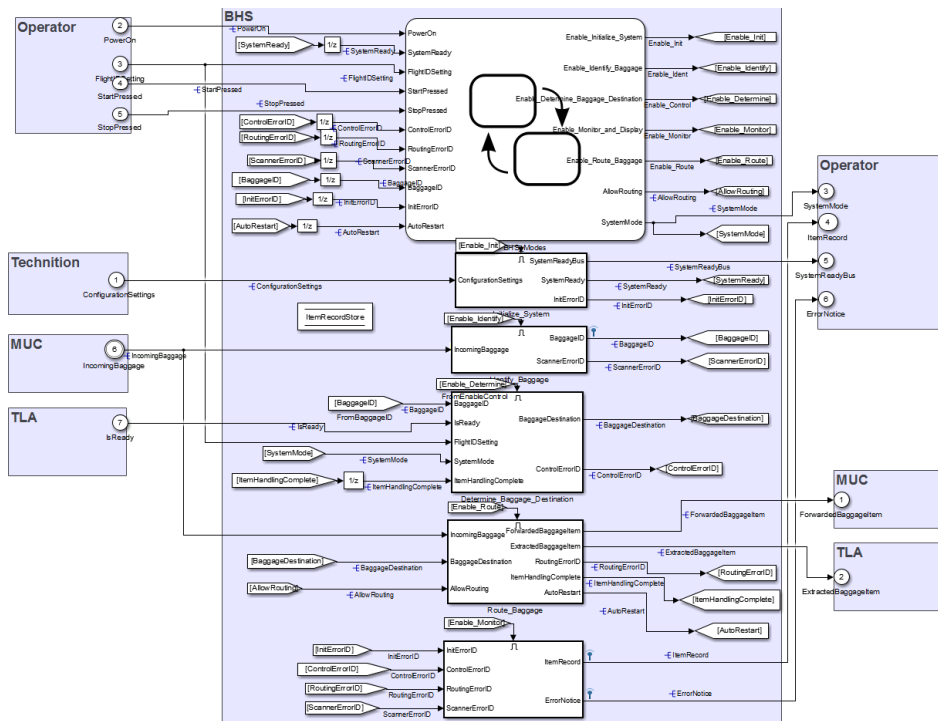


הנדסת מערכות מבוססת-מודלים: מהם באמת היקף ועומק ההטמעה בתעשייה, והאם אנחנו מתקדמים בכיוון הנכון?

ד"ר יניב מרדכי, 6 במאי 2020

בשנים 2015-2017 עבדתי בתעשייה האווירית כמהנדס מערכות רובוטיות. הפרויקט האחרון בו הייתי מעורב היה פיתוח מערכת להטענה רובוטית של מזוודות על טיסות יוצאות, ופריקה רובוטית של מזוודות מטיסות נכנסות. המערכת פותחה כמדגים טכנולוגי עבור שדה התעופה הבינלאומי של סינגפור, צ'אנגי (הזוכה שנה אחר שנה בתואר "[שדה התעופה הטוב בעולם](#)") במסגרת תחרות [Aviation Challenge](#), שבה מספר קבוצות נדרשו להציג פתרון מערכתי כולל שיחליף את העבודה הפיזית הקשה שמבצעים בד"כ סבלים. החלטנו לאמץ גישת **הנדסת מערכת מבוססת מודל – Model-Based Systems Engineering – MBSE**. הכלי שנבחר היה Simulink של MathWorks, וקיבלנו סיוע צמוד מחברת סיסטמטיקס, נציגת MathWorks בישראל. בתמונה שלהלן מוצג צילום של תרשים Simulink המהווה חלק קטן ממודל המערכת שפיתחנו.



מאז עברו הרבה מאד מזוודות בקרוסלות ההעמסה של צ'אנגי, אך לא נראה שהמצב השתנה משמעותית בכל הנוגע להמשך האימוץ וההטמעה של MBSE בתעשייה, גם אם נראה שהצורך בגישה כזו הולך ונעשה ברור ומובן יותר לרבים. כמי שעוסק בתחום שנים רבות תמיד עניין אותי להבין מה מצב ההטמעה בתעשיות עתירות הנדסת מערכת, והנה, בחודש מרץ 2020 פרסם המרכז למחקרי הנדסת מערכת – [Systems Engineering Research Center \(SERC\)](#) במכון הטכנולוגי Stevens – [ד"ר וחשבונו על היקף ההטמעה, הבשלות והתועלות הנתפשות של גישת הנדסת מערכות מבוססת-מודלים \(MBSE\) בתעשייה האמריקאית](#). הדו"ח הוזמן ע"י [התאחדות תעשיות ההגנה האמריקאית](#) – [National Defense Industry Association](#) וע"י [INCOSE](#), ונערך בשיתוף פעולה עם חוקרים מהמכון הטכנולוגי של וירג'יניה (VirginiaTech), שעם אחד מהם שיתיתי פעם [כוס בירה](#), אבל זה סיפור אחר. הדו"ח מבוסס על סקר שנערך במהלך 2019 עד ראשית 2020 אשר עליו השיבו כ-160 נשאלים העוסקים ב-MBSE או עובדים בארגונים המיישמים MBSE (רובם המוחלט מהתעשייה, אך השיבו גם אנשי ממשל ואקדמיה). הנשאלים התבקשו לציין את מידת הסכמתם לגבי היבטים שונים הנוגעים לסביבת MBSE בתעשייה.

הסיבות העיקריות לאימוץ MBSE, באופן לא מפתיע, הן הציפייה לחסכון בעלויות ובזמן פיתוח יקר, להפחתת סיכונים, ולהנגשת התכן כמידע מובנה (למעשה, הרעיון המרכזי של מעבר מכתובת מסמכים והכנת תרשימים גרפיים לשפות מידול פורמליות). בעלי העניין מצפים להגדלת היקף השימוש החוזר באבני בניין קיימות, לשיפור העקיבות והעקיבות של התכן לדרישות, לשיפור כולל בהבנת התכן, לשיפור בתקשורת, בשיתוף מידע ובתיאום בין גורמים שונים העוסקים בפיתוח מערכות מורכבות.

ציפיות לחוד ואכזבות לחוד. ככלל, הסקר משקף תחושה כללית לפיה **גישת MBSE עדיין לא הגיעה לבשלות בתעשייה.** לגבי 31 מתוך 35 היגדים לגבי בשלות ומוכנות (Maturity), נרשמה אי-הסכמה מהדהדת. בולט במיוחד חוסר שביעות הרצון מאיזון מספיק של בעלי תפקידים לתמיכה בפעילות מבוססת מודלים, מהיעדרם של מדדי ביצוע והצלחה ברורים ואחידים לרוחב הארגון ומחוסר שימוש במודלים כבסיס לתהליכים הנדסיים וטכניים. ניכר גם כי אין שיתוף משמעותי של מודלים ומידע מבוסס מודלים (כגון תכן ממשקים) בין ארגונים שונים, גורמים שונים וכלים שונים, ויש קושי באחזור מידע משמעותי ושימושי מתוך המודלים. נקודה נוספת שעולה היא היעדר מתודולוגיה מתאימה בכל הנוגע לניהול המודלים, ניהול תהליכי המידול והשימוש העקבי בשפה משותפת ובטרמינולוגיה אחידה.

ההיבטים היחידים שבהם ניכרת הסכמה גורפת הם היבטים משניים, הנוגעים דווקא לאמינות ואבטחת תשתית **טכנולוגיות המידע ואבטחת המידע** עליה בנויה סביבת העבודה ב-MBSE. אלו היבטים חשובים אך אינם מהווים סיבה עיקרית להקמה והטמעה של סביבת עבודה כזו בארגון. נרשמה גם הסכמה במידה מועטה, כמעט על גבול האדישות, לגבי שני היבטים מהותיים יותר: בניית מודלים מביאה לשיפור מדיד בתהליכי העבודה, ומסייעת בהגדלת השימוש החוזר (Reuse) באבני-בניין.

החסמים העיקריים להטמעה מוצלחת של MBSE בארגון, לדעת המשיבים, הם באופן לא מפתיע **היעדר מתודולוגיה מתאימה ותרבות ארגונית.** המשיבים ציינו כי **אין השקעה מספקת ב"יחסי ציבור"** – "שיווק" של סיפורי הצלחה ופרקטיקות מנצחות לעבודה בסביבת MBSE. בנוסף ניכר **חוסר עניין או חוסר מחויבות של בעלי העניין,** ההנהלה, הלקוחות, והשותפים. כאשר משווים את MBSE למתודולוגיות פיתוח כגון Agile, ניתן בהחלט לחוש בהבדלי שיווק, מיתוג, נראות ומעורבות הנהלה.

המשיבים סברו כי התועלות עיקריות העשויות לאפשר ולקדם הטמעה מוצלחת בארגון הן היכולת לבקרת **עקיבות (traceability)** בין הארכיטקטורה לדרישות הלקוח, **הבנה** טובה יותר (אישית וקבוצתית) של ארכיטקטורת הפתרון המוצע, והאפשרות לנתח את ארכיטקטורת המערכת **מזוויות שונות** והיבטים שונים (כגון מבנה, התנהגות, מצבים, אינטראקציות, ומבני נתונים). חלק מן המשיבים ציינו כי לשימוש במודלים יש **פוטנציאל להפחתת סיכונים טכניים, קיצור משך הזמן** לביצוע עדכונים, **והקטנת השכיחות של טעויות** אפיון ותכנון. יש לציין כי אף אחת מהתועלות לא זכתה באופן חד וברור להכרה נרחבת.

נקודה חשובה, שהחוקרים נוגעים בה בעקיפין לאורך הדו"ח היא הזיקה בלתי נמנעת של MBSE למגמה הנוכחית הרווחת בתעשייה – **"הטרנספורמציה הדיגיטלית"**. זוהי גישה מקבילה, המקדמת אוטומציה של תהליכי העבודה והפיכת שירותים ותהליכים רבים שהתקיימו ומתקיימים עדיין באופן ידני (גם אם ממוחשב) לתהליכים ממוכנים/אוטומטיים. הגישה הזו החלה להתרחב בעשור האחרון באוטומציה של תהליכי שירות ללקוח, המתאפשרת באמצעות טכנולוגיות זמינות, זולות ומאובטחות-יחסית לשיתוף מידע דו-כיווני עם הלקוחות לצורך ביצוע פעולות מהותיות (כגון הפקדת המחאה באמצעות הטלפון הסלולרי, או הזמנת מונית באמצעות יישומים מוכרים כמו Uber ו-Gett). המגמה הזו מתחברת גם ליישומים תעשייתיים יותר המבוססים על ה-Internet of Things (אסתכן בתרגום המונח הזה ל-"מרשתת החפצים") וכוללים לדוגמה ניטור אמצעים וציוד קצה באמצעות חיישנים הפזורים בשטח ומאפשרים הפעלה ותחזוקה מרחוק ואף באופן אוטומטי, ושיוקף מורחב של סטטוס אמצעי הקצה דרך עותק דיגיטלי המתעדכן באופן שוטף – Digital Twin).

הטרנספורמציה הדיגיטלית ממשיכה ומתקדמת כלפי מעלה בשרשרת הערך ומגיעה גם לשרשראות האספקה ולמערכי הייצור, כשממשם הדרך אל סביבת המחקר והפיתוח קצרה. כיום, מערכים עתירי תוכנה המשלבים יכולות אינטגרציה רציפה (Continuous Integration) יכולים להפיץ עדכונים תוכנה ללקוחות בשטח דרך טכנולוגיות מחשוב ענן, סלולר או רשתות רדיו טקטי, ותקשורת מקומית (Wi-Fi, Bluetooth) בזמני סבב קצרים ביותר. כך, ככל שמערכת מכילה יותר תוכנה כך יש ציפייה ליותר "דיגיטציה" בתהליכי ההעברה מפיתוח לייצור, מייצור לשימוש, ושימוש לתחזוקה. שרשראות האספקה הדיגיטליות מסוגלות כיום להניע ייצור מוצרים תלוי ביקושים מהזמנות מקוונות של צרכני קצה, לרבות משיכת מודלים לייצור מכאני וחשמלי היישר אל מערך הייצור, ובהמשך גם להרכיב, לארוז, לשנע ולספק את המוצרים ללקוחות, באופן אוטומטי כמעט לחלוטין.

בתעשייה מצפים שגם השלבים היותר מורכבים קוגניטיביים של ניהול מוצר והנדסת מערכות יתבצעו אף הם באופן "דיגיטלי" ככל הניתן – החל מניתוח דרישות השוק, דרך הגיית מוצרים ושירותים, הגדרת ארכיטקטורת הפתרון המערכת, הקצאת הדרישות למכלולי המערכת וכלה באינטגרציה עם הדיסציפלינות ההנדסיות השונות (מכניקה, אלקטרוניקה, תוכנה, חומרים וכו'). מאחר שיש **תשתית "דיגיטלית" להנדסת מערכות – MBSE** – התעשייה מצפה להסתגלות מהירה ולטרנספורמציה דיגיטלית של תהליכי הנדסת המערכת, למשל באמצעות שיתוף (דו-כיווני אם אפשר) של ייצוגים דיגיטליים (מודלים) של התכן המערכתי עם גורמים נוספים. בעוד ש**מהנדסי מערכת רבים עוסקים בעצמם הלכה למעשה בטרנספורמציה דיגיטלית של מערכים ושירותים שונים בתחומי ההגנה, התעופה והחלל, הרפואה, האנרגיה, התחבורה ועוד – האין זה תמוה שדווקא מהנדסי המערכת נשארים מאחור** בנסותם לייצר ולשתף תוצרים המגדירים פתרונות חדשניים לעולם הדיגיטלי?

נראה כי המשיבים לסקר הודו בכנות ובאומץ שהבעיה איננה בכלים, בטכנולוגיות או בהיקף וטיב ההכשרה ע"י ספקיות הכלים והיועצים המובילים את המהלך. ישנה הכרה שהכלים בהחלט יכולים לסייע בבניית שפה משותפת, בשיפור איכות

עבודת מהנדס המערכת, ובחסכון בעלויות. הבעיות האמיתיות, אם כן, מצויות דווקא בהיבטים הרכים יותר – **המתודולוגיה** לעבודה נכונה עם הכלים, **והערך המוסף** המיוצר ע"י התהליך. ישנה השלמה במידה מסוימת עם חוסר היכולת להתמודד עם בעיית התרבות הארגונית, והבנה שהדרך לעקוף את הבעיה היא באמצעות מתודולוגיה נכונה, אשר מצליחה לרכוב על התרבות הארגונית הקיימת או לעקוף אותה. כפועל יוצא, נדרשים הדרכה וליווי צמוד – **הרבה פחות בהיבטים הטכניים** של שימוש בכלים (איזור הנוחות של ספקיות הכלים והמדריכים מטעמן) **והרבה יותר בהיבטים המתודולוגיים והתהליכיים** ולגבי הפרקטיקות הנכונות והחשיבה המערכתית שנכון ליישם במסגרת עבודה בגישת MBSE. אין ספק שמומחיות היועצים ואנשי ההטמעה נדרשת להיות הרבה יותר גבוהה, אך למצער, נראה שאין כרגע מספיק מומחים או מובילים פנים-ארגוניים (Champions) שיכולים לספק את הביקוש להטמעה מתודולוגית.

להבנת כותב שורות אלה, הסקר מצביע חלקית (ולא במידה מספקת) על **חוסר זהות (אך לא ניגוד) האינטרסים בין מהנדסי המערכת ו"בעלי העניין"**. הכלים והפרקטיקות הקיימים כיום ממוקדים במהנדס/ות המערכת ובתועלת שניתן לקבל מהשימוש השוטף בכלים לבניית מודלים. **המיקוד בבעלי העניין** – הלקוחות, המנהלים, הרגולטורים, המשקיעים, הציבור וכו' – הינו בד"כ **שולי**, והרי ברור שהם **אמורים להיות המרוויחים או הנהנים העיקריים**. כתוצאה מכך, **ספקים אינם מקבלים "נקודות"** על שימוש בסביבת MBSE. כל עוד MBSE נתפסת כתקורה, שתדומתה העיקרית היא במישור **האיכות** (כלומר – טכנולוגיה שמסייעת למהנדס/ת המערכת לבצע את עבודתו/ה בצורה טובה יותר) ולא במישור **המהות** (טכנולוגיה המייצרת תוצרים בעלי ערך ללקוח) היא אינה מקבלת את הדחיפה המשמעותית קדימה שלה היא כה זקוקה.

הדרך לקדם גישת MBSE מהותית היא מיקוד באותם תוצרי ערך מוסף, שיגרמו לבעלי העניין לרצות, לבקש, ולהעדיף ספקים המיישמים MBSE, מתוך הבנה שזה יסייע להם לקבל תוצרים טובים יותר. תוצרים אלה כוללים, למשל, דו"חות תומכי-החלטה מבוססי-מודל, סימולציות מערכתיות מבוססות-מודל לתיקוף רעיונות מערכתיים ותפישות הפעלה, ניתוחי תאימות של הפתרון המוצע לתקנים קריטיים לעולם התוכן (כגון תקנים בענפי התעופה האזרחית, המכשור הרפואי והרכב), וכן הפקת אופיונים (מסמכי אפיון ותכן) התואמים לתבניות הלקוח או לדרישות הרגולטור. כל עוד **המודל הוא התוצר העיקרי של עצמו**, הוא עונה בעיקר לצרכים של מהנדסי המערכת. רק כאשר נוסף לבעלי העניין **תוצרים בעלי ערך מבוססי-מודל**, תהפוך הדרישה והציפייה שלהם לעבודה בסביבת MBSE לציפייה או דרישה מהותית, מתוך הבנה שהיא מאפשרת להם לקבל ערכים מוספים משמעותיים עבורם. דווקא **דרישה חיצונית, להבדיל ממוטיבציה פנימית**, היא שתגרום לשינוי המיוחד ולמעבר ממסמכים, גיליונות אלקטרוניים ומצגות ל-MBSE, פשוט כי לא תהיה לנו ברירה.

בחזרה לפרויקט שלי בתע"א. לא ציינתי (בכוונה כמובן) **שהתע"א זכתה יחד עם שותפותיה לפרויקט במקום הראשון בתחרות**. אם תשאלו אותי, **העבודה ב-MBSE תרמה רבות לאינטגרציה מוצלחת של המערכת ולהדגמה מוצלחת ללקוח**. המודל נבנה במקביל לתהליך הפיתוח ושימש לתיקוף וניתוח של הארכיטקטורה המערכתית, של **ביצועי המערכת** בתגובה לקלט הפיזי והאינפורמטיבי, ולבחינה ועדכון תכן המערכת להתמודדות עם **אירועים מורכבים, תקלות, ואנומליות**. השימוש במודל איפשר לי לזהות מבעוד מועד פערים בתגובת ופעולת המערכת, להתאים את תכן המערכת להתמודדות עם סטואציות מורכבות ולא-שגרתיות כמו **מזוודות שנתקעות, מסוע שנעצר אקראית או סתירה בין אינדיקציות מחיישנים שונים** המספקים מידע משלים, **ולשפר את ביצועי ואמינות המערכת**. בפרויקט שבו הכל מתכנס להדגמה אחת, שבה הכל צריך לעבוד בצורה חלקה, זה קריטי. כך שאפילו בפרויקט מסוג הדגמה טכנולוגית או הוכחת התכנות (Proof of Concept) כדאי ליישם MBSE.

אך יש עוד מרכיב שלא הזכרתי: **המתודולוגיה**. אכן, עשינו שימוש במתודולוגיית **ECSAM** לפיתוח מערכות מורכבות, שנבנתה והתגבשה בתעשייה האווירית במשך שנים רבות. מבחינתי, **המתודולוגיה היוותה גורם קריטי** בבניה מוצלחת של המודל ובמיצוי נכון שלו. והרי זה בדיוק מה שצוין בסקר כמרכיב קריטי להצלחת ההטמעה. ההיצמדות למתודולוגיה סייעה רבות להתקדמות בבניית המודל ולייצור תוצרים אופרטיביים בעלי-ערך באמצעותו ועל-בסיסו (כגון סימולציה מערכתית, הפקה אוטומטית של מפרט דרישות מבוסס מודל וייצואו לכלי DOORS המשמש לניהול דרישות בתעשייה, ועוד). ניתן לומר כי **שילוב של כלי בעל יכולות (Simulink), מתודולוגיה נכונה (ECSAM), ליווי והנחה של מומחים, ונכונות ופתיחות של הצוות**, הם שהובילו להטמעה מוצלחת של גישת MBSE ולהוכחת הכדאיות להשקעה בשיטה זו לפרויקטים נוספים בתחום. כך אפשר ונכון להמשיך בהטמעה, בסיכון נמוך לארגון, **פרויקט אחר פרויקט, צוות אחרי צוות**.

לסיכום, בשנים האחרונות אנו עדים להתפתחות משמעותית ובשלות **טכנולוגית** בכלי MBSE, אך מדובר **בתנאי הכרחי שאינו מספיק** להצלחת ההטמעה. הדו"ח של SERC מעיד ללא ספק על אכזבה וחוסר שביעות רצון לגבי היקף ועומק ההטמעה של MBSE בתעשייה, אך יש בו גם **ביקורת בונה ולקחים חשובים** לגבי התמהיל הנכון להטמעת MBSE בתעשייה. לצד הלקחים מן הדו"ח, על-סמך מספר קטן של סיפורי הצלחה שפורסמו בספרות וכן הדוגמא של עבדכם הנאמן, נראה כי יש מתכון מנצח המשלב **מתודולוגיה, טכנולוגיה, ליווי והכוונה, פתיחות, והדבר החשוב ביותר – הערך המוסף**.

אהבתם, לא אהבתם? שתפו בכל מקרה! מוזמנים/ות לשלוח חוות דעת ל-ModelBasedSystemsEngineering@gmail.com.