

## 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".



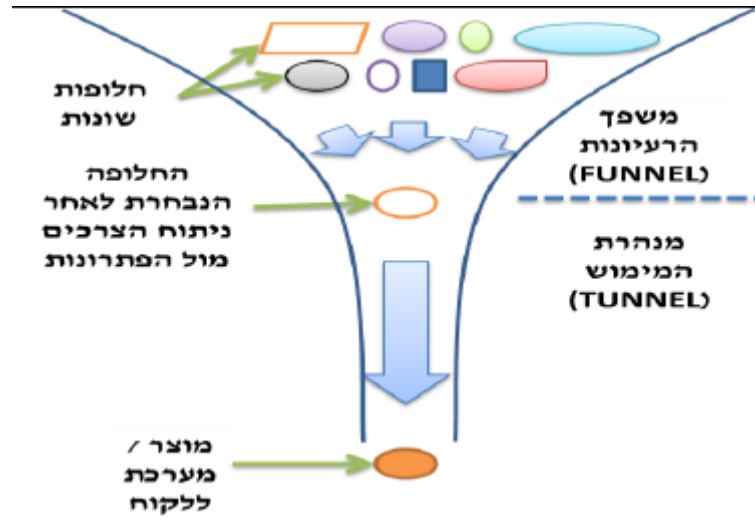
דגמים שונים של רכבי נוסעים מקטגוריות שונות

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 ניידת 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 שלשמשם נוצרה המערכת.

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

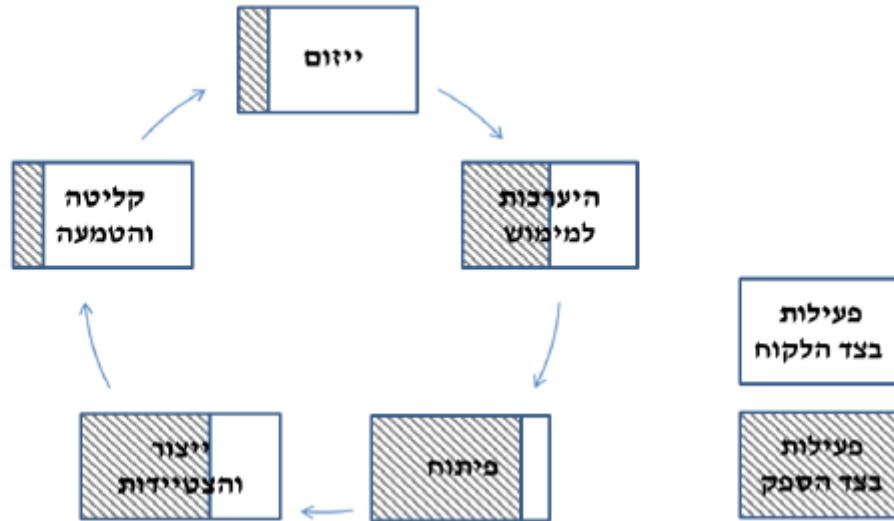
יש שיטות שונות לסווג פרויקטים. אל"ם (מיל") משה שפריר הציג את אחת הדרכים הכוללת שלושה סוגי פרויקטים: פרויקט פנימי, פרויקט יצרן־צרכן ופרויקט ספק־לקוח. לצורך הפשטות נציג להלן את הממשקים והתפקידים הניהוליים במהלך פרויקט ספק־לקוח, שהם דומים בעיקרם לנעשה בפרויקט פנימי. בפרויקט יצרן־צרכן התקשורת בין המפתח והמשתמש 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 מאליה 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.

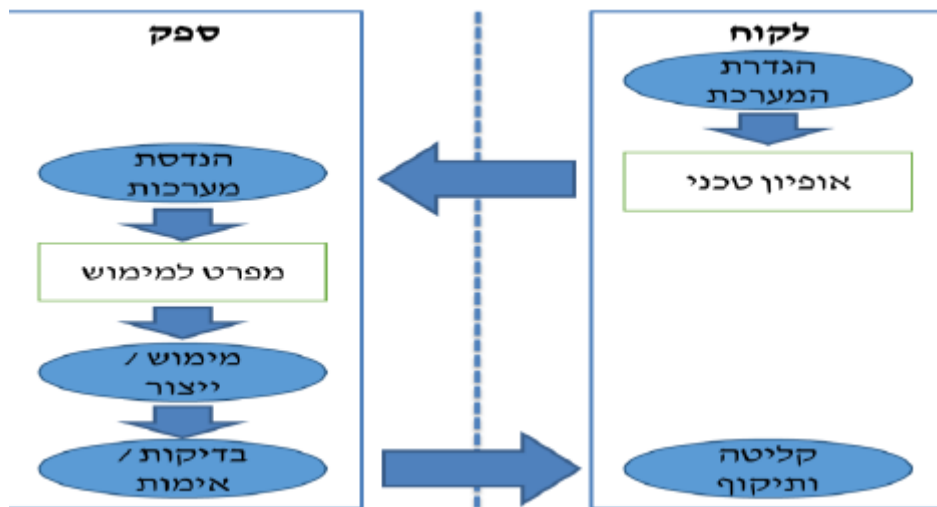
בפרויקט ספק-לקוח המבוסס על תהליך התקשורת, כמו פיתוח טיל או מטוס על-ידי תעשייה ביטחונית עבור שימוש הצבא, הלקוח מבצע את הגדרת המערכת. לרוב כך גם הדבר בפרויקט פנימי. בפרויקט יצרן-צרכן, כמו פיתוח של מכשיר טלפון נייד חדיש, צוות של היצרן מבצע את הגדרת המערכת, והוא מנסה בשיטות שונות לדמות ולאפיין את הדרישות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

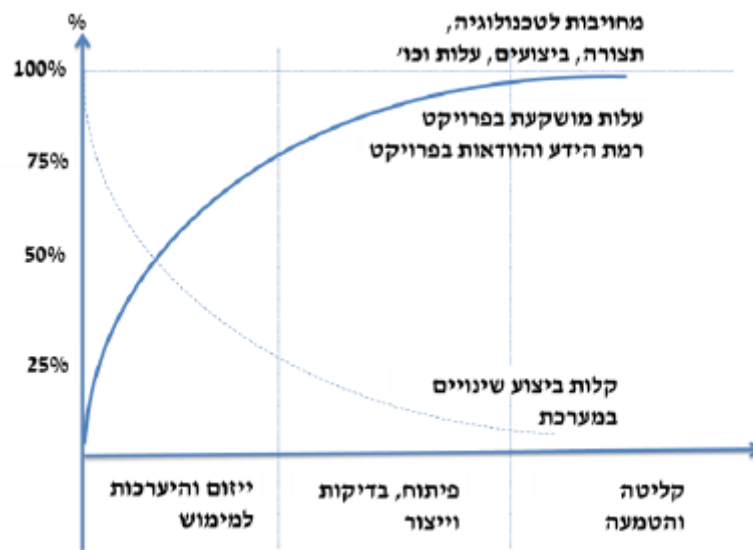
1. האם נדרשת גדר תלתלית מעל הגדר או על הקרקע?
2. האם נדרש מכשול לרכב? ואם כן, מאיזה סוג?
3. האם נדרשת יכולת התרעה? מאיזה סוג?

### 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-בקטריות**

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.