

אביגדור זוננשיין, שוקי שטאובר

# מהקונקורד לכיפת ברזל

ניהול מערכות טכנולוגיות במאה ה-21

# **"From the Concorde to the Iron Dome"**

## **Managing Technological systems in the 21<sup>st</sup> Century**

Avigdor Zonnenshain, Shuki Stauber

All Rights Reserved ©

Copyright © 2014 by The Technion Institute for Research & Development Ltd,  
by the Gordon Center for Systems Engineering, Technion, Haifa;  
by Avigdor Zonnenshain and by Shuki Stauber

Printed in Israel 2014

**עריכה לשונית:** הילה שביט  
**עיצוב עטיפה:** צבי פדלמן  
**עימוד:** סטודיו רובין  
**ניהול הפקה:** אבי ליפשיץ - אות הפקות

נדפס בישראל תשע"ד 2014  
על ידי יהושע שטאובר - ספרי ניהול ועסקים  
E-mail: [shuki@shukistauber.co.il](mailto:shuki@shukistauber.co.il)  
אתר הבית: [www.shukistauber.co.il](http://www.shukistauber.co.il)

© כל הזכויות שמורות למוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ,  
למרכז "ברנרד מ. גורדון להנדסת מערכות", הטכניון, חיפה,  
לאביגדור זוננשין וליהושע שטאובר

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאחסן במאגר מידע, לשדר או לקלוט בכל דרך או אמצעי  
אלקטרוני, אופטי או מכני אחר, כל חלק שהוא מהחומר הכלול בספר זה.  
שימוש מסחרי מכל סוג שהוא בחומר הכלול בספר זה אסור בהחלט, אלא ברשות מפורשת בכתב  
מהמחברים.

אביגדור זוננשיין, שוקי שטאובר

# מהקונקורד לכיפת ברזל

ניהול מערכות טכנולוגיות במאה ה-21

## תוכן העניינים

מבוא - הנדסת מערכות - מקצוע בהתהוות. . . . . 17

### חלק ראשון: הנדסת מערכות פנים רבות לה

א. מקורות התפתחותה וייחודה של הנדסת מערכות . . . . . 25  
ב. ראייה מערכתית רב-תחומית . . . . . 31  
ג. מהנדס מערכות כמנהל וכמנהיג . . . . . 38  
ד. התפתחותו של מהנדס מערכות . . . . . 43  
ה. הנדסת מערכות בארגונים שונים . . . . . 50  
ו. הנדסת מערכות לאן? . . . . . 54

### חלק שני: עולם של פרויקטים מורכבים - אז והיום

פרויקט ה"לביא" - החלום ושברו . . . . . 61  
א. בדיקת היתכנות . . . . . 62  
ב. הפרויקט . . . . . 67  
ג. סוף הפרויקט ותובנות נוספות . . . . . 80  
פרויקט "כיפת ברזל" - פיתוח תחת אש . . . . . 83  
א. רקע והתארגנות . . . . . 84  
ב. ניהול הפרויקט . . . . . 92

### חלק שלישי: הראיונות

התפתחות הנדסת מערכות בעולם טכנולוגי מורכב - ענפי התעופה והחלל . . . 104  
א. "התמודדות מאורגנת ורב-תחומית עם בעיות רחבות" . . . . . 105  
ב. "תכנון מערכות מותאמות לצורכי לקוחות ומשתמשים" . . . . . 116  
ג. "לראות מעבר לטכנולוגיה ולהבין את המשימה" . . . . . 125  
ד. "יכולת פישוט בסביבה מורכבת" . . . . . 136  
ה. "מגה-מערכות מורכבות שלא ניתן לפקח עליהן" . . . . . 148

התפתחות הנדסת מערכות בעולם המסחרי והתעשייתי

- ובמערכות אזרחיות מורכבות . . . . . 157
- א. "היכולת לזהות צווארי בקבוק ולדעת לטפל בהם" . . . . . 158
- ב. "תמיד נדרשת עבודה מסודרת, הבעיה היא שלא רוצים להשקיע בה" . . . 168
- ג. "מהנדסי מערכות 'ניהוליים' רואים גם את הצדדים העסקיים" . . . . . 178
- ד. "אופטימיזציה מהקומה הכי גבוהה שלה" . . . . . 186
- השפעת ההתקדמות המואצת של עולם המחשוב . . . . . 196
- א. "כשנוצרת מסה קריטית של תהליכים ושיטות, נולד מקצוע" . . . . . 197
- ב. "הסתכלות על בעיה מזוויות ראייה שונות" . . . . . 205
- ג. "למידה של נושאים חדשים, מעבר לתחומי הליבה" . . . . . 214
- ד. "משקל מהותי לרמת הדיון האבסטרקטית" . . . . . 220
- הנדסת מערכות והעולם האקדמי . . . . . 231
- א. "אפליקציה של חשיבה הוליסטית" . . . . . 232
- ב. "סקרנות טבעית חזקה ויכולת אמיתית לחבב אנשים" . . . . . 239
- ג. "להרחיב את גבולות המערכות" . . . . . 244
- ד. "מקצוע שנועד לשרת את צורכי התעשייה" . . . . . 255
- הנדסת מערכות בעולם הייעוץ וההכשרה . . . . . 263
- א. "שילוב של מיומנויות הנדסיות וניהוליות" . . . . . 264
- ב. "הנדסת מערכות מבוססת מודלים" . . . . . 273
- ג. "הדרישה המרכזית, עמידה בלוחות זמנים" . . . . . 280



## פרקי הראיונות לפי שמות המרואיינים

שם המרואיין.....	עמוד
פרופסור עובדיה הררי .....	61
א"א.....	83
נורמן אוגוסטיין.....	105
יוסי אקרמן .....	116
ג'ון תומס.....	125
דוקטור קובי ריינר .....	136
הילרי סיליטו.....	148
דוקטור גלעד (גילי) פורטונה .....	158
בועז דוברין .....	168
אלון גזית, בנג' רום וארז הייסדורף.....	178
דוקטור אמיר זיו-אב .....	186
הנרי ברודני.....	197
מרים (מימי) תימנת .....	205
באד לאוסון .....	214
שרון שושני תבורי .....	220
פרופסור ג'וזף קסר.....	232
דוקטור ססיליה הסקינס .....	239
פרופסור אוליביה דה וויק.....	244
פרופסור אביב רוזן.....	255
דוקטור אריק הונור .....	264
סנדי פרידנטל .....	273
נילס מלוטאו .....	280

## דבר ראש מרכז "ברנרד מ. גורדון" להנדסת מערכות, הטכניון

בתחילת תקופת כהונתי כדיקן הפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל של הטכניון (1995-1998) הופנתה אליי בקשה שמקורה היה בתעשייה, לגיבוש תכנית לימודים ומתן תואר אקדמי בהנדסת מערכות. עד לאותו זמן, הפעילות האקדמית בהנדסת מערכות בישראל הייתה מצומצמת יחסית ומפוזרת ביחידות אקדמיות שונות, בטכניון ובמוסדות אקדמיים אחרים. הפניה לדיקן הפקולטה לאווירונאוטיקה וחלל לא הייתה מקרית - הפעילות בהנדסת מערכות בעולם התחילה בדרך כלל בתעשיות האווירונאוטיקה והחלל ובתעשיות הביטחון.

מתוך הכרה בחשיבות הנושא והתפקיד ההיסטורי של הטכניון כמקדם הידע והעשייה ההנדסית בישראל, לא היה כל היסוס בהיענות לבקשה. בגלל האופי הרב-תחומי והבין-תחומי של הנדסת מערכות, היה ברור כי התכנית חייבת להיות בין-יחידתית, ובה ייקחו חלק כמה יחידות אקדמיות (פקולטות). ואכן, מאז הקמתה מנוהלת התכנית על ידי ועדה הכוללת נציגים של כמה יחידות אקדמיות. יתרה מזו, היה ברור כי הנדסת מערכות היא תחום שבו קיים קשר הדוק, כנראה יותר מאשר בכל תחום הנדסי אחר, בין האקדמיה לתעשייה. לאור זאת, הוועדה שהוקמה כדי לקבוע את יעדי התכנית ואת אופי הלימודים כללה מלבד חברים מהאקדמיה גם נציגים בכירים מהתעשייה; הסכמה שהוועדה הגיעה אליה כבר בשלבים ראשונים של עבודתה הייתה כי התכנית תהיה תכנית לתואר שני: על המועמדים להיות בעלי תואר ראשון בתחום מסוים ובעלי ניסיון מינימלי של עבודה בתחום זה.

התכנית זכתה להתעניינות ולביקוש הרבה מעבר לציפיות של מקימיה. כיום, פחות מחמש-עשרה שנים מאז החלה התכנית לפעול, היא חצתה את הסף של אלף בוגרים ולומדים. בוגרי התכנית פזורים על פני כל התעשייה הישראלית - ביטחונית ואזרחית, ארגונים ומשרדים. לבוגרי התכנית הייתה ויש השפעה רבה על הטמעת נוהלי הנדסת מערכות והחשיבה המערכתית בישראל. קשה יהיה למצוא פרויקט גדול המבוצע במדינת ישראל, שאין בצוות המבצע אותו בוגרים של התכנית הטכניונית, רבים מהם בעמדות בכירות.

תנופה משמעותית בפעילות הנדסת מערכות בטכניון ובישראל התאפשרה עם הקמת מרכז "ברנרד מ. גורדון" להנדסת מערכות. מרכז זה הוקם בעזרת תרומתו הנדיבה של דוקטור גורדון, מהנדס עתיר הישגים מארצות הברית, שהכיר בחשיבות



הנושא. הקמת המרכז אפשרה את העמקת הקשרים בין התעשייה לאקדמיה וביצוע מחקרים בתחום, חלקם בשיתוף הדוק עם התעשייה. נוסף על כך, המרכז פעיל בארגון כנסים וימי עיון, בהזמנת מומחים מחו"ל למתן הרצאות וסדנאות, כמו גם בעידוד הקהילייה הטכנולוגית בישראל לאימוץ השיטות המודרניות של הנדסת מערכות. אף שבשנים האחרונות ניתן לראות כי המודעות ליתרונות שמציעה הנדסת מערכות קונה לה אחיזה בחלקים הולכים וגדלים של עולם ההנדסה, עדיין ישנם תחומים הנדסיים אשר אינם מודעים לכך. לאור זאת ראה "מרכז גורדון" חשיבות בביצוע המחקר אשר הוביל לכתיבת ספר זה.

אני מאמין כי ספר זה, המבוסס על ראיונות עם מומחים בהנדסת מערכות מישראל ומהעולם, מציג תמונה רחבה של תחום הנדסת מערכות, של האתגרים העומדים לפניו, של תרומותיו עד היום, של יתרונותיו וגם של האתגר שהוא מציב בפני אלה המנסים להטמיע אותו בענפי תעשייה ובארגונים.

לתובנות שהביאה איתה הנדסת מערכות לגבי הניתוח והייעול של פעילות מערכות מורכבות, רב-תחומיות ובין-תחומיות, יכולה וצריכה להיות השפעה גם מעבר לעולם הטכנולוגי; מערכות בריאות, מערכות חברתיות ומערכות רבות אחרות - כולן יכולות לצאת נשכרות מאימוץ השיטות שפותחו בהנדסת מערכות. לכן ישנה חשיבות רבה לכך שהמודעות ליכולות הטמונות בהנדסת מערכות תהיה בהישג ידם של רבים אשר בדרך כלל אינם עוסקים בהנדסה או בטכנולוגיה. מטרה זאת עמדה לנגד עיני המחברים של ספר זה, אשר הצליחו להציג תמונה שהבנתה אינה דורשת מהקורא רקע טכנולוגי מיוחד.

אני מודה לכל המרואיינים אשר הקדישו מזמנם לקיום הראיונות ולתהליך העברתם אל הכתב. תודות לדוקטור אביגדור זוננשיין ולמר שוקי שטאובר, על המאמץ והמסירות אשר ליוו כתיבת ספר זה. אני מאחל לקוראים קריאה מהנה ומאמין כי המסר שמועבר בספר יסייע בהפצת המודעות ליתרונות שמציעה הנדסת מערכות. אני מקווה כי ספר זה יעודד את העמקת השימוש בתובנות, בידע ובכלים מודרניים לשיפור מערכות מסוגים שונים.

פרופסור אביב רוזן,

ראש מרכז "ברנרד מ. גורדון" להנדסת מערכות, הטכניון, חיפה

## **דבר נשיא האיגוד הישראלי להנדסת מערכות INCOSE\_IL\***

לעוסקים בהנדסת מערכות היה ברור אינטואיטיבית שזו הדרך לעבוד בפרויקטים מערכתיים, אולם לא היו מספיק נתונים כמותיים אשר יאששו את תחושתם זו. והנה בשנים האחרונות פורסמו ממצאי מחקרים שבהם נמצאו קשרים מובהקים בין מידת ההשקעה בהנדסת מערכות כחלק מהעלות הכוללת של הפרויקט ובין הצלחת הפרויקט בממדים של עמידה בתקציב, עמידה בלוח הזמנים והצלחה כוללת. נמצא גם קשר מובהק בין יכולת הניהול והמנהיגות הטכנולוגית של מהנדס המערכות הראשי של הפרויקט ובין הצלחת הפרויקט.

נראה שהדילמה, שהייתה קיימת בעבר, אם להשקיע במיסוד הנדסת מערכות בארגונים עתירי פרויקטים, אינה קיימת יותר. בחברות הביטחוניות הגדולות בארץ ובגופים הטכנולוגיים של מערכת הביטחון, גופים שבהם צמחה והתפתחה הנדסת מערכות בישראל, הבינו זאת כבר מזמן. לפיכך, בשנים האחרונות אנו עדים להכנסת תהליכים וגישות של הנדסת מערכות גם לחברות "אזרחיות" קטנות ובינוניות.

ב"איגוד הישראלי להנדסת מערכות" משוכנעים שיש להתייחס להנדסת מערכות דווקא בישראל כאל נכס אסטרטגי וכאל תחום שבו יש לנו יתרון יחסי גדול. לכן, החלטנו שלצד חיזוק הנדסת מערכות בארגונים הביטחוניים וחיזוק הקשר בין התעשייה לאקדמיה, נפעל גם להנחלת הידע הרב שהצטבר בנושא לכלל התעשייה הישראלית. הדבר ייעשה באמצעות יצירת ידע, הפצת ידע ושיתוף בידע בתחום הנדסת מערכות.

הספר שלפנינו, מהקונקורד לכיפת ברזל - ניהול מערכות טכנולוגיות במאה ה-21, משתלב היטב ביעדים אלה; הוא מספק הזדמנות מרתקת להיחשף מקרוב לידע עצום, לתובנות המבוססות על ניסיון רב ולעמדות שהתגבשו מתוך מעורבות בפרויקטים מערכתיים של עשרים ושניים מומחים בהנדסת מערכות מהארץ ומהעולם.

הספר נכתב ונערך על ידי שני מומחים בכירים: דוקטור אביגדור זוננשיין, מהנדס מערכות בכיר ורב ניסיון שפרש לאחרונה מ"רפאל" וכיום פועל בטכניון במסגרת "מרכז גורדון להנדסת מערכות", ושוקי שטאובר, מומחה בכיר לניהול וכותב ספרי ניהול.

בשם "האיגוד הישראלי להנדסת מערכות" אני רוצה להודות להם מקרב לב על תרומתם החשובה לקידום הנדסת מערכות בארץ.

**פרופסור מוטי פרנק,**

**נשיא "האיגוד הישראלי להנדסת מערכות" INCOSE\_IL**

## **ברכת נשיא INCOSE - האיגוד הבינלאומי להנדסת מערכות**

### **Dear Systems Engineers,**

I am proud to be a systems engineer.

Systems engineers have an important role in developing systems for the benefit of mankind and the world.

The study on **Systems Engineering** which are documented in this book is very important for the Systems Engineering community, as it presents for the first time different views and various aspects of systems engineering as expressed by experts who have been interviewed for this research. These experts are coming from different countries, cultures and backgrounds.

This study is a great asset for INCOSE as a training material and as a promotion document for the systems engineering community as it presents the diverse, rich & colorful roles of the systems engineer

I am proud to be a part of this effort as one of the experts to be interviewed.

It gave me the opportunity to communicate my views and vision on the important values of the systems engineer.

I congratulate the leaders of this initiative - Shuki and Avigdor, and I express my thanks for the "Gordon Center" for supporting this study.

**John A. Thomas, ESEP**

**INCOSE President**

## דברי המחברים

\* \* \*

הנדסת מערכות היא דיסציפלינה דינמית ההולכת ומתפתחת בהתאם לשינויים שחווה הסביבה שבתוכה היא פועלת. בין השאר, משפיעים עליה שינויים טכנולוגיים, התפתחויות בדיסציפלינות משיקות, ממצאי מחקרים בתחום או לקחים מניסיון שנצבר בתעשייה.

גם אני אישית חוויתי בחיי המקצועיים, הנפרשים על יותר מארבעים שנה, היבטים ומבטים שונים ומשתנים של הנדסת מערכות ושל גישות מערכתיות בתעשייה ובאקדמיה. הפעלתי גישה מערכתית והוליסטית במגוון תחומים: אמינות ובטיחות מערכות, ניסויים מערכתיים, תמיכה כוללת במוצר, ניהול והנדסת איכות כוללת, ניהול ופיתוח פרויקטים מערכתיים-טכנולוגיים ואחריות חברתית כוללת.

לאור זאת עלה בי הרעיון לקיים מחקר איכותני של ההיבטים השונים של הנדסת מערכות על ידי פגישות וראיונות עם מומחים להנדסת מערכות מהארץ ומהעולם. כדי לבצע את הראיונות ואת הכתיבה באופן איכותי ומקצועי, רתמנו את שוקי שטאובר, מראיין וכותב מקצועי בתחומי הניהול.

ראיונות ומפגשים אלו מאפשרים לנו להכיר את מקורות ההתהוות של דיסציפלינת הנדסת מערכות, את דרכי התפתחותה, ולהכיר באופן אישי את המומחים בתחום זה ואת ניסיונם, את דעותיהם ואת גישותיהם לתחום. אנו קוראים לסקירת הפתיחה "הנדסת מערכות - פנים רבות לה" משום שבספר מוצגים ההיבטים השונים של הנדסת מערכות ונקודות המבט השונות בעיני קבוצת המומחים שבחרנו לראיין במסגרת זו. פנינו ליותר מעשרים מומחים מהארץ ומעולם, המייצגים קשת רחבה של תחומי עיסוק וניסיון מגוונים בתעשייה ובאקדמיה. כל המומחים נעתרו ברצון רב להשתתף במחקר זה ולהציג בכירור ובפרוטרוט את ניסיונם ואת דעותיהם בתחומי העניין של המחקר. בין היתר התייחסנו לשאלות כגון כיצד מתמודדת הנדסת מערכות עם מורכבות טכנולוגית ועם צרכים משתנים של לקוחות? כיצד מיושמת בפועל הנדסת מערכות בארגונים ובפרויקטים שונים? כיצד משמש מהנדס מערכות כמנהל וכמנהיג?

כל המומחים בירכו על היוזמה למחקר זה ושמחו על ההזדמנות להציג את גישותיהם. נוסף על כך, הם העריכו מאוד את האפשרות שגישותיהם יסוכמו ויכללו בספר המסכם את ממצאי המחקר.

יש לציין שההיכרות האישית שלי עם עשרות מומחי הנדסת מערכות בארץ ובעולם סייעה לנו לגייס את המרואיינים להשתתף במחקר זה. באופן מעשי, "אף אחד לא אמר לנו לא..."

מחקר זה אף סייע בידי לסגור כמה מעגלים היסטוריים; אחד מהם הוא המפגש עם נורמן אוגוסטין, הנשיא הידוע של "לוקהיד מרטין" (Lockheed Martin), שאותו פגשתי בחברת "מרטין מריאטה" (Martin Marietta) כאשר הוא ניווט את יצירת שיתוף הפעולה עם "רפאל" כנשיא "מרטין מריאטה", ואני הייתי חבר בצוות גיבוש שיתוף הפעולה. באותם ימים הוא היה מושא להערצתי וכיום נפלה בידי הזכות להיפגש עמו ולראיין אותו למחקר זה.

הבחירה לשלב במחקר זה את שוקי שטאובר, כותב ומראיין מקצועי בתחומי הניהול, הייתה מכוונת ומושכלת. רצינו שהראיונות ינוהלו בצורה מקצועית מאוד ושהכתיבה של סיכומי הראיונות תהיה בשפה "שווה לכל נפש" - כלומר, שגם קוראים מחוץ לקהילת מהנדסי המערכות יוכלו לקרוא, ללמוד ולהבין את הממצאים ואת התובנות, ואפילו ליישם בתחומי עיסוק אחרים. להערכתי, "ההימור" על שוקי הצליח מעל ומעבר - שוקי הקשיב ולמד את היבטי הנדסת המערכות, והצליח לנסח את ממצאי הראיונות בשפה מובנת לכול. אני יכול להצהיר ששוקי שטאובר הוא "מהנדס המערכות הטוב ביותר מבין כותבי ספרי הניהול בישראל".

אני מודה מקרב לב לפרופסור אביב רוזן, ראש "מרכז גורדון להנדסת מערכות" בטכניון, על כך ש"הרים באומץ את הכפפה שזרקתי לו" בדמות מחקר מקיף זה. פרופסור אביב רוזן דאג לתקצוב המחקר, כיוון את התנעתו ואף השתתף בפועל ברוב הראיונות ותרם לנו את תרומתו המקצועית שלא תסולא בפז.

קריאה מהנה ולימוד מעניין!

דוקטור אביגדור זוננשיין,  
מרכז גורדון להנדסת מערכות

\* \* \*

כאשר דוקטור אביגדור זוננשיין פנה אליי לראשונה כדי שנכתוב יחד ספר על הנדסת מערכות, כלל לא הכרתי את המושג. המילים "הנדסה" ו"מערכות" לא נשמעו מלהיבות, אך לאחר שהסביר לי במה מדובר, הצטייר הנושא כמעניין, מיוחד וחדשני. עד אז לא הייתה לי כמעט נגיעה לעולמות טכנולוגיים. את השכלתי הבסיסית רכשתי בפקולטה למדעי החברה. התמחיתי בנושאים "רכים", שעיקרם מיומנויות אנושיות. כמומחה לניהול, התמקדה הכתיבה המקצועית שלי בקשר בין אנשים, ביכולות אנושיות ובעולם הארגוני.

פתאום גיליתי שגם אנשי ההנדסה, אנשי טכנולוגיה מובהקים, מתחילים להבין כי טכנולוגיה אינה קיימת כשלעצמה, אלא נועדה לשרת בני אדם. כפי שהעיד פרופסור אביב רוזן, מהנדס אווירונאוטיקה במקצועו וראש "מכון גורדון להנדסת מערכות" בטכניון, שבמסגרתו נערך המחקר שהיווה את תשתית ספרנו: "באתי מעולם המדעים המדויקים והתברר לי כי במקרים רבים 'המדעים הרכים' חשובים מאוד, לא פחות מהטכנולוגיה... בסוף הדרך עומד לקוח וצריך להביא בחשבון את הפסיכולוגיה של המשתמש."

"הצורך הוא אבי ההמצאה" היא אמרה שמקובל לייחס לאפלטון ורלוונטית מאוד להנדסת מערכות, תחום שהתפתח מתוך הצורך להתמודד עם העלייה במורכבותן של מערכות טכנולוגיות. מצאתי שמתודולוגיות שפותחו כדי להתמודד עם אילוצים טכנולוגיים-מערכתיים יכולות לשמש גם מנהלים, שמעצם טבעם מתמודדים עם אילוצים ניהוליים-מערכתיים. ממילא הקשר בין עולמות אלו - הטכנולוגי והאנושי - הולך ומתהדק; הכול הופך להיות קשור בכול, בדרך ליצירה של מערכות-על משולבות טכנולוגיה ואנשים.

ואכן, במהלך העבודה על הספר מצאתי בין החומרים שאליהם נחשפתי כלים מעולים שיכולים לשרת את עולמות הניהול בכלל, ולא רק את עולם הניהול ההנדסי. מכאן, הספר שלפנינו הוא ספר ניהול לכל דבר ועניין והוא מיועד למנהלים לא פחות מאשר למהנדסי מערכות. הוא נכתב במתכונתו זו כדי שגם מנהלים ללא רקע טכנולוגי יוכלו להפיק ממנו ידע רב ערך.

לבסוף, ברצוני להודות מעומק לב לשני עמיתי, פרופסור אביב רוזן ודוקטור אביגדור זוננשיין, שהעניקו לי את ההזדמנות לקחת חלק בתהליך מלהיב של יצירה ולמידה. זאת לצד היותם אנשי מקצוע מהמעלה הראשונה, המשלבים יכולת אינטלקטואלית רחבה יחד עם רוחב לב ונועם הליכות - תלמיד נדיר שהפך את העבודה המשותפת עמם לחוויה לא שגרתית.

**שוקי שטאובר**





# מבוא

## הנדסת מערכות - מקצוע בהתהוות

הנדסת מערכות היא מקצוע בהתהוות, המקשר בין תחומי ההנדסה הקלאסיים ובין מערכות ניהוליות וארגוניות. על כן, אין זה מפתיע לגלות כי אחת מקבוצות הכישורים המרכזיות הנדרשות ממהנדס מערכות, לבטח ככל שהוא בכיר יותר, היא קבוצת כישורי המנהיגות. זאת אף שהנדסת מערכות היא בבסיסה מקצוע הנדסי ומי שעוסקים בה הם מהנדסים.

בעבר הייתה הפרדה ברורה יותר בין מהנדסים מקצועיים המיומנים בתחומם (כמו מהנדסי אלקטרוניקה, מהנדסי מכונות או מהנדסי מחשבים) ובין אנשי ניהול ואינטגרציה, ששילבו בין המערכות הטכנולוגיות שפיתחו המהנדסים. אך ההתפתחות הטכנולוגית המואצת ולצדה הגלובליזציה יצרו מצב שבו הפרדה שכזו עיכבה תהליכים ופגעה ביכולת הפיתוח, וממילא גם ביכולת התחרות, של ארגונים אשר המשיכו בבלי דעת לקדש את האבחנה בין שני תחומי-על אלו.

לדוגמה: אם בעבר מהנדס היה יכול לדרוש לחזור ולבצע ניסויים אין-ספור כדי להגיע לשלמות טכנולוגית, כיום עליו לשקול שיקולים כמו זמינות משאבים או עמידה בלוח זמנים. הוא אינו יכול עוד לפעול על פי שיקולים הנדסיים "טהורים", אלא עליו להביא בחשבון גם אילוצים מערכתיים נוספים - כלומר, עתה עליו לחשוב בעצם כמהנדס מערכות.

לא כל מהנדס צריך לעבור טרנספורמציה כזו. רבים הם המהנדסים שירצו להמשיך ולהתמקד רק בתחום התמחותם ההנדסי-מקצועי, אך יש כאלו המבקשים לעשות שימוש בכלי הניתוח ההנדסי שרכשו (במסגרת לימודיהם ותוך כדי עבודה

שוטפת) לא רק כדי לפתח מעגל אלקטרוני מתוחכם, מכונה משוכללת או תוכנה מורכבת, אלא גם כדי "להנדס" מערכת שלמה שיש בה לא רק טכנולוגיה אלא גם מרכיבים נוספים כאילו ציגים כלכליים, גורמי אנוש ושיקולים מסחריים ושיוקיים. אלו הם מהנדסי המערכות.

מהנדסי מערכות מאמצים דפוסים של חשיבה ניהולית משום שלא ניתן עוד לנתק את הטכנולוגיה מהקונטקסט הרחב שבתוכו היא מתקיימת. הם פועלים כך במערכות שבהן הטכנולוגיה היא בעלת משקל מרכזי, ושם בא לידי ביטוי היתרון היחסי שלהם: הם משביחים את החשיבה הניהולית באמצעות כלי הניתוח ההנדסי שרכשו. לכן ייצאו מהנדסי מערכות רבים בארגונים המפתחים כלי טיס או כלי נשק מתוחכמים, ולעומת זאת בשלב זה מעטים מהם (אם בכלל) ייצאו במוסדות פיננסיים או ברשתות קמעונאות.

בספר זה אנו מבקשים לפתוח צוהר שיציג לקורא את עולמם של מהנדסי מערכות ויאפשר לו ללמוד מניסיונם המצטבר, ואולי גם לאמץ דפוסי חשיבה והתנהלות המתאימים לתחום פעילותו. אחרי ככלות הכול, הנדסת מערכות חוצה תחומים מעצם טבעה, ולכן המתודולוגיות שלה עשויות לשרת מגוון רחב של מומחים מעולמות הניהול וההנדסה - החל במנהל ייצור בתעשייה המבקש להשביח קו ייצור, דרך רופא המפתח מזרק רפואי או אדריכל המתכנן קומפלקס של בניינים וכלה במנהל משרד ממשלתי המגבש תכנית עבודה רב-שנתית.

"מהקונקורד לכיפת ברזל - ניהול מערכות טכנולוגיות במאה ה-21" מושתת על מחקר איכותני שבמרכזו עשרות שיחות מעמיקות עם מומחים בולטים בתחום. שוחחנו עם מהנדסי מערכות ראשיים, עם מנהלים בכירים, עם מומחים מהאקדמיה ועם יועצים מנוסים. כמחציתם מישראל והיתר ממגוון ארצות אחרות. היה לנו חשוב להציג מגוון רחב של תפיסות ומאפיינים שונים של תעשיות וארגונים.

בחלקו הראשון של הספר אנו מציגים סקירה כוללת של תחום הנדסת המערכות, מקורות היווצרותו, מאפייניו העיקריים וכיווני ההתפתחות שלו. סקירה זו מבוססת על סדרת הראיונות עם המומחים ועל התובנות שנגזרו מהדברים שהוצגו ונידונו בראיונות.

הנדסת מערכות צמחה מתוך צרכים שעלו בפרויקטים טכנולוגיים מורכבים, וגם כיום היא בעלת משקל מרכזי במסגרות כאלה. על כן, בחלקו השני של הספר הבאנו לדוגמה שני פרויקטים משמעותיים שנערכו במערכות ביטחוניות בישראל - האחד הוא פרויקט ה"לביא", שנערך לפני כשלושים שנה ולא הגיע לכלל סיום, והשני הוא "כיפת ברזל", שהסתיים בהצלחה שאף זכתה לתהודה תקשורתית. ההשוואה בין התנהלותם של שני פרויקטים אלו מאלפת, לבטח ככל שהדברים נוגעים להנדסת המערכות של הפרויקט, וחלק מזה נובע מכך שהדיסציפלינה עברה שינויים מהותיים במהלך אותן שנים.

בחלקו השלישי והאחרון של הספר נמצא פירוט הראיונות שערכנו; הוא כולל מידע עשיר ומפורט הנסמך על הידע הרב ועל שנות הניסיון הרבות שצברו האנשים שעמם שוחחנו.

בחלק זה מוצגים הראיונות במסגרת חמישה שערים:

- התפתחות הנדסת מערכות כמענה לאתגרים בעולם טכנולוגי מורכב - ענפי התעופה והחלל
- התפתחות הנדסת מערכות בעולם המסחרי והתעשייתי ובמערכות אזרחיות מורכבות
- השפעת ההתקדמות המואצת של עולם המחשוב על תהליכי הנדסת מערכות
- הנדסת מערכות והעולם האקדמי
- הנדסת מערכות בעולם הייעוץ וההכשרה

לבסוף, ברצוננו להודות מעומק לבנו לכל המומחים שתרמו לספר מתבונתם, מידיעותיהם ומזמנם. שמותיהם והרקע המקצועי שלהם מפורטים בעמוד הבא.

יבואו כולם על התודה והברכה,

המחברים

## שמות המרואיינים

**א"א - מהנדס מערכות ראשי ב"רפאל".**

**נורמן אוגוסטין - נשיא, יושב ראש ומנכ"ל חברת "לוקהיד מרטין" (1987-1997),**  
מאז שירת כיושב ראש ועדות נשיאותיות וממלכתיות, כמו הוועדה להערכת פעילות  
ארצות הברית ביבשת אנטרקטיקה.

**יוסי אקרמן - נשיא ומנכ"ל חברת "אלביט מערכות" (1996-2013).**

**הנרי ברודני - מנהל קבוצת טכנולוגיות הנדסת מערכות, "יבמ" (IBM) מעבדות**  
מחקר בחיפה.

**אלון גזית - סמנכ"ל מו"פ, בנג'י רום - מנהל מחלקת פיתוח מוצרים, ארז הייסדורף -**  
מנהל תכנית אילת בחברת "אינדיגו".

**פרופסור אוליביה דה וויק - חבר בפקולטה להנדסת מערכות MIT, עורך ראשי של**  
העיתון Systems Engineering, בעבר קצין בחיל האוויר השוויצרי.

**בוועז דוברין - מנהל פרויקט בחברת "לומיניס", בעבר מהנדס מערכות ומנהל טכני בחברת**  
"אלביט מערכות" ובחברת "פיליפס מערכות רפואיות" (Philips Medical Systems).

**דוקטור אריק הונור - מומחה בינלאומי, יועץ, חוקר ומורה להנדסת מערכות.**

**דוקטור ססיליה הסקינס - פרופסור בתחומי הנדסת מערכות באוניברסיטה**  
הנורווגית למדע וטכנולוגיה (NTNU), מהנדסת מערכות מוסמכת (ESEP) וחברה

בוועד המנהל את האיגוד הבינלאומי להנדסת מערכות INCOSE.

**פרופסור עובדיה הררי ז"ל - ראש פרויקט ה"לביא" (1980-1988), משנה למנכ"ל**  
התעשייה האווירית (עד שנת 2006), חתן פרס ביטחון ישראל (1969, 1973), חתן פרס  
ישראל לטכנולוגיה והנדסה (1987).

**דוקטור אמיר זיו-אב - מדען ראשי במשרד התחבורה (2011-2013), המייסד**  
והבעלים של חברה הנדסית טכנולוגית.

**הרולד (באד) לאוסון - מומחה בינלאומי, חוקר, מדריך ויועץ בתחומי חשיבה**  
מערכתית, הנדסת תוכנה והנדסת מערכות, פרופסור אמריטוס לטלמוניקציה ומערכות  
מחשב באוניברסיטת לינקפינג, שוודיה.

**נילס מלוטאו - יועץ בינלאומי המסייע לפרויקטים ולארגונים.**

**הילרי סיליטו** – הממונה על הנדסת מערכות ועמית בחברת "ת'אלס" (Thales UK).  
**דוקטור גלעד (גילי) פורטונה** – עמית מחקר בכיר, ראש פרויקט חזון ואסטרטגיה  
למדינת ישראל ב"מוסד שמואל נאמן" בטכניון (משנת 2009), בעבר סמנכ"ל בכיר  
ב"רפאל" ובחברת "טבע".

**סנפורד (סנדי) פרידנטל** – מומחה בינלאומי, מורה ויועץ להנדסת מערכות מבוססת  
מודלים (MBSE), בעבר מהנדס מערכות בכיר ועמית בחברת "לוקהיד מרטין".

**פרופסור ג'וזף (ג'ו) קסר** – מומחה, מרצה וחוקר בתחומי הנדסת מערכות, כיום  
פרופסור אורח באוניברסיטה הלאומית של סינגפור - NUS.

**פרופסור אביב רוזן** – חבר סגל בפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל בטכניון,  
היה היוזם של תכנית הטכניון לתואר M.E. בהנדסת מערכות ועומד כיום בראשה. כמו  
כן עומד בראש "מרכז גורדון להנדסת מערכות", הפועל בטכניון.

**דוקטור קובי ריינר** – מהנדס מערכות ראשי ב"רפאל".

**שרון שושני תבורי** – יועצת בנושאי הנדסת מערכות, חוקרת ב"מרכז גורדון להנדסת  
מערכות", בעבר ראש מנהלה ומהנדסת מערכות ראשית ב"רפאל".

**ג'ון תומס** – נשיא האיגוד הבינלאומי להנדסת מערכות, INCOSE - 2012-2014, סגן  
נשיא בכיר ומהנדס מערכות ראשי בחברת הייעוץ "בוז אלן המילטון".

**מרים (מימי) תימנת** – מהנדסת מערכות בכירה, ראש תחום שיפור תהליכים בהנדסת  
מערכות וניהול טכני ב"אלביט מערכות".