קול העורך

קורא יקר

בשעה טובה אתה מחזיק בידך את המהדורה השלישית של "קול המערכות" - כתב העת של מהנדסי המערכות בישראל.

מהדורה זו יוצאת לאחר הכנס הישראלי הרביעי להנדסת מערכות, כנס INCOSE הבינלאומי שהתקיים בסן - דייגו, קליפורניה ביולי 2007, בכינוס השני למחקר בהנדסת מערכות SER' 08 שנערך בטכניון בינואר 2008 ולקראת יום העיון לזכרו של ד"ר יוסף לוין שיתקיים ביום ד' 13.2.08 בבית ח"א. סיכומים, רשמים ופרטים על אירועים אלה תוכלו למצוא בגיליון זה.

מהדורה זו עומדת בסימן חילופי יושבי הראש של INCOSE_IL. אנו נפרדים מדר' אביגדור זוננשיין המסיים כהונה בת שנתיים, ומקדמים את פניו של מר עוזי אוריון שנכנס לתפקידו באוקטובר 2007. בגיליון זה נביא את חזון הנדסת המערכות, אתגרי INCOSE_IL , סיכום סטאטוס הפעילות ותכניות שנת 2008 במאמר משותף של היו"ר היוצא והיו"ר והנכנס וכן את דברי הפתיחה של עוזי אוריון היו"ר הנכנס.

אנו משתדלים לשמור על הרמה הגבוהה של המאמרים המוצגים בכתב עת זה. והפעם מובאים שני מאמרים מעניינים:

המאמר הראשון עוסק בנושא:

שילוב שיקולי בטיחות המוצר וניהול הבטיחות בתהליך פיתוח טכנולוגי.

מאת: *ד"ר מיכאל מהרי"ק וד"ר שמשון ארואטי.*

המאמר מציג מתכונת שיטתית המקובלת, מזה שנים, במספר ארגונים טכנולוגיים מובילים בישראל, לשילוב שיקולי בטיחות וניהול הבטיחות בתהליך פיתוח.

דר' מיכאל מהרי"ק הוא מנתח סיכונים, מהנדס בטיחות וממונה בטיחות במגזר הטכנולוגי-תעשייתי. עוסק בפיתוח, בניסויים, בהערכות סיכונים ובניהול בטיחות בטכנולוגיות מורכבות ועתירות-סיכונים, וכן בניהול סיכונים ובניהול הבטיחות בעיסוקים אחרים כדוגמת אירועים המוניים וספורט.

דר' שמשון ארואטי הוא מהנדס תכן לבטיחות ואמינות ומנתח סיכונים בחברת רפאל בע"מ. בעל ניסיון בתכן לבטיחות ובהערכות סיכונים למערכות נשק ולמערכות עתירות סיכון אחרות בתעשייה הביטחונית בישראל ובעבר - בתעשייה הגרעינית ובתעשיית החלל בארה"ב. מקדיש חלק מזמנו להוראה בנושאים אלו.

כמצופה מהשילוב של שני "אריות בטיחות" המאמר משלב ידע תיאורטי והתמודדות עם דילמות מעשיות, הדגש בו הוא על הטמעת בטיחות המוצר כבר בתהליך הפיתוח וזה מה שעושה אותו מאוד רלוונטי לקהיליית מהנדסי המערכות.

המאמר השני דן בנושא:
תיכון מערכות בעלות כושר הסתגלות באמצעות שימוש באופציות ארכיטקטוניות
Adaptability by Means of Architecture Options Designing Systems for
מאת: *דר' אבנר אנגל ופרופ' טייסון בראוינינג.*

המאמר עוסק במערכות מסתגלות. הנושא של תכן מסתגל Adaptive Design זוכה בשנים האחרונות להתעניינות רבה. רק מעט פרסומים קיימים בנושא וקהיליית הנדסת המערכות מייחלת לרעיונות איך להתמודד עם מציאות משתנה בצורה מהותית אפילו במהלך הפיתוח. רוב הפרסומים הקיימים בנושא באים ממוסדות אקדמאים ומכוני מחקר ועדיין רחוקים מלתת מענה מעשי למציאות האדפטיבית.

דר' אבנר אנגל עוסק בכתיבת תוכנה, וניהול פרויקטי מערכות עתירות תוכנה. עבד בתעשייה האווירית במסגרת פרויקט הלביא, פרויקטי מזל"טים ופרויקטי מחקר בינלאומיים במימון הקהילה האירופית.

טייסן בראון הוא פרופסור חבר ב- TCU (Texas Christian University) הוא עוסק במחקר בנושא מודלים של תהליכים מסתגלים והיבטים נוספים של ניהול תוכניות.

המאמר הוצג בכנס INCOSE 2006 ונבחר על ידי INCOSE כדוגמא לכתיבה טובה של מאמר בתחום המחקר התיאורטי.

אנו חוזרים וקוראים לכם, מהנדסי המערכות בישראל, לתרום מניסיונכם ומהידע שלכם ולשתף בו את קהיליית הנדסת המערכות שלנו. אנו מזמינים אתכם לכתוב מאמרים, תגובות או להעלות נושאים לדיון שניתן להם במה.

כמו-כן אנו מבקשים לקבל משוב ולדעת לכמה קוראים מגיע כתב העת כמה פותחים אותו, כמה קוראים ומה קוראים ומה דעתכם על החומר שאתם מוצאים בו. נשמח לקבל משובים ותגובות מכם.

קריאה מהנה
ולהתראות בכנס

דר' עמי הרי
עורך

דבר היו"ר
שלום לקוראים

אם אנו מנסים לבחון מהם השינויים שחלו בעת האחרונה בתהליכים התעשייתיים, אפשר להבחין שהגורם המשתנה במהירות הרבה ביותר הוא קיצור לוחות הזמנים בהם מוצר נדרש להגיע לשוק. המערכות נעשות מורכבות יותר, רב תחומיות ודורשות התמחויות מקצועיות עמוקות יותר על מנת לעמוד בתחרות.

אפילו בשוק הביטחוני, הרבה לקוחות מעוניינים "למשש" את הסחורה לפני רכישתה, דבר שלפני חמש שנים כמעט ולא נשמע.

שינויים בדרישות הלקוח עקב תכונות חדשות, דרישות חדשות, הוספת יכולות וסיבות אחרות הינן תכופות ותהליכי פיתוח המוצרים חייבים לספוג אותם ביעילות. מבחינת ידע, העולם קטן והופך ל"כפר גלובלי", שם כולם מכירים את כולם, התחרות עזה וקשה להסתיר מידע.

כל אלה מחייבים שינוי הערכות בתהליכי הפיתוח שמאופיינים בחיזוק והטמעת שיטות הנדסת המערכת בכל המפעלים שעוסקים בפיתוח מוצרים ומערכות מורכבות: הפיתוח חייב להיות יעיל, תכליתי וללא טעויות, חייבים למצוא את נקודות הבידול בתחרות ולחזק אותן, יש להכיר את כל צרכי הלקוח וציפיותיו ולענות עליהם במלואם, המוצר, תוצר הפיתוח חייב להיות אמין, פועל היטב וקל להפעלה ותחזוקה ולבסוף, יש למצוא דרכים להטמעה מהירה של המוצר אצל הלקוחות.

תהליכי הנדסת המערכת הקיימים והמתפתחים נועדו לתת תשובה מתאימה לכל הסוגיות הללו תוך שיפור תהליכי הפיתוח והיישום והאצתם. אנו, כארגון שוקדים על לימוד, פיתוח והנחלת השיטות למעוניינים בישראל, תוך מתן דגש על שיפור הקשר עם החברות האזרחיות והחברות הקטנות והבינוניות, מהם אנו מעוניינים ללמוד על השיטות שפותחו בהם ולחלוק עימם את הידע שהתפתח ברובו בתעשיות הביטחוניות הגדולות.

אני שמח על הוצאת עיתון "קול המערכת" השלישי, שהוא הראשון בתקופת כהונתי כיו"ר הארגון. כמו העיתונים הקודמים הוא מצטיין במאמרים מעניינים ברמה גבוהה ואני מקווה שיעניין את מגוון מהנדסי המערכות.

אנו מתכננים שנת פעילות מלאה ומגוונת, שתכלול, פרט לעיתון, כנסים, מפגשים מקצועיים וסדנאות. פירוט קצת יותר רחב על פעילותנו ב-2007 והתוכניות ל-2008 אפשר לראות בהמשך.

האיגוד חרט על דיגלו, כיעד לתקופה הקרוב, להרחיב את חוג חבריו עם מהנדסים מחברות קטנות ובינוניות, בעיקר מאלו שאינן בעלות רקע בטחוני. נשמח מאד להחליף ידע עם אנשים אלו, ללמוד מהם ולשתפם עם ניסיוננו. אשמח להגיע למפעלים ולספר על הפעילויות שלנו, על שיטות הנדסת מערכות ועל התרומה האפשרית לחברות.

למרות שתוכנית העבודה שלנו מלאה למדי, אנו פתוחים ליוזמות ורעיונות לפעילויות נוספות. נשמח, כמובן, להרחיב גם את חוג הפעילים באיגוד.

לאחרונה שינינו מעט את סמל הארגון והוספנו כיתוב באותיות עבריות, להקטנת "מעטה הסודיות" שסביב הארגון.

מהנדסים מוזמנים לפנות אלי אישית, לשיחה, לגלגול רעיונות ולהעלאת רעיונות.

בברכה
עוזי אוריון יו"ר איגוד הישראלי להנדסת מערכות

יעד וייעוד INCOSE_IL

יעד

להיות האיגוד המקצועי של מהנדסי המערכות בישראל ולתרום באופן משמעותי לתחום הן בארץ והן בעולם.

ייעוד

לטפח ולקדם את מקצוע הנדסת המערכות ויישומו בתעשייה, באקדמיה, בצה"ל ובמוסדות הממשלה. זאת, על ידי עידוד גישות רב-תחומיות ליצירת פתרונות טכנולוגיים שהולמים את הצרכים להם הם מיועדים

דרכי הפעולה של INCOSE_IL

- הארגון משמש כצומת להנדסת המערכות בתעשייה, באקדמיה ובמוסדות הממשלה
- מעודד ומקדם שת"פ בין תעשיות ישראליות בהנדסת מערכות
- מארגן סדנאות מומחים, מפגשים טכניים, ביקורים בחברות, כנסים מקצועיים והוצאת עיתון מקצועי
- מעמיק את שילוב התעשיות האזרחיות והתעשיות הקטנות בפעילות הנדסת המערכות.
- מטפח את החינוך לחשיבה מערכתית והנדסת מערכות הן באקדמיה והן בקרב הנוער ומקדם את המחקר בתחומים אלו בישראל
- ממליץ על תקני הנדסת מערכות ומעודד השימוש בהם
- ממסד את ישראל כאחת המובילות בעולם בתחום המחקר בהנדסת המערכות
- יצר אתר אינטרנט להפצת מידע לגופים המקצועיים ותקשורת נוחה
- מעודד מצוינות מקצועית ע"י בחירת מהנדס מצטיין ומתן אותות הוקרה
- מטפח שיתוף פעולה עם אגודות מקצועיות אחרות ומכוני מחקר בתחומים רלוונטיים
- מקבל הנחיה וקווי פעולה מצוות היגוי של ממנהלים בכירים במשק

ארגון ותפעול INCOSE_IL

- הינו הסניף הישראלי של INCOSE, המשתייך לאזור 3. אזור זה כולל את הסניפים האירופאים, הישראלי והדרום אפריקני.
- INCOSE_IL פועל בחסות אילטם
- ישנו הסכם פורמאלי לשיתוף פעולה בין אילטם ו-INCOSE
- חברי אילטם זכאים ליהנות מכל הפעילויות המקומיות של הארגון
- יחידים יכולים להיות חברים ב-INCOSE וליהנות מהפעילויות הבינ"ל של INCOSE, לרבות הפעילויות של הסניף הישראלי
- אילטם מסבסדת את פעילויות הארגון שאינן מכוסות במלואן על ידי תשלום דמי ההשתתפות של החברים

נושאים ש-INCOSE_IL עוסקת בהם

- הטמעת כלים ומתודות קיימים (כגון ניהול דרישות, בחירת מחזור החיים)
- שיפור היכולות המקצועיות בתחומי הנדסת המערכות בתעשייה, באקדמיה ובקרב גורמי הממשלה והצבא
- הנחיית תהליך התיכון המערכתי
- בנייה ואימות של מודלים לחיזוי וסימולציה של התנהגות מערכות מורכבות
- פיתוח שיטות לאינטגרציה בתנאי אי ודאות קשים- שיטות ושילובן
- פיתוח תהליכי בחירה אובייקטיביים של מהנדסי מערכות ושיפור עבודת צוות (עם הטכניון ו-HIT)
- פיתוח מתודולוגיות וכלים חדשים לשיפור יכולות הנדסת המערכות
- שיפור הכלים והתהליכים לאיתור וניהול אפקטיבי של סיכונים
- השתתפות בהכנת תוכניות לימודים להכשרת מהנדסי מערכות בטכניון ובמוסדות אחרים
- פיתוח שיטות להערכה כמותית של תהליכי הנדסת המערכת (עם הטכניון)
- לימוד והעמקת תהליכי קבלת החלטות בתהליך הפיתוח
- הרחבת פעילות החברות הלא ביטחוניות בארגון

INCOSE_IL - סטאטוס ותוכנית 2007-2008

ד"ר אביגדור זוננשיין ועוזי אוריון, INCOSE_IL

- ארגון מהנדסי המערכות בישראל INCOSE_IL הפועל במשותף עם אילטם - איגוד משתמשים לטכנולוגיות מתקדמות בתעשיות משולבות עתירות ידע, מרכז את פעילויות הנדסת המערכות ומקדם את מגוון האספקטים של הנושאים המקצועיים.

- הארגון לקח על עצמו יעד להרחיב את חוג המשתתפים בקרב החברות שאינן ביטחוניות ולהעמיק את החינוך להנדסת מערכת במוסדות הישראליים. אילטם ממקד ומרחיב את פעילותו בנושאי הנדסת המערכות ובכוחות משולבים הפעילות בשנת 2007 הייתה ענפה וברוכה.

- השנה התקיים הכנס הרביעי להנדסת מערכות במרץ 2007 עם משוב חיובי מאוד על הרמה המקצועית והשתתפות ערה של למעלה מ- 400 מהנדסי מערכת. הכנס התקיים תוך שיתוף פעולה פורה עם הטכניון שהתבטא בארגון היום השלישי של הכנס בטכניון בנושא מודלים וסימולציות בשירות הנדסת המערכות. קיימנו שני מושבים מיוחדים בכנס: מושב "הנדסת מערכת שייכת לצעירים" בו הציגו תלמידים פרויקטים מערכתיים שהונחו ע"י מהנדסי מערכת, ומושב Tool Vendor Challenge בו ספקי כלים הציגו פתרונות לבעיה מערכתית.
- קיימנו גם יום עיון למחקר בהנדסת מערכת בשיתוף הטכניון ומרכז גורדון. יום העיון היה הצלחה גדולה מבחינת הרמה המקצועית וכן היקף המשתתפים בכינוס (כ- 100 משתתפים). בעקבות הצלחה זו, ערכנו יום עיון מוצלח נוסף ב-2008.
- נמשכת הפקת העיתון המקצועי "קול המערכת" בעריכת ד"ר עמי הרי.
- נערכו, בארגונה המוצלח של רויטל גולדברג, סידרת ביקורים במפעלים המצטיינים בהנדסת מערכות.
- הותנעו מספר קבוצות עבודה במודל שכולל גם הנחיית מומחה מחו"ל בשלב ההתנעה.
- שתי פעילויות קיימות:
  - קבוצת עבודה ניהול אינטגרציה (מנוהלת ע"י עזי אוריון)
  - קבוצת עבודה מתודולוגיות וכלים (מנוהלת ע"י ד"ר עמיר תומר).

- בשלבי התנעה - קבוצת עבודה בנושא ניהול סיכונים. רעיונות נוספים, יתקבלו בברכה.
- נוצר שיתוף פעולה פורה עם מרכז גורדון להנדסת מערכות בטכניון, אשר נתן חסות ומימן הבאת מרצים מחו"ל בכנסים שלנו, וכן השתתף במימון יום העיון להנדסת מערכות. כמו כן, קיים שת"פ מעולה עם מנה"ר / היחידה לתיעוש / תוכנית המצוינות בהבאת מרצים וקיום סדנאות משותפות. יצרנו גם שיתופי פעולה מקצועיים עם איגודים מקצועיים כמו - האיגוד הישראלי לניהול פרויקטים PMI והאיגוד הישראלי לאיכות - ISQ.
- יזמנו ויצרנו מתכונת להוקרת אנשי הנדסת מערכת ישראלים בכירים ומצטיינים. תעודות ההערכה וההוקרה הוענקו בטקס הפתיחה של הכינוס הרביעי של INCOSE_IL.

  - תעודת חבר כבוד הוענקה ל-3 אישיים חשובים ותורמים ב-INCOSE_IL
    - ד"ר יוסי לוין ז"ל
    - ד"ר זאב בונן
    - ד"ר עובדיה הררי
  - תעודת עמית של INCOSE_IL הוענקה לשני הנשיאים לשעבר של INCOSE_IL
    - יעקב קגן
    - ד"ר מיכאל וינוקור
  - תעודות מהנדס מערכות מצטיין של השנה הוענקו ל-4 מהנדסי מערכות מצטיינים
    - גריגורי גיישיס
    - פאול פרידמן
    - רויטל גולדברג

- יניב רוזן
  - תעודת מאמר מצטיין בכנס INCOSE_IL, הוענקה לד"ר דוד סטרימלינג.

- במסגרת חינוך הדור הצעיר לחשיבה מערכתית, יזמנו והתנענו פרויקט מיוחד יחד עם רשת אורט ישראל, בו מהנדסי מערכת מנחים תלמידים בפרויקטים מערכתיים במסגרת המדעית-טכנולוגית של רשת אורט. בשלב זה הותנעו 8 פרויקטים מונחים.
- במהלך השנים עדכנו ושדרגנו את אתר INCOSE_IL כך שהוא כולל מידע הנחוץ למהנדסי מערכת. לאחרונה גם שודרגה הצורה החיצונית של האתר.
- בתהליך הקמה צוות היגוי בכיר המורכב ממנהלים במשק הישראלי שישמש מעין "מנחה" לפעילות INCOSE_IL.
- אנשי INCOSE_IL פעילים גם במסגרת הארגון הבינ"ל INCOSE - הצגת מאמרים, ניהול פנלים, הנחיית סדנאות והשתתפות בארגון כנסי INCOSE. אנשינו זוכים בהערכה על המאמרים שהם מציגים במסגרת AWARD BEST PAPER (עמי הרי, יעקב הרשקוביץ, אבנר אנגל).
- קיימנו סדנאות רבות בהנחיית טובי המומחים בעולם. בתקופה האחרונה אירחנו את Mark Powel שהעביר סדנה בנושא Engineering Uncertainty in Systems. דייויד סטרמלינג העביר סדנה בנושא Decision Analysis for SEs. רוברט הליגן העביר סדנה בת 5 ימים בנושא הנדסת מערכות.
- מדליות זהב ניתנו במסגרת כנס INCOSE העולמי שהתקיים באורלנדו ל-INCOSE_IL – הוענקו מדליות זהב על הישגינו הרבים והקף פעילותנו. יש לשוב ולציין כי בשנת 2006 הוענקו לנו מדליות זהב כאות הוקרה בינלאומית מ- INCOSE.

ומה הלאה?

תוכנית העבודה של INCOSE_IL כוללת פעילויות רבות, ביניהן:

- קיום מפגשים דו חודשיים בנושאים מגוונים, בהם יחלקו המשתתפים מניסיונם בין הנושאים יהיו: הנדסת מערכת בהעדר לקוח (בהנחיית שמאי אופפר מ-HP), הקשר בין הנדסת מערכת וניהול פרוייקטים (בהנחיית יוסי תידהר), בחינת הגישות השונות לתהליך פיתוח, הצלחות וכשלונות (בהנחיית פרופ' יורם רייך) ועוד.
- אנו מתכננים להמשיך ולהביא את טובי המומחים מהעולם שירצו על החידושים בתחומנו. ד"ר מוטי פרנק ירכז את נושא הסדנאות.
- רויטל גולדברג תמשיך להוביל אותנו לביקורים בחברות תעשייתיות מעניינות.
- קבוצות העבודה מתוכננות להגדיל את תכיפות המפגשים וע"י כך את תרומתן למשתתפים.
- כאמור, חרטנו על דגלנו העמקת השיתוף עם חברות לא בטחוניות. נפעל ליצירת מפגשים בין החברים הותיקים לחדשים על מנת להחליף ידע ונסיון.
- נמשיך בפרוייקט עם אורט בנושא הנחלת החשיבה המערכתית לתלמידי תיכון
- במהלך שנת 2008 נחל בהכנות לכנס הלאומי להנדסת מערכות שמתוכנן להתקיים במרץ 2009.
- נמשיך ונעמיק את שיתופי הפעולה עם ארגונים רלוונטיים בישראל ומחוצה לה. פעילות זו תכלול עידוד השתתפות הקהל המקומי בכנס INCOSE השנתי שיתקיים השנה באוטרכט שבהולנד. ד"ר אביגדור זוננשיין, היו"ר היוצא של הארגון, קיבל על עצמו את תפקיד המתאם.

נאחל לכולנו תקופה פורייה, מעניינת ומהנה

אביגדור זוננשיין
היו"ר היוצא

עוזי אוריון
היו"ר הנכנס

דבר מנכ"ל אילטם

INCOSE_IL פועל במסגרת אילטם. אילטם, הוא איגוד המשתמשים לטכנולוגיות מתקדמות בתעשיות משולבות עתירות ידע. האיגוד הנו עמותה-מלכ"ר, הפועלת במסגרת תוכנית מגנ"ט, תחת פיקוחו של משרד המדען הראשי, במשרד התעשייה והמסחר.

הפעילות ממומנת ע"י דמי חברות שנתיים המשולמים על ידי החברות החברות. יש להדגיש כי החברות באילטם הינה מוסדית וכמשתמע מכך- כל עובדי חברה החברה באילטם זכאים להשתתף וליהנות מפעילויות האיגוד..

ייעוד האיגוד הוא להגדיל את יכולת התחרותיות של החברות באיגוד על ידי שיתוף בידע הקיים, הבאת מומחים בעלי שם, האצת היישום של טכנולוגיות מתקדמות, הורדת עלויות הפיתוח והייצור והעלאת איכות המוצרים.

זה המקום לציין, כי האיגוד פועל למען חבריו ואינו בעל עניין בשום פעילות מסחרית.

כיום חברות באיגוד כמאה חברות מהתעשייה האזרחית והביטחונית.

לפני כחצי שנה נבחרה נשיאות חדשה לאיגוד, אשר הגדירה כי פעילות האיגוד לשנים 2008-2010. פעילות האיגוד תמוקד לטובת חמישה קהלי ידע: קהל מהנדסי המערכות, קהל מהנדסי התוכנה, קהל מהנדסי פיתוח החומרה, קהל המהנדסים העוסקים בתכן לייצוריות וקהל המהנדסים המרכזים את נושא תכן תואם דירקטיבות ירוקות. עבור כל אחד מתחומי הפעילות הנ"ל האיגוד מקיים ימי עיון, מפגשים מקצועיים ומפעיל מספר קבוצות עבודה של מומחים בכל אחד מתחומי הפעילות.

הפעילויות הללו מתקיימות באמצעות מפגשים מקצועיים בפורום של קבוצות עבודה, בפורום רחב של מפגשים מקצועיים, סמינרים מקצועיים על-ידי מומחים מארץ ומהעולם, שיתופי פעולה עם איגודים מקצועיים בינלאומיים, השתתפות בכנסים בינלאומיים לצורך ייבוא הידע, שילוב אנשי אקדמיה בקבוצות העבודה ופרוייקטים משותפים.

בנוסף לאמור לעיל, עלי לציין בפניכם כי אילטם חבר ומשתף פעולה עם איגודים וקונסורציומים בחו"ל, דוגמת:

- האגוד הישראלי של הנדסת המערכות INCOSE_IL פועל בשיתוף פעולה צמוד עם איגוד INCOSE העולמי.
- התא הישראלי של איגוד SMTA העולמי פועל כועדת ההיגוי של הנדסה ותכנון לייצוריות באילטם
- שתוף פעולה עם IEEE - Computer Society
- שתוף פעולה עם IEEE - EMC Society
- פעילות עם IEC International (Electro-technical Commission) - תקנים בהנדסת חומרה
- שיתוף פעולה עם SEI (Software Engineering Institute) - תקנים בהנדסת תוכנה
- חברות ב- Soldertec – איגוד המבצע פרוייקטים בתחום מערכות ידידותיות לסביבה

אנו כאילטם, נשמח לעמוד לרשותכם ולראותכם נוטלים חלק בפעילויותינו

משה סלם מנכ"ל אילטם

שילוב שיקולי בטיחות המוצר וניהול הבטיחות בתהליך פיתוח טכנולוגי

ד"ר מיכאל מהרי"ק[1]
ד"ר שמשון ארואטי[2]

טכנולוגיות עוסקות בחומרים, מתקנים, תהליכים ומוצרים. בכל אלה כרוכים סיכונים לאדם ולסביבה. כדי להפחית את הסיכונים במידת האפשר, יש לשלב שיקולי בטיחות בתכן ובהפעלה של הטכנולוגיות. צירוף המלים "תכן" ו"טכנולוגיות" מעורר אסוציאציה של שולחן-שרטוט (וכיום – של מסך המחשב), אבל למעשה מדובר במארג מורכב של פעילויות הנדסיות וניהוליות החורגות מן התכן-גרידא וכוללות את תהליך הפיתוח כולו (ראו הגדרות ל"תכן" ול"פיתוח" במסגרת). בתפישה הרחבה המאפיינת בשנים האחרונות את הראיה הבטיחותית, עלינו להתייחס לא רק ל"בטיחות בתכן" של מוצר כלשהו אלא ל"בטיחות בפיתוח המוצר", כלומר גם לכל מרכיבי הפיתוח שמעבר לתכן-גופו. בתפישה זו יש לכלול את "בעלי העניין" השונים (החל ביזם ובמפתח וכלה באנשים הנמצאים בסביבת המוצר המופעל), את מגוון העיסוקים והטכנולוגיות המשמשים בפיתוח, ואת מרחב הזמן המלא של מחזור חיי המוצר (איור 1).

במאמר זה נציג מתכונת שיטתית, המקובלת מזה שנים במספר ארגונים טכנולוגיים מובילים בישראל, לשילוב שיקולי בטיחות וניהול הבטיחות בתהליך פיתוח. למיטב ידיעתנו וניסיוננו, מתכונת זו מספקת תוצאות טובות יותר – במונחים של בטיחות אינהרנטית ומערכתית של המוצר ושל התאמתו לקריטריונים מובָנים – לעומת גישות שהיו מקובלות בטכנולוגיה בעבר.

"בטיחות הייצור" ו"בטיחות המוצר"

את שיקולי הבטיחות יש לשלב בפיתוח טכנולוגי-תעשייתי בשני תחומים:

- התחום הראשון הוא ***בטיחות בתהליכי הפיתוח והייצור*** במפעל. תחום זה כולל תכנון והקמה של מבנים ומתקנים, בחירת ציוד וחומרים ושילובם בעבודה, תכנון תהליכי עבודה, הכנת נהלים לפעולה בשגרה ובמצבי חירום, תכנון וביצוע פעולות תחזוקה, הדרכת עובדים וכו'. בהקשר הזה מדובר, בראש ובראשונה, בבטיחותם של עובדי הפיתוח, הייצור, הניסויים ושאר "פעילויות הליבה", ונוסף לכך גם בבטיחותם של עובדים אחרים במפעל, בבטיחותם של תושבים המתגוררים בשכנות למפעל, ואף בהפחתת סיכונים לנכסי המפעל ולסביבה.

- התחום השני הוא ***בטיחות המוצרים המפותחים*** ע"י המפעל. בהקשר הזה מדובר קודם-כל בבטיחות המשתמש – פועל, עקרת-בית, ילד, חייל – לאורך מחזור החיים של המוצר, אך גם בבטיחות אנשים הנמצאים בקרבת האדם המשתמש במוצר, בהפחתת סיכונים לנכסים הנמצאים בקרבת המוצר, ובהפחתת סיכונים לסביבת האתר שבו נעשה שימוש במוצר. לעתים אף מתייחסת בטיחות המוצר לסיכונים באתרים הנמצאים הרחק מסביבת השימוש המתוכנן במוצר. לדוגמא:

[1] מנתח סיכונים ומהנדס בטיחות במגזר הטכנולוגי-תעשייתי.

[2] מהנדס בטיחות בחברת רפאל בע"מ.

הכותבים מודים לאברהם חסון, לאבי הראל, לראובן גרינברג, לרפי מירון ובמיוחד לישי לבנון על הערותיהם לטיוטת מאמר זה.

בהפעלת מערכת מוטסת לא-מאוישת יש לקחת בחשבון גם את הצורך למנוע פגיעה של המערכת (עקב תקלה בה) באזורים מרוחקים מן האזור בו היא מופעלת; בבחירת חומרים למערכת קירור יש לקחת בחשבון פגיעה אפשרית בשכבת האוזון.

העקרונות, הגישות ואף הכלים הטכניים המשמשים ליישום שיקולי בטיחות עשויים להיות דומים בשני התחומים. בפועל, לא תמיד הדבר הוא כך. בהיבטים ארגוניים וניהוליים יש הבדלים מהותיים בין הבטיחות המפעלית לבין בטיחות המוצר:

- הבטיחות המפעלית עוסקת בעובדי המפעל עצמם, ואילו בטיחות המוצר מתייחסת בעיקרה לא לצוות הפרויקט אלא לאנשים אחרים שיעשו שימוש במוצר;

- הבטיחות המפעלית ממוקדת במידה רבה בשגרה, בסיכוני ההווה ובבעיות של יום-יום, ואילו בטיחות המוצר מקדישה את המאמץ העיקרי למתן פתרונות כוללים לסיכוני העתיד בטווח-זמן ארוך;

- הבטיחות במפעל מאופיינת ע"י רציפות והתמשכות, בעוד שפיתוח מוצר הוא "חבילת עבודה" שיש לה התחלה, משך מוגדר וסוף.

כתוצאה מהבדלים אלה, בארגונים רבים נעשה הטיפול ב"בטיחות המפעל" וב"בטיחות המוצר" על ידי גורמים שונים, שלעתים מופרדים זה מזה עד רמות הניהול הבכירות: "בטיחות המפעל" ממומשת ע"י הנהלת המפעל ויחידות הביצוע, ואילו "בטיחות המוצר" מופקדת בידי מנהלות הפרויקטים. הפרדה זו שכיחה בעיקר בארגונים שבהם מיושמת גישת "ניהול מטריצי" ("קווי מוצר" פרויקטיים הפועלים מול יחידות-ביצוע מקצועיות). יחד עם זאת, במקרים לא-מעטים מתקיימים שיתוף פעולה מקצועי והפריה הדדית בין הגורמים המטפלים בשני ההיבטים, וקיימים אף ארגונים שבהם העיסוק בשניהם נתון בידי מנגנון ניהולי ומקצועי אחד.

מאמר זה עוסק בבטיחות מוצרים טכנולוגיים. הדגש בו הוא על הטמעת בטיחות המוצר כבר בתהליך הפיתוח. כל האמור להלן רלוונטי גם לעניין הבטיחות במפעל; אבל העקרונות, הגישות והפעלת הכלים יוצגו בראיית פיתוח המוצר כפרויקט שיש לו שלבים, לוחות זמנים, יעדים ואבני דרך ובעיקר התחלה וסוף, להבדיל מן הפעילות המתמשכת המאפיינת, כאמור לעיל, את ה"בטיחות המפעלית".

לנוחות הקוראים, להלן הגדרות למספר מונחים שבהם נעשה שימוש במאמר זה (על פי סדר הופעתם):

תכן (design): תכנון טכנולוגי-הנדסי ישיר של מתקן או תהליך.

פיתוח (development): מסגרת רחבה של פעילויות ארגוניות, מקצועיות וניהוליות הכרוכות ביצירת מתקן או תהליך: הגדרת צורך, אפיון דרישות, הכנת מפרטים, תכן, ייצור והרכבה, בחינה וניסויים, ותמיכה במוצר לאורך כל מחזור חייו עד לגריטתו ועד בכלל.

מוצר: במאמר זה – תוצר, מכל סוג שהוא, של תהליך פיתוח פרויקטי. מוצר יכול להיות, לפיכך, צעצוע, מכונית, מבנה, מפעל כימי או כור גרעיני. במאמר זה נשתמש לעתים גם במונח "מערכת" באותה משמעות.

מכלל: חלק של מוצר, המורכב מפריטים שונים ונועד לבצע תפקיד מוגדר בפעולת המוצר.

מחזור חיים של מוצר: האוסף המלא של שלבי הטיפול במוצר החל באפיון, בפיתוח ובייצור, המשך בקליטה, בהפעלה, בתחזוקה, בהובלה ובאחסון, וכלה בהוצאה מן השירות ובגריטה.

גריטה: תהליך הוצאה של מוצר מן השירות, לרבות פירוק וטיפול במרכיבים ובחומרים הנותרים בתום הפירוק.[3]

אימות בטיחות (safety verification): הוכחה או הדגמה של עמידה בדרישות לבטיחות מוצר.

תיקוף בטיחות (safety validation): הוכחה או הדגמה של התאמת מוצר לצורך בהיבט הבטיחות, כלומר עמידתו באיומים העלולים להתממש במחזור החיים התקני שלו ובמצבי תאונה אשר לא הוזכרו בדרישות, כדוגמת תרחישי שריפה, הצפה או שבירה.[4]

הערכת בטיחות המוצר (product safety assessment): תהליך שבו מפתח או מפעיל בוחן, מאמת, מתקף ומציג את העמידה בדרישות הבטיחות ובצרכים הבטיחותיים, במהלך התכן ולאחר השלמתו. תהליך זה מתועד ומסוכם ב"דו"ח בטיחות".

סינרגיה: צירוף של מרכיבים היוצר תפוקה שהיא גדולה מן הסכום הישיר של תפוקות המרכיבים הבודדים, כלומר לעצם הצירוף ביניהם יש תרומה נוספת משלו בנוסף לתרומת המרכיבים כשלעצמם.

סיכונים שיוריים (residual risks): סיכונים שנותרים בתום תהליך של הפחתת סיכונים, מכיון שלא ניתן לבטלם או להפחיתם יותר.

"בטיחות המוצר" – ערוצי הפעילות

על המוצר המפותח לעמוד במכלול של דרישות, ובהן, כמובן, גם דרישות בטיחות. את פעילות הבטיחות הנערכת בתהליך הפיתוח כדי להבטיח מענה מלא לדרישות אלו, ניתן לחלק לארבעה ערוצים. בכל אחד מן הערוצים מתקבלות במהלך הפיתוח תפוקות שונות.[5] העבודה בערוצים אלה נעשית, במרבית שלבי הפיתוח, במקביל, וקיימות ביניהם זיקות של העברת מידע ושל ניהול ובקרה (איור 2):

א. תכן לבטיחות

הפעילות בערוץ זה, שמרכיביה העיקריים הם הכנת מפרטים ומימושם, מספקת את המענה לדרישות הבטיחות שהוצבו למוצר. המענה עשוי להיות, למשל, פיתוח מנגנונים ייעודיים לבטיחות (לדוגמא: איור 3), יתירות של מנגנוני בטיחות (לדוגמא, התקנת מספר גלאי אש במקביל) ואף שונות בין המנגנונים היתירים (בדוגמא האחרונה – התקנת גלאי להבה, חום ועשן). פתרונות התכן

[3] עצם ההתייחסות לתהליך הגריטה כמרכיב בפיתוח המוצר אינו עניין מובן מאליו. אבל, במקרים לא מעטים, התייחסות כזאת היא הכרחית למניעת סיכוני בטיחות כבדים.

[4] ל"תיקוף" יש משמעות רחבה יותר מאשר ל"אימות", והוא עשוי לכלול יסוד גדול יותר של שיפוט.

[5] האבחנה והחלוקה הפורמאלית בין הערוצים אינן חיוניות לגופו-של-עניין. במאמר זה נשתמש בהן ככלי להצגת מרכיבי הפעילות ולהסבר הזיקות בין המרכיבים האלה.

בהקשר הבטיחותי צריכים להשתלב בתכן הפונקציונאלי והאמינותי. התכן לבטיחות הוא, כמובן, הערוץ העיקרי בפעילות הבטיחותית, אבל הוא בהחלט אינו היחיד.

ב. **הערכת הבטיחות בתכן**

המפתח זקוק להערכה על מידת העמידה של התכן בדרישות הבטיחות. הערכה זו נדרשת עוד כאשר המוצר המפותח נמצא, רובו ככולו, "על הנייר": אם היא מבוצעת מספיק מוקדם, היא עשויה לאתר פערים ולזהות איומים על הבטיחות במועד שבו תיקונם עדיין אפשרי במאמץ קטן ובעלות נמוכה. הכלים העיקריים המשמשים להערכת הבטיחות של מוצר הנמצא בתהליך פיתוח הם ניתוחי בטיחות לסוגיהם השונים. פערים המזוהים בדרך זו מוחזרים לערוץ ה"תכן לבטיחות", ובו ניתנים להם פתרונות.

ג. **אימות העמידה בדרישות הבטיחות ותיקוף הבטיחות**

כאשר המוצר – או, לפחות, חלקים ממנו – כבר קיימים בפועל, יש להוכיח (או לפחות להדגים) כי הוא עונה לצורך, כלומר עומד בדרישות הבטיחות ובאיומים נוספים המזוהים במהלך הפיתוח. האימות והתיקוף של הבטיחות נעשים בעיקר באמצעות כלים של ניתוח, סימולציה, בדיקה וניסוי.

הערה: בדרך כלל משמש המונח "הערכת בטיחות המוצר" כשם קולקטיבי לערוץ הערכת הבטיחות בתכן ולערוץ אימות ותיקוף הבטיחות בסיומו. ההפרדה בין השניים במאמר זה מסייעת באבחנה בין מועדי פעילויות ובהתאמתם לשלבי הפיתוח, כמובהר בהמשך.

ד. **ניהול הבטיחות**

בפרויקט רחב היקף, העשייה בתחום הבטיחות היא מארג מורכב של פעילויות רבות. תחילתן של פעילויות אלה – בזיהוי הצורך במוצר ובקביעת הדרישות ממנו, וסיומן – עם פירוקו בסוף השימוש בו או בתום "משך חייו". יש לתכנן פעילויות אלה כהלכה, לבצען במועדים המתאימים (לא מוקדם מדי וכמובן לא מאוחר מדי), לעקוב אחר מימוש הדרישות ואחר הביצוע, לתעד לקחים ו"סיכונים שיוריים" ולהציג את סטטוס הבטיחות במסגרת המעקב על התקדמות הפרויקט כולו. ערוץ ניהול הבטיחות עוסק בשילוב הנכון של פעילות התכן, ההערכה והאימות בתכנית הפרויקטית, ובפרט בסקרי התכן ובניסויים.

בפרקים הבאים נציג עקרונות, גישות וכלים המשמשים לביצוע כל אחד מארבעת ערוצי הפעילות הנזכרים לעיל. נקדים לכך סקירה קצרה בעניין דרישות הבטיחות: חשיבותן הרבה של דרישות הבטיחות למוצר-כשלעצמו היא מובנת מאליה, אבל הן חשובות לא פחות מכך להערכת הבטיחות של המוצר: לא די בכך שהמוצר **יהיה** בטוח, אלא יש גם **להראות** שהוא בטוח!

דרישות לבטיחות המוצר

ברמה הגבוהה ביותר של סדר העדיפות, דרישות הבטיחות מתקבלות או נגזרות מן התחיקה (חוקים ותקנות) ומן התקנים העוסקים במשפחת המוצרים המדוברת. התחיקה העוסקת בתכנון מבנים, למשל, מקדישה מקום רב לעניין הבטיחות. ברמה "מקומית" יותר, נהלי הבטיחות במפעל שבו מפותח המוצר עוסקים (כאשר מדובר במפעל רציני ואחראי) גם בבטיחות בתהליכי ייצור, הרכבה וניסויים, ופרויקט-הפיתוח כפוף לנהלים אלה של המפעל כשאר הגופים הפועלים בו. בנוסף לכך, דרישות לבטיחות המוצר מוצגות לעתים קרובות באורח מפורש ופורמאלי גם על ידי הגורם המזמין את המוצר (אם יזמת הפיתוח אינה של המפתח עצמו). לעומת זאת, במקרים אחרים אין מוצבות בפני המפתח דרישות בטיחות מפורשות כלל, וקביעתן נתונה לשיקול דעתו ולמידת

האחריות המאפיינת אותו; כך, למשל, בתחומים שבהם מפתח המוצר הוא גם היזם ("המזמין"), כדוגמת יצרני רכב המפתחים דגמי-מכוניות חדשים, או יצרנים של צעצועים חדשים המופיעים בשוק.

דרישות בטיחות עשויות להיות דטרמיניסטיות ("צריך שיהיה...") או הסתברותיות ("ההסתברות לכשל מסוג ... לא תעלה על ..."). הדרישות עשויות להיות פונקציונאליות (כיצד צריך המוצר להגיב ל"אירוע מעורר" בטיחותי) או טכניות (מה צריך לתכנן במוצר כדי שיגיב כנדרש). ובנוסף, דרישות בטיחות עשויות להיות כלליות (למשל, מהו מספר מנגנוני הבטיחות שנדרש על מנת למנוע כשל בטיחותי קטסטרופאלי) או ייחודיות (למשל, איך להפריד בין המוצרים באחסון).

משיקולים של שוק, תחרות, היצע-וביקוש, וגם משיקולים ציבוריים ואתיים, רמת הבטיחות הנדרשת צריכה להיות תואמת למאפייני המוצר והמשתמש, לסיכונים הכרוכים בשימוש בו ולתועלת המופקת ממנו.[6] מימוש דרישות הבטיחות משליך על העלות, הנפח, המשקל, ההספק, הסיבוכיות, האמינות והתפעוליות של המוצר. דרישות בטיחות יש לקבוע בחכמה: אין קל מלדרוש מן המוצר רמות בטיחות גבוהות מאד, עד כדי "בטיחות מוחלטת", אבל המחיר עלול להתגלות כגבוה עד כדי אי הצדקת הפיתוח או עד כדי חוסר יכולת למתן פתרון תפעולי. אכן, יש מקרים שבהם מוצדק לבטל פיתוח אם המימוש האפשרי היחיד אינו בטוח דיו![7]

דרישת בטיחות צריכה להיקבע ולהיות מנוסחת כך שהעמידה בה תהיה ניתנת לאימות. מכאן, שבעת הכנת דרישות הבטיחות יש להפעיל לגבי כל דרישה "מבחן" של קיום מתכונת, או שיטה, שתאפשר לאמת את העמידה בה, ורצוי אף להזכיר מתכונת זו כהערה במסמך הדרישות. דרישת בטיחות שהעמידה בה אינה ניתנת לאימות צפויה לעורר אי-הסכמות ומחלוקות, ולהקשות מאד על הליכי אישור המוצר וקבלתו.

ככלל, הדרישות לבטיחות המוצר נבדלות מדרישות לביצועי המוצר במספר מאפיינים:

- אי-האמינות התפעולית המותרת לרוב המוצרים הטכנולוגיים היא, בדרך כלל, ברמה של אחוזים או פרומילים בודדים; אמינות גבוהה יותר נדרשת רק ממערכות נדירות, והשגתה כרוכה בהשקעה רבה מאד של משאבים. בניגוד בולט לכך, סיכונים לחיי אדם הם "עולם של הסתברויות נמוכות" (אחד למיליון ואף למטה מזה): לא היינו מסכימים לחיות בעולם שבו השימוש בטכנולוגיה מטיל על המשתמשים סיכוני מוות ברמות של אחוזים, או אף פרומילים, לאדם לשנה. תכן לרמה גבוהה כזאת של אמינות בטיחותית צפוי להיות יקר בהרבה מתכן לרמה הנקובה לעיל של אמינות תפעולית.

- אנו "מתירים" למוצר להתקלקל כאשר תנאי הסביבה חורגים ממעטפת הביצועים שנקבעה באפיון (ספציפיקציה) שלו; אבל איננו מסכימים שבתנאים חריגים אלה יגרום המוצר לפגיעה באדם. במלים אחרות, מעטפת התנאים הנדרשת ל"אי-פגיעה בטיחותית" היא נרחבת בהרבה מן המעטפת שבה על המוצר לפעול כהלכה. גם ההבדל הזה הוא תובעני בראיית המתכנן.

- דרישות בטיחות, להבדיל מדרישות אחרות, מתייחסות להשפעות החורגות מתחומי המוצר עצמו, הן במקום והן בזמן. כדוגמה, מפעל צריך להיות בטוח לא רק למפעיליו אלא גם לאוכלוסיה שבסביבתו הקרובה והרחוקה, לאטמוספרה, למקורות המים ולבעלי החיים שעלולים להיות

---

[6] לדוגמא, דרישות הבטיחות מצעצועי ילדים מחמירות בהרבה מדרישות הבטיחות מ"צעצועי מנהלים"!

[7] לדוגמא, לדעת רבים אסור לעסוק בפיתוח בתחום "הנדסה גנטית" עקב הסיכונים הכרוכים בכך.

מושפעים מפעילותו, וזאת לא רק במשך השימוש בו אלא גם זמן רב לאחר גריטתו (למשל בהקשר של פסולת רדיואקטיבית מכורים גרעיניים ופסולת רעילה ממתקנים כימיים).

- במשולש המקובל של הדרישות מן המוצר לביצועים, לעלות כספית וללוח זמנים, ניתן – ואף מקובל – לעשות פשרות לאור אילוצים שונים. בניגוד לכך, אנו הרבה פחות ותרנים כאשר מדובר בפשרות במאפיינים בטיחותיים של המוצר.

תכן לבטיחות

יעדו של התכן לבטיחות הוא הפחתת סיכונים. סיכונים ניתן להפחית בשתי מגמות: מגמה אחת היא הפחתת ההסתברות לתאונה, או השכיחות של תאונות ותקריות (בלשון הדיבור – "מניעת תאונות", אבל אי-אפשר, כמובן, למנוע תאונות לחלוטין). המגמה השנייה היא הפחתת החומרה של תאונה, במקרה שתתרחש. את זאת ניתן להשיג באמצעות מניעת נזק במקרה שהסיכון אכן יתממש, או ע"י מיתון (mitigation) של הנזק, במקרים שבהם לא ניתן למנעו לחלוטין כאשר הסיכון מתממש.

באיור 1 הצגנו את רב-הממדיות של תהליך הפיתוח. בהתאמה, התכן לבטיחות צריך לעסוק גם-הוא בהיבטים רבים ושונים של המוצר, שחלקם מובנים מאליהם וחלקם אינם טריביאליים כלל. נושא שאיננו בגדר מובן-מאליו הוא, לדוגמא, הוצאת המוצר מן השירות בתום מחזור החיים שלו: תהליכי הפירוק יכולים לכלול השמדה של חומרים מסוכנים (חומ"ס), אחסון חומ"ס שאינם מיועדים (בינתיים) להשמדה, אחסון חומ"ס שאינם ניתנים להשמדה (כדוגמת חומרים רדיואקטיביים), טיהור תשתית והכשרתה לשימושים עתידיים, ובמקרים קיצוניים – אף טיהור קרקע. יש מקרים שבהם ההיבטים הבטיחותיים של שלב זה במחזור החיים הם חמורים-ממש ונמצאים ברמה הגבוהה ביותר של הסיכונים הכרוכים בהפעלת המוצר.

בהתאמה לרב-הממדיות של הפיתוח ושל התכן-לבטיחות, גם הצוות העוסק בכך צריך להיות רב-תחומי. במישור המושגי, "צוות תכן לבטיחות" מורכב ממנהלי הפרויקט, מאנשי תכן, מאנשי בטיחות ומנציגי המפעילים והמשתמשים. לכל מרכיב מאלה יש משימות הנובעות מסמכותו, מכישוריו או מניסיונו: מנהלי הפרויקט נושאים באחריות העליונה לעמידת המוצר בדרישות הבטיחות, מרכזים את תהליכי הניהול, הארגון וקבלת ההחלטות, מקצים משימות ועוקבים אחר ביצוען, אחראים לאינטגרציה בין מרכיבי הצוות, ומאזנים בין דרישות הבטיחות לבין דרישות אחרות לתכן; אנשי התכן תורמים את הידע המקצועי הנדרש בנושאי הפיתוח, מכינים מפרטים טכניים, ובעיקר – מספקים את פתרונות-התכן לדרישות, מתכננים את הניסויים הנדרשים ומבצעים אותם; אנשי הבטיחות מרכזים את בקרת הסיכונים: מכינים את תכנית הבטיחות, מזהים את גורמי הסיכון ומפעילים שיטות ניתוח להערכת הבטיחות ולהפקת מסקנות והמלצות להפחתת סיכונים; ונציגי המפעילים והמשתמשים תורמים מניסיונם התפעולי בהגדרת הצרכים, בהערכת הפתרונות התפעוליים ובהכנת נהלי ההפעלה (איור 4). בשילוב יעיל בין מרכיבי הצוות ניתן להשיג אפקט סינרגטי משמעותי.

התמונה-בפועל שונה מן האבחנה המושגית המתוארת לעיל, כי למעשה לא קיימת בפרויקט קבוצה של "אנשי בטיחות". החשיבה ברוח הבטיחות אינה נחלתה של קבוצה מסוימת, אלא משותפת לכל העוסקים בפרויקט. כל אנשי הפרויקט הם רב-תחומיים: המנהלים החלו את דרכם במקרים רבים כאנשי תכן, חלק מאנשי התכן שמשו בעבר כמפעילים, ואנשי הבטיחות החלו דרכם אם כמפעילים ואם כאנשי תכן. "מהנדס-המערכת לבטיחות" בהנהלת הפרויקט (המינוח אינו אחיד ועשוי להיות שונה בארגונים שונים) הוא מרכיב בצוות הפיתוח ומשתלב בהכללת שיקולי הבטיחות בתכן, ויחד עם זאת מהווה גם חלק מצוות הניהול הפרויקטי.

נזכיר כעת מספר עקרונות מקובלים בתכן לבטיחות. עקרונות אלה הם מוכרים וידועים, אבל ראוי לרעננם מעת לעת:

- **"תכן בטוח ביסודו"** – Inherently safe design – הוא תכן שהחשיבה הבטיחותית מוטמעת בו מלכתחילה. תכן כזה, למשל, לא יאפשר הפעלה לא-בטוחה או טעות. לפני זמן לא-רב הזדעזע הציבור בישראל ממקרה של חיבור צינורית מזון לווריד של פגה בבית חולים; חייה של הפגה ניצלו רק בזכות טיפול מסור ואינטנסיבי. בתהליך המדובר ננקטו לא מעט מנגנונים למניעת טעות: צבעים שונים לצינורות ההזנה והעירוי הורידי, נוהל ביצוע מפורט הכולל חתימה על פתקית לאחר החיבור, ניסיון רב (12 שנים) של האחות המבצעת, וביקורת-כפל ע"י אחות-אחראית. היה כאן "רק" מנגנון כשל אחד: מחברים זהים לצינוריות ההזנה והעירוי. לאחר האירוע צוטטו תגובות נוגדות זו-לזו באופן קיצוני של רופא בכיר במחלקה ("זו טעות איומה ונוראה... אי אפשר לטעות כך"), ושל אחיות העובדות בה ("זו טעות אנוש; תמיד חששנו מטעות כזאת"). אנשי התעשיה מכירים היטב את השגיאה הפוטנציאלית של חיבור שגוי של צנרת, והנהיגו מזה זמן רב פתרון שהוא "בטוח ביסודו": מחברים בעלי הברגות שונות לצנרת של גזים שונים. עם מחברים כאלה, הטעות היא פשוט בלתי אפשרית.

- **"תכן חסון"** – robust design – הוא תכן העומד גם בתנאי תפעול החורגים במידה רבה מתנאי התפעול הנומינליים. תכן שאינו חסון במידה מספקת הוא שהביא בשעתו לאובדן מעבורת החלל "צ'לנג'ר" במהלך שיגורה, בשנת 1986 (איור 5).

- **תכן בגישת "הגנה לעומק"** (או "הגנה בשכבות") – Defense in depth – הוא תכן המשלב מספר שכבות-הגנה שונות ובלתי תלויות. הצורך בכך מבוסס על ההנחה שאין שכבת-הגנה יחידה שהיא בטוחה לחלוטין. הורתה של גישה זו של תכן לבטיחות היא בתעשיה הגרעינית, אבל כיום היא משמשת גם במספר רב של תחומים אחרים. דוגמאות להגנה לעומק: התקנת מערכות לקירור-בחירום בכור גרעיני כגיבוי למערכת הקירור הראשית; הכנת גנראטור ומערך מצברים כגיבויים מקומיים למתח רשת החשמל; בניית מאצרות סביב מיכלי חומ"ס בנוסף למערכות איטום בצנרת; הרחקת חומרים דליקים, הצבת ציוד לכיבוי אש, ולבישת ביגוד חסין-אש בתהליכי עבודה מסוימים.

- **תכן לבטיחות בהפעלה** מביא בחשבון את יכולותיו ואת חולשותיו של המשתמש במוצר: הוא כולל, לדוגמא, התייחסות לממשק אדם-מכונה בתצוגות ובחיוויים, תכנון מערכות בקרה ברורות ו"ידידותיות", ואמצעי הפעלה המוגנים מפני "טעויות אצבע". בנוסף לתרומתו לבטיחות מונע תכן כזה הפעלה בדרך המנוגדת לכוונת המפתח, ובכך הוא תורם לשימושיות (usability) של המוצר. ראוי להזכיר כאן כי המפעיל חייב להכיר היטב את המוצר, את יכולותיו ומגבלותיו ואת אופן הפעלתו ותחזוקתו, וחובה על המפתח לתת בידי המפעיל את כל המידע והכלים הנדרשים לצורך היכרות זו.

- **תכן ל"בטיחות בכשל"** – Fail-safe design – הוא תכן המביא לכך שאם מערכת נכשלת כאשר היתה במצב בטוח – היא תישאר במצב זה, ואם היא נכשלת כאשר היתה במצב מסוכן – היא תעבור אוטומטית, כתוצאה ישירה מן הכשל, למצב בטוח. הדוגמא הנפוצה ביותר לרכיב הגורם למערכת להיות fail-safe היא הנתיך החשמלי. דוגמאות אחרות – ברזים אלקטרומגנטיים (במצב normally-open או normally-closed כתלות בלוגיקה של חיבורם במערכת), ומוטות הבטיחות בכור גרעיני (התלויים על אלקטרומגנט, ונפילתם בכוח הגרביטציה במקרה של נפילת מתח מפסיקה את פעולת הכור). במקרים מסוימים ניתן אף להשיג בטיחות בכשל בעזרת חשיבה נכונה בלבד, ללא צורך בהוספת מנגנונים מיוחדים. דוגמה אופיינית: במערכות בקרה שבהן קצר יגרום לאירוע בטיחותי, ניתן לבחור סוג נגדים שאופן הכשל האופייני שלהם הוא נתק ולא קצר.

- **תכן למחזור החיים המלא** הוא תכן המביא בחשבון את כל שלבי "מחזור החיים" של המוצר ולא רק את שלב ההפעלה שלו. התכן צריך לתת את הדעת במיוחד למצבים שבהם המערכת הקיימת בפועל שונה מזו שבתפעול השוטף, לעתים תוך הוספת סיכונים חדשים. דוגמה טיפוסית:

מערכת הנמצאת בניסוי שבו הוספו לה מרכיבים חדשים שטרם נוסו בעבר. דוגמה נוספת: בדיקות תחזוקה שבמהלכן חייבים לנטרל או לעקוף חלק מאמצעי הבטיחות כדי לאפשר את הבדיקות.

- **תכן לתחזוקה** הוא תכן שבו משולבים שיקולי תחזוקה בתכנון המוצר למשך כל מחזור חייו, במטרה למנוע הידרדרות ברמת הבטיחות בעת פעילות תחזוקה. הידרדרות כזאת אירעה, למשל, מפעל "יוניון קארביד" בבופאל שבהודו, שבו נמשכה פעילות הייצור גם כאשר מערכות בטיחות הושבתו לצורך תחזוקתן; התוצאה היתה אחד האסונות הכבדים בהיסטוריה של הטכנולוגיה.

- במקביל קיימת גם גישה של **תכן לבדיקתיות**: זהו תכן הכולל תהליכי בדיקה אופטימאליים של המוצר במחזור חייו המלא, ואמצעי בדיקה התואמים תהליכים אלה. לדוגמא, כאשר נעשה שימוש בשני מפסקים לצורך יתירות (מחוברים בטור או במקביל, תלוי בלוגיקת המערכת), יש הבדל מהותי אם בביקורות התקופתיות נבדקת התקינות הפונקציונאלית של המכלל בלבד, או שנבדקת התקינות של כל מפסק בנפרד. במקרה הראשון יתכן שאחד המפסקים תקוע במצב לא-בטוח מזה זמן רב, היתירות קיימת רק "על הנייר" והבדיקות אינן מגלות זאת, בניגוד למקרה השני (שמידת הסיבוך בביצועו תלויה בחשיבה שהוקדשה לכך בתכן) המגלה תקלה בכל מפסק בנפרד ולא רק בתפקוד המכלל, ולכן בוחן ומוודא את קיומה של יתירות-של-ממש. דוגמא נוספת: התכן המביא להידלקות רגעית של נוריות-התרעה במכונית בעת התנעתה, כבדיקה יומית לתקינותן.

מעבר לרמת העיקרון, קיימות מספר גישות יישומיות לתכן לבטיחות:

א. **החלפה** של גורם-סיכון במרכיב שאינו מסוכן: למשל, ההחלפה (שנערכה לפני כעשרים שנה) של גז המימן בבלונים מטאורולוגיים בגז הליום. ההליום יקר יותר וביצועיו פחותים מאלה של המימן, אבל הוא אינו דליק. אילו היתה החלפה זו מבוצעת בספינות האויר הצפידות (ה"צפלינים") בשנות השלושים של המאה העשרים, לא היתה מתרחשת התאונה המפורסמת של ספינת האויר "הינדנבורג" בשנת 1937, והשימוש בטכנולוגיה זו לצרכי תחבורה אולי לא היה נפסק-באחת. לעתים מיושמת גישה זו בדרך של החלפת גורם-סיכון מסוכן בגורם-סיכון מסוכן פחות (איור 6).

ב. **הפחתה** של כמות גורם הסיכון או של הנזק הפוטנציאלי שלו: למשל, ייצור חומרים כימיים מסוכנים בתהליך של זרימה (שבו נמצאת במערכת בכל רגע כמות קטנה מאד של החומר המסוכן) במקום בתהליך מנתי (שבו נמצאת בתוך ריאקטור כמות גדולה של החומר המסוכן), או הגבלת הכמות של חומרי-גלם מסוכנים בנקודת העבודה לכמות הנדרשת למשמרת או ליום-עבודה בלבד.

ג. **הרחקה** של עובדים, ובמקרים מסוכנים במיוחד – אף של המפעיל, ממוקד הפעילות. דוגמאות – הפעלת מתקנים כימיים וכורים גרעיניים מחדר בקרה מרוחק, והטסת כטב"מים (כלי טייס בלתי מאוישים). ברוח דומה – הרחקה מאזור העבודה (או אף מחצר המפעל) של חומרים מסוכנים שאינם נחוצים מיידית לייצור או לתפעול.

ד. **הפרדה** בין פעילויות שונות או בין אזורים שונים, למניעת אפשרות של התנגשות מסוכנת או התפשטות של אירוע תאונתי. דוגמאות: הפרדה מפלסית בין כביש לבין מסילת ברזל, בניית מחלף במקום צומת מרומזר, הפרדה בין אזורים במבנה גדול באמצעות "דלתות-אש".

ה. **התניה** של קיום פעולה מסוכנת בקיום תנאי בטיחות. דוגמאות – התניית פעולה של מקרן לייזר בסגירת דלת המעבדה, התניית קיום מתח גבוה בסגירת המכסה למתקן שבו קיים המתח, התניית הפעלתה של מכונת כביסה בסגירת דלת המכונה, והתניית הפיצוץ של ראש קרבי של טיל בהתרחקות מן המטוס המשגר או מאתר השיגור המאויש.

ו. **מניעה** של מצבים מסוכנים שאינם חיוניים. לדוגמא, הפעלת מכבש בעזרת שתי ידיות מרוחקות זו מזו, כדי למנוע מצב שבו המפעיל משתמש ביד אחת כדי להפעיל את המכבש וביד השניה כדי "לסדר" את מיקום החומר באזור התנועה המסוכן של המתקן.

ז. **הגנה** מפני סיכונים במקרים שבהם לא ניתן ליישם את גישות ההחלפה, ההפחתה, ההרחקה, ההפרדה, ההתניה והמניעה. לדוגמא: תכנון אטימות, מאצרות, ריפודים, ציוד מגן אישי לעובדים וכו'.

הערכת הבטיחות בתכן

הערכת הבטיחות מלווה את התכן עם התקדמותו, בעוד המוצר המפותח נמצא "על הנייר" בלבד. ההערכה אמורה להוביל לזיהוי נקודות תורפה בטיחותיות ולפתרונן, בטרם יעוגנו כמרכיב בלתי-הפיך בתכן. בנוסף, ההערכה תתמוך במעבר לשלב מתקדם יותר של התכן, או תמנע מעבר זה, על בסיס הידע הניתן למיצוי מן התכן בשלבו הנוכחי.

ניתן לתאר חמישה מרכיבים בתהליך: ריכוז המידע הנדרש, ניתוח המידע, הערכת עמידות המוצר על בסיס כל אחד מן הניתוחים, תִכלוּל (אינטגרציה) של הערכת בטיחות המוצר, וקביעת יעדים נדרשים למימוש על פי ממצאי הניתוחים והאינטגרציה. יעדים אלה ימומשו בשני ערוצים: האחד – ערוץ התכן לבטיחות, שבמסגרתו יופחתו הסיכונים במידת האפשר, והשני – ערוץ אימות העמידה בדרישות ותיקוף הבטיחות, שבמסגרתו יינתן מענה לפערי ידע שזוהו ותיבחן בפועל נכונות ההערכות התיאורטיות. לאור העובדה שפרטי התכן הולכים ומתבהרים במהלך הפיתוח, וכן עקב המשוב שמספקת ההערכה לתכן לבטיחות (כאמור לעיל), התהליך כולו הוא איטראטיבי וכולל יותר מסבב אחד. פירוט רב יותר של התהליך ומרכיביו ניתן באיור 7. הערכת הבטיחות מסוכמת בניתוחים מתועדים בשלבי התכן השונים; עניין זה יפורט בהמשך, בפרק העוסק בניהול הבטיחות.

כאמור לעיל, הכלים המשמשים להערכת הבטיחות של מוצר הנמצא בתהליך פיתוח הם בעיקר ניתוחי בטיחות לסוגיהם השונים. נושא זה נסקר בהרחבה במאמר שפורסם לא-מכבר בכתב-העת "בטיחות",[8] ולכן נסתפק במאמר הנוכחי בסקירה תמציתית של שיטות-הניתוח העיקריות ובהצעה למתכונת שימוש אינטגרטיבית בהן בהקשרים טכנולוגיים שונים.

ארבע מן השיטות העיקריות המשמשות בתהליכים של פיתוח טכנולוגי הן FMECA, HAZOP, FTA ו-ETA.[9]

א. **FMECA – "ניתוח אופני כשל, אפקטים וקריטיות"** (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis)

הניתוח מוחל בנפרד על כל אחד מ**רכיבי המערכת**[10] ונערך "מן הפרט אל הכלל":

- באיזה אופנים עלול הרכיב להיכשל?
- מה גורם לו להיכשל בכל אחד מאופני הכשל?

[8] ש. ארואטי, ניתוח סיכונים הסתברותי ככלי עזר לממוני בטיחות, בטיחות 290 (יוני-יולי 2004), 8-13.

[9] הפרסום System Safety Analysis Handbook, בהוצאת System Safety Society (ניתן לרכישה גם על גבי CD), מציג ומתאר כמאה שיטות שונות לניתוח סיכונים!

[10] לחילופין, ניתוח זה יכול להיערך על פונקציות של המערכת או על תהליכים שונים (כדוגמת תפעול ותחזוקה), במקום על רכיבים פיזיים.

- מהי תוצאת הכשל – בסביבה המיידית של הרכיב, במעגלים רחבים יותר, במערכת כולה?
- מהי ההסתברות להתרחשותו של אופן-כשל מסוים בחומרה מסוימת?
- אם התוצאה היא קריטית למערכת כולה – כיצד נמנע את הכשל, או את השפעתו?

דוגמא לרכיב ולכשלים אופייניים בו: נגד חשמלי – נתק או קצר.
דוגמאות לשיפורי-תכן שניתן להפיק מניתוח FMECA: החלפת רכיבים, תכן שונה של התקנות וזיווד, שיפור התכן לבדיקתיות, הוספת ניסויים, מעקב התיישנות, הוספת נהלי בדיקות, הפעלה או אחזקה.
השיטה אינה נותנת ביטוי לתרחישים מורכבים (מספר תקלות במקביל, תפעול שגוי או תזמון שגוי).

ב. **HAZOP – "ניתוח גורמי סיכון ותפעוליות"** (Hazard and Operability Study)
הניתוח עוקב אחר **תהליך הזרימה** במערכת המנותחת:
- מה יקרה אם הזרימה בנקודה X תופסק, תוגבר, תתהפך, תתחמם, ...?
- אם התוצאה קריטית למערכת – מה עלול לגרום לכך?
- אם התוצאה קריטית למערכת – כיצד נמנע את האירוע, או את תוצאותיו?

השיטה מתאימה במיוחד לניתוח תהליכים במתקנים כימיים מורכבים, או במערכות אחרות שבהן ניתן לזהות זרימה של תהליך ולעקוב אחריה.
דוגמא: המשמעויות הבטיחותיות והתפעוליות של הפסקה בכניסת חומר-קירור לתהליך הכולל ריאקציה אקסותרמית.

ג. **FTA – "ניתוח עצי תקלות"** (Fault Tree Analysis):
הניתוח מתחיל מ**אירועים סופיים** קריטיים ונערך מהכלל אל הפרט:
- איך (בניתוח לוגי לאחור) יכול להתרחש אירוע קריטי Y?
- מהם צירופי הגורמים לאירוע קריטי זה?
- מהי ההסתברות להתרחשות כל אחד מן הגורמים לאירוע קריטי זה?
- איך (על בסיס הניתוח הלוגי) ניתן למנוע את האירוע הקריטי?

השיטה מתאימה במיוחד לניתוח מערכות מורכבות ומערכות אדם-מכונה.
דוגמא: הגורמים ל"אירוע סופי" של פיצוץ קטלני במפעל העוסק בחומרי נפץ.

ד. **ETA – "ניתוח עצי אירועים"** (Event Tree Analysis):
הניתוח מתחיל **מהתרחשות בודדת** כדוגמת כשל טכני או פעולה שגויה ("אירוע מתחיל"):
- איזה מנגנונים במערכת עשויים למנוע או להפחית את חומרת התוצאה הנובעת מההתרחשות?
- איזה תקלות או פעולות נוספות עלולות להחמיר את תוצאת ההתרחשות המקורית?
- מהם התרחישים האפשריים בעקבות התרחשות התקלות הנוספות?
- מהן ההסתברויות לתרחישים אלה, אם נתונות ההסתברויות לתקלות הבסיסיות?

השיטה מתאימה במיוחד לאפיון צירופי כשלים בפונקציות העיקריות של המערכת שיגרמו לתקלה בטיחותית, וכן למיצוי המגוון האפשרי של אירועים סופיים.
דוגמא: התוצאות של שרשרת אירועים, שהראשון בה הוא נפילת הספק מרשת החשמל החיצונית במפעל שבו ההספק החשמלי הוא חיוני.

טרם פותחה שיטת ניתוח שהיא מספקת למיצוי שיטתי מלא של כל הכשלים והתרחישים האפשריים במערכת טכנולוגית מורכבת. לפיכך, כדאי להפעיל יותר משיטת ניתוח אחת לבחינת מערכת. במערכות אלקטרומכאניות מורכבות מקובל לפתוח בניתוח ETA כדי למפות את כל האירועים הסופיים האפשריים; מן הרשימה המתקבלת ממוצים אירועים קריטיים, שכל אחד מהם מחייב הכנת ניתוח FTA נפרד. כדי לפרט את עצי התקלות עד לרמת רכיבים, חיוני להכיר היטב את מאפייני הכשלים של הרכיבים האלה. מכאן נובע צורך בביצוע FMECA למערכת הנבחנת לפני עריכת ניתוח FTA בה.

בניתוח תהליכים כימיים מורכבים מקובל להפעיל את שיטת HAZOP. בניתוח מתקנים כימיים כדאי לפתוח בניתוח FMECA כדי להבין את מאפייני הכשלים של הרכיבים לפני המעבר לניתוח תהליכי הזרימה במערכת. לעתים כדאי לנתח תת-מערכות מסוימות במתקן הכימי גם בשיטת FTA.

רצוי לקשור בין ניתוחי הבטיחות לניתוחי האמינות, כדי "להציף" מוקדם ככל האפשר ניגודים בין שני מאפיינים חשובים אלה של המוצר (למשל, השפעת סיבוכיות, הנובעת מצרכי בטיחות, על האמינות).

אימות העמידה בדרישות הבטיחות ותיקוף הבטיחות

אימות ותיקוף הבטיחות נועדו לבסס את תחושת הביטחון במוצר עם התקדמות הייצור, ולאשש (או להפריך) את המסקנות שהופקו בשלב הערכת הבטיחות. כמו כן ניתן בשלב זה מענה לפערי ידע שזוהו בשלב ההערכה, ואשר מחייבים ביצוע ניסויים והפעלת סימולציות. נזכיר כי ערוץ-פעילות זה כולל הן אימות העמידה של המוצר בדרישות בטיחות פורמאליות, והן מתן תוקף לבטיחות המוצר באמצעות הוכחה או הדגמה של עמידתו בתרחישים בטיחותיים ("איומים"), אשר זוהו במהלך התכן ואשר המפתח רואה מחובתו לתכנן את המוצר כך שיישאר בטוח דיו גם אם יתרחשו (למרות שהעמידה בהם לא נדרשה פורמאלית).

על אף ההבדל העקרוני בין **המושגים** "אימות" ו"תיקוף", במישור המעשי קיימת חפיפה חלקית בין **הפעולות** הנדרשות למימוש האימות והתיקוף. לפיכך מקובל לאחדם לערוץ פעולה משותף.[11]

קיימות מספר שיטות לאמת את בטיחות המוצר:

א. **ניתוח**: חישובים הנדסיים תוך שימוש במודלים ובנוסחאות והסתמכות על טבלאות נתונים ועל שיקולי דמיות. לדוגמא: חישוב מקדם-בטחון למיכל-לחץ.

ב. **סימולציה**: מודל ממוחשב של המוצר או של חלקים ממנו, עם או בלי דגם חלקי או מוקטן של המוצר, והרצות של המודל המדמות את אופן הפעולה הצפוי של המוצר בפעולה תקנית, בתנאי קיצון או במצב תאונה.

ג. **בדיקה:** הפעלת תהליכי בחינה על המוצר הנבדק בתנאי סביבה מוגדרים. נבדקים מרכיבים תקניים של המוצר, והבדיקה נערכת באופן שיוכלו לתפקד באופן תקין גם לאחר ביצועה. במהלך הבדיקה נמדדים תכונות ופרמטרים תפקודיים של המוצר על פי תכניות בדיקה מוכנות מראש.

ד. **ניסוי**: הפעלה של המוצר, שבו מורכבים ומשולבים גם פריטים שהוכנו במיוחד לצורך הניסוי ושאינם אמורים לתפקד כמרכיבים במערכת תקנית. לעתים נהרסים המוצר כולו, או חלקים ממנו, במהלך הניסוי (לדוגמא – כאשר נבחנת בטיחות המוצר בתרחישי תאונה, איור 8).

דרכים נוספות לאימות הבטיחות הן תצפית-עין וביקורת חזותית.

אימות תכונה בטיחותית מסוימת נעשה, במרבית המקרים, בשילוב של מספר שיטות. לדוגמה: נעשה שימוש במודל לצורך זיהוי תרחישים; בעזרת תרחישים אלו מזוהים תנאי סביבה אופייניים, ובהם נערכים ניסויים חלקיים למרכיבי המערכת או בדיקות וניסויים במערכת השלמה.

[11] בהמשך הפרק נשתמש לעתים במונח "אימות הבטיחות" במשמעות של אימות ותיקוף.

בפרויקט מורכב רצוי להכין "תכנית לאימות ולתיקוף הבטיחות". התכנית בנויה כמטריצה, המציגה את אופן האימות מול דרישות הבטיחות שנקבעו ע"י המזמין. כאשר אופן האימות הוא ניתוח, מפרטת התכנית את אופי הניתוח ואת הפרמטרים הנבדקים; כאשר אופן האימות הוא סימולציה, מתוארת הסימולציה וניתנים תחומי הערכים של הפרמטרים שיהוו קלט להפצתה; כאשר אופן האימות הוא בדיקה או ניסוי, מפורטים מטרות הפעולה, מערכת הניסוי, אופן השילוב בתכנית הכוללת של הניסויים, ותחומים של פרמטרי הניסוי. תכנית אימות ותיקוף הבטיחות היא מסמך מתעדכן, על פי רמת הידע הקיימת בפרויקט וה"איומים" הנוספים המזוהים בכל שלב של הפיתוח. קיומה של תכנית פורמאלית ומוסכמת (בין המזמין לבין המפתח) לאימות הבטיחות מפשט, בסוף הפיתוח, את הכנת ההנמקה ע"י המפתח כי המוצר בטוח, ולאור זאת – את הליכי אישור הקבלה ע"י המזמין.

במידת האפשר, רצוי לשלב את הניסויים והבדיקות המיועדים לאימות הבטיחות בתכנית הניסויים והבדיקות להוכחת ביצועי המוצר ולאימות אמינותו. יחד עם זאת, יש לעמוד על ביצוע ניסויים נפרדים כאשר השילוב אינו מסוגל לענות לצורכי אימות הבטיחות במידה מספקת.

קיימות מספר בעיות המקשות מאד על אימות הבטיחות של המוצר. נציג כאן אחדות מהן:

- כאמור לעיל, מעטפת התנאים הנדרשים לבטיחות המוצר היא נרחבת בהרבה מן ממעטפת התנאים הנדרשים לתקינותו. כפועל יוצא מכך, גם אימות העמידה במעטפת הבטיחות קשה בהרבה מאימות העמידה בדרישות התקינות הטכנית במעטפת הביצועים התקנית.

- השאיפה העקרונית היא **להוכיח** בעזרת ניסויים את עמידת המוצר בדרישות הבטיחות. "הוכחה" – משמע אמון מלא ומוחלט בבטיחות המוצר. אבל, במקרים רבים, הוכחה ניסויית אינה אפשרית: בעוד שניתן להוכיח בעזרת ניסויים אמינות בסדר גודל של 99% ואף למעלה מכך, אין דרך ניסויית להוכיח רמת בטיחות של אחד למיליון ברמת מהימנות סבירה. בלית ברירה מדברים על **אימות** – ביטוי "רך" יותר מאשר הוכחה – ולעתים אפילו על "**הדגמה**" בלבד.

- עקב הקושי באימות ניסויי על פני כל מעטפת הבטיחות הנדרשת, מנסים לעתים לאמת את הבטיחות בעזרת ניתוח תגובת המוצר לסדרה של תרחישים חזויים, כלומר נעשה אימות בנקודות "מייצגות" (לכאורה) ומכך מקישים על המעטפת כולה. גישה זו היא ציורית ומשכנעת, אבל חולשותיה – בחוסר השיטתיות שלה (כי התרחישים הנבחרים הם, מדרך הטבע, אלה הצצים בקלות רבה בדמיון, ולא בהכרח אלה המייצגים את הנקודות החשובות באמת במעטפת), וכן באי-התייחסותה ל"תרחיש שלא חשבנו עליו", העלול להתגלות בעתיד ולשמוט את הקרקע מתחת לטענת הבטיחות המאומתת.
גישה חלופית להפחתת מספר הניסויים היא "שיטת קנס", שבה מוחלפים מספר ניסויים בנקודות שונות של מעטפת התנאים הנדרשת, בניסוי אחד הנערך בתנאים מחמירים. חסרונה של הגישה הוא בכך שבמקרה של כישלון בניסוי, קשה להסביר אם הוא נבע מתכן לקוי המחייב תיקון, או מתנאי הניסוי החריגים שכלל אינם רלוונטיים לפעולת המערכת.

- העלות של ניסויים במערכת שלמה עלולה להיות גבוהה מאד. לפיכך נערכים לעתים ניסויים חלקיים, והשלמת המידע לרמת המערכת מבוצעת בסיוע ניתוחים וסימולציות. גישה זו היא שימושית יותר, אבל מחירה הוא תוקף (validity) נמוך יותר של המסקנות המופקות ממנה.

ניהול הבטיחות

ניהול הבטיחות נדרש לתת מענה לשני צרכים חשובים:

- האחד – צורך בניהול מובנה של הפעילויות בתחום הבטיחות כשלעצמו, הנובע מריבוין של הפעילויות האלה וממורכבותן. הניהול המובנה נועד להשיג, בין השאר, **אפקטיביות מירבית של החשיבה הבטיחותית**, כלומר מעבר ישיר וטבעי מזיהוי פערים וחולשות לאיתור פתרונות וליישומם ההנדסי הנכון. כדי לענות על צורך זה יש ליצור מסגרת פורמאלית לפעילות הבטיחות בפיתוח, להכין תכניות שעל פיהן תבוצע העבודה, ולהפעיל כלים למעקב אחר ביצוע התכניות.

- השני – צורך להבטיח היזון חוזר בין האנשים העוסקים בקביעת עקרונות הבטיחות לבין מנהלי הפרויקט ומפתחיו, וההכרח לתאם את פעילויות הבטיחות עם שאר הפעילויות בפרויקט. ההיזון החוזר והתיאום נועדים להשיג **השפעה של השיקולים הבטיחותיים על התכן במועד מוקדם ככל האפשר**, כך שיהיה מוטבע-מלכתחילה באיפיון המערכתי, באיפיון המכללים ובתפישת ההפעלה. שילוב מוקדם זה מונע צורך בשינויים ובשיפורים של תכן ונהלים במועד מאוחר, כאשר מתגלים פערים וחולשות בתחום הבטיחות ונוצר צורך לגשר עליהם. מענה הניתן בקונספט של המוצר ושל אופן הפעלתו הוא תמיד יעיל, חסכוני ומשולב יותר מאשר מענה המוצמד כ"טלאי" על גבי מוצר מוגמר. כלי ניהולי מרכזי בחשיבותו להשגת יעד זה הוא מעקב מתמיד, החל בשלבים הראשונים של הפיתוח וכלה בסיומו, על מצב העמידה בדרישות הבטיחות ("סטטוס הבטיחות").

על-מנת לעמוד ביעדי-העל האלה, על ניהול הבטיחות בפרויקט לכלול שני סוגים של כלים: כלי **תכנון** וכלי **מעקב**. כלי התכנון העיקריים הם תכנית הבטיחות הפרויקטית ותכנית אימות ותיקוף הבטיחות; תכניות אלה נכתבות כבר בשלבים הראשונים של הפרויקט (לקראת סקר התכן הראשוני), ומעודכנות במהלך התכן והפיתוח על פי הצרכים המתפתחים. הנושאים העיקריים למעקב הם סטטוס תכנית הבטיחות, סטטוס העמידה בדרישות, סטטוס אימות הבטיחות, והסיכונים השיוריים.

א. כלי תכנון: תכנית בטיחות פרויקטית

תכנית הבטיחות, שיש להכינה בצמוד להתארגנות הראשונית של הפרויקט, כוללת:
- הצגת ארגון הפרויקט בתחום הבטיחות: הבהרת אחריות ראש הפרויקט לבטיחות, מינוי "מהנדס מערכת לבטיחות", והגדרת הזיקה של בעלי התפקידים השונים במנהלת הפרויקט למימוש דרישות הבטיחות (עוד על האחריות הניהולית לבטיחות – בהמשך).
- זיהוי מקורות לדרישות הבטיחות (חוקים ותקנות, תקנים, נהלי הארגון, דרישות המזמין).
- זיהוי תהליכים שבאמצעותם ישולבו שיקולי הבטיחות בפרויקט (הכנת דרישות ומפרטים, תהליכי תכן, הערכה ואימות).
- זיהוי ממשקים רלוונטיים לשיקולי בטיחות (עם מערכות אחרות, עם הסביבה, עם המשתמש וכו').
- הצגת עקרונות המעקב שיבוצע על מידת העמידה בדרישות ועל סטטוס המימוש של התכניות עצמן.
- הצגת המנגנונים שבהם תושג בטיחות העובדים בפרויקט הפיתוח.

ב. כלי תכנון: תכנית אימות ותיקוף הבטיחות

תכנית מפורטת לאימות ולתיקוף הבטיחות, שתכניה תואמים לאמור בפרק הדן בנושא זה לעיל. נדרשת תכנית ממוקדת בעניין זה עקב האינטראקציה של מרכיביה עם ניסויים, בדיקות ופעילויות נוספות של הפרויקט הנערכים כחלק מתהליך הפיתוח, כרוכים בהשקעת משאבים רבה ומחייבים תיאום מדויק.

ג. **כלֵי מעקב: סטטוס תכנית הבטיחות, אימות העמידה בדרישות הבטיחות ותיקוף הבטיחות**

המעקב בנושאים אלה נועד לוודא כי ביצוע התכניות אינו "דועך" עם התקדמות הפיתוח, אלא נותר חי, פעיל ואף "בועט" כאשר הדבר נדרש. המעקב מבוצע לאורך כל חיי הפרויקט, ונתוניו מתעדכנים במקביל להתקדמות התכן, ההערכה והייצור. דיווחי סטטוס מוצגים באופן תקופתי ובמתכונת שיטתית לביקורת הנהלת הפרויקט, המזמין וגורמים רלוונטיים נוספים. הצגת סטטוס הבטיחות משולבת ב"אבני דרך" חוזיות כדוגמת סקרי תכן (ראו בהמשך).

ד. **כלי מעקב: "פנקס סיכונים שיוריים"**

רשימת סיכונים מזוהים בפרויקט, שתחילתה ב"רשימה ראשונית של גורמי סיכון" המוכנה במקביל לאיפיון המערכתי הראשוני של המוצר, והיא מתעדכנת באופן שוטף. עם התקדמות הפיתוח משתנה הרשימה בשתי מגמות: האחת – מחיקה של סיכונים שהתכן נותן להם פתרון מספק, והשניה – פירוט רב יותר של הסיכונים הנותרים. בסיום הפרויקט מקבל המזמין את הרשימה הסופית של ה"סיכונים השיוריים" – אלה שנותרו בתום תהליכי הפחתת הסיכונים מכיון שלא ניתן לבטלם או להפחיתם יותר – והנחיות כיצד לנהוג ולהשתמש במוצר כך שסיכונים בלתי-נמנעים אלה יישארו בשליטה ולא יובילו לתאונות ולפגיעות.

הדרך הנכונה לוודא ניהול רצוף ומעקב "חי" בתחום הבטיחות היא לשלב את הניהול והמעקב האלה במנגנוני הניהול והמעקב הכלליים של הפרויקט: פעולות הבטיחות מהוות אז מרכיבים אינטגראליים בתכנית העבודה של הפרויקט ובמעקב שעורכת ההנהלה. בשום-פנים אין לנהל את פעולות הבטיחות במסגרת תכנית עבודה המנותקת מתכנית הניהול הכוללת של הפרויקט!

אין ניהול ללא תיעוד, וגם ניהול הבטיחות בפרויקט כרוך בהכנת תיעוד מגוון: מפרט דרישות הבטיחות, מפרט דרישות התכן לבטיחות ("תרגום" דרישות הבטיחות הנוגעות לתכן למונחים הנדסיים), מפרט ממשקי בטיחות, מפרטי מערכת ומכללים ראשיים, ודו"חות בטיחות. שליטה ניהולית על ההכנה וההפצה של התיעוד הבטיחותי מושגת באמצעות קביעת "אבני דרך" פורמאליות בתחום הבטיחות, שבהן, בין השאר, נכללת ההפצה של מסמכים שנקבעו מראש. אבני הדרך משולבות בסקרי התכן המערכתיים שעורך המפתח מול המזמין בהתאם לחוזה הפיתוח. קיימת מתכונת מקובלת לשרשרת של סקרי תכן כאלה (טבלה 1). בכל סקר יש לכלול נושאי בטיחות ספציפיים, המתאימים למועד שבו נערך הסקר. להלן – סקירת הפעילויות בתחום הבטיחות, שיש לבצע בכל שלב של הפיתוח ולהציג במועד הסקר המסיים את השלב:

1. **גיבוש צורך והכנת דרישות עד SRR – סקר דרישות מערכת** (System Requirements Review):

- מפרט דרישות בטיחות (על פי כל המקורות)

2. **תכן מערכתי עד SDR – סקר תכן מערכתי** (System Design Review):

- תכנית בטיחות פרויקטית
- מפרט דרישות-תכן לבטיחות
- רשימה ראשונית של גורמי סיכון[12]
- מפרט ממשקי בטיחות בין מרכיבי המוצר ובינו לבין הסביבה.

[12] Preliminary Hazard List – PHL

- הערכה לעמידת עקרונות התכן בדרישות הבטיחות

3. **תכן-על עד PDR – סקר תכן ראשוני** (Preliminary Design Review):

- עדכון מפרט דרישות התכן לבטיחות (אם נדרש לאור לקחי התכן הראשוני)
- תכן מערכתי לבטיחות (אם רלוונטי למוצר)
- הערכת בטיחות ראשונית (עצם היכולת לעמוד בדרישות, ומידת העמידה בהן)[13]
- תכנית כללית לאימות הבטיחות (דגש על צורך בניסויים)
- פרקי בטיחות למפרטי מערכת ומכללים ראשיים
- הערכת סטטוס הבטיחות במחזור החיים

4. **תכן מפורט עד CDR – סקר תכן מפורט** (Critical Design Review):

- הערכת מסכמת לבטיחות התכן (הנמקה מפורטת לעמידה בדרישות)
- עדכון מפורט של התכנית לאימות הבטיחות
- הערכות בטיחות מפורטות למכללים[14]
- אימות הבטיחות – ביצוע (חלקי) ותיעוד; עדכון תכנית האימות
- עדכון להערכת סטטוס הבטיחות במחזור החיים

5. **פיתוח והרכבה עד TRR – סקר מוכנות לניסוי** (Test Readiness Review):

- הערכות בטיחות לתהליכי ייצור והרכבה
- המשך אימות הבטיחות
- הערכות בטיחות לניסויי פיתוח וקבלה
- עדכון להערכת סטטוס הבטיחות במחזור החיים

6. **ניסויים ומבחני-אישור עד PRR – סקר מוכנות לייצור** (Production Readiness Review):

- השלמת הניסויים ואימות הבטיחות
- תיעוד מסכם של הערכת הבטיחות עם השלמת הפיתוח
- הערכת בטיחות להפעלה ולתחזוקה[15]
- הערכה מסכמת של סטטוס הבטיחות במחזור החיים

7. **בטיחות בייצור ובהפעלה שוטפת – "תמיכה במוצר" לאורך מחזור החיים עד הוצאה משירות**

- התעדכנות מתמדת על מצב הבטיחות
- ניהול והערכת הבטיחות בתהליכי שדרוגים ("שו"ש" – שינויים ושיפורים)
- ניהול והערכת הבטיחות בהוצאת המוצר משירות

מימוש האחריות לבטיחות בהנהלת הפרויקט

[13] Preliminary Hazard Analysis – PHA

[14] Sub-System Hazard Analysis – SSHA

[15] Operation and Service Hazard Analysis – O&SHA

בעמודים הקודמים תוארה מסכת ענפה ומורכבת של פעילויות. לצורך ביצוע פעילויות אלה דרוש צוות מקצועי ומאורגן, שבראשו עומד מנהל ממוקד ובעל תחושת מחויבות עמוקה. **האחריות לבטיחות המוצר חלה על מפתח המוצר, ובראש-ובראשונה – על ראש הפרויקט**: הוא האחראי לעמידה בדרישות הבטיחות באמצעות השגת יעדי הבטיחות הנכללים במפרטים, לביצועה של תכנית הבטיחות, להטמעתן של המסקנות וההמלצות הנגזרות מהערכות הבטיחות (במהלך הפיתוח) ומן הפעולות לאימות הבטיחות (בשלביו הסופיים של הפיתוח), ומעל לכל – ליצירת תרבות של מחויבות-לבטיחות בצוות הפיתוח.

לצידו של ראש הפרויקט עומד "מהנדס-מערכת לבטיחות" או "מהנדס בקרת סיכונים" (המינוח משתנה בארגונים שונים, אבל המשמעות נשארת בעינה). הוא האחראי להובלה המקצועית והניהולית של כלל פעילויות הבטיחות בפרויקט, להכנת תכניות עבודה בתחום הבטיחות ולמעקב אחר ביצוען, לביצוע ניתוחי בטיחות (או לבקרה על ביצועם בידי גורמים אחרים), ולאינטגרציה של כלל הפעילויות והחשיבה בהיבטי הבטיחות ע"י אנשי התכן, הייצור, ההרכבה, הניסויים והתמיכה במוצר.

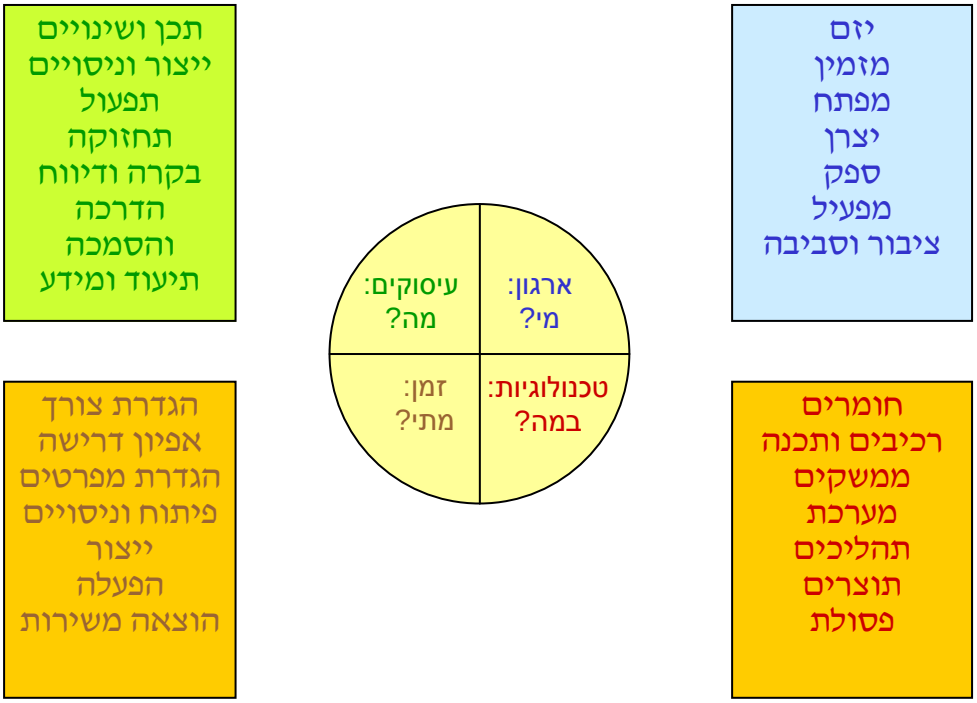
מהנדס המערכת לבטיחות אינו פועל ב"חלל ריק": יש לראות את כל בעלי התפקידים בפרויקט כממלאי משימות בתחום הבטיחות, וזאת כמרכיב אינטגראלי בעבודת הפיתוח. הבטיחות אינה נחלתם של אנשי הבטיחות המקצועיים בלבד: בצד המימד המקצועי שלה, היא אמורה להיות קו-מנחה ובסיס למחשבה של כל צוות הפיתוח. ההטמעה של תפישה זו בקרב אנשי הצוות כולם היא, כאמור, אחת ממשימותיו החשובות של ל ראש הפרויקט, בסיועו המקצועי של מהנדס המערכת לבטיחות.

סיכום

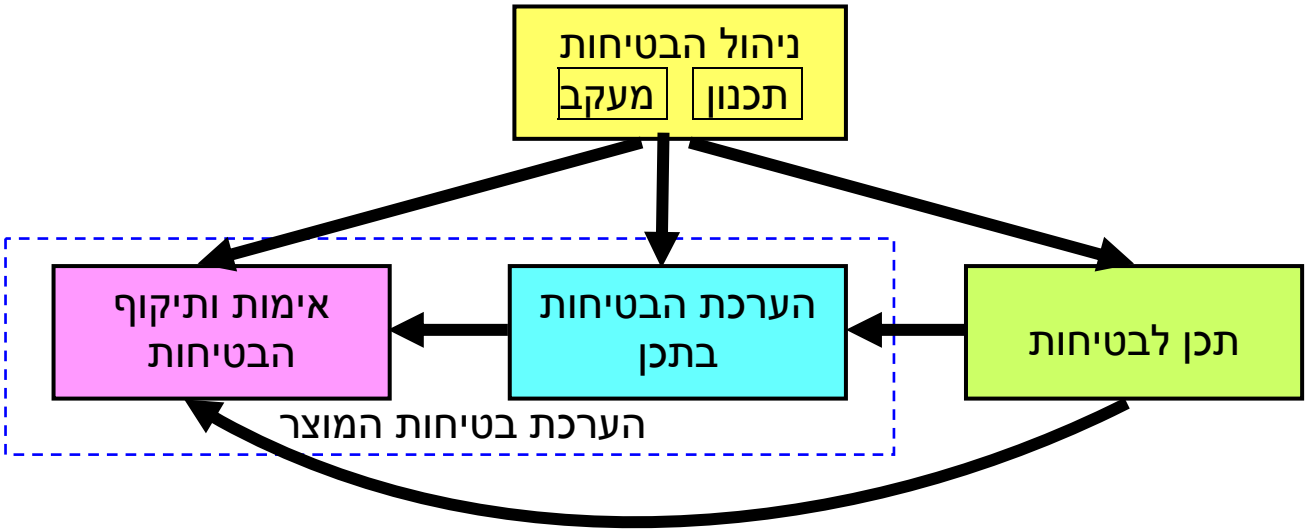
האמור במאמר זה הציג מתכונת שיטתית לשילוב המדובר, מתכונת המשמשת מזה שנים, במידה רבה של הצלחה, גורמים העוסקים בפיתוח מערכות ומוצרים מורכבים בחזית הטכנולוגיה.

מהי הזיקה בין בטיחות המוצר לבין הביצועים והאמינות התפעולית של המוצר? יש הטוענים כי התכן לבטיחות תומך מעצם-טבעו באמינות התפעולית (או המבצעית), שכן תנאי למוצר אמין הוא היותו בטוח. אחרים טוענים במפגיע כי הבטיחות כרוכה בהוספת מערכות יתירות ובסרבול לוגיקת ההפעלה, ולפיכך מימוש דרישות הבטיחות יוצר סיבוך הפוגע בביצועים ובאמינות התפעולית. ההנחה העומדת בבסיס טענה זו הוא כי ככל שמערכת היא פשוטה יותר, כן היא אמינה יותר.

לשאלה זו אין, ככל הנראה, תשובה יחידה. לפעמים הטמעת שיקולי הבטיחות במוצר משפרת גם את אמינותו, ובמקרים אחרים היא מפחיתה אותה. הבטיחות והאמינות הן מרכיבים של איכות המוצר. כדרכם של מרכיבים במכלול, לפעמים הצירוף שלהם הוא סינרגטי ולפעמים – יוצר ניגודים. בשילוב של שיקולי הבטיחות בתכניות הפיתוח הפרויקטי וביישומם במימוש הפיתוח הלכה למעשה יש להפעיל הרבה שיקול דעת, תפישה מאוזנת של צרכים ואילוצים, ובראש-ובראשונה – שכל ישר. בטיחות המוצר חיונית לאיכותו ולשימוש בו; אבל אסור לנתק אותה ממערך השיקולים השוטף של הפיתוח, אלא להיפך – יש לשלבה במערך השיקולים הזה במועד מוקדם ככל האפשר ובמידה המירבית האפשרית.



איור 1: מרכיבי הפיתוח הפרויקטי

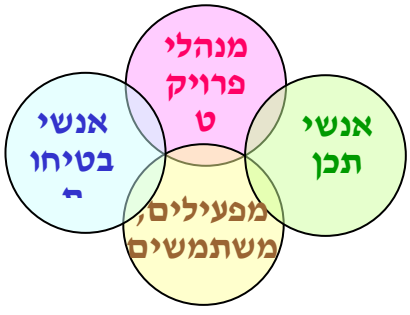


איור 2: זיקה בין ערוצי הפעילות לבטיחות בפיתוח פרויקטי

איור 3: דוגמא למנגנון ייעודי לבטיחות – כסא-מפלט במטוס קרב

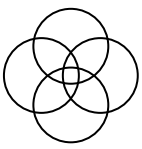
- ריכוז מטרות, משימות ומגבלות
- הכוונה, ניהול וארגון
- סמכות וקבלת החלטות
- אינטגרציה

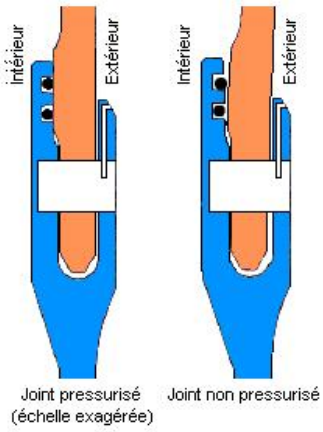
- ידע פרויקטי ספציפי
- הכנת מפרטים
- מתן פתרונות-תכן
- תכנון ניסויים וביצועם



- הכנת תכנית בטיחות
- זיהוי גורמי סיכון
- הפעלת שיטות ניתוח

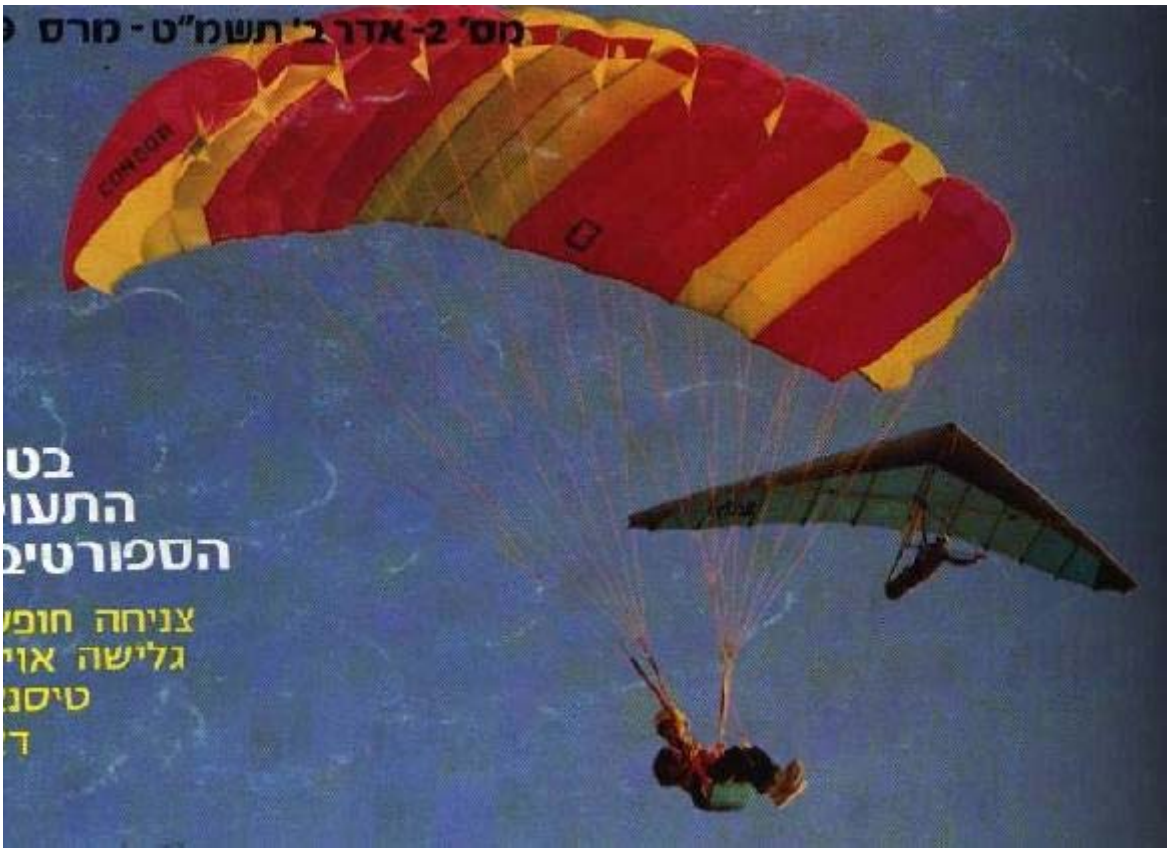
- ניסיון תפעולי
- הגדרת הצורך
- אבלואציה תפעולית
- השתתפות בהכנת נהלים



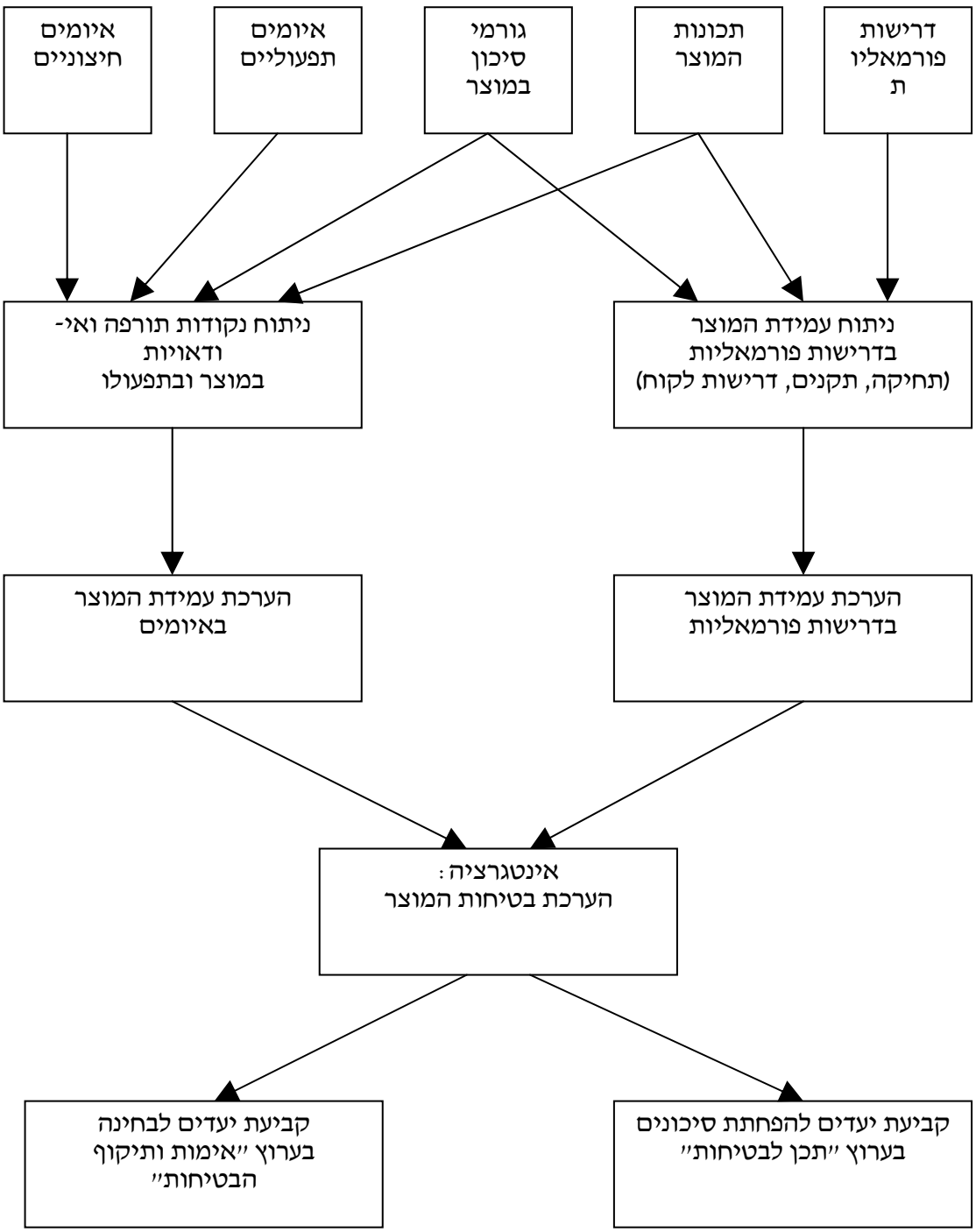


איור 4: צוות בטיחות בפיתוח ומשימותיו

איור 5: אסון המעבורת צ'לנג'ר – תוצאה של תכן לא חסון
מימין: טבעות-האטימה שנכשלו; באמצע: עדות לטמפרטורה הנמוכה בבוקר השיגור;
משמאל: התוצאה



איור 6: תכן לבטיחות בגישת החלפה – מעבר מגלשני-רוח למצנחי-רחיפה



איור 7: הערכת הבטיחות בתכן

איור 8: ניסוי לאימות בטיחות – התנגשות רכב

שלב בחיי המוצר	סקר	פעילות הפיתוח	מידע ומסמכים
אפיון הדרישות		בדיקת היתכנות, לימוד תקנות ותקנים, ניתוח דרישות המזמין	
	– SRR סקר דרישות מערכת	סקר דרישות המזמין	מפרטי דרישות למוצר
תכן מערכתי		בחינת קונספטים וחלופות, הגדרת ממשקים חיצוניים	סקר חלופות, סקר טכנולוגיות וניתוח סיכונים בפיתוח, הגדרת ממשקים
	– SDR סקר תכן מערכתי	אישור הקונספט הנבחר	סיכום הסקר
תכן ראשוני		קביעת ארכיטקטורה וממשקים פנימיים; בניית עץ-מוצר שלדי	הגדרת הארכיטקטורה תכניות אינטגרציה וניסויים תכניות לו"ז ומשאבים
	– PDR סקר תכן ראשוני	אישור הארכיטקטורה	סיכום הסקר
תכן מפורט		תכן מפורט למכללים תכן פרמטרי לביסוס נקודת העבודה	מפרטי תכן מלאים שרטוטים, אנליזות, חישובים
	– CDR סקר תכן מפורט	אישור התכן המפורט	סיכום הסקר
ייצור אבי-טיפוס וניסויי פיתוח		בניית מכללים ניסויי פיתוח ומבחנים מפורטים	מפרט ניסויי פיתוח תוצאות ניסויי פיתוח רישום תקלות
	– TRR סקר מוכנות לניסוי	אישור תכנית ניסויי קבלה	סיכום הסקר
ייצור וביצוע מבחני אישור		מבחנים מערכתיים מבחני אישור פורמאליים	תוצאות מבחני אישור תיק תכ"מ תיעוד תפעולי
	– PRR סקר מוכנות לייצור	אישור קווי ייצור אישור מתקנים	סיכום הסקר
ייצור סדרתי		ייצור סדרתי	הוראות תחזוקה
תמיכה במוצר		תמיכה, שדרוגים	
גריטה		תכנית הוצאה משירות תכנית פירוק וטיפול בפסולת	

תיכון מערכות בעלות כושר הסתגלות באמצעות שימוש באופציות ארכיטקטוניות

(Designing Systems for Adaptability by Means of Architecture Options)

אבנר אנגל התעשייה האווירית
טיסון בראונינג Texas Christian University (TCU)

תקציר: מערכות הנדסיות מספקות תמורה לאור יכולתן לענות על צרכים ורצונות של בעלי עניין שונים. צרכים אלה מתפתחים במשך הזמן ועשויים לחרוג ממעטפת היכולות של המערכת המקורית. לפיכך, ערך המערכת למשתמשים בה הולך וקטן עם הזמן. כתוצאה מכך, יש להחליף או לשדרג מערכות בעלות גבוהה ובפגיעה בשירותים המסופקים. אולם מערכת המתוכננת מראש לשינויים ולשדרוג, יכולה לתת תמורה גדולה יותר לאורך כל חייה. איך אם כן, ניתן לתכנן מערכת בעלת כושר הסתגלות לשינויים עתידיים שתספק תמורה מירבית לבעלי העניין לאורך כל חיי המערכת? מאמר זה מתאר את הבעיה וכן מציע דרך לפתרונה.

במסגרת המאמר, אימצנו את המושג של "אופציות ממשיות" (Real options) מתחום הכלכלה והרחבנו אותו לתחום ארכיטקטורת המערכות. הגדרנו את המושג "אופציות ארכיטקטוניות" (Architecture options) כשיטה וכלים חדשניים שבעזרתם ניתן לתכנן כמותית מערכות בעלות כושר הסתגלות לשינויים עתידיים. הגישה של אופציות ארכיטקטוניות מאפשרת תיכון של מערכות גמישות שיספקו צרכים של בעלי עניין שונים לאורך כל חיי המערכת באופן אופטימאלי. בהסתמך על תוצאות מחקר ראשוני בנושא, אנו סבורים שישום היבט זה של "תיכון לגמישות" עשוי להגדיל את התמורה הכוללת של מערכות לבעלי העניין לפחות ב-15%, וזאת כהערכה מינימאלית. כמו כן, אנו מרחיבים את השיטה של אופציות ארכיטקטוניות לחישוב ערך דינאמי של מערכות.

Introduction

The Problem

Systems provide value through their ability to fulfill stakeholders' needs and wants. These needs evolve over time and may diverge from a fielded system's capabilities. Thus, a system's value to its stakeholders diminishes over time. Some reasons for this decrease include growth in stakeholder wants and technological opportunities, which make an existing system seem inadequate, and growth in a system's maintenance costs, due to effects such as depreciation and component obsolescence. As a result, systems have to be periodically upgraded at substantial cost and disruption. Since complete replacement costs are often prohibitive, system adaptability is a valuable characteristic. While most of a system's value to its stakeholders accrues as it is used (the usage phase), the extent of this value is largely determined by key decisions made when it is designed (the development phase) [Murman *et al.*, 2002]. Therefore, increasing a system's lifetime value

requires improved methods of design. However, these new methods and tools cannot be stand-alone solutions; rather, they must be harmonized with existing and emerging system design methodologies. It is not trivial simply to add *design for adaptability* (DFA) to current design methods, because there are costs of including increased flexibility and upgradeability in a design. Thus, an economic model is needed to help designers determine the optimal amount of "adaptability" a system should possess. Unfortunately, the current concepts, methods and tools for the design of systems (emanating from the traditional engineering disciplines) lack vital business and economic components, resulting in designs that are not easily and quickly adaptable to evolving needs. DFA indeed requires a systems engineering perspective.

Key Terms

1. *Adaptability* is a characteristic of a system amenable to change to fit altered circumstances, where "circumstances" include both the context of a system's use and its stakeholders' desires.[16]

2. System *upgrades* are externally imposed changes which aim to increase the value and profitable life of a system by closing emerging gaps between stakeholder desires and system capabilities.

3. *Stakeholders* are any person, group or organization with a vested interest in a system, now or in the future.

4. *Value to stakeholders* is provided by congruence between stakeholder desires and system capabilities. Stakeholder needs and wants are defined in terms of various desired benefits and acceptable sacrifices, and system capabilities are defined in terms of various quality attributes and levels of performance [Browning, 2003; Browning & Honour, 2005].[17]

5. *System architecture* is "the fundamental organization of a system embodied in its components, their relationships to each other, and to the environment, and the principles guiding its design and evolution" [IEEE, 2000].

6. A *modular system* has a one-to-one mapping from functional elements in its function structure to its physical components and specifies decoupled interfaces between components, whereas an *integral* system has a complex (non one-to-one) mapping from functional elements to physical components and/or coupled interfaces between components [Ulrich, 1995].

The State of the Art

Currently, typical systems are designed solely to meet stated requirements at a point in time. Many designers do not account for the fact that systems and their environments evolve, although ample literature [e.g., Schulz and Fricke, 1999] indicates that systems undergo major upgrades every few years. Furthermore, as shown in Figure 1, various subsystems may evolve at different rates. Thus, certain parts of the system should be designed so as to be easily decoupled from the rest

[16] According to the dictionary, to adapt means "to make fit (as for a specific or new use or situation), often by modification" [Webster, 2007].

[17] See these references for a fuller discussion and definition of value.

of the system to facilitate partial upgrades. However, a system that is not designed to provide such changes over its lifetime is said to be "inflexible." Consequences of low system flexibility include: (1) extensive upgrade costs, (2) significant disruptions to users, due to system outages caused by both failures and upgrade installations, (3) lost opportunities, and (4) unnecessary value loss for stakeholders.

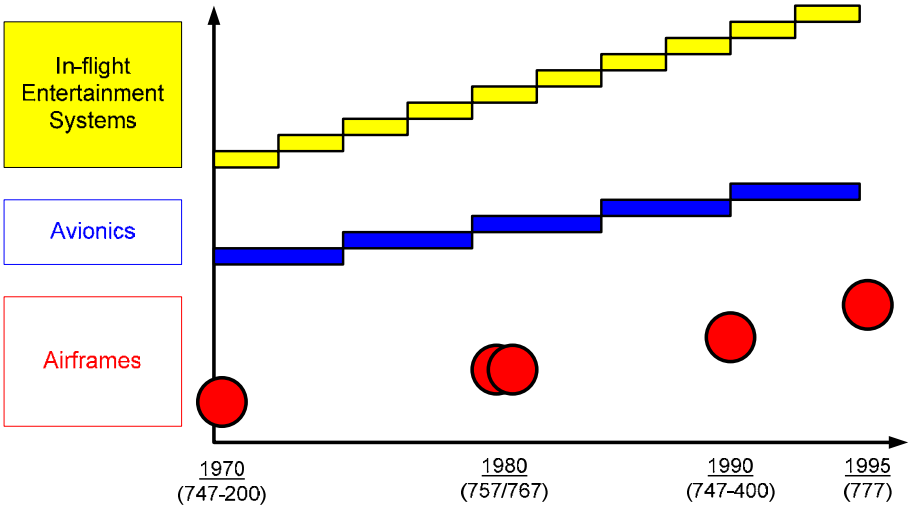


Figure 1: Boeing data on systems upgrades, adopted from [Gartz, 2001]

The earliest formal, public DFA considerations appeared in 1986 in the context of computer hardware and software design [Alexandridis, 1986]. Such philosophies eventually led to the development of computer devices and software packages possessing "open" systems architectures (e.g., object-oriented). An alternative DFA methodology, the Product Line Practice Initiative (PLPI) [Cohen, 2003], guides organizations away from traditional, one-at-a-time system development and towards the paradigm of systematic, large-scale reuse of product lines. However, PLPI is limited to software components. Several other research centers are also interested in various aspects of software DFA. For example, the Distributed Systems Research Group (DSRG) is interested in identifying, understanding and constructing technology that facilitates adaptable software systems. However, these efforts are oriented towards a narrow band of existing systems within the software domain.

Open systems provides another limited DFA approach emphasizing standard interfaces and subsystem modularity. This is both a technical approach to systems engineering and a preferred business strategy applied by the US Department of Defense (DoD) for large and complex systems [Hanratty, 1999]. Yet, the issue of DFA is much wider than the scope of open systems.

Fricke and Schulz [2005] recognize the importance of Design for Changeability (DfC) since systems continue to evolve throughout their lifetime. They suggest that flexibility, agility, robustness, and adaptability are the four key aspects of changeability and discuss how changeability has to be incorporated into a system's architecture. Larses [2005] describes quantitative efforts to optimize product modularization at the Swedish truck company Scania. The automotive industry requires that a system architecture be optimized for use over a range of products, and also for reuse over time with continuous improvements. While Fricke and Schulz stress qualitative issues, Larses addresses quantitative design optimization,

yet without sufficient elaboration of the model and equations.

Researchers at the Massachusetts Institute of Technology (MIT) have been developing a theoretical approach to the value of flexibility [de Neufville et al., 2004]. These concepts, defined as real options "in" projects, are options created by changing the design of the technical system. Real options in systems can be very effective [Wang, 2005; Kalligeros, 2006]. Wang and de Neufville [2006] propose a procedure to identify real options "in" engineering systems. The method consists of a screening and simulation procedure. The screening model is a low-fidelity representation of the system that reflects its most important issues and the simulation model is used to validate critical considerations, such as the robustness and reliability of the design. Bartolomei et al. [2006] discuss the end-to-end representation of a complex socio-technical system through the concept of an engineering system matrix (ESM), "a holistic representation of an engineering system that captures the critical variables and causal interactions across architectural elements." The authors propose a definition for an *engineering system* as "a complex socio-technical system that is designed, developed, and actively managed by humans in order to deliver value to stakeholders" and note that what separates an engineering system from other complex systems is the aspect of value delivery. Nilchiani [2005] and Nilchiani and Hastings [2007] use an extensive review of the literature on space systems to quantify system flexibility, manufacturing flexibility and systems engineering. They identify six key elements that affect the value of flexibility: uncertainty, time window of change, system boundary, response to change, the system aspect to which the flexibility is applied, and access to the system. Based on this framework, they propose a twelve-step procedure for assessing the value of flexibility.

Yu *et al.* [2007] are interested in issues similar to those concerning the authors of this paper-namely, how to architect a system for flexibility and adaptability. They propose an architecture clustering metric based on a Minimal Description Length (MDL) model. MDL views interfaces as consisting of transmitting an approximate description of a given dataset together with information describing the inherent mismatch. The MDL concept is used as an objective function for a genetic algorithm optimization, which may generate an optimal number of clusters as well as their composition. In this paper, while we advocate a similar optimization approach, we frame the design problem differently, considering needs for adaptability over the lifetime of a system.

Research Need

Although various methods exist to improve system value in a dynamic context (see Figure 2), there is still a need for improved methodologies that quantify the value and achievable benefits of DFA (e.g. modularity, open systems, object orientation, interface standardization, etc.) in system architectures. We still need greater insight into the question: *How can adaptability be designed into systems so that they will provide greater value to stakeholders over a longer time?*

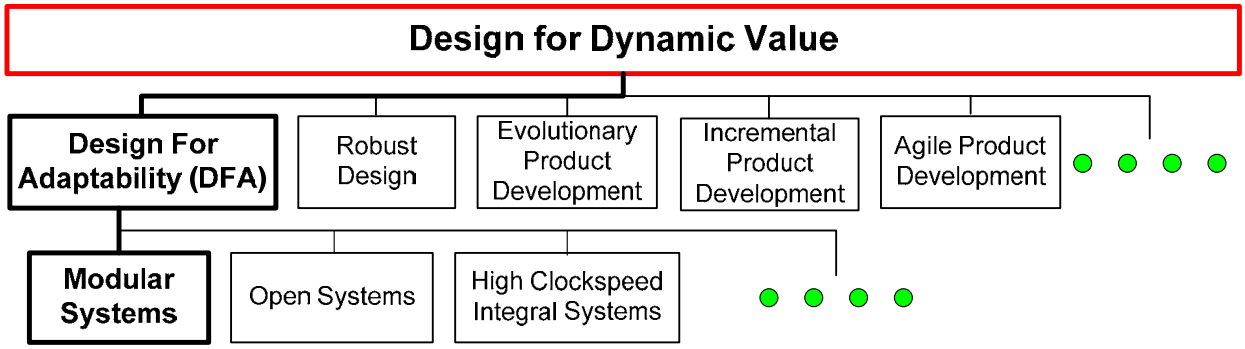


Figure 2: Research context

Overview of Our Approach

We seek to provide an extension to system design theory in the context of dynamic value. To do this, we incorporate basic aspects of economic options theory, which we call *architecture options* (AO), into the design and evaluation of systems. Our approach harmonizes DFA techniques with existing design methodologies to provide the system development community with a useable DFA methodology and a quantitative DFA economic model. As Figure 2 shows, existing product development philosophies that address the dynamic desires of stakeholders provide a good basis for the development of a DFA methodology. However, none of them is sufficient alone. Since modularity has made a major contribution to product flexibility (i.e., the capability to make inexpensive changes in a design; e.g., Alexander [1964], Ulrich [1995], Baldwin & Clark [2000]), it provides the main focus of our research. However, we also seek to investigate, evaluate, and incorporate other methods that contribute to adaptability. Much of this work remains, so in this paper we seek merely to provide an introduction and some preliminary results.

Economic options theory has been applied to engineering design in an effort to "design in" flexibility [de Neufville, 2001, 2003]. The current theory of economic options distinguishes between three types: (1) financial options, (2) real options and (3) real "in" options. Our research seeks to develop an optimal approach to DFA by proposing a new, further stage: *architecture options* (see Figure 3). AOs provide a quantitative means of exploring the optimal degree of design flexibility in a system in order to maximize its lifetime value for varied stakeholders.

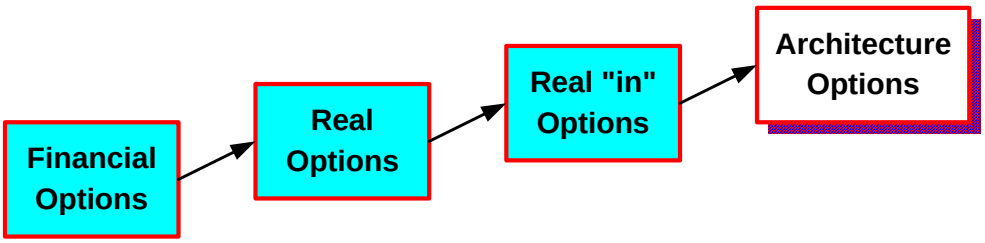


Figure 3: From "financial options" to "architecture options"

In finance and economics, an *option* is "the right but not the obligation to exercise a feature of a contract at a future date" [Higham, 2004]. This can be translated into systems engineering by identifying certain flexibility vis-à-vis the system's future evolution. In other words, we associate the set of software and hardware components and interfaces embodying the system architecture with a set of economic options that can be exercised in the future as the system is upgraded. In general, the more modules in a system, the more options there are (representing adaptability "options value"). However, the more modules, the more interfaces there are (representing "options price"). In balancing these costs, and given a set of assumptions about rates of change and future states of stakeholder desires, there exists at least one system architecture with optimal adaptability value. Therefore, we propose the following steps for a DFA methodology: (1) identify potentially desired functionalities, associating each with a systems component and determining its option value; (2) identify each functional interface between components and determine its option cost; and (3) combine analytical (e.g., Taguchi loss function) [Taguchi, 1980; Barad and Engel, 2005] and meta-heuristic (e.g., genetic algorithm) optimization techniques, to identify optimal architectures for different stakeholders. The value of systems to their stakeholders is a combination of many subjective factors related to technical quality and capability, timeliness, and cost. In practice, these factors are converted to a monetary value through personal biases toward utility and risk [Vollerthun, 2002].

The rest of this paper is organized as follows. In the next section, we provide a fuller discussion of options theory as the basis for architecture options, which we describe in section 3. We then present our AO model and analysis in two parts. The first part, in section 4, applies AO to a static architecture—i.e., at a single point in time. The second part, in section 5, applies AO to a dynamic situation, exploring value over time. Section 6 discusses how to gather the data required for the model, and section 7 concludes the paper. Again, our primary aim is to provide some introduction to the ideas of DFA and AO for the systems engineering community and to present some preliminary results with static and dynamic models. We see this as a basis for much future research.

Options Theory

Before introducing AOs, we provide a brief overview of three other types of

economic options.

Financial Options

In finance, an option is a contract whereby the contract buyer has a right to exercise a feature of the contract (the option) at future date (the exercise date), and the seller (or "writer") has the obligation to honor the specified feature of the contract. Since the option gives the buyer a right and the seller an obligation, the buyer has received something of value. The amount the buyer pays the seller for the option is called the option premium. The term "financial options" refers to a derivative security, an option which gives the holder of the option the right to purchase or sell a security at a predefined time in the future, for a predetermined amount.

Historically the pricing of options was entirely *ad hoc*. Traders with good intuition about how other traders would price options made money and those without it lost money. Then in 1973 Fischer Black and Myron Scholes published a paper proposing what became known as the Black-Scholes pricing model [Black and Scholes, 1973], which led to a 1997 Nobel Prize. The model gave a theoretical value for simple put and call options, given assumptions about the behavior of stock prices. The availability of a good estimate of an option's theoretical price contributed to the explosion of trading in options. Researchers have subsequently generalized Black-Scholes to the Black model, and have developed other methods of option valuation, including Monte Carlo and binomial models.

Real Options

The concept of real options originated in the field of finance [Myers, 1984] but is concerned with physical assets traded in markets. Specifically, they refer to elements of a system that provide rights to achieve some goal without obligations. For example, a modular system architecture, in which components such as computers can be easily replaced, gives the system's stakeholders an ability to do so (at a particular level of cost) which they otherwise would not have (at the same level of cost) if the system was highly integral. Real options analysis blends technical and market considerations. This observation has important implications for how financial options analysis translates into system design. Since the early 1990s, numerous authors [e.g., Baldwin and Clark, 2000] have extended this analysis to engineering systems. Zhao and Tseng [2003] and other researchers offer case studies demonstrating the practicality and the effectiveness of real options.

The real options approach to systems design attempts to manage the major risks confronting the design. It seeks opportunities to build real options into design, evaluates these possibilities, and implements the best ones. Unlike conventional decision analysis, which works with a predetermined set of possible decision paths, the options approach seeks to identify new paths and change the decision tree by adding flexibility for its own sake. Thinking in terms of real options illuminates opportunities that designers may have previously underused or ignored. Real options analysis enables managers and designers to estimate the value of system flexibility.

In this context, it often might be cost-effective to *stage* or *stream* the development of systems (incrementally) to bring parts of it into service as needed. Streaming avoids the development of unnecessary capability and capacity. It also defers some expenses, which can considerably reduce the (present value) cost of a system.

Moreover, when the implementation of later stages is deferred until needed, the design of the system can accommodate the latest technology and cater more precisely to the latest needs.

Real "In" Options

Real "in" options [de Neufville, 2001] is a recent extension to real options that categorizes them as either "on" or "in" projects. Real options "on" projects are financial options taken on technical things, treating the particular system as a "black box." Real options "in" projects (ROIP) are options created by changing the system design. A simple example of a real option "in" a system is a spare tire on a car: it gives the driver the right (without the obligation) to change a tire at any time [Wang, 2005].

In general, ROIP require a deep technical understanding of the system being developed. Because such knowledge is not readily available among options analysts, there have so far been few analyses of ROIP, despite the important opportunities available. Moreover, because the data available for analyzing ROIP are of much poorer quality than those for financial options or real options "on" projects, ROIP require their own appropriate analysis framework. Nevertheless, ROIP can be very effective. For example, de Weck *et al.* [2004] evaluated real options "in" a satellite communication system and determined that their use could increase the value of the system by at least 25%. In that case, the real options "in" the satellite constellation involved additional positioning rockets and fuel in order to achieve a flexible design that could adjust capacity according to need.

ROIP are of special interest to the study of engineering systems. Large-scale engineering projects share three major features: (1) they last a long time, which means they need to be designed with the demands of a distant future in mind; (2) they typically exhibit economies of scale, which motivates large quantities of products and infrastructure; and (3) they exhibit highly uncertain future requirements, since forecasts of the distant future are almost always wrong.

Architecture Options

Our proposed AO theory is an extension of ROIP theory. One aspect of AO involves system modularity. Here, we consider all the modules constituting a system as options in an economic sense and seek to identify an optimal system architecture in terms of "adaptability attributes" that support recurring, originally unforeseen, upgrades of the system.

Theory

Architecture options theory for system modularity is based on ideas adopted from Baldwin and Clark [2000] and expanded for this research. When a design is "modularized," the system components are divided up and assigned to modules according to a given architecture. Each module within the architecture is a part of a larger system and must fit with the other modules to function together as a whole. From an engineering perspective, modularization has three main purposes:

1. To make system's complexity manageable,
2. To enable parallel work by different design teams, and
3. To accommodate future uncertainty.

Modularity accommodates uncertainty because the particular elements of a modular design may be changed after the fact, and in unforeseen ways, as long as the *design rules* are obeyed [Baldwin and Clark, 2000]. These design rules dictate the architecture and the interfaces of the system. Thus, "modularizing" a system involves specifying its architecture—i.e., it is a key aspect of system architecting [Rechtin, 1991]. Once the design rules are defined, new modules and new interfaces may replace older ones at minimal cost. Modularity in the design of a system allows components to be changed over time while improving the functionality of the system as a whole. In this sense the modular design of a complex system facilitates adaptations to future uncertainty. This ensures the option to modify the system to fit future demands.

Even at the point when a system is introduced into a market or delivered to a customer, the final outcome in terms of ultimate stakeholder satisfaction is uncertain. In other words, uncertainty about a system's design translates into uncertainty about its long-term success. This issue cannot be anticipated with certainty, and this uncertainty causes alternative designs to have "option-like" properties. In engineering, a new design creates the ability but not the necessity (the right but not the obligation) to do something in a better way. In general, the new design will be adopted only if it is superior to the current one. The option-like structure of designs has important consequences. When payoffs take the form of options, taking more risk can create more value. That is, increased uncertainty (variation or volatility) with consequences generally increases the value of the options. Intuitively, a risky design is one with high technical potential but less guarantee of success. "Taking more risk" means accepting greater dispersion in the range of potential outcomes.

Architecture Option Value in Terms of System Lifetime Value

Different system architecture alternatives must be evaluated. To that end, the DFA-relevant design risks and opportunities are considered that describe the design aspects that may have to be changed in the future in order to keep up with the increased value desired by the stakeholders. After an analysis of the design alternatives, this step provides the lifetime value evaluation results with a ranking of the different design alternatives. Moreover, the evaluation also provides insights about strengths and weaknesses of the different design alternatives, which is important information for the architecture optimization in the following step.

Bahsoon and Emmerich, [2003] proposed the concept of *architectural stability* as a measure of software system flexibility to endure evolutionary changes in stakeholders' requirements and the environment. They extend the Black-Scholes financial option pricing method to optimize software architectures' flexibility vis-a-vis refactoring[18] [Bahsoon and Emmerich, 2004] and middleware[19] design [Bahsoon et al., 2005]. The flexibility of the software architecture is determined by the volatility of requirements and their influence on the evolving architecture.

18 A software refactoring is any change to a computer program, which improves its readability or simplifies its structure without changing its results.

19 Middleware technologies (e.g. J2EE, CORBA) simplify the construction of distributed systems by providing high-level primitives, which shield the application engineers from the distribution complexities.

Browning and Honour [2005] define a procedure for measuring the life cycle or lifetime value of a system on a very high level, emphasizing that lifetime value depends on several system parameters (not only adaptability) and the stakeholders. Different stakeholders have different, often conflicting views on the lifetime value of a system. We refine this approach for measuring lifetime value in the case of AOs with respect to system modularity.

Our approach incorporates ideas from several modeling approaches, including the System Modeling Language (SysML) [Hause *et al.*, 2004], an extension of the popular Unified Modeling Language (UML) [Booch *et al.*, 1999] that supports integrated modeling of the hardware and software components of a complex system, and the component-based *design structure matrix* (DSM) [Browning, 2001], which represents the element-to-element relationships between components in an (N-square) matrix.

Static Evaluation of Architecture Flexibility

First, to evaluate architecture flexibility in a static case, we define three helpful metrics: system adaptability factor, component option values, and interface cost factors. Each is defined in one of the following sub-sections, after which we demonstrate their use with an example.

System Adaptability Factor

As an initial approach to the issue of system adaptability, we define a metric called the *system adaptability factor* (*SAF*).[20] We adopted standard ISO/IEC 9126-1, "Software Engineering - Product quality - Part 1: Quality model," which describes six categories of software quality (see Figure 4). While we are concerned with a broader set of system types than pure software systems, these metrics also pertain to systems more generally.

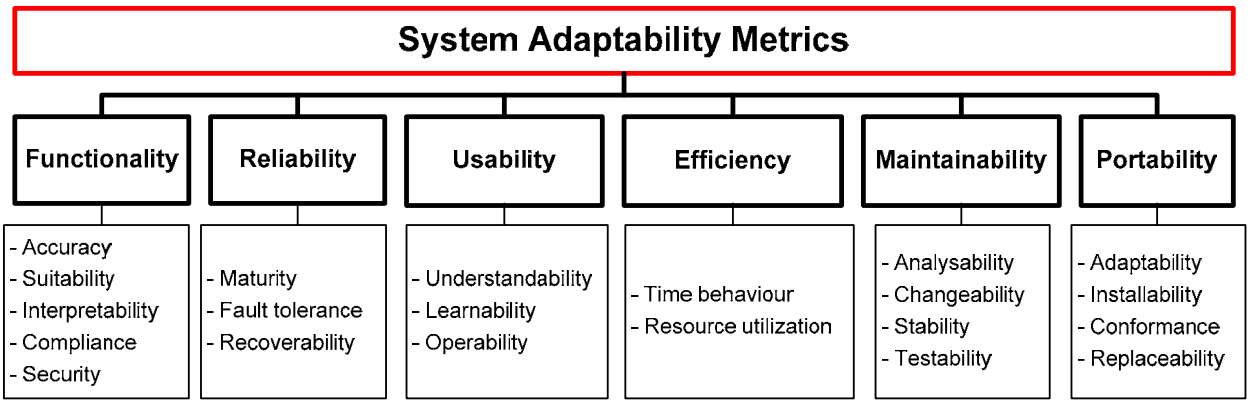


Figure 4: ISO/IEC 9126-1 standard components

We use the ISO/IEC 9126-1 standard as a starting point to derive six metrics, described in Table 1, that collectively quantify the *SAF*.

Table 1: *SAF* constituent metrics (initial values)

[20] The SAF and other variables used in this paper are summarized in a nomenclature list at the end of the paper.

Metric	Variable	Weight (w_i)	Description
Functionality	*F*	0.1	The capability of the system to provide functions that meet stated and implied needs when the system is used under specified conditions
Reliability	*R*	0.1	The capability of the system to maintain its level of performance when used under specified conditions
Usability	*U*	0.1	The capability of the system to be understood, learned, used, and liked by the user, when used under specified conditions
Efficiency	*E*	0.1	The capability of the system to provide the required performance, relative to the amount of resources used, when used under specified conditions
Maintainability[a]	*M*	0.4	The capability of the system to be modified; modifications may include corrections, improvements or adaptations of the system to changes in environment, requirements, and functional specifications
Portability[b]	*P*	0.2	The capability of the system to be transferred from one environment to another

[a] As shown in Figure 4, the ISO/IEC 9126-1 definition of maintainability includes "Changeability" (ease of modification), which is perhaps the single most important factor in overall system adaptability.

[b] While portability includes "Adaptability" as defined by the ISO/IEC 9126-1 standard, this is a narrower view of adaptability than we are concerned with, as it pertains chiefly to "re-port-ability."

Each metric is measured on a continuous [0,1] (percent) scale. The weights given in Table 1 are arbitrary and provided for demonstration only. For example, we assume that a system's adaptability is affected more significantly by its maintainability than by, say, its reliability. The weights may therefore be changed but must meet the following criterion:

$$\sum_{i=\{F,R,U,E,M,P\}} W_i = 1 \qquad (1)$$

An initial model describing the SAF is defined as the weighted average of the six constituent metrics:

$$SAF = w_F F + w_R R + w_U U + w_E E + w_M M + w_P P \qquad (2)$$

Since each metric lies in the range [0,1], and since the weights sum to one, $SAF \in [0,1]$ as well.

We further derive sub-metrics for each of the six constituent metrics, as described in Table 2. (Again, the weights are for demonstration only; calibrating them is a subject for future research.)

Table 2: Adaptability sub-metrics (initial values)

Metric	Variable	Sub-Variable	Sub- Weight	Sub-Metric
Functionality	*F*	*F1*	0.2	Accuracy
		F2	0.2	Suitability
		F3	0.2	Interpretability
		F4	0.2	Compliance
		F5	0.2	Security

Metric	Variable	Sub-Variable	Sub- Weight	Sub-Metric
Reliability	*R*	*R1*	0.33	Maturity
		R2	0.33	Fault tolerance
		R3	0.33	Recoverability
Usability	*U*	*U1*	0.4	Understandability
		U2	0.4	Learnability
		U3	0.2	Operability
Efficiency	*E*	*E1*	0.2	Time behavior
		E2	0.8	Resource utilization
Maintainability	*M*	*M1*	0.1	Analyzability
		M2	0.3	Changeability
		M3	0.2	Stability
		M4	0.4	Testability
Portability	*P*	*P1*	0.2	Adaptability
		P2	0.3	Installability
		P3	0.2	Conformance
		P4	0.3	Replaceability

Therefore, each of the six constituent metrics for *SAF* may be computed as follows, where, again, each metric's factor weights must sum to one:

$$F = \sum_{i=1}^{5} w_{F_i} F_i; \qquad R = \sum_{i=1}^{3} w_{R_i} R_i; \qquad U = \sum_{i=1}^{3} w_{U_i} U_i$$
$$E = \sum_{i=1}^{2} w_{E_i} E_i; \qquad M = \sum_{i=1}^{4} w_{M_i} M_i; \qquad P = \sum_{i=1}^{4} w_{P_i} P_i \tag{3}$$

Component Option Values

We start with a minimal building block, the *component*. A component is a software or hardware object with clearly defined interfaces. It encapsulates specific functionality and interacts with other components and/or with the environment. We seek to determine the option value of a module analogously to the approach used in financial options.

The economic value of options is determined in financial markets through the mechanism of supply and demand. Options buyers and sellers assess the value of an options contract by how likely it is to meet their expectations. In the language of options, that is determined by whether or not the option is likely to be "in-the-money." A call option (giving the holder an option to buy) is in-the-money if the current market value of the underlying instrument is above the exercise price of the option. A put option (giving the holder the option to sell) is in-the-money if the current market value of the underlying interest is below the exercise price. Therefore, the intrinsic value of an option is the profit that would be received if the option were exercised immediately. Unfortunately, there is no way to know this final intrinsic value in advance. However several models, notably the Black-Scholes Option Price Model (OPM), provide quantitative means to estimate this value based on the following key parameters:

- **Current price of the underlying instrument:** as it increases, so does the value of a call option; as it decreases, so does the value of a put option.
-
-

- **Exercise (or strike) price** is fixed for the life of the option, but every underlying instrument has several exercise prices for each expiration time. The higher the strike price, the lower the value of a call option, and the higher the value of a put option.
- **Volatility** is measured as the annualized standard deviation of the returns on the underlying instrument. Options increase in value as volatility increases, since options with higher volatility have a greater chance of expiring in-the-money.
- **Time to expiration** is measured as the fraction of a year. As with volatility, longer times to expiration increase the value of options, since there is a greater chance that the option will expire in-the-money with a longer time to expiration.
- **Risk-free interest rate** is the rate of interest needed to fund the purchase of the underlying instrument or exercise it under a no-risk assumption.

Further research is needed to define a method for generating options values estimates in AOs. A natural approach is to continue the analogy between financial options and AOs. This means adopting the Black-Scholes financial option pricing method and expanding it to calculate architecture option values. The following Table 3 depicts the parameters of the Scholes model for calculating a financial option price at any given time:

Table 3: The parameters of the Black-Scholes model

Financial Options	Symbol	Description
Current stock price	*S*	The current price of the stock
Strike price	*X*	The price for which the holder of an option may exercise a contract for the purchase / sale of the underlying stock
Volatility	*σ*	A statistical measure of the stock price fluctuation over a specific time span (i.e., the measure of the stock price uncertainty)
Time to expiration	*T*	The time the call option will expire
Risk-free interest rate	*r*	Interest rates under the assumption of no risk
Option price	*C*	Option price under the European trading system equal to the value discounted at a risk-free rate of interest.

The expected value of a European call option is given by $E[Max(S_t - X,0)]$ - i.e., the expected value of the call will be either the amount by which the stock price (S_t) exceeds the strike price at time *t*, or zero, whichever is larger. The European call option price (*C*) is the value discounted at a risk-free rate of interest:

$$C = e^{-rT} E\left[Max(S_t - X, 0)\right] \qquad (4)$$

Assuming risk-free conditions, ln S_t can be approximated by the following probability distribution, written in terms of $\phi\left[Mean,\ Standard\ Deviation\right]$:

$$\ln S_t \approx \phi\left[\ln S + (r - \sigma^2/2)T,\ \sigma\sqrt{T}\right] \qquad (5)$$

Evaluating the right-hand side of (5) leads to the Black-Scholes valuation of a call option:

$$C = S\,N(d_1) - Xe^{-rT}N(d_2) \qquad (6)$$

Where

$$d_1 = \frac{\ln(S/X) + (r + \sigma^2/2)T}{\sigma\sqrt{T}},$$

$$d_2 = \frac{\ln(S/X) + (r - \sigma^2/2)T}{\sigma\sqrt{T}} = d_1 - \sigma\sqrt{T},$$

and $N(x)$ is the cumulative probability distribution function for a standardized normal variable.

Now, we calculate the option price (C) of a given architecture from Equation (6) by considering an interpretation of the Black-Scholes model in the context of AOs. Table 4 provides a mapping between the parameters of the Black-Scholes model and AOs:

Table 4: Mapping financial options to AOs

Financial Options	Architecture Options
Current stock price	The current value of a given system component
Strike price	The estimated value of the given system component after it was upgraded
Volatility	The uncertainty in the lifetime-value of the upgraded component within the system as viewed by stakeholders and translated into market-value over the specified period of time
Time to expiration	The time to start deployment of the upgraded component within the system
Risk-free interest rate	Risk-free interest rate associated with funding required to upgrade a given system component at a prescribed schedule of project upgrade
Option price	The option value of the given system component

As mentioned, the assumptions underlying option-pricing as well as estimates used as input data for such models contain substantial levels of uncertainty. This uncertainty should be reflected in option valuations calculations. Therefore, what is needed is a probability distribution of valuations rather than solely a point estimate. For example, the Technology Investment Advisor software tool [Rouse *et al.*, 2000] enables modeling of uncertain parameter values as well as technology maturity, production learning, and competitive positions. Computation of an option value (*OV*) is rather simple when one uses tools readily available on the internet.[21] For example, the *OV* associated with a component used in a later example (component "G" in Figure 7) is calculated to be $39.80 based on equation (6) and the parameters depicted in Table 5. The input parameters could be elicited from a group of experts as we describe in section 6. The experts may be asked to estimate:

- The current and future contribution of the component to the overall sales price of the system,
- The uncertainty in the lifetime-value of the upgraded component within the system, in terms of the standard deviation of the distribution of potential future values,
- The planned time horizon for deploying the upgraded system, and
- The prevailing interest rate over the planned time horizon.

Table 5: Example calculation of the *OV* of a component

Term	Variable	Example Value

[21] For further discussion on the Black-Scholes Option Price Model and several references to simple-to-operate, on-line tools, we refer interested readers to: http://en.wikipedia.org/wiki/Black-Scholes

Component current value	*S*	$700
Component future value	*X*	$1000
Standard deviation of distribution of potential future value	*σ*	20%
Upgrade horizon	*T*	3 years
Risk-free interest rate	*r*	4.0%
Option value	*OV*	$39.80

Interface Cost Factors

Pimmler and Eppinger [1994] developed a methodology for the analysis of product design decomposition. They assert that component interfaces may represent one or more different types of interactions, including the transmission of physical material, mechanical force, energy, and/or information. Other particular types of interactions could include electromagnetic, thermal, and vibrational. We build on this idea to determine interface cost factors ($Ii_{n,k}$ and $Ie_{n,l}$) and further suggest (arbitrarily) specifying the importance and desirability of each interaction with respect to its functional role—i.e., the intensity of the interaction on a zero to one scale., where zero indicates no interaction and one suggests maximal importance or intensity. For example, a model based on Pimmler and Eppinger's four basic forms of interaction is depicted in Table 6. We further consider the overall interface cost factor as the sum of the four individual interaction values.

Table 6: Modeling interface cost factors by means of basic interactions

Interactions			Range	
Name	**Description**	**Symbol**	**Low**	**High**
Material	Interaction identifies needs for materials exchange between two elements.	*IM*	0.0	1.0
Spatial	Interaction identifies needs for adjacency, force transfer or orientation between two elements.	*IS*	0.0	1.0
Energy	Interaction identifies needs for energy transfer between two elements.	*IE*	0.0	1.0
Information	Interaction identifies needs for information or signal exchange between two elements.	*II*	0.0	1.0

For example, consider the interface between a personal computer to a wireless mouse unit. There is no material interaction (*IM* = 0.0). There are some limitations on the spatial interaction, but there is no force transferred from the PC to the mouse, and a large latitude in the orientation of the mouse relative to the PC is possible. And while the physical interface between the computer and the mouse's USB plug has spatial limitations and specifications, these are highly standardized and relatively simple (*IS* = 0.2). There is no energy transmission via this interface, as the mouse contains its own battery (*IE* = 0.0). Finally, the information interaction, which is the main interface characteristic, occurs in terms of highly standardized protocols (*II* = 0.6). Therefore, the overall interface cost factor is the sum of the above interactions values, thus *Ii* = 0.8.

Note that the low and especially the high range for each factor can be adjusted by the design team if necessary. For example, information interactions may be easier to handle than spatial ones, in which case a fairly intensive information interaction may need to be rated lower than a moderate spatial one. While the range and the setting of each factor may be determined subjectively by a system's designers, the important things are that the measures make sense relative to each other (i.e., that

any biases are applied equally to all interface measures) and that the designers at least come close to agreement regarding them. Once quantified, the interface measures should be checked for consistency across the system.

Modeling the Adaptability Value of a System Architecture

One or more components may be combined to create a *module* which has also an expected option value. A large module composed of ten components has a lower expected option value than five smaller modules, each composed of two components. This claim is based on a special case of Merton's theorem [Merton, 1973], which states that for general probability distributions, the aggregate value of a "portfolio of options" is more valuable than an "option on a portfolio." Therefore, we assume that the expected economic value of the j^{th} engineering module, X_j, is normally distributed and related:

- Positively: to an appropriate function (for example, the vector sum) of each of n components' expected options values, OV_n, each multiplied by its corresponding adaptability factors, SAF_n.
- Negatively: to an appropriate function (for example, the algebraic sum) of the expected costs associated with all (1) outgoing internal (module-to-module) interfaces, $Ii_{n,k}$, and (2) all external (module-to-environment) interfaces, $Ie_{n,l}$.

Thus, the module value of the first architecture variant is:

$$X_j^{(1)} = \sqrt{\sum_{n=1,2,..} (OV_n * SAF_n)^2} - \sum_{n=1,\,2..} \left(\sum_{k=1,2..} Ii_{n,k} + \sum_{l=1,2..} Ie_{n,l} \right) \qquad (7)$$

While this model might seem arbitrary, using a vector sum to model the positive side of the architecture value corresponds nicely with Merton's theorem, which can be interpreted as implying that there is more overall architectural option value in many small design clusters than in a few large ones. On the negative side, it is reasonable to assume that the overall cost of interfaces increases linearly with their number and individual attributes. Thus, the "best architecture" should contain some number of modules that is less than the number of components (or else the interface costs become too high) but also greater than one (because the option value would be too low).

We also assume that the economic value of the entire first architecture variant, $V^{(1)}$, can be expressed as the sum of its modules' values:

$$V^{(1)} = \left(\sum_{j=1,2,...} X_j^{(1)} \right) \qquad (8)$$

During the optimization process or during system upgrades we add, replace, or repackage modules in search of the highest-value architecture variant, which we designate V^*.

Static Example

The DSM in Figure 5 depicts a system of 10 components (A through J) with both internal and external interfaces. An output from a component is indicated by an "X" in its row, and an input to a component is indicated by an "X" in its column (e.g., component F generates an output to component B, which is seen by the latter as an input). One possible system architecture, shown in both the DSM in Figure 5 and

the architecture block diagram in Figure 6, consists of module 1 (components A-D) and module 2 (components E-J). In this case, the interface from F to B is also an interface from module 2 to module 1. Note that the last row and column in the matrix show interactions with the system's environment.

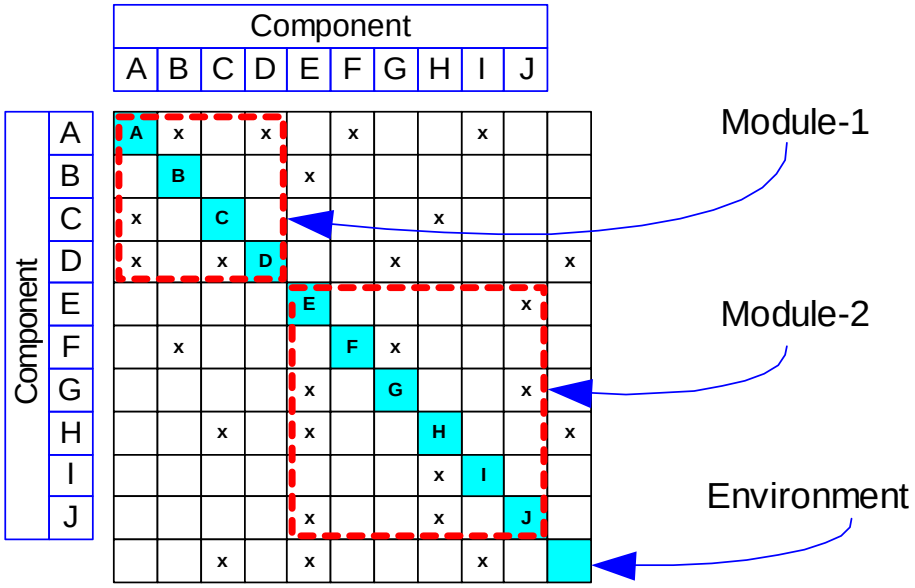


Figure 5: An example system architecture shown using a DSM

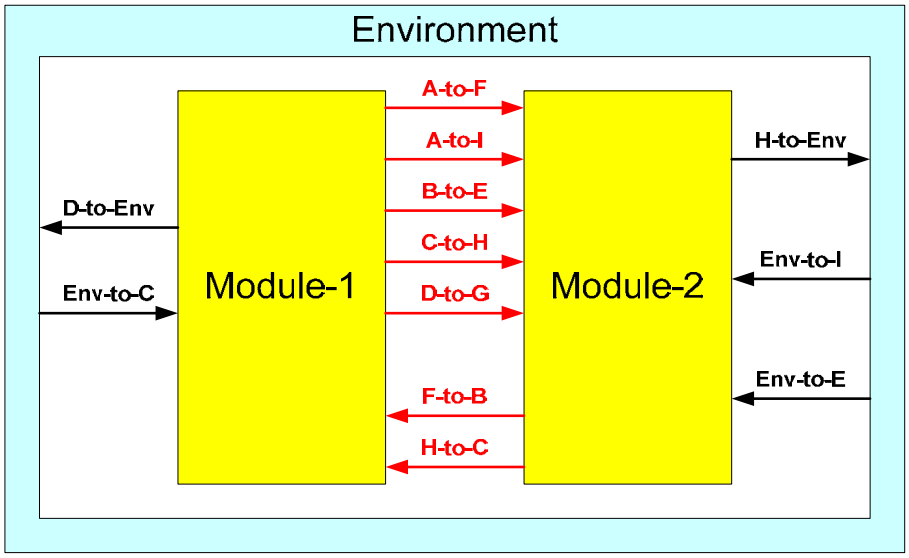


Figure 6: The example system architecture shown using a block diagram

Figure 7 depicts the option values, OV_n, and adaptability factors, SAF_n, for each component and the costs for each interface, $Ii_{n,k}$ and $Ie_{n,l}$, associated with this example. (In section 6 we discuss how to gather these data.)

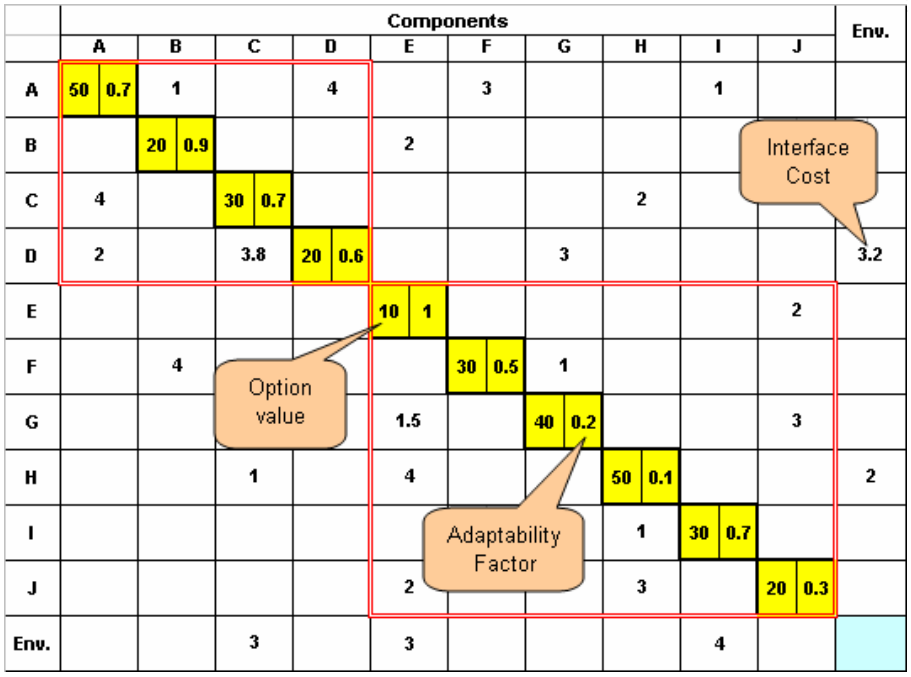


Figure 7: Example of option values, adaptability factors and interface costs

We use equations (7) and (8) to calculate the adaptability value of the first architecture variant:

$$X_1^{(1)} = \sqrt{(50*.7)^2 + (20*.9)^2 + (30*.7)^2 + (20*.6)^2} - (3+1+2+2+3+4+3) = 28.2$$

$$X_2^{(1)} = \sqrt{(10*1)^2 + (30*.5)^2 + (40*.2)^2 + (50*.1)^2 + (30*.7)^2 + (20*.3)^2} - (4+1+2+4+3) = 15.8$$

$$V^{(1)} = X_1^{(1)} + X_2^{(1)} = 44.0$$

The above example demonstrates a simple, static evaluation of a single architecture variant. Clearly, different design solutions that combine components into different modules will yield varied system adaptability values. Since real systems have an immense number of potential architectures, we need to facilitate the identification of the optimal system architecture. Optimization techniques such as genetic algorithms or simulated annealing seem quite promising in this regard, perhaps following an approach similar to that used by Yu *et al.* [2007]. While initial results look promising, further work is needed to fine-tune the model's factor weights and perhaps even its aggregative structure.

Dynamic Evaluation and Design for Dynamic Value

We also seek to design systems for repeated upgrades over their lifetime in order to meet stakeholders' revised perceptions of value. In this section, we formulate a *Design for Dynamic Value* (DDV) optimization model and demonstrate it with an example.

DDV Model

Initial Cost & Value (*IC&V*). We measure the *IC&V* of a system in monetary units (e.g., dollars). We assume that a system's initial value to its stakeholders (upon delivery) is equal to the sum costs of developing, manufacturing, and deploying the system.

Value Desired by Stakeholders (*VD*). We also measure the *VD* in monetary units.

The value desired from systems tends to increase over time due to expected *economic growth*, *EG*, and *technological advances*, *TA*:

$$VD_i(t) = f_{EG_i}(t) + f_{TA_i}(t) + IC\&V \quad (9)$$

Thus, we assume that *IC&V* = *VD* at time zero, although this assumption is easily relaxed.

Increase in Maintenance Cost (*MC*). We measure the *MC* in monetary units. The *MC* of a system tends to increase because of hardware and software *wear-out costs*, *WC*, and components and infrastructure *obsolescence costs*, *OC*:

$$MC_i(t) = f_{WC_i}(t) + f_{OC_i}(t) \quad (10)$$

The difference between *VD* and *MC* is also supposed to account for depreciation and related costs, although this and any other terms relevant to a particular context may be added to the model (as long as one is careful to avoid double-counting).

Stakeholder Value Loss (*VL*). We measure the *VL* in monetary units. The instantaneous value loss during the time period leading up to the i^{th} upgrade $(t_{i-1} \rightarrow t_i)$ equals the accumulated *VD* and *MC* of the system, less its *IC&V*:

$$VL_i(t) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} [VD_i(t) + MC_i(t)]dt - IC\&V \quad (11)$$

Upgrade Cost (*UC*). Our aim is to increase the value of the system by enhancing its ability to adapt to changing stakeholder desires. A system's *UC* is equal to its *development and production costs*, *DPC*, plus its *suspension of service costs*, *SSC* (i.e., costs of any disruption to the existing system while the upgrade occurs):

$$UC_i(t) = DPC_i(t) + SSC_i(t) \quad (12)$$

Optimal Upgrade Strategy. Figure 8 depicts the overall value loss and upgrade model. We seek to design systems such that the sum of the *VL* and *UC* for system lifetime upgrades is minimized over *n* upgrade cycles.

$$Min\left(\sum_{i=1,2,\ldots}^{n} [VL_i(t) + UC_i(t)]\right) \quad (13)$$

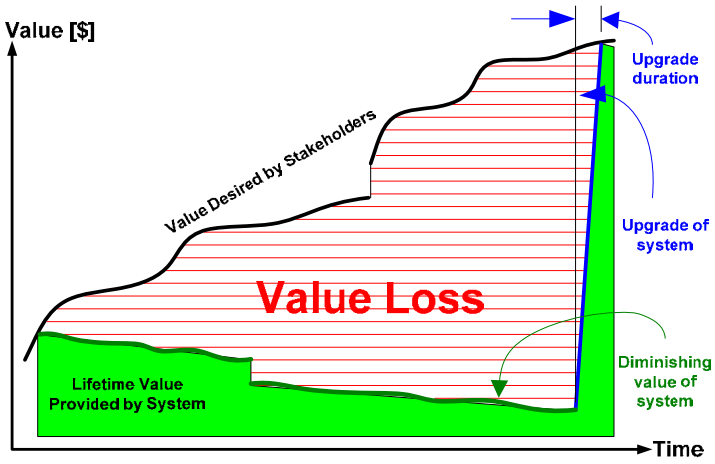


Figure 8: Value loss and system upgrade model (single upgrade)

It makes sense to upgrade only at a time when *UC* ≤ *VL*. (Note that premature upgrades might serve to increase *VD* faster than it might otherwise grow.). Figure 9 illustrates the result of repeated upgrades, where the intent is to minimize the value loss over the lifetime of the system and to increase the system's lifetime, thus increasing the lifetime value provided by the system [Browning and Honour, 2005].

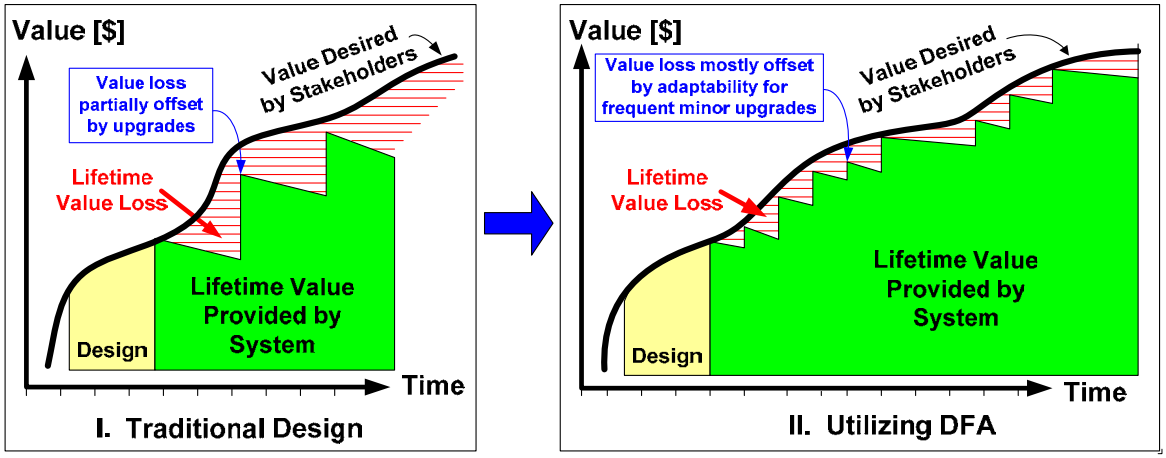
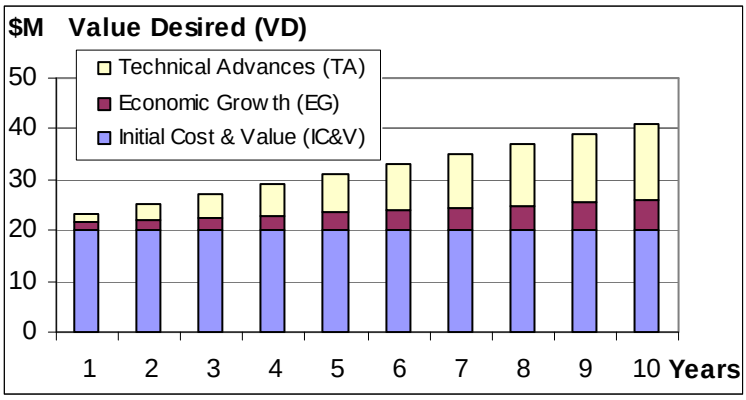


Figure 9: Value is higher over the system lifetime due to adaptability (adapted from [Browning and Honour, 2005])

Dynamic Example

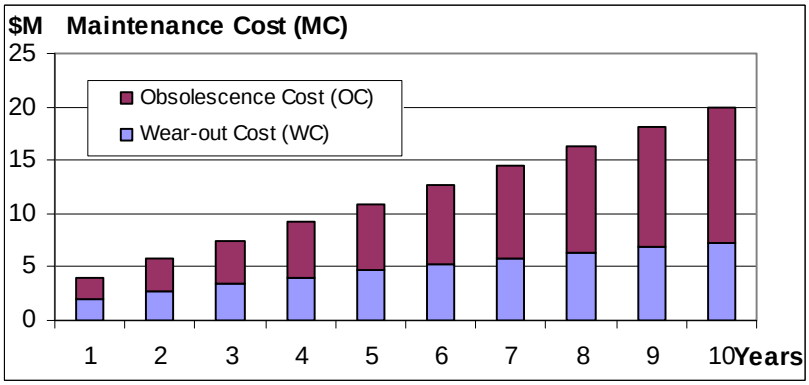
We consider a system with an *IC&V* of $20 million. The system is operated within an environment where certain economic growth and technical advances are predicted, as forecast ten years out in Figure 10, where the (undiscounted) *VD* is calculated using equation (9).



	End of year									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Initial Cost & Value (IC&V)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Economic Growth (EG)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Technical Advances (TA)	1.6	3.1	4.6	6.1	7.6	9.1	10.6	12.1	13.6	15.1
Value Desired (VD)	23.1	25.1	27.1	29.1	31.1	33.1	35.1	37.1	39.1	41.1

Figure 10: A ten-year forecast of the value (in $M) desired by a system's stakeholders

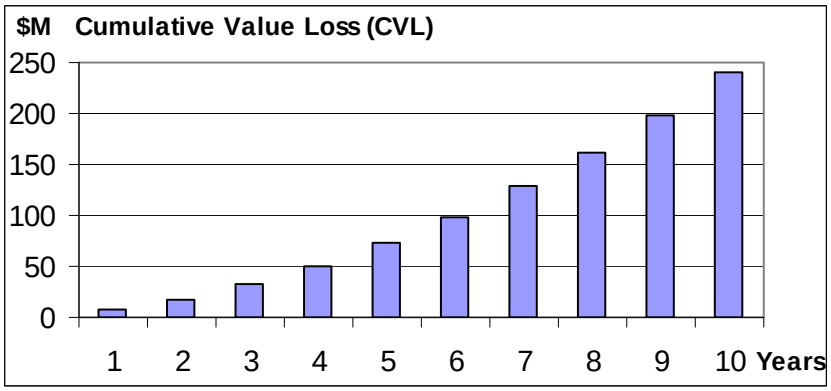
The wear-out and obsolescence costs are also forecast so we can calculate the expected maintenance cost with equation (10) (see Figure 11).



	End of year									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Wear-out Cost (WC)	2.0	2.7	3.4	4.0	4.6	5.2	5.7	6.3	6.8	7.3
Obsolescence Cost (OC)	2.0	3.0	4.1	5.2	6.3	7.5	8.7	10.0	11.2	12.6
Maintenance Cost (MC)	4.0	5.8	7.5	9.2	10.9	12.7	14.4	16.2	18.0	19.9

Figure 11: A ten-year forecast of an example system's maintenance costs (in $M)

The yearly and cumulative value losses are computed with equation (11) (see Figure 12).



	End of year									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Initial Cost & Value (IC&V)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Value Desired (VD)	23.1	25.1	27.1	29.1	31.1	33.1	35.1	37.1	39.1	41.1
Maintenance Cost (MC)	4.0	5.8	7.5	9.2	10.9	12.7	14.4	16.2	18.0	19.9
Value Loss (VL)	7.1	10.9	14.6	18.3	22.0	25.8	29.5	33.3	37.1	41.0
Cumulative Value Loss (CVL)	7.1	18.0	32.5	50.8	72.8	98.6	128.1	161.5	198.6	239.6

Figure 12: A ten-year forecast of an example system's value loss

The above example demonstrates a simple evaluation of a system's dynamic value. Clearly, increased stakeholder expectations combined with a reduction in system performance lead to a repeated call for system upgrade or replacement. The above model can provide a quantitative basis for an analysis of the timing of such a move. For example, if the cost of an upgrade is $10M, then it is advisable to upgrade the system after 2 years of operations, as the yearly value loss exceeds the upgrade cost. When we expand the analysis and seek to optimize the upgrade strategy for a system's entire lifetime, the problem becomes much more complex. Again, advanced optimization techniques can be applied, although the result is likely to depend much more on the forecasts than on the optimization technique.

The DDV model is a great simplification of the various costs that can matter, so it will have to be tailored to particular contexts. However, its general insights would appear to hold. This method is also susceptible to limitations in forecasting future variables. This vulnerability tends to increase as we project economic, social, and technological trends into the remote future. Nevertheless, we assert that rough predictions are better than none. We also remind the reader that any actual upgrade decision is an "option." It provides "the right but not the obligation" to exercise it once the actual information about costs and values is available. For further discussion of the background and issues surrounding this model, see Browning and Honour [2005].

Obtaining the Required Socio-Economic Data

The AO models require product design data that may not be readily available and often must be solicited from domain experts. Frequently, engineers and professionals related to the domains of more exact sciences look with disdain on such models and information. This may be attributed to a lack of training, or possibly to personality traits. In fact, there is a large body of knowledge about methods to obtain and process such data, and much valuable information is routinely gathered in diverse domains like sociology, economics, marketing, and political science using these techniques. The following sections describe a typical

procedure for data acquisition, the Delphi method, and a way to collect and aggregate the results. A practical estimation of quality cost parameters, using this method in a real-life project, is depicted in Engel and Shachar [2006].

The Delphi Process

In general, the purpose of eliciting data from experts is to bridge the gap between available records and required information. Cooke [1991] provides an extensive survey and critical examination of literature on the use of expert opinion in scientific inquiry and policy-making. The elicitation, representation, and use of expert opinions have become increasingly important since advanced technology requires more and more complex decisions. Cooke considers how expert opinions are being used today, how an expert's uncertainty is represented, how people reason with uncertainty, how the quality and usefulness of expert opinion can be assessed, and how the views of several experts can be combined. Loveridge [2002] expands on Cooke's seminal work and covers topics such as the selection of people for expert committees. These authors suggest a practical Delphi elicitation procedure comprised of the following steps:

1. Orientation, issue familiarization, and training
2. Elicitation and collection of opinions
3. Aggregation and presentation of results
4. Group interaction, discussion, and revision of findings (data scrubbing)
5. Conclusions

We will discuss further the most important two of these steps in the following sub-sections.

Eliciting Experts' Data

Application of the AO model requires the attainment of a certain state in the design process. We assume that the general characteristics of a planned system are known and its general structure is defined. More specifically, we assume that a set of functionalities associated with its components, internal and external interfaces, and design constraints has been established. Thus, we envision the latter stages of what is sometimes called conceptual design.

At this point in the design process, a group of system architects, systems engineers, and domain experts familiar with the target system must be identified. The experts are gathered for an initial meeting and given a questionnaire with the relevant information. They receive an explanation of the Delphi procedure as well as instructions regarding the nature and meaning of each question on the questionnaire. One effective technique is to elicit data as triplets composed of minimum (*a*), most likely or mode (*m*), and maximum (*b*) values, such that $a \leq m \leq b$. In this case, the collected data will contain the following:

- *Static Model*: (1) the *OV* of each component, (2) all parameters for equation (2) to compute the *SAF* associated with each component, and (3) the cost associated with each internal and external interface, $Ii_{n,k}$ and $Ie_{n,l}$.
- *Dynamic Model*: (1) the *EG* and *TA* functions, (2) the *WC* and *OC* functions, (3) the *IV&C*, and (4) the *DPC* and *SSC* of the system to be upgraded.

Once collected, the data are aggregated and the results are presented to the experts during a second meeting. At this second meeting, each expert has a chance to review his original responses in light of the group's aggregated data and possibly change his or her opinion based on further discussions.

Aggregating Expert Data

If these data are gathered in terms of *a*, *m*, and *b*, then some distribution of outcomes (such as a triangle or beta distribution) can be assumed across each range, and therefore each of the above variables can be treated as a random variable with an expected value and other characteristics [Vose, 2000]. Here each expert is assumed to have a probability $p_{,i}$ of being correct, and often all experts dealing with such matters are assumed to be equally likely to be correct. The reader should note that, other than in the case of a trivial straight line, summing probability distributions obtained from several experts yields non-linear results, suggesting that closed mathematical expressions for statistical moments of the aggregated distribution are impractical. Therefore, a credible data aggregation could be accomplished by means of a numerical analysis such as Monte Carlo simulation [Vose 2006].[22]

Conclusions

The proposed static modeling approach enables us to measure the adaptability of a given system architecture in terms of the likely ease with which its modules can be changed without disrupting other modules. The proposed dynamic modeling approach enables us to estimate how the value of a system will fluctuate over its lifetime. In determining this dynamic value, we should consider the dual effect of gradual increases in stakeholders' expectations coupled with increases in system maintenance costs. Our goal is to select a given system architecture with maximum lifetime value, which is not necessarily the same as the architecture that maximizes customer value at the point of initial delivery. Thus, an opportunity for future work lies in comparing the results from the static and dynamic analyses.

Our analyses can be extended from individual, local systems like aircraft and automobiles to continental or even global, net-centric systems-of-systems. The latter encompass a distributed environment where applications and data are exchanged among peers across a network on an as-needed basis. Our goal is to provide a quantitative basis for planning system upgrades. Ultimately, our aim is to optimize the system architecture and upgrade strategy in order to maximize the long-term satisfaction of dynamic stakeholders.

This present work represents only a beginning towards much needed research in this area. In particular, more work is needed in formulating a method for estimating AO values and tying it with the DDV models, so that each system's architecture can be evaluated in terms of its effect on the overall lifetime value of a system.

Acknowledgements

The authors have been inspired in particular by the writings of Carliss Baldwin, Kim Clark, and Richard de Neufville. Their ideas are reflected in the background material presented in this paper. In addition, we are grateful for the contributions of Armin Schulz, Viktor Lévárdy, and Andreas Vollerthun of 3D Systems Engineering GmbH, as well as Markus Hoppe of HOOD GmbH. Three anonymous reviewers provided comments that helped us improve an earlier version of this paper [Engel and Browning, 2006].

[22] There are several commercial tools that may support the aggregation and analysis of experts' data—e.g., @RISK (http://www.palisade.com) and Crystal Ball (http://www.crystalball.com).

References

C. Alexander, Notes on the Synthesis of Form, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1964.

N.A. Alexandridis, Adaptable Software and Hardware: Problems and Solutions. IEEE Computer Volume-19, Number-2, pp. 29-39, Feb. 1986

C.Y. Baldwin and K.B. Clark, Design Rules: The Power of Modularity, Cambridge, MA: MIT Press, 2000

M. Barad and A. Engel, Optimizing VVT strategies - A decomposition approach, Journal of the operation research society (JORS), 57(8), pp. 965–974. Aug., 2006

J.E. Bartolomei, D.E. Hastings, R. de Neufville, and D.H. Rhodes, Screening for Real Options "In" an Engineering System: A Step Towards Flexible System Development, 16th Annual International Symposium (INCOSE 2006), Orlando, FL, July 9-13, 2006

R. Bahsoon and W. Emmerich, ArchOptions: A Real Options-Based Model for Predicting the Stability of Software Architectures, The Fifth International Workshop on Economics-Driven Software Engineering Research (EDSER-5), Portland, USA. 2003

R. Bahsoon and W. Emmerich, Applying ArchOptions to Value the Payoff of Refactoring, The Sixth International Workshop on Economics-Driven Software Engineering Research (EDSER-6), Edinburgh, Scotland, May 23-28, 2004

R. Bahsoon, W. Emmerich, and J. Macke, Using real options to select stable middleware-induced software architectures, Software- Special issue on relating software requirements to architectures 152(4) (2005) ISSN 1462-5970, pp. 153-167, 2005

F. Black and M. Scholes, The pricing of options and corporate, liabilities, J Pol Econ 81 (1973), 637–654.

G. Booch, J. Rumbaugh and I. Jacobson, The Unified Modeling Language user guide, ISBN: 0-201-57168-4, Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc. Redwood City, CA, USA, 1999

T.R. Browning, Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions, IEEE Transactions on Engineering Management, 48(3): 292-306, 2001

T.R. Browning, On Customer Value and Improvement in Product Development Processes, Systems Engineering, 6(1): 49-61, 2003

T.R. Browning, and E. Honour, Measuring the Lifecycle Value of a System, Proceedings of the 15th Annual International Symposium of INCOSE, Rochester, NY, 2005

S. Cohen, Predicting When Product Line Investment Pays, Product Line Practice Initiative, Technical Note CMU/SEI-2003-TN-017, July, 2003

R.M. Cooke, Experts in Uncertainty: Opinion and Subjective Probability in Science, Oxford, England: Oxford University Press,1991

R. de Neufville, Real options: dealing with uncertainty in systems planning and design, 5th International Conference on "Technology Policy and Innovation", Technical University of Delft, Netherlands, 2001

R. de Neufville, Architecting/Designing Engineering systems using Real Options, MIT ÊSD Internal Symposium, (ESD-WP-2003-01.09-ESD), 2003

R. de Neufville, *et al.*, Uncertainty management for engineering systems planning and design, MIT Engineering Systems Division, March, 2004

O. de Weck, R. de Neufville, and M. Chaize, Staged Deployment of Communications Satellite Constellations in Low Earth Orbit. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 1(4), pp.119-136, March, 2004
A. Engel, and T.R. Browning (2006) "Designing Systems for Adaptability by Means of Architecture Options," Proceedings of the 16th Annual International Symposium of INCOSE, Orlando, FL, Jul 9-13.
A. Engel, and S. Shachar, Measuring and Optimizing Systems' Quality Costs and Project Duration, Systems Engineering, Volume 9, issue 3, 2006
E. Fricke, and A.P. Schulz, Design for changeability (DfC): Principles to enable changes in systems throughout their entire lifecycle, Systems Engineering, Volume 8, Issue 4, pp. 342-359, 2005
P.E. Gartz, Systems Engineering for the 21st Century, IEEE Distinguished Lecture, IEEE Dallas Chapter, April 24, 2001
M. Hanratty, Open systems and the systems Engineering Process, Acquisition Review Quarterly, Winter, 1999
M. Hause, F. Thom, and A. Moore, The Systems Modeling Language (SysML). http://www.artisansw.com/whitepapers/home.asp, 15.11.2004.
D. Higham, An Introduction to Financial Option Valuation: Mathematics, Stochastics and Computation, Cambridge, England: Cambridge University Press, 2004
IEEE, "IEEE Recommended Practice for Architectural Description of Software-Intensive Systems," Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association, Standard Number 1471-2000, 2000.
K. Kalligeros, Platform and Real Options in Large-Scale Engineering Systems, Doctoral dissertation, Engineering Systems Division, Massachusetts Institute of Technology, June, 2006
O. Larses, Applying quantitative methods for architecture design of embedded automotive systems, INCOSE-2005, 15th International Symposium, Rochester, NY, July 10-15, 2005
D. Loveridge, Experts and Foresight: Review and experience, Paper 02-09, PRES, The University of Manchester, UK, 2002
R. Nilchiani, Measuring Space Systems Flexibility: A Comprehensive Six-Element Framework, Doctoral dissertation, Department of Aeronautical and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Sep., 2005
R. Nilchiani, and D.E. Hastings, Measuring the Value of Flexibility in Space Systems: A Six-Element Framework, Systems Engineering journal, Volume 10, Issue 1, pages 26-44, 2007
R.C. Merton, Theory of Rational Option Pricing, Bell Journal of Economics and Management Science, 4, pp. 141-183, 1973; reprinted in *Continuous Time Finance*, Oxford, England: Basil Blackwell, 1990.
S. Myers, Finance theory and financial strategy, *Interfaces*, 14, pp.126-137, 1984
E. Murman, *et al.*, Lean Enterprise Value: Insights from MIT's Lean Aerospace Initiative, New York, NY: Palgrave Macmillan, 2002
T.U. Pimmler and S.D. Eppinger, Integration analysis of product decompositions, Working Paper # 3690-94-MS, MIT Sloan School of Management, Cambridge, MA, p. 39, 1994

E. Rechtin, Systems Architecting: Creating & Building Complex Systems, Englewood Cliffs, NJ: PTR Prentice Hall, 1991.
W.B. Rouse, C.W. Howard, W.E. Carns, and E.J. Prendergast, Technology investment advisor: An options-based approach to technology strategy, Inform Knowledge System Management 2, pp 63–81, 2000
A. Schulz and E. Fricke, Incorporating Flexibility, Agility, Robustness, and Adaptability within the Design of Integrated systems – Key to Success?, Proceedings of the IEEE/AIAA 18th Digital Avionics systems Conference, St. Louis, MO, 1999
G. Taguchi and Y. Wu, Introduction to Off-Line Quality Control, Nagoya, Japan: Central Japan Quality Association, 1980.
K.T. Ulrich, The role of product architecture in the manufacturing firm, Research Policy, 24, pp. 419-440, 1995
A. Vollerthun, "Design to Market – Integrating Conceptual Design and Marketing", Systems Engineering, 5(4), 2002
D. Vose, Risk Analysis: A Quantitative Guide, New York, NY: John Wiley & Sons, 2000
D. Vose, Correct way of incorporating differences in expert opinion, Decisioneering Inc, http://www.crystalball.com/support/risktips/risktip-4.html, Last accessed: May 29, 2006
Webster, Online Dictionary, http://www.m-w.com/dictionary/adapt, last accessed 22 May 2007.
T. Wang, Real Options "in" Projects and systems Design - Identification of Options and Solution for Path Dependency, Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2005
T. Wang and R. de Neufville, Identification of Real Options "in" Projects, 16th Annual International Symposium (INCOSE 2006), Orlando, FL, July 9-13, 2006
T.-L. Yu, A.A. Yassine, and D.E. Goldberg, An Information Theoretic Method for Developing Modular Architectures Using Genetic Algorithms. Research in Engineering Design (forthcoming), 2007
T. Zhao and C. Tseng, Valuing Flexibility in Infrastructure Expansion, Journal of Infrastructure systems, pp. 89-97, September, 2003

Nomenclature

SAF_n	*Systems adaptability factor* associated with the n^{th} component of a system; a function of F_n, R_n, U_n, E_n, M_n, and P_n
OV_n	The *options value* associated with the n^{th} component of a system
$Ii_{n,k}$	The k^{th} internal (module-to-module) interface leaving the n^{th} component of a system
$Ie_{n,l}$	The l^{th} external (module-to-environment) interface leaving the n^{th} component of a system
$X_j^{(s)}$	Adaptability value of module j in the system architecture associated with design variant s
$V^{(s)}$	Economic value of system architecture associated with design variant s
VD_i	Expected *value desired* by stakeholders of a system at the i^{th} system upgrade
$f_{EG_i}(t)$	Function of the expected *economic growth* during the i^{th} system upgrade
$f_{TA_i}(t)$	Function of the expected *technological advances* during the i^{th} system upgrade
$MC_i(t)$	Expected system *maintenance cost* during the i^{th} system upgrade
$f_{WC_i}(t)$	Function of the expected hardware and software *wear-out cost* during the i^{th} system upgrade

$f_{OC_i}(t)$	Function of the expected components and infrastructure *obsolescence cost* during the i^{th} system upgrade
$VL_i(t)$	Expected *value loss* during the i^{th} system upgrade
IC	*Initial cost* of the system
UC_i	Expected *upgrade cost* of the i^{th} system upgrade
DPC_i	Expected *development and production costs* during the i^{th} system upgrade
SSC_i	Expected *suspension of service cost* during the i^{th} system upgrade
IM	Interaction identifies needs for materials exchange between two elements
IS	Interaction identifies needs for adjacency, force transfer or orientation between two elements
IE	Interaction identifies needs for energy transfer between two elements
II	Interaction identifies needs for information or signal exchange between two elements
S	Current stock price
S_t	Future stock price
X	Strike price
T	Time to option expiration
σ	Volatility
r	Risk-free interest rate
N(x)	Cumulative probability distribution function for a standardized normal variable

Author Biographies

Dr. Avner Engel is a senior systems and software engineer at the Advanced Systems and Software Engineering Technology (ASSET) group of the Israel Aircraft Industries (IAI), Israel. Dr. Engel holds a B.Sc. in Electrical Engineering from the University of Maryland, an M.Sc. in Computer Systems from the University of New York and a Ph.D. from the Industrial Engineering department of the Tel-Aviv University. His 35 year professional career spans the areas of programming, systems and software engineering, and technical management with several large companies in the US and Israel. For the past twenty years he has worked for IAI, where he has managed large software projects. From 2003 to 2005 he led an international consortium funded by the European Commission, SysTest, aimed at developing a methodology and a process model for Systems Verification, Validation, and Testing (VVT). He is currently involved in the "Speculative and Exploratory Design in Systems Engineering" (SPEEDS) project funded by the European Commission, 6FP, IST Priority.

Dr. Tyson Browning is Assistant Professor of Enterprise Operations in the Neeley School of Business at Texas Christian University (USA), where he teaches MBA courses in operations management and project and program management. Dr. Browning holds a B.S. in Engineering Physics from Abilene Christian University and two Master of Science degrees and a Ph.D. from Massachusetts Institute of Technology. He has industrial experience at Lockheed Martin, Boeing, Honeywell, Los Alamos National Laboratory, and the Lean Aerospace Initiative and has conducted research at and provided consultation for a number of other organizations. He has published over 30 peer-reviewed papers in the areas of systems engineering, engineering management, risk management, and process improvement. His current research addresses the modeling of adaptive processes and other aspects of project and program management. He has been an INCOSE member since 1995 and is also a member of the Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS) and the Production and Operations Management Society (POMS).