות של המערכת;
  3. הגנה מביצוע טעויות קריטיות, כלומר מניעת אפשרות לבצע פעולות שיגרמו נזק;
  4. נוחות בתפעול ובגישה, למשל מנשא נוח לנשיאת הציוד על גב החייל;
  5. יכולת לבצע את המשימה לאורך זמן;
  6. אילוצים על יכולות ומגבלות האדם דוגמת עומסי הפעלה;
  7. קריטריונים להשפעתה של הסביבה על האדם כמו: תאורה, חום, תאוצות, רעש וכדומה;
- הניסיון ההנדסי מלמד שנושאי הנדסת אנוש הם מרכיבים מהותיים בהצלחת המערכת ופעולתה התקינה.

### איכות הסביבה

דרישות לשמירה על איכות הסביבה נועדו למנוע פגיעה בסביבה באמצעות המערכת או עקב הפעלתה. לעיתים דרישות איכות הסביבה רלוונטיות דווקא לשלבי הגריטה של המערכת ואופן המחזור. כמובן שחשוב לוודא שאין בשימוש חומרים רעילים או מסוכנים בצורה שתהיה מסוכנת לא רק למפעילים וסובבים, אלא גם לסביבה. דרישות איכות הסביבה עשויות לכלול הנחיות להימנע מלהשתמש בחומרים רעילים ובחומרים הפוגעים באוזן, דרישה להשתמש בחומרים ממוחזרים וידידותיים לסביבה ככל שניתן, ולתכנן את הגריטה בהתחשב באספקטים של איכות הסביבה.

### ביטחון ואבטחת מידע

במערכות צבאיות הדרישות לביטחון ואבטחת מידע מובנות היטב. גם במערכות אזרחיות יש לא מעט היבטים רלוונטיים, למשל רמה אבטחת מידע באתר או באפליקציה נדרשת למנוע חשיפה של פרטים אישיים. הבסיס להגדרת הדרישות יהיה ניתוח סיכוני אבטחת המידע. ניתוח זה יכלול פרטים כדוגמת אלה:

1. מי הגורמים העשויים לנסות לפרוץ למערכת;

2. סוג פריצה או איום רלוונטי על הנתונים במערכת: קריאה, הריסה, שינוי (עדכון), איסוף;

3. מידת הנזק הצפוי לכל צירוף גורם או סוג פריצה;

4. יכולת השיפוי (תיקון, התאוששות) מנזק זה.

הדרישות הכרוכות בהיבטי ביטחון מידע של המערכת, מרכיביה וביצועיה יכללו היבטים במהלך הפעלתה המבצעית והפעלה בשגרה לצד דרישות הכרוכות במערכות הבאות עם המערכת במגע או שהמערכת כלולה בהן.

#### **דרישות מיוחדות נוספות**

כאן המקום לציין דרישות מיוחדות, כמו רכיבים, חומרים מיוחדים או כל נושא רלוונטי למערכת שלא נכלל בסעיפים הקבועים של פורמט האופיון.

### **תמיכה ואחזקה**

#### **תפיסת האחזקה**

תפיסת האחזקה כוללת את הדרישות הטכניות לתמיכה בסבבי האחזקה, טיפול בתקלות והתמיכה הטכנית הנדרשת. הדרישות יכללו את הסעיפים האלה:

1. **דרישות למנהלות אחזקה:** דרגי האחזקה ומיקומם, מדיניות האחזקה והאחריות המוטלת על כל דרג

בתחום האחזקה, דרישות לאחזקה מונעת, כולל קריטריונים מה עושים ומתי ושירותים נדרשים מגוף התפעול כמו גיבויים, ניטורים ועוד;

2. **דרישות אחזקה פרטניות:** אילוצי המתקן או השטח שבו נמצאת המערכת, והאילוצים הנובעים

מהציוד הנוסף הקיים שם, יכולת תמיכה מרחוק של הספק (היכן שרלוונטי), טיפול בשינויים ושיפורים ועדכון גרסאות ואופן הפצת התוכנה.

מומלץ להוסיף למכלולי המערכת דרישה לשני שעוני פעילות. שעון אחד יציג את מספר שעות העבודה שצבר המכלול החל מהאיפוס האחרון, והשעון השני יצבור את סך השעות הכולל של המכלול. קריאת השעונים תיעשה באמצעות בקרה חיצונית ולא תחייב פתיחה או פירוק המערכת, והיא תשמש לביצוע חישובי אמינות, אחזקתיות וזמינות המערכת.

#### **תפיסה לוגיסטית ודרישות נגזרות**

התפיסה תכלול דרישות לתכן הנובעות משיקולי עיתוד מלאים ואופני אספקה על-פי פרופיל החיים הטכני והלוגיסטי שנבנה לה. יוגדרו המרכיבים הנדרשים לאספקה במהלך חיי המערכת ובתנאי הפעלתה המבצעית. יצוינו גורמים ואמצעי אספקה קיימים ומידת יכולתם לענות לדרישות האספקה למערכת. תוגדר שיטת האספקה, מיקום מערומי האספקה ומרכיבי המערכת (החלפים) שיימצאו באותם מערומים.

#### **כוח-אדם ואמצעים לאחזקה**

הלקוח הסופי בדרך כלל אינו רואה את בעלי המקצוע בתחומי האחזקה, והוא נתקל בהם לעיתים רחוקות. יחד עם זאת, כוח-אדם בתחומי התמיכה, האחזקה והשירות, כמו גם אמצעים לאחזקה, הם רלוונטיים לכל פרויקט. גם טלפון סלולרי שבמרבית הזמן עובד היטב, ומעט התקלות נפתרות בדרך כלל באמצעות הפעלה מחדש, לעיתים נדרש לאחזקה של בעל מקצוע. אם בעל המקצוע לא יוכשר מראש ויצויד באמצעי בדיקה וחלקי חילוף, כנראה ששביעות הרצון של המשתמש תיפגע מאוד.

עבור כוח-אדם מאחזק יש להגדיר מיומנות נדרשת, מספר אנשי האחזקה והתמיכה הטכנית הנדרשים במצבי המערכת השונים, כולל אחסנה, פריסה, הפעלה מבצעית, אחזקה וכדומה. בתכנון הציוד יילקחו בחשבון כלי הבדיקה והאחזקה. בנוגע לציוד תמיכה תחזוקתית (צת"ת) יש לשלב דרישות כלליות ודרישות לצת"ת ייעודי דוגמת עריסות, עגלות שינוע וכדומה. יש להימנע מתכנון ציוד המצריך כלים מיוחדים לאחזקה. יש לאפיין גם את ציוד הבדיקה שימש בכל דרג, ובמידת הידוע בשלב זה את הדרישות הספציפיות מהציוד (סביבת הפעלתו, ניידות, מה נדרש לבדוק).

### דרישות אימות ביצועים

דרישה טובה מחויבת להיות, בין היתר, בת אימות. אם האימות לא יבוצע, גדול הסיכוי שהתכונה שהוגדרה בדרישה לא תתקיים או לא תתפקד כנדרש. אופן הבדיקה של הדרישות מוצג בפרק אימות הביצועים המגיע לאחר פרק הדרישות הטכניות.

### תהליך האימות של מערכת

אימות המערכת נדרש להיעשות לכל אורך הדרך, "ויפה שעה אחת קודם": אם איהוודאות היא משמעותית, עדיף לבדוק אותה מוקדם ככל האפשר, כדי שתהיה אפשרות סבירה לעדכן את התכן במידת הצורך. לעומת זאת, בשלבים המוקדמים של הפרויקט התכן אינו שלם, ולכן יש דברים שקשה לבדוק בתחילת הפיתוח, וגם אם בודקים - התוצאות אולי לא תהיינה רלוונטיות לביצועים הסופיים. נהוג לחלק את תהליך האימות לשלושה חלקים: בדיקות מפתח, בדיקות דגם ובדיקה סדרתית. להלן נציג בקצרה כל אחד מאלו.

**בדיקות מפתח** הן בדיקות שמבצע היצרן (לרוב ביידוע הלקוח ובשיתופו), ומטרתן להוכיח ולהדגים פעולה תקינה בשלבים מוקדמים של הפרויקט וכך להוריד סיכונים פיתוח. למרות היתרונות הברורים של בדיקות מפתח, כאמור, לעיתים אי-אפשר לבצע אותן עד שהמערכת בשלה מספיק או משולבת עם מערכות נוספות, וזה יכול להתרחש רק לקראת סוף הפיתוח.

**בדיקות דגם** מתבצעות על דגם המערכת, כלומר המערכת הראשונה שיוצרה בתצורה סופית. בדיקות הדגם מחולקות בדרך כלל לשני שלבים המכונים בהקשר של מערכות ביטחוניות "אישור בטיחות" ו"אישור דגם". המטרה של האישור הבטיחותי היא לוודא שהשימוש במערכת לא יזיק למשתמשים, למערכות אחרות או לסביבה. לצורך האישור הבטיחותי המערכת הנבדקת אינה נדרשת לביצועים כלשהם, ובלבד שהיא אינה מסכנת את המפעילים והסובבים. כלומר, מערכת שאינה עושה שום דבר מועיל, עשויה לקבל אישור בטיחותי, בתנאי שהיא אינה פוגעת או מזיקה.

אישור דגם הוא אישור של עמידת המערכת בביצועים הנדרשים. בדרך כלל תהליך של אישור בטיחותי הוא קודם או משולב באישור דגם. יש הנוהגים לכוונת תהליך של אישור דגם בשם "בדיקת קבלה מורחבת". **בדיקה סדרתית** היא בדיקה של מערכות בשלבי ייצור סדרתי. מטרת הבדיקה היא לוודא עמידה של פריטים המיוצרים בייצור סדרתי לדרישות האופיון ונתוני אישור הדגם וכך לתקף את שרשרת הייצור.

### שיטות האימות

קיימות חמש שיטות אימות עיקריות: הצהרת יצרן, הדגמה, אנליזה, בחינה וניסוי. סדר השיטות הוא "מהקל אל הכבד": הצהרת היצרן היא השיטה הזולה והקלה ביותר לביצוע מבחינת הספק, אך היכולת של הלקוח לוודא ולבדוק את ההצהרות היא נמוכה או לא קיימת. ניסוי הוא תהליך הדורש את מירב האמצעים, אך

בניסוי המערכת עצמה מופעלת בתנאים הקרובים למצב האמת, ולכן תוקף התוצאות אמור להיות הרב ביותר. להלן נביא תיאור קצר של כל שיטת אימות.

**הצהרת יצרן** - מסמכי יצרן או כל הכרזה של הספק שלא עברה אימות על-ידי הלקוח, ושאינה מסתמכת על נתונים או אנליזות. במסמכי יצרן יכולים להיכלל גם דוחות מעבדה של הספק או אישורים של בעלי מקצוע מוסמכים (למשל אישור חשמלאי מוסמך). נהוג לבקש ולהסתמך על הצהרה של היצרן לעמידה בדרישות מסוימות.

**הדגמה** - הצגה או הפעלה של המערכת על-ידי היצרן כדי להראות עמידה בדרישות מסוימות. בדרך כלל בהדגמה מוצגת המערכת בסביבה מבוקרת, וההפעלה נעשית על-ידי מפעיל מיומן של הספק. השימוש בהדגמה נפוץ בתצוגת ממשקי משתמש, תכונות חיצוניות ועוד. בהדגמה נבדק שהמוצר מתאים לנדרש ממנו ללא מדידות כמותיות אלא על סמך התרשמות בלבד.

**אנליזה וסימולציה** - הצגת נתונים ותוצאות של חישוב תיאורטי שיכולים להעיד או לנבא עמידה של המערכת בתנאים מסוימים. משתמשים באנליזה אם נדרש לבחון ביצועים בתרחישי קיצון שאינם ניתנים לשחזור באופן מעשי. לעיתים המערכת נדרשת לעמוד בתרחישים רבים מאוד, אך ניתן לעשות רק מעט ניסויים חיים. במקרה כזה משתמשים בסימולציה כדי לקבל מעטפת ביצועים עקרונית והערכה להתנהגות בכל הסביבות המבצעיות, ובמקביל מבצעים כמה ניסויים כדי לתקף את תוצאות הסימולציה.

**בחינה** - בדיקה של המערכת על-ידי נציגי הלקוח, בדרך כלל חזותית או משלבת בדיקות התרשמות ובסיסיות בלבד, כמו מימדים פיזיים, נוחות שימוש, סימונים, צבע ועוד. בחינה עשויה לכלול מדידות פיזיקאליות, חשמליות ומכניות כמותיות פשוטות.

**ניסוי** - הפעלה של המערכת בתנאים הקרובים לסביבה האמיתית. כאמור לעיל, הניסוי הוא שיטת האימות היקרה ביותר מבחינת התשומות, אך היא אמורה להיות המקורבת ביותר לתנאים במציאות. ניסויים יכולים להתבצע במעבדה או בשדה.

**ניסויי מעבדה**: ניסויים מבוקרים בתנאי מעבדה שבהם נבדקים מרכיבי המערכת לעמידה בדרישות. המערכת נבדקת מול ציוד בדיקה או סימולטורים פיזיקאליים החל מבדיקת פרמטרים בדידים ועד פעולה שלמה של מערכת מול סימולציה מייצגת של העולם החיצון.

**ניסויי שדה**: ניסויים עם הציוד המפותח בתנאים הדומים לתנאים השוררים בסביבה המבצעית שבהם מתוכנן הציוד לפעול. ניסויים אלה יכללו ניסויים של מרכיבי המערכת וניסויים מערכתיים.

### **טבלת אימות**

טבלת האימות מפרטת עבור כל דרישה מפרק הדרישות באופן את מיקום הבדיקה בתהליך האימות, שיטת האימות והאופן הפרטני של ביצוע הבדיקה. נהוג לחלק את אימות הדרישות בין השיטות השונות, ואף לאמת דרישה אחת בכמה שיטות לאורך הפרויקט כדי להביא למקסימום את הוודאות בביצועי המערכת בהשקעה של מינימום אמצעים.

3.5.1.1		3.4.4.3	3.2.4.1		סעיף הדרישה	דרישה (פרק 3)
עמידה בתנאי גשם		דיוקי ייצור	טווח ירי		מהות הדרישה	
			✓		בדיקות מפתח	תהליך האימות
✓		✓	✓		בדיקות דגם	
		✓			בדיקה סדרתית	
					הצהרה	שיטת האימות
✓					הדגמה	
			✓		אנליזה	
		✓			בחינה	
✓			✓		ניסוי	
4.3.2	4.4.15.7	4.2.2	4.3.1	4.5.1	סעיף הבדיקה	פירוט הבדיקה (פרק 4)
ניסוי מבצעי בשטח למשך חודש	הדגמה במעבדה	מדידת דיוקים באמצעות פלס אלקטרוני	ניסוי ירי של תחמושת חיה	אנליזה מול מטרות אדם ושריון	מהות הבדיקה	

### פירוט הבדיקות

בכל מקרה שבו הבדיקה איננה טריוויאלית, נדרש לפרט את אופן ביצועה. דוגמאות: עבור ניסוי ירי טילים נדרשת הגדרה של כמות הטיילים, תרחישים, תנאים חיצוניים ועוד; עבור אנליזת חוזק נדרש לפרט את המכלולים הנבדקים, תקנים רלוונטיים ועוד. לרוב מידע זה חורג מהמקום הקיים בטבלה, ולכן דורש פירוט בסעיף נפרד.

### דרישות למסירת המערכת

#### אריזה

הסעיף כולל הגדרות לשאלות האלה: כיצד ייארז המוצר? כמה מערכות באריזה? האם האריזה תהיה כבדה, יקרה ועמידה, או אולי לא נדרשת אריזה כלל, למשל אם המוצר יותקן וייכנס לשימוש מיידי? האם נדרשת אריזה נוספת לנשיאה, אחסנה או שינוע אחזקתי לאורך חיי המערכת?

יש לתכנן את דרישת המארזים בהתאם לאופן האחסון וההובלה. המארזים אמורים להגן על התכולה מפני פגיעות מכניות ומפני תנאי אחסון שאינם מתאימים. בדרישות האריזה יש להתחשב גם באמצעי ההובלה והשפעתם על אופן האריזה ובנוחות בהעמסה. יש מצבים שבהם נדרשת אריזה שונה בהתאם לפרופילי הפעלה שונים, כמו מערכת שיש לארוז אותה באופן מסוים להובלה ולאחסנה ובאופן אחר לנשיאה על גב החייל.

אם הדבר רלוונטי, ניתן לדרוש שהאריזה תתאים לשימוש רב-פעמי. יש להגדיר את אופן האריזה גם לחלקי החילוף. בנושאים הרלוונטיים ניתן לדרוש שמכלולים סגורים יוגנו מפתיחה שאינה מורשית, באמצעות מדבקות אבטחה או כל דרך הגנה אחרת.

## סימון

סימון המערכת נדרש לצורכי זיהוי, תפעול או אזהרה. נהוג להגדיר את החומרים, המידות והמיקומים של השלטים בשילוב עם הגורמים הרלוונטיים לתמחור (גרפיקה או טקסט, צבע או שחור-לבן ועוד). את התוכן המדויק נהוג להשאיר להגדרה מאוחרת יותר. חשוב להגדיר אמצעי סימון מתקדמים, במידה ורלוונטי (לדוגמה, ברקוד, קוד QR, RFID ועוד).

## הערות

פרק ההערות כולל תיאורים משלימים ומידע להבהרה שלא שולב בשאר סעיפי האופיון. למשל מידע זה יכול לכלול הפניות לסעיפים ב-SOW שרלוונטיים לנושא ההגדרות של המערכת. ניתן לכלול בסעיף ההערות הסברים הנוגעים לחלופה שנבחרה או לחלופות שנפסלו והסיבות לפסילתן - אם הוא לא נכלל בסעיפים קודמים, ואם הוא רלוונטי לאופיון המערכת. בדרך כלל פרק ההערות אינו כולל דרישות פורמליות.

## סקרים בתהליך הפיתוח

סקר (Review) הוא כלי פורמאלי לבקרה ולאישור איכות המוצר ותוצרי ביניים ולאישור המוכנות להמשך הפיתוח לאורך השלבים במחזור חיי הפרויקט. סקרים משולבים אינטגרלית בתהליכי הנדסת מערכות, והם משמשים אמצעים חשובים ביותר לאימות שלמות המערכת, איכותה והוכחת תקפותה. סקר מהווה גם אבן דרך לבקרה על התקדמות הפרויקט ועמידתו בלוחות הזמנים ובמשאבים. מהות הסקר היא הצגת תוצרי ביניים ודיון בנקודות פתוחות וסיכונים אפשריים לקראת אישור אבן דרך בפיתוח והתארגנות לקראת המשך הפיתוח. סקרים כוללים בדרך כלל שני היבטים, אשר נהוג לשלב ביניהם:

1. היבטי מערכת (סטטוס הפיתוח עצמו): סטטוס רכיבי מערכת וממשקים, איכות, התאמה לדרישות וכדומה;
  2. היבטי ניהול: לוחות הזמנים של הפרויקט, משאבים (כוח-אדם ותקציב), השלכות ארגוניות, סיכונים שעלולים להפריע למימוש הפרויקט וכדומה.
- SRR (System Requirements Review) - סקר דרישות מערכת - יבוצע לאחר חתימת החוזה, עם השלמת ניתוח הדרישות עלידי הספק ולפני הכניסה לתהליך הפיתוח. מטרת הסקר הן אלה:
1. לוודא שהספק מבין היטב את הדרישות ואת אופני הבדיקה, את סדרי העדיפויות ואת המגבלות הקיימות;
  2. לוודא שהספק מתחייב לממש את הדרישות במהלך הפרויקט בהתאם לאבני הדרך ולתוצרים שהוגדרו;
  3. לוודא שהספק הוא בעל היכולת והמשאבים לעמוד בכל דרישות החוזה.
- SDR (System Design Review) - סקר תכנון מערכתי - יבוצע עם השלמת התכנון המערכתי (קונספטואלי). מטרת הסקר היא לבחון ולהעריך את התפיסה המערכתית (קונספט) שנבחרה למערכת ביחס לדרישות המערכת ולהציג באופן מפורט את השלבים השונים הקשורים בתכנון המערכת או המוצר ובפיתוחם לאור תיחום הפרויקט, דרישות הלקוח, סדרי העדיפויות, המגבלות והאילוצים הטכנולוגיים.
- PDR (Preliminary Design Review) - סקר תיכון ראשוני - יבוצע עם סיום שלב התכנון הראשוני ולפני הכניסה לשלב התכנון המפורט. מטרת הסקר היא להציג את חלופות התכנון ותהליך הבחירה של החלופה המועדפת ולהציג לאישור תיכון ראשוני של החלופה שנבחרה.
- CDR (Critical Design Review) - סקר תיכון קריטי - יבוצע עם סיום מלא של שלב התכנון ולפני כניסה לשלב



המימוש. מטרת הסקר הן אלה:

1. לאשר את תוצרי התכנן המפורט, ולוודא שהתכנן מספק מענה שלם לכל דרישות המערכת והתקנים הנדרשים תוך שמירת העקיבות בין האופיון לבין התכנן;
  2. לאשר הקפאת תצורת המערכת או המוצר והממשקים למימוש בשלב הייצור והבדיקות.
- TRR (Test Readiness Review) - סקר מוכנות לבדיקות, לבחינה ולניסויים - יבוצע לקראת כל ניסוי במערכת. מטרת הסקר הן לאשר מוכנות לתחילת בדיקות בהתאם לתוכנית ניסוי ובחינה, לוודא הורדת כל הסיכונים וביצוע כל הבדיקות המקדימות ולאשר תוכנית ניסוי, לוחות זמנים ומשאבים לביצוע הניסוי.
- FTR (Final Test Review) - סקר סיכום בדיקות מערכת - יבוצע לאחר סיום שלב הבדיקות והניסויים. מטרת הסקר הן אלה:

1. להציג את תהליך הבדיקות ואת כל ממצאי הבדיקות שנערכו ברמת המערכת ותת-המערכות, לצד פירוט הרכיבים שלא נבדקו;
  2. להעריך את משמעות הבעיות והתקלות שאותרו במהלך הבדיקות ולקבל החלטה בהתאם באשר למוכנות המערכת והמעבר לשלב הייצור בהיבט הטכני.
- FQR (Formal Qualification Review) - סקר בדיקת התאמה פורמאלי - יבוצע עם השלמת כל מטלות הפיתוח ולקראת ההעברה לייצור. מטרת הסקר היא לאשר שמטלות הפיתוח, ייצור הדגמים וביצוע הבדיקות של אימות התכנן הושלמו בהצלחה, ולאשר את התצורה הסופית של המערכת, כולל ציוד תמיכה.
- PCA (Physical Configuration Audit) - סקר ביקורת קונפיגורציה פיזית - יבוצע לפני הכניסה לייצור וייתחם למוצר כפי שמועד לצאת מקו הייצור. מטרת הסקר היא לוודא את תאימות הפריטים השונים למסמכי התכנן השונים (מפרטים, שרטוטים) ולאשר שתקני הבחינה אכן מאמתים את דרישות התכנן.
- PRR (Production Readiness Review) - סקר מוכנות לייצור - יבוצע לפני שלב הייצור. מטרתו לבחון ולהעריך את סטאטוס המוכנות לייצור ולאשר את תיק הייצור של הדגם וכן את מוכנות קו הייצור לייצור סדרתי.
- SPRR (System Production Readiness Review) - סקר מוכנות למבצוע - יבוצע לאחר סיום הפיתוח, ביצוע בדיקות והניסויים ואישור דגם ולקראת תחילת פעילות שוטפת של המערכת (בהיקף מלא או בהיקף חלקי). מטרת הסקר הן אלה:

1. לוודא מוכנות לקליטת המערכת ולהטמעתה בקרב המשתמשים;
  2. לוודא מוכנות של גורמי הפיתוח, התפעול, אחזקה והתשתיות לקליטת רכיבי המערכת או המוצר, התקנתם והפעלתם בסביבה המבצעית.
- סקרים נוספים שנערכים באופן מחזורי או בעת הצורך הם PMR (סקר ניהולי - Program Management Review) - QAR (סקר הבטחת איכות - Quality Assurance Review). מטרת סקרים אלו היא הצגת תמונה רוחבית בהיבטי ניהול או הבטחת איכות וקבלת החלטות בהתאם.
- בפרויקטים קטנים מקובל לשלב יחד חלק מהסקרים. שילוב מקובל הוא חיבור SDR עם SRR או איחוד בין FTR לסקר ה-FQR. אך בכל פרויקט חשוב לקיים CDR מפורט כנקודת בקרה להצגת כלל המאפיינים שישולבו במערכת וכתנאי להמשך מימוש המשימה.

## הרחבה: בטיחות מערכות/משה יצחקי<sup>30</sup>

פרק זה מתמקד בניתוח בטיחות של מערכת בגישה המכונה בטיחות מערכת (system safety). התחום העוסק בבטיחות מערכת נקרא הנדסת בטיחות מערכת (system safety engineering), ובדרך כלל מבצעים אותו מהנדסים אשר התמחו בניתוח סיכונים של מערכות. בטיחות מערכת נדרשת בעיקר בארגונים המתכננים, המפתחים והבונים מערכות שיש בהם סיכונים לאדם ולסביבה. כמעט בכל המערכות הצבאיות יש עיסוק בחיי אדם, והמטרה היא לוודא שאין במערכת סיכונים שאינם קבילים.

דרישות בטיחות מערכת מוגדרות בתקן MIL-STD 882E "ליישום של עקרונות, קריטריונים, וטכניקות ניהוליים והנדסיים כדי להגיע לרמת סיכון נסבלת של תרחישים מזיקים, וזאת במגבלות ישימות ויעילות תפעולית, זמן, ועלות במשך כל השלבים של חיי המערכת". כיום גישה זו אומצה כסטנדרט גם בתחומי תעשייה אזרחיים שונים, ויש מספר רב של תקנים נוספים הדנים במערכות אוטונומיות, מערכות תעופה ועוד. בטיחות מערכת משמשת כלי סטנדרטי בניתוח בטיחות של מערכות - ממערכות קטנות ועד למערכות נשק, כורים גרעיניים, תובלה אווירית ותעופת חלל, מערכות נשק עתירות אנרגיה, ועד מתקנים ותהליכים מסוכנים בתעשייה. לקחי העבר לימדו אותנו כי ביצוע ניתוח וטיפול בבטיחות מערכת בהתאם לדרישות התקנים מחויב כדי להבטיח את חיי המשתמשים ושלומו.

בטיחות מערכת מלווה את הפרויקט משלב התכנון הראשוני ועד שלב הפירוק או הגריטה של המערכת. הנחת העבודה בהגדרת התקן היא כי יש סיכונים במערכת. הכוונה להגיע לרמה נסבלת של סיכונים המתחשבת בצרכים התפעוליים ובמשאבים הנחוצים ליישום הבטיחות במערכת. הגדרה זו תואמת את עיקרון ה"ALARP (As Low As Reasonably Practical)". לפי עיקרון זה יש להשקיע מאמצים להפחתת רמת הסיכון כל עוד הדבר ניתן ומעשי.

### מונחי יסוד בבטיחות מערכת

המונחים העיקריים של בטיחות מערכת מבוססים על תקן MIL-STD-882E, והם אלה:

**מערכת (system):** שילוב אינטגרטיבי של אנשים, תוצרים ותהליכים המאפשר סיפוק צורך או מטרה מוגדרים.  
**תתמערכת (sub-system):** שילוב של מרכיבים המאפשר אוסף של ביצועים במערכת מוגדרת.  
**גורם סיכון (hazard):** מצב ממשי או פוטנציאלי היכול לגרום לפגיעה, מחלה או מוות לאנשים; נזק או אובדן מערכת, ציוד או רכוש או נזק לסביבה.

**תרחיש מזיק (mishap):** מאורע או סדרה של מאורעות לא מתוכננים שתוצאתם הינה מוות, פגיעה או מחלת מקצוע, נזק או אובדן של ציוד או רכוש או נזק לסביבה.

**סיכון של תרחיש מזיק (mishap risk):** החומרה הפוטנציאלית של התרחיש המזיק וההסתברות לאירועו.

**בטיחות (safety):** היעדר מצבים העלולים לגרום מוות, פגיעה או מחלת מקצוע, נזק או אובדן של ציוד או רכוש או נזק לסביבה.

**אליכשל (fail-safe):** מאפיין של פיתוח המבטיח שהמערכת תישאר בטוחה, או, במקרה של כשל, גורם למערכת לעבור למצב שלא יגרום תרחיש מזיק. חשוב לציין כי כיוון שחלק זה הינו מורכב מאוד ודורש ידע הנדסי ויצירתיות רבה. נדרש לבצע חשיבה על שילובו מוקדם ככל הניתן.

<sup>30</sup> אל"ם (מיל") משה יצחקי שירת שנים רבות בחטיבה הטכנולוגית ליבשה ושימש, בין היתר, בתפקיד ראש מחלקת תקיפה ואיסוף, ראש מחלקת מערכות אלקטרואופטיות ומפקד יחידת הפיתוח. בתפקידו במילואים משמש יושב ראש ועדת הבטיחות לניסויים עתירי אנרגיה בזרוע היבשה.

**פונקציה קריטית בטיחותית (safety critical):** מונח המתייחס לכל מצב, מאורע, תפעול, תהליך או פריט אשר הזיהוי, השליטה, הביצוע או הסיבולת שלהם הינם חיוניים להפעלה או תמיכה בטוחה במערכת. **ניהול בטיחות מערכת (system safety management):** כלל התוכניות והפעולות המבוצעות באופן שיטתי כדי לזהות, להעריך, להפחית - וכן לעקוב באופן שוטף, לשלוט ולתעד - סיכונים סביבתיים, בטיחותיים ובריאותיים של תרחיש מזיק העלול לקרות בעת פיתוח, בדיקה, רכישה, שימוש ופירוק של מערכת, תת-מערכת או ציוד.

**סיכון שיורי של תרחיש מזיק (residual mishap risk):** הסיכון של תרחיש מזיק שנותר לאחר שכל האמצעים להפחתת הסיכון נוצלו או ננקטו על-פי העקרונות של מדרג בקרת הסיכונים.

### תהליך בטיחות מערכת

תהליך הבטיחות של המערכת כפי שמובא ב-MIL-STD-882E מכיל שמונה שלבים, וכמובן שביניהם יש אינטראקציות ומעגלים החוזרים על עצמם. השלבים הם אלה: קבע את תפיסת הבטיחות המערכתית; זהה את הסיכונים; הערך את הסיכונים; זהה את האמצעים לצמצום הסיכונים; צמצם את הסיכונים; אמת וודא את הפחתת הסיכונים; קבל את הסיכונים; נהל את הסיכונים בכל מחזור החיים.

### שלב 1: קבע את תפיסת הבטיחות המערכתית

תהליך ניהול הבטיחות בפרויקט מתחיל בקביעה של גישת הבטיחות של המערכת לניהול סיכונים ובתיעודה כחלק בלתי נפרד מתהליך הנדסת המערכת. הדרישות הבסיסיות לגישת הבטיחות כוללות את אלה:

1. תיאור של המאמץ לניהול הסיכונים הבטיחותיים ושילובו בתהליך הפיתוח, הנדסת המערכות והמבנה הניהולי הכולל של התוכניות;
2. זיהוי הדרישות שיש להן היבט בטיחותי ושנקבעו ונגזרות על המערכת; דוגמאות לכך כוללות דרישות בטיחות תחמושת, דרישות תאימות אלקטרומגנטית, דרישות איכות הסביבה ושיקולים טכנולוגיים. לאחר זיהוי הדרישות, יש להבטיח את הכללתם במפרט המערכת ואת העברת הדרישות גם על קבלני משנה וספקים;
3. הגדרה הדדית בין הלקוח והספק של האופן שבו סיכונים וסיכונים נלווים מקובלים באופן רשמי על-ידי הלקוח;
4. תיעוד סיכונים עם סגירות במערכת למעקב סיכונים (HTS Hazard Tracking System). ה-<sup>HTS</sup> יכול, לכל הפחות, את הנתונים האלה: סיכונים מזוהים, תקלות קשורות, הערכות סיכונים, אמצעים מזוהים להפחתת סיכונים, אמצעי הפחתה נבחרים, מצב הסיכונים ותיעוד קבלת הסיכונים.

### שלב 2: זיהוי הסיכונים

סיכונים מזוהים באמצעות תהליך ניתוח שיטתי הכולל חומרה ותוכנה של המערכת וממשיקי מערכת, לרבות ממשקים אנושיים. תהליך זיהוי הסיכונים יהיה לאורך כל מחזור החיים של המערכת. ההשפעות האפשריות על כוח-אדם, תשתיות וסיכונים מזוהים יתועדו ב-HTS.

### שלב 3: הערכת סיכונים

רמת החומרה ורמת ההסתברות של התקלות הפוטנציאליות עבור כל סכנה בכל מצבי המערכת נבחנים באמצעות ההגדרות בטבלאות הבאות. כדי לקבוע את החומרה המתאימה, עבור סיכון מסוים בנקודת זמן

נתונה, יש לזהות את הפוטנציאל למוות או לפציעה, להשפעה סביבתית או להפסד כספי. לסיכון מסוים יש פוטנציאל להשפיע על אחד או יותר משלושת התחומים שהוזכרו. יש להתייחס לתוצאה הסבירה הקשה ביותר הצפויה, בהנחה שהתרחיש המזיק קורה.

דרגת חומרה	קטגוריה	קריטריונים סביבתיים, בטיחותיים ובריאותיים
קטסטרופלי	I	עלול לגרום לאחת או יותר מהפעולות הבאות: מוות, נכות מוחלטת קבועה, השפעות סביבתיות בלתי הפיכות או הפסד כספי העולה על 10 מיליון דולר.
קריטי	II	עלול לגרום לאחת או יותר מהפעולות הבאות: פציעות או מחלת תעסוקה העלולה לגרום לאשפוז של לפחות שלושה אנשי צוות, להשפעה סביבתית משמעותית, אך הפיכה, או הפסד כספי העולה על 1 מיליון דולר אך נמוך מ־10 מיליון דולר.
שולי	III	עלול לגרום לאחת או יותר מהפעולות הבאות: פגיעה או מחלה תעסוקתית שיובילו לאובדן יום עבודה אחד או יותר, להשפעה סביבתית מתונה, אך הפיכה, או הפסד כספי העולה על 100,000 דולר אך נמוך מ־1 מיליון דולר.
זניח	IV	עלול לגרום לאחת או יותר מהפעולות הבאות: פציעה או מחלה תעסוקתית שאינה גורמת לאובדן יום עבודה, השפעה מינימלית על הסביבה או הפסד כספי הנמוך מ־100 אלף דולר.

כדי לקבוע את רמת ההסתברות המתאימה, כפי שמוגדרת בטבלה הבאה, עבור סיכון מסוים בנקודת זמן מסוימת, יש להעריך את הסבירות להתרחשות תקלה. העמודה של קבוצה או מלאי מתארת את ההשפעה של סדרה, כמו צי כלי רכב, או סדרות המכילות פריטים דומים רבים. רמת ההסתברות F משמשת לציון מקרים שבהם הסיכון אינו קיים עוד. התקן מדגיש כי הגדרת שיטת הפעלה, הדרכה, אזהרה או ציוד מגן אישי אינם מציינים יכולת לגרום לסיכון לקבל את הרמה F.

קבוצה או מלאי	פריט בודד ספציפי	רמה	הסתברות
קורה כל הזמן.	צפוי לקרות לעיתים קרובות במהלך חיי הפריט, עם הסתברות לאירוע הגדולה מ- $10^{-1}$ במהלך חיי הפריט.	A	שכיח (frequent)
יקרה לעיתים קרובות.	יקרה פעמים אחדות במהלך חיי הפריט, עם הסתברות קטנה מ- $10^{-1}$ , <sup>1</sup> אך גדולה מ- $10^{-2}$ במהלך חיי הפריט.	B	אפשרי (probable)
יקרה פעמים אחדות.	צפוי שיקרה פעם במהלך חיי הפריט, עם הסתברות קטנה מ- $10^{-1}$ , <sup>2</sup> אך גדולה מ- $10^{-3}$ במהלך חיי הפריט.	C	מדי פעם (occasional)
לא צפוי, אך סביר להניח שאולי יקרה.	לא צפוי, אך עלול לקרות במהלך חיי הפריט, עם הסתברות קטנה מ- $10^{-3}$ , אך גדולה מ- $10^{-6}$ במהלך חיי הפריט.	D	קלוש (remote)
לא צפוי, אך אפשרי.	בלתי צפוי במידה כזו, שניתן להניח שכנראה לא יקרה כלל במהלך חיי הפריט, עם הסתברות הקטנה מ- $10^{-6}$ במהלך חיי הפריט.	E	לא סביר (improbable)
	לא מסוגל להתרחש. רמה זו משמשת כאשר סיכונים פוטנציאליים בוטלו מאוחר יותר.	F	מבוטל (eliminated)

הסיכונים המוערכים באים לידי ביטוי כקוד הערכת סיכונים (RAC - Risk Assessment Code) שמקצה רמת סיכון גבוהה, חמורה, בינונית או נמוכה לכל שילוב של קטגוריית חומרה ורמת הסתברות.

כחלק מתוכנית הבטיחות יתועדו כל ההגדרות המספריות של ההסתברות ששימשו בהערכת סיכונים כנדרש בשלב 1 שהוגדר והסיכונים המוערכים יתועדו ב-HTS.

#### שלב 4: זהה את האמצעים לצמצום הסיכונים

יש לזהות מנגנוני צמצום סיכונים ולבצע ניתוח הפחתת הסיכונים הצפויים של החלופות תוך תיעוד הנושא ב-HTS. המטרה צריכה להיות תמיד למנוע את הסיכון, אם אפשר. אם לא ניתן לנטרל סיכון, יש להפחיתו לרמה הנמוכה ביותר המקובלת במגבלות העלות, לוח הזמנים והביצועים. יישום חלופות לשיטות צמצום הסיכונים יהיה על־פי מידת האפקטיביות בהתאם לסדר הבא:

1. באופן אידיאלי, את הסיכון יש לבטל באמצעות בחירת חלופת תכן או חומר שמסיר את הסיכון לחלוטין;

2. אם לא ניתן לנטרל את הסיכון באמצעות שינוי התכן, יש לשקול שינויים בתכן המפחיתים את החומרה או את ההסתברות לפוטנציאל התקלה הנוצר בעקבות המפגעים;
3. אם הפחתת הסיכון באמצעות שינוי התכן אינה אפשרית, יש להפחית את החומרה או את ההסתברות לפוטנציאל התקלה שיצרו המפגעים על ידי שימוש באמצעים הנדסיים אשר יפריעו לרצף תקלות ובכך יפחיתו את הסיכון של תקלה;
4. אם האמצעים הנדסיים אינם אפשריים או שאינם מורידים במידה מספקת את חומרתם או את סבירותם של התקלות שגרם הסיכון, יש לכלול מערכות גילוי ואזהרה כדי להזהיר את המשתמשים (מפעילים ומאחזקים) מפני מצב מסוכן או התרחשות של אירוע מסוכן;
5. אם מנגנוני התרעה אינם יכולים להקטין במידה מספקת את החומרה או ההסתברות של פוטנציאל התקלה שגרם הסיכון, יש להוסיף שילוט, נהלים, הדרכה ואמצעי מיגון אישי; עבור סיכונים המסווגים לקטגוריות קטסטרופליות או קריטיות יש להימנע משימוש בשילוט, נהלים, הדרכה ואמצעי מיגון כשיטה יחידה להפחתת הסיכון.

#### **שלב 5: הקטן הסיכונים**

אמצעי הפחתת הסיכונים שנבחרו, ייושמו על־מנת להשיג רמת סיכון מקובלת. יש לשקול ולהעריך את העלות, את ההיתכנות ואת האפקטיביות של שיטות הפחתת הסיכונים כחלק מתהליך הנדסת המערכת הכוללת. במסגרת הסקרים השונים יש להציג את הסיכונים הנוכחיים, את חומרתם ואת הערכות ההסתברות שלהם ואת מצב מאמצי הפחתת הסיכון.

#### **שלב 6: אמת וודא את הפחתת הסיכונים**

אמת את היישום ואת האפקטיביות של האמצעים הנבחרים להורדת הסיכון באמצעות ניתוח, בדיקה, הדגמה או בדיקה מתאימים. יש לוודא כי תיעוד האימות מופיע ב-HTS.

#### **שלב 7: קבלת הסיכונים (לפני חשיפת גורמים לסיכון)**

לא תמיד ניתן להקטין את הסיכונים לרמות מקובלות. לכן לפני מבצוע או ניסוי האמצעים על ידי אנשים, יש להגדיר את הסיכונים הידועים הקשורים למערכת. רמת הסיכון מחויבת להיות מקובלת על הסמכות שהוגדרה לכך. תצורת המערכת והתיעוד הנלווה התומכים בהחלטת קבלת הסיכון הפורמלית יישמרו לאורך חיי המערכת. החלטה על קבלת סיכון שיש לה הצדקה בשלב פרויקט מסוים ייתכן כי תתייטר עם הזמן, ונכון שהנושא יתועד. ההטמעה בשדה, קבלת לקחים או ניסיון ממערכות אחרות יישמשו לביצוע הערכה מחודשת של הסיכונים שנשארו כיוון שיתכן שסיכונים מסוימים הוערכו בצורה גבוהה או נמוכה מדי.

#### **שלב 8: ניהול סיכונים בכל מחזור החיים**

לאחר מבצוע של המערכת יש להשתמש בתהליך לזיהוי סיכונים ולשמור אותם ב-HTS. לאורך מחזור החיים יש לבחון כל שינוי שיכלול, בין השאר, את הממשקים, המשתמשים, החומרה, התוכנה, נתוני התקלות או המשימות של המערכת. נדרש כי התהליכים יתקיימו כדי להבטיח שהמשתמשים ומנהלי המוצר יהיו מודעים לשינויים אלה, למשל באמצעות הכללתם כחלק מתהליך בקרת התצורה או שחרור גרסה. אם יתגלה סיכון חדש או שייקבע סיכון ידוע שיש לו רמת סיכון גבוהה יותר מזו שהוערכה קודם לכן, הסיכון החדש או

המתוקן יצטרפו לעבור ניתוח של הסיכונים ומתן המלצות על אמצעים להפחתת הסיכון, במיוחד כאלו שימזערו טעויות אנוש.

### סיכוני תוכנה

החידוש של MIL-STD-882E הוא בנתח המשמעותי שהוא מייחס לנושא התוכנה. בשנת 2016 פורסם מדריך עזר לנושא התוכנה שמתייחס גם לסוגיית הערכת הסיכונים בתהליך פיתוח "זמיש" - "זריז וגמיש" (Agile). הסיבה לשינוי נבעה מההבנה כי הערכת הסיכון של תוכנה וכתוצאה מכך מערכות מבוקרות תוכנה או עתירות תוכנה, אינה יכולה להסתמך אך ורק על חומרת הסיכון והסתברותו. קביעת ההסתברות לכישלון של פונקציית תוכנה אחת היא קשה, וברוב המקרים היא אינה יכולה להתבסס על נתונים היסטוריים בדומה לחומרה. התוכנה היא בדרך כלל ספציפית ליישום, ופרמטרי אמינות משויכים לסביבה שבה היא נמצאת. לכן פותחה גישה נוספת שתשמש להערכת תרומות התוכנה לסיכון המערכת. השיטה בוחנת את חומרת הסיכון הפוטנציאלית של התוכנה ואת מידת השליטה שהתוכנה מפעילה על החומרה.

בקרת הסיכונים במערכות עתירות תוכנה מתבצעת בהתאם לטבלאות האלה:

1. טבלת רמות בקרת תוכנה (SCC - Software Control Categories) המגדירה את מידת השליטה של התוכנה;
  2. טבלת קריטיקליות בטיחות תוכנה (SSCM Software Safety Criticality Matrix) מקצה מדדי קריטיקליות תוכנה (SwCI Software Criticality Index) - בהתאם לחומרת הסיכון ולקטגוריות שליטת התוכנה;
  3. טבלת רמת ההקפדה (LOR – Level Of Rigor) הנדרשות בהתאם ל-SwCI הספציפי. למרות הדמיון במראה של מטריצת הערכת הסיכון, ה-SSCM אינה משמשת להערכה של הסיכון אלא משמשת להגדרת המשימות המינימליות הנדרשות בהתאם לרמת השליטה של התוכנה.
- נדרש להעריך רמות בקרת תוכנה מחדש גם אם התוכנה מבוססת על חבילות תוכנה מדור קודם (Legacy). יש לבדוק את הפונקציות הישנות הן בממשקים הפונקציונליים והפיזיים כדי לקבוע האם יש אפשרות להשפעה ברמה הגבוהה ביותר ובגורמים סיבתיים מסוכנים.

רמת שליטת תוכנה	קטסטרופלי I	קריטי II	שולי III	זניח IV
1	SwCI 1	SwCI 1	SwCI 3	SwCI 4
2	SwCI 1	SwCI 2	SwCI 3	SwCI 4
3	SwCI 2	SwCI 3	SwCI 4	SwCI 4
4	SwCI 3	SwCI 4	SwCI 4	SwCI 4
5	SwCI 5	SwCI 5	SwCI 5	SwCI 5

משימות ה־LOR מובאות בטבלה הבאה:

משימות ה־LOR	SwCI
התוכנית תבצע ניתוח של דרישות, ארכיטקטורה, תכן וקוד ותבצע בדיקות עומק ספציפיות לבטיחות.	SwCI1
התוכנית תבצע ניתוח של דרישות, ארכיטקטורה ותכן ותבצע בדיקות עומק ספציפיות לבטיחות.	SwCI2
התוכנית תבצע ניתוח של דרישות וארכיטקטורה ותבצע בדיקות עומק ספציפיות לבטיחות.	SwCI3
התוכנית תבצע בדיקות עומק ספציפיות לבטיחות.	SwCI4
אם מהנדס בטיחות העריך שאין לפריט השפעה בטיחותית, לא יידרשו פעילויות נוספות.	SwCI5

משימות ה־LOR יבוצעו כדי להעריך את רמת הסכנה של המערכת. התוצר של משימות ה־LOR מספקות רמת ביטחון בתוכנות בעלות אספקטים בטיחותיים ומשמשים כפקטור משמעותי בנכונות להקל בנוגע לסיכונים. תוצאות משימות ה־LOR ייכללו בתוכנית ניהול הסיכונים. התרומה של התוכנה לסיכון המערכת, כולל תוצאות של יישום משימות ה־LOR, יתועדו ב־HTS.



## אחרית דבר: סוף מעשה במחשבה תחילה

המהות של הנדסת מערכות היא להביא למימוש של מערכות מוצלחות. ההצלחה של המערכת היא, בחלקה הגדול, הגדרה נכונה של הצורך ובחירה נכונה של החלופה המערכתית בהתאם לדרישות ולציפיות של בעלי העניין.

שאלת הערך של המערכת, המוצר או השירות נמצאת בלב ליבה של הנדסת המערכות. לאורך הספר שאלה זו נידונה מזוויות שונות בהתאם לתהליך הנדסת המערכות.

**סוף מעשה במחשבה תחילה** הוא פתגם עתיק המתאים מאוד לתחום הנדסת המערכות. אלא שהדבר אינו פשוט. ניתוח הצורך, מפגש בין הצורך לפתרון ואפיון הפתרונות ומימוש מסתמכים על ידיעה של הסביבה המבצעית והעסקית, בקיאות בפתרונות הטכנולוגיים ויכולת לרתום את כלל השותפים הרלוונטיים למשימת פרויקט.

מעבר לקשיים ההנדסיים בכל אחד מתחומים אלו לעיתים הצורך אינו ידוע במלואו, ויש שינויים לאורך הדרך.

מול אתגרים אלו, הספר נותן שיטות וכלים רבים המיועדים לעיסוק בשאלת הערך של מערכות: הן שיטות קלאסיות בהנדסת מערכות, כמו QFD, NGT ואחרות, והן תפיסות עדכניות בנושאי ניתוח מערכתי וחשיבה מערכתית.

אלו כוללים הסתכלות מצד הספק ומצד הלקוח, הבחנה בין הנדסת מערכות "קשה" להנדסת מערכות "רכה" ומנהרת המימוש מול משפך האפשרויות. את השיטות התיאורטיות משלימים פרקי הרחבה העוסקים בשאלות מערכתיות, כמו כיצד להבטיח שילוב של המערכת המפותחת במערך מבצעי? כיצד מבצעים תכן קונספטואלי? איך שינויים בדרישות משרתים חשיבה כלכלית בהנדסת מערכות?

הספר כולל תיאור ממוקד ותמציתי של עיקר הידע והכלים בהנדסת מערכות ומציג נושאים אלו בצורה הדרגתית בהלימה לשלבי מחזור החיים של פרויקט, החל בשלב הייזום אל שלב הפיתוח, הקליטה וההטמעה. עם זאת, הספר אינו מתיימר להקיף את כל עולמות הידע הנדרשים בכל פרויקט ולהחליף ניסיון מעשי בהנדסת מערכות, אלא מיועד להניח את תשתית הידע שתשמש כנקודת מוצא להרחבה והעמקה בכל תחום עיסוק ופרויקט הנדרש למימוש תהליכי הנדסת מערכות.

בעיניי, סיכום כל תורת הנדסת המערכות הוא המשפט שהופיע בהקדמה: לא רק לבנות את המערכת נכון, אלא גם, ובעיקר, לבנות את המערכת הנכונה.

זוהי האומנות של הנדסת המערכות, ויש לה מקום מרכזי בספר זה, לא פחות מהשיטות והכלים הכמותיים. כולי תקווה ששילוב זה בין אמנות להנדסה יסייע בידכם, קוראים יקרים, בבניית מערכות המחר.

**אלכס בלכמן**

## נספח: מונחים מרכזיים בהנדסת מערכות

**מערכת (System):** מבנה או אוסף של מרכיבים שונים שמביאים לתוצאות שאינן ניתנות להשגה על-ידי המרכיבים בנפרד.<sup>31</sup>

**מבנה המערכת (System Structure):** אוסף המרכיבים הנכללים במערכת: מודולי חומרה, תוכנה, מתקנים מכניים ואמצעים נוספים.

**התנהגות המערכת (System Behavior):** האופן שבו המערכת פועלת לאורך זמן ובהתאם לאינטראקציה עם סביבתה.

**הפונקציה של המערכת (System Function):** אוסף המשימות שהמערכת אמורה לבצע ולשמן נוצרה.

**מערכת של מערכות (System of Systems):** אוסף מערכות הקשורות זו בזו או המשתפות פעולה לצורך ביצוע משימה מסוימת וקבלת יכולות שאינן אפשריות במערכת אחת.

**הנדסת מערכות (Systems Engineering):** גישה בין-תחומית ואמצעים שמאפשרים מימוש של מערכות מוצלחות.<sup>32</sup> הנדסת מערכות עוסקת בהגדרת צורכי הלקוח והפונקציונליות הנדרשת בשלבים המוקדמים של תהליך הפיתוח, תיעוד הדרישות ולאחר מכן תיכון ואימות בראיית הבעיה השלמה: פעולה, ביצועים, בחינות, ייצור, עלות ולוחות זמנים, אימון ותמיכה עד שלב הגריטה.

**ערך המערכת (System Value):** התועלת מפעולת המערכת. ערך המערכת מציין את השיפור הצפוי או הנצפה בסביבה המבצעית או העסקית כתוצאה מהמערכת או המוצר.

**לקוח (Customer):** האדם המזמין את המערכת או המשלם עבורה. לדוגמה, משרד הביטחון הוא הלקוח בפרויקט פיתוח רובה חדש.

**משתמש (User):** אדם או ארגון המיועד להפעיל או לבצע שימוש במערכת או במוצר. לדוגמה, חייל הוא המשתמש בפרויקט פיתוח רובה חדש.

**בעל עניין (Stakeholder):** אדם או ארגון המשפיע או מושפע במישרין או בעקיפין מהמערכת או הפרויקט.

**צורך (Need):** יכולת או פעילות שלא ניתן לממש באמצעים קיימים או שנדרש עבורה אמצעי חדש שיחליף את הנוהג או האמצעי הקיים.

---

<sup>31</sup> על-פי המועצה הבינלאומית להנדסת מערכות (INCOSSE - [www.incose.org](http://www.incose.org)).

<sup>32</sup> שם.



מהנדסי המערכות הראשונים היו אנשי האשכולות והמדענים פורצי הדרך לאורך ההיסטוריה. אנשים בעלי כישרון וחשיבה יוצאת דופן תכננו ובנו מערכות ששינו את העולם עוד לפני שהנדסת מערכות הייתה לתחום הנדסי ומקצוע.

מהנדסי המערכות הם אנשי האשכולות של ימינו. במאה ה-21, מהנדסי מערכות מובילים אפיון ותכן של מערכות מורכבות, רבת-תחומיות ומשוכללות בתחומי תעופה, חלל, רפואה, תקשורת, אמצעי לחימה ועוד.

ספר זה הוא כלי בידו של מהנדס המערכות לאורך דרכו המקצועית. הספר כולל ידע מתודולוגי בתהליכי הנדסת המערכות, גיבוש חלופות וקבלת החלטות. הספר מתאר את תהליכי הנדסת המערכות מנקודות מבט שונות, ומספק דוגמאות ולקחים מן העולם המסחרי והצרכני ומן העולם הביטחוני.

על המחבר:

ד"ר אלכס בלכמן הוא מהנדס מערכות בכיר ומרצה בתחומי טכנולוגיה וחדשנות. במהלך השנים עסק בפרויקטים מרכזיים בצה"ל בתחומי אמצעי לחימה, הגנת העורף, מערכות מידע, סימולציה, אימון והדרכה. ד"ר אלכס בלכמן הוא בוגר הטכניון בהנדסת מחשבים, מוסמך בהנדסת חשמל ובעל תואר שלישי בהנדסת ניהול מידע.

