

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 יצרך 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).

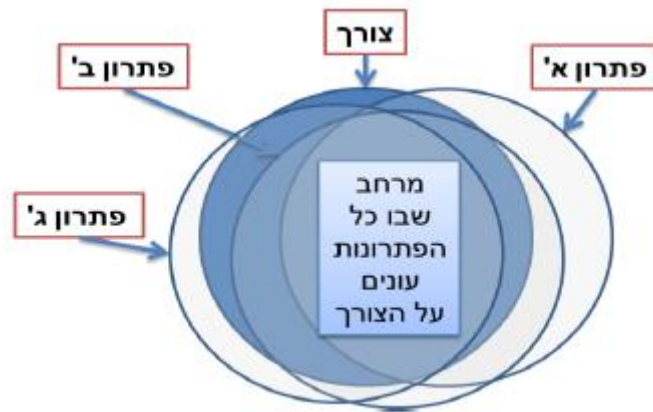
צורך או פתרון?

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:



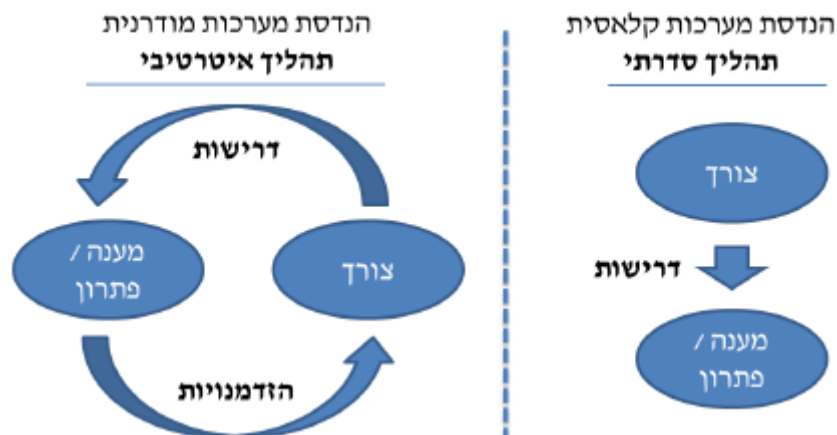
צורך מול פתרון

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 וחיונית 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.²⁰ 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.

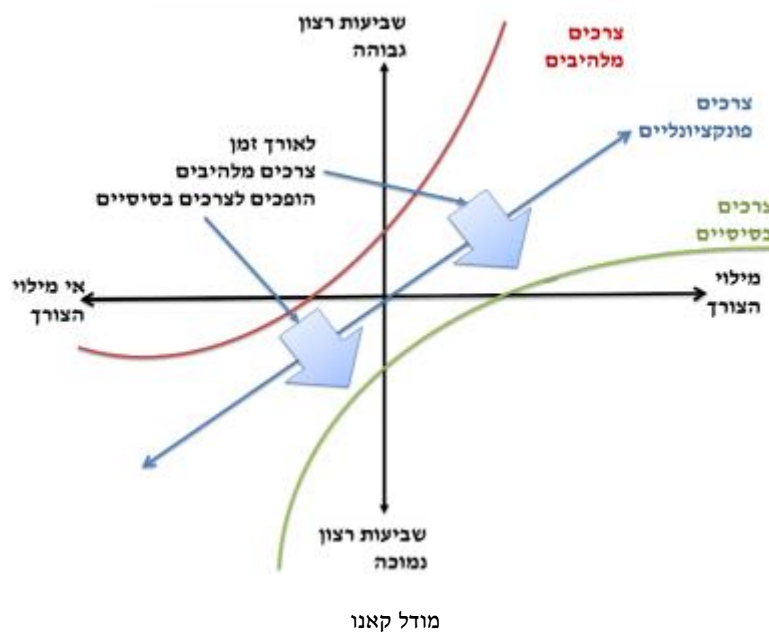
צרכים בסיסיים. בבחינת מובן מאליו בעיני הלקוח, ולכן לעיתים הלקוח עשוי לא לצייןם באופן מפורש. צרכים בסיסיים מגדירים מאפייני סף: מוצר ללא תכונות אלו יתקשה להיכנס לשוק או להישאר בו. אם מאפיינים העונים לצרכים אלו אינם משולבים במוצר, אי שביעות הרצון של הלקוח היא גבוהה. אם הם

²⁰ 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 ביצועים, 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.

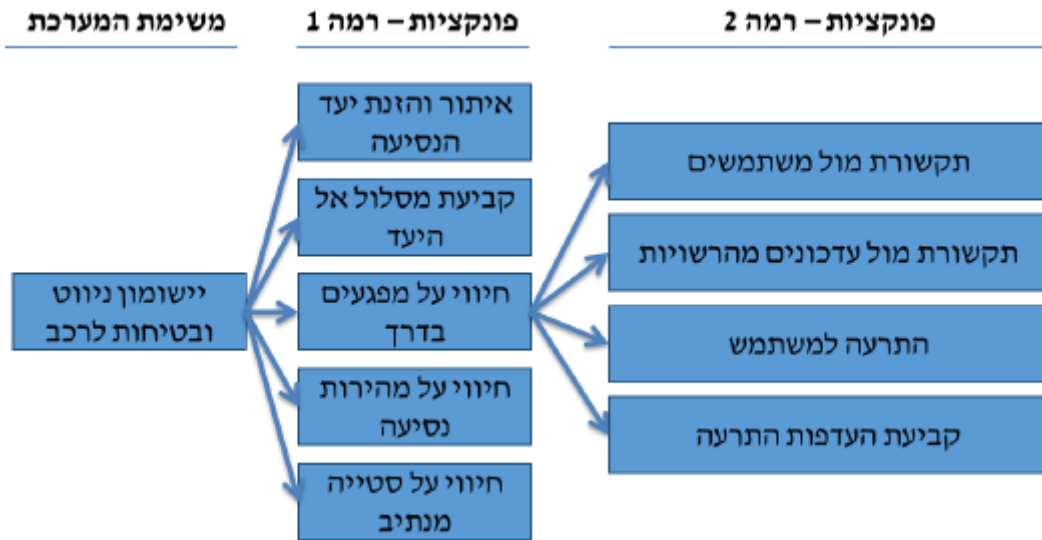
מצב נוכחי	תיאור	תנאי קדם / קלט	שחקנים משתתפים	טריגר למצב הבא	מצב הבא	פלט
1	הגעת חולה לקופת החולים	הוזמן מראש תור לרופא	החולה, מערכת זימון תורים	החולה מעביר כרטיס בעמדה	2	פתק עם חדר הרופא ומס' תור
2	המתנה לרופא	הרופא הודיע שסיים טיפול בחולה הקודם	החולה, מערכת זימון תורים	המערכת מציגה שתור החולה להיכנס 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

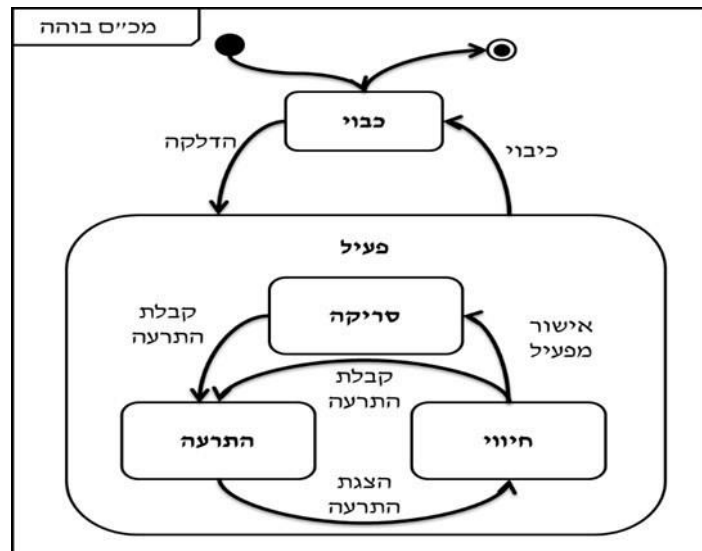
תרשים הניתוח הפונקציונלי יכול לשמש לאיתור צרכים ומאפיינים נדרשים עבור המערכת. בדוגמה לעיל פונקציית תקשורת מול עדכונים מהרשויות מחייבת בנייה של ממשק מתאים. נושא זה אינו בהכרח אחת מהדרישות המרכזיות, והוא גם עשוי לא לעלות כחלק מדרישת הלקוח. הניתוח הפונקציונלי מאפשר לקבל נקודת מבט שלמה על המערכת ולעלות על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

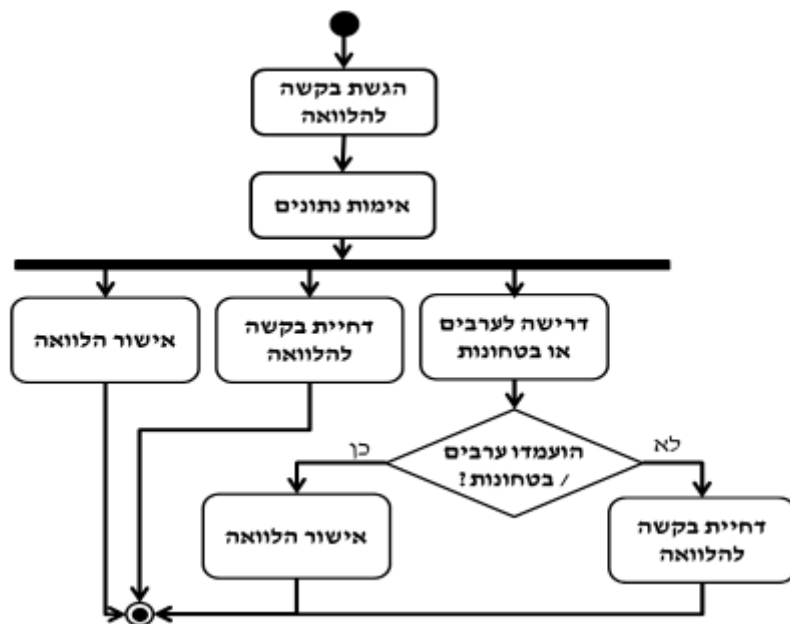
תרשים מכונת מצבים - מבטא את מצבי המערכת והמעברים ביניהם. העיגול המלא בתרשים מייצג את המצב ההתחלתי והעיגול עם הנקודה השחורה מייצג את המצב הסופי.

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 מנתיב
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
150 דקות בתוכנית חסכונית	30 דקות בתוכנית חסכונית	100 דקות בתוכנית חסכונית
3 תוכניות הדחה, הגדרה ידנית	5 תוכניות הפעלה, הגדרה ידנית	7 תוכניות הפעלה, הגדרה ידנית
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
3,000 שקלים	2,000 שקלים	2,500 שקלים
אפשרות לשירות טכני מרחוק (IoT)		זיהוי אוטומטי של מדף ריק (לחיסכון במים)

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.

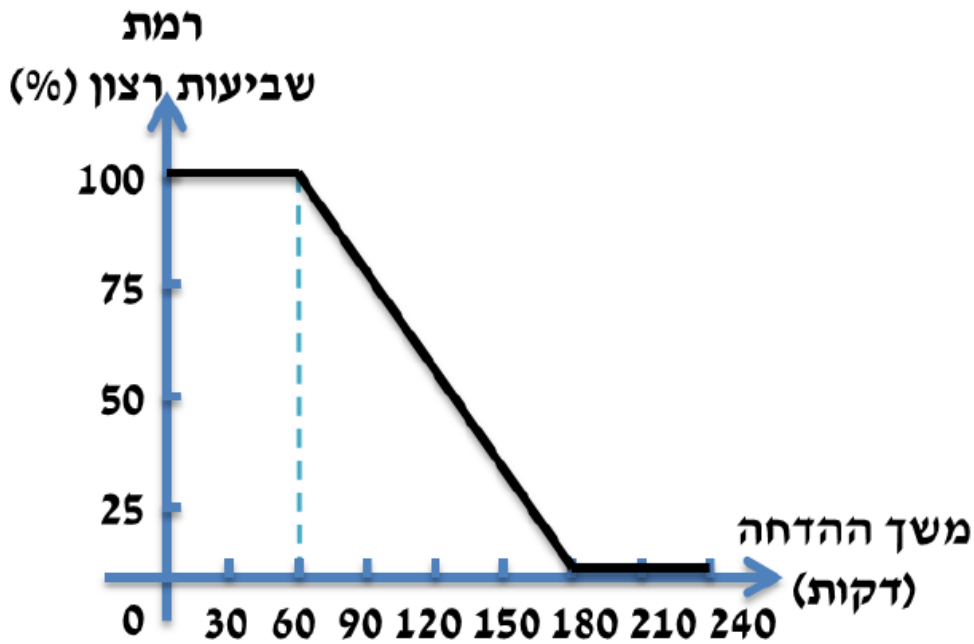
	חשיבות (מתוך 100%)	רמת הניקיון	משך ההדחה	אופן הפעלה	נפח מועיל	כמות מים להדחה	קו"ט להדחה	הערכת מוצרי הייחוס
								5 4 3 2 1
איכותי בשטיפה	40%	●				○	△	■ ★ ◇
מהיר	30%	●	●		△	○	○	■ ★ ◇
נוח להפעלה	10%	○	△	●				■ ★ ◇
חסכוני בהפעלה	20%	○			●	●	●	■ ★ ◇
חשיבות גולמית		720	280	90	210	390	310	■ מוצר ייחוס א'
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.

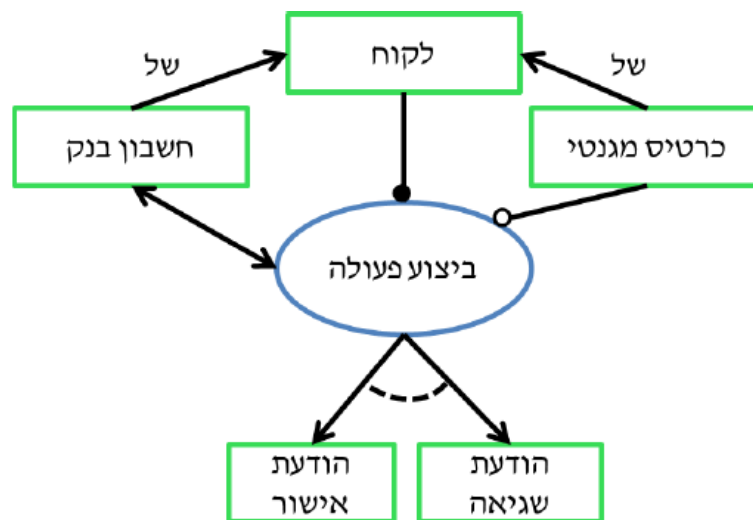
החלטה ארכיטקטונית היא הבחירה, למשל בין חלופות הנעה לרכב: מנוע בנזין, הנעה חשמלית או אחרת. מאפיינים חשובים של הפתרון נקבעים בעצם הבחירה בארכיטקטורה. לדוגמה, הבחירה במנוע בנזין מחייבת תכנון של מערכת הולכת הדלק, מיקום מכל ופתח מילוי ועוד - דברים שעובדים אחרת לגמרי במנוע הנעה חשמלית. בה בעת בשלב זה אין התייחסות 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 N² 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 N²

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 N² 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 N² 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 N² עבור מחשב שולחני

הרחבה: תכן קונספטואלי עם מתודולוגיית עצמים-תהליכים (OPM)/דב דורי,²¹ חנן כהן²²

פיתוחים רבים במדע ובהנדסה מתחילים בשרבוט רעיונות ראשוניים על מפית או על פיסת נייר. בעבר נהגו ממצאיים 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 מודל²³ 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.


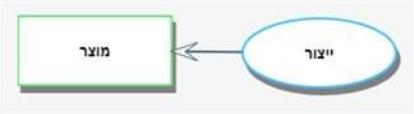

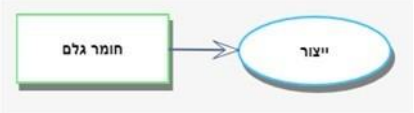

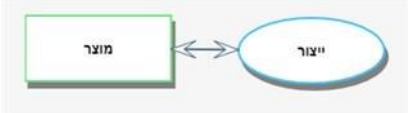
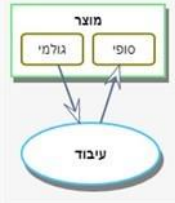
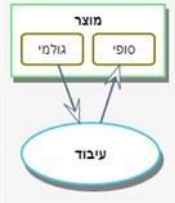

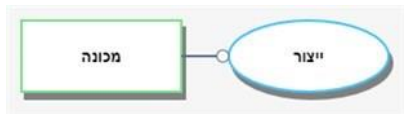

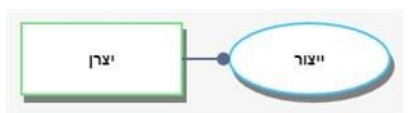
מתודולוגיית OPM אינה רק שפה למידול אלא, כשמה כן היא, גם מתודולוגיה. כך למשל, כאשר ניגשים למדל (להפוך למודל) מערכת פתרון לבעיה, לא מתחילים במידול הפתרון מייד, אלא קודם כל מגדירים את הקריטריונים לפתרון מוצלח. בוחרים לפחות שלושה פתרונות מסוגים שונים ואחרי מידול שלהם בוחנים אותם אל מול הקריטריונים להצלחה 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.

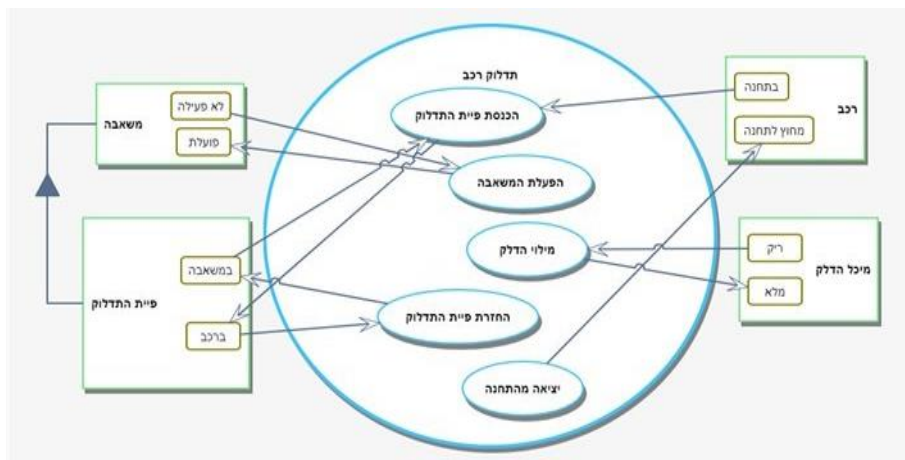
²¹ פרופ' דב דורי הוא ראש המעבדה למידול מערכות בפקולטה להנדסת תעשייה וניהול בטכניון ופרופסור אורח ב-MIT. המציא ופיתח את שיטת OPM למידול קונספטואלי וניתוח מערכות.

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

²³ 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
קשר יצירה מציין הפקת אובייקט שלא היה קיים קודם לכן.		
קשר צריכה מציין חיסול אובייקט שחדל להתקיים עם תחילת התהליך		
קשר השפעה מציין שינוי של מצב האובייקט על-ידי התהליך ללא פירוט מצב המוצא והיעד.		
זוג קשרי קלט/פלט מציין שינוי של מצב האובייקט על-ידי התהליך עם פירוט מצב המוצא והיעד.		
קשר כלי האובייקט הוא אמצעי הנדרש לביצוע התהליך אך הוא אינו עובר התמרה.		
קשר סוכן 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, מונחת 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.