



# עולם ההנדסה והמהנדסים

ההתפתחות ההיסטורית

ודרכי הפעולה בחברה המודרנית

ברוך קרפ | אביגדור זוננשיין | ארנון בנטור

מוסד שמואל נאמן  
למחקר מדיניות לאומית



# עולם ההנדסה והמהנדסים

## ההתפתחות ההיסטורית

### ודרכי הפעולה בחברה המודרנית

מאת

**ברוך קרפ**

הקריה למחקר גרעיני ומרצה מן החוץ בטכניון ובאוניברסיטת בן גוריון

**אביגדור זוננשיין**

מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית, הטכניון

**ארנון בנטור**

מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית, הטכניון

© מוסד שמואל נאמן

כל הזכויות שמורות למוסד שמואל נאמן

אין להעתיק, לצלם, או לשכפל כל חלק מספר זה ללא רשות בכתב ומראש ממוסד שמואל נאמן

עריכה לשונית: איילת צורי

עריכה גרפית: אלה ברזני

הדפסת הספר וכריכתו בוצעו על ידי דפוס הטכניון

הודפס בישראל, 2021

## הכרת תודה

היוזמה לכתיבת הספר עלתה על רקע הפעילות של הפורום לחינוך מהנדסים במאה ה-21 שהוקם במסגרת מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית בטכניון. הדיונים בפורום הבליטו את הצורך במסמך, אשר יחדד לסטודנטים, למהנדסים ולמנהלי ארגונים המבוססים על פעילות הנדסית את הייחוד של ההנדסה כמקצוע. ייחוד זה בא לידי ביטוי הן בפילוסופיה והן בפרקטיקה המאחדות והמשותפות לכל הדיסציפלינות הטכנולוגיות ולצידן בערכים מאפיינים המקנים למקצוע ההנדסה מעמד ותפקיד מיוחדים בקידום החברה.

ברצוננו להודות למוסד שמואל נאמן על התמיכה המתמשכת בפעילות הפורום לחינוך מהנדסים ועל ההכרה בחשיבות ובצורך לסייע בקידום הוצאת ספר זה לאור.

על העריכה הלשונית של הספר הייתה מופקדת איילת צורי ותודתנו לה על העריכה המוקפדת ועל שלא חסכה כל מאמץ לשפר את שטף הקריאה של הספר, שחולש על תחומי דעת מגוונים.

אלה ברזני ממוסד שמואל נאמן בטכניון טיפלה במקצועיות ובמסירות בכל ההיבטים של העריכה הגרפית והערכתנו נתונה לה על תרומתה זו לספר.

# פתיחה

באופן מסורתי, מבוססת העשייה ההנדסית על שתי "רגליים", מדעי ההנדסה ואומנות ההנדסה. "מדעי ההנדסה" כוללים את הידע המדעי וההנדסי הייחודי (specialized) לכל התמחות הנדסית. "אומנות ההנדסה" היא הידע והמיומנויות המוכללים (generalized) המשותפים לכל התמחויות ההנדסה. הידע המוכל באומנות ההנדסה מתווה את עבודת המהנדס ברמת העל וביחד עם מדעי ההנדסה מהווה את "ההנדסה המוכללת" ומתוך כך נגזר השם של הספר "עולם ההנדסה והמהנדסים". אומנות ההנדסה כוללת ידע ומיומנויות כדוגמת: יצירתיות, קבלת החלטות, זיהוי פערי ידע ואי-וודאויות והתמודדות איתן, ראייה חברתית וגישה אתית, איזון בין פריצת דרך טכנולוגית לבין החשש מכשל, תהליכי לימוד עצמי ועבודת צוות.

השילוב של שתי רגליים אלה, מדעי ההנדסה ואומנות ההנדסה, עומד בבסיסו של הייחוד המאפיין "פרופסיה" (profession), שהוא יותר מאשר עיסוק מקצועי והתמחות ממוקדת, ויש בו ממדים הוליסטיים נוספים. לצד שני מרכיבים אלו, ובדומה לפרופסיות רבות נוספות, כוללת הגדרת ה"פרופסיה" ההנדסית מרכיבים נוספים כדוגמת: טיפול במצבים לא שגרתיים ולא מוכרים; מחויבות לקוד אתי; אחריות לחברה (society) שאיננה פחותה ואף עולה על מחויבות למעביד או למזמין העבודה. כל אלו יחדיו מחייבים הכשרה מורכבת המשלבת ידע ומיומנויות בהכשרה הפורמלית לתואר אקדמי שהוא "כרטיס כניסה" למקצוע, בנוסף למבחני רישוי (נדרשים בתחומים מסוימים), המשך הכשרה במקום העבודה והכשרה המתמשכת לאורך החיים.

ספר זה מציג בקצרה את אומנות ההנדסה המשותפת לכל מקצועות ההנדסה, כמו הנדסת חשמל, הנדסת מחשבים והנדסת מכונות, והוא משותף לכל תפקידי המהנדסים בתעשייה, כדוגמת מהנדסי תכן, מו"פ, תומכי ייצור ותחזוקה. היבטים משותפים אלו מדגישים את היות ההנדסה מקצוע (profession) על כל המשתמע מכך: השילוב בין מקצוענות לבין אחריות לחברה והייחודיות של המקצוע בהשוואה לתחומים קרובים אליו דוגמת המדע.

הסקירה ההיסטורית של התפתחות הוראת ההנדסה בשלוש מאות השנים האחרונות, המתוארת בספר, מספקת מספר תובנות בנוגע לתמונת הוראת ההנדסה כיום, המדגישה בעיקר את מרכיבי מדעי ההנדסה ופחות את אומנות ההנדסה. בספר מתואר אופן השילוב הראוי של מדעי ההנדסה עם אומנות ההנדסה בכל הדרגים ובכל החתכים של העשייה ההנדסית. תיאור זה חושף גם את החשיבות של הוראת והקניית אומנות ההנדסה בהכשרת מהנדסים ושל המשך פיתוחה בתעשייה. על רקע זה מוצגים בספר מספר היבטים הנוגעים לקשר שבין העשייה ההנדסית לבין העשייה המדעית, במיוחד לאור ההבדלים המהותיים במטרות שלהם, במשמעות פערי הידע בעשייתם, במשמעותו של כשל בעשייה, במהותה של החשיבה ההנדסית וביחסן למטרות החברה.

הספר נכתב מתוך כוונה לפנות לקהל רחב של קוראים העוסקים בעשייה ההנדסית והנוגעים לה. הוא פונה לסטודנטים בכל מגמות ההנדסה וארכיטקטורה ומיועד הן למהנדסים בתחילת דרכם והן לבעלי ניסיון הנדסי רב. הספר יכול לשמש גם כעזר למרצים למקצועות המדעיים בהכשרת מהנדסים. חידוד משימות המהנדס, כמתואר בספר, יאפשר למרצים להתאים בין המדע שהם מלמדים לבין האופן שבו יידרשו הסטודנטים לחבר בינו לבין העשייה ההנדסית. לבסוף, מנהלים שאינם מהנדסים המעסיקים מהנדסים עשויים להפיק גם הם תועלת מראייה רחבה של העשייה ההנדסית המוצגת בספר.

בסיכום הספר, מובאות מספר תובנות אפשריות הנוגעות לאופן הכשרה המומלצת למהנדסים בעתיד וליחס הראוי של התעשייה לתהליך משולב של עיצוב עולם ההנדסה והתרומה שלו לחברה.

ספר זה מבוסס על עיבוד של פרקים נבחרים מתוך טיוטה מתקדמת של הספר "אומנות ההנדסה" המתאר ביתר פירוט את הידע המוכלל של מקצוע ההנדסה, אשר נועד להבין לעומק את המשמעות הרחבה של ההנדסה כמקצוע, "ההנדסה המוכללת".

## תוכן העניינים

1. מבוא ..... 8
2. מרחב הפעולה ההנדסי ..... 10
  - 2.1 תכנון ויצירה ..... 10
  - 2.2 קבלת החלטות ..... 15
  - 2.3 תכנון, ניהול ומנהיגות ..... 17
  - 2.4 איזון משאבי תכנון ..... 20
  - 2.5 גורמים הפוגעים בתהליכי תכנון ..... 23
3. עולם ההנדסה ..... 26
  - 3.1 מקצועות ההנדסה ומגמות להכשרה פורמלית ..... 26
  - 3.2 תוצרי התכן ..... 29
  - 3.3 משימותיו של המהנדס במשך חיי מערכת ..... 29
  - 3.4 תתי-התמחויות מקצועיות חוצות דיסציפלינות ..... 36
  - 3.5 תפקידי המהנדס בחתך תעסוקתי ..... 38
  - 3.6 היררכיה הנדסית ..... 39
4. כשלים בהנדסה: גורמים ושיטות למניעתם ..... 42
  - 4.1 כשל מערכת ..... 43
  - 4.2 כשל פרויקט ..... 48
  - 4.3 היררכיה של גורמי כשל וגורמי שורש ..... 50
  - 4.4 למידה מניסיון אישי ומניסיון ארגוני ..... 54
  - 4.5 פערי ידע ואי-וודאויות ..... 57

60.....	4.6	תכן הסתברותי ותכן עם מקדמי ביטחון
63.....	4.7	מניעת כשלים להשגת יעילות ואמינות
<b>66.....</b>	<b>5</b>	<b>הכשרת מהנדסים: עבר ועתיד</b>
66.....	5.1	הנדסה בתקופה שלפני המהפכה המדעית
68.....	5.2	ראשית האוניברסיטה
69.....	5.3	ראשית האקדמיה
70.....	5.4	ראשית ההכשרה הפורמלית להנדסה
72.....	5.5	ההכשרה ההנדסית כיום
74.....	5.6	הכשרת מהנדסים למאה ה-21
<b>78.....</b>	<b>6</b>	<b>מדע, מדעי ההנדסה והנדסה</b>
78.....	6.1	הדמיון בין מדע לבין הנדסה
79.....	6.2	ההבדל בין מדע לבין הנדסה
84.....	6.3	מקורות להטיה בתפיסה של היחס בין מדע לבין הנדסה
<b>88.....</b>	<b>7</b>	<b>חברה והנדסה</b>
88.....	7.1	מהנדסים בתווך בין החברה לבין המעסיקים
93.....	7.2	אתיקה ואחריות מקצועית בהנדסה
101.....	7.3	הנדסה מסורתית והנדסה מתקדמת
<b>103.....</b>	<b>8</b>	<b>סיכום - אומנות ההנדסה המוכללת והשלמה</b>
<b>106.....</b>		<b>מקורות</b>

## 1. מבוא

מוצרים ומתקנים מהווים מרכיב חשוב בחברה האנושית, וקיומם משפר את איכות החיים ורמתם. את הקידמה הזו, המלווה במעבר לתרבות הפנאי, אנו חבים במידה רבה להנדסה שהובילה להמצאת המוצרים והמתקנים, לתכנונם ולייצורם. בכל מקום שאליו נתבונן, נמצא יצירה של תהליך הנדסי, אשר בלעדיו היה האדם נדרש לעמל רב ונאלץ להיאבק על הישרדותו.

התהליך של יצירה הנדסית לשיפור הישרדותו של האדם ולהקלת חיי היום-יום שלו החל לפני אלפי שנים. המצאת הגלגל ופיתוח השימושים בו הוא דוגמה קלאסית לכך. ייצור כלי צייד, ביגוד, לבנים הנאפות בשמש, מכוניות וכלי טיס הם המשך טבעי להמצאת הגלגל. פירוט נרחב של הנדסה בעולם הקדום מובא בספרים רבים כדוגמת ספריהם של Landels (1978) ושל Hill (1996). מהתיאורים בהם עולה, כיצד אוסף פיתוחים הנדסיים קטנים אך רבים, הוביל למצב שבו רובנו חופשיים בחיי היום-יום מאילוצי הקיום. מצב זה, שנראה בעינינו כמובן מאליו, עלול לגרום לנו להמעיט בהישגי אבותינו ולהוביל אותנו לתחושה שגויה כאילו אנו טובים מהם.

בניסוח פשטני, משימתם של מהנדסים היא לפתח ולתכנן מתקנים ומערכות, כדוגמת גשרים, בניינים, מכוניות וטלפונים ניידים, כולל תכנון אופן הייצור והתפעול שלהם. מתוקף תפקידם, מעורבים המהנדסים כמעט בכל העשייה האנושית, ועבודת התכנון שלהם מקיפה את כל המתקנים שבהם אנו משתמשים, את כל התהליכים שיובילו אליהם, את הייצור שלהם ואת אופן השימוש בהם.

העניין המרכזי שלו נדרשים המהנדסים, בין אם הם עוסקים בתכנון, בייצור או בהפעלה, הוא קבלת החלטות. במובן זה דומים המהנדסים למנהלים ולקצינים. השיקולים המדעיים המסייעים למהנדסים בקבלת החלטות בשלבי הפעולה השונים מתוארים בספרים הרבים להוראת הנדסה, כאשר מרביתם ייעודיים לכל אחד מתחומי הנדסה או למערכת המתוכננת, כדוגמת הנדסה כימית, הנדסת חשמל, הנדסה מכונות והנדסה אזרחית. שיקולים אלו מבוססים על המשולש הקלאסי של תיאוריה, ניסיון הנדסי, ניסויים וחישובים המבוצעים באופן ייעודי לתכן הנדון. בספר זה נעסוק במשולש זה, המהווה את "מדעי הנדסה", באופן מצומצם בלבד המוגבל לזיקה של העשייה המדעית להנדסה במובן הרחב הכולל גם את אומנות הנדסה.





אומנות ההנדסה כוללת את הידע ההנדסי הנוגע לאופן ניהול התכן שאינו חלק ממדעי ההנדסה. הניסיון מוכיח, שידע זה חשוב להצלחת פעילות המהנדסים, ולמרות זאת הוא מופיע באופן תמציתי בלבד בחלק מספרי ההנדסה. ידע זה של אומנות ההנדסה הנו משותף לכל מקצועות ההנדסה וחשיבותו מוצגת בספר זה בקצרה, בהקשר הרחב של העשייה ההנדסית בחברה.

הספר פותח בפרק 2 בהצגת עשייתם של המהנדסים במבט מכליל, כיוצרים וכמחליטים. בפרק 3 מתוארת עשייתם של המהנדסים במקום עבודתם, תוך פריסת מגוון התפקידים ומקצועות ההנדסה על פני שישה צירים המגדירים את המהנדס.

מניעת כשלים וניתוח כשלים מתוארים בפרק 4, לצד תיאור מבחר גורמים להופעתם, לאופן איתורם, לאופן הלימוד מהם ולמניעתם. הפרק מתאר את דרכי קבלת החלטות של מהנדסים בתנאים של פערי ידע וכיצד להתמודד איתם.

פרק 5 מוקדש לסקירה היסטורית של התפתחות ההכשרה האקדמית, במיוחד זו של המהנדסים. הבנת היסטוריה זו לצד הייחודיות של משימות המהנדס מובילה להצפת סוגיות המעצבות את הכשרת המהנדסים במאה ה-21. הדימיון בין עבודת המהנדסים לבין עבודת המדענים וההבדלים ביניהם מתוארים בפרק 6, תוך הבחנה בין המרכיב המדעי והאומנותי (professional) בעבודת המהנדסים. בפרק 7 מוצגות מספר סוגיות של עבודת המהנדסים בהקשר החברתי, לרבות האחריות שלהם והמחויבות שלהם לקוד אתי בתפקידם כ"נאמן של החברה".

בסיכום הספר, מובאות מספר המלצות כלליות הנובעות באופן טבעי מהמסקנות של הדיון בתפקידם של המהנדסים בחברה המודרנית. הצגת הדברים היא כללית בלבד ולא נעשה בה כל ניסיון למצות אף לא אחד מההיבטים המתוארים לעיל. הספר המלא, שבו יובא פירוט של מרכיבי אומנות ההנדסה, ה"מטה-הנדסה", נמצא בימים אלה בשלבים אחרונים של כתיבתו.

## 2. מרחב הפעולה ההנדסי

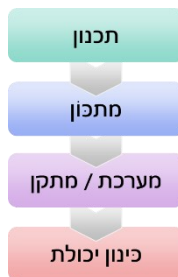
עולם ההנדסה משלב בתוכו נדבכים רבים שהבולטים בהם הם תכנון, הקמה (ביצוע, ייצור) ותמיכה בהפעלה של מערכות האמורות לשרת את החברה (society). כלומר, החברה נסמכת על העשייה ההנדסית ומתקדמת באמצעותה. בפרק זה מתוארת עשייתו של המהנדס ב-"מבט על" לזיקוק פשוט של תפקידיו בחברה, כיוצר וגם כמחליט.

### 2.1. תכנון ויצירה

תכנון היא פעולה של יצירת מתפון. מתפון הוא מרשם לפעולה, לא רק במטבח. לתפיסתנו, תפקידם של המהנדסים הוא לייצר "מתפונים" עבור החברה. השימוש במונח "מתפון" מאפשר לאחד שני "דברים" שהמהנדסים מתכננים, קרי, הגדרה של האופן שבו צריכה להיראות מערכת פיזית שתממש את היכולת הנדרשת והגדרה של דרך פעולה (תהליך) שתאפשר להגיע אל היעד הנדרש.

תכנון טוב מוביל למתפון שאם פועלים על פיו, נוצרת מערכת המאפשרת להגשים ולכונן את היכולת הנדרשת. מכווננת במובן של קיום: "פּוֹנֵנֶת אֶרֶץ וְתַעֲמֹד" (תהלים קיט, צ), תעמוד לא במובן שלא תזוז אלא במובן שלא תיפול, שתחזיק מעמד: "וְתִכּוֹן לְךָ אֶת-עַמּוֹךְ יִשְׂרָאֵל לְךָ, לְעַם--עַד-עוֹלָם" (שמואל ב, ז, כד); "הָלוֹא-הוּא אֲבִיךָ קִנְיָה הוּא עֲשֶׂךָ וְיִלְנְךָ" (דברים לב, ו). לכן, מהנדסים הם המתכננים. הם נכנסים לפעולה כאשר עולה צורך ביכולת חדשה שאינה קיימת, יכולת שלשם המימוש שלה נדרש מתקן חדש או תהליך חדש שעדיין לא נוסה.

התפקיד של המתכננים הוא להגשים רעיון, כלומר להפוך רעיון מופשט לדבר גשמי, קרי, למוצר או לתהליך. כל מתפון שמצליח לפונן את הרעיון, הוא נכון. הספר הנוכחי מתמקד בתהליכי הכנת מתפונים והגשמת רעיונות, כפי שמתואר באופן סכמטי בציור שלהלן.



הגדרת ההנדסה היא רב ממדית ולכן קיימות הגדרות רבות: חלקן נוגע לתוצרים שלה, אחרות מגדירות את התהליכים הנדרשים להשגת תוצרים אלה, ואחרות נוגעות לכלים שבהם נעשה שימוש לתכן המוצרים. ניתן למצוא הגדרות מגוונות להנדסה בהתבסס על כל אחד מהמאפיינים הללו. על פי אחת ההגדרות הנפוצות, תפקידו של התכן ההנדסי הוא לפתור בעיות של האדם ושל החברה באמצעות שימוש בידע מדעי (למשל, Penny, 1970). על פי האגודה האמריקאית להסמכה של תכניות אקדמיות להכשרת מהנדסים, ABET, 'הנדסה' הינה:

"Engineering design is the process of devising a system, component, or process to meet desired needs. It is a decision-making process (often iterative), in which the basic science and mathematics and engineering sciences are applied to convert resources optimally to meet a stated objective [or desired needs]." (Mitcham, 1998, p. 33; Haik and Shahin, 2011, p. 3)

כשמשווים בין ההגדרה של Penny לבין ההגדרה של ABET, ניתן להבחין שבשתי ההגדרות משולב השימוש בידע מדעי, אך יש הבדל ביניהן מבחינת תוצרי ההנדסה ומבחינת הייעוד שלהם. בעוד שבהגדרתו של Penny התוצאה של פעילות הנדסית היא פתרון בעיה לטובת האנושות, בהגדרה זו של ABET התוצאה היא מערכת המממשת צרכים של בעלי עניין. נציין כי היבט זה השתנה בהגדרה של האגודה מספר פעמים במהלך השנים.

בשתי ההגדרות, בזו של Penny ובזו של ABET, ההגדרה של העשייה ההנדסית כנשענת על מדע, עשויה להטעות מעט. כפי שנציג בהמשך, במיוחד בפרק 6, עשייה הנדסית אפשרית גם כשאינן ידע מדעי כלל, אם כי, כשהוא קיים, כדאי שיעשה בו שימוש. גם הגדרת האתגר ההנדסי כפתרון בעיות עשויה אף היא להטעות מעט. אומנם ניתן להגדיר את היעדרה של יכולת לבצע דבר מה כבעיה, אך עצם השימוש במונח "בעיה" אינו מגדיר את העשייה ההנדסית, במיוחד לאור העובדה שגם רופאים, כלכלנים ושופטים, כמו גם בעלי מקצוע רבים אחרים, פותרים "בעיות". מכל אלה עולה, שהגדרת ההנדסה כמייצרת מתכונים לפינון יכולת חדשה היא מדויקת יותר ומייצגת טוב יותר את העשייה ההנדסית.

כדי לכוון יכולת שלא הייתה קיימת עד כה, צריכים המהנדסים, המתכננים, לגלות יצירתיות וחדשנות. המתכננים מגדירים את האופן שבו תיווצר היצירה החדשה או תבוצע המשימה הנדרשת. לחדשנות שביצירה עשויות להיות דרגות שונות. לא כל תכן כרוך בהמצאת הגלגל. רמז להבדל ברמת החדשנות המצופה מהמהנדסים

במקרים השונים אפשר למצוא במילים קרובות *create, invent, devise*. המצאה (*invent*) היא חידוש רעיוני, פעמים רבות כזה שמפתיע. המילה "המצאה" מצביעה הן על תהליך, והן לתוצאה – ההמצאה גופא. לעומת זאת, המילה "יצירה" (*create*) מכוונת לתהליך שבו נותנים צורה לדבר השונה מצורת חומר הגלם. גם ביצירה יש מרכיב של חדשנות, אם כי, ייתכן שהוא מהפכני פחות מהמצאה. גם "יצירה" מכוונת הן לתהליך והן לתוצאה.

במילה "עיצוב" (*devise*) מתכוונים לתהליך דומה ליצירה במובן שהצורה החדשה המתקבלת שונה גם מחומר הגלם וגם מיצירות קודמות, אך כרוך בחדשנות פחותה ממנה. בשונה מ'המצאה' ומ'יצירה' שיכולים להיעשות ללא מטרה מוגדרת מראש, העיצוב מתייחס לתהליך מכוון ומנוהל ליצירת הדבר החדש.

מכאן מובן מדוע המקור למונח *engineer* הוא במילה הלטינית *ingenium* המבטאת אינטליגנציה (*ingenious*) ויכולת מולדת ליצור, שמקורה הוא בצירוף לטיני *in-* עם הזמן מילה זו הוחלפה על ידי *ingenerare*, שפירושו ליצור ולהוליד (*Britannica*), יכולת שיוחסה לנשים (דרוקמן, 2020) ולמהנדסים ממצויאים (Channell, 2019, p. 4). מונחים אלו יחדיו התגלגלו לצרפתית העתיקה ולאנגלית הבינונית, לייצוג מתקן חדשני במילה *engine* ומי שממציא מתקן כזה הוא *ingeniator*.

כינוי נוסף למהנדסים הוא *designer*, מונח המרמז על מרכיב נוסף בעשייתם. גם המקור למונח זה הוא בפעולת ה"עיצוב" (*design*) הקרוב לקודמתה, *devise*, אך שונה ממנה במקצת. שורשה של המילה הוא בשימוש בתרשימים הכוללים סימנים (*sign*) והוא אולי ספציפי יותר למהנדסים. לכן מי שנעזר בתרשימים בתכנון הוא *designer*. היסטורית, אלו הם המעצבים על מקצועותיהם: ארכיטקטוני, פנים, וכיוצא באלה, וגם המהנדסים. התרשימים, תוצרי תהליך העיצוב, משמשים הן לחשיבה הנדסית והן להפצת תוצאת התכן.

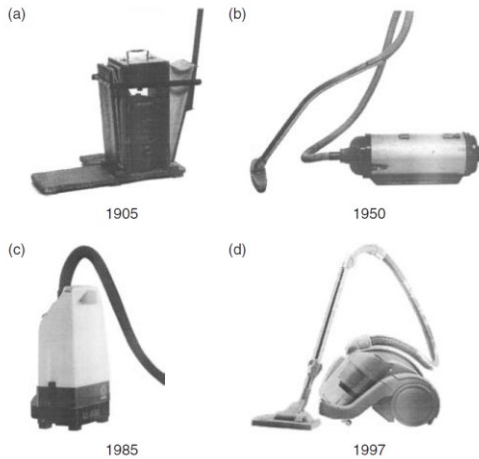
המונח "מהנדס" מצדו יובא לשפה העברית מהשפה הערבית בתקופת ימי הביניים. בשפה הערבית המונח "מוהנדס" מבוסס על השורש "hind" המבטא חוכמה שייחסו הערבים להודים שהכירו, לאחר שכבשו את הודו. בתקופה ההיא, היו ההודים פורצי דרך מהיבטים רבים: הם המציאו את השחמט ואת סימן האפס במתמטיקה, אם כי האפס כמושג היה קיים עוד בתקופת המקרא ובמסופוטמיה (למשל, 1988, Moss).

דוגמה הממחישה את הקשר שבין המצאה לבין הנדסה היא נורת הled-) (light/laser emitting diode). קודם כל היה הגילוי של פליטת אור מחומר מוצק. מרגע שהודגם הרעיון של נורת לד ברמה הפיזיקאלית ועד להימצאותה בכל מכונת ובכל בית, נדרש מאמץ פיתוחי והנדסי ניכר. כלומר, להמצאה של נורת הled ולהמצאות רבות נוספות יש תפקיד מכונן ביצירת מערכת חדשה, אך ההמצאה עצמה היא רק תחילתו של התהליך ובוודאי שהיא אינה סופו. יתירה מכך, מרבית התהליכים ההנדסיים מבוססים יותר על יצירתיות מאשר על המצאות.

דוגמה פשוטה הממחישה את ההבדל בין יצירתיות לבין המצאה היא המגבים ברכבים בשנים האחרונות. עד לא מזמן היו שני המגבים בחלון הקידמי בגודל זהה. היום, לעומת זאת, במכוניות החדישות הם בגודל שונה, תצורה המספקת כיסוי שטח ניגוב טוב יותר.

דוגמה מורכבת יותר שממנה ניתן ללמוד על המדרג של המצאתיות ויצירתיות היא התפתחות דגמי שואבי האבק. המצאת שואבי אבק החלה משואב אבק ידני ועד לשואב אבק ציקלוני המוצג באיור 2.1 (מתוך Ashby, 2005). בכל אחד מהתכנונים לשואב אבק היה מרכיב חדשני בדרגת חדשנות שונה. ניתן לומר שהדגם הראשון הומצא, ובאחרים הייתה יצירתיות במימוש הטכנולוגי. הדגם הציקלוני מדגים יפה גם את המדרג ההמצאתי-הנדסי-יצירתי.

המקור לשואב אבק ציקלוני הוא במסננים ציקלוניים למסוקים שנועדו להבטיח את תפקוד המנועים במדבר, במיוחד בזמן נחיתה ובזמן המראה. שימוש בחוק פיזיקלי ידוע הצריך מידה של המצאתיות לרעיון המסנן למסוקים. היישום שלו להבטחת הספיקה המתאימה דרשה פיתוח הנדסי. היישום של הרעיון לשואב אבק, שבו התפקיד של הציקלון הוא הפוך במטרתו, ללכוד אבק שבשטיחים מול ניקוי האוויר המיועד למנועים, הצריך יצירתיות.



איור 2.1 – סדרה של שואבי אבק החל בשואב ידני (a) וכלה בשואב ציקלוני (d). (מתוך Ashby, 2005).

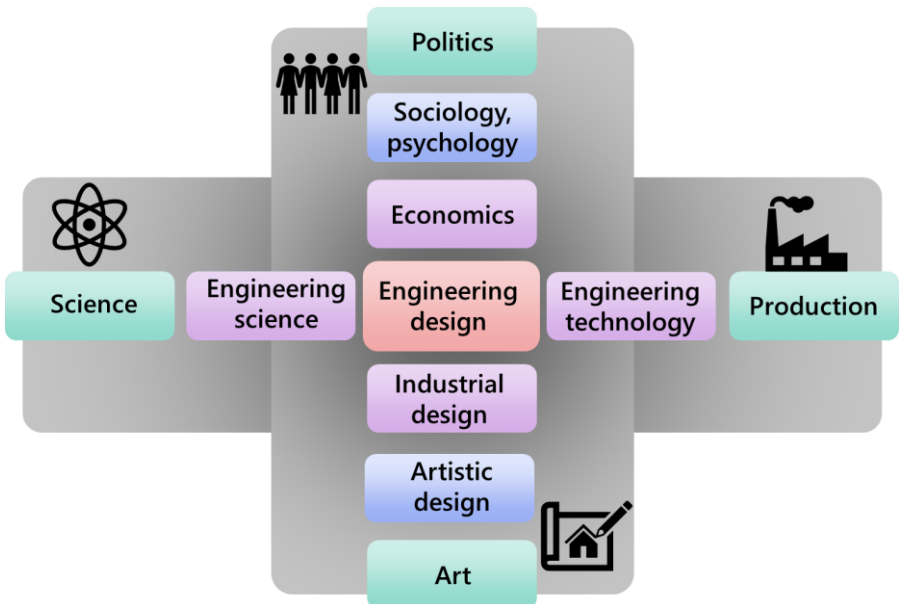
תהליך אבולוציוני דומה המשלב דרגות שונות של המצאה ויצירתיות אפשר למצוא במכוניות, במטוסים, בטלפונים, במכונות כביסה וכדומה. בספרות ניתן למצוא דירוגים של ההמצאות בתרבות האנושית: הצעה מעניינת אחת לדירוג היבטים שונים של המצאתיות, של שלושים המצאות בהיסטוריה ההנדסית, מוצגת על ידי Cropley (2019); הצעה אחרת סוקרת מספר שיטות נבחרות להערכת יצירתיות בפועל ובפוטנציה, בהקשר הרחב של יצירתיות, והיא מוצגת על ידי Villani and Antonietti (2013).

לסיכום, המתכונים שיוצרים המהנדסים הם מצרף של המצאה ויצירתיות. מרגע שעלה בהם הרעיון ההמצאתי, הם מעצבים את המתכונן תוך שהם משלבים חשיבה הנדסית עם חשיבה יצירתית. כמו כן, מהדוגמאות הרבות אפשר להבחין שאין הכרח שהרעיון הראשון יתבסס תמיד על ידע מדעי פורמלי. המצאות רבות הן תוצאה של התנסות ישירה של הממציאים עם המציאות ולפעמים אף תוצאה של טעות. כך למשל, מספרים שהמצאת הסימניות הדביקות הניתנות להסרה ולהדבקה חוזרת, הומצאה בחברת 3M בזמן פיתוח דבק חדש. תוצאה זו של הדבקה חלשה לא הייתה מלכתחילה במטרות הפיתוח.

## 2.2 קבלת החלטות

מהנדסים הם לא רק יוצרים, אלא גם מחליטים. המתכנן שמכינים מהנדסים מכיל פרטים טכניים של המערכת שתממש את היכולת החדשה. עם זאת, מכיוון שכמעט כל יכולת באשר היא אפשר לממש באמצעות יותר מדרך אחת בלבד, על המהנדסים לבחור את החלופה המיטבית. לכן, הכנת המתכנן מצריכה קבלת החלטות לאחר שיוצרו החלופות באופן רעיוני.

השיקולים המנחים את המתכננים ביצירת חלופות ובבחירה המיטבית כוללים היבטים רבים מלבד היכולת החדשה שנדרש לכוון, והם לאו דווקא היבטים טכניים או טכנולוגיים. שיקולים רבים נמצאים בעולם ההומני הכוללים את עולמות החברה והכלכלה. רעיון זה של היות המהנדסים פועלים בצומת של מערך שיקולים מגוון מודגם באיור 2.2. על פי דגם זה המערך כולל ארבעה מרכיבים: מדע ומדעי ההנדסה, היבטי חברה, שיקולי ייצור והיבטים עיצוביים-אסתטיים. על פי רעיון זה, על המתכננים להביא בחשבון את כל המרכיבים הללו בהחלטותיהם בתהליך התכנן.



איור 2.2 – מרכיבים המעצבים את קבלת ההחלטות של המתכנן. מבוסס על (Penny, 1970).

במקרים רבים, אם לא בכולם, חלופה הנותנת מענה יעיל בהיבטים מסוימים היא נחותה במענה שהיא נותנת להיבטים אחרים. חוסר האפשרות לתת מענה מלא לכל ההיבטים מאלץ את המתכננים להתפשר. למרות שבמקרים רבים נתפסת הפשרה כוויתור שלם, הרי שבמרבית המקרים של תכן מתקדם, המתגבר את היכולות הטכנולוגיות, לפשרה יש תפקיד חשוב ומכונן. החלופה המיטבית היא זו שקיים בה איזון בין שלל השיקולים הרבים הנובעים מהדרישות לתכן, והיא מקנה אופטימיזציה ברמה ההיררכית הגבוהה ביותר מנקודת ראותו של מזמין התכן. הצורך לקחת בחשבון היבטים שונים, כולל אלו שאינם טכנולוגיים, מרמז על כך שהאופטימיזציה שמבצעים המהנדסים יכולה להתבצע ברמות היררכיה שונות. מכך נגזר שיעילות המערכת שתתקבל תהיה שונה בכל אחת מההיררכיות. ההחלטות שמקבלים המהנדסים להשגת יעילות ברמות ההיררכיות השונות ניתנות לחלוקה לשני היבטים:

האחד, צורת המערכת המתוכננת והיבטים הקשורים לאופן ייצורה, הרכבתה, הפעלתה, ותחזוקתה – המתכון.

השני, אופן קידום התכן וניהולו בסביבה שבה הוא מתבצע – "מטה-הנדסה" או תכן של תהליכי התכן המכונה "תכן של התכן" (design of design) בהשאלה מכותרת ספרו של (Glegg 1969).

השיקולים המערכתיים המתוארים באיור 2.2 משמשים סביבה לקבלת החלטות משני היבטים אלו, אשר בעצמם נמצאים ברמות היררכיה שונות. המשימה של הכנת מתכון היא טבעית, והיא שואבת את עיקר תשומת ליבם של המהנדסים למימוש היכולת שהם נדרשים לפונן. לעומת זאת, אופן קידום עבודת המהנדסים דורשת "התכונות-על", הכרוכה ברפלקציה על עשייתו הראשונה, עם מידה מסוימת של ביקורת עליה. את שתי המשימות, הן של הכנת המתכון והן של ראיית-העל, נדרשים המהנדסים לבצע במקביל על אף הקושי הכרוך בכך.

דרך נוספת לבחון כיצד מבצעים המהנדסים את האופטימיזציה בכל אחת מההיררכיות היא באמצעות מקורות הידע שבהם הם נעזרים לקבלת החלטות. ממקורות הידע הללו שואבים המהנדסים גם את הקריטריונים שעל פיהם ישקלו את אופן אופטימיזציית המערכת. ניתן לחלק את מקורות הידע הללו לארבע קבוצות עיקריות:



- ידע הנדסי (מטה-הנדסה)
- ידע מדעי ומדעי ההנדסה
- ידע חברתי וכלכלי
- ערכים

ידע הנדסי מורכב מניסיון הנדסי המצטבר במהלך שנים, הכולל הן את המתכונים שפעולתם הוכחה בפועל, את אופן מימוש המתכון (הייצור), את התפעול והתחזוקה של המערכות והן את האופן שבו כדאי לנהל את התכנון. אחד המאפיינים המרכזיים של התכן הוא היותו מדרגי ואיטרטיבי. מאחר שרבות מההחלטות העקרוניות המתקבלות בתחילת התכן ובמהלכו מתבצעות בתנאים של פערי ידע ושל אי וודאויות, אשר בהכרח קיימות כמעט בכל תכן, צריך לחזור על פעולות פרטניות, כגון חישובים וניסויים ואף לאשרר החלטות. עובדה זו ממחישה את הצימוד בין קבלת החלטות בנוגע למתכון לבין קבלת החלטות בנוגע לאופן קידום התכן (מטה-הנדסה), למשל ניהול סיכונים. הידע הנדסי כולל המלצות ושיטות לכיצוע יעיל של קבלת ההחלטות ולאיוון ביניהן.

הידע המדעי במדעי הטבע, במתמטיקה ובהנדסה עצמה (מדעי ההנדסה) מאפשר למהנדסים ליצור חלופות, להשוות ביניהן, לתמוך בהחלטות שמקבלים, ולחזות את התנהגות המערכת המתוכננת. הידע החברתי-כלכלי כולל את ההיבטים החברתיים של התכן – חשיבות המערכת לחברה, כדאיותה, חשיבות הבטיחות בהפעלת המערכת, כמו גם ידע כלכלי צרף: עלויות של ייצור, תפעול, תחזוקה וכדומה.

ערכים אישיים וחברתיים הם "עקרונות על" המנחים את המהנדסים בקבלת החלטות. אלו הם העקרונות המנחים אותם בחייהם וגם בעבודתם. לא תמיד הם מודעים להם, אך הם עשויים לגרום להם להעדיף חלופה אחת על פני האחרת. כך למשל, מהנדסים רגוישים לחיי אדם עשויים להעדיף חלופה הנדסית המצילה חיי-אדם, העדפה שהם יכולים להביא לידי ביטוי כאשר מזמין המערכת ניטרלי בהיבט זה.

## 2.3. תכנון, ניהול ומנהיגות

בסעיפים הקודמים תיארנו את החלטות המהנדסים כמעצבות מתכונים. חילקנו את המתכונים לשתי קבוצות עיקריות: האחת - מתכונים לעיצוב מוצר, השנייה – מתכונים לתהליכים כמו ייצור, הרכבה, בדיקת תקינות ייצור, תחזוקה, והפעלה.

באופן מסורתי מכונה עיצוב מוצר "תִּכְן הנדסי" (engineering design) ונקשר לשימוש בשרטוטים וסימנים (sign) ואילו עיצוב התהליכים נקרא תִּכְנוּן (planning), למרות שאינו "הנדסי" פחות מעיצוב מוצר. בכל מקרה, למרות ההבדל במונחים הלועזיים והנטייה לזהות את התכן עם עיצוב מוצר, אין כל הבדל בין המונחים מבחינת המנהיגות שמגלים המהנדסים במהלכם: בשניהם הם מקבלים החלטות להכנת תכנית, שאמורה לפונן דבר-מה.

מנהיגותם של המהנדסים, במובן של planning, בולטת אף יותר בהחלטות שהם מקבלים על אופן קידום התכן, ה"מטה-הנדסה". בהיבט זה, המהנדסים הם גם מנהלים (managing), ומרכיבים רבים של אופן הניהול נלמדים במסגרת תת-ההתמחות של "הנדסת מערכת". פעולת ניהול הנדסי זו, בדומה לניהול בכלל, כרוכה בקבלת החלטות לכונן דבר מה. כך למשל, בניהול הנדסי של פרויקט, נדרשים המהנדסים להחליט כיצד לתזמן את השלבים השונים בתכן, לערוך את הניסויים, לקבוע מועד אחרון לקיבוע תצורה של תתי-רכיבים וכיוצא באלה. החלטות אלו מצריכות שילוב של ידע הנדסי וידע כללי.

לצד הדמיון שבין ניהול כללי לבין ניהול הנדסי ניתן לזהות שני הבדלים אפשריים ביניהם. בעוד שהמהנדסים נדרשים להכין את המתכנן מראש, המנהלים יכולים לקבל החלטות גם בזמן אמת. למונח "תכנון" יש משמעות (קונוטציה) של חשיבה מראש, עובדה היוצרת ריחוק בין רגע קבלת ההחלטה לבין הימוש שלה. ריחוק זה בין התכנון לבין הביצוע מאפשר למהנדסים גם לבחון את ההחלטה שקיבלו ולאמת את נכונותה, פעולה שיקשה עליהם לעשותה בזמן אמת. עם זאת, אין כל הכרח שהמנהלים יקבלו החלטות בזמן אמת, וקיימת האפשרות שיקבלו את ההחלטות מראש ובאופן מתוכנן.

ההבדל השני בין ניהול כללי לניהול טכנולוגי הוא הידע הנדרש לקבלת החלטות. בעוד שלניהול הנדסי נדרש ידע הנדסי, לידע כללי אין הכרח בידע טכנולוגי, אך כדאי שיתבסס על ידע בעולם התוכן המנוהל.

למרות העדיפות המובהקת לניהול הנדסי המבוסס על החלטות המתקבלות מראש, קיימים מצבים בהם גאלצים המהנדסים לקבל החלטות בזמן אמת, במהלך הביצוע, למשל, בעריכת ניסוי מורכב. מן הראוי שכל ניסוי יבוצע על פי תכנית ניסוי מוכנה מראש. תכנית זו היא המתכנן שמכין מנהל הניסוי. עם זאת, בגלל קיומם של אי וודאויות ופערי ידע עשוי המתכנן להחליט שנוכחותו נדרשת בזמן הניסוי, כדי לאפשר לו לקבל החלטות מקצועיות בזמן אמת, החלטות אותן לא יכול היה לקבל מראש.

באופן דומה, על המהנדסים לגלות מנהיגות וכושר ניהול בזמן אמת במצבים רבים אחרים: בזמן ייצור אב-טיפוס, בזמן ייצור המערכת עצמה באותם מקרים שבהם ישנה רק אחת מסוגה, כדוגמת גשר, אשר ייצורו מנוהל במתכונת של אב-טיפוס, בעת טיפול בתקלות בייצור, בעת הפעלה או בתחזוקה. המשותף לדוגמאות אלו הוא הקושי לצפות מראש את כל פרטי התהליך והצורך של המהנדסים לתת מענה מייד, מענה הכרוך בקבלת החלטות גם בעת ביצוע.

מכל האמור לעיל עולה, כי המהנדסים הם גם מתכננים וגם מנהלים. מהנדסים מנהלים את עצמם וגם את קבוצת המהנדסים העומדים לרשותם. כדי לקבל החלטות ניהוליות מכוננות, זקוקים המהנדסים הן לידע הנדסי בעולם התוכן של התכן והן לידע פסיכולוגי כדוגמת הנעת עובדים, ניהול תקשורת יעילה או זיהוי יכולות של העובדים. לא פעם, ממעיטים בצורך בידע הנדסי לניהול קבוצת מהנדסים בטענה ש"ניהול זה ניהול". מסתמן, שלהיות מהנדסים פרושו להיות בצומת שבה צריך לקבל החלטות בתחומים שונים וגם להתחשב בהיבטים רבים של המציאות.

כמי שקבלת החלטות היא חלק אינהרנטי מתפקידם, יכולים המהנדסים להיות מנהיגים, גם אם אינם מנהלים מבחינה ארגונית. גם מנהיגים וגם מנהלים משפיעים על פעולותיהם של אנשים. ההבדל ביניהם נעוץ במקור הסמכות. בעוד שהמנהל שואב את סמכותו מהכוח שניתן לו על ידי הממונה עליו, המנהיג שואב את כוחו מאלה שהוא מנהיג.

היכולת של המהנדסים להגיע למעמד של מנהיגים מקצועיים, ואף למעלה מזאת, טמונה בארבעת מקורות הידע שצוינו לעיל (סעיף 2.1). מצד אחד הידע המקצועי הנדסי, ובמיוחד היכולת שלהם להכיר את גבולות הידע שברשותם, ומצד שני מערך הערכים שאימצו, לרבות היכולת להודות בטעות ולשאת באחריות לכך. היכולת של המהנדסים להתבונן בצרכי המונהגים על ידם ולהיות קשובים לצרכיהם המקצועיים והאישיים, מהווה מקור בלתי נדלה לשיתוף הפעולה הנחוץ כל כך, במיוחד כיום, כאשר העולם הנדסי המגוון מצריך שיתוף פעולה פורה בין מומחים רבים.

מנהיג אינו יודע הכול, אך הוא יודע מה הוא לא יודע והיכן למצוא את הידע האמין הנחוץ לו. החינוך מכלל הוא היכולת להקשיב לעמיתים, ללקוחות ולכל בעלי העניין. זוהי הגישה המצופה מהמהנדסים.

## 2.4. איזון משאבי תכנון

תכנון מורכב מאוסף החלטות. כדי ליצור מתכנון אחד, צריך לקבל עשרות החלטות. נשאלת השאלה: האם עדיף לתכנן מראש או להחליט תוך כדי העשייה? לכאורה, ברור שעדיף לתכנן מראש. מזה עשרות שנים ידוע בהנדסה כי השקעה בשלבי תכנון ראשוני מובילה לתכן יעיל. האמת היא שאין כמעט פעולות אנושיות, בוודאי אלו של המהנדס, שהן נטולות תכנון שקדם להן. הקמת בתי ספר להנדסה מעידה על ההכרה בחשיבות התכנון. למרות זאת, אנו עדים למקרים שבהם התכנון אינו מספק ואפילו חסר לגמרי.

העדר תכנון פרושו ביצוע דבר מה מבלי להחליט מראש על האופן שבו יבוצע. כל תכן אפשר למקם על הרצף בין תכן מושלם לפרטי-פרטים לבין העדר מוחלט של תכנון מראש, המוביל להתנהלות הקרובה לספונטאנית, גם אם לוותה במחשבה בזמן אמת. בדומה לניקיון, שניתן לבצעו ברמות קפדנות משתנות, כך גם את פעולת התכנון אפשר לעשות ברמות השקעה שונות. הבחירה ברמת תכנון ראויה מושגת באמצעות איזון מתאים בין השקעה בתכנון מראש לבין הסיכון שבהתנהלות ספונטאנית. קל להבחין שבמצבים מסוימים, כמו אלו שבהם קיימת אי-וודאות קיצונית, התכנון הוא לא רק לא כדאי אלא אף בלתי אפשרי. לעומת זאת, ישנם מצבים אחרים, כמו עריכת ניסוי מסוכן, שבהם לא כדאי להשאיר את ההחלטות לרגע האחרון. האתגר של המתכננים הוא למצוא את האיזון הנכון לכל מקרה בין תכנון מראש לבין התנהלות על בסיס ספונטני. החלטה זו שייכת ל"מטה-הנדסה", הנוגעת לאופן ניהול התכן.

אחד השיקולים בהשקעה בתכנון היא עלותו. העלות הכוללת של תכנון מורכבת בעיקר משלושה מרכיבים: תכן, ייצור, והפעלה של המערכת. תכנון הוא פעולה הדורשת משאבים רבים, והם מהווים מרכיב ניכר בעלות הכוללת של כיון היכולת החדשה. לכן, טבעי שתהיה שאיפה לצמצם את עלות התכן למינימום ההכרחי. מינימום זה קשה מאוד להערכה.

לחידוד האתגר של בחירה מראש של ההשקעה הראויה בתכנון, נתבונן בשני מצבי קיצון שבהם לא נדרש כל תכנון:

- קיים "מתכון" מוכח המוביל לתוצאה הרצויה.
- כשל בהשגת התוצאה הרצויה כתוצאה מחוסר תכנון מזוהה בקלות, הוא אינו חמור, וניתן לתקנו במהלך העשייה או אחריה באופן יעיל, יותר מזה שהיה מתבצע באמצעות תכנון מראש.

דוגמה למקרה הראשון הוא תיקון של מערכת שהתגלו בה תקלות. התיקון מתבצע על פי הוראות היצרן (המייצג את הוראות המתכנן). במקרה זה, המתכנן זמין ולכן מצבים אלו מזוהים בקלות מעצם זמינותו של מתכנן. לעומת זאת, זיהוי מקרה בקטגוריה השנייה כרוך באתגר: צריך להעריך מראש את עלות התכנון, את עלות הכשל המתלווה לאי תכנון ואת עלות תיקון הנזק כתוצאה מכשל.

כשל הוא אירוע לא רצוי הנגרם מהחלטה שגויה או מהתעלמות מסימנים לצורך לקבל החלטה. כשל מצביע על העדר איזון כלשהו בקבלת החלטה. כשלים בתכן קלים יותר לזיהוי מתכן לא יעיל, אך גם איתור הכשלים לא תמיד מביא ליישום משופר של תהליכי תכן. תכן שאינו יעיל ואף כשל מערכתי של אי הפעלת כלים הנדסיים, קשה לזיהוי בזמן אמת ומצריך יושרה ומקצועיות כפי שהדגימו Dixon and Duffey (1990) בדיון על המצב העגום של התעשייה באמריקה.

המחשה למשמעות כשל הנגרם מתכן חלקי אפשר לקבל מעצם ביטול התכן. כך למשל, האגדה מספרת שמלך שבדיה ביטל את המלצות המתכנן של הספינה Vasa, שלא למקם תותחים נוספים על סיפונה ובכך גרם לטביעתה עוד לפני שירתה פגז אחד, ממש ביציאה מהנמל שבו נבנתה. גם התרסקות מעבורת צ'לנגר התרחשה בגלל הרצון העז להוציא את המשימה בזמן, תוך ביטול המלצות המתכננים לגבי עמידות אטם הגומי בטמפרטורות נמוכות.

הקושי להעריך את המינימום הנדרש להצלחה ולמניעת כשל נעוץ במספר גורמים. האחד הוא הקושי לזהות מראש את הכשלים שישתרבבו בתכן שאיננו מוקפד כראוי. הקושי השני הוא בהערכת הנזק שיתלווה לכשל שזוהה. הטיה הפועלת באדם, שלא מדעתו, ממעיטה מעוצמתם ומחשיבותם של שני היבטים אלו. באופן שגוי היא מעודדת חיסכון בהוצאות התכנון ומוצאת את ביטוייה בתחושה ש"יהיה בסדר". השפעה של הטיה זו על קבלת החלטות ידועה לרבים מניסיונם. היא הוכחה בניסויים פסיכולוגיים על ידי Bar-Hillel and Budescu (1995) והודגמה בעשייה הנדסית וניהולית בהקשר של תכן מערכות חלל של NASA על ידי Benjamin et al. (2016). בנייתו שלאחר מעשה של תקלות רבות שהתרחשו ב-NASA בתקופה של כ-70 שנה, הראו הכותבים את עקביות התופעה של זיהוי חסר של גורמי כשל ותת-הערכה של נזקיהם בשלב התכן, אשר תרמה משמעותית לתופעה של "מחלות ילדות".

הערכות שגויות של מרכיבים אלו עלולות לגרום לזירוז התכן, לדילוג על שלבים נדרשים ולצמצום פעולות לאימות שלו. התכן יכול להתבסס על מחשבה מוקפדת המסוכמת בדוחות בדוקים היטב, או יכולה להיות שטחית ואף ספונטאנית, כאשר

העשייה נשענת על הוראות בעל פה. התכן יכול להיות מבוסס על מחשבה קצרת טווח או ארוכת טווח. כך למשל, אחת הדרכים לאמת תכן היא באמצעות ניסויים. שאלה שכל מתכנן נדרש לענות עליה היא האם נדרשים ניסויים ואם הם נדרשים, באיזה היקף יש לבצעם. אין נוסחה למתן תשובות לשאלות אלו, והתשובות להן תלויות במרכיבי תכן רבים, כגון האמינות הנדרשת מהמערכת, המורכבות שלה, החדשנות בטכנולוגיה שבה נעשה שימוש, עלות הניסוי ומיומנות המתכננים.

סקירה במבט לאומי, של נזקי הימנעות מיישום תהליכי תכן של התעשייה בארצות הברית, הוצגה על ידי Dixon and Duffey (1990). ידוע מניתוח של תעשיית המטוסים באנגליה בשנות השבעים שכדאי להשקיע מחשבה רבה בשלבים הראשונים של התכן, אשר מקטינה את עלות הייצור והתחזוקה; בכל זאת, ידע זה אינו מיושם תמיד. מניתוח כשלי תעשייה בארצות הברית בשנות התשעים של המאה הקודמת ניכר כי מהנדסים נטשו את תהליכי התכן המובנים והובילו בכך ל-"מערך תכנון שבור" (Dixon and Duffey, 1990, p. 14).

טענה נפוצה התורמת למיסוך של גורמי הכשל היא האמירה "מי שלא עושה אינו טועה". טענה זו משמשת לפעמים להצדקת כשלים, להעדר הפקת לקחים מהם ולהחלשת רוחו של המתכנן מהימנעות מכשלים. אומנם נכון שלטעות זה אנושי, אך ישנן שתי משפחות של טעויות שלמהנדסים אסור לטעות בהן:

- טעויות המובילות לאסון, המצדיקות השקעה רבה למניעתן;
- טעויות קלות ערך אשר ניתנות למניעה באמצעות מחשבה סבירה.

כל הטעויות האחרות מצריכות ביצוע תהליך תכן מאוזן ומתאים כמבואר לעיל.

לסיכום, תכנון אינו ערוכה להצלחת התכן או למניעת כשלים ביישומו. החובה של המהנדסים כמתכננים וכמקבלי החלטות אינה למנוע כשלים לגמרי, אלא רק את אלו העלולים לגרום לאסון, את אלו שקל למנוע ואת אלו שבבחינת עלות-תועלת כדאי היה למנוע מראש. ללא קשר לרמת הידע והמיומנות של המהנדסים המתכננים, ברור שככל שהתכנון מוקפד יותר, כך קטנה יותר הסבירות לכשל. האתגר האמיתי הוא לזהות בשלב ההכנות את רמת התכנון המתאימה ו"לתפור" לה את מתכונת התכנון המתאימה.

## 2.5. גורמים הפוגעים בתהליכי תכנון

אם אכן כה ברור שעדיף לתכנן מראש, מדוע עדיין קיימים מצבים בהם מצטמצם התכן רק למספר פעולות מינימליות, מעין תכנון "ייצוגי"?

ניתן למנות מספר חולשות אנושיות ומאפיינים של התכן המקשים על המהנדסים לממש איזון מתאים בין השקעה בתכנון מוקדם לבין ניהולו הספונטני, שיכולה להגיע עד כדי הימנעות לגמרי מתכנון מראש.

המנגנון הראשון נעוץ בטבעו של התכן המתבצע בתנאים של אי-וודאות. בתנאי אי-וודאות קשה לאנשים, במקרה זה המהנדסים, לקבל החלטות. לתחושתם, אי הוודאות נותנת לגיטימציה להימנעות מקבלת החלטות מראש, משום שממילא הן לא יעילות בתנאים אלו. עם זאת, הידע ההנדסי מנחה את המהנדסים כיצד לקדם את התכן באופן יעיל גם בתנאי אי-וודאות, כולל יישום נכון ומאוזן של האמרה "כל תכנית היא בסיס לשינויים". כך למשל, ידע הנדסי מנחה את המהנדסים להבחין בין החלטות עקרוניות שעליהם לקבל בעת התכנון לבין החלטות שניתן לדחות למועד מאוחר יותר, לכשיתקבל המידע הנחוץ.

מנגנון נוסף הטבוע במאפייני התכן הוא האיטרטיביות (החזרתיות) שלו. החזרתיות שבתכן גורמת להטיה באיזון שבהשקעה בתכן. מכיוון שמרבית התכנונים מצריכים איטרציות בקבלת החלטות ובביצוע חישובים וניסויים, במידה רבה כתוצאה של תנאי אי-וודאויות ופערי ידע בתחילת התהליך, עלול להיווצר הרושם שהתהליך ממילא חוזר על עצמו, ולכן לכאורה אין טעם לתכנן מראש. דבר זה מאפשר, למי שבטעות מעוניין בכך, לטעון שממילא כמעט תמיד מבוצע תיקון לתכן באיטרציה הבאה, ולכן עדיף להם, למהנדסים, להמתין למשוב המתקבל בצורת תקלה, במקום לנסות לבצע מלכתחילה תכן איטרטיבי-מדרגי נכון.

גורם נוסף לפגיעה באיזון התכן הוא המתח הכלכלי ההולך וגובר בשנים האחרונות. מתח זה דוחף לצמצום הוצאות התכן כדי להגדיל את הרווחיות בטווח הקצר ונוגס בלגיטימציה של המהנדסים לשאוף לתכן מותאם. כך למשל, המהנדסים החוששים מגורם כשל כלשהו והמבקשים משאבים לשלול את קיומו, נחשפים ללחצים רבים בדרישה להוכיח שאכן יש בעיה בתכן, כדי לקבל את המשאבים שהם מבקשים. כבר בשנת 2005 מצא Ashby (2005, Ch. 16) כי כוחות הכלכלה והראייה לטווח הקצר פוגעים במאמץ המושקע בתכנון. מתח זה בין ההנדסה לבין הגישה העסקית-קפיטליסטית מתואר היטב בספר בעריכתם של Christensen et al. (2019).

מנגנון נוסף הפוגע בהערכה נכונה של האיזון הנדרש בהשקעה בתכן הוא הנטייה להסתמך על היבטים כמותיים-אובייקטיביים בקבלת החלטות. נטייה זו נותנת משקל נמוך, אם בכלל, להיבטים איכותניים, שאינם כמותיים ופונקציונליים, אך פעמים רבות הם חשובים לא פחות, כדוגמת אמינות, בטיחות, ואיכות סביבה. יש לציין שגם אם ניתן במצבים מסוימים לכמת את האמינות, הבטיחות ואף את הנזקים לסביבה ולקבוע את הערך הרצוי שימשם להשוואה, עדיין החלטה אינה בהכרח פעולה כמותית-אובייקטיבית.

היכולת לתכנן נשענת על היכולת לדמיין מצבים של המערכות הנבחנות כחלופות. גם בחירה בין החלופות נשענת על היכולת לדמיין את פעולת כל המערכות הנבחנות. כל קושי לדמיין את מצבי הפעולה השונים מקשה על קבלת החלטה מנומקת, הגורמת לדילוג על שלבים חשובים בתהליך התכן, עד כדי מזעורו לקבלת החלטות רק בזמן אמת. ייתכן שבדומה ל-"חוש טכני", לא כולם ניחנו ופיתחו את אותה יכולת הדימיון, במיוחד זו הנדרשת בתכן מכני.

מספר גורמים נוספים, כלליים יותר, תורמים להמשכיות בתכנון חסר. הראשון הוא הנטייה האנושית להתבונן לטווח הקצר, אשר מקשה על מקבל ההחלטות להשקיע בתכן מוקדם. זאת מכיוון שאת התוצאה רואים בו ברגע, בשעה שאת החיסכון של אי כשל לא רואים גם בדיעבד, כל שכן בזמן אמיתי. לכן אפשר לכאורה לדחות את הצורך בתכנון מוקדם בגישה של success oriented.

גורם נוסף הפוגע באיזון בהשקעה בתכן טמון בגישה שעל פיה הכשלים הם מקריים. מי שתופס את הכשלים כמקריים נוטה להימנע מלחפש את הגורם לכשל ומסתפק בניתוח סטטיסטי של אירועי הכשל. גישה זו מקשה על קבלת משוב חשוב לזיהוי כשלים חבויים והמאפשר עריכת תכן מוקדם יותר. הגישה ההסתברותית זו מאפשרת אומנם קבלת משוב על טעויות בעשייה, אך נדרשים תנאים מיוחדים לכך, אשר במקרים רבים אינם מעשיים. כך למשל, הישגים של גישה זו הוצגו על ידי Benjamin et al. (2016), אשר ניתחו באופן הסתברותי כשלים ב-NASA, שהתרחשו במהלך שבעים שנה והראו את ההטיה שבשימוש בניתוח הסתברותי (PRA) עד כדי צורך לשלב מקדם ביטחון בניתוח הסתברותי. במרבית המערכות לא ניתן להמתין שבעים שנה לניתוח כזה, וגם לא רצוי להסתמך על מספר כה גדול של כשלים.

בגישה מקרית (כלומר, מקרה שאינו סיבתי, אקראי), שהיא הבסיס לגישה ההסתברותית לכשלים, אין קשר סיבתי בין אירועים. לכן, כל כשל נחקר בנפרד, מבלי לחפש האם קיים גורם משותף לכשלים. כאשר הגורם המשותף הוא



בהתנהלות הנדסית-ארגונית הנמצאת בהיררכיה גבוהה מעל לפרטים הטכנולוגיים של התכן (כמבואר בהמשך בסעיף 4.3), התחקירים אינם מזהים את חוסר התכנון כגורם, וכך נמנע מהמתכננים לקבל משוב הקורא לשיפור תהליכי התכן ולא רק לשיפור התכן.

לבסוף, חוסר הכרות עם הכלים ההנדסיים של תכן או שליטה חלקית בהם, מהווה נימוק נוסף להעדר השימוש בהם או לצמצום השימוש בהם עד למינימום. הסיבות שהובילו לכך שבתחילת המאה ה-21 רק מעטים הם המהנדסים המכירים את התהליכים ההנדסיים מתוארת היטב במאמר של Dixon and Duffey (1990) בהקשר לתעשייה של אמריקה ובדוח של CDIO בהקשר הרחב יותר (Crawley et al., 2014).

בשל המנגנונים של צידוק הכשל ובשל הקושי לזהות תכן שאינו יעיל, נוצרת אשליה של ביטחון בעשייה ללא תכנון מוקפד דיו. ברבות הזמן מתחזקת אשליית הביטחון, ובהעדר גילוייה מתחזקת התחושה שניתן להצליח בעשייה גם ללא תכנון מוקפד. דוגמה לתהליך כזה מובאת על ידי Starbuck and Milliken (1988) אשר הראו ש-24 המראות מוצלחות של מעבורות לפני התרסקות הצ'לנג'ר היוו משקל מכריע כנגד החששות של המהנדסים לגבי עמידות אטם הגומי שהיה הגורם להתרסקות של צ'לנג'ר. גורמים אלו יחדיו נותנים לגיטימציה מוטעית לכיצוע תכן שטחי אשר לכאורה חוסך משאבים רבים. על כך נכתב לפני כשישים שנים:

"When machines and others do our thinking for us and this trend is encouraged, the brains, our most cherished possession will certainly atrophy with disuse. Then only would there be cause for despair" (Pearson, 1961, p. 5).

לסיכום, התהליכים ההנדסיים הם תוצאה של ניסיון הנדסי של מאות, אם לא של אלפי שנים, ונועדו לסייע למתכנן לבצע את האיזון המתאים בין עומק התכן הנדרש כדי לכוון מערכת לבין ההטיות הרגשיות שפוגעות בתכן, כפי שתוארו בדוגמאות שהבאנו. התהליכים המוצעים על ידי "מטה-הנדסה" מאפשרים לבצע התאמה בין מידת הקפדנות והעומק של השימוש בכלים המתוארים, לבין ייעודה של המערכת המתוכננת. מיומנות זו היא העומדת מאחורי היות מהנדסים "אומנים", הכלולה בחשיבה הנדסית (engineering wisdom) (למשל Samuel and Weir, 1999, p. 273).

### 3. עולם ההנדסה

עשייתם של המהנדסים וההחלטות שהם מקבלים מתפרסים על מרחב עשייה עצום בגודלו. כדי למלא את תפקידם באופן מקצועי, על המהנדסים להכיר עולמות תוכן שונים. כדי לתאר את עולם ההנדסה, ממעוף הציפור, נוח לפרוס את עולם ההנדסה על מרחב בעל שישה צירים, שכל אחד מהם מייצג היבט שונה של עבודת המהנדסים:

- מגמות ומקצועות הכשרה להנדסה;
- תוצרי התכן;
- משימות המהנדס במהלך חיי המערכת;
- תתי-התמחויות הנדסיות;
- משרות מהנדסים בתעשייה;
- היררכיה הנדסית.

למעט מהנדסים שהם יוצאי זופן, כל מהנדס ומהנדסת יכולים למקם את עצמם בנקודה כלשהי בכל אחד מששת הצירים, נקודה אשר עשויה להשתנות במהלך הקריירה המקצועית שלהם. אפיון המהנדסים ועשייתם רק על פי אחד הצירים, במנותק מן הצירים האחרים, עלולה ליצור תמונה מעוותת של תפקידם ושל אופי עבודתם. בפרק זה נתאר בקצרה כל אחד מהצירים הללו. אגב כך, נמחיש את התועלת שבתפיסת מהות ההנדסה כהכנת מתכונים באמצעות קבלת החלטות בכל מרחב העשייה הנדסי. יצירת מתכונים הכרוכה בקבלת החלטות, היא היוצרת מכנה משותף בין כל המהנדסים בכל תחומי ההנדסה (ראה פרק 2 לעיל).

### 3.1 מקצועות ההנדסה ומגמות להכשרה פורמלית

הנדסה היא מקצוע הנלמד במוסדות אקדמיים, באוניברסיטאות ובמכללות. זהות המהנדסים בציר זה מוגדרת באמצעות התחום הנדסי שלמדו.

בארצות הברית פועל ארגון ייחודי להסמכת תכניות לימודים למהנדסים – ABET, ומדינות רבות בעולם אימצו אותו. באירופה פועל ארגון מקביל – EUR-ACE. איגוד בינלאומי נוסף, CDIO, דן בתהליכי הכשרה של מהנדסים בדגש על תהליכים מערכתיים. במדינת ישראל, המועצה להשכלה גבוהה (המל"ג), היא הגוף המסמיך

את מוסדות ההשכלה להקנות תעודת הכשרה למהנדסים, והיא המאשרת את תוכניות הלימוד שמציעים המוסדות האקדמיים. בשנת 2018 הקים "מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית" שלייד הטכניון 'פורום לחינוך מהנדסים במאה ה-21', שבו שותפים כל בעלי העניין באקדמיה ומחוצה לה, שמטרתו לבחון את השינויים המתבקשים בתכניות הקיימות להכשרת מהנדסים כך שיתאימו לעידן הנוכחי (בנטור ושות', 2018).

ארגון ההסמכה האמריקני ABET מונה כשלושים תחומי הנדסה, ביניהם התחומים הבאים: מכונות, אווירונאוטיקה וחלל, חשמל, כימיה, אזרחית (בניין, כבישים, גשרים), מחשבים, מזון, הנדסה ימית, חקלאית, ביולוגית, הגנת אש, מכרות ודלקים. ההבדל בין התחומים השונים נעוץ בעיקר בעולם התוכן הייחודי לכל אחד ואחד. כך למשל, לתכן מטוסים נדרש ידע רב יותר בתכונות אלומיניום ובחומרים מרוכבים, ולתכן בניינים וגשרים ידע בבטון ובפלדה; לתכן מערכות מכניות נדרש ידע בחומרים ובזרימת זורמים, ולתכן מערכות אלקטרוניות ידע בזרמים חשמליים.

למרות הייחודיות של כל התמחות הנדסית מבין מקצועות ההנדסה ולמרות תתי-ההתמחות של כל אחד מהם, קיימים היבטים משותפים לרבים מהם, הן מהפן המדעי והן מהפן ההנדסי-תהליכי. כך למשל, הפן המדעי של התנהגות קורות בכפיפה נלמד באווירונאוטיקה, בהנדסת מכונות ובהנדסה אזרחית. הפן ההנדסי-תהליכי ("מטה-הנדסה"), משותף ברובו לכולם. עם זאת, קיימים מאפיינים ייחודיים לחלק ממקצועות ההנדסה, כפי שהם נלמדים כיום במרבית המוסדות האקדמיים.

להנדסת חשמל יש מספר מאפיינים ייחודיים בקשר למיומנויות תהליכי התכן. Dixon and Duffey (1990) מצביעים על כך שמורכבות התכן החשמלי נמוכה משמעותית מהתכן המכני בגלל המאפיינים של התכן המכני: ריבוי חלופות; חומרים; רגישות איכות המוצר לתהליכי ייצור; חוסר מודולריות של התכן המכני; הצורך בהתמודדות עם שלושה ממדים. בשנים האחרונות קיימת רגישות לאיכות המוצר גם בתחום האלקטרוניקה. ייחוד נוסף של הנדסת חשמל הוא בקרבה הגדולה הקיימת בה בין לימודי ההנדסה והעשייה המדעית במוסדות האקדמיים, לבין העשייה ההנדסית של המתכננים בתעשייה (Crawley et al., 2014, p. 238).

הנדסה אזרחית ייחודית בהיבט של הפרדה חדה בין תכן לבין ייצור, המכונה בעגה המקצועית "ביצוע", והיא מושרשת כבר בתהליך ההכשרה של המהנדס. הפרדה זו נתפשת כטבעית בפרויקטים בהנדסה אזרחית, ויש לה היסטוריה ארוכה שנים. אולם, יש בה נקודות תורפה, משום שעל מתכנני המבנה להביא בחשבון גם שיקולי ביצוע, כדי למנוע כשלים בעת ההקמה. בפועל, לא תמיד קיימת ההרמוניזציה

הרצויה בין התכן לבין הביצוע שהייתה אמורה לפצות על פיצול זה. העדר ההרמוניזציה מהווה מקור לבעיות ביצוע ולעיתים גם לכשלים במהלך ההקמה (למשל גשר שפירים), או אף לכשלים שהתגלו לאחר חניכתו לשימוש הציבור (למשל מרפסות תלויות במלון Hayat).

הנדסת חומרים היא ייחודית מבחינת היחס בין תכני המדע שהיא מכילה לבין היבטי ההנדסה. בהנדסת חומרים לומדים בעיקר מדע ופחות הנדסה. היא איננה ספציפית לתכן מערכות מסוימות, והנלמד בה הוא בעיקר תכונות של חומרים, אפיונם ואופן העיצוב שלהם. אפשר לדמות את ההבדל בין הנדסת מכונות לבין הנדסת חומרים להבדל שבין לימודי מדעי הכימיה לבין לימודי ההנדסה הכימית. בניסוח סכמתי, להמחשת ההבדל, אפשר לומר שבמדעי הכימיה נלמדים החוקים הפיזיקאליים השייכים לתגובות כימיות, ובהנדסה כימית לומדים להקים מתקנים לתעשייה כימית. בדרך כלל, לא נלמדים הנושאים של "מטה-הנדסה" בהנדסת חומרים. במונח זה, יש אי דיוק מסוים בכינוייה של הנדסת חומרים כ"הנדסה". ולכן, לאחרונה, במוסדות אקדמיים רבים, שינו המחלקות להנדסת חומרים את שמן לימדע ולהנדסה של חומרים'.

מכיוון שתכן שגוי של מערכות מסוימות עלול לסכן חיי אדם, קיימים תחומי הנדסה שלעיסוק בהם, על פי חוק, נדרשת הסמכה מרשות ממשלתית, בנוסף לתעודת גמר לימודים באוניברסיטה. דוגמאות לכך הן מהנדסי מבנים, מהנדסי חשמל (בכל הקשור למערכות חשמל של זרם חזק), מהנדסי מכלי לחץ גבוה ומהנדסי מתקני הרמה ומעליות. בעצם, בפעולה זו, החברה (society) דואגת לבטיחות חבריה, מסדירה את הרישוי ומפקחת על עבודת המהנדס כדי לשמור על חיי אנשיה. בעולמות התעופה והתחבורה, דואגים לחיי אדם וביטחונם באמצעות רשות ממשלתית המאשרת את התכן עצמו ולא את המתכנן; לדוגמא, מנהל התעופה.

נציין שהתכנון (תכן) נעשה לא רק על ידי מהנדסים אלא גם על ידי הנדסאים; בנוסף, לא כל מי שמקבל תעודת מהנדס הוא מתכנן (ראה דיון בהנדסת חומרים לעיל). הנדסאים מבצעים תכן למערכות פשוטות שלהן קל להתאים משוואות סטנדרטיות המופיעות במדריכים הנדסיים.

מרבית המסלולים להכשרת מהנדסים במוסדות אקדמיים מכשירים את המהנדסים גם למחקר ופיתוח בתארים מתקדמים, כדוגמת תואר שני (M.Sc.) ותואר שלישי (Ph.D.). תארים אלה אינם מהווים הכשרה נוספת בעשייה הנדסית קלאסית אלא הכשרה לעריכת מחקר ופיתוח תומך הנדסה, בדרגות חדשנות

שונות. חלק מהמוסדות מציעים תואר שני תומך-הנדסה (M.E.) המבוסס על קורסים ללא תזה מחקרית.

### 3.2. תוצרי התכן

ציר נוסף לזהותם של המהנדסים הוא על פי תוצרי התכן שלהם; במלים אחרות, לפי המערכות שהם מתכננים. למעשה, כל תחום הנדסה מכשיר את המהנדסים המשתייכים אליו לתכנן משפחה של מערכות דומות. כך למשל, יכולים בוגרי הנדסה אזרחית לתכנן בניינים, גשרים, כבישים, מערכות מים ושפכים. בדומה לכך, מהנדסי מכונות יכולים לתכנן מזגנים, מכונות, אוניות ומטוסים. מהנדסי אווירונאוטיקה יכולים לתכנן מטוסים, לוויינים וטילים. אלו הן תתי-התמחויות של כל תחום הנדסה, הדורשות ידע ייחודי שנרכש מתוך התמחות נוספת בשילוב ניסיון מקצועי. במקרים רבים, לא רק הידע הוא ייחודי למערכות, אלא גם מיומנויות המתכננים והכלים שבהם נעשה השימוש בתכן.

תכן מערכות מסוימות מצריך התמחות נוספת לתואר הפורמלי. לקבוצה זו שייכים תכן מתקני הרמה ומעליות, תכן מערכות הידרוליקה ומערכות פניאומטיות וכן תכן מערכות מיזוג אוויר. אכן, לכל תכן נדרשת התמחות מסוימת, אבל החלוקה ביניהם היא לא תמיד מובהקת, ואין כל הכרח שתהיה זהות בין המקצוע ההנדסי שנלמד לבין המערכות שמתכננים המהנדסים. מהנדסים שהתמחו בתכן מערכות בקרה עשויים לתכנן מערכות בקרה למכונות ייצור, למדפסות ובהמשך גם למכונות. בהתאם לכך, את ההכשרה לתכנן מערכת בקרה לומדים במקצועות הנדסה שונים, כדוגמת הנדסת אווירונאוטיקה, הנדסת מכונות והנדסת חשמל. לכן, לא תמיד קיימת חפיפה בין תוצרי התכן לבין התעודה שקיבלו המהנדסים מהמוסד האקדמי. אחד הביטויים של תופעה זו הוא נדידה של מהנדסים מתחום הנדסי אחד למשנהו, לצד חוסר אחידות בשמות המשרות שהם ממלאים.

### 3.3. משימותיו של המהנדס במשך חיי מערכת

המשימה המזוהה ביותר עם הנדסה, במידה רבה של צדק, היא התכן. כפי שהוזכר בפרק הקודם, התכן מוביל ליצירה חדשה. במשימה זו מחליטים המהנדסים כיצד צריכה להיראות מערכת שתבצע את הנדרש. עם זאת, יש למהנדסים משימות נוספות שהעיקריות שבהן, בנוסף לתכן, הן: ייצור, הפעלה, תחזוקה, רכש, ומחקר ופיתוח. משימות אלו פורסות את המהלך הטבעי של חיי המוצר החל מהמצאתו,

המשך בתמיכה בפעולתו וכלה בגריטתו. נתאר כאן בקיצור נמרץ את התפקידים השונים של המהנדסים, ונראה שפעולת התכנון משותפת לכולם. כל המהנדסים מקבלים החלטות ליצירת מתכון שאמור לממש יכולת תחת אילוצים של ביצועים, כסף וזמן.

## מהנדסי תכן

מהנדסי תכן מגדירים את המתכון ליצירת מערכת לכינון יכולת. הגדרה זו כוללת את תיאור המרכיבים הפיזיים של המערכת המתוכננת, את צורתם, הוראות הייצור, ההרכבה, ההפעלה, והתחזוקה של המערכת שתוכננה. תהליכים אלו ממחישים שעיצוב מערכת הוא רק אחד מתוך שורה של תפקידי תכנון, שעליהם מופקדים המהנדסים. בהנדסת תוכנה, הלוגיקה והפקודות למחשב מקבילים למרכיבים פיזיים בתחום הנדסה אחר. למעשה, מהנדסי תכן מתווכים בין הרמה הביצועית הנדרשת למשתמש לבין הטכנולוגיה המאפשרת יכולת זו.

ניתן לסווג את סוגי התכן שהמהנדסים נדרשים לתכנן לקבוצות הבאות:

- תכן מערכת חדשה;
- תכן תת-מערכת חדשה;
- תכן שיפורים במערכת קיימת או תיקון שלה;
- תכן תהליך הנדסי חדש;
- תכנון שינויים ושיפורים בתהליך קיים;

כדי לקבל החלטות וכדי להשלים את התכן, מסתמכים המהנדסים, המתכננים, על תוצאות הפעולות המבוצעות על ידי מהנדסים נוספים, הכוללות: ניסויים, חישובים, ליווי ייצור, ליווי הטמעת הפעלה של המערכת, הערכה של סיכונים בתכן, עלויות, זמנים וכיוצא באלה. משימות אלו משמשות לא רק בקבלת החלטות על תצורת התכן אלא גם משפיעות על אופן הניהול שלו, כמו חלוקת משימות למהנדסים או החלטה על המועד המדויק שבו יסתיים התכן.

פעילויות אלו של המתכננים ושל המסייעים להם מצריכות כתיבה. על המהנדסים לכתוב מסמכים וסיכומים כמו הוראות ייצור, הוראות הרכבה, הוראות בדיקה, הוראות שימוש והפעלה, הוראות תחזוקה, דוחות פיתוח המתעדים שיקולים בקבלת החלטות התכן, דרישות תכן לתתי מערכות, הגדרת דרישות לחבילות

עבודה (ניסויים, אנליזה) והערות לעמיתים. כתיבה זו היא תקשורת בכתב של המהנדסים עם עמיתים, מזמינים וספקים, והיא מהווה חלק מהמיומנות המקצועית שלהם.

כדי שהמהנדסים יוכלו לתכנן מערכת אופטימאלית המתפקדת באופן מיטבי, עליהם להכיר את החזית הטכנולוגית מבחינת חומרים, שיטות ייצור, גישות תכן ותחזוקה. לשם כך חשוב שישתתפו בכנסים מקצועיים, יקראו כתבי עת, יזמו מפגשי הפריה ההדדית של עמיתים וייקחו חלק במסגרות שונות של לימודי המשך. בארגונים גדולים הדבר אפשרי באמצעות שיתוף מהנדסים ממחלקות שונות במשימות רחביות בתוך הארגון.

כך לדוגמה, הכיל כנס טיפוסי בהנדסה רב תחומית לפני מספר שנים את מגוון הנושאים הבאים: תכן חסין, שרטוט הנדסי, תכן לקיימות, תכן לגיל הזהב, יצירתיות בתכן, תיאוריה של תכן, ייצור בשיטת הדפסה, תכן לאיכות, ניהול הנדסי, תכן רבובטים, תכן מוכוון משתמש, חינוך הנדסי, אתיקה בהנדסה, ניהול ידע, הנדסה ברפואה, הנדסת מערכת, תכן בהשראת הטבע, הנדסת ערך, חשיבה הנדסית, מחשבים בתכן (סימולציות), קבלת החלטות, תעשייה 4.0, למידת מכונה, ideation (שיטות למציאת פתרונות יצירתיים).

השתתפות בכנסים מסוג זה, למידה עצמית המבוססת על עיון בכתבי עת ובפרסומים טכניים והשתתפות בהשתלמויות במסגרות שונות, מאפשרים למתכננים להיות מעודכנים בהתפתחויות בנושאי עבודתם ולהכיר את חזית הידע כדי לממש את הרעיון של מהנדסים הנמצאים בלמידה מתמדת ולומדים במשך כל חייהם (LLL-Life Long Learning).

## מחקר ופיתוח

מהנדסי מחקר ופיתוח (מו"פ - R&D, Research and Development) עוסקים במנעד רחב של משימות, החל בחקר כישלונות, דרך ביצוע תכן פורץ-דרך וכלה במחקר לקידום רעיונות טכנולוגיים חדשניים, שעשויים לאפשר תכן מתקדם. למעשה, מקשרים מהנדסי מו"פ בין הידע המדעי והטכנולוגי המתקדם ביותר לבין תכן הנדסי באופן המוכוון לחדשנות ביכולות, במוצרים ובמערכות.

מצד אחד, קרובים מהנדסי המו"פ למתכננים במוכן שעליהם להבין את היכולת שיש לכוון ולקבל החלטה בהתייחס לטכנולוגיה מתקדמת בעלת פוטנציאל מתאים לדרישה. מצד שני, מתוך ההיכרות שלהם עם המדע והטכנולוגיה

המתקדמים, באפשרותם ליזום שיפורים במערכות קיימות ואף להציע פיתוח מערכות חדשות שהטכנולוגיה החדשה סללה לה אפשרויות לפריצות דרך.

מהנדסי מו"פ נדרשים להתמודד עם פערי ידע טכנולוגיים מורכבים יותר מהמקובל בתכן סטנדרטי. פערי ידע אלו מצריכים שימוש בשיטות מדעיות להסרתם, כמו עריכת ניסויים ומחקרים להוכחת התכן המוצע. מהנדסי מו"פ עושים שימוש נרחב בכלים מדעיים כדי לגלות חוקיות התקפה במערכות שהם מפתחים. בעוד שבמדע מדובר בגילוי חוקיות ברמת תופעה, בהנדסה מכוונים לחוקיות במערכת מוגדרת, או למשפחה של מערכות. במידת הצורך, מהנדסים אינם נמנעים מלבחון מצבים ברמת תופעה.

עבודת מהנדסי המו"פ קרובה לעבודת המדענים, אלא שבשונה מהמדענים, החיפוש שלהם אחר חוקיות ופיתוח התהליכים כפופים לאילוצים של עמידה ביעדי ביצוע, בזמן ובמחיר. עליהם לקבל החלטות כיצד להסיר את הסיכונים הכרוכים בקיומם של פערי הידע, כמו סדרי עדיפויות והדרכים להסרתם. בשונה ממחקר מדעי, המחקר שמבצעים המהנדסים הוא מכוון-מטרה שאינה ידיעה לשמה; לכן, גם, אם נשוא המחקר זהה למחקר המדעי, ההחלטות שצריכים לקבל המהנדסים כדי לקדם את המחקר שונות באופיין מאלו הנדרשות מהמדענים. ההבדלים בין מחקר הנדסי לבין מחקר מדעי מפורטים בפרק 6 בהמשך.

גם מהנדסי מו"פ, כמו שאר המהנדסים, נדרשים להכין מסמכים. מסמכים אלה כוללים תכניות ניסוי, דוחות ניסוי, מאמרים מדעיים, הצגות המחקר בכנסים מדעיים והצגות למקבלי החלטות. כך לדוגמה, בין הנושאים המדווחים היום בכתב עת של תכן הנדסי Journal of Engineering Design אפשר למצוא:

design strategies; usability and adaptability; materials, component and systems performance; process control; alternative and new technologies; organizational, management and research issues; human factors, environmental, quality and health and safety issues; cost and life cycle issues; sustainability criteria, indicators, measurement and practices; risk management, entrepreneurship law, regulation and governance; design, implementing, managing and practicing innovation; visualization, simulation, information and communication technologies; education practices, innovation, strategies and policy issues.



## מהנדסי ייצור

מהנדסי ייצור עשויים להיות מעורבים בתכן של שלושה היבטים בנוגע לאחת משתי מערכות: המוצר המיוצר, המערכת המייצרת אותו, או התהליך המתבצע בה. במרבית המקרים מבוסס התכן על תהליכי ייצור קיימים ומוכחים. האחריות של המהנדסים המתכננים היא להכיר את התהליכים ולתכנן את המוצר בהתאם.

קיימים שני מצבים קיצוניים שבהם נדרשת מעורבותם של מהנדסי ייצור בנוגע לאופן ייצור המערכת: האחד, כשישנן מספר דרכים לייצר את המערכת כדי לעמוד בדרישות המתכננים, ולמתכננים אין כל עדיפות בנושא. במקרה זה, מחליטים מהנדסי הייצור איזו מהדרכים תואמת יותר את הכלים של קו הייצור שבו מדובר, כדי ליצור התאמה בין דרישות המתכנן לבין יכולות היצרן.

במקרה הקיצוני השני, מפתחים מהנדסי הייצור תהליכי ייצור חדשים כדי לאפשר למהנדסים לבצע תכן יעיל יותר, במיוחד כשמדובר בתכן פורץ דרך המצריך רכיבים מיוחדים. פיתוח מערכות מתקדמות מצריך שילוב בין פיתוח ותכנון של אופן ייצור המערכת לבין תכן של המערכת עצמה. כך למשל, מהנדסים שמתכננים ששני חלקים יחוברו באמצעות בורג ואום, צריכים לוודא שתהיה גישה להידוקם. דוגמה פחות מובנת מאליה היא כאשר מתכננים כנף מחומר מרוכב על בסיס אפוקסי, יש לוודא שיש תנור בגודל מתאים, ואם לא, לשנות את קו הייצור שיכיל תנור כזה.

בנוסף לתכן מערכות ייצור ולפיתוח תהליך ייצור למוצרים חדשים, נדרשים מהנדסי הייצור לתכנן או לשפר תהליך ייצור של מוצרים קיימים. קטגוריות אלו הן נרחבות, ולפעמים מהנדס אחד או מהנדסת אחת עשויים לבצע את כולן. כלומר, גם התוצר של מהנדסי הייצור הוא 'מתכנן', אלא שבשונה ממהנדסי התכן, המתכנן של מהנדסי הייצור מוביל למערכות ייצור ולתהליכים ולא להגדרת צורתה של המערכת שתיווצר.

בתהליך מיטבי, קובעים המהנדסים המתכננים את צורת הרכיבים וגם את תהליך הייצור שלהם. אם לא יעשו כן, עלולים המהנדסים לתכנן מערכת שלא ניתן לייצרה. כאן נכנסים לתמונה מהנדסי הייצור המכירים היטב את התהליכים. הם תומכים במתכננים כדי שיתחשבו בשיקולי ייצור, וכך הופכים בעצמם לשותפים בתכן. עובדה זו חשובה במיוחד כאשר מתכננים רכיבים ייחודיים וחדשניים. היסטורית, חוסר המודעות של המתכננים לחובתם להכיר את תהליכי הייצור הולידה מושג "חדש" של "תכן לייצוריות" (design for producibility). כדי ליעל את התכן לכיוון ייצוריות פותחה גישת ה"הנדסה המשולבת", (concurrent engineering), שבה

באופן מובנה ומתמיד משלבים את היבטי הייצור והתחזוקה כבר בתהליך התכנון ההנדסי בעזרת צוותים ובעזרת תהליכים משולבים בתכנון ובייצור.

במציאות שבה לא הביאו המהנדסים בחשבון את תהליכי הייצור, נדרשים מהנדסי הייצור לעדכן את המתכונות תוך קבלת ההחלטות, שצריכים היו המתכננים לקבל בעצמם. הפיצול בין היבטי הייצור לבין היבטי התכנון בתהליך התכנון עלול להוביל לכשלים, כפי שמדגים כהלכה (Durkee (2000) בבניית גשרים. הוא מציג גשר שנפל תוך כדי בנייתו, מכיוון שהמתכנן לא לקח בחשבון את תהליך הבנייה. דוגמה נוספת לכשל ששורשו התעלמות מיכולות הייצור, הוא תכנון המעברים התלויים במלון היאט בארצות הברית. בעת בניית המלון, שינו את התכנון באופן לא זהיר וגרמו למותם של 144 אנשים זמן קצר לאחר פתיחתו של המלון בשנת 1981 (Dias, 2019, p. 40).

דוגמה אחרונה המוכרת כשלעצמה, אך בדרך כלל לא מקושרת לכשל בתכנון הייצור, היא שקיעת הטיטניק. באחד התחקירים, מני רבים, לגורמי שקיעת הספינה עלתה השאלה, מדוע הספינה שקעה למרות שהמבנה שלה תוכנן שלא לגרום לשקיעה אפילו בפגיעה בקרחון כפי שהתרחש לטיטניק. התחקיר העלה שבגלל שהספינה הייתה גדולה יותר מהסיפון שעליו נבנתה, היא בלטה מספר מטרים מהסיפון. עובדה זו לא אפשרה גישה למכונת הסמור, ולכן לא התאפשר לסמור את הפחים בחלקה הקדמי של הספינה באמצעות המכונה. משהדבר התגלה, במהלך הייצור, נאלצו לבצע סמור ידני, אך לשם כך נדרש להחליף את חומר המסמורת לחומר רך יותר, כדי לאפשר סמור ידני. כך התקבל מבנה חלש יותר מזה שתוכנן לכתחילה (ממצא זה דווח בתכנית תחקירים של National Geographic). כמובן שזו רק סיבה תורמת לכשל המצטרפת לגורמים הנוספים שנמצאו.

משימה נוספת של מהנדסי הייצור היא לתכנן תיקון תקלות בקו הייצור ולהאריך את חיי הקו מעבר לתקופה שקבע המתכנן המקורי. מערכות ייצור רבות הן יקרות, ולכן יש טעם להשתמש בהן במשך שנים רבות. כדי לשמר את יכולות הייצור שלהם ואף כדי ליצר רכיבים שמלכתחילה לא תוכננו עבורם, יש לערוך בהן התאמות ולבצע בהן שינויים. מהנדסי ייצור הם אלה שמתכננים שינויים אלו. זהו תכנון לכל דבר. נוסף על כך, כל התקדמות טכנולוגית במערכות ייצור מזמנת למהנדסי הייצור אפשרות לשדרג את קו הייצור במקום להחליפו. כך למשל, מכונות שבמקור הופעלו באופן ידני, ניתן לשדרג על ידי הוספת רכיב בקרה חשמלי ולהפוך את המערכת למערכת מבוקרת מחשב, כפי שבוצע בתחילת שנות האלפיים למכשירי העמסה לבדיקת תכונות מכניות מתוצרת של Instron.

גם מהנדסי ייצור, כמו מהנדסים אחרים, עוסקים בכתיבה: הם כותבים דוחות פיתוח למערכות ייצור, יוצרים הנחיות לתיקון ולשיפור מערכות ייצור ומפרט כתוב המתאר את השיקולים שהנחו אותם בשלב התכן. כן כותבים מהנדסי הייצור הנחיות לייצור, דוחות מעקב אחר תקינות המוצרים המופקים בתהליכי ייצור וכיוצא באלה.

## מהנדסי תחזוקתיות

מהנדסי תחזוקתיות, בדומה למהנדסי ייצור, מתכננים את תהליך התחזוקה, אם מתכנני המערכת לא השלימו תכן זה במידה מספקת או כאשר יש לבצע שינויים באופן התחזוקה. למען הדיוק, הם אינם עוסקים בתחזוקת המערכות אלא בתכנון. לדוגמה, כאשר המתכננים הכינו תכנית מתאימה אבל נדרש לעשות בה שימוש מעבר לזמן שהוגדר לכשירות המערכת, או כאשר המשתמשים מחליטים לשנות את מתאר השימוש במערכת או לערוך בה שינוי בעצמם. כך למשל, במכנים, בגשרים ובמטוסים נעשה שימוש העולה בהרבה על משך חיי השירות הראשוני שלהם תוכנו.

המיומנות של מהנדסי התחזוקתיות והבקיאות שלהם באופן תפעול המערכות בתנאי אמת מאפשרים להם לבצע תפקיד נוסף: ללוות את מהנדסי התכן בקבלת החלטות כדי לשלב בהן שיקולי תחזוקה. גישה זו, שבה מתחשבים המתכננים בשיקולי ייצור ותחזוקה, מאפשרת להם לבצע אופטימיזציה ברמת היררכיה גבוהה, המתכללת את ההיבט החברתי של עולם ההנדסה במטרה להתחשב בשיקולי החברה האנושית, מה שנקרא - socio-technological engineering. גם מהנדסי תחזוקתיות כמו עמיתיהם עוסקים בכתיבה: הם כותבים דוחות פיתוח לתהליכי תחזוקה, הנחיות תחזוקה, דרישות למתכנן לשיפור מערכות וכיוצא באלה.

## מהנדסי רכש ושרשרת אספקה

לא כל רכש מצריך את מעורבותם של מהנדסים. כאשר מהנדסי התכן מגדירים באופן חד משמעי את מפרט המוצר הנדרש, יכול הרכש להתבצע גם על ידי אחראים שאין להם השכלה הנדסית. עם זאת, כאשר מדובר במערכות יקרות הנדרשות לתת מענה ליכולות מורכבות, במיוחד כאשר דרישת הרכש מנוסחת באופן פונקציונלי ולא באופן טכני, נדרשת מעורבותם של המהנדסים בתהליך הרכש. זאת כמובן בתנאי שקיימות שתי חלופות ויותר למימוש היכולת הרצויה.

במצבים אלו, דומה תהליך הרכש לתהליך תכנון סטנדרטי, שבו צריך לקשר בין יכולות פונקציונליות לבין מאפיינים טכנולוגיים של מערכת.

גם הבנת מפרטי היצרן של מערכות מורכבות מצריכה ידע הנדסי. במקרה זה, נדרשים מהנדסי הרכש לבחון את מידת ההתאמה בין מפרט המערכת המנוסחת במונחים טכניים לבין היכולות הנדרשות, המנוסחות במונחים של ביצוע. מהנדסי הרכש יכולים לדרוש מהיצרן לערוך סדרה של מבחנים, לשאול שאלות מתאימות, ואף לבקש לערוך ניסויים לבחינת המערכת שהם עצמם יגדירו וגם ינהלו.

התערבות זו של מהנדסי הרכש, הנקראת "בדיקת היתכנות", נדרשת גם בשלב שבו מי שדורש את היכולת מהארגון בוחן את האפשרות לרכוש מערכת קיימת או לפתח בעצמו מערכת ייעודית, שתהיה זולה יותר או בעלת ביצועים מתאימים יותר לארגון מאשר מערכת מוכנה.

### 3.4 תתי-התמחויות מקצועיות חוצות דיסיפלינות

כפי שתואר בסעיף 3.1, לרבים ממקצועות ההנדסה, קיימות תתי-התמחויות שהן חוצות דיסיפלינות; חלקן משותפות למספר מקצועות הנדסיים. חלק מתתי-התמחויות אלה נלמד ביחידות האם, כמו תת-התמחות של 'מנהור', הנלמד בהנדסה אזרחית. חלקן נלמדות במחלקות ייעודיות ונפרדות, כמו 'הנדסת גורמי אנוש', הנלמדת בדרך כלל בפקולטות לתעשייה וניהול, אך נדרשת לכל מקצועות ההנדסה באשר הם. כל המהנדסים צריכים להכיר נושאים אלו בעוד שההתמקצעות בהם, לרבות שליטה מיטבית ביישומם, נרכשת בדרך כלל מתוך ניסיון במהלך עבודתם של המהנדסים. המשותף לתתי-התמחויות אלו הוא שהן תומכות בתכן ומלוות את המתכננים בשלבי תכן שונים כדי לסייע להם לקבל החלטות המתחשבות בידע המקצועי הכלול בהן. להלן מספר התמחויות מקצועיות נפוצות שהן חוצות דיסיפלינות:

**אנליזה:** מהנדסי אנליזות מתמחים בשימוש בקודים ממוחשבים לסימולציות כדוגמת חוזק, זרימה ומעבר חום התומכות בהחלטות המתכננים. המתכננים בוחנים את תוצאות האנליזה ומתוך הכרת מגבלותיה, מחליטים על הצורך בהפעלת שיטות נוספות לתמיכה באמינות התכן.

**בטיחות:** מהנדסי בטיחות מתכננים את מרכיבי הבטיחות. כתוצאה מהבדלים בין המערכות ובאופן השימוש בהן, נדרשים המהנדסים לערוך התאמה מיטבית לכל

מקרה ומקרה. מכאן חופש הפעולה שלהם להחליט אילו שיטות מתאימות יותר לדרישות הבטיחות הספציפיות למקרה.

**אמינות:** מהנדסי אמינות בוחנים את האמינות של המערכת המתוכננת ומציעים למתכננים דרכים כדי לבססה. מהנדסי האמינות "חיים" את הערוץ המניעתי בתוך ואת המודעות לגורמי כשל. הם שולטים בכלים להערכת האמינות ובכלים לבנייתה.

**ניסויים:** ניסויים משמשים למגוון מטרות הנדסיות. לדוגמה: צמצום פערי ידע, תיקוף אנליזות נומריות, שלילת קיומם של גורמי כשל חבויים, ולבניית אמינות המערכת. על מהנדסי הניסוי להגדיר את מערכת הניסוי, את צורת הפעלתה, את מהלך הניסוי ואת השיטות לביתוח התוצאות. המומחיות שלהם בהבנת מגבלות מערכות הניסוי ותנאי הניסוי אמורים לאפשר להם לקבל החלטות מתאימות למטרות הניסוי.

**גורמי אנוש:** כמעט לכל מערכת יש ממשק אנושי כלשהו, בין אם מדובר במפעיל המערכת ובין אם מדובר במתחזק שלה. מהנדסי גורמי אנוש מתמחים בהבנת היכולות והמגבלות ההכרתיות, התת-הכרתיות, הפיזיות והפיזיולוגיות של האדם. מידע זה מאפשר למתכנני המערכת להתחשב בהיבטים אלה בתוך.

**תנאי סביבה:** כל מערכת פועלת בסביבה המפעילה עליה עומסים, שעלולים להוציא אותה מכשירותה. מהנדסי סביבה מתמחים בהבנה של העומסים שיכולה הסביבה להפעיל, כמו תנאי סביבה: תנאים מכניים, תרמיים, כימיים וכיוצא באלה, תרגום שלהם למונחים טכניים ברמת המערכת, הגדרת מבחני סביבה שאמורים לייצג את תנאי הסביבה, ועריכת ניסויי דימוי סביבה הבוחנים את עמידות המערכות בתנאים הנדרשים. מידע זה חשוב למתכננים בכל שלבי התכן ובמיוחד בבחינת אבי טיפוס לאישור התכן.

**בדיקות לא-הורסות:** מהנדסים לבדיקות לא-הורסות (Non Destructive Testing - NDT) מסייעים בבדיקת חומרים ובניתוח כשלים בחומר ובמבנה ומיעצים למתכננים לשלב שיטות לא-הורסות בתהליכי התכן, הייצור והתחזוקה.

**ניטור:** מהנדסי ניטור מתמחים בשיטות עדכניות לניטור בריאות מערכות ופוטנציאל כשל המערכות. ההיכרות שלהם עם היכולות ועם המגבלות של המערכות מאפשרות למתכננים להחליט על אופן השילוב המיטבי של הניטור בהשוואה לחלופות הנוספות לתכן המערכתי (מקדמי ביטחון, תחזוקה וכיוצא באלה).

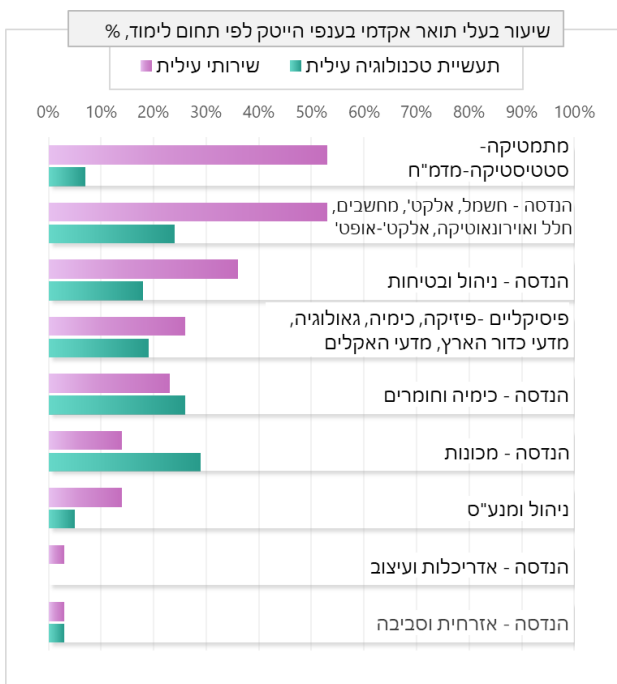
**מדידות:** מהנדסי ביקורת מתמחים במערכות מדידה, ביכולות ובמגבלות שלהן. הם מסייעים למהנדסי התכן לוודא שניתן יהיה לאמת את עמידת הייצור בדרישות התכן ומסייעים למהנדסי הייצור לפקח על הייצור ולעקוב אחר סחיפה אפשרית בייצור. למשל, הסחה הולכת וגדלה עם הזמן של מאפייני הרכיבים ביחס למרכז הטולרנס כאשר מדובר בייצור סדרתי, ועל אף היות הערך "הנסחף" בתחום הטולרנס המותר.

**איכות:** ההתמחות של מהנדסי איכות כוללת שליטה בכלי איכות ובאופן יישומם. מהנדסי איכות מסייעים לשילוב היבטי איכות בתכן באמצעות הנחייה לעריכת סקרים, בקרת תצורה, תיעוד העשייה ההנדסית וכדומה. מהנדסי איכות מסייעים למהנדסי ייצור לשמר ואף לשפר את איכות המוצר באמצעות ניהול בקרת תצורה, ניטור איכות מוצר ותהליכים, באמצעות ביצוע ביקורות ומבדקים לעמידה בתקני איכות. רבים מהכלים להגברת האיכות אינם מורכבים ללמידה וליישום, ולכן, במקומות רבים עוברים מהמהנדסים עצמם הכשרה לשימוש בכלים אלו. זו אחת הסיבות לכך שהבטחת איכות היא יוצאת דופן ביחס לתתי-ההתמחויות האחרות. טבעי יותר שהמהנדסים המתכננים יהיו האחראים לאיכות של תוצרתם, אבל הם בהחלט יכולים להסתייע במימוש אחריותם לאיכות במהנדסי איכות.

**הנדסת מערכת:** מהנדסי המערכות עוסקים בתכן-העל של מערכות, משלב גיבוש הקונספט המערכתי, דרך גיבוש הארכיטקטורה המערכתית, גיבוש וביצוע האינטגרציה המערכתית וכלה בגיבוש וביישום ניסויים מערכתיים. מהנדסי מערכות מנהלים את כל המאמץ ההנדסי בתכן המערכת.

### 3.5 תפקידי המהנדס בחתך תעסוקתי

מהנדסים יכולים לזהות את עצמם גם על פי משרתם. משרד העבודה של ארצות הברית (U.S. Department of Labor) מפרסם רשימה של משרות נפוצות למהנדסים במקצועות ההנדסה המגוונים (Occupational Outlook Handbook). חלוקה מעט אחרת מוצגת על ידי הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה של ממשלת ישראל, בסיווג האחד של משלוחי היד (1994, 2011). דוגמה לכך בתעשיית הטכנולוגיה העילית High-Tech ובשירותי העילית מוצגת באיור 3.1.



**איור 3.1** – שיעור בעלי תואר אקדמי הנדסי בענפי הייטק לפי תחום לימוד (עיבוד של צוות מוסד נאמן לנתונים במחקר של בנטל ופלד, מעובד מקובץ נתונים שנבנה בשנת 2016, ממקורות בלמ"ס, על ילידי 1978-1985, לפי בקשת הכלכלן הראשי במשרד האוצר).

שמותיהם של משלחי היד עשויים להיות זהים לשמה של ההכשרה ההנדסית הספציפית שקיבלו המהנדסים במוסד האקדמי שבו למדו (מהנדסי חשמל, מהנדסי בניין), עם המערכת שהם מתכננים (מהנדסי מערכות מיזוג אוויר, מהנדסי קרקע), עם השלב בחיי המערכת שעליה הם אחראים (מהנדסי קונסטרוקציה, מהנדסי ייצור, מהנדסי ביצוע/הקמה), עם תת-ההתמחות ההנדסית שלהם (מהנדסי ניטור, מהנדסי הבטחת איכות, מהנדסי אמינות), ולפעמים אף אחד מאלו (מהנדסי מוצר).

### 3.6 היררכיה הנדסית

המיומנות הבסיסית של מהנדסים היא תכנון רכיבי מערכת, כדוגמת קורה או מעגל חשמלי. בתכן רכיבים נדרשים המהנדסים להבין את התפקיד של הרכיב שעליהם לכוון. כאשר מדובר ברכיבים פשוטים, לרוב לא יידרשו המתכננים לממשקים רבים עם מהנדסים נוספים וגם לא יזדקקו לכלי פיתוח מיוחדים.

עם זאת, מערכת מורכבת מצריכה תפישת היררכיה הנדסית והתנהלות נכונה בתוכה. המיומנות הגבוהה ביותר של מהנדסים מהיבט זה היא ניהול תכן ופיתוח של מערכת מורכבת, המצריכה ארגון של מהנדסים רבים בעלי התמחויות ותתי-התמחויות שונות כמו גם תזמון ביניהם. מדובר במהנדסים שהם מנהלי פרויקט או במהנדסי מערכת (כאשר התכן מורכב ונדרש לפצל את הניהול). בעבר, היו מרבית המנהלים מהנדסים (Christensen et al., 2019, p. 3). בתווך בין תכן רכיבים לבין הנדסת מערכת קיים רצף משימות שניתן לתארו באמצעות היררכיה הנדסית, המבטאת גם את ההיררכיה של האופטימיזציה. אומנם היררכיה זו עשויה להכיל גם היררכיה ניהולית, אך בראש וראשונה זוהי היררכיה הנדסית המצריכה קבלת החלטות ברמות שונות של התכן. ככל שהחלטות מתקבלות בדרג גבוה יותר, כך השפעתן, לטוב או לרע, רבה יותר. בכל ההיררכיות מבצעים המהנדסים משימות השייכות למהנדס התכן.

לסיכום הפרק, הכלים והתהליכים ההנדסיים המתוארים כאן מהווים את המכנה המשותף לכל המהנדסים בכל אחד מהצירים שעל פיהם מוגדרת עשייתם של המהנדסים. לכל התפקידים הרבים והמגוונים של המהנדסים משותף הצורך לקבל החלטות. מכיוון שהחלטות הן דבר מורכב ולאור העובדה שעשויות להיות להן השלכות לא רצויות, מתבצעת קבלת החלטות במעגל סגור, הנסגר באמצעות תחושת האחריות והנשיאה בתוצאות. תחושת האחריות והכרה בקיומה אמורה לעודד את מקבלי החלטות לנקוט בזירות המתבקשת בכל מקרה ומקרה. אחריות היא האמצעי של החברה לסגור את מעגל קבלת החלטות לשם שמירה על החברה. האחריות היא המשלים של קבלת החלטות במונח שמי שנמצא בתפקיד של קבלת החלטות, נושא באחריות לתוצאות הנגרמות מהחלטותיו או מהימנעות מהחלטות שבתחום סמכותו. לכן לא נכון לפטור אותו מאחריות אם קיבל החלטה שגויה או שנמנע מלקבל החלטה כאשר הדבר נדרש.

תיאור מעניין של האחריות האישית של המתכננים בעבודתם מוצג בספרם של Budynas and Nisbett (2011, Sec. 1-5, 1-8). בין החובות של מקבלי החלטות אפשר למצוא את המחויבות לפעול על פי כללי האתיקה המקצועית, הארגונית והאנושית, לנהל יומן של קבלת החלטות המתאר את השיקולים בבסיס ההחלטה, לייצר סביבה שבה מתקיימת תקשורת יעילה עם עמיתים ועם גורמים נוספים, לערוך ניסויים מוקפדים ולתת דגש על אבטחת איכות ראויה. הכותבים מציעים שהמתכנן יבחן באופן קפדני את ההבטחות של אנשי מכירות מתוך ראייה שכל הדרישות יחדיו משיתות אחריות על המתכננים שלא לתכנן מוצר אם הוא אינו



מקצועי דיו לכך. היבטים דומים של התנהלות אישית מוזכרים על ידי Whirthel (1994) בהקשר של גורמים לכשלים מכניים. אגדה עממית מספרת שהדרך להבטיח התנהגות אתית (אחראית) של מתכנני גשרים היא דרישה מהם לשבת מתחת לגשר שתכננו כאשר הרכבת עוברת עליו בפעם הראשונה. האחריות לנזק הנגרם ממוצר תוך שימוש בו שהוגדר כתקין על ידי המתכננים מעוגנת בחוק בארה"ב. הרחבה נוספת על היבטי אחריות מובאת בפרק 7 בהמשך.

## 4. כשלים בהנדסה: גורמים ושיטות למניעתם

הצורך לכונן יכולת הוא מרכז עשייתם של המהנדסים. עשייה זו מתחלקת לשני ערוצים עיקריים: ערוץ בונה וערוץ מונע. בערוץ הבונה עוסקים המהנדסים בביצוע משימות לכינון היכולת הנדרשת הכוללות הצפת רעיונות, ביצוע אנליזה, חיזוי התנהגות המערכת בכל מצבי העבודה, ניסויים להשלמת מידע וכדומה. בערוץ המונע, מתמקדים המהנדסים באיתור הגורמים שיכולים להכשיל את משימתם ובשלילת התרחשותם. אפשר לראות בערוץ הבונה את ה"עשה טוב", ובערוץ המונע את ה"סור מרע", המשלימים זה את זה למניעת כשלים ולהגשמת הצלחה כאחד.

אחת הסיבות לצורך להבחין בין שני הערוצים, הבונה והמונע, היא הקושי לפעול בשניהם בו-זמנית. כאשר פועלים בערוץ אחד, נמצא השני ברקע, ולהיפך. הערוץ המונע מתמקד בחיפוש טעויות, בגדר "אם טעיתי – היכן טעיתי?", חיפוש שנעשה אומנם במהלך התכנון, אך לא באופן שיטתי. כפי שמסביר (Pitt, 2009, p. 878), קיימת א-סימטריה מובנית בין שני התהליכים. הנטייה הטבעית, המקבלת עידוד בהכשרתם הפורמאלית של מרבית המהנדסים, היא להתמקד בערוץ הבונה מבלי לחדד את חשיבותו של הערוץ המונע וללא תרגול שלו.

האירוע המרכזי שמנסה הערוץ המונע למנוע הוא כשל (failure) שמוגדר כאירוע שבו התוצאה המיוחלת לא הושגה. זוהי "החטאה" של המטרה. כפי שהוצג לעיל, המטרה של המהנדס היא לעמוד בדרישות התכן, אשר כאמור מתחלקות לשתיים: האחת, יצירת מתכון (תכן) והשנייה, תכן של התכן – "מטה-הנדסה". המטרה הראשונה של המהנדסים היא להכין מתכון שמכונן יכולת בהתאם לדרישות לתכן הכוללות, בין היתר, היבטים של אמינות, בטיחות ועלות. המטרה השנייה של המהנדסים היא לנהל תהליך תכן באופן יעיל, אשר ייתן מענה גם לדרישות הנוספות מהתכן כמו עמידה בל"ז ובעלות. כשל מערכת הוא החטאה של כינון יכולת, וכשל פרויקט הוא החטאה בניצול המיטבי של המשאבים שהועמדו לצורך ביצוע התכן. אלו שני התחומים שבהם מחליטים המהנדסים.

הפרק הנוכחי, פרק 4, מוקדש לסקירה תמציתית של היבטים המרכיבים את הערוץ המונע, תוך התמקדות בהיבטים הייחודיים לעשייתם של המהנדסים, המבדילים אותם משותפיהם לעבודה, המדענים והמנהלים.

## 4.1. כשל מערכת

כשל מערכת הוא מצב שבו המערכת לא ביצעה את תפקידה כאשר נדרשה לכך, באופן מלא או באופן חלקי. תפקיד זה יכול להיות "בונה" במובן של "עשה טוב" או "מונע" במובן של "סור מרע". לדוגמה, בערוץ הבונה בתכן מכונית נמצאת המשימה של כינון יכולת להסיע נוסעים ולהביאם ליעד. הערוץ המונע בתכן מכונית הוא לשמור על בטיחות הנוסעים ולא לפגוע בהולכי רגל. הערוץ הבונה בתכן מכונן למימוש היכולת שבגללה נדרשה המערכת מלכתחילה, ומבחינה כמותית, מספר הזרכים להצליח קטן בדרך כלל ממספר הזרכים שבהן יכולה המערכת להיכשל, ואותן צריך לזהות מבעוד מועד הערוץ המונע.

כחלק מתפקידם של המהנדסים לכונן יכולת כפי שהתחייבו לכך, עליהם לפעול למניעת כשלים. עליהם לוודא שבכל מצבי הפעולה האפשריים של המערכת, היא תהייה חופשית מכשלים. המציאות מגלה שמישהו זו אינה פשוטה, ואכן, מידי פעם אנו עדים לכשלים שהמתכננים לא מנעו מראש.

מערכת חופשית מכשלים היא מערכת אמינה, שניתן לסמוך עליה. כשל חבוי או נגלה מעיד על טעות של המתכננים, שכן הכוונה הראשונית של כל מתכננים באשר הם היא לתכנן מערכת אמינה (אלא אם כן הוסכם עם המזמין על התרחשות מופעי כשל מסוימים). אם כשלה המערכת כאשר הופעלה בתנאים שבהם לא נועדה לפעול או אם כשלה בגיל הגבוה מזה שהתחייבו עליו המתכננים, לא מדובר בכשל שלהם. אם כן, נשאלת השאלה כיצד קורה שאוסף מהנדסים משכילים, מלומדים, מנוסים וחזורי-מטרה לתכנון מערכת חפה מכשלים, יוצרים מערכת שיש בה כשלים.

הכשלים שעלולים להתרחש הם רבים ומגוונים. מנקודת מבטם של המשתמשים, לא כל הכשלים הם בעלי דרגת חומרה זהה. כך למשל, כשל של שרוך נעליים של אצן בתחרות אולימפית חמור בהרבה מכשל דומה בנעלי מי שעובד במשרד, ולא כל הכשלים מפורסמים כמו הכשל של התרסקות מעבורת חלל. למרות הנטייה הטבעית לזהות כשל עם נזק, גם אירוע ללא נזק יכול להיות מוגדר ככשל. גם אם התרחש אירוע בניגוד לציפיות המהנדסים, ולא נגרם כל נזק, מדובר בכשל מנקודת ראותם של המהנדסים. אומנם אין זה כשל המערכת אך כשל ביכולת הנדסית. עם זאת, יש לזכור שהפרקטיקה הנדסית אינה דורשת חיסון כנגד כל סוגי הכשלים, ולא תמיד נדרשת מערכת בעלת אמינות פעולה מושלמת.

מכיוון שהפעלת הערוץ המונע דורשת משאבים, רצוי להבין את היבטי הכשל מנקודת ראותם של המשתמשים במערכת. אחת החלוקות הנוחות לדרגות חומרה של כשלים מובאת במדריך לניתוח חומרת אופני כשל בגישת FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Analysis) (ראה סעיף 4.4.3), המציע ארבע דרגות חומרה לכשלים:

- כשל קטסטרופלי (Catastrophic) – כשל שעלול לגרום לאובדן חיי אדם או לאובדן מערכת בעלת משמעות גבוהה מבחינה אסטרטגית;
- כשל קריטי (Critical) – כשל שעלול לגרום לפגיעה משמעותית באנשים, לפגיעה גדולה ברכוש, או לפגיעה במערכות שעלולה להוביל לכשל או לביטול משימה;
- כשל בינוני (Marginal) – כשל שעלול להוביל לפגיעה של אנשים, לפגיעה בציוד, לפגיעה מסוימת במבצעות המערכת או באיכות המשימה;
- כשל משני (Minor) – כשל שאינו גורם לפגיעה באדם או ברכוש אך יגרום לפגיעה נסבלת בביצועי המערכת, לדחייה מסוימת בביצוע משימה או לשינוי בתוכנית התחזוקה.

דירוג זה של חומרת הכשל הפוטנציאלי מהווה שיקול מסייע למהנדסים בהחלטה על כמות המשאבים שכדאי להשקיע בשלילת קיומו של הכשל הנבחן. האתגר הוא בעצם זיהוי הכשלים ובהערכת חומרתם, או לחלופין, בשלילת קיומם.

על המתכננים לאזן בין שתי פונקציות מנוגדות. מצד אחד, למרבית הכשלים מתלווה אובדן משאבים, ולכן כדאי למנוע את התרחשותם. מצד שני, למניעת הכשלים מראש נדרשים משאבים לא מעטים, שאינם זניחים. לכן, לא כדאי להשקיע משאבים רבים במניעת כשלים שאינם חמורים, אשר ניתן לתקנם במהלך התכן או אפילו לאחר הפעלת המערכת, ומנגד, לא נכון להימנע מהשקעת משאבים במניעת כשלים חמורים ובשלילת קיומם. מסיבות אלה, יש לאזן בין עלות אי-איכות לבין עלות תכן מוקפד החף מכשלים.

אם שתי הפונקציות, עלות תיקון נזקי הכשלים ועלות מניעתם, היו מלכתחילה מונחות לפני המתכננים בניסוח המתמטי שלהן, היה למהנדסים קל לזהות את המקרים שבהם עדיף לנקוט בדרך אחת, במקרים בהם כדאי לנקוט בדרך אחרת, ובאילו מקרים רצוי לאזן את השילוב ביניהן. האתגר הוא לאזן ביניהן מבלי להכיר את הפונקציות באופן מפורש. הרי המתכננים אינם יודעים מהי עלותם של כשלים

חבויים וגם לא את עלות הזיהוי המוקדם שלהם. הקושי שלהם הוא לדעת מראש, על "שולחן השרטוטים", שאכן לא חבויים בתכן כשלים בלתי נסבלים. זוהי מקצועיותם של מהנדסים שאינה נלמדת באופן פורמלי בהכשרת מהנדסים.

ישנו יתרון בחשיפת הכשלים החבויים בשלב המוקדם ביותר האפשרי, בשאיפה בסמוך מאוד לנקודות ההחלטה שבה הוכנסו שלא במודע לתכן. את אופן זיהוי מופעי הכשל של מערכת ניתן לסווג לשלוש קבוצות עיקריות:

- אי תפקוד המערכת המזוהה לפני גמר פיתוח;
- תפקוד לקוי של מערכת המזוהה בשלבי הוכחת התכן;
- תפקוד לקוי או חוסר תפקוד מוחלט של המערכת המזוהה רק בעת הפעלתה בתנאי אמת.

הקושי שבזיהוי כשלים בשלבי תכן מוקדמים מתואר על ידי (Verderaiame 1992) והוא מהווה את אחת המשימות החשובות בניתוח אופני הכשל. החשיבה בערוץ המונע לזיהוי כשלים היא סוג של "הנדסה הפוכה" (reverse engineering), המצריכה יכולות השונות במידה מסוימת מהיכולות הדרושות לביצוע הערוץ הבונה (Pitt, 2009, p. 876).

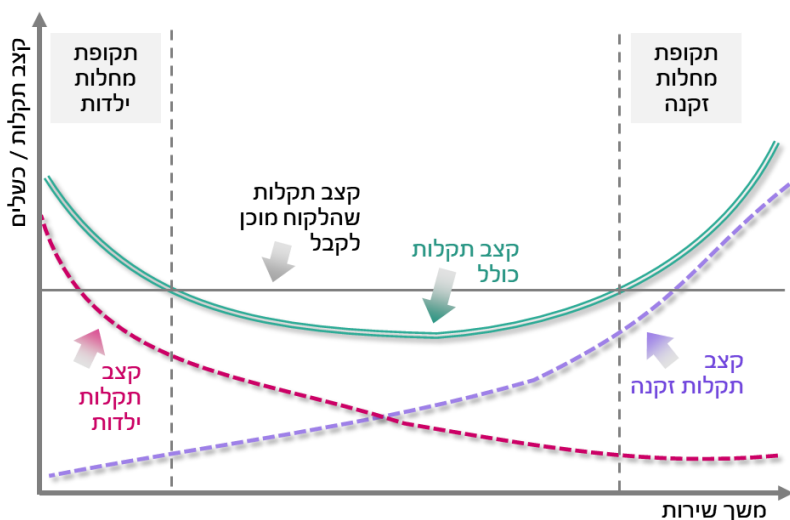
תהליכי תכן, המהווים חלק מהידע ההנדסי, בנויים באופן המניח שיייתכנו כשלים חבויים בתכן, ולכן כוללים שלבים שאמורים להציף אותם עוד לפני גמר התכן. לדוגמה: ניתוח אופני כשל וסימולציית מצבים. זהו הערוץ המונע אשר אמור למנוע את התרחשות כשלים משני הסוגים הראשונים שהוצגו לעיל.

כשל מהסוג השלישי, תפקוד לקוי או העדר תפקוד, הוא הכשל המסוכן יותר מכיוון שהמשתמש מתבסס על מידע שגוי כאילו המערכת היא אמינה. מניעת כשל מסוג זה היא המוטיבציה להערכה קפדנית של אמינות התכן, הגם שבמקרים לא מעטים גם כשל זה יכול להיות נסבל.

עדות למוכנות לקבל כשל מהסוג השלישי, של מערכת אמיתית שכשלה בזמן הפעלתה, הוא "גרף האמבטיה" (bathtub curve), המתאר את צורת התפלגות קצב התקלות של מערכת כתלות במשך פעולתה מיום הפעלתה, כמתואר באיור 4.1. הציר האופקי מייצג את גיל המערכת, והציר האנכי מייצג את קצב התקלות. צדו השמאלי של העקום (הרציף) מתאר מערכת חדשה שבה קצב התקלות הוא גבוה יחסית, אולי אף מעל לקצב שהמזמין מוכן לקבל. תקלות אלו מכונות "תקלות ילדות" הנובעות מטעויות תכן, מתקלות בייצור בדגמים ראשונים, ואף מחוסר ניסיון

בהפעלת המערכת. מעורבותם של המתכננים בשלב זה אמורה להפחית את מספר התקלות באמצעות עדכוני תכן, הוראות הפעלה וייצור, עד להפחתת כמות התקלות אל התחום האמצעי של העקום, המתאר את קצב התקלות שאליו התייצבה המערכת, בשאיפה להגיע לקצב מזערי המקובל על המשתמש.

בצדו הימני של העקום ניכרת עלייה בקצב התקלות המשויכת למחלות "זקנה" של מערכות בגיל מתקדם. תקלות בתחום זה הן תוצאה של בלאי ושל התיישנות, אשר ביחד גורמות לשינויים במאפייני המערכת כתוצאה מתהליכים טבעיים במערכת. כך למשל, צמיגים של רכב מאבדים מתכונותיהם בעקבות שימוש, אך גם בעקבות הזמן החולף, גם אם לא נעשה בהם שימוש.



**איור 4.1** – תיאור סכמתי של קצב תקלות של מערכת בשירות, המורכב מקצב תקלות בסיסי של מערכת, אליו מתווספים קצבי תקלות כתוצאה ממחלות ילדות ומחלות זקנה, אשר ביחד יוצרים את "גרף האמבטיה" הטיפוסי.

תיאור מקובל זה של עקום האמבטיה משרה תחושה שאין מנוס מתכן מערכות בעלות מחלות ילדות ובעלות מחלות זקנה. האמת היא שאופיין זה של צורת אמבטיה מוכתב באופן מובהק על ידי התנהלותם של המתכננים. מגוון הפעולות שעושים המתכננים, או נמנעים מעשייתן, הגורמות לכשלים, מוצעים על ידי Dhillon (2006, p. 24) בחלוקה לשלושת האזורים שבאיור 4.1. כך למשל, מתכננים שמקפידים על הוכחת התכן ועל ניתוח אופני כשל עשויים לספק מערכת עם מעט

מחלות ילדות עד כדי היעדרן המוחלט. מנגד, המתכננים יכולים שלא להגיב נכון למחלות ילדות באמצעות תיקון התכן, וכך קצב התקלות במערכת לא ירד לקצב תקלות סביר. בדומה לכך, מחלות זקנה הן תוצאה של הערכה לא נכונה של קצב התיישנות המערכת המובילה להצהרה שגויה של המתכנן על משך חיי המערכת. לכן, מודל האמבטיה הוא אומנם מודל טיפוסי, אך אינו המודל הבלעדי לתיאור כשלים.

גרף האמבטיה מדגיש גם את האמור לעיל בנוגע למיצוי הערוץ המונע למניעת כשלים. כשהמהנדסים אינם ממצים בתכן את הערוץ המונע, הם גורמים לקצב תקלות ראשוני הגבוה מזה שעליו אמורה להתייבב המערכת.

היבט נוסף שממחיש גרף האמבטיה הוא מגבלת ההתייחסות לאמינות המערכת באמצעות קצב תקלות. קצב תקלות הוא ערך ממוצע המתקבל בנייתוח הסתברותי אשר אינו בהכרח בעל משמעות לכל מערכת. יישום הגישה של קצב תקלות למערכות יחידות מסוגן, כמו בנין וגשר, או למערכות שצריכות לפעול בפעם הראשונה באמינות גבוהה, כמו ליון, אשר אינן טולרנטיות לתקלות, אינו יעיל ובמקרים רבים גם לא מועיל.

הבחנה נוספת שניתן לעשות בין סוגי כשלים היא בין כשל הנוצר מנזק (flaw, defect, imperfection) שהתפתח באופן רציף (drift failure) לבין כשל "משברי" המתרחש באופן פתאומי. כשל משברי מעביר באופן מידי את המערכת ממצב תקין ללא תקין (fault). בעוד שנזק המתפתח בהדרגתיות עשוי להיות לא מורגש, בעודו מכרסם במקדם הביטחון או פוגע בביצועים באופן הדרגתי, עד שהוא מגיע לסף ביצועים המוגדר ככשל. כך, למשל, שחיקת צמיגים גורמת לפגיעה באחיזתם בכביש רטוב באופן רציף. רק כאשר השחיקה מגיעה לערך סף, ניתן לומר שהצמיג ייכשל. כשלים מסוג זה מציבים אתגר בפני המתכננים להכריע מהו ערכו של ערך הסף שיגדיר את הכשל.

דוגמה לכשל משברי הוא היווצרות סדק במיכל מנוע רקטי או אובדן בלמים במכונית. פעמים רבות הנזק המשברי נגרם כתוצאה מהתפתחות של נזק המתקדם באופן רציף, כמו אובדן נוזל בלמים הנגרם בגלל דליפה איטית, אך המופע שלו, העדר לחץ, הוא משברי, מכיוון שאינו מזוהה לפני התרחשות הכשל הביצועי. חשיבות ההבחנה בין שני סוגי הכשל נעוצה ביכולת תאורטית לנטר את ההידרדרות בתפקוד המערכת במקרה של נזק המתפתח באופן רציף ולהתריע על קרבה לכשל משברי.

## 4.2. כשל פרויקט

כשלי מערכת שנדונו בסעיף 4.1 לעיל יכולים גם להכשיל פרויקט. עם זאת, פרויקט יכול להיכשל גם מבלי שתיכשל המערכת שתוכננה במסגרתו, ולכן מוקדש לכשל זה דיון נפרד בסעיף זה. פרויקט הוא מסגרת שבה מנוהלים המאמץ ההנדסי והמאמץ הלא-הנדסי כאחד. למען נוחות הדיון, נגדיר ש"פרויקט" הוא מאמץ הנדסי בכל רמה היררכית של תכן. תכן מכונית הוא פרויקט, כמו גם תכן המנוע למכונית זו וגם תכן המשאבה למנוע.

המתכננים לוקחים על עצמם לתכנן מערכת שתכונן יכולת תחת אילוצים של לוח זמנים ומשאבים המוגדרים במסמך דרישות לתכן לצד דרישות נוספות. אי עמידה באחת מדרישות הלקוח או יותר, מבלי שהלקוח הסכים לכך בשלב כלשהו של הפרויקט, הוא כשל פרויקטלי בדרגה מסוימת.

כדוגמה לכשל פרויקט מביא Ferguson (1993, p. 188) את תחנת החלל Freedom אשר בפיתוחה הושקעו משאבים רבים, אך לבסוף המימוש שלה נגזז. אך גם אם הפרויקט הושלם, עדיין אין בכך בהכרח עדות להצלחה פרויקטלית. דוגמה לכך היא פיתוח מטוס F-35 שעלותו חרגה משמעותית מהעלות הראשונית שהוקצבה להשלמתו בתחילת הפרויקט, התארכה בלמעלה משבע שנים, ולאחר הפעלתה נדרשו תיקוני תכן רבים. אוסף חריגות אלו נחשב לכשל משתי סיבות. הסיבה הראשונה, משום שהמהנדסים, ביחד עם מנהלי הפרויקט, לא עמדו בהבטחותיהם. הסיבה השנייה היא בגלל האפשרות שאם בנקודת ההחלטה להשקת הפרויקט, היו מקבלי ההחלטות יודעים באופן מדויק יותר את העלות, את הביצועים ואת לוח הזמנים, ייתכן שהיו מקבלים החלטה אחרת המתאימה יותר לצרכים.

כל אחד מהמערבים בפרויקט יכול להכשילו. הכשלים שהוצגו לעיל אינם מצביעים בהכרח על כשל של המתכנן, ויכולים לנבוע מהערכה שגויה של עלות הפרויקט מלכתחילה (אשר צריכה להתבצע בבדיקת היתכנות), ואף משיקולים זרים של רצון להשיק את הפרויקט. גורמים מסוג זה מרומזים בעבודתם של Munns and Bjeirmi (1996), המנתחים את המתח שבין מנהלי פרויקט למהנדסים, על הרקע של קריטריוני הצלחה שונים.

חוקרים רבים ביקשו להתחקות אחר הגורמים לכשל פרויקטים. רשימת הגורמים המתקבלת מסיכום מחקרים אלו, כדוגמת (Nelson, Munns and Bjeirmi, 2007), ושל (Alias et Al. (2014), כוללת שורה של סיבות, המסודרות להלן על פי סדר יורד של תרומה לכשל או של המידה שבה נפוצה הסיבה לכשל: מטרות



פרויקט לא מוגדרות היטב, שינוי מטרת במהלך הפרויקט, חלוקה עמומה של מטלות הפרויקט, תכנון לקוי של הפרויקט, תקשורת לקויה בין הגורמים בפרויקט, חוסר מחויבות ההנהלה, לוח זמנים ותקציב לא ריאליים, ניהול שגוי של סיכונים, קושי לראות את הפרויקט בשלמותו, חוסר מקצועיות (איוש שגוי), תמיכה ארגונית שאינה מספקת, הנהגת פרויקט שאינה תואמת, מוטיבציה נמוכה, הדרכה חלקית וחסרה וחוסר אמון בין המעורבים. את מרבית הכשלים מייחס Nelson ל-36 "טעויות קלאסיות" של מנהלים שתיאר (1996, Ch. 3) McConnell כבעלות "ניחוח של פיתוי":

"After studying the infamous failures described above, it becomes apparent that failure is seldom a result of chance. Instead, it is rooted in one, or a series of, misstep(s) by project managers. As McConnell suggests, we tend to make some mistakes more often than others. In some cases, these mistakes have a seductive appeal" (Nelson, 2007, p. 70).

במאה ה-21 יש להזכיר את ההצלחה ואת הכישלון של חברות הזנק (start-ups) כמשפחה של פרויקטים. הסטטיסטיקה אומרת שכ-90% מחברות אלו נכשלות לבסוף (Patel, 2015). אחת הטענות היא שחברות הזנק מפתחות מוצרים שאיש לא צריך, או שאין כמות מספקת של אנשים המעוניינים לרכוש אותם, טענה שיכולה להסביר רק חלק מהכישלונות (Griffith, 2014). באופן טבעי, יוזמות חברות הזנק מוצרים וטכנולוגיות עם סיכונים רבים, ולכן אין פלא שחלק גדול מהמיזמים אינם עולים יפה. עם זאת, למיזמים המעטים שמצליחים יש השפעה ניכרת על התפתחות התעשייה, הכלכלה, הסיביה הטכנולוגית והעולם העסקי ואף על כיווני התפתחות החברה (society).

לסיכום, כל המחקרים מצביעים על ריבוי גורמים לכשלי פרויקט. נדיר למצוא שרק אחת מהסיבות לבדה תכשיל פרויקט. ובאמת, כנראה שאין אף פרויקט מוצלח שחף לחלוטין מגורמי כשל אלו. אומנם בין הגורמים יש כאלו הנמצאים באחריות המהנדסים, אך מאוסף הגורמים מובן שגם אם למהנדס עשויה להיות תרומה לכשל, הוא אינו התורם הבלעדי לו ובמקרים רבים אף לא העיקרי. עם זאת, תהליכי תכנון הנדסי, המהווים את ה"מטה-הנדסה" שבמסורת הנדסית, אמורים לעקור מהשורש, תרתי-משמע, את הגורמים לכשל פרויקט.

## 4.3. היררכיה של גורמי כשל וגורמי שורש

בתפישת העולם הסיבתית שבה מתחוללת העשייה ההנדסית, אירוע הכשל אינו מתרחש מעצמו. כפי שמובא בציטוט של Nelson (2007) לעיל, הכשלים אינם תוצאה של מקרה, ולכן ידיעת החוקיות מאפשרת לחזותם מראש הן ברמת המערכת והן ברמת הפרויקט. שכן, הגרעין לכשל נזרע זמן רב לפני התרחשותו, אשר מתפתח לכשל בשרשרת **סיבתית** של תהליכים. לכן, בתחום של כשל מערכות, מקפידים ארגונים רבים לחקור תאונות ותקלות ואף להנגיש את מסקנות התחקירים לעובדי הארגון. עם זאת, גם במקרים שבהם חוקרים את הסיבות לכשל, מסתיימים תחקירים רבים באיתור הגורם לכשל שאינו באמת השורש לכשל, גם אם הוא מכונה כך.

הגורם הישיר לכשל הוא החוליה הטכנולוגית שהביאה לכך שהמערכת פסקה מלבצע את תפקידה באופן מיידי. אין ספק, כי זיהוי הגורם הישיר לכשל עשוי להיות משימה מורכבת מאוד המצריכה ידע רב ומשאבים ניכרים ולא רק משום שהמערכת הנחקרת נפגמה או אף הושמדה. דוגמאות לתחקירים כאלו ניתן למצוא בספריהם של (1994) Witherell ושל (2005) Ramachandran et al.

ידוע שאם הלקח הנלמד מכשל נוגע רק לגורם הישיר לכשל, הרי שהלקח הנלמד הוא חלקי בלבד (DOE, 1992). היות שמדובר בשרשרת תהליכים סיבתית, חשוב למנוע את היווצרות הגורם לכשל כבר מהיווצרותו, משורשו. בהקשר זה חשובה התובנה שלכל כשל ישנם **שני שורשים**: האחד שורש טכנולוגי (engineering) (forensics) והשני שורש לא טכנולוגי שהוא חברתי/תרבותי (social forensics).

נקח לדוגמה את הכשל במעבורת החלל "קולומביה". הגורם הישיר להתפרקותה בכניסה לאטמוספירה הוא עומס-יתר על המבנה. עומס יתר זה התפתח בשרשרת ארוכה של תהליכים סיבתיים, דרך חימום הכנף והפגיעה של הקצף בכנף. סיבת השורש הטכנולוגית הייתה הדבקה לא מספקת של הקצף, שהשתנתה בעקבות האיסור של השימוש בפראון. באופן דומה הגורם הישיר להתרסקות צ'לנג'ר היה התפוצצות מיכל הדלק וסיבת השורש הטכנולוגית היא קרע באטם הגומי.

כאשר בחקירת כשל מסתפקים במציאת גורם השורש הטכנולוגי, מאבדים את ההזדמנות לזהות את הגורמים העמוקים יותר שהובילו להיווצרות הכשל. יתירה מזו, כשעוצרים את חקירת שרשרת הכשל בגורם הטכנולוגי, נוצרת תחושה כאילו מדובר בכוח עליון, ולכן לכאורה, לא ניתן היה למנוע את הכשל. במקרה של מעבורות חלל, לאחר הכשל של צ'לנג'ר, אכן נלמד הלקח הטכנולוגי, ולא התרסקו

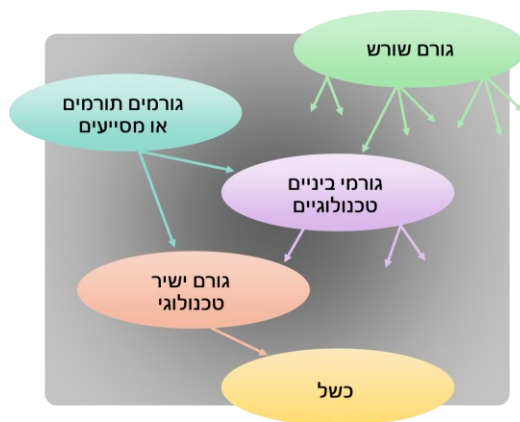
מעבורות נוספות בשל אותו האטם. אולם, כעבור תשע עשרה שנה התרסקה המעבורת "קולומביה". הפעם, לא בשל אטם גומי אלא בשל קצף. בראיה סיבתית של התהליכים, עולה השאלה: מדוע הצליחו המהנדסים למנוע כשל כתוצאה מגומי, אך לא מנעו כשל כתוצאה מהתנתקות הקצף? מענה לשאלה זו חורג מהתחום הטכנולוגי ועשוי לדרוש דיון בהיבטים הכוללים גם התנהגות אנושית ותרבות ארגונית, כפי שאכן נעשה על ידי צוות החקירה של התרסקות "קולומביה" (NASA, 2003). צוות החקירה הקדיש כשמונים עמודים לדיווח על החקירה למציאת השורש הטכנולוגי ועוד כמה עמודים לחקירה למציאת השורש הלא-טכנולוגי, הנעוץ במקרה זה בתרבות הארגונית. יתירה מזו, הוועדה מצאה שלשתי התאונות, זו של ה"צ'לנג'ר" וזו של "קולומביה", היה גורם שורש משותף אחד, שאינו טכנולוגי, אלא קשור בתרבות הארגונית של נאס"א (NASA, 2003; Hall, 2003). ממצא זה מדגיש את החשיבות של השורש שאינו טכנולוגי ואת החיסרון שבעצירת החקירה של כשלים בשורש טכנולוגי.

עדות נוספת לנזק שבעצירת החקירה בשורש הטכנולוגי הוא התרסקות הגששית של נאס"א על המאדים. חקר הכשל של ההתרסקות הוביל לסיבת שורש שנוסחה באופן ברור:

"The MCO MIB has determined that the root cause for the loss of the MCO spacecraft was the failure to use metric units in the coding of a ground software file" (Stephenson et al., 1999, p. 16).

אי ההתאמה בשימוש ביחידות מידה אינה כוח עליון הנכפה על המהנדסים ועל מנהלי הפרויקט. תהליכים הנדסיים תקינים אמורים לסנן טעויות כאלה. אפשר לשער שעצירת החקר בגורם שורש טכנולוגי מבלי למצות את השורש האנושי לכשל (Pitt, 2009) הובילה למסקנות ולהמלצות מובנות מאליהן, ובכך לא מנעה כשלים שהתרחשו במערכות אחרות של נאס"א שנבעו משורש זה עצמו, התרבות הארגונית.

סיבת השורש הלא-טכנולוגית לכשל היא החלטה, או אי-החלטה של מקבלי ההחלטות. בדרך כלל, החלטה מתניעה תהליך סיבתי של תהליכים המובילים, דרך גורמי ביניים, להתרחשות הגורם הישיר לכשל. תהליך זה מתואר סכימטית באיור 4.2. באיור רואים שניתן מקום לגורם נוסף שאינו חלק מאותה שרשרת סיבתית, אך נוכחותו תורמת להתרחשות הכשל או מזמנת אותו. זהו מעין קטליזטור לקיום השרשרת. לחץ-זמן או חוסר זמינות של ספרות מקצועית, למשל, הם כשלעצמם אינם הסיבה לכשל וגם לא חלק מהשרשרת הסיבתית, אך תורמים להתרחשותה.



**איור 4.2** – תיאור עקרוני של שרשרת סיבתית של תהליכים החל בגורם שורש (החלטה) ועד לגורם הישיר לכשל שהוא גורם טכנולוגי. ככל שההיררכיה של הגורם גבוהה יותר, כך עשויות להיות לו יותר השפעות (מבוסס על קרפ, 2020).

לסיכום, במדרג ההיררכי של הגורמים לכשלים, עומדות במקום העליון החלטות שגויות של מקבלי החלטות: הן החלטות הנוגעות למאפייני המתכנן והן החלטות הנוגעות לאופן קידום התכנון שלו. במבט נוסף באיור 4.2 ניתן להבחין שהחלטות שאינן מכוונות נגרמות גם הן מהגורם שמעליהן. הרשימה שלהלן מרכזת את גורמי השורש העיקריים לקבלת החלטות שגויות שעלולות להוביל לכשל. הרשימה מבוססת בעיקרה על הצעתם של (Witherell, 1994, p. 12) של Fortune and Peters (1995) בפרק "גישות להבנת כשלים", ושל (Walton, 1991), והיא כוללת מספר היבטים נוספים, ואלה הם:

**טעות** (בספרים נכתב error אך נכון יותר לכנותה mistake): טעות היא כל החלטה לעשיית דבר שאינו מוביל לתוצאה הרצויה. גם הימנעות מעשייה ראויה היא טעות. טעויות הן מנת חלקו של כל אדם ונובעות מסיבות שונות כגון היסח דעת, שכחה ואי-ידיעה.

**גישה מוטעית** (wrong attitude): עבודת המתכננים נשענת על גישות לחיים ולהנדסה. דוגמה לגישה מוטעית לחיים היא היחס לחיי אדם. דוגמאות לגישות מוטעות בהנדסה הן היחס לעבודת צוות, האחריות שיש למתכננים לתחזוקת המערכת שהם מתכננים וחשיבותם של מזמיני התכנון.

**אמונות שגויות** (incorrect beliefs): למרות שמתכננים מתבססים לכאורה על ידע מדעי, מרכיב ניכר מעבודתם נשען על אמונות. למשל, האמונה שאליה התייחסו

חוקרי התרסקות "קולומביה" שעל פיה, מהנדסים רבים מאמינים שחקר תקלה ברמה הטכנית שלה ימנע את הישנותה (NASA, 2003, p. 97).

**אי הבנה קונצפטואלית** (conceptual misunderstanding): למרות שרבות מההחלטות שמקבל המתכנן נשענות על ידע מדעי, בחלקן הן נשענות על עקרונות. דוגמה לעיקרון זה היא המחשבה השגויה שאת אי-הדיוק של מדידה אפשר לדעת רק לאחר ביצוע המדידה ובהסתמך על הפיזור בתוצאות.

**ביטחון שאינו במקומו** (misplaced confidence): ביטחון שאינו במקומו מכונה פעמים רבות בטעות "ביטחון מופרז" ושורשו בגאווה (pride). אחד מביטויי הגאווה הוא חוסר ההבחנה בין מה שהאדם חושב שהוא יודע לבין מה שהוא יודע באמת. קושי זה להגדיר את הידע ולהזדות בגבולותיו הוא סממן של חוסר גרות ומוביל לכשלים. לאחר שמתכננים הצליחו בתכן של מערכת אחת, הם עלולים לחוש ביטחון-יתר גם בנוגע לתכן מערכת אחרת, השונה במשהו מהמערכת שבה רכשו את ביטחונם. ביטחון זה עלול למנוע מהם את הזהירות המתבקשת במניעת כשלים, ובכך עלול להוביל לכשל.

**סדרי עדיפויות שגויים** (scrambled priorities): פעולת תכנון כוללת תהליכים מקבילים וטוריים. מקבול שלהם ומתן עדיפות בקידומם נשען על זיהוי נכון של סדרי עדיפויות, ברמה שהיא מעל לרמה שבה פועלים המתכננים. לפעמים זו רמה ארגונית או חברתית. כך למשל, הבנת סדרי עדיפויות בין הדרישות השונות לתכן משפיעה על אופי הפשרות שצריכים המתכננים לעשות. לדוגמה, האיזון בין איכות ואמינות לבין עלות המערכת ולמשך הפיתוח.

**תקשורת לקויה** (defective communication): מכיוון שנדירה המציאות שבה משלימים המתכננים את משימת התכן בעצמם, עליהם לתקשר עם גורמים רבים בסביבתם, כמו מהנדסים ועמיתים, מנהל הפרויקט, המשתמש, המזמין, היצרן ומנהלי ניסוי. הבנה שגויה או הבנה לא מלאה של המסרים תוביל לכשל. כך אבד רכב המאדים הראשון בגישתו אל הכוכב.

**עומס יתר או הצפה במידע** (overload or information saturation): עומס יתר מגביר את הסבירות להתרחשות תקלות בכל המנגנונים האפשריים. בתנאים של עומס יתר קל יותר לטעות, ליצור תקשורת לקויה, להתעלם ממידע חיוני, לחוש ביטחון במקום שאינו ראוי וכיוצא באלה.

**בורות** (ignorance): התעלמות מעובדה חשובה או מהיבט חשוב של הבעיה יכולים לנבוע מבורות, מחוסר ריכוז, מעומס יתר, מאי הבנת חשיבות הדבר, מגאווה, או מאי הכרתו מלכתחילה.

**אי-וודאויות** (uncertainty): מכיוון שאי וודאויות הן בלתי נמנעות, האתגר הוא בהערכתן הנכונה ובזיהוי השפעתן. תהליך זה של הערכת העוצמה שבאי-וודאות אינו מובנה עדיין בלימודי המדע, וקיים קושי בהערכתו. לכן, הערכת חסר של אי-וודאות עלולה להוביל לכשל. כך גם הערכת יתר יכולה להוביל לכשל מסוג אחר.

**אי בהירות בחלוקת תפקידים** (confusion of roles and assignments): גורם מובן מאליו שמביא לחוסר תיאום, לביצוע פעילויות על ידי גורם שאינו מתאים, או לפעילויות שלא נעשות בכלל, מה שנקרא "נפילה בין הכיסאות".

**תפישת מציאות** (perception of reality): לימודי הנדסה כוללים תיאור של חוקי הפיזיקה ואופן יישומם. אחד האתגרים של סטודנט, ובהמשך גם של מתכנן, הוא לבצע התאמה בין התיאוריה שנלמדה לבין המציאות שבה הוא מתכנן. אומנם במסגרת לימודי הנדסה מתרגלים מיומנות זו, אך היא אינה מאוגדת בנוסחאות, ומורכבת וקשה ללמידה. מי שלא תופש את המציאות נכון יקבל החלטות שיובילו לטעויות. המחשה לתפישת מציאות שגויה בהקשר הנדסי מובאת על ידי Johnson (1998). הדבר מתרחש למשל, בעת בחירת תנאי שפה לא מתאימים בחישוב השפעת עומסים על מבנה, מכיוון שהמציאות בהכרח שונה מתנאי השפה האידיאליים הנלמדים בכיתה.

**הערכה לא מספקת של סיכויים וסיכונים** (incorrect chance estimation): כחלק מניהול המאמץ הנדסי, נדרשים המתכננים, במיוחד בהיררכיה הגבוהה יותר של פרויקט, להעריך סיכונים ולקדם את הפרויקט בהתאם להם. הערכה זו של סיכונים חשובה לטעויות רבות. כפי שמוסבר על ידי Zeckhauser and Viscusi (1990), מקבלי החלטות נוטלים סיכונים מוגזמים במיוחד כאשר ההחלטות משפיעות על אנשים אחרים. גם ההערכה אינטואיטיבית של הסתברויות חשובה לטעויות.

#### 4.4. למידה מניסיון אישי ומניסיון ארגוני

אחת המוסכמות בהכשרת מהנדסים היא שלא ניתן להקנות לבוגרי הנדסה את כל הידע והמיומנויות שלהם יידרשו בעבודתם. מלבד היותה אבחנה פשוטה, מוסכמה זו מבוססת על יכולתו של האדם ללמוד גם מניסיונם של אחרים וגם מניסיונו שלו, והיא מהווה את הבסיס ללמידה לאורך החיים (LLL-Life Long Learning). מוסכמה

זו מחייבת את המהנדסים למצות את יכולותיהם ללמוד באפקטיביות תוך נקיטת הזהירות הנדרשת לאור האפשרות הקיימת פעמים רבות ללמוד דבר לא נכון בשל מסקנות מוטעות.

הלמידה מטבעה כוללת מרכיב מודע (מושכל ומפורש explicit knowledge) ומרכיב מובלע (experiential, tacit). כך למשל, עיקר הלמידה המושכלת מתרחשת על ספסל הלימודים, עיון במספרים ובמאמרים, ובניתוח כשלים. הלמידה המובלעת מתרחשת עם הניסיון, הן בהצלחות והן בכישלונות. עם זאת, קיימת חוסר סימטריה בין למידה מהצלחות לבין למידה מכישלונות.

הצלחה בונה ביטחון בעשייה ואינה מצביעה דווקא על ידע מסוים שנרכש באמצעותה. כשל, לעומת זאת, מאפשר ללמוד דבר מה חדש, אם הוא מתווכר נכון. לכן נהוג לומר, שמכשל לומדים יותר מאשר מהצלחה. את ההבדל בין למידה מהצלחה לבין למידה מכשל אפשר להמחיש באמצעות הניתוח של Starbuck and Milliken (1988) את המהלכים שקדמו להתרסקות מעבורת "צ'לנג'ר". הם הראו שהתרסקות "צ'לנג'ר" לימדה את המהנדסים ואת המנהלים לקח שלא למדו מ-24 טיסות מוצלחות קודמות של מספר מעבורות, הגם שיכלו לעשות כן (כפי שאכן חשדו בתפקוד אטם הגומי שחקירתו לא הושלמה). אומנם גם בניתוח כשל אפשר להגיע למסקנות שגויות, אך הלמידה מהצלחות יותר חשופה להטיות מלמידה מכישלונות, כפי שהוסבר על ידי Tversky and Kahneman (1974) ובמחקרי המשך רבים בכלכלה ובמדעי ההתנהגות.

למרות שלמידה מכשלים היא ברורה וחשובה, איש אינו יוזם כשל במכוון, וכולם רוצים להימנע מכשלים. עם זאת, לא ניתן להימנע מכשלים באופן מוחלט. מעידה על כך האמרה "לטעות זה אנושי" ועל משקל זה כתב Petroski (1992) ספר בשם "להנדס זה אנושי", המדגיש את היות הטעויות חלק מהעשייה ההנדסית. הטענה שלא ניתן להימנע מכשלים ועצם קיום כשלים הכרוכים בנזקים קטנים או זניחים יחסית (כמבואר לעיל בסעיף 4.1), משמשת לפעמים כהכשר לכשל או למיעוט בהפניית משאבים לחשיבה טרם העשייה. האמירה ש"לא נורא שנכשלנו" אינה מורידה מערכו הלא רצוי של הכשל, אלא מדגישה את ההזדמנות ללמוד ולהיבנות ממנו, למידה שתהפוך את הכשל לגורם בונה. זהו אחד ממרכיבי הניסיון שבונה אצל המהנדסים במהלך הקריירה את הידע המקצועי שלהם, ולשם כך עליהם להיות פתוחים ללמידה זו ולשתף בה גם את עמיתיהם.

כדי לתרגם את הניסיון להצלחה, צריך להתקיים תהליך שלם של למידה, הפנמה ויישום הנלמד. בנוגע ללקח הטכנולוגי, הקושי בדרך כלל, מלבד עצם קיום חקירת

הכשל, הוא יישום הלקחים, אשר כרוך בהקצאת משאבים. בתחום הלא טכנולוגי, האישי והארגוני (social forensics), ישנם גורמים נוספים המעכבים הן את עצם החקירה למציאת השורש והן את היישום של תוצאותיה. כך למשל, אם נמנעים מחקירת תהליכי קבלת החלטות, גורמים לניתוק בין תהליכי קבלת החלטות לבין האחריות להן, ניתוק שאינו בריא אישית וארגונית.

המנגנון הראשון המעכב למידה מכשל הוא עצם ההודאה בו. אם האירוע לא נתפש ככשל, הוא לא יילמד לעומקו, אם בכלל. מצב זה נפוץ במיוחד כאשר הגדרת הכשל אינה חד-משמעית, כמו במקרה של פרויקטים. מנגנון אי ההודאה בכשל, המעכב את הלמידה, מוליך למנגנון השני הקשור לאחריות להחלטות ולמעשים.

מנגנון זה של השאיפה שלא לשאת באחריות לטעויות הוא בין הנפוצים לכך שתחקירי תקלות ותאונות לא נערכים לעומקם, עד לשורש האמיתי שלהם, כמוסבר בסעיף 4.3 לעיל. עצירת התחקיר לכשל בשורש הטכנולוגי מביכה פחות את הנוגעים בדבר מהגעה אל השורש הלא טכנולוגי, הכולל התנהגות אישית ותרבות ארגונית. בתנאים אלו מחפשים פתרון טכנולוגי לכשל במקום תיקון ארגוני.

כדי למצות היטב את התהליך לאיתור גורם השורש לכשל, הן בתחום הטכנולוגי והן בתחום החברתי, דרוש ידע וגם חופש מדעות קדומות. הראיה לכך היא הקושי המתמשך לאתר את הגורמים לכשל פרויקטים, למרות שכשל פרויקטים היא תופעה המתרחשת כבר עשרות שנים, וכרוכה, כמובן, בהפסדים ובאובדן משאבים גדולים. ייתכן שהסיבה התורמת להתמשכות התופעה היא העובדה שחקר הכשל לא מתבצע על ידי מי שמאבד משאבים אלו, דהיינו הציבור עצמו.

לסיכום, הלמידה מהניסיון האישי ומהניסיון הארגוני, שבמידה רבה מבוססים על הבנת גורמי כשל, היא הזדמנות להשתפר. לטעות זה אנושי, אך לטעות שוב ושוב ולחזור על אותה הטעות הוא על גבול הנסבל. עם השנים פותחו בהנדסה תהליכי תכן וכלי תכן, שחלקם הגדול מאוגד בידי הנדסי תחת הכותרת "הנדסת מערכת", כאמצעי להתגבר הן על גורמי כשל טכנולוגיים והן על גורמי כשל אישיים-ארגוניים. כך למשל, ביצוע תכן על פי שלבים מוגדרים וביצוע ניתוח אופני כשל נועדו לשפר הן את אמינות התכן והן את היעילות שלו (דוגמה לריכוז כלים מובאת על ידי Goldberg et al., 1994).



## 4.5. פערי ידע ואי-וודאויות

פערי ידע ואי-וודאויות הם מאפיינים טיפוסיים של סביבת עבודת המתכננים, והם בין הגורמים שיכולים להוביל לכשל. לרוב, לא ניתן להימנע מהם, ואין גם הכרח שהם אכן יובילו לכשל.

מהנדסים המתחייבים לפונן מערכת נדרשים לחזות את התנהגותה בכל מצבי הפעולה עוד לפני ייצורה ולחזות גם את השינויים שיתרחשו במהלך השימוש בה ולאורך זמן. חיזוי זה מאפשר למהנדסים להתחייב על תפקוד נכון של המערכת ועל העדר כשל בה. יכולת החיזוי נשענת על ידע, והוא זה המאפשר את קבלת ההחלטות בתכן. אומנם, מרבית תהליכי התכן מתבססים גם על ידע אינטואיטיבי-חוויתי, של קשר סיבתי בין דבר לדבר, אך השאיפה הטרווייאלית, וההכרחית במרבית מצבי התכן המודרני, היא לבצע תכן רציונלי שהוא מבוסס-ידע.

הידיעה של חוקיות הטבע מאפשרת למתכננים לחזות את ביצועי המערכת מתוך הכרת המאפיינים שלה, קשר הניתן לייצוג עקרוני באמצעות הביטוי

$$(4.1) \quad P = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

כאשר  $P$  הם הביצועים (performance) שצריכים המתכננים לכוון באמצעות מערכת ו-  $x_i$  הם מאפייני המערכת. ביצועי המערכת יכולים להיות ספיקת מים נדרשת, דחף מנוע נדרש, או עילוי כנף. ביטוי (4.1) מדגים את הערוץ הבונה בתכן רציונלי. אופן השפעת מאפייני המערכת על היכולת מיוצגת על ידי הפונקציה  $f$ , והכרתה מאפשרת למתכננים לבחור את השילוב המתאים של מאפיינים, כך שיושג יעד הביצועים המזערי  $P_{min}$ . בכך, ההחלטה על ערכי מאפייני המערכת  $x_i$ , שהיא מהותו של התכן, הופכת להיות רציונלית.

במציאות, הביטוי (4.1) מורכב יותר, וכולל גם את פגמי הייצור שעל קיומם מתפשרים המתכננים,  $y_i$ , וגם את השפעת תנאי הסביבה על המערכת,  $w_i$ . ההכללה של הביטוי (4.1) תהייה לכן:

$$(4.2) \quad P = f(x_1, x_2, \dots, x_i, y_1, y_2, \dots, y_j, w_1, w_2, \dots, w_k)$$

כאשר:

$x_i$  – מאפייני המערכת הדרושים להשגת הביצועים  $P$ .

$y_i$  – מאפייני פגמי ייצור במערכת המשפיעים על השגת הביצועים  $P$ .

$w_i$  – מאפייני תנאי סביבה שבהם תפעל המערכת המשפיעים על השגת הביצועים  $P$ .

ביטוי (4.1) מדגיש את ההיבט המדעי של הבנת פעולת המערכת וביטוי (4.2) מבהיר את ההיבט ההנדסי, של קבלת החלטות במרחב שאינו "סטריילי". שני הביטויים מדגישים את הרעיון שהתכן, במקרים רבים, מתחיל בתכן אינטואיטיבי שבמסגרתו ניתנת למערכת צורה ראשונית. שכן, לפני שקיימת תצורה ראשונית כלשהי, לא ניתן להתייחס למאפייני המערכת  $x_i$  ולא קיים הקשר (4.2).

למרות ההתקדמות הרבה ביצע האנושי המאפשר את הקדמה הטכנולוגית שלהם, לנו עדיין, לעולם אין למתכננים ידיעה שלמה. תפישת המציאות שלהם, הכוללת הן את הקשרים הסיבתיים והן את המצב עצמו, היא תמיד מוגבלת. אלו הם פערי ידע ואי-וודאויות אשר עלולים לפגום ביכולת לחזות את התנהגות המערכת, ובכך לסכן את אמינות התכן.

המשותף לאי-וודאויות ולפערי ידע הוא ששניהם מתארים מצב של ידע חלקי. שניהם מקשים על המתכננים לחזות בוודאות את התנהגות המערכת המתוכננת. ההבחנה ביניהם אינה חדה, ופעמים רבות גם אינה חשובה. נציע הבדל ביניהם, שאמור להקל על האיתור ועל הניהול שלהם.

אי-וודאות היא בדרך כלל ידיעה לא שלמה של ערכו של מאפיין של המציאות, וגודלה המזערי הוא אי הדיוק במדידה או בחישוב. ככל שהמדידה מדויקת יותר, כך אי הוודאות קטנה יותר.

פער ידע הוא מושג רחב יותר המתייחס במיוחד לתופעות. אי הכרת תופעה שיכולה להתרחש במציאות הוא פער ידע. דוגמה לפער ידע הוא כאשר המתכננים לא מכירים את התופעה של קורוזיה גלוונית. אם הם אינם יודעים מהו קצב התרחשות הקורוזיה, כתוצאה מתנאי סביבה משתנים בעלי אופי אקראי, הרי שזוהי תופעה של אי-וודאות.

ביטוי (4.2) ממחיש את מקורם האפשרי של כלל פערי הידע בתכן הרציונלי והם כוללים: שלמות רשימת כל מאפייני המערכת  $x_i$  הרלוונטיים לביצועים  $P$ , שלמות רשימת תנאי הסביבה הרלוונטיים ושלמות רשימת פגמי הייצור האפשריים. אי וודאויות הן על כל אחד מהמשתנים המוזכרים וגם אופן השפעתם על היכולת המגולמת בפונקציה  $f$ . כך למשל, בגלל הצורה המיוחדת של המערכת עשוי להיות הבדל בין הפונקציה  $f$  הידועה ברמה המדעית, לבין אותה פונקציה הספציפית למערכת המתוכננת. אפילו עריכת ניסוי למציאת הפונקציה לא תצמצם לחלוטין את אי-הוודאויות בגלל תנאי הניסוי ואי הדיוקים שלו.

סקירה של פערי ידע ואי וודאויות בלתי נמנעים בתכן מוצגת על ידי Nikolaidis (2005) ובתכן מיכאני על ידי (Budynas and Nisbett, 2011, Sec. 1-10). הרשימה כוללת אי-וודאויות בייצור וגם פערי ידע מדעיים או הנדסיים, המתארים למשל את אופן התפתחות השיתוך, את השפעת הטיפול התרמי ואת מידת התוקף של הכלים לתכן שבהם משתמשים המתכננים. לדעתם, המתכננים חייבים להתמודד עם אי-וודאויות ועם פערים אלו, כאשר הכלים שעומדים לרשותם הם מקדם ביטחון דטרמיניסטי וכלים הסתברותיים. המקורות לפערי ידע ולאי-וודאויות בתכן מערכות "יחידות מסוגן" (non-prototypical) בהנדסה אזרחית מתוארים על ידי Bulleit (2013). דוגמה מעניינת למקורות לפערי ידע מובאת בדרישות לתכן מבנה מעבורת החלל (NASA, 1972), הכוללת היבטי ייצור ותהליכי תכן. לכן, ההתנהלות הנכונה של המתכננים היא מודעות תמידית לקיומם של פערי ידע ושל אי-וודאויות.

אחד מהמקורות לפערי ידע ולאי-וודאויות נעוץ בטבעו האיטרטיבי של תהליך התכן עצמו. המתכננים מקדמים את התכן בכל שלב, מבלי לדעת את מלוא הפרטים על מרכיבי תכן מסוימים, שייקבעו רק בהמשך. לכן, נאלצים המתכננים לקבל החלטות כאשר לא הכול ידוע להם. כאשר הדברים מתבררים עם התקדמות התכן, עליהם לחזור לנקודות החלטה קודמות בתכן ולעדכן את פרטי התכן בהתאם. לכן, לצד המודעות לקיומם של פערי ידע נדרשת מהמהנדסים המיומנות של הבחנה בין פערים שהם תנאי להתקדמות בתכן (קבלת החלטות) לבין אלו שהצמצום שלהם יהפוך להכרחי רק בהמשך התכן. פערים אלו גם מדגימים את הצימוד שבין פערי ידע טכנולוגיים-מדעיים בהכנת המתכון לבין אופן קידום התכן – הפרויקט. כך למשל, ניהול לא שלם של פערים טכנולוגיים-מדעיים ברמת התכן מונע ממנהלי הפרויקט לקבל החלטות ראויות ברמה הפרויקטלית.

תכן רציונלי באמצעות הביטוי (4.2) בערוץ הבונה, יכול לשמש גם בערוץ המונע. מניעת כשל מבוססת על השאיפה שלא יתרחש מצב שבו העומס,  $S$ , גדול מהיכולת (או ההתנגדות),  $R$ . בהקבלה לביטוי (4.2), התנגדות המערכת נגזרת מהמאפיינים שלה וניתנת לייצוג עקרוני באמצעות הביטוי

$$(4.3) \quad R = g(x_1, x_2, \dots, x_i, y_1, y_2, \dots, y_j)$$

כאשר  $g$  היא הפונקציה המגדירה את הקשר בין מאפייני המערכת לבין היכולת שלה. בדומה לביטוי (4.2), גם כאן קיימים פערי ידע ואי-וודאויות.

בסעיף הבא, 4.6, נציג את שתי הגישות הנפוצות להתגברות על פערי הידע בערוץ המונע, תכן הסתברותי ותכן מבוסס מקדמי ביטחון. את הגישות המשלימות המתייחסות גם לערוץ הבונה נתאר בקצרה בסוף הפרק, בסעיף 4.7.

#### 4.6. תכן הסתברותי ותכן עם מקדמי ביטחון

קושי בהערכת התנגדות המערכת לשאת בעומס,  $R$ , והעומסים הפועלים עליה,  $S$ , מקשים על המתכננים לקבוע שהעומס יהיה תמיד קטן מההתנגדות של המערכת לכשל. במצב זה המתכננים לא יודעים האם המערכת שתכננו אמינה, גם אם היא בפועל אמינה. בסעיף הנוכחי נתאר בקצרה את שתי הדרכים המקובלות להתנהל בנוכחות פערי ידע ואי-וודאויות. נקדים ונציין ששתיהן אינן מבטלות את פערי הידע ואי-וודאויות אלא מפצות עליהן במידה מסוימת באמצעות ידע חליפי, כפי שמרמז על כך פרק 2 בספרם של Edwards and McKee (1991) שכותרתו *uncertainty*.

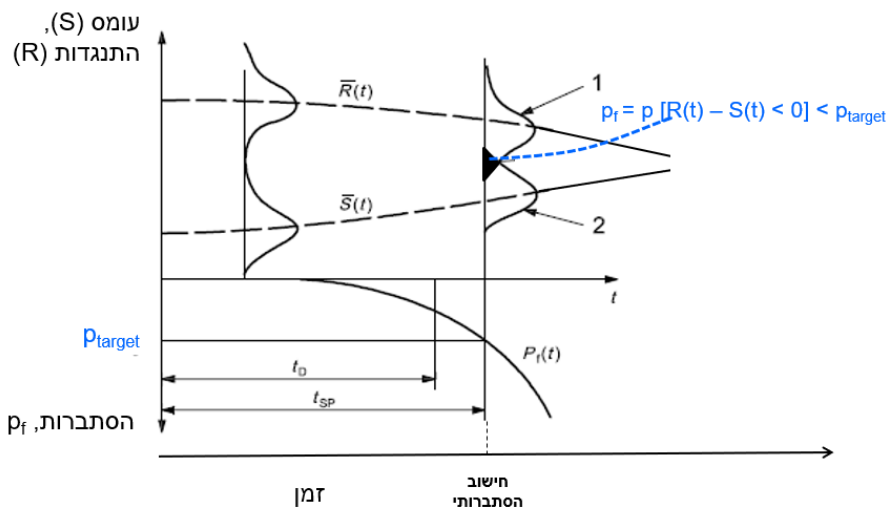
#### הגישה ההסתברותית

בגישה ההסתברותית מניחים שהעומסים הפועלים על המערכת והיכולת של המערכת לשאת עומסים אלו אינם ידועים במדויק, אך ניתנים לייצוג באמצעות פילוג סטטיסטי כלשהו. הפילוג הנורמלי הוא הנפוץ יותר, במידה רבה בזכות משפט הגבול המרכזי (CLT) שעל פיו צבר של גדלים משתנים בעלי פילוג כלשהו, מוביל להתנהגות אקראית על פי פילוג נורמלי (למשל Fischer, 2011). משפט זה נכון רק תחת מספר הנחות מגבילות שאינן מתקיימות בכל מערכת.

פילוג נורמלי של העומס,  $S(t)$ , ושל ההתנגדות,  $R(t)$ , מוצגים גרפית באיור 4.3 על ציר הזמן, המראה גם שהיכולת של המערכת יורדת עם הזמן, וכי העומס עליה גדל. השטח השחור באיור מייצג מצבי כשל שבהם העומס עולה על היכולת. ניתן לחשב שטח זה, שהוא ההסתברות לכשל, באמצעות הביטוי (Edwards and McKee, 1991, p. 131)

$$(4.4) \quad P_{failure} = \int_{C=-\infty}^{\infty} \left( \int_{L=C}^{\infty} f_L dL \right) f_C dC$$

השאיפה של המתכננים היא להקטין את ההסתברות לכשל, לערך הנמוך מהסיכון המרבי שמוכן המזמין לקבל,  $P_{failure} < P_{max}$ .



**איור 4.3** – תיאור סכמתי של השתנות פילוג העומס ושל השתנות פילוג ההתנגדות של המערכת כתלות בזמן וההסתברות לכשל של המערכת כתוצאה משינויים אלו. עיבוד מתוך General Principles of the Design of Structures for Durability, ISO - ISO 13823 International Standard, 13823

התנאי לביצוע חישוב בביטוי (4.4) הוא ידיעת פילוג העומס הפועל על המערכת והיכולת של המערכת להתנגד לעומס זה. הנחת פילוג נורמלי מאפשרת חישוב פשוט של ההסתברות לכשל באמצעות הממוצע וסטיית התקן של שני הפילוגים. לכן, מידת הסמך של ההסתברות לכשל המתקבל תלויה באמינות המידע על שני הפילוגים. בגישה זו על המתכנן לבחור פילוגים המובילים להסתברות לכשל הנדרש.

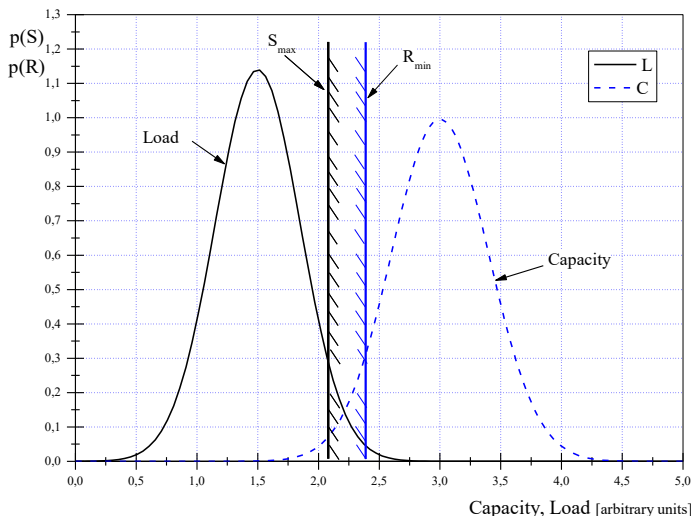
### הגישה הדטרמיניסטית

גישת התכן הדטרמיניסטי מתמודדת עם אי-וודאויות באמצעות חסמים על העומס המרבי,  $S_{max}$ , ועל ההתנגדות המזערית,  $R_{min}$ , כמתואר באיור 4.4. מקדם ביטחון,  $n$ , מוגדר על ידי היחס

$$(4.5) \quad n = R_{min} / S_{max}$$

ערכו המזערי של מקדם הביטחון נקבע משיקולים מגוונים, פעמים רבות כדרישה בתקן הנובעת מניסיון מצטבר. בהעדר ניסיון קודם, ערכו של מקדם הביטחון הראוי

מושפע מאי-וודאות בערכם של החסמים. אי-וודאות זו מושפעת הן ממגבלות הכרת המציאות וגם מכלי תכן המשמשים להערכת החסמים. ככל שאי הוודאות גדולה יותר, כך מקדמי הביטחון הנדרשים להשגת אמינות יהיו גדולים יותר. סקירה של התפתחות השימוש במקדמי ביטחון בראייה היסטורית אפשר למצוא למשל במאמרו של Beal (2011) ובמאמר כנס של Zipay et al. (2016).



**איור 4.4** – הצגה גרפית של הערכת חסמים של יכולת המערכת לשאת בעומס (התנגדות) ושל העומס הפועל עליה, המדגישה את ההבדל בין תכן סטטיסטי לתכן דטרמיניסטי.

כמעט תמיד אפשר לייצר חסמים מוחלטים ומוגזמים, אך הם עלולים להוביל למימוש מערכת שאינה יעילה, שלא לדבר על חוסר אפשרות לכונן את היכולת הנדרשת כלל. לכן, המאמץ של המתכנן הוא לייצר חסמים שאינם מוגזמים ועם זאת, כאלה שאפשר לסמוך עליהם.

למרות שמרבים להשוות בין שתי הגישות ואף לטעון להעדפת האחת על פני השנייה, הגישה ההסתברותית והגישה הדטרמיניסטית, אינן גישות חליפיות. שתי הגישות מדברות בשפה שונה מכיוון שהן מתייחסות להיבטים שונים של אמינות מערכת ונותנות מענה לגורמי כשל שונים.

## 4.7. מניעת כשלים להשגת יעילות ואמינות

הגישה ההסתברותית וגישת החסמים מאפשרות התנהלות מושכלת של המהנדסים בתנאים של אי-וודאויות. אך אי-וודאויות אינן הגורם היחיד שגורם להיווצרות כשלים חבויים בתכן. מכיוון שאף מהנדס או מהנדסת אינם יכולים לפטור את עצמם מכשל, אפילו לא בתואנה שלא ידעו דבר מה שהוביל אליו, ישנן שיטות מגוונות לשלילת קיומם של כשלים חבויים ולאימות אמינות המערכת המתוכננת. כל השיטות, באשר הן, מהוות דרך או כלי לקבלת החלטות, כך שבסופו של דבר יוכלו המתכננים להתחייב בלב שקט על כך שהמתכנן שהכינו עומד בדרישות, וכי הכנת המתכנן התנהלה בתהליך יעיל.

בסעיפים שלעיל נדונו היבטים שונים של כשל, כולל הגורמים להם ברמות היררכיות שונות. מובן שכדי למנוע כשל, רצוי לעצור אותו בשורשו. עם זאת, יש חשיבות לזהות את הכשלים החבויים ולמנוע אותם עוד לפני שמוסרים את המערכת ללקוח, גם אם הם לא זהו בשורשם. התהליכים המובאים להלן בקצרה מאפשרים למנוע את הכשלים ואף לחשוף את הגורמים החבויים המובילים לכשל בשלבים השונים של התכן. חשוב לציין, שלא קיימת שיטה אחת היעילה כנגד כל הכשלים, ולכן במערכות שבהן נדרשות אמינות ויעילות גבוהות, נוהגים להפעיל מספר שיטות ולא להסתפק בשיטה אחת ואף לא בשתיים.

### תקני תכן

שימוש בתקני תכן הוא אחת הדרכים להימנע מכשל. מדריכים רבים נבנו מתוך ניסיון שעל פיו גובשו המלצות למתכנן כיצד לתכנן, לרבות המלצות לאופן שימוש במקדמי ביטחון ובחירת ערכם. כמוכן, המשתמש בתקן חייב לוודא שהתקן שבו הוא עושה שימוש מתאים למערכת שהוא מתכנן ולכלי התכן שבהם הוא נעזר. כך למשל, מאפשרת ההתפתחות של כלי התכן להקטין את מקדמי הביטחון, עובדה שלא תמיד באה לידי ביטוי בתקן שאינו מפרש את הכלים שבהם נעשה שימוש.

### ניתוח אופני כשל

ניתוחי אופני כשל נועדו מלכתחילה לחשוף גורמי כשל חבויים בתכן. אלו הם היבטים שהמתכננים לא הכירו או היבטים שלא הקפידו לבחון. זו אחת הסיבות לכך שהניתוח מבוצע בצוות, כאשר המתכנן או המתכננת הם אחד מאנשי הצוות לצד מומחים מעולם התוכן של המערכת. ניתוחים אלו ניתנים להיעשות בדרגות

התעמקות והקפדה שונות בהתאם למערכת הנבחרת. לא ראוי לוותר על עריכת ניתוח כזה אפילו למערכות פשוטות, ניתוח שהמתכננים יכולים לבצע בעצמם בהשקעת מחשבה מועטה בלבד. מכל המתכננים מצופה לדעת מהי החולייה החלשה בתכן שלהם, אשר הזיהוי שלה מתאפשר בניתוח אופני כשל.

## סקרי תכן

כלי נוסף שנועד למנוע כשלים, במיוחד כשלים פרויקטליים, הם סקרי תכן (design review). סקרים אלו הם מפגשים הנערכים כאשר פרויקט התכן מגיע לאבני דרך חשובות ומוסכמות על הצדדים. בסקרים אלו מבוצע תהליך של תיאום ציפיות בין דורש כינון היכולת לבין המתכננים, המאפשר לדורש לכחור בין חלופות עקרוניות עם התקדמות התכן. בנוסף, נוכחות מומחים בלתי תלויים מאפשרת ביקורת נוספת לאיכות הפתרון המתהווה.

## ניתוח פערי ידע

כאשר מבוצע פיתוח הכולל פערי ידע, המבוסס על טכנולוגיות חדישות שלא הוכחו במערכות דומות, יש צורך לבצע ניתוח לפערי ידע. בניתוח זה מזוהים פערי הידע ואי-הוודאויות ומבצעים הערכה למידת השפעתם על היכולת לקבוע שלא יתרחש כשל.

## ניטור

כלי נוסף המסייע למנוע כשלים הנובעים מפערי ידע הם סוגים שונים של ניטור. בזכות המזעור והשכלול של מערכות מדידה ועיבוד הנתונים, מדידות שבעבר שימשו רק לניסויי פיתוח ממוכשרים ניתנות לביצוע כיום במערכות אמיתיות. מדידות אלו מאפשרות לנטר את מצבה ואת תפקודה התקין של המערכת במהלך פעולתה ובהתאם לצורך להתריע על התפתחות נזקים.

## ביטול ה"לא ידוע-לא ידוע"

אחת התופעות שעלולה להוביל לכשל היא כאשר המהנדסים לא הביאו תופעה מסוימת בחשבון, מכיוון שכלל לא הכירו אותה. במקרים כאלו, בדיעבד, כאשר מתרחש כשל, מכנים את התופעה "לא ידוע-לא ידוע". כלומר, המהנדסים לא ידעו



שאינם יודעים. יש מי שטוען שמצבים אלו פוטרים לכאורה את המהנדסים מאחריות לכשל שכן אי אפשר לדעת הכול. עם זאת, החברה (society) מצפה ממהנדסים שלא יהיו כשלים במערכות, ולכן אסור למהנדסים לנקוט בגישה זו של "לא ידוע-לא ידוע". זאת במיוחד לאור העובדה שהכלים של אומנות ההנדסה כיום מאפשרים למהנדסים למזער את האפשרות שיהיו כשלים שהעדר ידע הוא שורשם, עד כדי שלילת קיומם לגמרי.

ארבעה כלים עיקריים משמשים לשלילת קיום ה-"לא ידוע-לא ידוע": להיות מודע לכך שיייתכן שהמהנדסים לא יודעים נושא חשוב הקשור לתכן שהם מבצעים, לחפש באופן פעיל את קיומם של נושאים אלו, למשל, באמצעות ניתוחי אופני כשל (למשל, Carlson, 2012), לערוך ניסויים המאמתים העדר תופעות שלא נלקחו בחשבון ולערוך סקרי תכן על ידי עמיתים מנוסים. ככל שארבע הפעולות מתבצעות באופן מוקפד יותר, כך הסבירות להתרחשות כשל עקב ה-"לא ידוע" (וגם מסיבות נוספות) יורדת.

שאלה חשובה שעולה מידי פעם היא מה עושים כאשר לא ניתן לבצע ניסויים בקנה מידה אמיתי או בתנאים אמיתיים. אומנם סימולציות מהוות השלמה חשובה לתהליך התכן, אך גם בהן קיים אתגר של תיקוף, שמקובל לעשותו באמצעות ניסויים. דוגמאות לכך הם רכב לירח או מערכת מלאה להגנת העורף שבהם ניתן לבצע בחינה חלקית בלבד של המערכת או של תתי-המערכות. בתנאים אלו, בנוסף לסימולציות ולניסויים חלקיים, מבצעים פעולות משלימות כמו ניתוח פערי ידע וסקרי תכן מערכתיים על ידי עמיתים מנוסים. כמו כן, כותבים ובודקים דוחות פיתוח מוקפדים שבהם מסבירים המהנדסים מדוע לדעתם המערכת אכן תבצע את תפקידה. לבסוף, על המתכננים להבהיר למזמין המערכת שמכיוון שלא בוצע בה ניסוי מלא, ייתכן שיתרחש בה כשל בהפעלה הראשונה. בנוסף עליהם להצביע על המרכיב במערכת שהם הכי פחות בטוחים בו. זהו אחד ממרכיבי האתיקה ההנדסית.

הידע המצוי באומנות ההנדסה מסייע גם ליעילות פרויקטלית. כלומר, אומנות ההנדסה לא רק מסייעת ליצירת מתפון יעיל, אלא גם לניהול יעיל של הפרויקט המוביל למתכון זה. תהליך פיתוח מוסדר הוא תהליך מדרגי (היררכי), ומסייע למנהל התהליך לקבל החלטות שיובילו לניצול המרבי של משאבי הפרויקט. תהליך זה, עם התאמות לגופו של פרויקט, אמור לתת מענה למנגנוני הכשל שלו.

## 5. הכשרת מהנדסים: עבר ועתיד

עולם ההשכלה העל-תיכוני כפי שהוא מוכר לנו היום הוא תולדה של התפתחות היסטורית של שלושה מוסדות בלתי תלויים: האוניברסיטה, האקדמיה והפוליטכניקום. לשלושת סוגי המוסדות ישנם שורשים קדומים יותר בבתי ספר ערביים (madrasah), בבתי ספר ביוון וברומי, וכמובן בבתי מדרש של משה רבנו: "ולמדדמם אתם את פניכם", אך לצורך הדיון כאן לא נרחיק לכת עד לתקופה עתיקה זו. באמצעות סקירה ההיסטורית הקצרה של ההכשרה ההנדסית במאות האחרונות שנביא בפרק זה, נוכל להבין טוב יותר את מצב הכשרת המהנדסים כיום ולזהות כהלכה את הכיוון השינוי הרצוי להכשרת מהנדסים למאה ה-21.

### 5.1. הנדסה בתקופה שלפני המהפכה המדעית

יש המייחסים את ראשית ההנדסה לתקופת המהפכה התעשייתית הראשונה, שבה הומצא מנוע הקיטור על ידי Watt (למשל Samuel and Weir, 1999, p. 273). עם זאת, מקובל לראות את ראשית ההנדסה כבר לפני אלפי שנים (Ferguson, 1993, p. 60). ניתן בקלות להתרשם מרציפות המסורת ההנדסית מהתבוננות בשלושים המצאות, שחלקן הגדול הנדסיות, מתחילת ההיסטוריה האנושית, המוצגות על ידי Cropley (2019). בספרו סוקר Cropley את היצירתיות האנושית תוך תיאור מידת החדשנות של כל המצאה והמצאה, כגון הגרזן, מערכת הניקוז הסניטרית, הנייר, המטבעות ואף לוח השנה.

כל דור בנה התקנים ועזרים בהתבסס על הידע שקיבל מהדורות הקודמים, המכונה "מסורת" (legacy). כך שכעבור מספר דורות ההתקנים שעד לא מזמן קשה היה לחשוב על קיומם, הופכים למובנים מאליהם, ולפעמים, למרבה הצער, תוך זלזול בממציאים שלהם. ניקח לדוגמה את מערך המעליות כיום, הנחשב לבטוח עם מקרים נדירים בלבד של כשל חמור. כל המתבונן בפרטי התכן של המעליות עשוי לתהות על חשיבותם או להתפעל מעצם המחשבה עליהם. מעטים מודעים להיסטוריה הארוכה של כשלים במעליות, כפי שמשקפת במאמר שנכתב לפני כמאה שנים (Bolton, 1907), אשר הובילה בתהליך ארוך ואיטי לביסוס מסורת לתכן מעליות. עדות להתפתחות מסורת בתחום אבטחת האיכות אפשר למצוא בכתב עת זה במאמר מהפכני לתקופה ההיא, המתאר את השיקולים בביצוע ביקורת איכות קפדנית ובאופן התאמתה למוצר, כך שההשקעה תהיה כלכלית (Wilt, 1907). בחלוף הזמן, בהעדר הידע של הרקע ההיסטורי להתפתחותה, קל

לפקפק בנכונותה של מסורת זו, במיוחד בשל העלות הישירה הכרוכה בה ובשל הקושי לראות את תרומתה למניעת כשלים.

האדם ממציא ומתכנן מתקנים ועזרים משחרר ההיסטוריה. החל בהמצאת הגלגל, דרך הפירמידות וכלי הציוד, שיטות חקלאיות, בניינים וגשרים, וכיוצא באלה (Garrison, 1991). העשייה של בוני המתקנים הייתה פרי של תכנון מראש. ניתן לראות זאת, למשל, באחידות בזוויות שיפוע הפאות של הפירמידות. יש הרואים ב-Imhotep את המהנדס האזרחי הראשון אשר תכנן ובנה את פירמידת Step Pyramid של פרעה Djoser לפני כ-4,500 שנים. לא ידוע מי תכנן את מגדל בבל, אם כי ידוע שהלבנה שנאפתה בשמש הומצאה בבבל בערך באותה התקופה: "וַתְּהִי לָהֶם הַלְבֵנָה לְאֶבֶן וְהַחֲמֵר הָיָה לָהֶם לְחֵמֶר:" (בראשית יא, ג). בחוקי חמורבי ישנה עדות לעידוד עשייה מתוכננת ומכוננת: מי שתכנן ובנה בית שהתפרק וגרם נזק ליושבים בו מקבל עונש. בדומה לכך, גם לכניית תעלות המים להשקיה דאז קדם תכנון.

העובדה שתהליכי התכנון היו קיימים לפני שנים כה רבות אינה צריכה להפתיע איש. שימוש בכלים לשיפור תהליך איסוף המזון קיים גם אצל בעלי חיים, ואף הרעיון של בניית "בית", הוא רעיון שכיח בקרב מרבית הציפורים. ציפורים רבות, כמו הצופית (יונק דבש) למשל, בונות קנים משוכללים ביותר. הציפור "רחם" גם משתמשת באבן כדי לנפץ ביצי יען. עם זאת, האדם התעלה על בעלי החיים בתכן לא רק של בתים אלא גם כלי מלחמה, גשרים, ושעוני זמן (Hill, 1996).

הסדר הפורה הוא ראשית הציוויליזציה המוכרת לנו, במידה רבה בזכות יכולת התכנון של תושבי אזור זה. בניית כלי ניגון הצריכו תכנון: "וַיִּבֶל הוּא הָיָה אֶבֶן כָּל תַּפֵּשׁ כְּנֹר וְעֹגֵב:" (בראשית ד, כא), "וְלִפְנֵיהֶם נִבְּל וְתָף וְחָלִיל וְכְנֹר" (שמואל א, ה). גם המשכן שבנה בצלאל במדבר היה יצירת מופת אמנותית-הנדסית. היוונים תכננו מערך של מראות כדי לנטרל ספינות אויב המתקרבות לחוף. הגשרים ומוליכי המים שבנו הרומאים גם הם דוגמה טיפוסית לתכנון הנדסי מוקדם. הבליסטרות שתכננו הרומאים הפכה אותם למנצחים. המונגולים בתקופתו של ג'ינגיס-חאן לבשו חליפות עור מחוזקות פחי מתכת בצדן הפנימי. חליפות כאלו אינן יכולות להיווצר ללא תכנון הנדסי מוקדם. אין ספק שהמונגולים ידעו שכך יקנו ללבושיהם הגנה משופרת ויעילה יותר משריון האבירים שבאירופה.

דוגמאות אלו ממחישות, כי הידע ההנדסי והיישום שלו התפתחו הרבה לפני המהפכה התעשייתית והמהפכה המדעית. במשך הדורות, נלמדה אומנות ההנדסה והמיומנות לתכנן במסגרת המשפחה או בהדרכה אישית על ידי מלמד

מומחה, בדומה למקצועות אחרים. ההיסטוריה מגלה, כי עד למאה השמונה-עשרה קיבלו המהנדסים הכשרה הנדסית לא-פורמלית, מבלי ללמוד כלל בבית ספר כלשהו (Grayson, 1993, p. x). הם למדו באופן פרטני את המקצוע או רכשו אותו במהלך תעסוקתם כשוליה בארגונים כמו הצבא (Buchanan, 1983). במילים אחרות, ההכשרה האקדמית להנדסה, כפי שהיא מוכרת לנו היום, עוצבה רק במאה השנים האחרונות ובעיקר לאחר מלחמת העולם השנייה. בפרק זה נתאר בקווים כלליים את השלבים המרכזיים שהובילו למצב כיום, שבו האוניברסיטאות והמכללות הן אלו שאחראיות על הכשרת המהנדסים. התיאור של התפתחות ההכשרה ההנדסית המובא בפרק זה הוא תמציתי-סכמתי, והתאריכים המובאים בו הם לייחוס בלבד, שכן בספרות אפשר למצוא תאריכים שונים המיוחסים כביכול לאותו אירוע.

## 5.2. ראשית האוניברסיטה

האוניברסיטאות הראשונות הוקמו במאה ה-11 בבולוניה שבאיטליה, בפריז שבצרפת ובאוקספורד שבאנגליה (Rashdall, 1936; Channell, 2019). למרות היסטוריה ארוכה של כתשע מאות שנים, אי אפשר לומר שלאוניברסיטאות כיום קיימת מסורת כה ארוכה של מאות שנים. מיום שנוסדה האוניברסיטה הראשונה ועד לתחילת המאה ה-18 היו האוניברסיטאות בשליטתה של הכנסייה (Scott, 2006, p. 6). נציגי הכנסייה והממשל נשלחו ללמוד בהן נצרות, לוגיקה, גיאומטריה, רטוריקה, שפה, רפואה, משפט וחקלאות (Välilmaa, 2019). לימוד תנועת גרמי השמיים, האסטרונומיה, הנחשב כיום כמדע, היה חלק מלימודי דת ונועד לצרכיה (לוח שנה) ובהמשך גם לצורך ניווט בים ולחיפוי היבשות. הניסיון של Roger Beacon ללמד יצירת ידע באמצעות עריכת ניסויים במאה ה-13 הוביל למאסרו (Scott, 2006, p. 9).

תחילת שחרור האוניברסיטאות משליטתה של הכנסייה, שלוהו בתהליך חילון וכונה "חופש אקדמי", התרחש בתחילת המאה ה-18 (Scott, 2006, p. 8). על פי אנציקלופדיה בריטניקה, האוניברסיטה הראשונה שוויתרה על האורתודוקסיה הנוצרית, נוסדה בשנת 1694 ב-Halle בגרמניה, על ידי לותרנים מבית מדרשו של מרטין לותר. גם לאחר הפיכתן לחילוניות, המשיכו האוניברסיטאות להתמקד בנושאי לימוד שנלמדו לפני כן, כדוגמת נצרות, משפט, ורפואה. כך למשל, את תחילת דרכו עשה אייזיק ניוטון בקולג' "השילוש הקדוש" (Trinity College) בקיימברידג' שבאנגליה, הגם שסרב להישבע על השילוש, שם עסק בחקר כתבי

התנ"ך ובמיוחד הבנת משמעותו של בית המקדש (Keynes, 1956). העשייה המדעית שבגינה הוא נחשב לפיזיקאי לא נעשתה באוניברסיטה שאליה השתייך. האוניברסיטה הראשונה הנחשבת למודרנית, שבה הועבר מרכז הכובד מלימודי הדת ללימוד המדע, היא האוניברסיטה של ברלין, אשר נוסדה בשנת 1809. זו האוניברסיטה הראשונה ששמה לה את המחקר למטרה, ככל הנראה בהשפעת האקדמיות באיטליה. המשך חילון האוניברסיטאות התרחש באיטליה (1870), בספרד (1876) ובצרפת (1896), אשר החלו לפעול במימון הממשלה. באף אחת מהאוניברסיטאות הללו לא לימדו הנדסה באותה תקופה (Channell, 2019, p. 13). ייתכן שמהלכים אלו הם שנתנו לאוניברסיטאות צביון מחקרי והפכו את האקדמיות למיותרות, דבר שבא לידי ביטוי היום בטשטוש ההבדל בין "אקדמיה" לבין "אוניברסיטה".

### 5.3 ראשית האקדמיה

ראשית העשייה המדעית המאורגנת, על פי חזונו של Roger Beacon ובהמשך על פי חזונו של Francis Beacon, החלה במסגרות קטנות שכוננו "אקדמיה" (Academy), במאה ה-17 (Applebaum, 2000). היו אלו איגודים ביוזמה פרטית או שלטונית, שליכדו מספר קטן של משכילים, מקבוצות של בודדים עד כמה עשרות חברים, שעיקר עיסוקם היה עריכת ניסויים להבנת הטבע, לימוד שנועד לתועלת החברה. אקדמיות אלו לא שימשו להוראה פורמלית, הגם שחלקן הכשירו דור המשך של חוקרים. רובן פעלו תקופות קצרות בלבד, כמה עשרות שנים לכל היותר.

הרעיון להקמת בתי ספר ייעודיים לחקר המדע ולהנדסה הוצג על ידי פרנסיס ביקון, בספרו *The New Atlantis*, שפורסם בשנת 1627. המוסד שבו מתנהלת הפעילות המחקרית כונה על ידו "הבית של שלמה" (*Solomon's House*) בהשאלה לבית המקדש שממנו יצא אור לעולם, ובו נערכים מחקרים בכל תחומי העשייה האנושית ולטובת האנושות (Channell, 2019, p. 32). ייתכן שבזכות חזון זה נחשב פרנסיס בייקון לאבי המדע המודרני (הגם שעמד על כתפי ענקים, כמו אייזיק ניוטון).

אחת מהאקדמיות הראשונות הייתה *Accademia dei Lincei* שהוקמה באיטליה בשנת 1603 על ידי Federico Cesi שגם מימן את פעילותה. שמה של אקדמיה זו נגזר מחתול הבר שונר (lynx) המייצג ראייה חודרת של עין בוחנת, שהיא לשיטתו של Cesi לא רק ראייה פיזית אלא גם ראייה אינטלקטואלית. אקדמיה זו נסגרה בשנת 1633 לאחר מותו של Cesi ולאחר מאסרו של גלילאו בידי הכנסייה. בשנת 1657

הוקמה בפלורנס שבאיטליה האקדמיה *Accademia dei Cimento* במימון נסיכים. כפי ששמה מרמז (*Cimento* -ניסוי), באקדמיה זו ערכו ניסויים שנועדו לתת מענה ליישומים הנדסיים שכללו חקירות בנושאים של מעבר חום, לחץ אטמוספרי, צפיפות ודחיסות של נוזלים, וכולם התבססו על פיתוח מכשירי מדידה. כך למשל, גלילאו וטוריצ'לי תלמידו, עסקו בהבנת הקושי לשאוב מים ממכרות בעומקים גדולים (Channell, 2019, p. 26). עבודתה של אקדמיה זו צונזרה מאוד, ונסגרה עשר שנים לאחר פתיחתה.

באנגליה הוקמה בשנת 1662 אגודה לחקר הטבע *Royal Society for the Promotion of Natural Knowledge*, אשר מנהליה מומנו על ידי הממלכה בעוד שחברי האגודה החוקרים מימנו את עצמם. בין החברים היו רוברט הוק ואייזיק ניוטון, שאליהם צורפו חברים אחרים משיקולים של יוקרה וקשרים פוליטיים. את ממצאי התגליות פרסמו החוקרים בכתב העת *Philosophical Transactions*.

בצרפת נעשתה ההתארגנות האקדמית ביוזמה פרטית, שראשיתה בשיחות סלון בנושאי מחקרי הטבע. מפגשים אלו הובילו להקמת האקדמיה הראשונה *Montmor Academy* בשנת 1657 אשר מומנה על ידי *Habert de Montmor* ופעלה עד שנת 1664 (Applebaum, 2000, p. 684). בשנת 1666 הקים לואי ה-14 את *Académie Royale des Sciences* בפריז. הוא הגדיר את תפקידה ההנדסי של האקדמיה כמחויבת לחקור תופעות שנועדו לרווחת החברה. המלך מינה נציגים מטעמו לפקח על הפעילות המחקרית ולתקצב אותה, בהתאם למטרות שהגדיר. מחקרים אלו כללו מכניקה, שיטות כרייה וזיקוק חומרים, אסטרונומיה למיפוי כדור הארץ וכיוצא באלה. בשל הגזרה שלא לפרסם את תוצאות המחקרים ברבים, פרסמו חלק מהחוקרים את התוצאות באופן אנונימי, ויש הטוענים שבכך תרמו לקידום המהפכה המדעית (Applebaum, 2000, p. 3-4). גם בגרמניה הוקמו אקדמיות באותה תקופה בערך, אשר התמקדו בעיקר בחקר הביולוגיה והרפואה.

## 5.4. ראשית ההכשרה הפורמלית להנדסה

האקדמיות שהוקמו במטרה לקדם את העשייה ההנדסית באמצעות מחקר, כפי שעשה זאת באופן מפורש לואי ה-14, לא עסקו בהכשרת מהנדסים. בית הספר הראשון להנדסה צבאית *corps de Génie* הוקם ביוזמת הממשל הצרפתי בשנת 1690 (יש אומרים 1676). בהמשך הקימה הנהגת צרפת את *Ecole des Ponts et Chaussées* בשנת 1747 (Picon, 2004, p. 426) ומוסדות רבים נוספים כמו *Ecole du génie* בשנת 1748 ו-*Ecole du mines* בשנת 1783. בבתי ספר אלו, ובמיוחד בבית

הספר הגבוה *Ecole Polytechnique* שהוקם בשנת 1794, ניתן דגש על הוראת המתמטיקה והמדעים כהכשרה להנדסה לשימושים צבאיים, כדוגמת תכן מצודות וכלי מלחמה וגם ליישומים אזרחיים, כדוגמת כבישים, גשרים ומכרות (Channell, 2019, p. 62).

ברוסיה הקים פטר הגדול שני בתי ספר להנדסה. האחד בשנת 1700 והשני בשנת 1701 (Gorokhov, 1997). בשנת 1773 הוקם ברוסיה בית ספר להנדסת מכרות. הדגש בבתי ספר אלו היה על טיפוח מיומנויות תכנון הנדסי הכולל הכשרה מדעית בסיסית ביותר. בשנת 1809 הוקם בית הספר לתחבורה באוריינטציה מדעית, בהתבסס על המודל הצרפתי. בשונה מבתי הספר בצרפת, השנה הרביעית בבית ספר זה הוקדשה להתנסות בפרויקט הנדסי.

בספרד התפתחו מוסדות להנדסה בערך במקביל להתפתחותם בצרפת. גם שם, הם הוקמו באופן יזום על ידי השליטים. פיליפ החמישי הקים בשנת 1715 את האקדמיה הצבאית *Academia de Militar Matematicas de Barcelona* ובהמשך בשנת 1728 את *Academia de Guardamarinas of Cadiz*. מוסדות אלו הוקמו כדי לצייד את הצבאות בצידוד לחימה חדיש, במיוחד לשמירת השלטון הקולוניאלי של ספרד בדרום אמריקה. בבתי ספר אלו נלמדו מקצועות כמו גאוגרפיה, ניווט, אסטרונומיה, שרטוט, מכניקה וארכיטקטורה, הכשרה שלא ניתן היה לקבל באוניברסיטאות באותם הימים (Nieto-Galan and Roca-Rosell, 2006, p. 275).

להבדיל מצרפת ומספרד, באנגליה הוקמו מוסדות להכשרת מהנדסים בהתארגנות חופשית של בעלי עניין מהתעשייה. זאת, לאחר שהוראת המדעים וההנדסה החלה בשנת 1713 בבתי קפה בלונדון על ידי Desaguliers (Channell, 2019, p. 57). בית הספר להנדסה הראשון באנגליה הוקם בשנת 1771, ועיקר עיסוקו היה בהוראת הנדסה אזרחית (Picon, 2004, p. 426). עד אז התבצעה הכשרת המהנדסים במסגרת פרטית בלבד (Buchanan, 1983, p. 410). אגודה מקצועית נוספת של מהנדסים הוקמה באנגליה בשנת 1818. בתי ספר נוספים להנדסה הוקמו באנגליה רק באמצע המאה ה-19, וגם אז נאלצו הבוגרים לעבור התנסות ארוכה במשרדי תכנון ותיקים לפני שיכלו לתפקד כמהנדסים ומתכננים עצמאיים (Buchanan, 1983, p. 428).

עם זאת, בממלכות הגרמניות, מיקוד האוניברסיטאות במדע, במודל של האקדמיות, לא אפשר להן להתקדם בתעשייה. חסרון זה זוהה בתחילת המאה ה-19, או אז הוקמו בתי ספר להנדסה. תחילה בפראג בשנת 1806, ובהמשך בווינה ב-1815 וב-

Karlsruhe ב-1825. ההוראה במוסדות אלה התבססה על הדגם הצרפתי המדגיש את המרכיב המדעי של ההנדסה (Channell, 2019, p. 67).

בארצות הברית הוקמו בתי ספר להנדסה בשילוב של המתווה הצרפתי והאנגלי. בית הספר הצבאי למהנדסים ביוזמה ממשלתית הוקם בשנת 1775 ב-West Point, לצורך הקמת גשרים, סכרים וביצורים. לשם הקמתו נעזרו בניסיונם של מהנדסים מצבא צרפתי (Picon, 2004, p. 426). יש הטוענים כי בית ספר זה הוקם בשנת 1802 (Channell, 2019, p. 69). בשנת 1824 הוקם בפילדלפיה בית ספר להנדסה Franklin Institute בדגש על מכניקה. אחת ממשימותיו המפורסמות של בית ספר זה הייתה לחקור את פיצוץ מכלי לחץ ששימשו במנועי קיטור, כשלים שהמדענים לא הצליחו לפתור. לאחר מציאת הפתרון החליט הממשל בארה"ב, בפעם הראשונה, להתערב בעשייה הפרטית ולחוקק תקנות מחייבות לתכנון מכלי לחץ.

באמצע המאה ה-19 החלו להקים בצפון אמריקה בתי ספר נוספים להנדסה: Rensselaer School אשר הוקם בשנת 1823; Harvard College ו-Yale College הוקמו בשנת 1847 (Scott, 2006, p. 16). MIT, אחד המוסדות המובילים בתחומי ההנדסה, נפתח בשנת 1865 עם 16 סטודנטים בלבד. במקביל לצמיחתם של בתי ספר להנדסה, עיקר ההכשרה של המהנדסים בתחומים האזרחיים הייתה לא פורמלית, והיא התבצעה במקום העבודה, ביניהם מהנדסים אמריקאים ידועים כמו תומס אדיסון, ג'ורג' וויסטינגהאוז והנרי פורד. כל זאת בזמן שהתנהל ויכוח בצפון אמריקה, האם ההכשרה צריכה להיות מבוססת ניסיון ומאפשרת כניסה מיידית לעבודה או שעליה להיות מדע ולאפשר את המשך הלמידה גם לאחר ההסמכה (Grayson, 1993, p. 48). כדי למסד את הכשרת המהנדסים בצפון אמריקה הוקמה בשנת 1893 האגודה להכשרת מהנדסים, ASEE (Grayson, 1993, p. 7).

## 5.5. ההכשרה ההנדסית כיום

לקראת אמצע המאה העשרים נחלקה ההסמכה של מהנדסים בעולם לשני אופני הכשרה עיקריים: בצרפת, בגרמניה ובחלק מבתי הספר בארצות הברית התמקדה ההכשרה ההנדסית במדעי ההנדסה, בעוד שבאנגליה ובחלק מהאוניברסיטאות בארצות הברית התמקדה ההכשרה ההנדסית בהיבטים של תהליכי תכן.

גילויים וחדושים רבים שנוספו לעולמות המתמטיקה והמדעים מאז ימיו של פרנסיס ביקון במאה השבע עשרה, חלקם על ידי מהנדסים בעצמם, חייבו להגדיל באופן הדרגתי את המרכיב המדעי בהכשרת מהנדסים. למרות ההכרה בצורך זה,



הרי שמייסד המחלקה להנדסה באוניברסיטת Glasgow באנגליה באמצע המאה ה-19, Rankine, נדרש להשקיע מאמץ גדול כדי לשכנע את עמיתיו להקים מחלקה חדשה להנדסה שתיצור את השילוב הנדרש "harmony of theory and practice". היה עליו להיאבק עם חברי סגל להוראת המדעים מצד אחד ועם ותיקי ההנדסה מצד שני, שטענו שהכשרה להנדסה צריכה להיעשות רק בפרקטיקה (Channell, 2019, p. 114). בזומה ל-Rankine, גם Redtenbacher שבגרמניה לא ראה בהנדסה רק יישום של ידע מדעי, ולכן היה עליו להתמודד עם מאבקים דומים לאלה שהתמודד איתם Rankine (Channell, 2019, p. 119).

ההצלחות הן של Rankine באנגליה והן של Redtenbacher בגרמניה לא החזיקו מעמד יותר ממאה שנים. המגמה של נטישת אומנות התכן וההסתמכות הכמעט בלעדית על מדעי ההנדסה התגברה בתחילת המאה ה-20 והושלמה לאחר מלחמת העולם השנייה. או אז התגבשה הגישה שהמדע הוא התנאי לעשייה הנדסית (Ferguson, 1993, p. 155). אמונה זו תפשה לה אחיזה, למרות שבפועל עשייה הנדסית רבה מתבססת על הגישה האומנותית להנדסה.

אכן, אמונה זו בכוחו של המדע בעשייה הנדסית היא נכונה, אלא שבמציאות הופר באקדמיה האיזון בין תרומת הידע המדעי לבין תרומת הידע האומנותי להצלחה בהנדסה. כיום, מתמקדת ההכשרה הפורמלית במוסדות האקדמיים ברובה בהקניית כלים מדעיים. כלים אלו מאפשרים למהנדס תמיכה בהחלטות הנדסיות על בסיס מדעי (Bulleit et al., 2015, p. 2). אלו הם "מדעי ההנדסה" (Crawley et al., 2014, p. 227), מושג שהוטבע על ידי B. de Bélidor בספר שפרסם בשנת 1729 (Gorokhov, 2014).

עם זאת, העשייה הנדסית נסמכת, כמוזכר לעיל וכמתואר ביתר פרוט בהמשך, על ידע ושיקולים נוספים שאינם מדעיים בלבד. בשל המורכבות הכרוכה באיחוד היבטים מגוונים אלו, הכרוך גם בידע חוויתי (Niedderer and Reilly, 2010), יש המכנים יכולת זו "חשיבה הנדסית" (engineering wisdom), כמתואר למשל על ידי Samuel and Weir (1999, p. 271). אפשר להקביל את החשיבה הנדסית ל-"חוש טכני" המוכר אולי יותר, להמחשת המרכיב ההנדסי שאינו ידע פורמלי במדעים.

תהליכים אלו, שבהם הוראת המדעים באה על חשבון פיתוח כישורי חשיבה הנדסית, מתוארים היטב על ידי Dixon and Duffey (1990) ו-Ferguson (1993) וגם בשתי המהדורות של ספרה של האגודה הבינלאומית להכשרת מהנדסים CDIO (Crawley et al., 2014). סיכום ממצא של הנושא הובא על ידי Ferguson:

"...it would become painfully obvious that engineering faculties had become strong in research but were generally unfamiliar with engineering practice, particularly design. Nor did the teachers have the necessary industrial experience to introduce students to the many subtle, unstructured problems of designing, building, operating, and maintaining structures and machines. (Ferguson, 1993, p. 159).

ייתכן שתרומת האומנות להצלחות ההנדסיות, לצד השימוש בידע של מדעי ההנדסה, היו כל כך מובנות מאליהן, עד שהפכו לשקופות בהשוואה לתרומה הבולטת של הגילויים המדעיים.

כיום, נלמדים בישראל מקצועות ההנדסה במרבית האוניברסיטאות ובמכללות אקדמיות להנדסה במתכונת הדומה לזו שמעבר לים, תוך מתן דגש על ההיבט המדעי של ההנדסה, "מדעי ההנדסה". הטכניון הוא המוסד האקדמי הראשון שהוקם בארץ ישראל בשנת 1924 בחיפה, מספר חודשים לפני האוניברסיטה העברית אשר הוקמה בשנת 1925. הטכניון הוא גם בית הספר הראשון להנדסה, "המכון הטכנולוגי לישראל". המקצועות הראשונים שנלמדו בו, עם 16 בוגרים, היו הנדסה אזרחית וארכיטקטורה. הרעיון להקמת מוסד אקדמי עברי כ"בית ספר גבוה יהודי" הועלה עוד בשנת 1882 על ידי הרמן שפירא מחובבי ציון (קירש, 2018, עמ' 20). הרעיון להקים "בית ספר גבוה יהודי" למקצועות טכנולוגיים הועלה כבר בשנת 1902 על ידי בובר, פייבל וויצמן הוא אשר הוביל להקמת הטכניון (דרור, 1996). המבנה האוניברסיטאי של הטכניון התבסס על המודל האוניברסיטאי הגרמני, שאחד ההדים הידועים לו הוא "מלחמת השפות". ה"מלחמה" הוכרעה כאשר העברית נקבעה לשפה הרשמית להוראה בטכניון. עד לתחילת המאה ה-21 כל תזות המחקר שהוגשו בטכניון נכתבו בעברית. עם זאת, כיום ניתן להגיש תזות גם באנגלית, וחלק קטן מההוראה אף מתבצע בשפה זו.

## 5.6. הכשרת מהנדסים למאה ה-21

בשנים האחרונות ניכרת מגמה של חשיבה מחודשת בנוגע לאיזון שבין ההכשרה למדע לבין ההכשרה לאומנות ההנדסה בחינוך מהנדסים. הרקע לכך הוא גם המהפכות המאפיינות את המאה ה-21, המהפכה התעשייתית הרביעית ומהפיכת התפוצצות וזמינות הידע, אשר בצוותא מניעות מהלכי רפורמה. המהפכה התעשייתית הרביעית מושתתת על הנדסה המצריכה אינטגרציה בין טכנולוגיות מגוונות (איור 5.1) ומחייבת את המוסדות להכשיר מהנדסים בעלי ראייה מערכתית

ורב-תחומית, תוך הקניית כישורים בינאישיים ויצירתיות, לצד כישורים טכניים ומדעיים להובלת תהליכים ( The future of jobs: employment, skills and )  
 workforce strategy for Fourth Industrial revolution, World Economic Forum (2016).



איור 5.1 – הטכנולוגיות שמניעות את המהפכה התעשייתית הרביעית

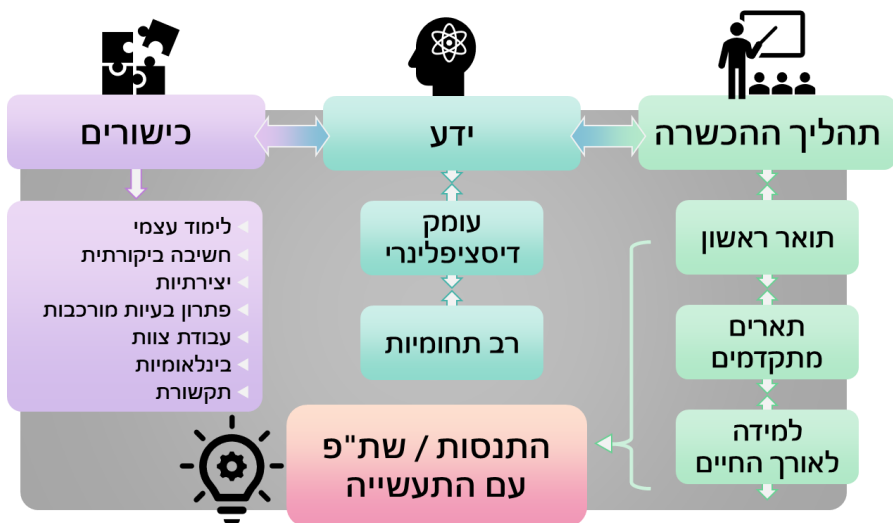
בדיוני הפורום לחינוך מהנדסים במאה ה-21, הפועל במסגרת "מוסד שמואל נאמן" שבטכניון, גובש מתווה לחינוך מהנדסים העונה על אתגרים אלה. מתווה זה בנוי מנדבכים שיש ביניהם מתח, אך הם גם משלימים אחד את השני, כאשר יש למצוא את האיזון ביניהם לאפשר שילוב המתאים לפרופילים שונים של מהנדסים (בנטור ושות', 2019, 2018). לפי המתווה, אלה הם ההיבטים החשובים שבהם יש לערוך את האיזונים המתאימים:

- **העמקה דיסציפלינרית מול רב-תחומיות:** רב-תחומיות בהיבט הרחב של תכלול דיסציפלינות מדעיות והנדסיות ואינטראקציה בינן לבין עצמן ועם תהליכים חברתיים ותהליכים כלכליים.
- **רכישת ידע מול הקניית כישורים:** ידע ניתן לרכוש גם בשיטות לימוד מגוונות ומותאמות אישית, לאו דווקא במסגרת אקדמית רגילה. לעומת זאת, הקניית כישורים חיוניים למהנדס כמו למידה עצמאית, מנהיגות, חשיבה ביקורתית,

פתרון בעיות מורכבות, יצירתיות, עבודת צוות, תקשורת ובינלאומיות, מחייבת חינוך בסביבה מתודולוגית, המאפשרת התנסות. התנסות זו דומה לזו המקובלת בלימודים מתקדמים לתואר גבוה, אשר מן הראוי לשלב ממנה מרכיבים גם בלימודי התואר הראשון. בנוגע להתנסות, אין תחליף להכשרה במסגרת מוסד אקדמי, בשעה שבנושא הקניית ידע ספציפי יש כיום חלופות שאינן מחייבות דווקא לימוד אקדמי ממוסד. כדי להעצים את החינוך ולהמשיך להיות רלוונטיים גם במאה ה-21, על המוסדות האקדמיים לחזק את חינוך בסביבה המאפשרת התנסות. האתגר החינוכי במאה ה-21 הוא לא רק בדרכי הפעולה ובמנגנונים בתחום, שהם רבים ומורכבים, אלא גם ביחס הגבוה מאוד בישראל בין סטודנטים לבין חברי הסגל, שעולה בהרבה על היחס המקובל במוסדות מובילים בחו"ל. אתגר נוסף הוא העובדה שחברי הסגל הם בעלי אוריינטציה מחקרית ולא הנדסית (מצב שאינו בהכרח ייחודי לישראל). יש לחשוב על דרכים אפשריות להתמודד עם קושי זה בעזרת הגברת השיתוף עם התעשייה במנגנונים שונים, כמו למשל מינויים של professor of practice במוסדות אקדמיים.

- **למידה בקמפוס מול התנסות בשטח:** יש צורך להשריש את התוכנה שחינוך מהנדסים איננו מתרחש רק בין כתלי האקדמיה וכיתות הלימוד. לכן, יש מקום לנדבך נוסף בחינוך ההנדסי, והוא שיתוף פעולה עם התעשייה. לצורך כך, יש לפתח מודלים חדשניים, במיוחד בכל הקשור לקידום החינוך לכישורים חינויים כחלק מההתנסות בתעשייה, או לחלופין, התנסות בקמפוס תחת הנחייה משותפת של מומחים מהתעשייה והסגל האקדמי.
- **למידה לאורך החיים:** כיום, הדינמיות של המערכת המדעית, טכנולוגית, כלכלית וחברתית יוצרת שוק עבודה עתידי גמיש ומשתנה, המחייב את בוגרי התואר להמשיך ללמוד, להתעדכן ולפי הצורך גם לעשות הסבה מקצועית. לפיכך הנושא של למידה לאורך החיים, LLL – Life Long Learning הופך לחלק בלתי נפרד מתהליך התפתחות הקריירה המקצועית של המהנדסים. כיום בעולם קיימת מגמה של מוסדות אקדמיים מובילים לראות גם את המשך הכשרת הבוגרים כיעוד שלהם, מעבר להכשרה של הסטודנטים בלימודי תואר רגילים: בתואר ראשון יקנו המוסדות גם את הכישורים ללמידה עצמאית, מתוך הבנה שהמוסדות ילוו את הבוגרים להרחיב ולהתעדכן בהמשך הקריירה שלהם, כחלק מ- LLL.

תיאור סכמתי של כל ההיבטים האלה מוצג באיור 5.2.



איור 5.2 – תיאור סכמתי של מרחב הנדבכים לחינוך ולהכשרת מהנדסים במאה ה-21 (מבוסס על בנטור ושות', 2019)

## 6. מדע, מדעי ההנדסה והנדסה

בין עולם המדע לבין עולם ההנדסה קיימים קשרים רעיוניים ומעשיים רבים אשר חלקם פועלים באופן הדדי ומפרים זה את זה. כך למשל, הגילויים המדעיים של דיויד לייזר אפשרה למהנדסים לפתח מנורת לד במקום מנורת ליבון. מנגד, מערכות הנדסיות מתקדמות, כמו טלסקופ האבל (Hubble) ומאיצי חלקיקים, מאפשרות גילויים חדשים על היקום. בנוסף, ישנם מאפיינים משותפים לעשייה המדעית ולעשייה ההנדסית. לתפיסה של הקשר בין מדע להנדסה יש השפעה על החברה, על השמת מהנדסים בתעשייה ואף על עצם העשייה ההנדסית.

בעשרות השנים האחרונות רווחת בין בעלי מקצוע בתחומים שונים וגם בדעת הקהל, תפיסה לא מדויקת על יחסי הגומלין שבין עולם המדע לבין עולם ההנדסה. על פי דעה זו, הישגי החברה הם בזכות המדע בלבד, וכפועל יוצא, להנדסה יש רק תפקיד שולי, של "יצרן". תיאור התפתחות תפיסה זו והטעות שבה מתוארת על ידי Ferguson (1993). המחשה ליחס זה, אשר בחלקו הוא נכון, ניתן למצוא בסדרת הטלוויזיה האמריקאית שהופקה על ידי CBS הנקראת "המפץ הגדול" (The Big Bang Theory).

פרק זה מוקדש לדיון ביחס שבין עולם המדע לבין עולם ההנדסה. בשל החשיבות של תפיסה נכונה של כל אחד מהעולמות והיחס ביניהם, הן בעיני הציבור והן בעיני העוסקים בהם, נתאר בקצרה את המשותף לעשייה ההנדסית ולעשייה המדעית ונבחן את ההבדלים ביניהם. מכיוון שההנדסה והמדע אינם מקשה אחידה בפני עצמם, הרי שרמת הכלליות של הדיון יוצרת בהכרח אי-דיוקים. עם זאת, התיאור המובא כאן מוסכם על רבים המכירים הן את שני התחומים (למשל, Ferguson, 1993; Boon, 2011; Bulleit et al., 2015). ההשוואה בין עולם ההנדסה לבין עולם המדע המוצגת כאן אינה מלאה והיא מוגבלת רק להיבטים הנדרשים למטרות הספר ולעיצוב הכשרתו של המהנדס.

### 6.1. הדמיון בין מדע לבין הנדסה

לתכניות הלימודים של מהנדסים ושל מדענים, בעיקר במסלול הפיזיקה, יש הרבה מן המשותף. הכשרת מהנדסים כיום מבוססת על "מדעי ההנדסה" (engineering science), הכוללים תחומי ידע שלומדים גם המדענים, כדוגמת מתמטיקה, מכניקה, מעבר חום, זרימה, חשמל וכימיה. הכשרה דומה עשויה לרמז לכאורה על כישורים דומים.

אכן, ישנם כישורים דומים הנדרשים הן ממהנדסים והן ממדענים. הדמיון הבולט ביותר נמצא בתפקידי מהנדסים בתחום הפיתוח. בדומה למחקר מדעי, נדרשים מהנדסי פיתוח להכיר את התיאוריות בתחומי הפיזיקה השונים, לחקור תופעות חדשות, לבצע ניסויים וחישובים שהתשובה עליהם אינה ידועה, להיות ביקורתיים כלפי עצמם וכלפי עמיתים ולכתוב דוחות ומאמרים. גם מהנדסים בתפקידים אחרים נדרשים להכיר את התיאוריות השונות, לבצע חישובים מורכבים לחיזוי התנהגות מערכת, לבצע ניסויים ולכתוב דוחות. הן המדענים והן המהנדסים מושפעים מהתקדמות מדעית וטכנולוגית. עליהם לעדכן את ידיעותיהם באופן מתמיד ולעשות שימוש מתאים בידע החדש. הגדרות פופולריות של הנדסה כפותרת "בעיות" לכאורה, דומה לפתרון בעיות במדע, כפי שניתן לראות בתיאור ויקיפדי של ההבדלים בין מדע להנדסה:

"Engineering is formulating a problem that can be solved through design. Science is formulating a question that can be solved through investigation. ....The key difference between the engineering process and the scientific process is that the engineering process focuses on design, creativity and innovation while the scientific process emphasizes discovery (observation)." (Wikipedia).

במובן מסוים, אכן במדע ובהנדסה פותרים "בעיות", אך זהו דמיון חיצוני בלבד. ההבדל בין בעיות הוא בדרך כלל רחב דיו שלא לכלול אותן בכפיפה אחת. הגדרת המהנדסים כ"פותרי בעיות" אינה מועילה מכיוון שבעלי מקצוע רבים פותרים "בעיות", כמו למשל, הרופאים.

קיימים בוודאי היבטים משותפים נוספים בין ההנדסה לבין המדע, אך די בהיבטים אלו כדי להמחיש שניתן בטעות להתמקד בדמיון שבין שני העולמות ולהתעלם מן ההבדלים.

## 6.2. ההבדל בין מדע לבין הנדסה

תפיסת ההנדסה כיישום של הידע המדעי, יחד עם הכשרה אוניברסיטאית דומה, מזינה לכאורה את הטענה שאין סיבה שהמדענים לא יוכלו ליישם את הידע שברשותם טוב לפחות כמו המהנדסים. אומנם לימודי ההנדסה (B.Sc.) בארץ ובעולם ארוכים בשנה מלימודי המדע (B.A.), אך לא בולט לעין מהו הדבר הנוסף שלומדים מהנדסים, המאפשר להם ליישם את הידע שברשותם טוב יותר

מהמדענים. ההבדל ביניהם כה נעלם, עד כדי כך שגם בין המהנדסים עצמם, יש הטוענים שאת לימודי ההנדסה ניתן לקצר לשלוש שנים.

לצד הדימויון בין המדע לבין ההנדסה, קיימים הבדלים ביניהם, אשר עשויים להיות עמוקים. מוסכם על רבים שתפקידי המדענים והמהנדסים הם שונים, כמו גם התוצר של עבודתם. תפקיד המדע הוא לגלות אמת כלשהי על המציאות, והתוצר שלו הוא ידע אובייקטיבי, חוק טבע. תפקיד ההנדסה הוא ליצור דבר מה שיכונן יכולת חדשה שלא הייתה קיימת עד כה, והתוצר שלה הוא "מתקן" או "תהליך". התפקיד של המהנדס הוא לעצב את המציאות באמצעות תכנון מערכות, מתקנים ותהליכים המובילים אליהם. וון קרמן, יהודי במוצאו, מהנדס מטוסים, מתמטיקאי וחוקר, שהיה מעורב הן בעשייה הנדסית והן בעשייה המחקרית, ניסח את ההבדל בין מדע לבין הנדסה:

"Scientists look at things that are and ask 'why'; engineers dream of things that never were and ask 'why not'" (Samuel and Weir, 1999, p. xv).

או בניסוח אחר: המדענים שואפים לדעת ומהנדסים שואפים לעשות:

"Science is about knowing; engineering is about doing." (Petroski, 2010, p. 17).

בתפישה ההיררכית, שעל פיה המדע הוא תנאי לעשייה הנדסית, יש מרכיב של אמת, ובכל זאת היא אינה מדויקת. לזיהוי טעות זו של היררכיה הפוכה די בשתי אבחנות: האחת, שהעשייה הנדסית של אלפי שנים, עוד לפני המהפכה המדעית, קידמה את האנושות באופן מובהק. הרב קוק אמר פעם שהמצאת מערכת סניטרית ומים זורמים בבתים הם בין הדברים שתרמו משמעותית להעלות את בן האנוש לדרגת אדם ולהרחיקו מבהמיותו.

האבחנה השנייה היא שאומנם עשייתו של המדען מכוונת למציאת חוקיות, אך אין זה אומר שהוא היחידי שעוסק בכך. במאמצייהם להחליט מה לעשות מחפשים המהנדסים מידע וידע כמבואר בסעיף 3.3 לעיל. עבודתם אינה מוגבלת לתכנון בלבד, והכשרתם במרבית המוסדות מאפשרת גם את המחקר, כמו למשל הדוגמה של חיפוש מקורות לכשל מכלי לחץ בארצות הברית שהוזכרה לעיל.

מהנדסים רבים ערכו מחקרים מדעיים כדי לגלות את האמת על המציאות, תוך שאיפה לקבל החלטות מושכלות בעת התכנון. המהנדסים מצמצמים פערי ידע לא בשם הסקרנות או מתוך אידיאל של הבנת העולם, אלא מטעמים מעשיים: עליהם



לקבל החלטות על פרטי התכן כדי שתיווצר בסופו של יום מערכת שתממש את היכולת הנדרשת. כך למשל, גלילאו הנחשב כמדען, עסק בבעיות הנדסיות. הגילויים שלו על תנועת גופים נועדו לחיזוי תנועת קליעים, הניסויים שלו בקורות נועדו לשפר תכן ספינות, והעיסוק שלו בלחץ אטמוספרי שהובילו לגילויים של טוריצ'לי, נועדו לסייע לשאוב מים ממכרות (Channell, 2019, p. 17). אכן, עם גילוי הולך וגובר של חוקי טבע, נעשה התכנון יעיל יותר, ואך טבעי שהמהנדסים ישתמשו בו.

אומנם השאיפה של המהנדסים היא לדעת "מה לעשות", אך כאמור אין כל מניעה שהם עצמם יפעלו גם כמדענים השואלים "מה לדעת" וישאפו להשגת הידיעה. אכן, במוסדות אקדמיים רבים, הכשרתם של מהנדסים כוללת גם הכשרה לעשייה מדעית. בראיה היסטורית, ניתן לראות כי אנשי "מדע" רבים מהמאה ה-18 וה-19, אשר התגליות המתמטיות והפיזיקאליות שלהם הן אושיות המדע המודרני, היו למעשה מהנדסים בהכשרתם ובעיסוקם. כך למשל, בין בוגרי בית ספר להנדסה *Ecole Polytechnique* אפשר למצוא את:

Jean-Baptiste **Biot** (1774-1862), Siméon Denis **Poisson** (1781-1840), Claude Louis Marie Henri **Navier** (1785-1836), Augustin Jean **Fresnel** (1788-1827), Augustin-Louis **Cauchy** (1789-1857), Antoine-César **Becquerel** (1788-1878), Gaspard-Gustave **Coriolis** (1792-1843), Nicolas Léonard Said **Carnot** (1796-1832), Gabriel **Lame** (1795-1870), Benoît Paul Emile **Clapeyron** (1799-1864), Charles **Hermite** (1822-1901), Henri Louis **Le Chatelier** (1850-1936), Pierre-Henri **Hugoniot** (1851-1887), Antoine Henri **Becquerel** (1852-1908), Henri **Poincare** (1854-1912).

ההיסטוריה גם מגלה, כי "מדענים" נוספים באותה תקופה קיבלו הכשרה במוסדות להנדסה שהיו קיימים אז או שעיקר עיסוקם היה ההנדסה, מבלי שתהיה להם הכשרה פורמלית לכך. כך למשל, *Joseph-Louis Lagrange* (1736-1813) הכשיר את עצמו במתמטיקה ושירת כמורה באקדמיה צבאית בהוראת מתמטיקה ותנועת קליעים. *Jean-Baptiste Joseph Fourier* (1768-1830), כמו לגרנז', שירת בבית הספר הצבאי. *Pierre-Simon Laplace* (1749-1827) היה חבר אקדמיה שכידוע עסקה בשאלות הנדסיות. *Adrien-Marie Legendre* (1752-1833) לימד בבתי ספר צבאיים והיה חבר באקדמיה, ו- *Jacques Charles François Sturm* (1803-1855) היה חבר אקדמיה ואח"כ לימד ב- *Ecole Polytechnique*. מטבע הדברים, לשם גילוי

מדעי או ביסוס חיזוי הנדסי, גם המהנדס ישתמש בכלים מדעיים. במובן זה אפשר שכלים אלו אינם מדעיים יותר משהם כלים הנדסיים.

כפי שהודגם באיור 2.2 לעיל, הידע המדעי הוא רק מרכיב אחד במערך השיקולים של המהנדסים בקבלת החלטות. אם קיים ידע מדעי שיכול לסייע להם במשימת עיצוב המציאות, מה טוב, אך עליהם לבצע את משימותיהם גם בהיעדר ידע זה. לשם כך, הם עושים שימוש בידע נוסף שאינו כלול במדעי הטבע. בעוד שהמדענים ניזונים מפערי ידע והצלחתם נבחנת על פי יכולותיהם לצמצם אותם באופן אובייקטיבי ומוכח, צריכים מהנדסים לקבל החלטות למרות קיומם של פערי הידע, תהליך שבהכרח אינו רציונלי (Klein, 1997; Bulleit et al., 2015). זהו הבדל מהותי בצורת החשיבה בין המדענים לבין המהנדסים. יתירה מזו, פערי הידע שבסביבתם פועלים המהנדסים הם לא רק בתחום המדעי אלא גם בתחומי החברה והכלכלה, פערים שהם אינהרנטיים לתהליך התכן עצמו מעצם קידומו בשלבים.

הידע המדעי הוא רק אחד הכלים בארגז הכלים של המהנדסים. לכן, אם קיימת מוטיבציה כלשהי להגדיר היררכיה בין הנדסה לבין מדע, הרי שהמדע הוא הכלי של הנדסה, כפי שניסח יפה Penny לפני שישים שנה:

"...engineering design is concerned with the art of using science in achieving a useful end-product" (Penny, 1960, p. 344).

לפי התיאור של ביתו של שלמה בספרו של פרנסיס בייקון The New Atlantis, המדע משרת את החברה. זו הייתה המטרה של הקמת האקדמיות שתוארו לעיל. המדע הוא האמצעי ולא המטרה. הוא אמצעי המשמש את ההנדסה לקבל החלטות כדי להוביל ליצירת מערכת יעילה. בדומה למדע, גם ההנדסה היא אמצעי ולא מטרה. היא אמצעי לחברה טובה יותר, כפי שיובהר בפרק 7 בהמשך. חשוב על כך, לעשות הבחנה ברורה בין מטרה לבין אמצעי, וברוח זו לבחון את יחסי הגומלין שבין המדע לבין ההנדסה.

כפי שהוצג בפרק הקודם, הכשרת המהנדסים בעבר הייתה שונה מזו של המדענים. לצד הדמיון בהכשרה שלהם, הנובע מהמרכיב המדעי ב"מדעי ההנדסה" (engineering science), הרי שמהנדסים למדו גם "תכן הנדסי" או את "אומנות ההנדסה" (engineering design). הצורך למנוע כשלים, ההתמודדות עם הגדרת דרישות לא מספקת (ill-defined/structured problems) וגם הצורך לעשות פשרות, הם בלב העשייה ההנדסית. כל אלה בעיקרם, אינם קיימים במדע, הגם שמדען עשוי להידרש לביצוע פשרות בתכן ניסוי.

השוני המהותי בין תהליכי תכן, עבודתם של המהנדסים, לבין תהליך מדעי, עבודתם של המדענים, מוביל למסקנה שצורת החשיבה של המהנדסים שונה מזו של המדענים (Channell, 2019, p. 6-8). בפועל, לא ניתן ליישם את הידע המדעי כפי שהוא (as is) לתכן מערכות, בין היתר בשל העובדה שתנאי שפה אינם נשוא המחקר המדעי, דבר המחייב את המהנדס לבחון בפרוטרוט את המידה שבה המודלים המדעיים מתאימים למערכת הממשית (Boon, 2011, p. 64). לכן, המדענים אינם נדרשים לפתח מיומנות של טיפול בנושאים אלה. ההבדלים בין הביטויים (4.1) ו-(4.2) מחיישים את האתגרים השונים. זהו אחד ההסברים לכך שהמדע מועבר באמצעות ספרים, וההנדסה מועברת באמצעות ניסיון (Channell, 2019, p. 5). בהנדסה חשוב יותר להגיע למימוש יכולת במועד נדרש, גם אם היא מושגת באמצעות מערכת שאינה מיטבית מבחינה מדעית טהורה (Klein, 1997, p. 341; Ben-Haim, 2005).

אחד ההבדלים בצורת החשיבה שבין מדענים לבין מהנדסים בא לידי ביטוי בבדיחה ידועה על המהנדסים, המתחילים כל דיון בבעיה ב-"נניח ונזניח". בעוד שהידע המדעי נועד לאפשר מיזול של התופעות ברמה העקרונית, הרי שהמהנדסים נדרשים ליישם אותו במערכות ממשיות. יישום זה אינו אפשרי באופן ישיר ומצריך ביצוע הזנחות והתאמות למערכת הנדונה. היכולת של ניסוח שאלה הנדסית, הבנת הגורמים המשפיעים יותר ורק אז פנייה אל המדע, מצריכה מיומנות הנדסית. גם המדענים מפשטים את הבעיות שבהן הם עוסקים, אך רמת הפישוט שלהם הופכת "סוס לכדורי" (ביטוי של פיזיקאים לרעיון של פישוט קיצוני), פישוט שאינו שימושי בהנדסה. במילים אחרות, המודל של המהנדסים צריך לדמות את המערכת, בעוד שהמודל של המדענים צריך לדמות את התופעה (Bulleit et al., 2015).

גם המוטיבציה של המהנדסים שונה לחלוטין מהמוטיבציה של המדענים. ההנחה וההזנחה נדרשות למהנדסים כדי לקבל החלטה, בעוד שהמדענים נדרשים למצוא מודל. האתגר של "נניח ונזניח" הוא להעביר את העולם הממשי לצורה קונצפטואלית המאפשרת טיפול מדעי-מתמטי. על כך נכתב ששיקולים הנדסיים אינם חשובים לניתוח רציונלי (Samuel and Weir, 1999, p. 273). המדענים אינם נדרשים לגישה זו, למעט אולי במקרים שבהם עליהם לתכנן ניסוי, תכנון הרחוק במאפייניו מתכן מערכות. אין ספק שהמדענים אינם לומדים את היבטי התכן על גווניו השונים.

בנוסף להבדל בין צורת חשיבה מעשית של כינון יכולת לבין חשיבה תאורטית של בניית מודלים של הטבע, הרי שעבודת המהנדסים מכילה רכיב יצירתי, אשר לדעת

רבים מהווה את לב ההנדסה (למשל, Aslaken, 2013, p. 119), השונה מאוד מהיצירתיות הנדרשת בעשייה מדעית. לצד ליאונרדו דה-וינצ'י אפשר להזכיר את Engelmeyer שכתב ברוסית לפני כמאה שנים מספר ספרים על חשיבות היצירתיות בהנדסה (Goriunova, 2009). אומנם נכון שתוכניות לימודים רבות בעולם ההנדסה עדיין אינן מציעות פיתוח יצירתיות, אך ברור שפיתוח יכולת זו, ולו בהדגשת חשיבותה, הוא אחד הדברים שיש לעדכן בתוכניות הלימודים של ההנדסה.

### 6.3. מקורות להטיה בתפיסה של היחס בין מדע לבין הנדסה

אם ההבדל בין הנדסה למדע הוא כל כך ברור, על אף הדמיון ביניהם, מדוע בכל זאת רווחת הדעה שהמדענים יכולים להחליף את המהנדסים בעבודתם? מדוע עדיין נתפס המדע כתנאי כמעט בלבדי לעשייה הנדסית? התשובות לשאלות אלה יתנו מענה גם לשאלה מדוע הוראת ההנדסה התפתחה באופן המזניח את ליבו של התהליך ההנדסי המגולם ב- *engineering design*.

אומנם ההכרה בתרומה של המדע להצלחה הנדסית הייתה קיימת בצרפת ובגרמניה עוד מהמאה ה-18, אך הכשרת המהנדסים לא הזניחה את המרכיב האומנותי בהכשרה. ההכרה בחשיבות המרכיב המדעי הלכה וגברה עם השנים, במיוחד בקרב המהנדסים עצמם. כבר עם הקמת בתי ספר להנדסה נחשף עולם ההנדסה למאבקים בין שתי קבוצות עניין: הנוטים לאומנות ההנדסה מצד אחד והנוטים למדעי ההנדסה מצד שני, כפי שהוזכר לעיל, בהקשר להצלחות של Rankine באנגליה ושל Redtenbacher בגרמניה.

בסקירה של התפתחות ההנדסה מציין Picon שחלה נקודת מפנה בתפיסת ההנדסה לאחר מלחמת העולם השנייה (Picon, 2004, p. 427). על מה שמרמז Picon, מפרשים (Crawley et al. (2014, p. 240), שהשינוי שהתרחש לאחר מלחמת העולם השנייה הוא תוצאה של הצלחתו של פרויקט מנהטן, לפיתוח הפצצה האטומית. עם סיום מלחמת העולם השנייה, תחת הרושם העז של הריסת הירושימה ונגסקי, נפוצה הבשורה של הצלחת המדע והתלות בו.

הצלחה זו היא שעודדה תפיסה של ההנדסה כיישום הידע המדעי, כפי שתואר לעיל. על פי תפיסה זו, הידע המדעי הוא תנאי לעשייה הנדסית. דעה זו נאמרה במפורש על ידי מדען ומנהל בכיר, היועץ המדעי של הנשיא רוזוולט במהלך מלחמת העולם השנייה, Vannevar Bush, שהקים את הזרוע הממשלתית של ניהול מחקר יישומי

בארצות הברית (OSRD) והיה ממקדמי פרויקט מנהטן (Boon, 2011, p. 55). אין ספק, כי לפרויקט זה הייתה השפעה משמעותית על דעת הקהל ביחס לתפקידה של ההנדסה בעת הזו.

אלא שגם כאן מתעוררת שאלה, שכן המתבונן בתהליכי פיתוח של הנשק, למשל בספר של (Reed, 2019), יגלה מיד שאומנם נדרשו גילויים מדעיים פורצי דרך להצלחתו של פרויקט מנהטן, אך עיקר האתגר הטמון בו היה הנדסי. אומנם לא נכון לייחס לאדם אחד את השינוי התפיסתי במידה כה נרחבת, אך ל- Vannevar Bush היה מעמד מיוחד. מעמד זה בא לידי ביטוי מפורש בדברים שנכתבו עליו, למשל בביוגרפיה שלו הכוללת רשימה ארוכה של כתביו (Wiesner, 1979), בהקדמה להוצאה מחודשת של ספרו לכבוד 70 שנה להקמת הקרן הלאומית למדע (NSF), שנכתב על ידי Cordova מנהלת ה-NSF בשנת 2020, ובמאמר רטרוספקטיבי על השפעתו שנכתב על ידי Pielke (2010). מאמר זה יצא בכתב העת המכובד Nature לכבוד 65 שנה לכתיבת הדוח המונומנטלי שהכין Vannevar Bush עבור נשיא ארה"ב בסיומה של מלחמת העולם השנייה, Science: The Eternal Frontier. דוח זה היה הבסיס להקמת NSF. בהתבסס עליו התקבעה התפיסה שהמדע הוא הרגל המרכזית בעשייה ההנדסית, ואילו ההנדסה היא זו שמשרתת את המדע.

Vannevar Bush סיים תואר ראשון ושני במתמטיקה בשנת 1913 ותואר שלישי בהנדסת חשמל בשנת 1916. הוא עבד במשך שנים כמפתח מערכות אלקטרוניות, ביניהן רדאר ומרעום קרבה והצטרף כחבר סגל למכון הטכנולוגי MIT בשנת 1919. הוא היה שותף להקמת הוועדה הלאומית למחקר ביטחוני (NDRC-National Defense Research Committee) ועם הצגת הרעיון לנשיא רוזבלט הוא מונה למנהלו. אחת השאלות המרכזיות שנדרש לה הייתה האם תוכל ארצות הברית לפתח פצצה אטומית לפני סיום מלחמת העולם השנייה. Vannevar Bush מינה ועדה שענתה בשלילה. כעבור מספר חודשים הוא מינה ועדה אחרת שענתה בחיוב, וכך ניתן האור הירוק למאמץ המחקרי וההנדסי שניהל Vannevar Bush בעצמו בהצלחה, כנגד כל הסיכויים (פרויקט מנהטן). בדיעבד, אנו יודעים שהערכות הוועדה הראשונה היו נכונות יותר, שכן הסכם כניעת גרמניה היה במאי 1945, מספר חדשים לפני הפלת שתי הפצצות על יפן.

תיאור פועלו של Vannevar Bush לא נועד אלא לסבר את האוזן לגבי המידה שבה יכלו להשפיע דבריו ומעשיו. הוא היה תומך נלהב במחקר טהור המאופיין בהיותו חופשי מ"זיהום" פרויקטלי-יישומי "performed without thought of practical

"ends" (Boon, 2011, p. 55). הוא קידם את הדעה שהתקבלה גם בתעשייה שעל פיה המדע הוא תנאי להנדסה, שההנדסה אינה מביאה חידוש ידע, ושאחריות ה"טכנולוגים" היא ליישם את המדע (Boon, 2011, p. 57). הדים מפורשים לגישה זו הוצגו בכתב העת המכובד Science על ידי Gross (1963), מי שהיה חבר בוועדת היגוי של הקרן הלאומית למדע (NSF), שבו חזר על הנחיצות במדע טהור ועל הצורך להגדיל את חלקו בתקצוב הממשלתי, במיוחד בהשוואה למרכיב ההנדסי. Gross גם מתואר כמי שדחף לכך שאוניברסיטת Duke תיתן עדיפות למחקר על חשבון הוראה.

לצד הקמת NSF קידם Vannevar Bush פעולות שלהן היה אפקט תודעתי לא מבוטל. בגלל מעמדו הרם, הייתה השפעה רבה לדעותיו הן על מקבלי ההחלטות והן על דעת הקהל. כך למשל, הוא החליף את תארי העיסוק של המהנדסים ב-OSRD ל-"מדענים", לכאורה לאחר שראה שמדענים זוכים לכבוד רב יותר (Picon, 2004, p. 427). באופן דומה, שנים מאוחר יותר, ההישג של הנחיתה על הירח נזקף לזכות המדע, בעוד העשייה המדעית שם הייתה מועטה (Channell, 2019, p. 4). כעבור שנים הודה Vannevar Bush שהדבר הביא לנזק הכולל פגיעה בנוער:

"...the business of elevating the scientists to a pedestal probably started with this move, and it has certainly persisted and misled many a youth... Even recently when we sent the first astronaut to the moon the press hailed it as a great scientific achievement. Of course it was nothing of the sort; it was marvelously skillful engineering job" (Ferguson, 1993, p. 157).

האופן שבו התרחש מעבר זה בעשייה הנדסית, שבו עלה מעמדם של המדענים על חשבון מעמדם של המהנדסים שירד, מתואר באריכות בספרו של Ferguson (1993), במאמר של Boon (2011) ובדוח של האגודה הבינלאומית להכשרת מהנדסים CDIO (Crawley et al., 2014). בכתובים אלו מפורט גם כיצד שייכו למדענים הישגים שלא הם השיגו אלא המהנדסים ועל הנזקים שבהצגה מסולפת זו של המציאות. על קיומה של דעה שגויה זו לגבי היחס שבין מדע לבין הנדסה, לא רק בקרב הציבור ובין מקבלי ההחלטות, אלא גם בין המהנדסים עצמם, ניתן ללמוד מספרו של Grayson, המוקדש לתיאור ההיסטוריה של הכשרת מהנדסים בצפון אמריקה. המשפט הבא, הנוגע ללקח ממלחמת העולם ה-II, ממחיש זאת:

"The war highlighted the shortcomings of engineering education, as people trained in physics were better suited to perform many of the tasks of new weapons development" (Grayson, 1993, p. X)

בכל הנוגע לעניינינו, יש בכך חלק מההסבר להזנחת המרכיב האומנותי שבהנדסה בתהליך הכשרת מהנדסים. אופן ההתמודדות של מהנדסים עם פערי ידע ועם גורמי כשל (סעיף 4.7 לעיל) ממחישים את ההבדל המהותי בין ידיעת חוקיות הטבע לבין היישום ההנדסי שלה.

## 7. חברה והנדסה

כבר בימי קדם, השתמשה החברה בעולם ההנדסה כדי לשפר את שרידותה וכדי לשפר את רמת החיים של חבריה ושל נבחריה. סקירה היסטורית מקיפה של היישומים הטכנולוגיים בדגש על ההקשר החברתי מובאת בכרך אנציקלופדי בן יותר מאלף עמודים בעריכתו של (McNeil, 1990). בסקירה זו אפשר למצוא פיתוח מערכות, חומרים ותהליכים מראשית הציביליזציה ועד ימינו, המהווים על פי הגדרת העורך בהקדמה לספרו, "סקירה של צרכי האדם".

האופן שבו עושה החברה שימוש בהנדסה הוא אחד ממאפייני החברה. אפשר לומר שההנדסה היא תוצר לוואי של החברה, והחברה עצמה מעוצבת על ידי ההנדסה. מהנדסים נמצאים בנקודת מפגש של בעלי עניין רבים, ביניהם המשתמשים במערכת המתוכננת, היצרנים, העמיתים השותפים לתכן, המתחזקים, הכלכלנים, והחברה בכללותה. מובן שהתפיסה שעל פיה עבודת המהנדסים מתמקדת בהיבטים טכנולוגיים בעיקר, כמו חישובים וניסויים, היא מצמצמת מאוד. המהנדסים וחבריהם יכולים לנתק במחשבתם את העשייה ההנדסית מהיבטיה החברתיים, אך ניתוק זה יהיה מלאכותי. הקשר יתקיים גם מבלי שמישהו יחשוב עליו. תוכנת הניווט waze, למשל, שפיתוחה הצריך מאמץ הנדסי, נועדה להקל על רבים במציאת נקודת היעד ובבחירת מסלול מיטבי, והיא אכן עושה זאת. אך לצד זאת היא מנוונת את יכולת ההתמצאות של המשתמש בה בקביעות ומחלישה את יכולת קבלת ההחלטות שלו, במיוחד במצבי לחץ. כלומר, להמצאה ולמוצרים ומתקנים הנדסיים יש השפעה חברתית.

### 7.1 מהנדסים בתווך בין החברה לבין המעסיקים

פיתוח מוצר יכול להיות מונע משיקולים של טובת הציבור או משיקולים עסקיים ומשיקולים אחרים. שתי מוטיבציות עיקריות אלו, טובת הציבור ורווח עסקי, באו לידי ביטוי בזמנים שונים בהגדרת ההנדסה של האגודה להסמכת התוכנית להכשרת מהנדסים (ABET, 1998, p. 32-33). בשנת 1986, התקפה גם היום, ההנדסה הוגדרה כמשרתת את טובת האנושות:

*The profession in which a knowledge of the mathematical and natural sciences gained by study, experience, and practice is applied with judgment to develop ways to utilize, economically, the materials and forces of nature for the benefit of mankind (ABET)*



בתקופה מסוימת הוחלפה הגדרה זו בתיאור ההנדסה כמשרתת את הדרישה של בעלי עניין, כפי שהובא לעיל בסעיף 2.1. בכך הסירה לכאורה ABET את האחריות מהמתכננים לענות בעצמם על השאלה של טובת הציבור. זאת בניגוד לציפיותיו של הנשיא רוזוולט בשנת 1936 מהמהנדסים שיציבו את החברה בראש מעייניהם:

"The design and construction of specific civil engineering works or of instruments for production represent only one part of the responsibility of engineering. It must also consider social processes and problems..." (Grayson, 1993, p. 139)

את הדרישה להכשיר את המהנדסים כדי שיבינו את ההשפעה של יצירתם על החברה ועל הסביבה ברמה הגבוהה ביותר הציג מהנדס רוסי מפורסם Peter Engelmeier כבר לפני יותר ממאה שנים (Mitchem, 1998, p. 30).

כאשר בעלי העניין מונעים על ידי טובת הציבור, אין הבדל מעשי בין ההגדרות מנקודת ראותם של המהנדסים. אכן, מרבית המהנדסים מעדיפים לראות את טובת הציבור הצומחת מפועלם על פני נזק לחברה ולסביבה שאליו מתלווה חשבון בנק מנופח. מהנדסים תמיד חיפשו אתגרים טכנולוגיים לטובת הציבור, שאפו לפתור אותם וחשו אחריות כלפי הציבור (Meiksins, 1988, p. 229).

שאיפתם של מהנדסים לפעול לטובת הציבור עשויה לבוא לידי ביטוי בשני אופנים עיקריים. האחד, להימנע מתכן מוצר "גבולי" שבו הנזק לציבור גדול מהתועלת. השני, בכיצוע אופטימיזציה של התכן תוך הבאת טובת החברה בחשבון. כל תכן כרוך במתן מענה לדרישות תכן מתחרות. למשל, ביצועי המערכת מתחרים עם עלותה. שניהם מתחרים עם איכות, אמינות, ובטיחות. התכן צריך לבטא אופטימיזציה של דרישות אלו. בהתבוננות צרה נראה הצורך באופטימיזציה כפשרה, אך בראייה רחבה הוא מיטוב.

ברמה שמעל למוצר עצמו, נדרשת גם אופטימיזציה המתחשבת בעלות התפעול, באיכות הסביבה ובגריטה שלה. ברמה גבוהה עוד יותר נדרש להתחשב בהשפעת המערכת על אופי החברה ועל שלמותה בכללותה. הגישה הסוציו-טכנולוגית לתכן מעודדת עריכת אופטימיזציה ברמה גבוהה זו, הכוללת גם חשיבה לטווח רחוק. היא דורשת מהמהנדסים לא רק להשפיע על החברה כתוצאת לוואי בלבד אלא להשפיע עליה באופן יזום המכוון נכון. על המהנדסים להיות יזמים חברתיים ולא רק יזמים כלכליים.

היכולת של מהנדסים לממש אופטימיזציה בכל אחת מהרמות תלויה במידת החופש שיש להם לבצע אותה. במאות ה-18 וה-19 אכן היו המהנדסים בעמדת ניהול, עובדה שאפשרה להם חופש החלטה ברמה גבוהה (Meiksins, 1988). מסוף המאה ה-19 ואילך פשטה, בעיקר בצפון אמריקה, התופעה של ניהול בידי בוגרי בתי ספר לניהול (business school). התופעה התפשטה גם לאירופה והתעצמה עם צמצום היקף חברות קטנות ועם יצירת תאגידים. במהלך תהליך זה איבדו המהנדסים במידה רבה את מעמד הניהול. מקרה מפורסם המדגים תהליך זה הוא פיטורי Arthur Davis בשנת 1923 מראשות Reclamation Service by Interior Secretary Hubert Work בנימוק שנדרש איש עסקים בתפקיד (Meiksins, 1988, p. 225). זו גם דוגמה לאופן שבו מעוצבת דעת קהל בנושא.

היות המהנדסים כפופים למנהלים אינה יוצרת בהכרח ניהול עניינים. הניהול נוצר כאשר, מסיבה כלשהי, המנהלים שואפים למטרה שונה מזו שאליה מכוונים המהנדסים, דהיינו העדפת אינטרס צר של הארגון העסקי על פני השפעות על החברה אשר לה מספקים את המוצר. ההבדל בין המטרות אינו בא, בדרך כלל, לביטוי באופן מפורש אלא בדקויות של האופטימיזציה שבין השיקולים השונים. מה יכולות להיות המוטיבציות של המנהלים שהן כה שונות מהמוטיבציה של המהנדסים?

אומנם לא רבים עוסקים בשאלה זו, אך בין אלו שכן עוסקים בה, מוסכם שהסיבה המרכזית לפער זה במוטיבציה נעוץ בחברה המערבית במאה ה-21 המושתתת על עקרונות קפיטליסטיים (Christinsen et al., 2019, p. 4). באופן עקיף התייחסו לכך Munns and Bjeirmi (1996), בדבריהם בהקשר לכשל פרויקטים והמטרות השונות של מהנדסים ושל מנהלים כפי שהובאו לעיל בסעיף 4.2. לא כאן המקום להרחיב ולהעמיק בנושא טעון זה, אך בכל זאת נשתדל להבהיר את העניין.

הקו המנחה של רבים מבתי הספר לניהול בעולם הוא כלכלת שוק חופשי המיוסדת על היגיון קפיטליסטי (capitalist reason). בבתי ספר אלו לומדים לא רק כיצד לחשב עלויות ורווחים אלא כיצד לקבל החלטות כדי למקסם את הרווחים של המשקיעים (בעלי המניות). השיקול המוביל בקבלת החלטות הוא כלכלי. זהו "ערך" עליון ברמה המקבילה ל"דת". מרמז על כך הביטוי בו השתמש לאחרונה פרופ' אורי קירש ממוסד שמואל נאמן "חסידי הגישה הקפיטליסטית" (קירש, 2018, עמ' 8).

אומנם רווח עסקי לא חייב להיות על חשבון הציבור, אך ההיסטוריה מוכיחה שקיימת אפשרות כזו, אשר אכן במקרים רבים מנוצלת, אם באופן חבוי מעיני הציבור ואם באופן גלוי לו. כך למשל, רק אחרי ש-Meyer London, יהודי מהגר,

שמשום מה דאג לציבור העובדים, ערך מאבק עם המעסיקים בניו יורק בתחילת המאה ה-20, והצליח להוביל לירידה במספר שעות העבודה ביום מ-16. בדיעבד, אפשר לומר שהרווח הכלכלי מנע מהמעסיקים את תחושת האמפתיה לעובדים, החשובה גם להם עצמם בראייה לטווח רחוק.

אפשר להמחיש את האופן שבו הרווח העסקי בקפיטליזם קיצוני (deregulated capitalism) מקריב את טובת הציבור. למשל, תמחור השירות (במקצועות מסוימים) נעשה על פי אחוז מסוים מהעסקה, ותמחור מוצרים רבים נעשה על פי מוכנות הצרכן לשלם ולא על פי עלות המוצר בתוספת רווח סביר. שיטה זו מאפשרת לנצל נקודות חולשה או רגעי משבר של הצרכן. ככל שהצרכן חלש יותר, כך הוא חשוף יותר לניצול מעין זה. תופעה זו מגדילה את הפערים בחברה ופוגעת בה עצמה. לכן, קפיטליזם שאינו מנוהל פוגע בחברה (למשל: Franzini et al, 2016; Sapelli, 2019; Piketty, 2014).

אלפי שנים לפני שנכתבו ספרים מודרניים אלו כתב אריסטו שכל חברה מורכבת משלוש שכבות: אליטה, בינוניים ועניים. הוא מסביר מדוע כדאי שרוב החברה תהיה שייכת לבינוניים, ושמנהיגי החברה יבואו מקבוצה זו:

"One who is excessively handsome, excessively strong, excessively well born, excessively rich, or who, conversely, suffers from abject poverty, abject weakness, abject lowliness of birth—such a man, I say, finds it difficult to obey the voice of reason." (Aristotle, -320)

לא צריך להיות פילוסוף או פסיכולוג כדי להבין שיש אמת בדבריו של אריסטו, ולראות את הקשר של דבריו להנהגת החברה על פי שיקולים קפיטליסטיים. ניתוח עומק של קבוצת חוקרים מאיטליה, Franzini et al. (2016), מראה שהטענה ש"העשירים הם עשירים לטובת הציבור" היא סיסמה ריקה.

דוגמה למנגנון שבו השיקולים הכלכליים פוגעים בחברה ניתן למצוא בדוח של "מוסד שמואל נאמן" הדן במדיניות ובאסטרטגיה של מדינת ישראל להשקעת הון ממדינות זרות (מוסד שמואל נאמן, 2019). דוח זה מדגים מצבים שבהם החשיבה הכלכלית המעדיפה את הרווח בטווח הקצר אינה לתועלת החברה בטווח הרחוק. כך שגם אם ההשקעות נראות ככדאיות, כדאיות זו מתגמדת ביחס לנזקים פוטנציאליים בטווח הרחוק, כלכליים או אחרים. כלומר, לא ראוי לחברה לנהל את עסקיה על בסיס כלכלי בלבד. שיקולים דומים פועלים גם ברמה האישית. לפעמים

כדאי לקנות מוצר יקר יותר מתוצרת "כחול לבן" גם אם הוא איכותי פחות. זוהי אופטימיזציה ברמה הגבוהה יותר.

הפיצול שקיים בפועל לעתים בין המנהלים לבין המהנדסים עלול ליצור מערכת הנוגדת את טובת הציבור. פיצול זה מאפשר למנהלים לטעון שהיבטים מקצועיים אינם באחריותם, בעוד שבמציאות הם אלה שהכניסו את המהנדסים לסד שלא אפשר להם לפעול על פי אמות המידה החברתיות או ההנדסיות, שעל פיהן רצו לפעול מלכתחילה. ניגוד זה צף לתודעת הציבור בתקלות ובתאונות הנדונות בבית משפט שם נדרש השופט להכריע בסוגיות. אלא שלמנהלים רבים יש טיעון מוכן מראש למצבים אלו: "שָׁאָא יִדְבְּרוּ אִישׁ אֶת רֵעֵהוּ שְׁפַת הַלְקוֹת כָּלֵב וְלֵב יִדְבְּרוּ:" (תהלים יב, ג). כלומר, ניסוח "חלק" של דברים מאפשר להם את התמרון הנוח להם. על גישה זו הצביע צוות החקירה של התרסקות קולומביה, התנהגות שכונתה "דיבור כפול" (double speak). מותר ואף נדרש לערוך התאמה בין הגישה המושלמת, "האידיאלית", לבין המקרה הנדון והאילוצים הספציפיים. זוהי "תפירה" של תהליכים ועקרונות המתאימים לתכן מעבורת אבל לא למשל, לתכן מקררים. אלא שאסור לעשות "תפירה" זו מבלי להכיר את התהליך המושלם, את חשיבות השלבים שלו, ולשקול לגופו של עניין את מחיר הוויתור על תהליכים מסוימים כמתבקש מהמקרה.

את ההתנגשות בין גישה הנדסית לבין גישה ניהולית המחישו Christensen et al. (2019, p. 527) באמצעות בקשה שהופנתה אל Robert Lund, מהנדס בכיר בחברה שאחראית לתכן וייצור מכלי הדלק למעבורות. בפגישה שבה הוחלט על שיגור המעבורת צ'לנג'ר נתבקש Lund "להסיר את הכובע של מהנדס ולחבוש את הכובע של מנהל". החלפת הכובעים הובילה למתן אישור להמראה. עצם הפנייה אל Lund במונחים אלו מגלה שרבים מכירים את הפער שבין שני הכובעים, של המנהלים ושל המהנדסים, והניסוח של הפער באמצעות משל מסגיר את עומק ההבדל אותו קשה לנסח במילים, על אף היותו ברור ומוכן.

בתנאים אלו עלול להיווצר ניגוד בין האופטימיזציה שהמהנדסים היו רוצים לערוך על פי המחויבות המקצועית שלהם לבין דרישות המעסיקים (Mitcham, 2019, p. v). בקרב מהנדסים רבים, לעיתים יוצר מצב זה התנגשות בין הערכים המקצועיים של הנדסה לטובת הציבור לבין המוטיבציה העסקית המרכזית – רווח כלכלי (Meiksins, 1998, p. 221). דוגמה טיפוסית לכך היא תכן שבו ניתנת העדפה לרווח כלכלי בטווח הקצר על חשבון איכות המוצר (Meiksins, 1988, p. 229).

אפשר להצביע על שלושה נזקים ברורים לחברה בתנאים אלו: אי-ביצוע הדבר שנכון לעשותו מבחינה הנדסית וחברתית, פגיעה בתדמית המהנדסים אשר כציבור זואגים לחברה, ואי-לימוד לקח וקלות ראש המתלווים לניתוק שבין קבלת החלטות לנשיאה באחריות.

על דעת הקהל השלילית על מהנדסים, שמתפתחת בטעות אפילו בין אנשי מקצוע בעולם ההנדסה, אפשר ללמוד ממאמר הדין באתיקה הנדסית (Kreiner et al., 2004). המאמר מדגים את החשיבות של הוראת אתיקה למהנדסים באמצעות מספר דוגמאות של כשלים מפורסמים, כמו שתי המעבורות שהתרסקו. ידוע זה מכבר שההתרסקות של המעבורות התרחשה לא בגלל חוסר אתיות של המהנדסים, ואפילו לא בגלל חוסר המקצועיות שלהם, אלא בגלל אתיקה ניהולית בארגון (או בשל היעדרה).

הבעיה אינה התחושה הלא נוחה של המהנדסים. הבעיה היא של החברה. זוהי אם כן השאלה של האופן שבו בוחרת החברה את נציגיה במגזר הציבורי ומצמיחה מנהלים למגזר הפרטי, שיהיו בעלי אוריינטציה חברתית. זוהי שאלה של מיהו העומד בפתח ושומר על אינטרס החברה. לחץ לתנועה בכיוון זה התפתח בשנים האחרונות במסגרת ניסוח "המשולש" חברה-כלכלה-סביבה (TBL-Three Bottom Lines). לפי גישה זו, בוחנים ארגונים את עצמם לפי שלוש אמות מידה מערכתיות: האחת – תרומה לרווח הכלכלי של הארגון, השנייה – תרומה לקיימות, והשלישית – תרומה לחברה/קהילה אליה מסופקים המוצרים והתהליכים שהארגון מפתח ומייצר. בארגונים הנוקטים בגישה זו ההחלטות מאוזנות יותר משום שהארגונים מיישמים תפישת עולם מערכתית שאליה מתלווה אופטימיזציה ברמה גבוהה וגם בעקבות שילוב שיקולי האימפקט בטווח הקצר (רווח כלכלי) לצד שיקולי אימפקט בטווח הארוך (קיימות וחברה).

## 7.2. אתיקה ואחריות מקצועית בהנדסה

מתיאור מרחב הפעולה של המהנדסים וממוטת ההשפעה של ההנדסה על החברה עולה בבירור שההנדסה היא יותר מאשר משלח-יד (occupation) ומיצובה הוא של מקצוע (profession), והוא אנלוגי למקצועות דוגמת רפואה. העיקרון המייחד של מקצוע ההנדסה הוא הבסיס ההכרחי של מיומנות וכישורים כמצופה בכל משלח-יד, כאשר מעבר לו יש לבעל המקצוע אחריות לחברה, הקשורה בשיקול דעת ובמחויבות אתית, שהיא מעבר למחויבות אתית אישית שבין אדם לחברו. אתיקה הנדסית היא "אתיקה שימושית" שנועדה להציב כללים, בשונה

מחוקים, שלאורם יפעלו מהנדסים, בכל הקשור לאחריות המקצועית שלהם לגבי הגורם שעבורו הם מתכננים ומבצעים (מזמיני העבודה והגורמים המעסיקים אותם), אבל גם עבור החברה (society) במובן הרחב ביותר של המילה, הכוללת את האזרחים ואת הסביבה שיכולים להיות מושפעים ממעשיהם, באופן ישיר או עקיף. בחלק אחרון זה יש למהנדסים תפקיד של "נאמן של הציבור".

המאפיינים של מקצוע באופן כללי (profession) מכילים מספר מרכיבים שמאפיינים גם את מקצוע ההנדסה (Fleddermann, 2012):

- פעילויות מקצועיות שבאופיין אינן חזרתיות וניתנות למיכון, הדורשות כישורים ומיומנויות מורכבות, הפעלה של שיקול דעת, תבונה וזהירות.
- צורך בבסיס איתן של לימודים פורמליים, שהם מעבר להשתלמויות והתנסויות מעשיות.
- התאגדות במסגרת ארגונים מקצועיים של בעלי המקצוע לקבוע תנאי סף וסטנדרטים.
- התוצרים של הפעילות המקצועית שהם לרוב מוצרים המשרתים את הציבור (public goods)

על רקע מאפייני המקצוע הללו, המחויבויות של המהנדסים מוצאות ביטוי הולם בציטוט של המדריך של האגודה המלכותית הבריטית למהנדסים (The Royal Academy for Engineers, 2011):

"Engineers invent the future and their work affects the lives of millions of people, for better or worse. That raises enormous ethical issues in every branch of engineering, from computing through biotechnology and energy to civil and aeronautical"

התפקיד של "נאמן הציבור" עולה בקנה אחד עם האופי של תוצרי המהנדסים, שגם אם הם מבוצעים עבור גורם עסקי, יהיו במרבית המקרים תוצרים ומוצרים המשרתים את הציבור (public goods). אלה יכולים להיות מוצרים גדולים וציבוריים דוגמת גשרים ומבני תחבורה, או מוצרים קטנים ואישיים כמו טלפון חכם. בכל המקרים, תכנון וייצור שאינם עומדים ברמה הנאותה, עלולים לפגוע ביעילות של התוצר על כל המשתמע מכך מבחינת הפגיעה בציבור. התמוטטות של מבנים או דליקות של סוללות בטלפון חכם מעידים על חשיבות ההיבטים הבטיחותיים, מהבחינה הציבורית והאישית כאחד, במגוון הרחב של מוצרים.

מכאן, שאתיקה של מהנדסים קשורה במיצוב של ההנדסה כמקצוע המתאפיין בעצמאות מקצועית, דהיינו במקצוענות (פרופסיונליות). לכן, לכך יש משמעות גם למעמד המקצוע וגם למעמד המהנדסים בחברה, שלא ייתפסו כ"בורג" במכונה או כ"טכנאי" הנותן שרותי תכנון וביצוע נקודתיים, דהיינו שייחשב כמעמד דומה לזה של רופא על כל המשתמע מכך (The Royal Academy of engineers, 2011; Harris et al., 2009; Unger, 2017).

היישום של אתיקה הנדסית הוא מעל ומעבר לאתיקה אישית ויש לו משמעויות מרחיקות לכת לגבי מעמדו ותפקידו של המהנדס בחברה (society), תפיסה ההולכת בד בבד עם מחויבותו לפעול ב"ראש גדול". נושא זה היה מרכזי בהקמתם ובהפעלתם של איגודי מהנדסים בתחומי ההנדסה השונים. אחת ממטרותיהם החשובות של האיגודים הללו היא קביעת כללים לאתיקה. האתיקה משקפת ראייה של המהנדסים כשומרי הסף של המקצועיות (פרופסיונליזם) במקצוע, להבדיל מאיגודי עובדים שתפקידם בעיקר להבטיח תנאי שכר ותעסוקה. עם זאת, יש להביא בחשבון שיש קשרי גומלין בלתי ישירים בין האיגוד המקצועי לארגון העובדים, כי מעמד פרופסיונלי גבוה יותר של המקצוע, שהוא בתחום פעולתם של איגודים מקצועיים, יכול לסייע באופן עקיף למאבקים של ארגוני עובדים.

על רקע זה, פיתחו איגודים מקצועיים קודקסים מנחים בנושאי אתיקה הנדסית, והם מתעדכנים כשחלות התפתחויות תרבותיות ומקצועיות. העקרונות עבור תחומי ההנדסה השונים הם דומים, ויש להם מכנה משותף רחב, למרות שלאיגודי מהנדסים שונים יש קוד אתי ספציפי משלהם, לדוגמה (American Society of Mechanical Engineers) ASME, (Association of Civil Engineers) ASCE, (Institute of Electrical and Electronic Engineers) IEEE, (American Association of Mechanical Engineers) ASME.

מכנה משותף לעקרונות האתיים של האיגודים השונים נמצא במסמכים של ABET (2019), שהוא הגוף האמריקאי לרישוי של תוכניות לימוד והכשרה של מהנדסים:

- מהנדסים יפעלו כשבראש מעייניהם הבטיחות, בריאות וטובת הציבור, תוך שמירה על עקרונות של פיתוח בר קיימא.
- מהנדסים יפעלו ויתנו שירותים רק בתחומם המקצועי.
- מהנדסים יתנו הצהרות לציבור אך ורק תוך שמירה על אובייקטיביות ועל האמת.

- מהנדסים יפעלו במסגרת המעסיק שלהם או הלקוח שלהם כ"סוכן נאמן" ויימנעו מניגודי עניינים.
- מהנדסים יפתחו את המוניטין המקצועי שלהם על פי איכות התרומה שלהם ולא יתחרו באופן לא הוגן.
- מהנדסים יפעלו באופן שישמור על היושרה והמכובדות של המקצוע ההנדסי עם אפס סובלנות לרמאות, לשוחד ולשחיתות.
- מהנדסים ימשיכו בהתפתחות המקצועית שלהם במהלך כל הקריירה שלהם ויתנו הזדמנויות להתפתחות מקצועית של המהנדסים הפועלים תחתיהם ("לימודים כאורח חיים").

עקרונות אלה באים לידי ביטוי בהיבטים המעשיים הבאים:

האחריות של מהנדסים היא לא רק לצדדים המקצועיים הישירים של תחומי פעילותם אלא גם להיבטים רחבים יותר שיכולים להשפיע על הבטיחות, על הבריאות ועל טובת החברה, וזאת מתוך ראייה של תפקידם של המהנדסים גם כ"נאמן של החברה".

האחריות של המהנדסים היא לשיפור מתמיד בידע, במיוחד בידע המקצועי, העברת הידע ושותוף בניסיון שלהם ומחויבות למוסדות שבהם התחנכו.

המחויבות לחברה (society) גוברת על המחויבות למעסיק או ללקוח, כאשר אלה אינם פועלים על פי הנחיות המהנדסים ובכך מסכנים את הציבור. במצבים אלו על המהנדסים לייעץ ולידע את הלקוח או את המעסיק על המשמעויות של הסיכונים של פעולותיהם בכל הקשור לבטיחות, לבריאות ולטובת הציבור ולהבטיח שהמעסיק או הלקוח פועלים לפי עצות המהנדסים – מחויבות לא רק להגן על הציבור אלא גם לפעול אם הוא נוכח שגורם אחר מסכן את הציבור.

כדי לקיים את כל אלה, נדרשים המהנדסים לפעול מתוך הלך מחשבה (state of mind) של "ראש גדול", שמחייב אותם לתת את דעתם על ההיבט הרחב של כל מטלה מקצועית, שהוא עולה על המחויבות למטלה הטכנית המוגדרת, ולבחון מתוך ביקורת עצמית את השלכותיה לתחומים הקשורים בה. במלים אחרות, הבחינה של כל נושא שבו המהנדסים אמורים לטפל היא מתוך ראייה מערכתית, בין אם הגישה המערכתית קשורה בממשק עם גורמים אנושיים אשר בטיחותם יכולה להיות בסכנה, בין אם היא קשורה עם גורמים סביבתיים שהקיימות שלהם



תהיה בסכנה, ובין אם היא קשורה עם גורמים פיזיים, חומרה או תוכנה שיגרמו לכשל הנדסי.

גישה מערכתית כזו היא זו שיכולה לאפשר למהנדסים לעמוד במחויבות לאתיקה הנדסית, ובו בזמן יכולה להבטיח את המקצוענות שלהם ובכך לבסס את המעמד והמוניטין המקצועי של מקצוע המהנדס. במילים אחרות, אין סתירה בין אתיקה והמקצוענות האישית, אלא להיפך – זה מחזק את זה, תוך סינרגיה ביניהם.

יש לעשות הבחנה בין אתיקה לחוק (Fleddermann, 2012). מהלך מסוים יכול להיות חוקי, אך לא אתי. למשל, תכנון תהליך המשחרר חומר רעיל לאוויר שאין לגביו מגבלה חוקית. המהלך הזה הוא חוקי אך הוא אינו אתי. במקרה זה, למרות שאין מגבלות חוקיות לפעולה, על המהנדסים להפעיל את שיקול דעתם ולבחון ביוזמתם האם החומר המשוחרר הוא רעיל במידה המסכנת את הציבור, למרות שהמחוקק לא קבע הגבלות לכך. זו דוגמה שבה המחויבות לציבור, כנאמן ציבור, גוברת על המחויבות למזמין העבודה. המצב גם יכול להיות הפוך, כאשר החוק מגביל שחרור של חומר רעיל זה, אך החוק נקבע לפני שנים, ובינתיים התקבל מידע שאין סכנה בחומר זה. תהליך שישחרר חומר זה אינו חוקי, אך הוא אתי. הדוגמה הזו מבחירה גם את האמירה שעל המהנדסים לפעול ב"ראש גדול", ושילוב של חשיבה כזו עם שיקול דעת הוא מהותי בקיום הקוד האתי של ההנדסה.

האחריות של המתכננים לשלומם של המשתמשים במערכות שתכננו והאחריות החברתית והסביבתית שלה הם מחויבים מתוארת על ידי Harris (2008). לדעתו של Harris, אחריות זו לא יכולה להיות מוגנת באמצעות חוקים ותקנות אלא באמצעות ערכים אתיים (Virtue ethics), ומכאן גם החשיבות של החינוך לאתיקה בהכשרת מהנדסים.

ההתפתחות של האתיקה ההנדסית היא תהליך שהתחיל להתגבש בסוף המאה ה-19, על רקע של מאמצים לאגד את כלל המהנדסים באגודה אחת (Layton, 1971, p. 45-46). המחשבה המובילה אז הייתה שבאמצעות אתיקה מקצועית, לצד תקנים הנדסיים, הכשרה אחידה ורישוי, ניתן יהיה לאחד את האגודות ההנדסיות המקצועיות לכדי אגודה מרכזית אחת. הקודקסים האתיים התפתחו והתעדכנו על רקע ההתפתחויות הטכנולוגיות והחברתיות ובעקבות בחינה ביקורתית של כשלים שהתרחשו מדי פעם. בולטים בהם, הם התמוטטויות של גשרים, שהיו הכוח המניע להקמת האגודה האמריקאית להנדסה אזרחית בסוף המאה ה-19, וכשלים של העת האחרונה, שאחד הבולטים בהם הוא הכשל שגרם להתפוצצות חללית הצ'לנג'ר. מקור הכשל בבעיה באחד האטמים (טבעת O), שהייתה ידועה לפני

ההתפוצצות, אך לא טופלה כראוי. המהנדסים אשר ייצרו את האטמים לרקטת ההאצה הזהירו שתפקודם יכול להיפגע כאשר טמפרטורת הסביבה נמוכה והמליצו לדחות את השיגור בגלל תנאי הטמפרטורה. המלצתם לא התקבלה על ידי הדרג הניהולי שמעליהם, שגם הוא היה בעל הכשרה הנדסית, אבל לדעתו לא היו די נתונים להצדקת חשש זה. כלומר, ההמלצה של הדרג הניהולי התנגשה עם ההמלצה של הדרג המקצועי-הנדסי. כידוע, אסון החללית התרחש בגלל סיבה זו, עמידות אטם הגומי. הסוגיה האתית שבכשל היא האם היה על המהנדסים להמשיך להיאבק בעניין ולהציף את חששם בפני הדרגים הגבוהים יותר או בפני המשתמשים הישירים במערכות שתכננו. החבות האתית של המהנדסים כלפי מי שמשתמש במתכונים שלהם פגה כאשר השמיעו באופן ברור את הסתייגויותיהם בפני בעלי העניין ודעתם לא התקבלה על ידי מקבלי ההחלטות. תרגיל מחשבתי מעניין הוא מה היה קורה אילו המהנדסים של נאס"א היו משתפים את האסטרונואוטים בחששות שלהם לפני ההמראה, פעולה שאולי לא הייתה אתית כלפי המנהלים. האם האסטרונואוטים היו משיבים, כפי שטענו המנהלים שלהם, שלטוס לחלל זה מסוכן וממריאים על אף הזהרות המהנדסים?

האתיקה ההנדסית הולכת בד בבד עם האחריות ועם המחויבות (accountability) הנדרשות מהמהנדסים. אתגר מיוחד למימוש כל אלה הוא אופי הפעולה ההנדסית המבוססת על שרשרת שבה מעורבים מהנדסים בעלי התמחויות שונות:

- ייזום
- תכנון
- ביצוע
- שימוש

שרשרת כזו קיימת כמעט בכל מוצר הנדסי. מטבעה, קיים בה פיצול הבא לידי ביטוי במספר גדול הן של דיסציפלינות והן של פונקציות, ולא בכל מערכת או מתקן יש צלע יעילה המקשרת ביניהן. אם המוצר הוא מכונית, הרי שהיצרן אחראי על כל השרשרת, החל ביוזמה ועד לתחזוקה בשימוש, גם אם הוא נעזר בגורמי משנה, מחוץ למערכת שלו. אם מדובר בבנייה, המצב מורכב הרבה יותר, מאחר שכאן מעורבים בעלי עניין רבים: יזמים, משתמשים, מתכננים, קבלנים, קבלני משנה בתחומי מקצוע ספציפיים, ספקים, יצרני רכיבים, יצרני חומרים ועובדים. כמו כן, ישנם תהליכים מגוונים כמו: תכן אדריכלי, תכן הנדסי, היתרים, ביצוע, ממון, תפעול,

אחזקה, כאשר כל בעל עניין מופעל על ידי בעלי עניין אחרים המנסים להסיט את האחריות המקצועית ואת הסיכונים הפיננסיים מאחד לשני.

בכל אחד מהשלבים הללו מוטלת אחריות על המהנדסים לחשוב באופן מערכתית כדי לבחון כיצד המשימה, שהם מתכננים או מבצעים, משפיעה על שאר בעלי העניין. כנאמנים של הלקוחות ושל הציבור, עליהם לתת את הדעת על נקודת המגע והחיכוך בין בעלי העניין השונים בשלבים השונים של המשימה. החשיבה המערכתית היא מרכיב חשוב במקצוענות של המהנדסים ומחובתם לעמוד על המשמר ולהזהיר כשהתוצאות הצפויות אינן עולות בקנה אחד עם העקרונות האתיים של המחויבות הציבורית, גם אם הלקוח או הנסיבות יוצרים לחץ בכיוון זה. בדרך כלל, העדר מקצועניות בהיבטים אתיים אלה מסתיים בתפקוד לקוי של המוצר, כמו למשל: חלקים לא מתאימים, קשיי מימוש התכן הבאים לידי ביטוי באי עמידה בלוחות זמנים ובתקציב, משך החיים של המוצר קצר יותר מזה שעליו הוצהר וצורך בתיקונים תכופים יותר וכיוצא באלה. במקרים קיצוניים יותר, הרי שהעדר המקצוענות מסתיים בכשל עם נפגעים בנפש, הרוגים ופצועים. אירועים קיצוניים אלו מובאים לפתחו של בית המשפט לבירור אחריות פלילית, שם יוצאות לאור בדרך כלל נקודות התורפה הללו. ברוב המקרים לא מדובר במעשים שנובעים מכוונה רעה או מבצע כסף, אלא "רק" מהעדר מקצוענות "נטו".

הקוד האתי נועד לשמש כמנחה וכמדריך למהנדסים, כדי שיוכלו להפעיל את שיקול דעתם ואת ההכרה במחויבות שלהם כ"נאמני הציבור" וימנעו כשלים תוך שהם מפעילים "ראש גדול" ונותנים את דעתם לא רק על המשימה שבאחריותם הישירה אלא גם על האינטראקציה שלה עם כלל המערכת שבמסגרתה הם פועלים. בשונה מהחוק, אין לאתיקה הנדסית כללים חד משמעיים, משום שעבודת המהנדסים אינה כרוכה במשימות החוזרות על עצמן אלא בפעילות חדשה בכל פעם, המחייבת יצירתיות.

למרות החשיבות של אתיקה כשומר סף של החברה, במקרים רבים, ההסתמכות עליה אינה מספיקה.

מאז שנת 2000, מהווה הוראת האתיקה המקצועית אחת מדרישות ההסמכה של תכניות הלימודים בהנדסה בארצות הברית ( Mitcham and Briggles, 2009, p. 1173). הוראה כזו מניחה כי ידיעת הכללים של האתיקה והבנת חשיבותם תאפשר למהנדסים ליישם אותה. לא מסובך ללמד את כללי האתיקה המקצועית אך עשוי להתעורר קושי לגרום ליישומה.

הקושי הראשון נובע מהבדלים בין אתיקה הנדסית לבין אתיקה עסקית. הבדלים אלו תוארו בהרחבה על ידי Davis (2019, p. 29) ועל ידי Raelin (1986) כהבדלים בין שתי תרבויות שונות. הקושי השני נעוץ בנטייתו הטבעית של האדם להעדיף את הנוחות האישית שלו ואת הרווח שלו. נטייה זו משותפת למהנדסים ולמנהלים ופועלת כנגד הידיעה הברורה של כללי האתיקה, ולכן מקשה על יישומה. שני הגורמים, הגישה העסקית והנטייה האנוכית, מקשים על המהנדסים לערוך את האופטימיזציה שבה ניתן המשקל הראוי לטובת החברה (society).

את היעילות הנמוכה של הוראת האתיקה, הנראית לעיתים כיציאה לידי חובה, מתאר Abaté (2011). חוסר יעילות הוראת אתיקה בבתי ספר לניהול מתואר ע"י Cordeiro (2003). הוא מתאר גם את חוסר היעילות בהיבט של קביעת קודים אתיים בארגון וגיוס עובדים אתיים המתיישרים עם הזמן עם חוסר האיתיות של הארגון, בארגון שבו התרבות הארגונית אינה איתית. המגבלה של הישענות על הצהרה מפורשת ופורמלית לערכים אתיים והאכזבה מאי יישום האתיקה הנלמדת בכיתה בהקשר של תהליכי ניהול מתוארת על ידי Griseri (1998). בין הגורמים המכשילים את יישום האתיקה הוא מונה את הצביעות וההתחסדות המונעות שיח ציבורי אמיתי (Griseri, 1998, Ch. 12). אפילו המעבר מ-"אתיקה" ל-"אתיקה ערכית" (virtue ethics) לפני כמה עשרות שנים לא פתר בעיה זו של הרכשת ערכים (הקנייה באופן שיירכשו) באמצעות הוראה בכיתה (Harris, 2008). כחלק מהניסיון להתמודד עם אתגר זה של הקניית אתיקה מקצועית דיווחו Génova and González (2016) על סדנאות מיוחדות לסטודנטים באתיקה מקצועית.

עוצמת המתח בין ערכי האתיקה של המהנדסים לבין הלחץ הכלכלי-התאגידי נדון בהרחבה על ידי Raelin (1986) ולאחרונה על ידי Conlon (2019) ו-Davis (2019). לדעת Conlon, הקפיטליזם מייצר סביבה המקשה על המהנדסים ליישם את כללי האתיקה המקצועית שלהם (Conlon, 2019, p. 49). לכן, לא ניתן לבוא בטענות אל המהנדסים על כניעתם ללחץ המנהלים, כניעה המובילה לתכנן מוצרים אשר באופן כלשהו פוגעים בטובת הציבור. לדעתו של Conlon, הגישה העסקית-קפיטליסטית השלטת היום מחלישה את תרבות הבטיחות בארגון, מסבכת את הבנת תחומי האחריות, מגבילה את המשוב על איכות העבודה, מקשה על הבקרה על איכות העבודה ומעודדת "עיגול פינות" בתכן ובייצור ללא שיקול מושכל. המציאות הרווחת היא לעיתים כניעה של מהנדסים לאנשי עסקים (Meiksins, 1988, p. 220), מצב שתואר על ידי Davis (2019, p. 32) כהתנהלות שבה מהנדסים הם כ"שבויים" (captivity of engineers). מהנדסי NASA העידו על חוסר היכולת

של מהנדסים לעמוד מול מנהליהם הן בהקשר של התרסקות צ'לנג'ר והן בהתרסקות קולומביה (Donovan and Green, 2003).

גם עוצמת המתח בין הנוחות האישית לבין טובת הציבור יוצרת אתגר שלא בקלות מאפשר למהנדסים לממש את מקצוענותם ואת ערכיהם. פעמים רבות לא די לדעת מבחינה הגיונית (רציונלית) מהו הדבר הנכון לעשותו, כפי שאנו חווים בעצמנו יום יום בהקשר לדיאטה או לתענוגים אחרים שאנו עצמנו מנסים להגביל. זו אחת הסיבות לכך שבפרקטיקה הנדסית קיים מנגנון של הפרדה בין העושה לבין הבודק והמאשר. חלוקה זו מתקיימת באופן מוקפד בטיפול במטוסים, בכתיבת דוחות, אישור שרטוטים ובתכן בכללותו. היבט זה של האתגרים שעמם צריכים המהנדסים להתמודד מוסיף ממד נוסף לטענה שהנדסה אינה רק יישום הידע המדעי.

הדרך המוצעת להקל על המהנדסים ליישם את האתיקה המקצועית והלוקחת את טובת החברה בחשבון, היא להקטין את העומס החיצוני והפנימי כנגד האתיקה מצד אחד, ולחזק את האתיקה הטבעה בהם, מצד שני. חברות שמיישמות אחריות חברתית (CSR) יוצרות תרבות ארגונית המחזקת את יישום האתיקה המקצועית. הטיפול בשני הערוצים גם יחד הוא באמצעות שינוי ערכי ברובד החברתי מגיל צעיר (Conlon, 2019; Basart and Serra, 2013) וחינוך להכשרת מנהלים אתיים (Cordeiro, 2003).

מהנדסים אינם בעלי המקצוע היחידים הנדרשים לסוגיה זו של המתח בין היחיד לבין החברה, אשר לא תמיד עולים בקנה אחד. גם עורכי דין יכולים לנוע בין עשיית צדק לנאשם, לבין השאיפה להוציאו זכאי בכל דרך אפשרית. הקניית ערכים בחברה ממילא תכלול גם את המנהלים של המהנדסים וגם את המהנדסים עצמם. הקניית ערכים של מתן משקל לטובת החברה מייצרת את תחושת הערבות ההדדית בין האזרחים ותורמת לבניית חוסן חברתי, חוסן שנדון ב"מוסד שמואל נאמן" מספר פעמים (למשל, כרמית וגל, 2020; Gal and Maital, 2017).

### 7.3 הנדסה מסורתית והנדסה מתקדמת

הנטייה הטבעית של האדם היא לשאוף להתקדם. נטייה זו מבוססת על תחושה, הנכונה פעמים רבות, שעל פיה אפשר להיבנות על הידע הישן ובכך להתקדם. הידע המדעי הוא דוגמה קלאסית לתהליך זה. אך לא כל שינוי הוא התקדמות, לא כל חדש טוב מהישן, ולא כל ישן נס לחו. דבר זה נכון גם בנוגע להנדסה.

לא כל ההנדסה שנעשתה בעבר היא מיושנת ולא רלוונטית. עמדו על כך רבים, כמו Dixon and Duffey (1990). האתגר של כל דור הוא להבחין בין הדברים שעדיין רלוונטיים ואולי להחליפם בעתיד לבין אלו שראוי להחליף כבר בעת זו. הבחנה זו אינה קלה ואולי בשל כך יש נטייה גורפת להחליף הכול.

כפי שראינו עד כה, העשייה ההנדסית עומדת על שתי רגלים – מדעי ההנדסה (engineering science) ואומנות ההנדסה (engineering design). בעולם מודרני מתקדם המושתת על מדע, עולה השאלה מהו מקומם של שני מרכיבי הנדסה אלו. שאלה זו מתחדדת אם מתבוננים בחידושים הרבים בעולם הטכנולוגי והמדעי המביאים איתם עולמות תוכן חדשים כמו ביוטכנולוגיה, ביו-רפואה, מכניקה של חומרים ביולוגיים, אינטליגנציה מלאכותית, ננוטכנולוגיה, הדפסות תלת ממד, מחשבים ומהפכת המידע (כמתואר באיור 5.1 לעיל). לצד אלו השתנו גם כלי התכן של המהנדסים. היכולת החישובית כיום גדולה כל כך, שלא רק שלא נדרש לדעת בעל פה את לוח הכפל, רבים מדברים על חישוב כעל "ניסוי ממוחשב" המייתר לכאורה את היגיעה הכרוכה בהבנת פתרונות אנליטיים ובעריכת ניסויים מוקפדים ויקרים.

לשיטתנו, הן בתחום של הידע המדעי והן באומנות ההנדסה, ישנם מרכיבים חדשים שרצוי ללמוד וליישם, אך ישנם גם מרכיבים שכדאי לשמר. חוקי יסוד במדע, כמו חוקי ניוטון, חוקי תרמודינמיקה, חוקי חוזק, חוקי חשמל, לא צפויים להשתנות ולא הפכו למיותרים גם עם התקדמות המדע והמחשבים.

באופן דומה, גם בתחום אומנות ההנדסה, ישנם מרכיבים חדשים אך ישנם גם מרכיבים שעברו במשך שנים במסורת ההנדסית, והם תקפים גם היום כמו הבנת צרכי לקוח, ניתוח אופני כשל, הפרדת רשויות למניעת ניגוד עניינים, התמודדות עם פערי ידע, ניהול סיכונים ותהליך מובנה של ניהול התכן. זוהי הנדסה מסורתית שמנקודת ראות היום עדיין תקפה בעקרונותיה. יש הרואים באתיקה ההנדסית חלק מהמקצועיות של המהנדסים, בדומה לאבטחת איכות. יצירת התמחות של "אבטחת איכות" לא פוטרת את המהנדסים לעשות עבודה איכותית, כפי שאכן היה לפני עידן אבטחת האיכות. לבסוף נציין, שלא כל המצאה חדשה מהווה בהכרח התקדמות, אפילו המצאות שבמבט ראשון נראות כמהפכה. הדבר בולט בדיעבד בתחום הרפואה וההדברה כאשר מתברר כעבור שנים שדבר מה חדשני בזמנו עושה יותר נזק מתועלת, והדבר נכון אפילו בדברים פשוטים יותר כמו בתכן מבנים.

## 8. סיכום - אימונת ההנדסה המוכללת והשלמה

תיאור עולם ההנדסה שהובא לעיל, לצד חידוד החשיבות של אימונת ההנדסה ושל מקומה בעשייה ההנדסית, מדגיש את התובנות העולות ממנו לגבי מקצוע ההנדסה בכללותו.

### אימונת ההנדסה

התובנה הראשונה היא חשיבות המרכיב הלא-מדעי בעשייה ההנדסית, המכונה engineering design (אימונת ההנדסה) המהווה את הידע המוכלל של ההנדסה (nonspecific/generalized). ידע זה תקף וישים במידה שווה לכל סוגי ההנדסה. תפיסה זו מאפשרת להבין טוב יותר את יחסי הגומלין בין ההנדסה לבין המדע ואת התפקיד החברתי (social) של ההנדסה. הדגש בהצגת הידע המוכלל הוא על עקרונות התכן המסורתי ועל הכלים שלו, הרלוונטיים גם בעולם המודרני ואשר נשתכחו מעט במיקוד על מדעי ההנדסה (engineering science) בשנים האחרונות. כך, "מדעי ההנדסה" הוא אחד הכלים של המהנדסים ואופן השימוש בכלי זה גלום ב-"אימונת ההנדסה".

### רב-תחומיות

התובנה השנייה היא רב-הממדיות ורב-התחומיות של העשייה ההנדסית הכוללת הבנה של הרבדים הרבים של החברה והתייחסות ייחודית לכל אחד מהם. הצגה זו אמורה לאפשר בנייה מותאמת יותר של התוכניות להכשרת מהנדסים. עצם הריכוז של היבטים אלו בכתובים, כפי שנעשה בספר זה, עשוי לאפשר לנוגעים בדבר לדון במפורש בנחיצות הרבדים השונים של ההכשרה ובכך ליצור שיח פורה יותר, גם אם בסופו יוחלט על ידי מי מהגורמים שלא לאמץ את הדרך המוצעת בספר זה.

### שליחות חברתית למקצוע

תובנה שלישית העולה מהספר היא השליחות החברתית-כלכלית של מקצוע ההנדסה ושל המהנדסים, אשר ניתנת למימוש באמצעות חדשנות, יזמות, תכן והנדסה של מוצרים ומערכות למען החברה ולמען קידום עולם מתוקן וטוב יותר ("תיקון עולם"). כל זה משתלב יפה בייעוד השלישי של האקדמיה - תרומה לחברה ולכלכלה המקומית והעולמית (Scott, 2006).

## התמודדות עם פערי ידע ועם כשלים

בספר הנוכחי ניתן דגש מיוחד לתיאור התמודדות ההנדסה עם פערי ידע ועם אי-וודאויות על פי שתי גישות מרכזיות - דטרמיניסטית והסתברותית. בנוסף, מוצגות הגישות למניעת כשלים בתהליכי הנדסה נכונים. שני תחומים אלו מעשירים את מקצוענות המהנדס ומשפרים את תהליך התכן ההנדסי. התקווה של הכותבים היא שהצגה זו של ההנדסה תאפשר לא רק להשלים את הידע של המהנדסים בדרך להפיכתם למקצוענים יותר, אלא אף תיעל את עשייתם באמצעות יצירת שפה משותפת בינם לבין עצמם, בינם לבין המנהלים שלהם ובינם לבין לקוחותיהם. שפה משותפת זו נחוצה במיוחד בתקופה של דרישה לתכן זריז ויעיל הנשען על שילוב של טכנולוגיות רבות ובמציאות שבה פרויקטים רבים נכשלים.

## הצגה שלמה של מקצוע ההנדסה

ההערכה היא שהצגת היבטים מעשיים בעבודתם של המהנדסים לצד הפן הרעיוני-פילוסופי של עשייתם, על רקע ההיסטוריה של ההנדסה, תאפשר למהנדסים להביא לידי ביטוי את מלוא הפוטנציאל שלהם אשר ישוקף לציבור נכונה. שיקוף זה עשוי לאפשר לבני הדור הצעיר לבחור נכון יותר את עתידם המקצועי, ולחסוך בכך לחברה משאבים כלכליים ואנושיים רבים.

## המלצות

כל האמור לעיל, מוביל באופן טבעי למספר המלצות מדיניות, אשר העיקריות שבהן הן:

(1) חיזוק הבניית אימונת ההנדסה בתהליך החינוך וההכשרה. ניתן לשפר את ההכשרה באופן ניכר מבלי לפגוע בהוראת מדעי ההנדסה.

(2) יצירת זיקה בין קבלת החלטות לבין נטילת אחריות ונשיאתה בכל הקשור לעשייה הנדסית.

(3) חידוד ההבדל שבין העשייה המדעית לבין העשייה ההנדסית וכן בין המהנדסים למדענים, במיוחד בכל הקשור להתנהלות עם פערי ידע ומניעת כשלים.

(4) השבת המעמד של המהנדסים לדרגי הניהול ולניהול עצמו, כדי לחזק את המנוע הכלכלי לכיוון של פעולה לטובת הציבור, מתוך ראייה רחבה של תועלות לטווח הארוך והשפעה על החברה והסביבה.



- 5) חיזוק חשיבות ההיבטים החיוניים בכישורי מהנדסים כדוגמת: מנהיגות, מערכתיות, רב תחומיות, עבודת צוות, בינלאומיות והכשרה לקראתם.
- 6) עידוד חברות וארגונים לאמץ תרבות של אחריות חברתית כוללת ולכוון את המנוע הכלכלי בראייה לטווח ארוך ולכיוון הנכון כדי לאפשר למהנדסים לפעול לטובת הציבור ולטובת הסביבה.
- 7) המהפכה התעשייתית הרביעית על כל מרכיביה ובמיוחד הטרנספורמציה הדיגיטאלית מהוות אתגר והזדמנות למקצוע ההנדסה להוביל מהפיכה זו לטובת החברה, הכלכלה והאנושות.
- 8) כדי לאפשר התעדכנות ושימור הכושר לעמוד בחזית ההנדסה בעידן הנוכחי, המתאפיין בשינויים מדעיים וטכנולוגיים המתרחשים בקצב אקספוננציאלי, על המהנדסים להיות ערוכים ומוכנים להשתלב בתהליך של למידה מתמדת ומתמשכת במהלך כל הקריירה המקצועית שלהם, דהיינו למידה לאורך החיים (LLL-Life Long Learning). לצורך כך יש לשלב בהכשרתם הראשונית הכרות עומק ורוחב במדעי ההנדסה לצד פיתוח כישורים חיוניים, שבין הבולטים שבהם נמצא כושר למידה עצמי.
- 9) עידוד מהנדסים וחברות המעסיקות מהנדסים ללימודים במשך כל החיים (-LLL Life Long Learning) וללימודים כאורח חיים, כדי להבטיח את מקצוענותם, עדכניות הידע והכישורים שלהם.

## מקורות

- המקורות מובאים על פי סדר ה-א'-ב' לעברית ולאנגלית בנפרד.
- בנטור א., זוננשיין א., דיין ת., 2018, חינוך מהנדסים במאה ה-21: היבטים גלובליים ונגזרות למדינת ישראל. מוסד שמואל נאמן למדיניות לאומית.
- בנטור א., זוננשיין א., נוה, ר., דיין ת., 2019, הפורום חינוך מהנדסים במאה ה-21: תובנות, דרכי פעולה ושינויי פרדיגמות, מוסד שמואל נאמן למדיניות לאומית.
- דרוקמן א., 2020, שיחה פרטית. יוני 2020.
- דרור י., 1996, ראשית הטכניון העברי בחיפה – 1950-1902, מהתוכנית לבית-ספר גבוה יהודי ועד תום תקופת ניהולו של שלמה קפלנסקי, עיונים בתקומת ישראל 6, עמ' 330-357.
- כרמית פ., גל ר., 2020, סיכום "שולחן עגול" – חוסן תרבותי. מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית.
- מוסד שמואל נאמן, 2019, המשמעויות האסטרטגיות של ההשקעות הסיניות בכלכלת ישראל ותשתיותיה. התובנות וההמלצות העיקריות של הסדנה שנערכה במוסד נאמן למחקר מדיניות לאומית, בטכניון ב- 10.3.2019.
- קירש א., 2018, אוניברסיטאות ישראל – היבטים ייחודיים בעולם המשתנה: תהליכים, סוגיות, מגמות והערכות. מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית. פברואר 2018.
- קרפ ב., ברכת התורה והמדע: כיצד פיתחנו תפישה מוטעית על היחס בין התורה למדע והצעה לתיקון התפישה לתפארת עם ישראל. בהכנה לדפוס.
- Abaté C.J., 2011, Should Engineering Ethics be Taught? *Science and Engineering Ethics* **17**(3):583-596.
- ABET, 2019, Criteria for accrediting engineering programs.
- Alias Z., Zawawi E.M.A., Yusof K., 2014, Determining critical success factors of project management practice: a conceptual framework. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **153**, 61-69.

- Ambrose M., 2020, Lawmakers propose dramatic expansion of NSF. *APS News*, **29**(7).
- Applebaum W., (Editor), 2000, *Encyclopedia of the Scientific Revolution From Copernicus to Newton*. Garland Publishing, Inc.
- Aristotle, -320, *Politics: The Athenian Constitution*. Book IV: Morphology of the State. Sec 3: The Best Constitution in Normal Circumstances. English translation by Warrington J., 1960, Heron Books, p. 117.
- Ashby M.F., 2005, *Materials Selection in Mechanical Design*. 3<sup>rd</sup> Ed. Elsevier.
- Aslaksen E.W, 2013, *The System Concept and Its Application to Engineering*. Springer.
- Bar-Hillel M., Budescu D., 1995, The elusive wishful thinking effect, *Thinking & Reasoning* 1(1), 71-103.
- Bari R.A., 2003, Probabilistic Risk Assessment. In: Pham H. (Editor), 2003, *Handbook of Reliability Engineering*. Springer. Ch. 30.
- Basart J.M., Serra M., 2013, Engineering Ethics Beyond Engineers' Ethics, *Science and Engineering Ethics* **19**(1), 179-187.
- Beal A. N., 2011, A history of the safety factor. *The Structural Engineer* **89**(20).
- Ben-Haim Y., 2005, Info-Gap Decision Theory for Engineering Design: Or Why "Good" Is Preferable to "Best", Chapter 11 in: Eds. Nikolaidis E., Ghiocel D. M. Singhal S., *Engineering Design Reliability Handbook*. CRC Press.
- Benjamin A., Dezfuli H., Everett C., 2016, Developing probabilistic safety performance margins for unknown and underappreciated risks. *Reliability Engineering and System Safety* **145**, 329–340 .
- Bolton R.P., 1907, The prevention of elevator accidents. *The Engineering Magazine*, October 1906-March 1907, XXXII, 401-406.
- Boon M., 2011, In defense of engineering sciences: On the epistemological relations between science and technology. *Techné*, **15**(1), 49-71.

- Buchanan R.A., 1983, Gentlemen engineers: The making of a profession, *Victorian Studies*, Summer 1983, 407-429.
- Budynas R.G., Nisbett J.K., 2014, *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill.
- Bulleit W.M., 2013, Uncertainty in the Design of Non-prototypical Engineered Systems. Ch. 25 in: D.P. Michelfelder et al. (eds.), *Philosophy and Engineering: Reflections on Practice, Principles and Process*, Philosophy of Engineering and Technology 15, Springer.
- Bulleit W., Schmidt J., Alvi I., Nelson E., Rodriguez-Niki T., 2015, Philosophy of Engineering: What It Is and Why It Matters. *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.*, 141(3): 02514003.
- Carlson C.S., 2012, *Effective FMEAs: Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes Using Failure Mode and Effects Analysis*. A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- Channell D.F., 2019, *The Rise of Engineering Science: How Technology Became Scientific*. Springer.
- Christensen S.H., Delahousse B., Didier C., Meganck M., Murphy M., (Editors), 2019, *The Engineering-Business Nexus*. Springer.
- Clausen J., Cantwell J., 2007, Reasoning with Safety Factor Rules. *Techné: Research in Philosophy and Technology* **11**(1).
- Conlon E., 2019, Prisoners of the capitalist machine: Captivity and the corporate engineer, In: Christensen S.H. et al. Editors, *The Engineering-Business Nexus*. Springer.
- Cordeiro W. P., 2003, The only solution to the decline in business ethics: Ethical managers. *Teaching Business Ethics* **7**, 265–277.
- Crawley E.F., Malmqvist J., Ostlund S., Brodeur D.R., 2014, *Rethinking Engineering : The CDIO Approach*. Springer.
- Cropley D.H., 2019, *Homo Problematis Solvendis—Problem-solving Man: A History of Human Creativity*. Springer.

- Davis M., 2019, Engineering and business management: the odd couple. Ch. 2 in: Christensen S.H., Delahousse B., Didier C., Meganck M., Murphy M., (Editors), 2019, *The Engineering-Business Nexus*. Springer.
- Dhillion B.S., 2006, *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. Taylor & Francis.
- Dias P., 2019, *Philosophy for Engineering: Practice, Context, Ethics, Models, Failure*. Springer.
- Dixon J.R., Duffey M.R., 1990, The neglect of engineering design. *California Management Review*, Winter 1990, **32**(2), 9-23.
- DOE, 1992, *Root Cause Analysis Guidance Document*. DOE Guideline DOE-NE-STD-1004-92.
- Donovan A., Green R.M., 2003, Setup for failure: The Columbia disaster. *Teaching Ethics* **4** (1), 69-76.
- Doorn N., Hansson S.O., 2011, Should probabilistic design replace safety factors?. *Philos. Technol.* **24**, 151-168.
- Doorn N., Hansson S.O., 2018, Factors and margins of safety. Ch. 6 in: *Handbook of Safety Principles*. Editors: Moller N, Hansson S.V., Holmberg J-E., Rollenhagen C., Wiley.
- Durkee J., 2000, Steel bridge Construction. Ch. 45 In: *Bridge Engineering Handbook*. Chen W.-F., Duan L. Eds., CRC Press.
- Edwards K.S., McKee R.B., 1991, *Fundamentals of Mechanical Component Design*. McGraw-Hill.
- Ferguson E.S., 1993, *Engineering and the Mind's Eye*. The MIT Press.
- Fischer H., 2011, *A History of the Central Limit Theorem: From Classical to Modern Probability Theory*. Springer.
- Fischhoff B., Slovic P., Lichtenstein S., Read S., Combs B, 1978, how safe is safe enough? A psychometric study of attitudes towards technological risks and benefits. *Policy Sciences* **9**, pp. 127-152

- Fischhoff B., Lichtenstein S., Slovic P., Keeney R., Derby S., 1980, *Approaches to Acceptable Risk: A Critical Guide*. NUREG/CR-1614, ORNL/Sub-7656/1.
- Fleddermann C.B., 2012, *Engineering ethics*, 4<sup>th</sup> edition, Prentice Hall,
- Fortune J., Peters G., 1995, *Learning from Failure: The Systems Approach*. Wiley.
- Franzini M., Granagila E., Raitano M., 2016, *Extreme Inequalities in Contemporary Capitalism Should We Be Concerned About the Rich?* Springer.
- Gal R., Maital S., Zhang H., Tangen E., 2017, *Strengthening Social Resilience, Building Social Capital: Perspectives from Israel and China*. Samuel Neaman Institute for National Policy Research.
- Garrison, E.G. 1993, *A History of Engineering and Technology : Artful Methods*. CRC Press.
- Génova G., González M.R., 2016, Teaching Ethics to Engineers: A Socratic Experience. *Sci Eng Ethics* **22**, 567–580.
- Gigerenzer G., 2008, *Rationality for Mortals: How People Cope with Uncertainty*. Oxford University Press.
- Gigerenzer G., 2004, Mindless statistics. *The Journal of Socio-Economics* **33**, 587–606.
- Glegg G.L., 1969, *The Design of Design*. Cambridge Un. Pr.
- Goldberg B.E., Everhart K., Stevens R., Babbitt III N., Clemens P., Stout L., 1994, *System Engineering "Toolbox" for Design-Oriented Engineers*. NASA Reference Publication 1358.
- Goriunova O., 2009, Vitalist Technocultural Thinking in Revolutionary Russia (on Piotr Engelmeier). In: *Place Studies in Art, Media, Science and Technology. Historical Investigations on the Sites and the Migration of Knowledge*, eds. Andreas Broeckmann, Gunalan Nadarajan, (Weimar: Verlag und Datenbank für Geisteswissenschaften, VDG, 2009), pp. 183–197.

- Gorokhov V., 1997, Technological enlightenment in Russia, *Phil & Tech* **3**(2), 78-89.
- Gorokhov V.G., 2014, Engineering Sciences: History and Theory. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, **84**(6), 441–448.
- Grayson L.P., 1993, *The Making of an Engineer*. John Wiley & Sons, Inc.
- Griffith E., 2014, Why startups fail, according to their founders. *Fortune*. at: <https://fortune.com/2014/09/25/why-startups-fail-according-to-their-founders/>.
- Griseri P., 1998, *Managing Values Ethical Change In Organisations*. Macmillan Press Ltd.
- Gross P.M, 1963, R & D, and the relations of science and government. *Science*. Vol. 142, No. 3593, November 1963, 645-650.
- Grottke M., Sun H., Fricks R.M., Trivedi K.S., 2008, Ten Fallacies of Availability and Reliability Analysis. In: T. Nanya et al. (Eds.): *Service Availability 5th International Service Availability Symposium*, ISAS 2008 Tokyo, Japan, May 19-21, 2008 Proceedings, LNCS 5017, pp. 187–206.
- Haik Y., Shahin T., 2011, *Engineering Design Process*. 2<sup>nd</sup> Ed. Cengage Learning.
- Hall J.L., 2003, Columbia and Challenger: organizational failure at NASA. *Space Policy* **19**, 239–247.
- Hansson S.O., 2006, Safe Design. *Technè* **10**(1), 64-70.
- Harris C.E., 2008, The Good Engineer: Giving Virtue its Due in Engineering Ethics. *Science and Engineering Ethics* **14**, Article 153.
- Harris, B., Soms A.P., 1993, A note on a difficulty inherent in estimating reliability from stress strength relationships. *Naval Research Logistics Quarterly*, **30**(4), 659–663.
- Harris C.E., Pritchard M.S., Rabins M.J., 2009, *Engineering Ethics, Concepts and Cases*. 4<sup>th</sup> Ed. Wadsworth.

- Heath W.G., 1977, Factors of safety - should they be reduced? In: *Factors of Safety: Historical Development, State of the Art and Future Work*. AGARD Report No. 661.
- Hill D., 1996, *A History of Engineering in Classical and Medieval Times*. Routledge.
- Johnson B.B., 1998, What researchers think they know about risk perception. In: *Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM 4, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management*. Ed.: Mosleh A. and Bari R.A., 13-18 Sep. 1998, p. 1997.
- Kenett S.R., Zacks S., Amberti D., 2013, *Modern Industrial Statistics: with applications in R, MINITAB and JMP (Statistics in Practice)*. Wiley.
- Keynes J.M., 1956, Newton, the Man. In: *The World of Mathematics*, Vol. 1. Ed. Newman J.R. Simon and Schuster, NY.
- Klein G., 1997, Developing expertise in decision making, *Thinking And Reasoning*, **3**(4), 337-352.
- Kreiner J., Flores A., Krishnamurthy S., 2004, Ethical issues facing engineers and their profession. Proceedings of *International Conference on Engineering Education and Research "Progress Through Partnership"*, VSB-TUO, Ostrava, 203-208.
- Landes J.G., 1978, *Engineering In the Ancient World*. University of California Press.
- Layton E.T., 1971, *The Revolt of the Engineers: Social Responsibility and the American Engineering Profession*. The Press of Case Western Reserve University.
- Lewis, H.W., Budnitz, R.J., Kouts H.J.C., Loewenstein W.B., Rowe W.D., von Hippel F., Zachariasen, F., 1978, *Risk Assessment Review Group report to the U. S. Nuclear Regulatory Commission*. NUREG/CR-0400, TRN: 79-004042.



- Lind, N.C. 1978. On the Value of life and limb. *Dialog*, 1-78, DIAB, Danish Engineering Academy, Lyngby, Denmark, Sept. 1978.
- McComb H.G., Murrow Jr. H.N., and Card M.F., 1990, *Structures and Materials Technology for Hypersonic Aerospacecraft*, NASA Technical Memorandum 102583, January 1990.
- McConnell S., 1996, *Rapid Development: Taming Wild Software Schedules*. Microsoft Press.
- McNeil I. (Editor), 1990, *An Encyclopedia of the History of Technology*. Routledge.
- Meiksins P., 1988, The "Revolt of the Engineers" reconsidered, *Technology and Culture*, **29**(2), 219-246.
- Meyer M., 2018, The Rise and Fall of Vannevar Bush. *Distillations: Using stories from Science's past to understand our world*. July 21, 2018. Retrieved on 20.8.2020 at <https://www.sciencehistory.org/distillations/the-rise-and-fall-of-vannevar-bush>
- Mitcham C., 1998, The importance of philosophy to engineering. *Teorema: Revista Internacional de Filosofia* **17**(3), 27-47.
- Mitcham C., 2019, Engineering and Business: Roward fragile appreciation of a fraught relationship. Foreword In: Christensen S.H., Delahousse B., Didier C., Meganck M., Murphy M., Editors, *The Engineering-Business Nexus*. Springer.
- Mitcham C., Briggie A., 2009, The Interaction of Ethics and Technology in Historical Perspective. In: *Philosophy of Technology and Engineering Sciences*. Meijers A. (Editor), p. 1147-1191. Elsevier.
- Moss C., 1988, *Science in Ancient Mesopotamia*. A First Book, Franklin Watts.
- Muller G.E., Schmid C.J., 1977, *Factor of Safety-USAF Design Practice*. In: *Factors of Safety: Historical Development, State of the Art and Future Work*. AGARD Report No. 661.

- Munns A.K., Bjeirmi B.F., 1996, The role of project management in achieving project success. *Int. J. Project Management* **14**(2), 81-87.
- NASA, 1972, *Structural Design Criteria Applicable to a Space Shuttle*, NASA SP-8057, March 1972, Revised.
- NASA, 1995, *Systems Engineering Handbook*. SP-610S, June 1995.
- NASA, 2003, *Columbia Accident Investigation Board – Report*.
- Nelson R.R., 2007, IT project management: infamous failures, classic mistakes, and best practices. *MIS Quarterly Executive* 6(2), 67-78.
- Niedderer K., Reilly L., 2010, Research Practice in Art and Design: Experiential Knowledge and Organised Inquiry. *Journal of Research Practice* 6(2), Article E2,
- Nieto-Galan A., Roca-Rosell A., 2006, Scientific Education and the Crisis of the University in 18<sup>th</sup> Century Barcelona, In: *Universities and Science in the Early Modern Period*. Editors: Feingold M., Navarro-Brotons V., Springer
- Nikolaidis E., 2005, Types of Uncertainty in Design Decision Making. Chapter 8 in: Eds. Nikolaidis E., Ghiocel D. M. Singhal S., *Engineering Design Reliability Handbook*. CRC Press.
- Nikolaidis E., Ghiocel D. M. Singhal S., 2005, *Engineering Design Reliability Handbook*. CRC Press.
- Patel N., 2015, 90% Of Startups Fail: Here's What You Need To Know About The 10%, *Forbes*. At:  
<https://www.forbes.com/sites/neilpatel/2015/01/16/90-of-startups-will-fail-heres-what-you-need-to-know-about-the-10/#78784d6b6679>.
- Pearson D.S., 1961, *Creativeness for Engineers: A Philosophy and Practice*. 4<sup>th</sup> Ed. State College, Edwards Brothers, Inc.
- Penny R.K., 1970, Principles of engineering design. *Postgraduate Medical Journal* (June 1970) 46, 344-349.
- Petroski H., 1992, *To Engineer is Human*. Vintage Books.

- Petroski H., 2010, *The essential engineer: Why science alone will not solve our global problems*. New York: Vintage Books.
- Pham H. (Editor), 2003, *Handbook of Reliability Engineering*. Springer.
- Picon A., 2004, Engineers and engineering history: Problems and perspectives. *History and Technology*, **20**(4), 421-436.
- Pielke R., 2010, In retrospect: Science-The Endless Frontier. *Nature*, **466**, August 2010, 922-923.
- Piketty T., 2014, *Capital in the Twenty-First Century*. The Belknap Press of Harvard University Press.
- Pitt J.C., 2009, Technological Explanation, In: Editor Meijers A., *Philosophy of Technology and Engineering Sciences*. Vol. 9 in: Editors: Gabbay D., Thagard P., Woods J., *Handbook of the Philosophy of Science*. Elsevier.
- Rashdall H., 1936, *The Universities of Europe in the Middle Ages*. Oxford University Press.
- Raelin J.A., 1986, *The Clash of Cultures: Managers and Professionals*. Taylor & Francis, Ltd
- Ramachandran V., Raghuram A.C., Krishnan R.V., Bhaumik S.K., 2005, *Failure Analysis of Engineering Structures: Methodology and Case Histories*. ASM International.
- Reed B.C., 2019, *The History and Science of the Manhattan Project*. 2<sup>nd</sup> Ed. Springer.
- Samuel A., Weir J., 1999, *Introduction to Engineering Design*. Elsevier Science & Technology Books.
- Sapelli G., 2019, *Beyond Capitalism: Machines, Work and Property*. Palgrave Macmillan.
- Scheel H.J., 2018, Experiences from the Fukushima disaster. In: Mihai F.-C., Grozavu A. Eds., *Environmental Risk*, Ch 5. p.85-102. IntechOpen.

- Scott J.C., 2006, The mission of the university: Medieval to postmodern transformations. *The Journal of Higher Education* **77**(1), 1-39.
- Starbuck W.H., Milliken F.J., 1988, Challenger: fine-tuning the odds until something breaks. *Journal of Management Studies* **25**(4), 319-340.
- Stephenson A.G. et al., Investigation Board, 1999, *Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board Phase I Report*. November 10, 1999.
- The Royal Academy for Engineers, 2011, *Engineering Ethics and Practice: A Guide to Engineers*, UK.
- Tversky A., Kahneman D., 1974, Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. *Science* **185**(4157), pp. 1124-1131.
- Unger S.H., 2017, *Controlling Technology: Ethics and the Responsible Engineer*, 3<sup>rd</sup> edition, Unger publications.
- Välilmaa J., 2019, *A History of Finnish Higher Education from the Middle Ages to the 21<sup>st</sup> Century*. Springer.
- Verderaime V., 1992, *Structural Deterministic Safety Factors Selection Criteria and Verification*. MASA Technical Paper 3203.
- Villani D., Antonietti A., 2013, Measurement of Creativity. In: *Encyclopedia of Creativity, Invention, Innovation, and Entrepreneurship*. Carayannis R.D. (Editor). Springer.
- Walton J, 1991, *Engineering Design: From Art to Practice*. West Pub.
- Wiesner J.B., 1979, Vannevar Bush 1890-1974: A Biographical Memoir, *National Academy of Sciences*.
- Witherell C.E., 1994, *Mechanical Failure Avoidance: Strategies and Techniques*. McGraw-Hill.
- Wilt A.D., 1907, The relation of inspection to money-making shop management. *The Engineering Magazine*, October 1906-March 1907, XXXII , 725-736 .
- Zeckhauser R.J., Viscusi W.K., 1990, Risk within reason. *Science*, **248**, 559-564,

Zipay J.J., Modlin C.T., Larsen C.E., 2016, The Ultimate Factor of Safety for Aircraft and Spacecraft – Its History, Applications and Misconceptions, [57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference](#), 4-8 January 2016, San Diego, California, USA

## הפורום לחינוך מהנדסים במאה ה-21

הפורום לחינוך מהנדסים במאה ה-21, אשר היוזמה לספר זה נולדה במסגרת פעילויותיו, נוסד בשנת 2018 במוסד שמואל נאמן בטכניון. מטרת הפורום לגבש תובנות והמלצות לחינוך מהנדסים לאור האתגרים של המאה ה-21 אשר מחייבים שינוי פרדיגמות על רקע המהפכות המתרחשות בעידן זה. מדובר במהפכה התעשייתית הרביעית שמרכיב מרכזי בה הוא רב תחומיות ואינטגרציה של טכנולוגיות ומהפכת הידע המתאפיינת בזמינות של ידע והיווצרות ידע חדש בקצב אקספוננציאלי.

הפורום מורכב מכל בעלי העניין בחינוך מהנדסים ובהם אוניברסיטאות, מכללות הנדסיות, תעשיות עתירות טכנולוגיה ומסורתיות, גופי ממשל (מל"ג/ות"ת, משרד החינוך, רשות החדשנות ועוד), מהנדסים צעירים ונציגי הסטודנטים. הפורום גיבש המלצות לצעדי מדיניות ודרכי פעולה בארבעה תחומים מרכזיים שנועדו לאפשר מעבר מלמידה מסורתית לחינוך שבו ניתן דגש מיוחד להבניית כישורים מיוחדים בנוסף על ידע במדעי ההנדסה, ויכולת ללמידה עצמית על פני כל משך החיים: הקניית והבניית ידע וכישורים חיוניים, חשיפה לעולם האמיתי ולתעשייה, הפניית דגש ללמידה פעילה של הסטודנטים ויצירת חוויית לימודים ושינוי תודעתי בתפקיד הסגל האקדמי מ"מרצה" ל"מנטור ומנחה".

## מוסד שמואל נאמן

מוסד שמואל נאמן הוקם בטכניון בשנת 1978 ביוזמת מר שמואל (סם) נאמן והוא פועל להטמעת חזונו לקידומה המדעי-טכנולוגי, כלכלי וחברתי של מדינת ישראל.

מוסד שמואל נאמן הוא מכון מחקר המתמקד בהתוויית מדיניות לאומית בנושאי מדע וטכנולוגיה, תעשייה, חינוך והשכלה גבוהה, תשתיות פיסייות, סביבה ואנרגיה ובנושאים נוספים בעלי חשיבות לחוסנה הלאומי של ישראל בהם המוסד תורם תרומה ייחודית. במוסד מבוצעים מחקרי מדיניות וסקירות, שמסקנותיהם והמלצותיהם משמשים את מקבלי ההחלטות במשק על רבדיו השונים. מחקרי המדיניות נעשים בידי צוותים נבחרים מהאקדמיה, מהטכניון ומוסדות אחרים ומהתעשייה. לצוותים נבחרים האנשים המתאימים, בעלי כישורים והישגים מוכרים במקצועם. במקרים רבים העבודה נעשית תוך שיתוף פעולה עם משרדים ממשלתיים ובמקרים אחרים היוזמה באה ממוסד נאמן וללא שיתוף ישיר של משרד ממשלתי. בנושאי התוויית מדיניות לאומית שעניינה מדע, טכנולוגיה והשכלה גבוהה נחשב מוסד שמואל נאמן כמוסד למחקרי מדיניות המוביל בישראל.