

הנדסה, חברה וסביבה יחסי גומלין ושילוב

ד"ר ברוך קרב
ד"ר אביגדור זוננשיין
פרופ' ארנון בנטור

מוסד שמואל נאמן
למחקר מדיניות לאומית



מדע וטכנולוגיה | 07/23





מוסד שמואל נאמן
למחקר מדיניות לאומית

הנדסה, חברה וסביבה

יחסי גומלין ושילוב

ד"ר ברוך קרפ
ד"ר אביגדור זוננשיין
פרופ' ארנון בנטור

יולי, 2023

אין לשכפל כל חלק מפרסום זה ללא רשות מראש ובכתב ממוסד שמואל נאמן מלבד לצורך ציטוט של קטעים קצרים במאמרי סקירה ופרסומים דומים תוך ציון מפורש של המקור.

הדעות והמסקנות המובאות בפרסום זה הן על דעת המחבר.ת ואינן משקפות בהכרח את דעת מוסד שמואל נאמן

תוכן עניינים

7	מבוא	1.
8	הנדסה	2.
8	2.1 היסטוריה של עשייה הנדסית	
9	2.2 הנדסה כמשאב חברתי	
10	2.3 הנדסה מוכללת	
12	2.4 מדע, הנדסה, טכנולוגיה ואומנות ההנדסה	
12	2.5 ההכשרה ההנדסית כיום	
14	חברה	3.
14	3.1 חברה, מאפייניה ורבדיה	
15	3.2 חוסן חברתי	
17	3.3 המתח בין היחיד לחברה	
18	3.4 ערכים, אתיקה וחוקים: סוגים של סדר חברתי	
20	3.5 כלכלה כמרכיב בסדר חברתי	
23	3.6 משאבי חברה ונחלת הכלל	
25	3.7 שינוי חברתי: יזום או תוצאתי	
27	3.8 יעדי החברה	
31	דרכי הפעלה של מהנדסים	4.
31	4.1 מפעילי המשאב ההנדסי	
31	4.2 החלטות חברתיות של מהנדסים בתפקידם	
32	4.3 מהנדסים בתווך בין כלכלה חופשית לחברה	
35	4.4 מדדים לאחריות חברתית	
37	4.5 אתיקה ואחריות מקצועית בהנדסה	
43	קשרי גומלין הנדסה-חברה-סביבה	5.
43	5.1 מבוא	
44	5.2 המהפכות התעשייתיות	
48	5.3 שימור החברה האנושית והבטחת שגשוגה: פיתוח ומחזור חיים בר קיימא	

50.....	מודלים לאומדן השפעות מחזור החיים.....	5.4
50.....	מחזור חיים סביבתי, E-LCA.....	5.4.1
53.....	מחזור חיים חברתי, S-LCA.....	5.4.2
54.....	מחזור חיים כלכלי, C-LCA.....	5.4.3
54.....	תכן הנדסי לקיימות.....	5.5
60.....	תכן מוצרים ומערכות ידיות למשתמש.....	5.6
62.....	בטיחות וביטחון-היבטים חיוניים לחברה ולחיים בה.....	5.7
63.....	אימפקט ואחריות תאגידית.....	5.8
65.....	אחרית דבר.....	.6
66.....	מקורות.....	.7

רשימת טבלאות

- טבלה 5-1 מאפיינים של ארבעת המהפכות התעשייתיות 45
- טבלה 5-2 : נושאי ההשפעה וההשפעות של בעלי העניין 56

רשימת איורים

- איור 2-1 : מרכיבים המעצבים את קבלת ההחלטות של המתכנן. מבוסס על Penny (1970) 11
- איור 4-1: אתיקה כמרכיב חשוב באפיון מקצוע..... 37
- איור 4-2: אופי הפעולה ההנדסית..... 40
- איור 5-1: המהפכות התעשייתיות עד כה וזו החדשה שהיא בהתהוותה 45
- איור 5-2: תהליכים טכנולוגיים וחינוכיים המלווים את המהפכות התעשייתיות 48
- איור 5-3: דיאגרמה טיפוסית של יוזמה לחשיבת מחזור החיים..... 49
- איור 5-4 : תאור סכמטי של קשרי הגומלין המרכיבים את הקיימות, פיתוח בר קיימא 49
- איור 5-5: תיאור המודל של הגבולות הפלנטריים..... 51
- איור 5-6: שלבים בניתוח של השפעות מחזור החיים וקשרי גומלין ביניהם 52
- איור 5-7: מערכות לאפיון השפעות חברתיות..... 53
- איור 5-8: מודל אינטגרטיבי לתכן לקיימות 55
- איור 5-9: עקרונות בסיסיים לתכן אינטגרטיבי המביא בחשבון השפעות סביבתיות חברתיות וכלכליות של מחזור החיים..... 57
- איור 5-10 : תחשיבי מחזור החיים של טכנולוגיות התקרה השונות להשפעות על אנרגיה טמונה והתחממות גלובלית (דו תחמוצת הפחמן)..... 58
- איור 5-11: תחשיבי מחזור החיים של טכנולוגיות התקרה השונות להשפעות יחסיות על מגוון של קריטריונים סביבתיים..... 58
- איור 5-12: תהליך חישוב של השפעה סביבתית של תהליך, לפי מתודולוגית 99 ECO Indicator 59
- איור 5-13 : ההשפעה הסביבתית של משטחים מבטון עם חומרים משוריינים שונים, פלדה וחומר מרוכב, FRP, כפי שחושבה באמצעות אינדיקטורים של 99 ECO Indicator המייצגים עומס על הסביבה 59
- איור 5-14: עלויות מחזור החיים, ראשוניות ותחזוקה, של בטון תקני לסביבה אגרסיבית ובטונים משופרים בטכנולוגיות שונות, של קיר תומך מזויין, עבור מחזור חיים של 100 שנים 60
- איור 5-15: קשרי גומלין ותכונות בהנדסת מערכות..... 62

פתיחה

להנדסה ולטכנולוגיה יש השפעה רבה על החברה (society) ועל חברה. החל בתכן מוצרי צריכה יומיומיים וכלה במערכות עתירות משאבים ברמה מדינתית. בנוסף, מתחזקות העדויות להשפעה הטכנולוגיה על משבר האקלים והסביבה, לצד הפוטנציאל הגלום בהנדסה למיתון ההשפעות ואף למציאת פתרונות.

בחיבור זה מתוארים בקצרה יחסי הגומלין הקיימים והפוטנציאליים בין החברה להנדסה. לתיאור יחסי גומלין ברמה הכללית ביותר מוצגות ההנדסה והחברה בראיית "על" ממעוף הציפור. מוצג מערך הפעלת המשאב ההנדסי בחברה ודרכי ההשפעה האפשריים.

להצגה כללית זו של חברה והנדסה יש חשיבות בתמיכה בהחלטות מהנדסים ליצירת איזונים נכונים בעבודתם ולכן מהווה מרכיב חשוב בהכשרת מהנדסים. הכרות מהנדסים עם מאפייני החברה וצרכיה עשויה לאפשר להם לקבל החלטות מאוזנות המביאות בחשבון את כלל בעלי העניין בעבודתם, כולל של החברה וכנציגיה הנאמנים.



1. מבוא

מוצרים ומתקנים מהווים מרכיב חשוב בחברה האנושית, וקיומם משפר את איכות החיים ורמתם. הנדסה הוא המקצוע במסגרתו מבוצע פיתוח, תכנון, ייצור, הפעלה ותחזוקה של מוצרים חדשים וכאלו הנמצאים כבר בשימוש. מידת ההשפעה של תוצרי הנדסה על החברה משתנה ממוצר למוצר, מחברה לחברה, ועם הזמן. בעידן המודרני ההשפעה של הנדסה על החברה הולכת וגדלה הן בעוצמתה והן בהיקפה. השפעה זו כוללת את השיפורים להם ייחלו יוזמי פיתוח המתקנים והמוצרים, וגם תופעות נוספות שניתן להגדירן כתופעות לוואי. חלק מתופעות לוואי יכול להיות רצוי, כמו גילוי שימושים חדשים למכשיר בו הייתה כוונה להשתמש רק באופן אחד. חלק אחר של תופעות לוואי יכול להיות לא רצוי כמו פגיעה באקלים, באיכות סביבה, וירידה ברווחה (well being) של הציבור בכלל.

על מנת לגבש תכנים שיאפשרו למהנדסים לפעול באופן הלוקח בחשבון את השפעת תוצרי פעילותם על החברה, עליהם להכיר את מרחב ההשפעה של המוצרים ואת חוקיות ההשפעה, לטוב ולרע. למשל, השפעת שימוש בגזים מסוימים לטובה בתהליכים תעשייתיים או לרעה בהשפעתם על האוזן, השפעת פולימרים לטובה בייצור רכיבים קלי משקל או לרעה בהשפעת שיירי פלסטיק על היצורים החיים באוקיינוסים, או השפעת אפליקציה על היכולת להשתמש להקל על חיינו או שימוש בה לרעה בהפצת מידע שקרי. להכרת השפעות אלו יש צורך להכיר את מרכיבי החברה והסביבה (כמו אקולוגיה, סוציולוגיה) ודרכי השפעה של מוצרי התכן עליהם.

בנוסף, מכיוון שמהנדסים אינם היחידים המשפיעים על החברה, על המהנדסים להכיר את בעלי המקצוע הנוספים המשפיעים על החברה, ואת אופן השפעתם ודרכי האינטראקציה אתם.

בדוח מובאות אבחנות ועובדות ידועות ואין בהן חידוש. כתיבתם באופן מרוכז נדרשה לצורך ריכוז נקודות המוצא לדיון תמציתי שיוכל לשמש כבסיסי לקידום מסקנות אופרטיביות.

2. הנדסה

הנדסה הוא מקצוע רב תחומי ורב ממדי אשר הגדרה כוללנית שלו כמעט ואינה מסגירה את אופיו ואת מהותו. עשייתם של המהנדסים וההחלטות שהם מקבלים מתפרסים על מרחב עשייה עצום לרוחבו ולעומקו. בפרק זה מובאים מספר היבטים של הנדסה הנדרשים כהנחות יסוד וכבסיס לדיון במטרות המסמך של בחינת הקשרים בין הנדסה, חברה וסביבה וכנגזרת מכך עדכון תוכניות הכשרה קיימות למהנדסים וגיבוש חדשות בעידן המתהווה בשנים האחרונות.

2.1 היסטוריה של עשייה הנדסית

יש המייחסים את ראשית ההנדסה לתקופת המהפכה התעשייתית הראשונה, שבה הומצא מנוע הקיטור על ידי Watt (למשל Samuel and Weir, 1999, p. 273). על פי תפישה זו, הנדסה היא "יישום המדע" (מתואר בהרחבה על ידי Boon, 2011, p. 57). עם זאת, גלוי לכל שהנדסה הייתה קיימת כבר לפני אלפי שנים (Ferguson, 1993, p. 60). עוד מימי קדם תרמה העשייה ההנדסית לקידום החברה האנושית, להבטיח את שגשוגה ואת שרידותה כפי שבא לידי ביטוי, למשל, בהתפשטות האדם לאזורים אקלימיים קשים, בהמצאת הגלגל ופיתוח השימושים בו. דוגמאות נוספות הן ייצור כלי צייד, כלי חקלאות, ביגוד, לבנים מחמר לבניין (Garrison, 1991). מכונות וכלי טיס הם המשך טבעי להמצאת הגלגל.

ניתן להתרשם מרציפות המסורת ההנדסית מהתבוננות בשלושים המצאות, שחלקן הנדסיות, מתחילת ההיסטוריה האנושית, המוצגות על ידי Cropley (2019). Cropley סוקר את היצירתיות האנושית תוך תיאור מידת החדשנות של כל המצאה והמצאה, כגון הגרון, מערכת הניקוז הסניטרית, הנייר, המטבעות ואף לוח השנה.

סקירה היסטורית מקיפה של היישומים הטכנולוגיים בדגש על ההקשר החברתי מובאת בכרך אנציקלופדי בן יותר מאלף עמודים בעריכתו של McNeil (1990) ובדגש טכנולוגי-מכני בספרים נוספים כדוגמת אלו של Landels (1978) ושל Hill (1996). בסקירות אלו אפשר למצוא תיאור של פיתוח מערכות, חומרים ותהליכים מראשית הציביליזציה ועד ימינו, המהווים על פי העורך McNeil בהקדמה לספרו, "סקירה של צרכי האדם".

כך אוסף פיתוחים הנדסיים קטנים אך רבים, הוביל למצב שבו רובנו חופשיים בחיי היום-יום מאילוצי הקיום. כל דור בנה התקנים ועזרים בהתבסס על הידע שקיבל מהדורות הקודמים, ידע המכונה "מסורת" (legacy) או "קבלה", בהתאם לצד ממנו מסתכלים. כך, כעבור מספר דורות ההתקנים שעד לא מזמן קשה היה לחשוב על קיומם, הופכים למובנים מאליהם, ולפעמים, למרבה הצער, תוך זלזול במציאים שלהם.

המסורת צריכה להימסר וגם להתקבל. תהליך זה אינו אמור להתבצע באופן עיוור. כל מסורת מכילה היבטים מתיישנים וכל דור מחדש חידושים. אך לא כל מה שישן אינו רלוונטי ולא כל מה שחדש בהכרח טוב יותר. בתהליך זה של מסירה ייתכנו כשלים במסירה, ומנגד, ייתכנו כשלים בקבלה. כשלים כאלו, משני צידי המתרחס, עלולים ליצור מצבים בהם ננטשים היבטים חשובים ומקודשים דברים שנס ליחם. לכן תהליך זה של העברת המסורת, קבלתה באופן מסווג, והכנסת חידושים צריך להתבצע בזהירות

הראויה. ראוי לציין שחלק מהמסורת ההנדסית שעדיין רלוונטי וחשוב לעשייה ההנדסית, כמעט שאבד (למשל, Crawley et al, 2014, קרפ ושות', 2021).

2.2 הנדסה כמשאב חברתי

הנדסה הינה עיסוק רב ממדי ולכן זוכה להגדרות רבות ושונות בהתאם להיבט אותו מעוניינים להדגיש. אחת ההגדרות מתייחסת לתפקידה של ההנדסה כמיטיבה לאנושות, כמתואר על ידי האגודה האמריקאית להסמכה של תוכניות אקדמיות להכשרת מהנדסים, ABET, מאחת הגרסאות בשנים האחרונות:

"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).

הגדרה זו תואמת את העשייה ההיסטורית הענפה של המהנדסים ומדגישה שההנדסה היא כלי בידי החברה. כבר בימי קדם השתמשה החברה בעולם ההנדסה כדי לאפשר את שרידותה וכדי לשפר את רמת החיים של חבריה ושל נבחריה. בגרסאות קודמות הופיעה המטרה כמימוש דרישות (meet a stated objective or desired needs) (Mitcham, 1998, p. 33; Haik and Shahin, 2011, p. 3) מכלי לציין מי הדורש.

שתי הגרסאות מבטאות את הרעיון שהנדסה הינה משאב או כלי. ככל שכלי זה מפותח יותר, כך ההישגים אליהם ההנדסה מובילה הם רבים יותר או מעולים יותר (בכפוף לאופן השימוש בהם). משתי הגרסאות מובן באופן מובלע שהמהנדסים מגיבים לדרישות ולצרכים המוצבים בפניהם ולא הם אלו המגדירים אותם.

שתי הגרסאות נבדלות בזוהות הגורם המשתמש בכלי ההנדסה. מהגדרה אחת אפשר להבין שהחברה היא זו המפעילה את הכלי הנדסי לטובתה, בעוד שבהגדרה השנייה, היותר רחבה וכוללת, יש מפעילים ומרוויחים נוספים שזהותם אינה כל כך חשופה.

הפעלת המשאב ההנדסי נעשית על ידי כל גורם בעל כושר להוציא לפועל החלטות. את כלל הגורמים אפשר לסווג לשלוש קבוצות: ממשלתית, ציבורית, פרטית-עסקית. כך, ברמה הפשוטה ביותר אדם פרטי מזמין ממהנדסים תכנון של בית או עיצוב פנים שלו. עירייה או מועצה מקומית מזמינה אצל מהנדסים תכנון שכונות ומבני ציבור. מנהל מפעל מזמין אצל מהנדסים שבמפעלו פיתוח מוצרים חדשים ותכנון תחזוקת המפעל. משרדי ממשלה מזמינים אצל מהנדסים תכנון מערך כבישים ורשת חשמל ומים. פירוט על אופן הפעלת המשאב ההנדסי על ידי היזמים השונים מובא בפרק 4 בהמשך.

שימוש במשאב ההנדסי כרוך בתכנון. התוצר ההנדסי אמור ליצור שינוי מיוחל על ידי היזם. מכיוון שהפעלת המשאב ההנדסי כרוכה בהשקעת משאבים ראשוניים, הדבר יעשה רק אם היזם יחשוב שתהיה בכך תועלת. לכן היכולת של ההנדסה להביא תועלת תלויה בתכנון של אופן השימוש בהנדסה. כך חידוש הנדסי יוצר חידוש חברתי.

המשאב ההנדסי כולל מרכיבים רבים, ביניהם מערך ההכשרה, התעשייה היוצרת דרישה ומזמנת ניסיון, תשתית תאגידית ולפעמים גם לאומית לביצוע חישובים וניסויים. כל אחד ממרכיבים אלו הוא תוצאה של פעולה משולבת של הגורמים השונים שנצברה במהלך השנים. לכן למשאב ההנדסי יש אינרציה

גדולה הפועלת בשני הכיוונים. שינויים לרעה אינם מורגשים מיידית ולכן קשה לקשור בין סיבה לתוצאה, ומנגד, יצירת שינוי מכוון דורשת אורך רוח ומשאבים רבים, כפי שנהוג להגיד על חינוך: את הפירות של שתילים רואים כעבור זמן רב.

מהנדסים יכולים להיות שייכים לכל אחד משלושת הקבוצות היוזמות פיתוחים הנדסיים. במרבית המקרים לא הידע ההנדסי הוא שמניע את התהליך. מקרים יוצאי דופן הם אלו בהם מהנדסים מזהים הזדמנות טכנולוגית ומציפים רעיונות בפני בעלי האמצעים. היבט זה בדרך כלל מעוגן בפטנטים המתורגמים למעשה על ידי יזמים.

2.3 הנדסה מוכללת

במבט ראשון נראה עולם ההנדסה מְפֹרָד וּמְפֹרָד בין פלגי הנדסה רבים, בהוראה ובתעשייה וכולל תתי-התמחויות רבות. כך למשל באקדמיה ישנן הנדסת חשמל, כימיה, ומכונות. הידע הנלמד בפלג הנדסה אחד שונה מהידע הנלמד בפלגי ההנדסה האחרים. בתעשייה ישנם מהנדסי תכן, מהנדסי תחזוקה, ומהנדסי ייצור. תתי התמחויות נוספות כוללות למשל מהנדסי ביקורת או מהנדסי מתקני הרמה. סקירה מקיפה של מקצועות ההנדסה, התפקידים של המהנדסים ומאפיינים נוספים של הפרופסיה ניתן למצוא בספרם של קרפ ושות' (2021).

למרות הריבוי העצום של מקצועות הנדסיים ותפקידי מהנדסים, לרובם יש קווים אופייניים משותפים הכלולים ב-"הנדסה מוכללת". יותר משהיבטים הכלולים בהנדסה המוכללת משותפים לכל המהנדסים, הם נמצאים ברמה הירארכית שמעל לידע הספציפי של כל התמחות והם מכוונים את אופן השימוש בידע זה ולכן לפעמים מכונים "מטה-הנדסה" (meta engineering). בגלל העדר נוסחות בהנדסה מוכללת זו ובגלל אופן השימוש בה, המיומנות שבשימוש בידע זה מכונה גם "אומנות ההנדסה" (engineering art).

אחד המאפיינים המשותפים לכל המהנדסים הוא היותם מתכננים. תכנון היא פעולה של יצירת מתכונ. מתכונ הוא מרשם לפעולה, לא רק במטבח או ברפואה. תפקידם של המהנדסים הוא לייצר "מתכונים" עבור המזמין המבקש ליצור יכולת חדשה שלא הייתה קיימת או שמימושה היה לא יעיל מספיק. התפקיד של המהנדסים הוא להגשים רעיון ליכולת חדשה, כלומר להפוך רעיון מופשט לדבר גשמי, קרי, למוצר או לתהליך. כל מתכונ שמצליח לכונן את הרעיון בצורה ראויה, הוא נכון.

השימוש במונח "מתכונ" מאפשר לאחד שני "דברים" שהמהנדסים מתכננים, ה-"מה" וה-"איך". האחד הוא מה צריך לייצר המוגדר באמצעות צורתה של מערכת פיזית שתממש את היכולת הנדרשת (במקרה של תוכנה – הלוגיקה של התוכנית). השני הוא ה-"איך" הכוללת תהליכים חדשים כמו תהליכי ייצור, תחזוקה, תיקון, או תפעול. תכן גשר חדש בעיר קיימת מגדיר את תצורת הגשר והכבישים החדשים שיותאמו לנוכחותו. תכן תהליך הבנייה שלהם מגדיר את שלבי הביצוע כך שההפרעה לתנועה במהלך הבנייה תהיה מזערית.

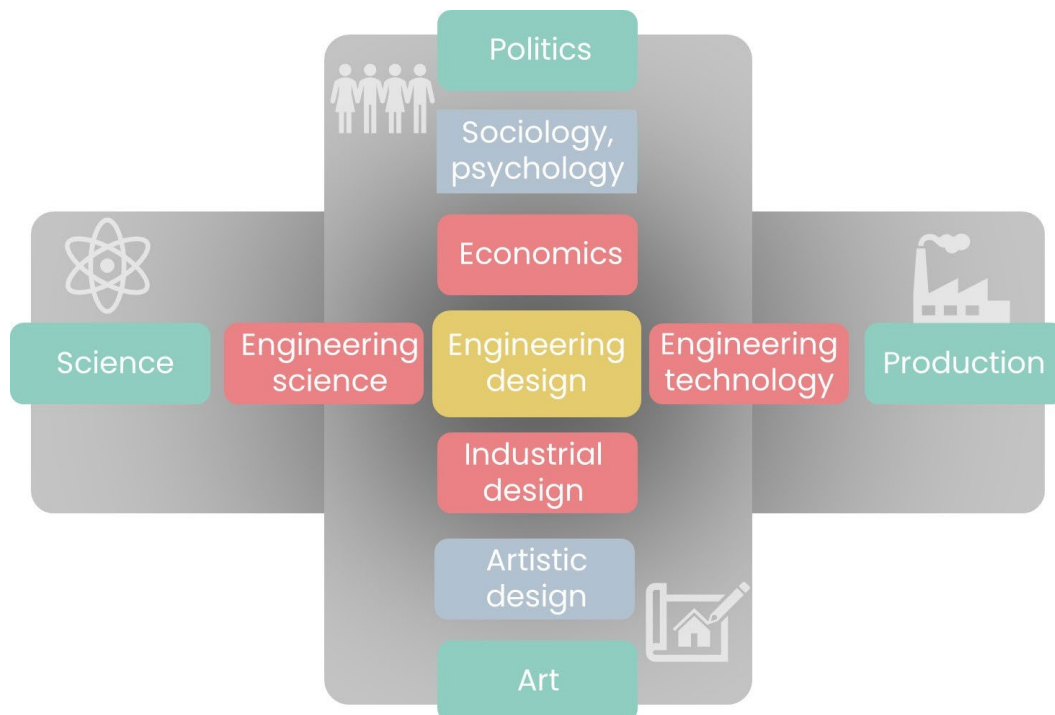


תכנון נכון מוביל למתפונן שאם פועלים על פיו, נוצרת מערכת המאפשרת להגשים ולפונן את היכולת הנדרשת, מפוננת במובן של קיום: "פוננת אָרץ וַתַּעֲמַד" (תהלים קיט, צ), תעמוד לא במובן שלא תזוז אלא במובן שלא תיפול, אלא שתתפקד ותחזיק מעמד: "וַתִּכּוֹן לָךְ אֶת-עַמְּךָ יִשְׂרָאֵל לָךְ, לְעַם--עַד-עוֹלָם" (שמואל ב, ז, כד); "הַלּוֹא-הוּא אֲבִיר קִנְיָה הוּא עֶשֶׂךָ וַיִּכְנֶנְךָ" (דברים לב, ו). מהנדסים הם המתכננים.

מהנדסים בכל מגוון התפקידים נדרשים להכין מתכונים. סוגי המתפונים הוא עצום, והידע הנדרש להכנתם הוא מגוון. כפועל יוצא מכך ישנם מהנדסים בעלי התמחויות בסיסיות שונות כמוזכר לעיל.

תהליך יצירת מתכון כולל יצירת חלופות שיכולות להיחשב כפוטנציאליות למימוש היכולות הנדרשות, השוואה ביניהן, ובחירה במיטבית. השיקולים המנחים את המתכננים ביצירת חלופות ובבחירה במיטבית כוללים היבטים רבים מלבד היכולת החדשה שנדרש לכונן, והם לאו דווקא היבטים טכניים או טכנולוגיים, ונמצאים בעולם ההומני הכולל את עולמות החברה והכלכלה. מצב זה של היות המהנדסים פועלים בצומת של מערך שיקולים מגוון מודגם באיור 2.1. על פי דגם זה המערך כולל ארבעה מרכיבים: מדע ומדעי ההנדסה, היבטי חברה, שיקולי ייצור והיבטים עיצוביים-אסתטיים. כל אחד מהמרכיבים מכתוב צרכים ודרישות בתחומו. על המתכננים להתחשב בדרישות של כל אחד ממרכיבים אלו ביצירתם ובהחלטותיהם.

איור 2-1: מרכיבים המעצבים את קבלת ההחלטות של המתכנן. מבוסס על Penny (1970)



ריבוי שיקולים וצרכים יוצר מצבים בהם חלופה הנותנת מענה יעיל בהיבטים מסוימים בעודה נחותה במענה שהיא נותנת להיבטים אחרים. חוסר האפשרות לתת מענה מלא לכל ההיבטים באמצעות

אותה חלופה מאלץ את המתכננים להתפשר. פשרה זו אינה וויתור על השלם אלא דרך להשגת אופטימיזציה ברמה הירארכית גבוהה. לכן יש לה תפקיד חשוב ומכונן.

רמת האופטימיזציה נגזרת מהשיקולים המשמשים את המהנדסים להשוואה בין חלופות. רמה הירארכית הנמוכה ביותר היא אופטימיזציה ברמת הרכיב. רמה הירארכית גבוהה יותר היא זו של מערכת. אופטימיזציה ברמה זו עשויה לתת עדיפות לחלופה שאינה אופטימלית ברמת הרכיב. רמה הירארכית גבוהה עוד יותר היא ברמת משתמש המייצרת אופטימיזציה הלוקחת בחשבון נוחות תפעול, עלות תחזוקה וכדומה. כך מערכת זולה יותר בתחזוקה יכולה להיות אופטימלית יותר מזו האופטימלית ברמת מערכת אך יקרה בתחזוקה. רמת האופטימיזציה הגבוהה ביותר היא זו של חברה, בה נלקחים בחשבון היבטים שאינם טכנולוגיים או כלכליים בלבד. מכאן נובע שאם מצפים ממהנדסים לערוך אופטימיזציה הלוקחת בחשבון את טובת החברה (society), עליהם להכיר היבטים אלו של מאפייני החברה וטובתה.

ניהול תהליך זה של התחשבות בגורמים בקבלת החלטות שייך לאומנות ההנדסה. פרטי ההחלטות נקבעות על ידי הידע הספציפי, כמו מידת ההשפעה של מאפיין כלשהו על הסביבה שייך לידע ספציפי של הנדסה אם הוא קיים, ולאומנות ההנדסה אם אינו קיים.

2.4 מדע, הנדסה, טכנולוגיה ואומנות ההנדסה

ישנם קשרים הדוקים בין מדע, הנדסה, וטכנולוגיה. שלושתם מהווים כלים של החברה אשר יכולה לעשות בהם שימוש לטובתה. הם נבדלים אך גם משלימים, כאשר בקליפת אגוז, המדע מגלה את חוקיות העולם, המסייעת למהנדסים להכין מתכונים. החוקיות מאפשרת למהנדסים לחזות את פעולת החלופות אותם הם שוקלים ולשלול קיומם של כשלים חבויים. הטכנולוגיה, אומנות המלאכה, מממשת (מייצרת) את המתכונים ומפעילה את המערכות לרווחת האדם. בסיומו של תהליך זה המציאות שונה מזו שבתחילתו. כך המציאות בה אנו חיים משתנה מיום ליום.

שותפות זו בין מדע, הנדסה וטכנולוגיה מאפשרת לייחס בטעות את ההתקדמות בעולם המערבי, למדע או לטכנולוגיה בלבד. המציאות היא, כפי שמעידה העשייה האנושית עוד לפני תקופת הרנסנס, שהמציאות משתנה בזכות מישהו שמתרגם את הרעיון (המצאה) לדבר מה מוחשי המיוצג באמצעות מתכון, ומישהו מגשים את המתכון למערכת פיזית. לפעמים זה אותו האדם. כלומר, מהמצאה ועד למערכת בעלת יכולת מתבצעים מספר שלבים של הגשמה והיא מושפעת כמובן מהאופן בו נעשה שימוש במערכת.

חלוקה סכמתית זו, אשר עקרונית מספיקה לצרכי הדיון הנוכחי, משאירה תחום אפור בהתייחסות לעשייה הנדסית. האם ילד בן 14 מכין יישום מחשב (אפליקציה), עשה פעולה הנדסית? האם מישהו שלא קיבל הכשרה הנדסית מכין מתכון המתקבל למימוש על ידי בעל אמצעים, היא פעולה הנדסית? על פי ההגדרה שהובא בתחילת החיבור התשובה היא כן.

2.5 ההכשרה הנדסית כיום

לקראת אמצע המאה התשע עשרה נחלקה ההכשרה של מהנדסים בעולם לשני אופני הכשרה עיקריים: בצרפת, בגרמניה ובחלק מבתי הספר בארצות הברית התמקדה ההכשרה הנדסית במדעי ההנדסה, בעוד שבאנגליה ובחלק מהאוניברסיטאות בארצות הברית התמקדה ההכשרה בהיבטים של

אומנות ההנדסה ותהליכי תכן. גילויים וחידושים רבים שנוספו לעולמות המתמטיקה והמדעים מאז ימיו של פרנסיס ביקון במאה השבע עשרה (הוגה הרעיון של שימוש במדע, באמצעות הנדסה, לטובת החברה), חלקם על ידי מהנדסים בעצמם, חייבו להגדיל באופן הדרגתי את המרכיב המדעי בהכשרת מהנדסים.

המגמה של נטישת אומנות ההנדסה וההתמקדות הכמעט בלעדית בהוראת מדעי ההנדסה התגברה בתחילת המאה ה-20 והושלמה לאחר מלחמת העולם השנייה. או אז התגבשה הגישה שהמדע הוא התנאי לעשייה ההנדסית (Ferguson, 1993, p. 155). אמונה זו תפשה לה אחיזה, למרות שבפועל עשייה הנדסית רבה מתבססת על הגישה האומנותית להנדסה.

אכן, אמונה בכוחו של המדע בעשייה ההנדסית היא נכונה, אלא שבמציאות הופר באקדמיה האיזון בין הכשרה הכוללת ידע מדעי לבין הכשרה הכוללת ידע אומנותי להצלחה בהנדסה. כיום, מתמקדת ההכשרה הפורמלית במוסדות האקדמיים ברובה בהקניית כלים מדעיים (Bulleit et al., 2015, p. 2). 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.

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 תמציתי 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).

למרות שברור מהאמור בסעיף הקודם, כמתואר גם באיור 2.1, שהמהנדסים צריכים להכיר את ההיבטים השונים בתחומים שאינם טכנולוגיים על מנת לקחת אותם בחשבון בהחלטותיהם, בכל זאת רק לעיתים רחוקות הם נלמדים בתוכניות הכשרה פורמליות. אין הכוונה ללימודי כלכלה בגלל שלמוצרים יש עלויות. לא נדרשים לימודי כלכלה בשביל לקחת בחשבון עלויות של רכיבים ותהליכים. הכוונה להכרת אופן השפעת החלופות על ההיבטים השונים, כמו החברה, כפי שיפורט בהמשך.

3. חברה

חברה בנויה ממגוון של מעגלים כאשר המונח "חברה" (society) מתייחס לכל אחד מהם, החל בפנימי ביותר של משפחה גרעינית, דרך משפחה מורחבת, ועד למעגל הרחב ביותר של החברה האנושית (local, regional, national, and global). השפעתם של מהנדסים יכולה לבוא לידי ביטוי בכל אחד מהם, החל באדם הבודד. בפרק זה מובאים מספר היבטים של חברה הנדרשים להמשך הדיון, בתפקידים הרצוי של המהנדסים בחברה ואופן הכשרתם לתפקידים אלו. עיקר הדיון הוא בחברות המורכבות מפרטים המשתייכים לה מבחירה, שאינן טוטליטריות או דיקטטוריות, הגם שחלק מההיבטים תקפים גם לחברות כאלו. דיון במאפיינים גם יסייע בבירור תהליכי קבלת החלטות בחברה והסיבות להתרחשותן של משבר האקלים, למרות שכבר לפני שלושים שנה הוזהרנו מפניו בוועידת ריו דה-ג'נרו בברזיל בשנת 1992. למשל, (Dryzek (1994), Chatterjee and Finger (2013).

3.1 חברה, מאפייניה ורבייה

החברה האנושית מורכבת מסוגים רבים של חברות. לכלל החברות יש מאפיינים משותפים וגם ייחודיים. הסיווג של חברות בעולם למתועשות ומתקדמות מתייחס למאפיינים משותפים להן המבדילים אותן ממדינות העולם השלישי. על פי מאפיינים אלו, הניתנים בדרך כלל למדידה, האומות המאוחדות מסווגות את המדינות השונות ומנתבות את הסיוע להן. בין המדדים של הארגון OECD אפשר למצוא את התל"ג, ההכנסה הממוצעת לנפש, רמת חיסכון של משפחה וכדומה. אחת ממטרות של ההשוואה היא להגדיר את הפער בין המצוי לרצוי ולהניע לצמצום הפער.

למרות שברור שתל"ג אינו המאפיין החשוב ביותר, רבים מבין מקבלי החלטות, ואף בין החוקרים, משתמשים בנתון זה כמדד לצמיחה. כך למשל הניתוח בדיעבד של המשמעות החברתית של המהפכה התעשייתית הראשונה, ואף על עצם הגדרתה כמהפכה, נסובה על השינוי בערכו של מדד זה באנגליה (Deane, 1978), זאת למרות שידוע שמדד זה אינו מייצג היטב את ההיבטים החברתיים החשובים:

"While real GDP per capita is an appropriate measure of 'economic resilience' or the power to survive in an aggressively competitive environment, most argue, quite rightly, that it is not an appropriate measure of living standards. A better, but not perfect, measure is consumption per capita". (Snooks, 1994, p. 12).

הכרה זו במגבלת התל"ג כמאפיין מרכזי ליעד התפתחות חברה הולכת ומתפשטת בקרב העוסקים בדבר. כך למשל, OECD ניסח לאחרונה מדד כלכלי חדש המשכלל מספר מדדים כלכליים Composite Leading Indicators-CLI, וגם בוחן היבטים שאינם כלכליים המכונים 'מחוונים' (indicators) ביניהם: נישואין וגירושין, אלימות במשפחה, הגנה על ילדים, וכדומה.

השוואה בין חברות מתאפשרת בהסתמך על הרעיון שלכל חברה יש מאפיינים ייחודיים לה למרות שהיא מורכבת מפרטים שונים שלאף אחד אין את המאפיין של החברה כולה. הדבר מובן מאליו במאפיינים כלכליים הניתנים למדידה, אך נכון גם בהתייחס למאפיינים אחרים, כמו למשל, ערכים, חוקים, שאיפות ותחושת ביטחון.

המונח "חברה" מרמז על כך שישנו "חיבור" בין קבוצת האנשים עליהם מדובר. קיימים סוגים רבים של חיבורים ליצירת קבוצה. אחת הדרכים להמחיש את ההבדל בין סוגי חיבור שונים היא באמצעות השוואה בין המונחים 'חברה' ו-'קהל' (או 'ציבור').

'קהל' מתייחס לאוסף של אנשים בעלי חיבור שנועד לצורך מסוים, בדרך כלל זמני או קצר טווח. למשל, קהל המשתתף בהופעה הוא גם צבר אנשים. 'חברה' הוא אוסף אנשים בעלי חיבור בהיבטים פנימיים, כמו למשל תרבות משותפת, תפישת מציאות משותפת, דרכי התנהלות בין אישית דומות ומרגישים קרובים האחד לשני. ההבדל בין 'קהל' לבין 'חברה' מרמז על הבדל בעוצמת החיבור בין אלו המרכיבים את הקבוצה. החיבור בין האנשים בקהל הוא חלש יחסית לחיבור בין אנשים בחברה. החיבור ב"עם" דומה לחיבור הקיים במשפחה, המהווה מקרה פרטי ומצומצם של 'חברה'.

'קהל' נסמך על "סור מרע" – "אל תפריע לי ולא אפריע לך". בחברה קיימת קומה נוספת של "עשה טוב". בחברה, הפרטים נותנים ומקבלים עזרה האחד מהשני באופן שוטף. לכל אחד יש תחושה שלשני אכפת ממנו. כפי שאמר אבנר דה-שליט מהאוניברסיטה העברית "אם אין אמון בין חברים, אין חברה" (מפגש על חופש אקדמי, 12.5.2022). זוהי חשיבה מערכתית של החברה. מערכת סופר-אורגניזם.

מוסכם בין המומחים שמאפייני החברה נקבעים באופן כלשהו על ידי מאפייני הפרטים המרכיבים אותה. מצד שני, הפרטים הם במידה רבה תוצר של החברה. על פי מסורת עתיקה של אבותינו "אדם הוא עולם קטן והעולם הוא אדם גדול". כלומר, מה שיש באדם יש בחברה, וגם להיפך. כך למשל, כפי שהאדם הפרטי מנהל את משק ביתו תוך איזון כלשהו בין הצריכה היומיומית לבין הדאגה לילדיו, כך גם החברה מאזנת בין תרבות של הנאה לבין דאגה לדורות הבאים.

לחברה יש מאפיינים רבים וחשובים נוספים. אחת האפשרויות לעשות בהן סדר היא באמצעות סידורם על פי ההירארכיה, ההירארכיה סיבתית והירארכיה של חשיבות יחסית. להדגמת הרעיון בהקשר לעבודת המהנדסים נתמקד בחוסן של חברה, שהוא אחד ממאפייניה ברמה הירארכית גבוהה.

3.2 חוסן חברתי

לצד ההבדלים בין אנשים, בין האדם לחברה, בין חברה לחברה, ובין החברה האנושית לבין בעלי החיים, יש לכולם גם מאפיינים משותפים. אחד המאפיינים החשובים הוא השאיפה לשרוד.

האתגר לשרוד, כמו במקרה של כל גוף חי, נובע מהניגוד בין הדחף הקמאי לשרוד לבין כוחות הפועלים על החברה, הן מבפנים והן מבחוץ, הפוגעים בשרידותה עד כדי פירוקה. תופעה זו היא המקבילה של החוק השני של התרמודינמיקה על פיו לכל מערכת יש נטייה שהאנטרופיה שלה (מדד לאי סדר) תגדל. לכן כאשר לא נעשה מאמץ להתנגד לכוחות אלו לשמירת הסדר, המערכת נעה באופן טבעי לעבר התפרקות. מסיבה זו, למשל, צובעים גשרים באופן תקופתי כדי למנוע התפוררות שהוא תוצאה של תהליך של קורוזיה כימית ומבצעים תיקונים של נזקים הנגרמים מהשפעת מכונות שעוברות על הגשר. באופן דומה כדוריות דם לבנות פועלות באופן תמידי כנגד הפולשים מבחוץ. בהעדר מאמץ לשמירת הסדר בחדר, האי סדר יגדל.

חיות הגוף (viability) מוגדרת באמצעות היכולת להתנגד לכוחות מפרקים, כמו למשל, וירוסים מבפנים וקור מבחוץ. ברגע שהתנגדות הגוף לפעולת הכוחות המפרקים תרד מתחת לסף מסוים, תתפתח מחלה שאם לא תטופל תוביל להפסקת תהליכי החיים והגוף יתפרק. "שולי החיות" הם הרזרבה שיש

לגוף להתנגד לכוחות מפרקים ביחס לנקודת הסף שמתחתיה מתחילה התדרדרות המחייבת התארגנות מחדש (מחלה).

באופן דומה אפשר להגדיר חיות של חברה. הכוחות החיצוניים הפועלים על החברה הם כוחות הטבע (פגעי מזג האוויר, הים והיבשה) וחברות שכנות המתנגדות לקיום החברה או שרוצות לנצל את משאביה. הכוחות המפרקים את החברה מבפנים הם פרטים או קבוצות אשר בפעולותיהם מזיקים לחיות של החברה ומקשים על החברה להתמודד עם הכוחות החיצוניים.

מערכות החוק והמשפט בחברה הן כמו כדוריות דם לבנות בגוף. חייבים רמה מסוימת של שניהם. כאשר מתגברים הכוחות הפנימיים, חברה שרוצה לשרוד תצטרך להגדיל או ליעל את מערך החוק והמשפט. הגדלה זו היא גרר על החברה, מעין מחלה, המאלץ אותה להשקיע אנרגיה במיגור תופעות לא רצויות במקום להשתמש במשאבים אלו להתמודד עם כוחות חיצוניים או לבניית החברה. שולי החיות של החברה הוא חוסנה.

חוסן חברתי (social resilience) הוא אחד המאפיינים המתייחס ליכולת החברה לעמוד בכוחות המפרקים אותה ולכן הוא בוודאי מאפיין חשוב. מאפיין קרוב אליו המשמש לפעמים כחליפי הוא יציבות החברה (social stability). במדעי החברה ישנן הגדרות מגוונות למונחים אלו השונות האחת מהשנייה, במידה רבה מכיוון שהן מתייחסות לתחומים שונים ולרבדים שונים בחברה (למשל: Friedland et al., 2021; Saja et al., 2021; Edwards, 2020; 2005). עבודה מקיפה להבהרת מושג החוסן, לגבי עדיין אין הסכמה בהקשר החברתי, הוצגה לאחרונה על ידי פדן וגל (2020).

לצורך הדיון בחיבור הנוכחי על מקומם של מהנדסים בחברה, נעזר בהגדרת מושג החוסן מעולם ההנדסה לחוסן חברתי. חוסן חברתי הוא מדד, הניתן לכימות או לא, המתאר את מידת שרידות החברה כנגד כוחות הפועלים לפירוקה ולאורך זמן מוגדר. ככל שהחברה עמידה בפני כוחות גדולים יותר הפועלים במשך זמן ארוך יותר, כך היא חסינה יותר. יציבות מוגדרת באמצעות היכולת של המערכת לחזור לשיווי המשקל המקורי לאחר שהופעל עליה כוח מעורר שפסק מלפעול, כמו אסון למשל.

כמובן שהמערכת החברתית היא מרובת פרמטרים ולכן לא פשוט למצוא את החוקיות המדויקת. כך למשל, למרות שברור שמשאב כלכלי חשוב לחוסן חברתי, ידוע מההיסטוריה שלא די בכך. מעידה על כך נפילת האימפריות ובעקבות כך האתגר של זיהוי הגורמים לנפילתן. אחד הגורמים לנפילת האימפריה הרומית מיוחסת על ידי Penty להתמכרות להנאות החיים ש"מרגשים":

"The old virtues of courage and sacrifice vanished before the growth of pessimism in which the populations, enervated by luxury and sensuality, became feebler and feebler, until finally they were unable any longer to offer effective resistance to the inroads of the barbarians". (Penty, 1920, p. 31).

כלומר, העושר האישי והחברתי אומנם תורמים לחוסנה של חברה אך אינם תנאי מספיק לשרידותה. קיימת חשיבות להערכת החוסן והיציבות של חברה מבעוד מועד, לפני שהחברה נחשפת לכוחות המפרקים המוכיחים בדיעבד האם היתה חסינה או לא. הדבר דומה לאתגר של ידיעת מיהו חבר אמת מבלי לבחון זאת "ברגע האמת". גם אם לא ניתן בכלים שעומדים לרשותנו היום להעריך את חוסנה של חברה, ניתן להסתפק בהכרת הגורמים המשפרים אותה (מלבד הכלכלה) ואלו הפוגעים בה (מלבד הכניעה לתענוגות).

חוסן חברתי מושפע מגורמים רבים נוספים. למשל, גורמים פיזיים הקשורים לתופעות טבע (הסכר בהולנד), אחוז אבטלה, בגרות אישית, אחווה, פערים סוציו-אקונומיים, מידת הניכור שחש האזרח ביחס

לחבריו ולנציגי הרשויות, ותופעת נישואין וגירושין משיקולים זרים. החוסן מושפע ממערך מאוזן של מקצועות הדרושים למשק ומדימוי עצמי של אזרחי המדינה (תת-הערכה והערכת-יתר כאחד).

אם החברה/קהל רוצה להתקיים למשך זמן, עליה להתמודד עם כוחות מפרקים באמצעות הפעלת כוחות נגדיים לכוחות הפועלים לפרק אותה. כוחות נגדיים הם תוצאה של פעולת חברי הקבוצה. אם החברה תפעיל כוחות נגדיים קטנים מכוחות הפירוק, היא תתפרק. ככל שהפער בין הכוחות גדול יותר, כך ההתפרקות תתרחש מהר יותר. חברה המורכבת מתתי-קבוצות להן יעדים שונים תתקשה לרכז מאמץ כנגד יעדים משותפים הנמצאים במרכז ההסכמה ואף תכלה את משאביה על מאבקים פנימיים. באופן דומה, חברה בה הפרטים אינם בוגרים מספיק להתגבר על התאוות האישיות מוחלשת בעמידותה כנגד כוחות מפרקים.

כאשר החברה מתפרקת, כל אחד מחבריה מפסיד (חוץ מאלו שיכולים לברוח ולא אכפת להם להשתייך לקהל אחר). תהליך זה מתרחש כאשר החברה אינה מצליחה לגייס מספיק חברים להיערכות להתמודדות עם הכוחות המפרקים: פרטים שמתנהגים כמו 'קהל' ולא כמו 'חברה' (קבוצות שלמות שלא תורמות דם אך נשענות על שירות זה) או כאלה שאינם מבינים או לא מאמינים למבינים מהם שהתמודדות זו הכרחית לקיומם.

מכיוון שתהליכים כאלו קיימים בכל חברה, כל חברה צריכה לנהל מאזן זה של הקטנת הכוחות המפרקים. אם החברה לא תפעל במידה מספקת, יתרחש תהליך התפוררות איטי אותו קשה לזהות בשלבים המוקדמים של התהליך. במצב זה, למתבונן מהצד נראה שהחברה חסינה מספיק ברגע נתון, ולכן כדאי לאמץ את הגישות שלה, בו בזמן היא נמצאת בתהליך התפוררות איטי.

3.3 המתח בין היחיד לחברה

חברה היא תוצר של חבריה. כל אחד מהחברים רוצה שתהיה חברה ורוצה להשתייך אליה. האדם הוא יצור חברתי וזקוק לחברה, הן לקיומו הפיזי והן לקיומו הרוחני, ואינו יכול להתקיים בלי חברה, לא בהיבט של הישרדות ואף לא בהיבט של נוחות.

לקיום חברה בריאה, המקיימת את חוסנה ואת טובת חבריה, נדרשים תנאים השונים מהתנאים הנדרשים לקיום קהל. האדם אינו החיה החברתית היחידה שקיומה מותנה בהשתייכות לקבוצה ובכל זאת יש באדם דבר מה ייחודי המוליד בו מתח בינו כפרט לבין החברה לה הוא שייך. תופעה זו ייחודית למין האנושי.

תנאי הקיום של חברה הוא כאשר חברה נוהגים על פי "אנחנו, בכל מקום, תמיד". חוסנה של חברה מבוסס יותר על שיתוף פעולה בין חבריה ופחות על חוזקו של כל אחד מחבריה. זו לא הנהגה של מחיקת העצמיות אלא הדגשתה כמרכיב בגוף גדול יותר. החברה זקוקה לבעלי מקצוע מגוונים ובעלי יכולות שונות. לכן יש הכרח שנוהג זה של "אני, כאן, עכשיו" יחליף עם הזמן את מקומו בנוהג "אנחנו, בכל מקום, תמיד".

המעבר להתנהגות של "אנחנו, בכל מקום, תמיד" הוא רצון החברה וגם רצון האדם הפרטי. החברה מחייבת לקיומה תנאים המאלצים את החברים לעמוד בתור ולשלם מיסים. אילוצים אלו אינם נוחים לחברים ונותנים להם תחושה של פגיעה בחופש שלהם. אלא שבגלל הקושי לראות לטווח הארוך, הילד לא יכול להבין את הסיבות והחשיבות לדרישות כאלו ולא רואה כיצד זו טובת החברה. חברה בריאה היא גם טובתו, ולכן הוא שרוי בניגוד עניינים בין הרצונות של החברה לבין מה שנראה לו כרצונו.

ילד שלא עבר את התהליך של נטישת הגישה "אני, כאן, עכשיו" לא יפעל כמבוגר לטובת החברה כאשר הדבר בא על חשבונם בטווח הקצר. מבוגרים כאלו לא מפתחים תכונות של נתינה לחברה אלא רק לקיחה ממנה.

ניגוד זה עשוי להוביל לפעולות של אדם הפוגעות בחברה ולפעולות של חברה הפוגעות באדם.

בכל משפחה יש חוקים של התחשבות אחד בשני וויתורים ואף אחד לא מעלה בדעתו שזו כפייה ונטילת חופש הפרט. תחושה 'חברתית' זו מובנת מאליה במשפחה, והיא ידועה גם ביישובים קטנים כמו קיבוץ, אך מיטשטשת בערים גדולות וברמה של עם. אלא שהדבר שמיטשטש הוא רק התחושה לגבי התלות הנתפסת כניגוד ולא עצם התלות של האחד בשני. זהו המקור למתח בין יחיד לחברה.

החברה רוצה את טובת חבריה. הרי לשם כך כולם התאחדו ליצור חברה. אלא שבגלל ההבדלים ביכולת לראות לרחוק, אם בגלל חוסר ידיעת החוקיות של התפתחות האירועים ואם בגלל היות האדם מרוכז בעצמו, יש הבדלים ביכולת החברים לראות שטובת החברה היא טובתם.

3.4 ערכים, אתיקה וחוקים: סוגים של סדר חברתי

אחת השיטות של חברה לייצר איזון בין הפרט לחברה ולשמור על עצמה מפני אנרכיה היא באמצעות ערכים, חוקים, ותקנות. זהו מערך של כללים, ברמות הירארכיה שונות, המכוונות את האדם בעשייתו. בכלל זה גם את התאגידים ובעלי המקצוע השונים. מערך כללים זה הוא ראוי כאשר הוא מאזן באופן מכוון את המתח בין הפרט לחברה, לטובת הפרט והחברה. אחד ההבדלים המהותיים בין החברות השונות עוד משחר ההיסטוריה, הוא באופן בו הן מנהלות מתח זה.

את הרעיון לסדר החברתי המודרני משייכים בדרך כלל לחכמי יוון. הבולטים שבהם הם אפלטון ואריסטו שהקדישו לנושא זה של מבנה החברה חיבורים מקיפים Republic, Law, Protagoras של אפלטון ו"אתיקה" של אריסטו.

אתיקה (ethics) היא מיוונית ethos שמשמעה "הרגל" או "אופי" (character). מילה נרדפת לאתיקה היא "מוסר" (moral). האטימולוגיה של moral היא מלטינית mores שהם "הרגלים". ואכן על פי מילון מילים נרדפות באנגלית (Hayakawa, 1971) אין הבדל במשמעות האתיקה והמוסר, אחד מקורו מלטינית ואחד מיוונית. הרעיון של אריסטו הוא שבהקניית הרגלים נכונים לאדם, ההופכים לטבע שני שלו, אפשר לייצר חברה בריאה. זאת בהתאם לטענות אפלטון, המורה שלו:

"The sum of education is right training in the nursery... For we are not speaking of education in this sense of word [retail trader, or of captain of a ship], but of that other education in virtue from youth upwards, which makes a man eagerly pursue the ideal perfection of citizenship, and teaches him how rightly to rule and how to obey. This is the only training which, upon our view, would be characterized as education; that other sort of training, which aims at the acquisition of wealth or body strength, or mere cleverness apart intelligence and justice, is mean and illiberal, and is not worthy to be called education at all". (Plato, The Laws. Translation by Jowett, p. 401-402).

האופי של האדם הוא לא רק מה שנולד אתו, הטבע הראשון, אלא גם הטבע השני אותו ניתן לעצב.

המונח "מוסר" נגזר במשמעותו משני רעיונות. מפועל "מסר" הנגזר מלשון מסירה ומשם עצם "יסר" הנגזר מלשון ייסורים המתלווים בדרך כלל למסירה זו. ייסורים לא במובן של סבל אלא במובן של הגבלת תנועה רוחנית, בדומה להגבלת תנועה פיזית במלה "אסר". ההרגלים אותם מוסר האב לילדיו: "שָׁמַע בְּנֵי מוֹסֵר אָבִיךָ וְאֶל-תַּשֵּׁחַ תּוֹרַת אָבִיךָ" (משלי א, ח). מאפיין חשוב של הרגלים אלו הנמסרים על ידי ההורים באמצעות ייסורים הוא שמרבית הילדים לא ינקטו בהם מרצונם החופשי. כאשר מלמדים אותם לפעול על פיהם, הם נראים להם כחסרי טעם. לכן הרגלים אלו הם הערכים עליהם דובר לעיל. ערכים אלו לא דבר שמלמדים אלא מקנים. משנקנו הערכים, הם נראים כדבר מובן מאליו שלא ניתן להסבירו. היבט זה מאפשר הבחנה חשובה בין חוקים לערכים, ששניהם זומים בהיותם מגדירים את הראוי ואת הלא ראוי. הרגלים אלו ההופכים לערכים הם אלו שנותנים לאדם את שמו: "טוֹב שָׁמַע מְשָׁקֵן טוֹב" (קהלת ז, א). הם אלו המאפשרים לילד לעבור ממצב של "אני, כאן, עכשיו" למצב של בוגר "אנחנו, בכל מקום, תמיד".

הדיון באתיקה, במוסר, ובערכים הוא תמיד בהקשר לחברה ולאופן בו יש ליישב את מה שנראה כהתנגשות בין רצון הפרט לרצון החברה. ערכים המרכיבים את ה"מוסר" הם הרגלים, צורות התנהגות, עקרונות וכללי התנהגות אותם החברה מעריכה כנחוצים להישרדותה ולטובת חבריה ליצירת האיזון הנכון. ובניסוח מודרני: "יותר מכל מבטאת המדינה הדמוקרטית את רצונם, הסכמתם ויכולתם של יחידים ושל קהילות להתארגן יחד ולקיים חיים משותפים, זה לצד זה, במטרה להשיג אינטרסים משותפים וערכים חשובים" (נחמיאס ושות', 2010, עמ' 325).

כל חברה זקוקה לערכים ולחוקים המייצרים סדר חברתי, היחסים בין הרבדים השונים של החברה, בין הפרטים לחברה, ובין תתי-הקבוצות שלה. כאשר הערכים ראויים – הם ישפרו את שרידות החברה ואף יהפכו את חיי החברים למהנים ויקדמו את רווחתם באופן רוחבי. ערכים לא ראויים, למרות שמכונים "ערכים", לא ישמרו על החברה. חברות רבות נמחקו מהמפה ההיסטורית בגלל שאימצו ערכים שלא הבטיחו את עתיד נכדיהם. לכן לא כל מה שמכונה "ערך" הוא באמת בעל ערך.

אפשר להפוך ערך לחוק באמצעות הגדרתו כחוק. למשל, הערך של לעזור לאדם במצוקה מופיע בחוקי תעבורה כחוק האוסר על אדם לנטוש זירת תאונה מבלי לעזור. חקיקה זו מעידה על ירידה בערכיות החברה, אם אכן היה קיים כערך לפני החקיקה. אם לא היה קיים לפני כן בחברה כערך, חקיקה זו מהווה עלייה בערכיות. בקיבוצים של פעם החברים בחרו מרצונם להקדיש את זמנם לציבור. אם הקדשה זו הופכת לחובה, הדבר מעיד על ירידה. ערכים הם תעודת הזהות של החברה.

ערכים נמצאים מעל החוק במובן שהם משפיעים על עצם קיומו של החוק ועל אופן יישומו. ערכים חשובים יותר מהחוק גם בגלל שהם יושבים על הלב (ההרגל) ולכן קרובים יותר לעשייה. חוקים מצריכים מחשבה בעוד ערכים הם טבע (שני). ליישום החוקים נדרש האדם לחשוב עליהם ולפעול בהתאם. ערכים גם יעילים יותר מהחוק בהיבט האכיפה. יכולת האכיפה של החוק מוגבלת לחוקים הקשורים לעשייה ובכפוף לגילוי ולהוכחה בעוד שערכים פועלים גם בלב – המצפון והבושה הם שומרי הסף. התפקיד המכריע של בושה מתגלה באמירה על אדם שפעל בניגוד לערכים כ-"חסר בושה". תחושת הבושה היא חשובה לקיום החברה ולכן חשוב לפתח אותה.

ערכים אינם מבוססים על מדע אלא על אמונה. על אמונה מתאמתת. כמובן שכאן עולה מייד השאלה כיצד בוחרים את הערכים המכוננים את החברה. או לחילופין, כיצד נמנעים מערכים ההורסים חברה ומדינה.

החוקים והערכים מכוונים גם את פעולותיהם של מהנדסים ברמה אישית, רמה חברתית-לאומית ובנילאומית. היחס לסביבה יכול להיות מנומק שכלית אך העשייה בפועל נקבעת על ידי ערכים (Smith,)

1995). מהנדסים מקבלים החלטות בעלות השלכות בטיחותיות וכלכליות המשפיעות על ציבור רחב. וגם להיפך. ההנדסה והטכנולוגיה משפיעות על ערכים (Ackermann, 1981). החוקים מגבילים את היצירה ההנדסית מכיוון שהם מהווים אילוץ בו צריך לעמוד המתכנן וגם תהליך התכנון עצמו. למשל, המערכת המתוכננת צריכה שלא לזהם את הסביבה וגם תהליך התכנון צריך להיות לא מזיק. ישנם גם ערכים המגבילים את פעולת המהנדסים.

חלק מהערכים שונים בטבעם מחוקים בהיותם מניעים את העשייה ולא רק מגבילים אותה, בגדר "עשה טוב" לצד "סור מרע". כך למשל תחושת הדאגה לבעלי נכויות שונות מניעה מערך הנדסי מסוּפּף של יצירת מתקנים בהתאם לנדרש. פרוט על שתי דרכי השפעה אלו בפרקים 5 ו-6 בהמשך.

על מנת להבין טוב יותר הדרישות הערכיות והאתיות ממהנדסים, נתאר בקצרה מספר היבטים כלכליים המהווים מרכיב נוסף בסדר חברתי אשר להם יש ממשק הדוק עם ערכים ונגזרות לעבודתם של המהנדסים.

3.5 כלכלה כמרכיב בסדר חברתי

הוזכר לעיל שהמשאב הכלכלי הוא אחד ממרכיבי החוסן החברתי מעצם האפשרויות הגלומות בו לפעול כנגד כוחות מפרקים. גם לאופן ניהול הכלכלה יכולה להיות השפעה על החוסן החברתי. כל שיטת ניהול כלכלי טומנת בחובה סוג מסוים של יישוב המתח בין יחיד לחברה. לאופן היישוב יש השפעה על פעולתם של המהנדסים. שתי דוגמאות יכולות להמחיש את הקשר שבין חברה לכלכלה.

המצאת השיטה המטרית בתקופת המהפכה הצרפתית כתקן מידה, באמצעות המטר והקילוגרם הסטנדרטיים, לא נועדה לקדם את המדע, כפי שנהוג לומר, אלא לצמצם את מגוון האפשרויות בהן בעלי ההון (הכנסייה, המושלים, והוסאלים) יכולים לרמות את פשוטי העם (אלדר, 2006). בתקופה שלפני המהפכה הצרפתית, בצרפת לבדה היו כ-800 יחידות מידה שונות ששימשו את הרוכלים (Alder, 1995). פעולת "תקינה" הנדסית-טכנולוגית נבעה מצורך בהסדר חברתי.

דוגמה נוספת לקשר שבין אופן התנהלות כלכלית למאפייני החברה הוא במנהג שהיה מקובל מאות שנים באירופה על פיו הירושה עוברת בשלמותה (או ברובה) לבכור (Primogeniture) ובכך מותרת את הילדים הנוספים ללא רכוש כלל. עיקרון כלכלי זה, שיושם באירופה מהמאה העשירית (Bertocchi, 2006), יצר שרשרת ענפה של תהליכים חברתיים בהם נוצרו פערים עצומים בין פרטים בחברה. ברי המזל הנהיגו תהליכים חברתיים מגוונים במטרה לשמר את מעמדם. כך למשל, בתקופה מסוימת באריסטוקרטיה צרפתית נאסר על מי שאינו בכור להתחתן (Fields, 2021).

שילוב של שני ההיבטים, עושק העניים באמצעות יחידות מידה שונות ויצירת פערים גדולים באמצעות הירושה, בוודאי עיצבו את החברה באופן משמעותי ולכן הכרתם הכרחית להבנת ההתפתחויות ההיסטוריות.

להמחשת האתגרים הערכיים להם נחשפים המהנדסים בעבודתם בהקשר החברתי נתמקד בשתי גישות, נוגדות לכאורה, לניהול כלכלת חברה, סוציאליזם וקפיטליזם. נכתבו אינספור מאמרים וספרים בנושאים אלו, בעד ונגד, על ידי מומחים מתחומים רבים. לצורך הדין בעבודת המהנדסים נתאר את שתי הגישות ברמה עקרונית במספר היבטים מצומצם, תוך נקיטת זהירות המתבקשת מהעובדה שבמציאות שתי הגישות מוצמדות לשיטת ממשל ולכן בעלות גוון פוליטי. כך למשל רבים טענו שכאשר נפלו חומות ברלין, בהחלטת נשיא רוסיה גורבצ'וב, הוכרע הניצחון של הקפיטליזם על הקומוניזם

(למשל, 1, p. 2014, Block and Somers). מסיבה זו המחשת העקרונות באמצעות דוגמאות מההיסטוריה צריכות לנטרל את המרכיב הפוליטי מהחברתי, ולשם כך נפתח בניסיון להגדיר את המונחים.

המונח "סוציאליזם" אומץ באירופה בתחילת המאה ה-19. המונח עצמו חומק מהגדרה ומאגד תנועות וגישות המכוונות לטובת החברה ובמיוחד בצמצום הפערים וביטול הניצול של חלשים (Encyclopedia Britannica, Socialism, 1963 - אנציקלופדיה המוגדרת כמיועדת למומחים שלא בתחומם).

ראשית הקפיטליזם, כפי שמוכר לנו היום, הוא במהפכה התעשייתית הראשונה באנגליה בסוף המאה ה-18 (כמפורט בהמשך בסעיף 5.1). הבסיס הרעיוני של הקפיטליזם, המיוחס לאדם סמיט' (Adam Smith, 1776), הוא "שוק חופשי", חופשי מרגולציה שלטונית: "בבסיסה של ההצדקה האידיאולוגית נמצאת הגישה הרואה את השוק החופשי כערך מוביל" (נחמיאס ושות', 2011, עמ' 21). בתצורת שוק כזו כל אחד דואג לעצמו במסגרת האמצעים שעומדים לרשותו והיכולות שלו. בהתאם לכך, סעיף 11 בחוק החברות משנת 1999 מגדיר את מטרת התאגיד "השאת רווחים".

באופן סכמתי ופשטני שתי נקודות מבחינות בין הסוציאליזם לבין הקפיטליזם:

- האם וכיצד דואגים לחלשים (אלו שלא מצליחים לכלכל את עצמם);
- כיצד מניעים את כלכלת המשק.

הסוציאליזם והקפיטליזם עונים באופן שונה על שאלות אלו.

הקפיטליזם עונה לשאלה הראשונה בעתיד ולשאלה הראשונה בהווה. הנעת הכלכלה היא באמצעות המוטיבציה האישית לרווחה ולכבוד של היזמים בעלי האמצעים היוצרת תחרות המניעה את המשק ל-"צמיחה". לשאלת הדאגה לחלשים הקפיטליזם מתייחס באופן עקיף כמתקבלת כתוצאת לוואי טבעית במשק חופשי ותחרותי. העיקרון הוא שמי שטורח ערב שבת אוכל בשבת, ומי שלא לא. מכיוון שקשה לזהות את הסיבה בגללה מי שלא טרח לא טרח, הנחת המוצא היא שהדבר בגלל שלא רצה. תשובה פופולרית נוספת היא שאם לעשירים יהיה הרבה ממון, גם העניים ירוויחו מכך. התועלת תחלחל גם לחסרי המזל והפחות מוצלחים בתהליך שיתרחש מעצמו ללא הכוונה מסודרת.

הסוציאליזם עונה לשאלה הראשונה בהווה ולשאלה השנייה בעתיד. הדאגה לחלשים מושגת באמצעות רגולציה שלטונית ומהווה את עצם הגדרת התנועה והרעיון שמאחוריה. סוציאליזם אינו מתייחס באופן מפורש לאופן הנעת המשק אך מובלע בגישתו הדגש על שיתוף פעולה בין חברים, גם אם ההישג שיושג נחות ביחס להישג של הקפיטליזם בהיבט זה.

תשובות אלו מבוססות על הנחות ועל מודלים בעלי דרגות שונות של התאמה למציאות. בתנאים של אי-וודאות, ההבדל הוא במידת הקרבה שלהם למציאות ובסוג הנזקים הנובעים מאי-וודאויות ומפערי ידע. טעות בהנחות ובמודלים של צד אחד מובילות לנזקים מסוג אחד וטעויות של צד שני מובילים לנזקים מסוג אחר.

שתי הגישות הן "אידיאולוגיות", כלומר "אמונות", מצב המאפשר לכל צד לטעון לצדקתו:

"...we use the label "market fundamentalism" because the term conveys the quasi-religious certainty expressed by contemporary advocates of market self-regulation. Moreover, we want to emphasize the affinity with religious fundamentalisms that rely on revelation or a claim to truth independent of the kind of empirical verification that is expected in the social sciences". (Block and Somers, 2014, p. 3).

בחינת הנחות של שתי הגישות מגלה שיש להן אחיזה במציאות אך אינן נכונות באופן בלתי מסויג. ההנחות של הקפיטליזם קרובות למציאות של אנשים רבים שעיקר עיסוקם הוא רווח כלכלי גם כאשר הם רחוקים מאיום קיומי. כך נוצרת חברה בה כל חברה פועלים כך. גם להנחה השלישית יש יסוד, שכן עולם הטבע ברובו מתנהג על פיו, תחרות בין המינים ובתוך המין עצמו (למעט יוצאי דופן שהוזכרו לעיל).

ניתוח עומק של קבוצת חוקרים מאיטליה, Franzini et al (2016), מראה שהטענה ש"העשירים הם עשירים לטובת הציבור" היא סיסמה ריקה. מגרעות שונות של השוק החופשי זהו כבר לפני שנים, שכללו: חלוקת משאבים, חלוקת תעסוקה, אבטלה ובזבוז משאבים, ניצול וחוסר שוויון, וריכוזיות (Rogan, 2017). עיקר הביקורת היא ערכית-חברתית (Rogan, 2017) שכן הרעיון הקפיטליסטי הוא זה שהצדיק את הקולוניאליזם ואת העבדות שהתלוותה לו. זו אחת העדויות לכך שהאיזון לא מתקיים.

הסוציאליזם אומר שצריך לעזור לחלשים הפחות מוכשרים או ברי מזל. עזרה זו תבוא מכספי הציבור במנגנונים שונים. על מנת להיות יעילה ויציבה לאורך זמן, העזרה לחלשים מצריכה הבחנה בין אלו שבאמת חלשים לבין מתחזים, אם ישנם. יכולת זו קיימת במקומות בהם קיימת הכרות אישית כמו במשפחה או ביישוב קטן אך מצריכה מיומנות רבה במקומות בהם חסרה הכרות כזו כמו בערים. תחושת זרות בעיר היא גם זו שיוצרת ניכור ומזמנת התחזות ואף עלולה לפגוע בשיתוף הפעולה בין החברים. העידוד להתקדמות החברה בסוציאליזם אמור לנבוע מהזדהות האדם עם מטרות החברה, עם חברה, ומתחושת שותפות גורל מבחירה.

כך שתי ההנחות הראשונות של הסוציאליזם אומנם מתקיימות במשפחה ובמקומות קטנים, אך אינן מובנות מאליהן במקומות גדולים וברמה של עם בהעדר איום קיומי נראה לעין. האתגר הוא לשמר תחושת שייכות ושותפות גם בהעדר איום קיומי.

ההנחה השלישית של קיומם של מנהיגים לחברה שחושבים על טובתה ולא על טובת עצמם ויודעים להוביל לטובת החברה לכאורה צריכה להתממש בבחירות דמוקרטיות. אלא שתנאי מוקדם להצלחה בתהליך זה היא שיהיו מנהיגים פוטנציאליים ראויים ושהציבור ידע להבחין בין אלו שרוצים את טובת החברה לבין אלו שרק אומרים זאת.

מהנדסים פועלים בממשק שבין עשייה כלכלית וחברתית. להחלטות שלהם יש משמעויות כלכליות וחברתיות (כפי שיפורט בפרק 5). היכולת שלהם לפעול והאיזון שיעשו תלויים באם הם פועלים בסביבה קפיטליסטית או סוציאליסטית. כך למשל, החלטות הנדסיות בשאלות הבאות עשויות להיות שונות בסביבה קפיטליסטית וסוציאליסטית:

- בחירת תהליך ייצור יקר יותר אך פחות מזהם;
- רכישת חומר גלם יקר יותר ממפעל שפחות מזהם או שמתחשב יותר בעובדיו;
- הכשרת מהנדס צעיר בעבודה גם אם קיים חשש שיעזוב את מקום העבודה בעוד מספר שנים בודדות;
- ביצוע תהליך פיתוח מוקדם יותר להשגת אמינות גבוהה למרות שהוא יקר יותר.

החלטות המיטיבות עם הטווח הרחוק אינן משתלמות בטווח הקצר. דבר זה מזכירים בכל כנס חינוך, כאשר מדגישים שצריך לטפח שתילים מבלי לצפות לתוצרים בטווח הקצר. הקושי הוא לעשות זאת בתנאים של אי-וודאות ופערי ידע.

תופעה זו באה לידי ביטוי באופן בולט במגפת הקורונה בה הממשלות נדרשו לנקוט פעולה. מדינות רבות השתתהו בהחלטה על סגר מכיוון שיש לו משמעות כלכלית. כאשר המרכיב הכלכלי הוא משמעותי בדעת ציבור, נדרש נימוק מבוסס יותר לפגיעה כלכלית. גם בפרוץ מלחמת יום כיפור נמנעה הממשלה מגיוס מילואים כאשר היו סימנים ממשיים לתקיפה, כאשר אחד השיקולים היה שמא גם הפעם מדובר בהטעיה ויצא שההוצאות על גיוס היו לחינם.

תמונת מצב זו מובילה למסקנה שנדרש שילוב כלשהו של שיקולים חברתיים וכלכליים, בו זמנית ו/או לסירוגין בתקופות, כפי שאכן רבים מציעים (shifting evolvments):

"The increasingly transparent weaknesses and contradictions in the capitalist system may eventually convince even some of its more uncritical supporters that an alternative needs to be found. But the conviction that there is and can be no alternative is very deeply rooted, especially in Western culture. That conviction is supported not only by the more blatant expressions of capitalist ideology but also by some of our most cherished and unquestioned beliefs about history - not just the history of capitalism but history in general". (Wood, 2002).

לכל גישה יש יתרונות וחסרונות ולכן השאלה היא איזה טעויות ואילו נזקים החברה מעדיפה. בגישה הקפיטליסטית הרווח הוא "צמיחה" כלכלית ורמת חיים והסיכון הוא איכות חיים וחוסן החברה. בגישה הסוציאליסטית הרווח הוא לכידות החברה וחוסנה והסיכון הוא רמת חיים נמוכה (בטווח הקצר) מזו שהיתה מתקבלת בגישה קפיטליסטית.

3.6 משאבי חברה ונחלת הכלל

המשאבים המשותפים של חברה, כמו משאבי הטבע (מחצבים בעלי חשיבות, עצים, קרקע חקלאית, נפט, ים המלח או גז) נמצאים בתפר שבין הכלכלה לחברה. המשאבים הם בוודאי מקור לחוסנה של חברה המאפשרים לה להתמודד עם כוחות מפרקים. האופן בו החברה עושה שימוש במשאבים אלו היא תופעה חברתית, מושפעת ממגוון תהליכים בחברה מצד אחד, ומשפיעה עליה מצד שני.

המשאב האנושי הוא משאב חברתי לא פחות חשוב ממחצבים, אם לא יותר. המוכנות של החברים להיות חקלאים, רופאים, חיילים בצבא העם, מפני הזבל, מהנדסים וכל המקצועות הנוספים להם זקוקה החברה הנם הכרחיים לשמירה על חוסנה. הראש יכול לטעון שאינו זקוק ללב, והלב יטען שאינו זקוק לרגל, אך אין ממש בטענות אלו. לכן אין מעלה אינהרנטית לבוגרי אוניברסיטה אם אין מי שיטפל בזבל בבית ובחברה.

בנוסף, היכולת של האדם להינפש, לצבור אנרגיה נפשית, תלויה במידה רבה בקיומם של אתרי טבע בראשיתיים, נחלים, וחופי ים זמינים. החיבור של האדם לאדמה אינו גלוי במחשבה מערבית אך הוא ברור.

היכולת של החברה לטפח משאבים אלו, לשמור עליהם ולעשות בהם שימוש הולם לטובתה מושפע באופן חריף מטבעו של חיבור בין החברים. קהל יתייחס למשאבים אלו באופן שונה מהתייחסותה של חברה. את השפעת תחושת האחדות של החברה על משאבים אלו אפשר להמחיש באמצעות ניקיון. רבים מקפידים שלא להוציא את שקית הזבל לפח השכונתי אם הפח מלא או שיחפשו פח מרוחק יותר

שאינו מלא. מבחינתם, הניקיון בחוץ חשוב לא פחות מהניקיון בבית ומי שהולך ברחוב לא ירגיש דחיפות להשליך את השקית אותו אינו צריך עד שיגיע לפח. אנשים אלו עשו את פעולת "הרחבת האני" המובילה אותם לחוש שהשכונה, העצים, והשכנים הם חלק מה-"אני" שלהם.

כפי שראינו בסעיף הקודם, הגישה הקפיטליסטית המעמידה את ההיבט הכלכלי בראש סדר העדיפויות, לצד האינדיבידואליזם המתלווה לכך, מעכבת את פעולת הרחבה זו ונותנים לגיטימציה למושג ה"פראייר", לו אין מקום בחברה המתנהלת כמו משפחה. לא ידוע לנו האם אחד הזנבנים או הפילים מרגיש "פראייר" בכך שהוא עוזר ללהקתו.

בהעדר הרחבת ה"אני" יקשה על האדם שלא לזרוק את הזבל בפח המלא על גדותיו ושלא לנצל את משאבי הטבע לצרכי עצמו, או למה שנראה לו כצרכי עצמו. בהעדר הרחבה זו, הנפוצה יותר בעיר, יקל עליו לתרץ את התנהגותו באמצעות נימוק מושכל מהסוג של: "אם אני לא אנצל, מישהו אחר יעשה זאת", ודי בכך להצדיק את חוסר ההתחשבות בחברה. בתנאים אלו זמינותם של המשאבים מקבלת חשיבות משנית, כמו כל היבטי הכלכלה שנדונו בהקשר לחוסן חברתי. טייסת מטוסים משוכללים לא תגן על החברה אם לא יהיה מי שיתנדב להפעיל כלים אלו להגנת החברה (ואין צורך לפרט על ההפסד שבפנייה לשכירי חרב).

הטבע הוא משאב אישי-משפחתי-עירוני-לאומי-אנושי. ישנם היבטים המשפיעים רק ברמה האישית, ישנם דברים שנוגעים לכל המשפחה, לשכונה, למדינה ולאנושות כולה. היכולת לראות נכון את השייכות של הדברים ברמות השונות ולפעול בהתאם מתוך ערבות תלויה במידת הרחבת האני שעשה האדם, או במילים אחרות, בתפישה של גודל הסירה בה אנו נמצאים, על פי הקריקטורה מפי ר' שמעון בר יוחאי בה אנשים בסירה והאחד קודח בתחתיתה. לשאלת חבריו הוא אומר: "מָה אֶכְפֹּת לָכֶם, לֹא תַחֲתִי אֶנִי קוֹדֵחַ?" (מדרש ויקרא רבה, ד, ו). במצב של העדר התחשבות האחד בשני, ובמיוחד במצב של תחרות ועוינות, כל קבוצה מנסה לנכס לעצמה את המשאב הטבעי ולנצל אותו לטובתה. תהליך זה אינו יציב בתנאים בהם המשאב הטבעי הוא סופי.

משבר האקלים, המאיים על הקיימות (Sustainability) של הדור הבא, הוא דוגמה לכך. לפני ארבעים שנה, בוועידת האקלים בברזיל כבר דובר על הסכנה האקלימית. מרבית הציבור לא היה מודע לסכנה ורבים דחו את התחזיות הקודרות. היום אין כמעט מי שמערער על כך (אולי רק אלו שעדיין חושבים שכדור הארץ אינו כדור). התחממות, עליית מפלס האוקיינוסים, הפלסטיק באוקיינוס ותופעות נוספות הסירו את הספקות וממחישות שאנחנו בסירה אחת.

קיימות הוא שם כולל להתנהלות חברה תוך התחשבות בסביבה ובמשאבי הטבע ושמירה עליהם כערך ומחשבה על עתיד הנכדים, כפי שנכתב במדרש: "תַּן דְּעֵתְךָ שְׁלֹא תִקְלַקֵּל וְתַחֲרִיב אֶת עוֹלָמִי, וְשֹׂאֵם קִלְקֵלְתָּ אֵין מִי שְׂיִתְקֵן אַחֲרָיךָ" (מדרש קהלת רבה, ז, יג). כך למשל, את החמץ בערב פסח שורפים באמצעות הלולב וההדסים היבשים שנשארו מחג הסוכות שנחגג חצי שנה לפני כן.

מי שהורג פילים ולוויתנים עושה זאת מתוך ראייה צרה של טובתו קצרת מועד מבלי להתייחס לפגיעה שהוא יוצר בעולם, פגיעה שתשפיע גם על נכדיו (אם יהיו לו). גם המדינות המחשיבות את שמירת הסביבה כערך, מבצעות תהליכים הפוגעים בסביבה במדינות העולם השלישי. למרות התעוררות המודעות לקיימות ומידע מדעי בנושא, עדיין התגובה של העולם אינה מספקת. כך למשל הפגיעה בחרקים. כבר שנים שמומחים מתריעים על פגיעה הדבורים ובחרקים בגלל תאורת הלילה הרבה, פגיעה שמזיקה לצמחייה ויכולה להיות הרסנית יותר מעליית הטמפרטורה על כדור הארץ. אך אותו מנגנון שפועל בניצול משאבי הטבע, בהעדר הרחבת האני, פועל גם כאן. גם מי שחושב על הקטנת

הצריכה שלו למען הדורות הבאים, נבלם במחשבתו שממילא הרוב אינם מקטינים וכך הוויתור שלו יהיה לשווא.

3.7 שינוי חברתי: יזום או תוצאתי

ההיסטוריה מלמדת שכל חברה משתנה. שינויים קטנים בזמנים קצרים ושינויים גדולים בזמנים ארוכים. חלק מהחברות נעלמות מהעולם, אחרות נולדות ומשתנות. לא כל שינוי הוא בהכרח התקדמות עליו אפשר להעיד כ-"קידמה". מעיזות על כך חברות שנמחקו מהעולם, נזקי מלחמות העולם שהתרחשו בגלל שינויים כאלו ואחרים ובעיות לאומיות ובינלאומיות שנולדו בעידן "פוסט-אמת" (למשל, אדרס ושות', 2021).

את מגוון השינויים בחברה אפשר לסווג על פי אופן הייזום שלהם. השינוי יכול להיות יזום על ידי נציגי החברה ועל ידי חברים בה. הכלים באמצעותם נציגי החברה מעצבים את החברה כוללים: חינוך לערכים, תיקון חוקים, תקנות ורגולציה. הכלים שעומדים לרשות החברים הוא הפצת מוצרים או רעיונות בדרכים מגוונות. יוזמות אישיות מופצות מפה לאוזן. כך מופצים רעיונות בין הורים כיצד להרדים את הילדים ולפעמים רעיונות הנראים כטובים במבט ראשון מתבררים כמזיקים. זהו "זיהום מחשבת" המתפשט כמו וירוס.

כל יוזמה יכולה להתממש ולהוביל לטובת החברה, להתממש ולא להוביל לתוצאה הרצויה, ויכולה להתממש ולהוביל לתוצאה הפוכה מהכוונה המקורית או אף להוביל לרעת החברה. החברה יכולה להשתפר הן בתהליכים מנוהלים והן בתוצאתיים. באופן דומה, יכולים להגרם נזקים לחברה הן בתהליכים מנוהלים והן בתוצאתיים. תהליכים מנוהלים יכולים להוביל לנזק כאשר הנחות הבסיס או המודלים שבבסיס הרעיון לשינוי היו שגויים או שהביצוע שלהם לא היה מתאים. החברה יכולה להינזק בתהליך תוצאתי כאשר היוזמה לשינוי לא לוקחת בחשבון את טובת החברה או שחסר ידע להערכה מינה של התוצאה הצפויה. המשבר הכלכלי העולמי שהתרחש בשנת 2008 נבע מתהליכים כלכליים-חברתיים שיושמו כעשור לפני כן באחד או בשילוב מנגנונים אלו.

דוגמה לשינוי חברתי יזום מוצלח על ידי נציגי החברה בארץ הוא בקמפיין תקשורת של החברה להגנת הטבע לשמירה על פרחי בר לפני מספר עשרות שנים או של הממשלה לצמצום בזבז מים. דוגמה ליוזמה פחות מוצלחת היא חקיקה של הממשל הפדרלי בארצות הברית אשר העלתה בשנת 1988 את משך המאסר המינימלי כעונש למשתמשים בסמים ולסוחרים בהם. כעבור מספר שנים התברר שלא רק שהדבר לא הוביל לירידה בסחר ובשימוש, אלא שבתי הכלא התמלאו במשתמשים מסוכנים מבלי לצמצם את רמת הפשע (Anderson, 2008, p. 137).

דוגמה ליוזמה עם תוצאה מזיקה לא צפויה בארץ היא שלאחר שהוחלפה שיטת מספר לוחיות הרישוי במכוניות בשנת 1980 נוצרה בעיה חברתית של קניית מכוניות חדשות רק בגלל שהשכן קנה. בעקבות זאת בשנת 1985 שונתה שוב שיטת מספור לוחיות הרישוי. דוגמה לפעולה שלא מועילה היא חוק הספרים שנחקק באופן זמני בארץ לפני כעשור אשר נועד ליצור שינוי חברתי, אך לא צלח. דוגמות לייזום שהוביל לשינויים תוצאתיים גדולים בהרבה מאלו שכיוון אליהם הם האינטרנט כממשק מחקרי ללא מטרת רווח וטלפון סלולרי כיוזמה פרטית עסקית.

דוגמאות אלו ממחישות שהשינויים בחברה הם שילוב כלשהו של שינויים מנוהלים (מושכלים יותר או פחות) לבין שינויים תוצאתיים. שילוב בין ניהול לבין התנהלות.

אפשר לומר שתכנון חברתי הוא למעשה הנדסה, וככזו, לתכנון מכונן נדרש ליישם עקרונות הנדסיים, כמו למשל, ניתוח אופני כשל. איחוד אירופה הוא דוגמה לתכנון חברתי רב לאומי. מעניין היה לראות את מסמכי התכנון שלהם, את היעדים, החלופות שנבחנו, והשיקולים לבחירה בחלופה שנבחרה וכשלים שנחזו וכיצד תכננו להימנע מהם.

ייזום שינוי חברתי באופן מכוון מצריך ידיעה של החוקיות המגלמת את הקשר בין סיבה לתוצאה. במובן זה ייזום חברתי דומה לתכן הנדסי בו מוגדר יעד לכינון יכולת ומתבצע תכנון שיוביל לשינוי. גישה הנדסית זו לתכנון חברתי מתוארת על ידי Banathy (1996). עם זאת, מדעי החברה מתקשים לאפשר חיזוי כפי שנדרש בהנדסה מכיוון שהם ממוקדים יותר בהסבר התופעות בדיעבד:

"Social scientific analysis of technological advance tends to be 'post mortem', not predictive". (Robertson, 1981, p. 439).

אחת התוצאות של כך היא שלא רק שקשה לחזות כיצד לערוך שינויים לטובת החברה, קשה לשלול קיומם של גורמי נזק חבויים בשינויים המיוחלים:

"Mass societies are passive towards socio-technological problems until ill-effects appear. So far there is no effective system of prediction and control". (Robertson, 1981, p. 439).

המגבלות של תאוריות סוציולוגיות לחזות תהליכים מתוארת בסקירה של תאוריות על שינויים בחברה (Boudon, 1986):

"Between 1950 and 1980 the social sciences-sociology, economics and political science – produced a considerable number of 'theories of social change'. Since they did not constitute a homogeneous unity, one of our first tasks is to establish and clarify their aims and indicate their major types.

The general impression prevailing in much current writing is that such theories have failed. Most of the predictions based on them have been proved false by reality. They have generated representations of social systems which are not only simplified – which is legitimated – but simplistic. And most of the macroscopic regularities which they put forward as generally valid now seem only locally so".

עם זאת, לא בהכרח נדרשות תאוריות סוציולוגיות על מנת לשפר את המצב. אפשר להדגים זאת באמצעות החשש אותו הביעו רבים מהכנסת טכנולוגיה חדשה שתוביל לפיטורי עובדים (למשל יתרונות גדולים בגלל הפגיעה בפרנסה. אך הכרות פשוטה עם תהליכים חברתיים מאפשרת למדינה ליצור צימוד בין הכנסת טכנולוגיה לבין דאגה לאלו שנפגעים לכאורה ממנה. למשל, באמצעות תהליכים חברתיים המאפשרים לנפגעים ללמוד מקצוע חלופי. פשרה זו היא אינטרס של החברה כולה. גם להכניס טכנולוגיה מתקדמת וגם לא לפגוע בחברים.

עריכת ניתוח אופני כשל, אפילו לא מושלם, בהעדר ידע וודאי, עשוי להציף חיזי היווצרות נזקים פוטנציאליים ולמנוע אותם מבעוד מועד. זוהי הזהירות המתבקשת בהכנסת שינויים פשוטים שהשפעתם יכולה להיות מרחיקת לכת. במקרים אלו עוזרים הערכים. לעשות את הדבר הנכון גם אם

לא יודעים כיצד הוא יוביל לטוב. לעזור לאדם שלא מכירים גם אם לא ברור כיצד זה יועיל לעוזר. לא לשקר גם אם לא ברור כיצד זה מועיל.

כפי שמתואר בפרקים הבאים, להנדסה יש השפעה רבה על החברה בשני הערוצים, היזום המכוון והיזום התוצאתי. על מנת להימנע מיצירת נזקים בשני הערוצים על המהנדסים להיות מודעים לכך ולהכיר את המנגנונים, כפי שיתואר בפרק האחרון של הדוח. כמובן שעליהם גם להכיר את הגורמים הנוספים הפועלים לצידם ביצירת שינויים בחברה, דבר עליו נעמוד בהמשך.

3.8 יעדי החברה

האגודה האמריקאית להסמכה של תוכניות אקדמיות הכשרת מהנדסים, ABET, מתייחסת להנדסה כאל אמצעי למטרה חברתית "benefit to the mankind". בהגדרה זו חבוייה ההבנה שקיים מושג של "טובת החברה" וגם ברורה מהי.

על מנת לפעול לטובת החברה צריך להיות ברור מהו יעדה ומהו היעד אליו היא צריכה להגיע. היעדים מכוונים את העשייה. העדרם של יעדים גורר התנהלות אותה ממשלים באמצעות דג או רכיבה על אופניים. אם לא מתאמצים ברכיבה על האופניים, סימן שנמצאים בירידה. דג שזורם עם הזרם הוא דג מת, והראייה, אינו מתנגד לכוחות המפרקים.

יעדים של חברה הם בין המאפיינים שלה (כמו גם העדרם). אחוזי צמיחה (growth, flourishing), וצמצום פערים בחברה הם דוגמאות ליעדים אפשריים. חברה אחת שמה לה יעד זכאות לבגרות והפצת הלימודים האקדמיים, חברה אחרת שמה לה יעד ליצור איזון בזמינות בעלי מקצוע הנחוצים לחברה ולהקטין את מספר האזרחים הממורמרים בעבודתם. מכאן שיעדי החברה הם בין ההיבטים המבדילים בין חברות. הדבר דומה ליעדי חינוך, שיכולים להשתנות מחברה לחברה. דוגמה ליעדי מערכת חינוך אפשר למצוא בנימוקים לתקציב שנתי של ארצות הברית. בתשובה לשאלה מדוע המדינה אינה מנוהלת בדומה לכל עסק נכתב:

"For example, the Federal Government invests in education and research. The government earns no direct return from those investments; but the nation and its people are made richer if they are successful". (US Gov, 2005, p. 202).

היעדים יכולים להיות בטווח הקרוב, הרחוק, ואפילו הרחוק מאוד. היסטוריון בריטי, Paul Johnson, בעל הכשרה קתולית, שכתב למעלה מארבעים ספרים, הקדיש ספר להיסטוריה של העם היהודי. וכך הוא כתב בהתייחס להבנתו את היעוד ארוך הטווח של העם היהודי:

"No people has ever insisted more firmly than the Jews that history has a purpose and humanity a destiny. At a very early stage in their collective existence they believed they had detected a divine scheme for the human race, of which their own society was to be a pilot. They worked out their role in immense detail. They clung to it with heroic persistence in the face of savage suffering. Many of them believe it still. Others transmuted it into Promethean endeavours to raise our condition by purely human means. The Jewish vision became the prototype for many similar grand designs for

humanity, both divine and man-made. The Jews, therefore, stand right at the centre of the perennial attempt to give human life the dignity of a purpose. Does their own history suggest that such attempts are worth making? Or does it reveal their essential futility? The account that follows, the result of my own inquiry, will I hope help its readers to answer these questions for themselves". (Johnson, 1987, p. 2).

מובן שההתייחסות ליהודים היא כוללנית ואין לומר שזו הייתה גישתו של כל יהודי. את הנימוקים לעמדתו הוא פורס על פני יותר מחמש מאות עמודים. גם אם לא כל אחד יסכים עם המסקנות שלו, נקודת המבט אותה הוא מציע מאפשרת פרספקטיבה רחבה למטרות החברה.

חלק מיעדים קצרי הטווח הם בפועל יעדי ביניים ומהווים אמצעי ליעדים ארוכי הטווח. כפי שתיאר הנשיא הראשון של מדינת ישראל, חיים ויצמן, במושב הפתיחה של כנסת ישראל, הקמת מדינת ישראל כיעד ביניים של שני יעדי על – "התעוררות הלבבות, השיבה למקורות הרוח של המסורת היהודית" ו- "להביא גאולה לעמם בפועל כפיהם ממש" (לוינסקי, 1951, עמ' 489). כך נוצרת הירארכיה של יעדים בעלי יחס של אמצעי-מטרה ורשת סבוכה של יעדים בתחומים שונים שרבים מהם בעלי זיקה רוחבית ליעדים מקבילים. כך למשל, חוסן של חברה הוא אחד היעדים האסטרטגיים שלה הנמצא בראש ההירארכיה שמימושה מצריך מימוש יעדי ביניים רבים הקשורים האחד בשני.

רשת מורכבת זו, הדומה למבנה של כורי עכביש, מאפשרת בקלות יחסית ללכת לאיבוד בסדרי עדיפויות. במיוחד, קל שכוח את היעד רחוק הטווח ולהפוך את האמצעי למטרה. כך למשל, בחברות רבות היעד הכלכלי הוא אמצעי ליעד שאינו בתחום הכלכלי. כמובן שטעות זו של קידוש האמצעי תוך הזנחת מטרת העל ושכחת המטרה מוביל להחטאת המטרה ובוודאי באופטימיזציה בהשקעה בהשגת היעדים השונים.

לא כל יעד הוא ראוי. היעדים משתנים עם הגיל למשל, ולכן מבוגר שבין יעדיו נמצאים יעדים של ילדים, אומרים עליו שהוא ילדו. כך גם חברה שאינה מעדכנת את יעדיה עשויה שלא להיטיב עם עצמה. יעדים יכולים להיות לא ראויים אם השגתם אינה ריאליזם או שלא ידוע כיצד להשיגם. אחד היעדים החשובים לחברה היא להגיע למצב בו רוב הגברים מעל גיל 20 הם בוגרים, מאפיין הכולל את היכולת שלהם להתייחס גם להיבטים הנסתרים מן העין ולהעריך ערכים. המידה בה אזרחי החברה תופשים את המציאות קרוב להווייתה, מידת היושרה האישית של האזרחים, היכולת של אזרחים להודות בטעות. יעדים אלו הם יעדים בפני עצמם, אך גם אמצעים להשגת היעד של חוסן חברה.

יעדים של חברה, בדומה למאפיינים אחרים של חברה, מורכבים באופן כלשהו מיעדים של החברים בחברה. לפרטים בחברה יש יעדים ברמה האישית, שעשויים להיות מקושרים ליעדים ברמה החברתית. מידת ההזדהות של הפרטים בחברה עם יעדי החברה משפיעה על התיאום בין הרמות השונות של יעדים. שני מצבי הקיצון הם כאשר כל היעדים האישיים של האדם מתלכדים או נגזרים מיעדי החברה או כאשר אינם קשורים ליעדי החברה ואולי אף הפוכים (גייס חמישי).

אחת השאלות המתבקשות בהקשר להגדרת יעדי חברה היא אילו ממאפייני החברה כדאי לשמר, לשפר, או למגר. הגדרת יעדים ראויים, הן ברמת הפרט והן ברמת חברה, מחייב התבוננות עצמית כנה והודאה בקיומם של דברים אותם נדרש לשפר או למגר.

מוסכם בין העוסקים בדבר שהבעיות המגוונות הן מקושרות ולכן לטיפול בהן נדרשת ראייה מערכתית רב-תחומית:

"...the myriad of problems challenging both the social order and quality of life encompass so many areas of concern that only an interdisciplinary approach can offer a thorough approach in gaining sufficient understanding into their causes and consequences. This Encyclopedia of Social Problems, therefore, utilizes experts and scholars from 19 disciplines in an effort to provide as comprehensive an approach as possible to this multifaceted field. These subject areas include anthropology, biology, business, chemistry, communications, criminal justice, demography, economics, education, environmental studies, geography, health, history, languages, political science, psychology, social work, sociology, and women's studies". (Parrillo, 2008, p. xii)

למרות הניסוח הכוללני של הבעיות כשייכות לאנושות כולה, ההבדלים בין החברות גם בהיבט של בעיות מצריך זהירות ועיון פרטני בבואנו לאמץ את היעדים במדינות אחרות. כך למשל, פערים בחברה תלויים ביריעה של הגדרת החברה. הפערים במדינת ישראל שונים מהפערים במזרח התיכון.

עם זאת, יש מקום למצוא מכנה משותף רחב להגדרת יעדים שיהיו משותפים ומוסכמים לכלל החברה המודרנית. מתוך גישה זו פותחו במסגרת האו"ם בשנת 2016 17 יעדים המתבססים על ראייה מורחבת וארוכת טווח של שימור ושגשוג החברה האנושית. הם מוגדרים כיעדים לפיתוח בר קיימא (SDG Sustainable Development Goals) שנועדו למגר עוני, להגן על כדור הארץ, ולהבטיח שלום ושגשוג לכל תושבי היקום:

1. מיגור העוני על כל צורתיו
2. מיגור הרעב, השגת ביטחון תזונתי ותזונה משופרת, קידום חקלאות בת קיימא
3. הבטחת חיים בריאים ורווחה בכל גיל
4. הבטחת חינוך איכותי מכליל ושוויוני וקידום הזדמנויות למידה למשך כל החיים לכול
5. השגת שוויון בין המינים וחיזוק כל הנשים והילדות
6. הבטחת זמינות וניהול בר קיימא של מים ותברואה לכל
7. הבטחת גישה לאנרגיה בת השגה, אמינה, בת קיימא ומודרנית
8. קידום צמיחה כלכלית בת קיימא ומכלילה, תעסוקה מלאה ויצרנית ועבודה מכובדת לכול
9. בניית תשתיות עמידות, קידום תעשייה מכלילה ובת-קיימא וטיפוח חדשנות
10. הפחתת האי-שוויון בין המדינות ובתוכן
11. הפיכת הערים וההתיישבויות האנושיות למכלילות, בטוחות, גמישות ובנות קיימא
12. הבטחת צריכה אחראית ותבניות ייצור בנות קיימא
13. נקיטת צעדים דחופים למאבק בשינוי האקלים וההשפעות שלו
14. שימור ושימוש בר קיימא באוקיינוסים, ימים ומשאבים ימיים לפיתוח בר קיימא
15. הגנה של מערכות אקולוגיות באדמה, שחזורן וקידום שימוש בר קיימא בהן, ניהול בר קיימא של יערות, מאבק נגד מדבור, עצירה והפיכה של הריסת קרקעות, עצירת האובדן של מגוון ביולוגי

16. קידום זכויות אדם בסיסיות: בנייה של חברות שלוות ומכלילות לפיתוח בר קיימא, אספקת גישה לצדק לכול ובניית מוסדות יעילים, אחראיים ומכלילים בכל הרמות

17. חיזוק האמצעים למימוש פיתוח בר קיימא והפחת רוח חיים בשותפות עולמית למען המטרה הזאת הרציונל מאחרי שבע עשרה יעדים אלו הוא:

"The problems related to the process of industrialisation such as biodiversity depletion, climate change and a worsening of health and living conditions, especially but not only in developing countries, intensify. Therefore, there is an increasing need to search for integrated solutions to make development more sustainable. The United Nations has acknowledged the problem and approved the "2030 Agenda for Sustainable Development". On 1st January 2016, the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) of the Agenda officially came into force. These goals cover the three dimensions of sustainable development: economic growth, social inclusion and environmental protection"¹.

על מנת לשים את היעדים של האומות המאוחדות בפרספקטיבה רחבה, נסכם עם דבריו של Johnson, מספרו על היסטוריה של יהודים:

"The Jews were not just innovators. They were also exemplars and epitomizers of the human condition. They seemed to present all the inescapable dilemmas of man in a heightened and clarified form. They were the quintessential 'strangers and sojourners'. But are we not all such on this planet, of which we each possess a mere leasehold of threescore and ten? The Jews were the emblem of homeless and vulnerable humanity. But is not the whole earth no more than a temporary transit-camp? The Jews were fierce idealists striving for perfection, and at the same time fragile men and women yearning for flesh-pots and safety. They wanted to obey God's impossible law, and they wanted to stay alive too". (Johnson, 1987, p. 586).

מן הראוי להדגיש ש- 17 יעדי האו"ם מייצגים מוסכמות שהתקבלו בדיונים של השנים האחרונות, אך לא מן הנמנע שיחולו בהם שינויים על רקע הדינמיקה של אתגרי החברה האנושית.

¹ [Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals](#)

4. דרכי הפעלה של מהנדסים

היכולת של מהנדסים להשפיע באופן מכוון על מהלכים בחברה תלויים בוודאי בידע ובכישורים שלהם, ובמידה רבה גם בתפקידים אותם הם ממלאים. היכולת שלהם לשלב בתהליכי קבלת החלטות שיקולים שאינם רק "הנדסיים" טהורים תלויה בחופש שיש להם לעשות זאת. בפרק זה יוצגו מספר היבטים הנוגעים לקיום ולהעדר דרגת חופש כזו.

4.1 מפעילי המשאב ההנדסי

המשאב ההנדסי זמין עקרונית לשרותו של היחיד ושל הציבור. לתכנון בית פרטי יכול כל אדם לשכור שרותיהם של מתכננים. הציבור עושה שימוש במשאב ההנדסי בעיקר בשני ערוצים, במגזר הציבורי המנוהל על ידי הממשלה המייצגת את טובת הציבור והמגזר האזרחי המורכב מארגונים בעלי אוריינטציה ציבורית הפועלים שלא למטרת רווח ואינם שייכים לממשל (מלכ"ר). ערוץ נוסף המפעיל את המשאב ההנדסי והמשפיע על הציבור הוא המגזר הפרטי-עסקי. שלושת הערוצים יחדיו מרכיבים את כוחות הפועלים במדינה והיוצרים את המערך של מדיניות ציבורית ומשילות (נחמיאס ושות', 2010, עמ' 324).

שלושת הערוצים יוזמים צרכים אותם מתבקשים המהנדסים לכונן. תרומת ההנדסה לחברה תלויה במטרות היזם ובשיתוף הפעולה של המהנדסים המגויסים עם היוזמה. ישנם יזמים חברתיים (society) ויזמים כלכליים, יזמים של רעיונות ויזמים של חברות (company). המהנדסים יכולים להיות גם יזמים אך עיקר עבודתם היא מענה ליוזמה.

האופן בו מפעיל המגזר הציבורי את המשאב ההנדסי תלוי בטבעם של המאיישים את המגזר. האופן בו מפעיל המגזר האזרחי את המשאב ההנדסי תלוי באופן בו מצמיחה חברה יזמים הפועלים לטובת הציבור ובאופן בו מאפשר הממשל למגזר זה לפעול. האופן בו מפעיל המגזר הפרטי-עסקי את המשאב ההנדסי תלוי באופיים של היזמים, ובהקשר של חברה, במידה בה הם מזיהים את המטרות של עסקיהם עם מטרות החברה. גם אופן פעולת מגזר זה מושפעת מהאופן בו הממשל מאפשר למגזר זה לפעול (עוצמת הרגולציה).

כפי שיתואר בפרק 5 בהמשך, בהקשר למהפכות התעשייתיות, המהנדסים בדרך כלל אינם חופשיים בהכנת מתכונים. היכולת שלהם להביא בחשבון היבטים חברתיים ולבחור חלופות יקרות יותר אך המיטיבות יותר עם החברה הן מוגבלות על ידי מי שמגייס אותם. דרגות החופש שלהם בהיבט זה מתוארות בסעיף הבא בהתאם לתפקידים אותם הם ממלאים בשלושת הערוצים של החברה.

4.2 החלטות חברתיות של מהנדסים בתפקידם

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 תפקודיות ופרויקטליות מתחרות. למשל, ביצועי המערכת מתחרים עם עלותה. שניהם מתחרים עם איכות, אמינות, ובטיחות. התכן צריך לבטא אופטימיזציה של דרישות אלו.

בתהליך הכנת המתכון יכול מהנדס מתכנן להעדיף ייצור באמצעות חומר זמין יותר וידידותי יותר לסביבה בהפקה, בשימוש, ובגריטה. בתכנון תהליך ייצור יכול מהנדס היצור להעדיף תהליכי ייצור יעילים יותר בעלי פחת קטן יותר תוך שימוש בחומרים פחות מזהמים.

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.

בערוץ המונע על המהנדסים לשלול קיומם של גורמי כשל חבויים תוך יצירת תכן רובוסטי ובאמצעות בחינה של אופני כשל. לצד הפעולה המובנת מאליה של שלילת קיומם של כשלים לכינון היכולת אותה הם נדרשים לכונן יש באפשרותם לבחון ולשלול קיומם של תהליכים וכשלים חברתיים.

דרגת חופש כזו בקביעת תצורת המתכונים, כמתואר גם באיור 2.1 לעיל, יכולים להפעיל כל המהנדסים בכל תפקיד ובכל רמה הירארכית של התכן. אלא אם כן, חופש זה נשלל מהם והם מושמים בסד שאינו מאפשר להם לבחור חומרים ותהליכים ידידותיים לסביבה, אשר בדרך כלל יקרים יותר מאלו שפחות ידידותיים או שאינם מוכרים עדיין ככאלו.

אפשרות נוספת של מהנדסים להשפיע על החברה היא כיזמים. הן כיזמים בערוץ הפרטי-עסקי והן בערוץ האזרחי כיזמים חברתיים. בזכות הידע שלהם הם יכולים להציע רעיונות למתקנים חדשים אשר צפוי שיהיו גלומים בהם שיפורים לחברה. ביוזמה כזו המהנדסים יכולים לנקוט הן בתוך הארגון (Intrapreneur) ובין אם מחוץ לו (Entrepreneur). אלא שמימוש הרעיונות בדרך כלל מצריך משאבים שאינם זמינים למהנדסים כמהנדסים. לכן למימוש הרעיונות החברתיים שלהם יהיה עליהם לשכנע מנהל או יזם בעל אמצעים מתאימים.

דרך נוספת בה מהנדסים יכולים לפעול היא כאשר הם מנהלים. אלא שאז, בדומה למצב בו הם עצמם יזמים, תישאל השאלה האם הם פועלים כמהנדסים או כמנהלים. כלומר, הטובה של מי עומדת לנגד עיניהם ולאיזה טווח הם מסתכלים. אם המרכיב ההנדסי והחברתי בהם הוא הדומיננטי, הם מבטאים בכך מנהיגות הנדסית-חברתית. משמעות הבחנה זו והמסגרת בה הדבר מתאפשר נדונים בסעיף הבא.

יוזמה נוספת אפשרית למהנדסים ומנהלים היא להנהיג או להשתתף ב"כלכלה מעגלית", כפי שנלמדה בעבר בשילוב התחשבות תהליכי גריטה והוצאה משרות כבר בתחילת התכן, שבחלקה מתוארת בפרק 5 בהמשך.

4.3 מהנדסים בתוך בין כלכלה חופשית לחברה

כמתואר בסעיף 4.1 לעיל, בחלוקה גסה, פיתוח מוצר מונע בעיקר משיקולים של טובת הציבור ומשיקולים עסקיים. שתי מוטיבציות עיקריות אלו, טובת הציבור ורווח עסקי, באו לידי ביטוי בזמנים שונים. בהגדרת ההנדסה של האגודה להסמכת התוכניות להכשרת מהנדסים, ABET (Mitcam, 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).

כמו רבים אחרים, הנשיא רוזוולט ביטא את הציפייה שלו לאחריות של המהנדסים בשנת 1936 וביקש מהם 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 (Mitcham, 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 ולהימנע מנזק לחברה ולסביבה. מהנדסים תמיד חיפשו אתגרים טכנולוגיים לטובת הציבור, שאפו לפתור אותם וחשו אחריות כלפי הציבור (Meiksins, 1988, p. 229).

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 החברות הקטנות ועם יצירת תאגידים. במהלך תהליך זה איבדו המהנדסים במידה רבה את תפקידם כמנהלים. 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 ניגוד עניינים. הניגוד נוצר כאשר, מסיבה כלשהי, המנהלים שואפים למטרה שונה מזו שאליה מכוונים המהנדסים (Raelin, 1991, p. 1). למשל, העדפת אינטרס קצר טווח וצר של הארגון העסקי על פני השפעות ארוכות טווח 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?

בין המעטים שעוסקים בשאלה זו מוסכם שהסיבה המרכזית לפער זה במוטיבציה נעוצה 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. לא כאן המקום להרחיב ולהעמיק בנושא טעון זה, אך בכל זאת נשתדל לחדד את העניין די לצרכי הציבור הנוכחי.

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", כפי שמרמז על כך הביטוי בו השתמש 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, המהפכה התעשייתית הראשונה, כפי שהוזכר, יצרה את המנגנון הקפיטליסטי המאפשר לבעלי הון להגדיל את הונם באמצעות הטכנולוגיה, ואגב כך, באופן תוצאתי להשפיע על החברה.

תנועות המחאה סוציאליסטיות וקומוניסטיות קמו כבר במהלך המהפכה התעשייתית הראשונה (למשל, Deane, 1965, p. 101 and Ch. 15). הטענה לא הייתה שלא רוצים את הקידמה. הטענה הייתה שבעלי ההון עושים מהלכים לטובת עצמם מבלי להתחשב בחברה (Outman and Outman, 2003, Ch. 4). אפשר לומר שהרווח הכלכלי מונע לא אחת מהמעסיקים והיזמים את תחושת האמפתיה לעובדים, החשובה גם להם עצמם בראייה לטווח רחוק.

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: "שָׂא יִדְבְּרוּ אִישׁ אֶת רֵעֵהוּ שְׂפֹת חֻלְקוֹת בְּלֵב 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.

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 חלל. 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, והניסוח של הפער באמצעות משל מסגיר את עומק ההבדל אותו קשה לנסח במילים, על אף היותו ברור ומובן.

בתנאים אלו עלול להיווצר ניגוד בין האופטימיזציה שהמהנדסים היו רוצים לערוך על פי המחויבות המקצועית שלהם לבין דרישות המעסיקים (Mitcam, 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 שנוכח לעשותו מבחינה הנדסית וחברתית, פגיעה בתדמית המהנדסים אשר כציבור דואגים לחברה, ואי-לימוד לקח וקלות ראש המתלווים לניתוק שבין מקבלי החלטות לבין הנושאים 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.

4.4 מדדים לאחריות חברתית

לכל הנקודות שהועלו לעיל יש כבר כיום ביטוי בשטח, כאשר ארגונים וחברות למטרות רווח עברו שינויים משמעותיים משנות השמונים במאה ה-20 ועד היום, מארגונים בהם שורת הרווח הכלכלי היא הגורם הכמעט יחיד במערכת השיקולים, לארגונים החייבים לקחת בחשבון גם גורמים סביבתיים וחברתיים רחבים, הרבה מעבר לארגון או לתאגיד הספציפי (גוטליב 2023). 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: תרומה לרווח הכלכלי של הארגון, תרומה לקיימות, ותרומה 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).

המגמה הזו מוצאת ביטוי מעשי במהלכים לפתח מדדים כמותיים להשפעות שהן מעבר לשורת הרווח, תחת הכותרת של אימפקט. סקירה של מגמות אלה מוצגת בדוח של מוסד נאמן (גוטליב 2023) והיא כוללת התייחסות למספר גישות לנושא האימפקט:

סביבה - בריאות - בטיחות (Environment Health Safety (EHS))

EHS הוא למעשה סט הכללים וההתנהגויות הארגוניות שמטרתן להגן על בריאות העובדים בסביבת העבודה. לפיכך זוהי הסתכלות מצומצמת יחסית העוסקת בבטיחות העובדים וכוללת אמצעי בטיחות פיזיים וסביבתיים.

קיימות (Sustainability)

קיימות (sustainability) הוא מושג הוליסטי עמום במידה מסוימת ולא פשוט להגדרה מדויקת, ולפיכך ישנן הגדרות שונות של המונח. פיתוח בר-קיימא (sustainable development) הקשור במידה רבה למונח הקיימות, משמש לעיתים באופן חליפי ומסמל את המדיניות להשגת קיימות. ההגדרות של מושג קיימות נעות מההגדרה המקורית ע"י ועדת Brundtland של האו"ם² המדברות על אתיקה בין דורית, כלומר המשך ההתפתחות והרווחה האישית והלאומית כך שגם ההתפתחות והרווחה של הדורות הבאים לא תפגע ועד הגדרות רדיקליות המגדירות קיימות כהתפתחות ללא צמיחה (כלכלית).

² Sustainability: "Development that meets the need of the present without compromising the ability of future generations to meet their own need"; Our Common Future Report of the World Commission and Development UN <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>

אחריות תאגידית (CSR) Corporate Social Responsibility

אחריות תאגידית היא ביטוי לסט ערכים המבטא התנהגות ארגונית כוללת, שארגונים משיתים על עצמם בהתנדבות והכוללים מעבר לרווח גם אספקטים של אחריות חברתית וסביבתית ומשולב בעקרונות הקיימות. ארגון בעל אחריות תאגידית הוא ארגון המכיר בכך שהוא הוא חלק מהמארג בו הוא פועל ואינו מבודד מסביבתו, מכיר בתחומים בהם יש לו תרומה שלילית לסביבה ולחברה, מכיר שהוא בעל אחריות אמיתית כנה ושואף לעמוד במספר עקרונות.

Environmental-Society-Governance (ESG)

ESG הוא מסגרת שמטרתה להכניס לאסטרטגיית הארגון יכולת לזהות, להעריך ולנהל ערכי קיימות רלבנטיים לכלל בעלי העניין בתאגיד, אולם גם מאפשרים יצירת ערך אמיתי (מוניטרי) לארגון. אם CSR הוא המסגרת הרעיונית לקראת ממדי קיימות, מסגרת ESG כשמה עוסקת בממדים סביבתיים חברתיים וניהוליים.

ממד סביבתי עוסק בהשפעת פעילות התאגיד על הסביבה הפיזית ובסכנות שינוי האקלים על פעילות התאגיד שותפיו וספקיו. ממד זה כולל פליטת מזהמים וגזי חממה, ברוא יערות ושמירה על מגוון ביולוגי, יעילות אנרגטית, ניהול משאבי מים ומחזור.

ממד חברתי עוסק בהשפעה חברתית וסיכונים כתוצאה משינויים חברתיים וקהילתיים סביב הארגון. ממד זה כולל מנהגי ונהלי עבודה, בריאות ובטיחות, שילוב אוכלוסיות ומגדרים, שוויון והכלה.

ממד ניהולי עוסק באספקטים של מנהל איכותי תקין וצודק בארגון ואצל בעלי העניין ליצירת ערך חברתי וסביבתי, כולל ניהול סיכונים. ממד זה כולל אתיקה ארגונית, מבנה דירקטוריון והנהלה, בטיחות מידע, תגמול ופערי שכר, ומדיניות מניעת שוחד ושחיתות.

תקני ניהול סביבה וניהול אחריות ככלי לניהול בארגונים

כדי לפתח, לקדם ולנהל היבטי סביבה ואחריות חברתית בארגונים פותחו ומיושמים תקנים בינלאומיים ומקומיים לניהול היבטים אלו בארגונים. העיקריים שבהם:

- תקני ניהול סביבה ממשפחת ISO 14000 שמשולבת בתקינה הישראלית.
- תקני ניהול אחריות חברתית: תקן בינלאומי ISO 26000, ותקן ישראלי 10000 שפותח ומיושם בישראל בתחום זה.

הארגונים מיישמים את התקנים כחלק ממערכי הניהול שלהם, מנטרים את ייזום התקנים באמצעות מערך מבדקים פנימיים ומבדקים חיצוניים על ידי גופים מתעדים כמו מכון התקינה הישראלי ואחרים. הידע והניסיון הצבור בתקנים אלו חיוני ליישום היבטים אלו בארגונים.

יחד עם התקנים נוסדו ארגונים המדרגים תאגידים בתחום ESG בארץ – ארגון מעלה (MAALA) ובעולם למשל MSCI³ או Bloomberg⁴.

³ www.msci.com/our-solutions/edg-investing/edsg-ratings

⁴ www.bloomberg.com/professional/dataset/global-environmental-social-governance-data

4.5 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".

הוראת אתיקה למהנדסים מבוססת על ההנחה שניתן להקנות ערכים להתנהגות אתית במסגרת חינוך מושכל הכולל דוגמאות מהדיסציפלינה הרלוונטית ללומדים.

במסגרת זו יש להתייחס לאתיקה כמרכיב חשוב המאפיין מקצוע במובן הרחב של המלה (profession), כמתואר בתרשים שלהלן:

איור 4-1: אתיקה כמרכיב חשוב באפיון מקצוע



רמת השליטה
בידע המקצועי

התרבות שלו
כבעל מקצוע

מאפיינים של תרבות בעלי מקצוע:

- אחריות
- אמינות
- בקרה עצמית
- כנות ויושר
- הערכה וכבוד לאחר
- תדמית אישית ומקצועית

במסגרת זו כלולים 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 במיצוע של ההנדסה כמקצוע המתאפיין בעצמאות מקצועית, דהיינו במקצוענות (פרופסיונליות). לכן, לכך יש משמעות גם למעמד המקצוע וגם למעמד המהנדסים בחברה (The Royal Academy of engineers, 2011; Harris et al., 2009; Unger, 2017).

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 ASCE (American Association of Civil Engineers), IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), ASME (American Association of Mechanical Engineers).

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 הנדסי 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, על הסביבה 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 ושיתוף 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.

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.

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 איננו חוקי, אך הוא אתי. הדוגמה הזו מבהירה גם את האמירה שעל המהנדסים לפעול ב"ראש גדול". שילוב 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 ה"צ'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 שמשמש במתכונים שלהם פגה כאשר השמיעו באופן ברור את הסתייגותיהם 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 האסטרונוטים בחששות שלהם לפני ההמראה, פעולה שאולי לא הייתה אתית כלפי המנהלים. האם האסטרונוטים 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:

איור 2-4: אופי הפעולה ההנדסית



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 מערכתי 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 מקצוענות 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 (Mitchem 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 אתית. 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 לתכנון 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 "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 המבצע 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.

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).

הטענה שמהנדסים צריכים להיות אחראיים כלפי החברה צריכה להיות מופנית במקביל לכל משלוחי היד להם זקוקה החברה, ובוודאי למקבלי החלטות בשם החברה או בשם עצמם. מובן שדרישה זו נוגדת במידה מסוימת את העקרונות של כלכלה קפיטליסטית הדוגלת ביוזמה חופשית המעמידה את החברה לחסדי היזמים, לחוק, וליכולת אכיפתו.

5. קשרי גומלין הנדסה-חברה-סביבה

5.1 מבוא

לאינטראקציה בין הנדסה-מדע-טכנולוגיה ובין החברה פנים רבות. במאות השנים האחרונות האינטראקציה הזו הייתה הכוח המניע ליצירת החברה התעשייתית, על כל המשתמע מכך לגבי אורח החיים שהתפתח בתקופה זו בעולם המערבי. אורח החיים בא לידי ביטוי ברמות העל, בהיבט המדינתי והגלובלי, כאשר בולטים הכוחות הכלכליים והחברתיים שבבסיסם רעיונות קפיטליסטיים וסוציאליסטיים שעצבו את המשטרים במדינות השונות, וברמות האזרחים בחיי היום-יום. את האינטראקציות ברמת העל קשה לחזות והניתוחים הקיימים של ההשפעות מבוססים על לימוד של העבר, post mortem. אינטראקציות אלה מצאו גם ביטוי בהתפתחויות של ערכים חברתיים ותרבותיים אשר נחקרו רבות במסגרות של מדעי החברה והרוח. בהקשר זה יש לתת את הדעת על שני סוגים של תהליכים המתרחשים בו זמנית, דהיינו ההשפעה של הערכים החברתיים על בחירה ביישום של טכנולוגיות חדשות וההשפעה של יישום טכנולוגיות חדשות על שינוי בערכים של החברה. ההשפעה של הטכנולוגיות על הערכים החברתיים איננה ישירה והיא באה לידי ביטוי בתהליכים ממושכים שמוצאים ביטוי בשטח במשך תקופה ארוכה לאחר היישום של הטכנולוגיות החדשות.

מהנדסים נמצאים בנקודת מפגש של בעלי עניין רבים, ביניהם המשתמשים במערכת המתוכננת, היצרנים, העמיתים השותפים לתכן, המתחזקים, הכלכלנים, והחברה בכללותה. לכן, התפיסה שעל פיה עבודת המהנדסים מתמקדת בהיבטים טכנולוגיים בעיקר, כמו חישובים וניסויים, היא מצמצמת מאוד. המהנדסים ועמיתיהם יכולים לנתק במחשבתם את העשייה ההנדסית מהיבטיה החברתיים, אך ניתוק זה יהיה מלאכותי.

ההתייחסות לאתגרים של המהנדסים בהקשר החברתי היא בדרך כלל מנקודת מבט של עשייה שנועדה להשיג מטרות שהוגדרו על ידי צרכים כלכליים ותפקודיים של החברה ולהבטיח שצרכים אלה מתמלאים וניתנים ליישום על יד המשתמשים. אבל, לא פחות חשוב הוא האתגר בתפקיד המהנדס בעידן המודרני לזהות פוטנציאל להשפעות שליליות ישירות או עקיפות של העשייה ההנדסית לפני שהן מתפתחות לממדים שליליים ומסוכנים. בהקשר זה עולה השאלה בעידן המודרני האם אנו זורעים היום נזקים חמורים, ואולי אף בלתי הפיכים, שיראו לעין כל רק כאשר לא ניתן יהיה לתקן? הסכנה האקולוגית זוהתה על ידי "פסימיסטים" ו-"יפי נפש" כבר לפני ארבעים שנה. מדוע לא ננקטה פעולה כבר אז? האם ייתכן שישנם תהליכים היום שעדיין לא רואים בברור את עוצמת הנזקים שלהם, ויש בינינו כאלו שיודעים לזהות אותם נכון ואנו מסיבה כלשהו מתעלמים מהם? זהו אחד האתגרים החשובים של מהנדסים שבבסיסו אחריות אתית לחברה המחייבת גישה מערכתית, אשר מצריכה חשיבה הוליסטית של תהליכים והשפעות של העשייה ההנדסית מעבר ליעדים הממוקדים יותר של המשימה עליה מופקד המהנדס.

נושא זה הוא רחב ומורכב, ובפרק הנוכחי נציג תמונה תמציתית שתוכל לשמש כמנחה למהנדסים בכל הקשור להשפעות חברתיות והסביבתיות של הנדסה. ההתייחסות תהיה ברמות העל, כפי שבאות לידי ביטוי בהשפעות של המהפכות התעשייתיות וברמות הפרטניות יותר תוך דגש על כלים העומדים לרשות המהנדס להביא בחשבון השפעות חברתיות וערכיות של העשייה ההנדסית.

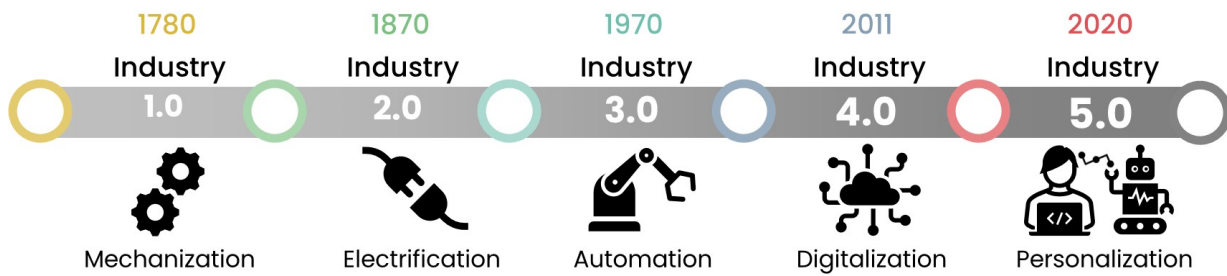
"רמת העל" של האינטראקציה בין הנדסה וטכנולוגיה ובין חברה מוצאת ביטוי בהשפעות של המהפכות התעשייתיות כמתואר בסעיף 5.2. ברמה מעשית יותר לימינו, שיש לה משמעות לפעילויות של המהנדס בהקשר של השפעות חברתיות, ניתן למצוא מרחב גדול של נושאים, החל מרמת הפרט, למשל מתקני עזר לבעלי מוגבלויות, עד לרמת הציבור הרחב כדוגמת בתי חולים ומערכות תחבורה. ההשפעות החברתיות בטווח זה הן בעלות מאפיינים רבים ומגוונים, אשר ניתן לסווג אותם באופן גס לשתי קטגוריות, האחת הקשורה למשמעויות לטווח הארוך והשנייה לטווח של השימוש המיידי במוצר. הטווח הארוך מתאפיין בעיקר בתהליכים מורכבים אשר אפיונם וכימותם מחייב גישה מערכתית רחבה הלוקחת בחשבון היבטים של סביבה, חברה וכלכלה לאורך כל מחזור החיים. יש כיום דגש מיוחד על ההיבטים אלה, במיוחד על רקע של השפעות סביבתיות הנובעות מכך שההיקף של הפעילות האנושית גדל מאז פריצת המהפכות התעשייתיות לרמה כזו שאיננה מאפשרת יותר להתייחס למשאבים סביבנו ולסביבה כאינסופיים, כפי שהיה למעשה מקובל בעבר הרחוק. היבטים אלה ידונו בסעיפים 5.3 - 5.5 המציגים את הגישות והכלים שמתפתחים כיום כדי לאפשר למהנדסים לכמת תהליכים ארוכי טווח שהם תוצאה של המוצרים ההנדסיים שהם מתכננים ומיצרים. ההיבטים המיידיים יותר הם רבים ומגוונים ומתוכם נציג סקירה לאלה שהם בעלי חשיבות גבוהה במיוחד, המתייחסים לבטיחות וביטחון (סעיף 5.6) ולידידותיות למשתמש (סעיף 5.7).

מעבר להיבטים המקצועיים של מהנדסים הקשורים באתגר והאחריות לקדם אינטראקציה חיובית בין ההנדסה והחברה נחוצה גם מערכת תומכת, אשר תראה בכך חלק בלתי נפרד מהיעוד שלה ותפעל להטמעתו במסגרת הייזום של כל פרויקט הנדסי. מסגרת כזו לא בהכרח קיימת במגזר העסקי המונע ברבות במדינות רבות ע"י הפילוסופיה הקפיטליסטית הקלאסית, ולכן נושא זה לא תמיד זכה לטיפול הנכון. על רקע המשבר האקלימי מתחולל שינוי הבא לידי ביטוי בהצבת 17 יעדים של האו"ם לפיתוח בר-קיימא שמשתלב עם שינוי תפיסה במגזר העסקי תחת הכותרת של הצבת יעד נוסף של "אימפקט" בתחומי סביבה וחברה, בנוסף ליעדים המסורתיים של רווח ומדיניות המונעת משיקול בלעדי של טובת בעלי המניות. על כך יורחב בסעיף 5.7.

5.2 המהפכות התעשייתיות

ההשפעות של הטכנולוגיה על החברה מתאפיינות בתהליך מתמשך והדרגתי, אשר מדי פעם יש בו קפיצות מדרגה כתוצאה מהתפתחות ויישום של טכנולוגיה חדשנית, שיש לה אופי גנרי המשפיע על כלל התהליכים במשק ובחברה. כמו כן יש בו מרכיבים של טכנולוגיה משבשת (disruptive technology) דהיינו היא מייתרת טכנולוגיות ותהליכי ייצור שהיו מקובלים עד לזמן זה ומחליפה אותם באחרים מתקדמים ויעילים יותר. ב-200 השנים האחרונות התחוללו ארבע מהפכות כאלה, ומהפכה נוספת שהיא בתחילת דרכה, הקרויות מהפכות תעשייתיות, כפי שמתואר באיור 5.1. המינוח מהפכה הנו מתאים במקרה זה מאחר וכל שינוי מסוג זה מלווה בדרך כלל בשינויים חברתיים משמעותיים.

איור 5-1: המהפכות התעשייתיות עד כה וזו החדשה שהיא בהתהוותה



מקור: עיבוד של מוסד נאמן לאיור 1 מתוך Sarfraz & Sarfraz, 2021

מאפיינים של ארבע המהפכות התעשייתיות מוצגים בצורה תמציתית בטבלה 5.1

טבלה 5-1 מאפיינים של ארבעת המהפכות התעשייתיות (Zaychikova, 2022)

Industrial revolution	Period	Content (achievements for the period)
The First Industrial Revolution (Industry 1.0)	The end of the XVIII century – The beginning of the XIX century	Agrarian revolution, mechanization of manual labor, transition to industrial production, increase in labor productivity. Achievements: steam engine, weaving and spinning machines in the industry, lathes and milling machines in metallurgy, agricultural machines, etc
The Second Industrial Revolution (Industry 2.0)	The second half of the XIX century - The beginning of the XX century	Electrification, the use of electric energy, the use of a conveyor in mass production, the development of petrochemicals, the construction of railways and other transport networks, etc
The Third Industrial Revolution (Industry 3.0)	The end of the XX century - present time	Programming, creation of industrial robots, introduction and application in the production of electronic computing complexes and information systems, automation and robotization of processes, etc
The Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0)	Nowadays: the appearance of the term - 2011	Access to information resources, cyber-physical production systems, development and distribution of Internet commerce, personalized approach in interaction with customers, cybersecurity, "digital enterprise", large amounts of data, artificial intelligence, virtual reality, cloud technologies, 3D printing, etc

כדי להבהיר את המשמעויות החברתיות של שינויים טכנולוגיים נתמקד במהפכה התעשייתית הראשונה הנחשבת לנקודת מפנה בעולם המערבי (יש האומרים בעולם הצפוני). במהפכה זו נבנתה תעשייה בעלת כושר ייצור המוני שהובילה להפצת מוצרים המקלים על החיים ומובילים לירידה

בעלותם. בגדים, כלי מטבח, כלי עבודה, וכדומה. היא גם הובילה לארגון מחדש של כוח העבודה, ממשקים משפחתיים העוסקים במגוון מוצרי צריכה, לשכירים המתמחים במיומנויות ספציפיות.

המהפכה התאפשרה בזכות מספר המצאות טכנולוגיות ובעיקר: הנול, מנוע קיטור, צריפת ברזל יעילה יותר, (למשל, Deane, 1965; Moore, 2000; Allen, 2009). טכנולוגיות אלו והחידושים שהתלוו אליהן אכן יצרו מארג של תעשייה המייצרת מוצרי צריכה חשובים באופן המוני (כמו בגדים, כלים משופרים מברזל), לצד שימוש בכוח הקיטור במקום כוח האדם, ותחבורה מהירה המאפשרת הפצת המוצרים.

למרות התדמית הנפוצה על פיה מהפכה זו נבעה רק מחידושים טכנולוגיים, שהם במידה רבה פרי תהליך הנדסי גם אם לא במתכוון, המהפכה התעשייתית התאפשרה גם בזכות "ארגון כלכלי" (economic organization) שיש לו שבעה מאפיינים (Deane, 1979):

- שימוש נרחב בידע מדעי וניסויי ליצירת מוצרי צריכה;
- יצירת כלכלה המעודדת שוק לאומי ובינלאומי המחליף את השוק הקהילתי והמשפחתי;
- נטישת כפרים והתיישבות בערים;
- הגדלה של מוצרי צריכה והפיכתם לפחות ייעודיים למשפחות ולקהילות;
- הפניית כוח עבודה מיצירת מוצרי בסיס למוצרי ושרותי צריכה;
- שימוש מוגבר בהון כתחליף וכהשלמה למאמץ אנושי;
- צמיחה של מעמדות חברתיים ומקצועות חדשים הנקבעים על ידי בעלות על הון ולא בהתבסס על קשר לאדמה ולחקלאות.

הנקודה המרכזית היא על כן שהמהפכה התעשייתית אינה רק עצם הפיתוח של מוצרים חדשים אלא אופן ארגון הכלכלה שעושה שימוש בפיתוחים אלו. מכאן ברור הקישור בין ההנדסה לבין הכלכלה במספר תהליכים כמתואר להלן. תהליך אחד קשור להחלטות של בית המלוכה האנגלי לגבי מיסוי והיבטים אחרים של סחר פנים וחוף (Deane, 1965, Chs. 12-13). התהליך השני הוא קפיטליזציה של השוק. לבניית מערך תעשייתי נדרשת השקעה ראשונית גבוהה שלא ניתנת לקידום במרבית המשקים הפרטיים. בעלי הון ראשוני, שראו תועלת בהשקעתם בזכות החידושים הטכנולוגיים ושינוי משטר סחר פנים וחוף, יכלו להתניע תהליכים של הקמת מפעלים (Deane, 1965, Ch. 10).

תיאור זה של התהליכים מדגיש שהחידושים ההנדסיים והטכנולוגיים לבדם לא היו מספיקים ליצירת מהפכה תעשייתית. סביר להניח שבתקופה שקדמה לתקופה זו היו חידושים טכנולוגיים לא פחות חשובים שמסיבה זו של העדר מצרף כלכלי לא יצרו "מהפכה". לכן, במידת ביטחון, הנעוצה בתיאורים תואמים של מספר חוקרים של המהפכה התעשייתית הראשונה, אפשר לומר שהייתה זו לא פחות, ואולי אף יותר, מהפכה כלכלית וארגונית. מהפכה שהתאפשרה בזכות מצרף של החלטות כלכליות וחידושים טכנולוגיים. למעשה, מהפכה זו היא שהולידה את הקפיטליזם, כפי שבא לידי ביטוי בציטוט באחד מני המקורות הרבים המעידים על כך, (Snooks, 1994, p. 24):

"Finally, the success of the Industrial Revolution depended upon the long slow transformation of the economic system—the shift from feudalism to mercantile capitalism. The essence of this transformation was the emergence of a system of flexible markets and market incentives that would make it possible to introduce a new process of technological change. This can only be seen in retrospect. It came about not because it was foreseen by

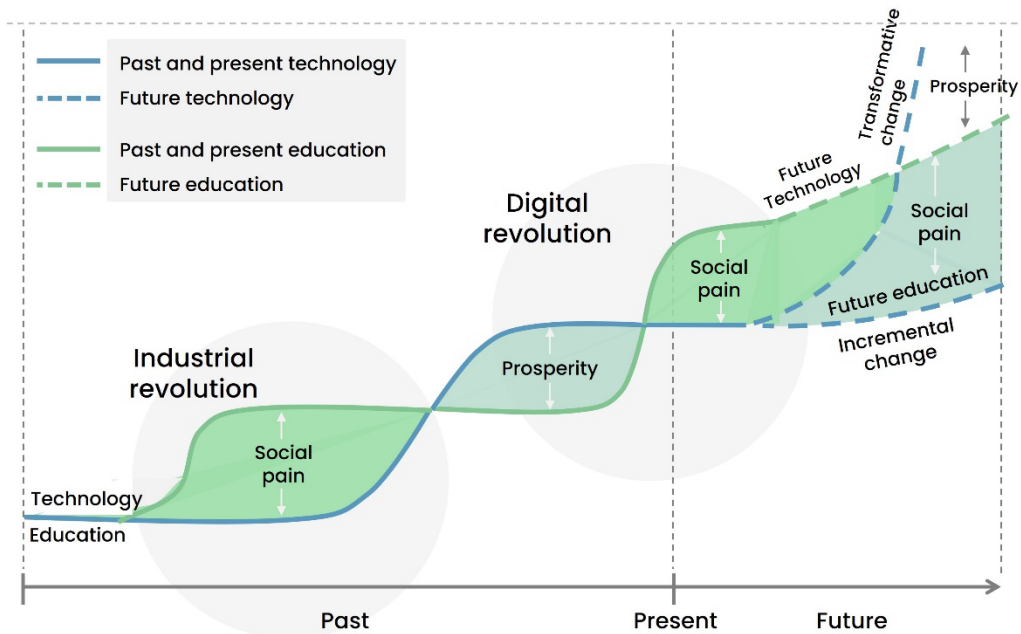
longsighted decision-makers, but because self-interested individuals were seeking to maximize their material advantage".

אדם סמיט שנחשב לאבי הפילוסופיה (האמונה) הקפיטליסטית הציע מספר הנחות יסוד, ביניהן, ששוק חופשי הוא מצב חברתי יציב ורצוי. לכן יש הרואים במהפכה התעשייתית במידה רבה גם כמהפכה קפיטליסטית, למשל Scott (2011), Fulcher (2004). מתוך חשיבה זו צמחה הגישה של הכלכלנים על "צמיחה כלכלית" כשאיפה ברורה מאליה לכלל החברה, וקצב הצמיחה (rate of economic growth) הוא המדד להתקדמות. בימים אלה מתפתח דיון האם זו חשיבה מתאימה לעידן הנוכחי, שבו יש להביא בחשבון שצמיחה כזו מחייבת ניצול יתר של משאבי הטבע שבעבר נחשבו כבלתי מוגבלים, בשעה שכיום אנחנו ערים לכך שהם גבוליים וניצול יתר שלהם כפי שמתרחש כיום עלול להביא לקטסטרופה. זה עומד כיום בבסיס החשיבה המחודשת לגבי האחריות של מהנדסים לקידום פרויקטים שאפתניים, מתוך הבנה שיש להביא בחשבון את המשמעויות הסביבתיות והאקולוגיות בעולם של משאבים מתכלים.

אנו נמצאים עדיין בתוך המהפכה התעשייתית הרביעית ולכן קשה לחזות מה תהיינה התוצאות של המהפכה. עם זאת, מנקודת ראות הנדסית, אם מניחים שהתהליכים החברתיים שהתרחשו במהפכה התעשייתית הראשונה דומים לאלו שהיו גם במהפכה השנייה והשלישית, אפשר לצפות שאם לא משנים דבר מה, תהליכים בעלי ממדים דומים יתרחשו גם במהפכה התעשייתית הרביעית.

דוגמא אחת היא בתחום החינוך, כאשר הזמינות של ידע וטכנולוגיות דיגיטליות לתקשורת מעלה על פני השטח פוטנציאל וצורך למודלים חדשים ללמידה שהם שונים מאלה שהכרנו בעבר. יש הפרש זמן בין פיתוח והטמעה של מודלים כאלה שיש להם משמעות חברתית (כגון: הגדלת הנגישות, לימוד לאורך החיים), ובין מועד התהוות המהפכה התעשייתית, כפי שמוצג בצורה סכמתית באיור 5.2 בהתבסס על ניסיון שנצבר במהפכות קודמות. הפרשי זמן אלה באים לידי ביטוי גם בתחומי פעילות אחרים, כדוגמת הקמת ופיתוח תשתיות, השפעות תרבותיות, ובכך בא לידי ביטוי שהמהפכה מתניעה תהליכים רבים שיש להם אופי חברתי אך קידומם הוא פועל יוצר של פיתוחים נוספים שבאים על רקע התשתית שנוצרה במהפכה. דוגמא לכך היא טכנולוגיות חינוכיות, EdTech, שיוצרות מהפכה משל עצמה בתחום החינוך.

איור 5-2: תהליכים טכנולוגיים וחינוכיים המלווים את המהפכות התעשייתיות



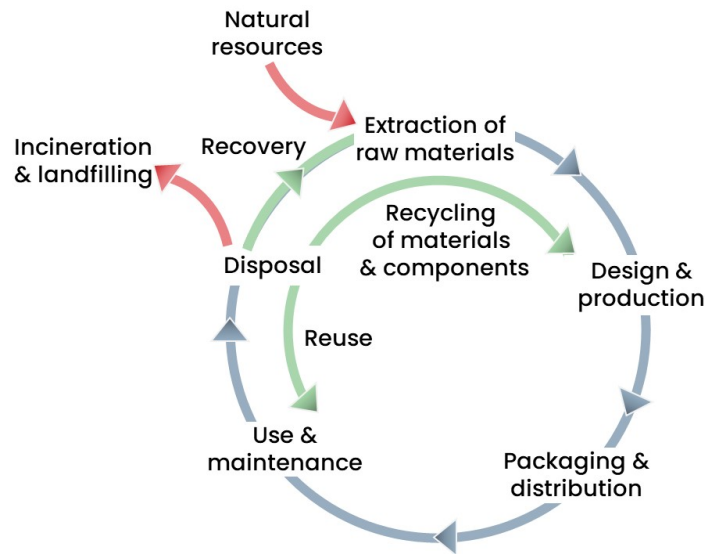
מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל- OECD (2019)

5.3 שימור החברה האנושית והבטחת שגשוגה: פיתוח ומחזור חיים בר קיימא

אחד המתווים לאינטראקציה בין ההנדסה, החברה והסביבה יכול להתבסס על היעדים לפיתוח בר קיימא, SDG, של האו"ם כמתואר בפרק 4 במסגרת הסעיף על יעדי החברה. יישום של גישה כזו במסגרת הכלים ההנדסיים יכולה להתבסס על המתודולוגיה של הערכת מחזור החיים שיש בה את הפוטנציאל להוות מסגרת ומתודולוגיה לראייה מערכתית במובן הרחב של המלה, ומאפשרת לפתח כלים למתן הערכות כמותיות וחצי כמותיות של השפעות חברתיות, סביבתיות וכלכליות. כלים אלה נועדו למקסם את הערך של ההנדסה בתחומים הללו ובמיוחד למנוע השפעות שליליות של מוצרים ותהליכים.

הנושא של מחזור חיים הוא יותר מאשר מתודולוגיה של אנליזה וניתן להתייחס אליו כאל פילוסופיה שיש להטמיעה בהנדסה ובכלכלה, כמו גם בתחומים אחרים. הוא מחייב חשיבה מערכתית-הוליסטית שניתן לכנותה חשיבת מחזור חיים (Mazzi 2019). גישה זו משתרעת על מרחב רחב, כפי שרואים לדוגמה באיור 5.3. היישום שלה מחייב גישה של "ראש גדול". גישה זו יכולה להוות גם מנוע חשוב לחדשנות ויצירתיות בהנדסה.

איור 5-3: דיאגרמה טיפוסית של יוזמה לחשיבת מחזור החיים

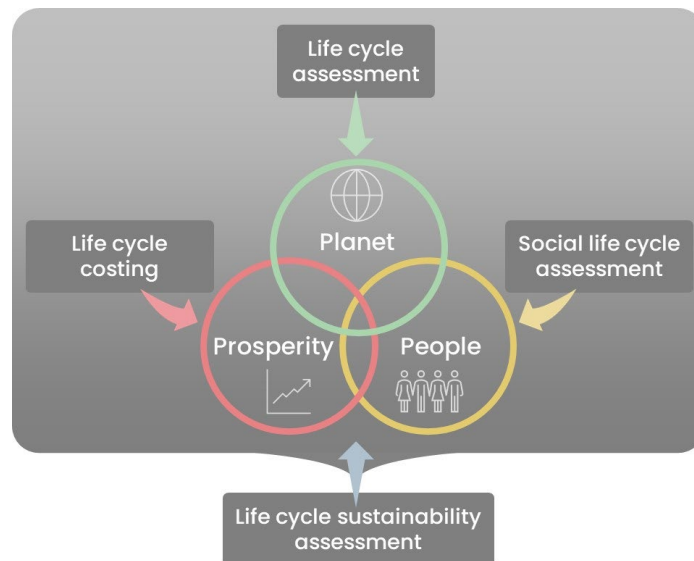


מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל- [What is Life Cycle Thinking?](#)

הקשר בין חשיבת מחזור חיים ובין פיתוח בר קיימא, "קיימות", הוא הדוק מאד מאחר וחשיבה בממדים אלה חייבת להביא בחשבון את ההשפעות של מחזור החיים בהקשרים רחבים, סוציו-תרבותיים, סביבתיים וכלכליים. המשתמע מגישה זו הוא שעל המשק והתעשייה להרחיב את המיקוד שלהם מעבר להיבטים כלכליים ולכלול גם היבטים של סביבה וחברה.

מדיניות בינלאומית מאמצת את הקיימות במובן הנקרא "P3", שמשמעותו אנשים-יקום-שגשוג, people-planet-prosperity, שממנו נגזרת ההגדרה של השפעת מחזור חיים בר-קיימא, SLCA (Sustainable Life Cycle Assessment) המורכב מהשפעת מחזור החיים הסביבתי, החברתי והכלכלי, כפי שמוצג בצורה סכמתית באיור 5.4.

איור 5-4: תאור סכמטי של קשרי הגומלין המרכיבים את הקיימות, פיתוח בר קיימא



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל- [What is Life Cycle Thinking?](#)

הגישה של ניתוח מחזור החיים נועדה לאתר הזדמנויות וסיכונים של מוצר או טכנולוגיה, משלב של כריית חומרי הגלם עד לגריטה, מעריסה לקבר. צרכנים, חברות (companies), תאגידים וממשלות מיישמים גישה זו למטרות נוספות, למשל לקביעת מדיניות, להנדסה של מוצר חדש, להשוואת מוצרי צריכה ועוד. ארבעה מאפיינים של הגישה של השפעות מחזור החיים עומדות בבסיס החוזה של שיטה זו והן ההתייחסות לכל מחזור החיים, הראייה ההוליסטית המביאה בחשבון את הסביבה, החברה והכלכלה, ההיבטים הכמותיים שבה והתבססותה על מדע לאפיון מודלים ותחשיבים כמותיים.

5.4 מודלים לאומדן השפעות מחזור החיים

במידה רבה המתודולוגיות בתחומים אלה צמחו מתוך המתודולוגיה של אומדן מחזור החיים הכלכלי, LCC (Life Cycle Costing) שנועדה בעיקר לאומדן ארוך טווח מנקודת מבט עסקית ופיננסית, כמו למשל הערכת הוצאות האנרגיה על פני מחזור החיים של מוצר או ההשקעות באחזקתו על פני מחזור החיים המתוכנן. שלושה כלים של הערכת מחזור חיים, מנקודות מבט שונות, הערכת השפעת מחזור החיים הסביבתי, E – LCA (Environmental Life Cycle Assessment), מחזור החיים החברתי, S – LCA (Societal Life Cycle Assessment) ומחזור החיים הכלכלי, LCC (Life Cycle Costing) / CLCA (Cost- Life Cycle Assessment) יכולים ביחד להוות את המסגרת להערכה מערכתית כולל (Yang et al 2020, Klöpffer, Weidema 2006, 2008) שידועה בשמות שונים, בהם מחזור חיים בר קיימא או מחזור חיים משולב – I – LCA:

$$I - LCA = E - LCA + S - LCA + C - LCA$$

גישה זו, תוך התייחסות ל- 17 יעדי הפיתוח בר קיימא של האו"ם, משמשת בסיס לבחינה רחבה של הערכת כלי מדיניות, פרויקטים וארגונים. היא יכולה גם להוות כלי להערכת האימפקט של פעילויות הנדסיות בכל הקשור למוצרים ותהליכים.

היתרונות של גישה זו באים לידי ביטוי במיוחד בשלושה תחומים:

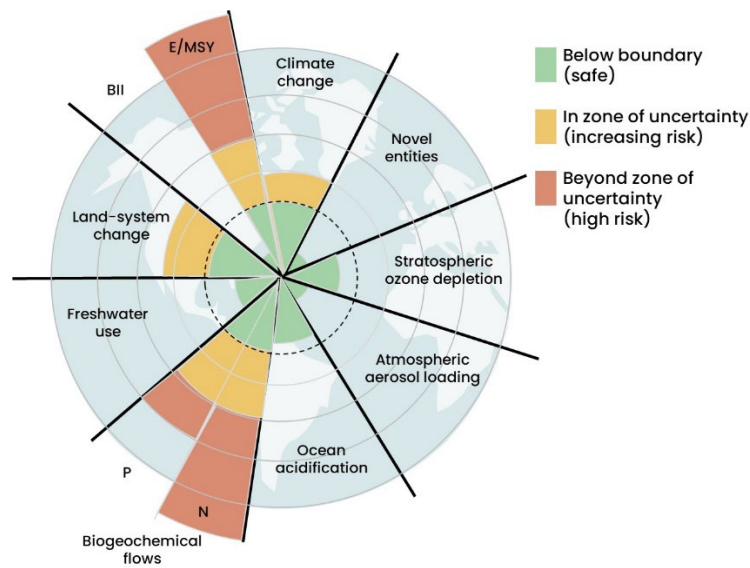
- גישה המאפשרת ניתוח הוליסטי שמאפשר לזהות ולהביא לידי ביטוי את כלל ההשפעות של מוצר, כולל גם חיצוניות.
- מאפשר בסיס לקבלת החלטות במישורים השונים, מדיניים (פוליטיים), סביבתיים, חברתיים וכלכליים וכן להשוות בין חלופות שונות במישור ההנדסי וקביעת סדרי עדיפויות.
- בסיס לתקשורת להסברת דרכי פעולה ובחירת חלופות ועדיפויות.

כדי לממש את המתודולוגיות לכלל כלים כמותיים יש צורך להתעמק ולהגדיר את המנגנונים שיש לכמת על פני זמן, לאפיין אותם באמצעות מודלים מתאימים ולבנות ולפתח מאגרי נתונים שיאפשרו חישובים באמצעות מודלים אלה. האתגרים כאן אינם פשוטים משום שמדובר במנגנונים שאינם בהכרח קלים לאפיון, במיוחד כאשר הם משתרעים על פני טווחי זמן ארוכים, כדוגמת אלה האחראים לשינויי האקלים.

5.4.1 מחזור חיים סביבתי, E-LCA

מחזור חיים סביבתי מטפל בעיקר בהשפעות סביבתיות אשר התייחסות כוללת אליהן באה לידי ביטוי במודל של גבולות פלנטריים, איור 5.5.

איור 5-5: תיאור המודל של הגבולות הפלנטריים⁵



מיסוד של הגישה של LCA – E מוצא ביטוי בסדרת תקני ISO, 14040 אשר מתפתחים ומשתכללים כל הזמן⁶. התפתחויות אלה תוארו ב- (Bjørn et al (2018).

בשלב הראשון פותחו 4 תקנים של ISO בהקשר לחזור חיים:

ISO 14040 המתייחס לעקרונות ולמסגרות –

Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework

ISO 14041 המתייחס להגדרות ולמטרות -

Environmental management — life cycle assessment — goal and scope definition — inventory analysis

ISO 14042 המתייחס להערכת ההשפעות -

Environmental management — Life cycle assessment — Life cycle impact assessment

ISO 14043 המתייחס לניתוח של מחזור החיים –

Environmental management — Life cycle assessment — Life cycle interpretation

בשלב מאוחר יותר, שלושת התקנים האחרונים אוחדו לכדי תקן אחד, ISO 14044 המציג את הדרישות וההנחיות -

Environmental management – Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines

סדרת ISO 14040 מתייחסת למתודולוגיה של הערכת מחזור החיים, אך בנוסף קיימת סדרת תקנים במסגרת זו לניהול סביבתי כמו למשל תקן סביבתי ISO 14006, ISO 14062, (eco-design), תקשורת של תפקוד סביבתי (ISO 14020, ISO 14063) ודיווח והקטנה של גזי חממה (ISO 14063).

⁵ [The nine planetary boundaries - Stockholm Resilience Centre](#)

⁶ [ISO 14040:2006\(en\) Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework](#)

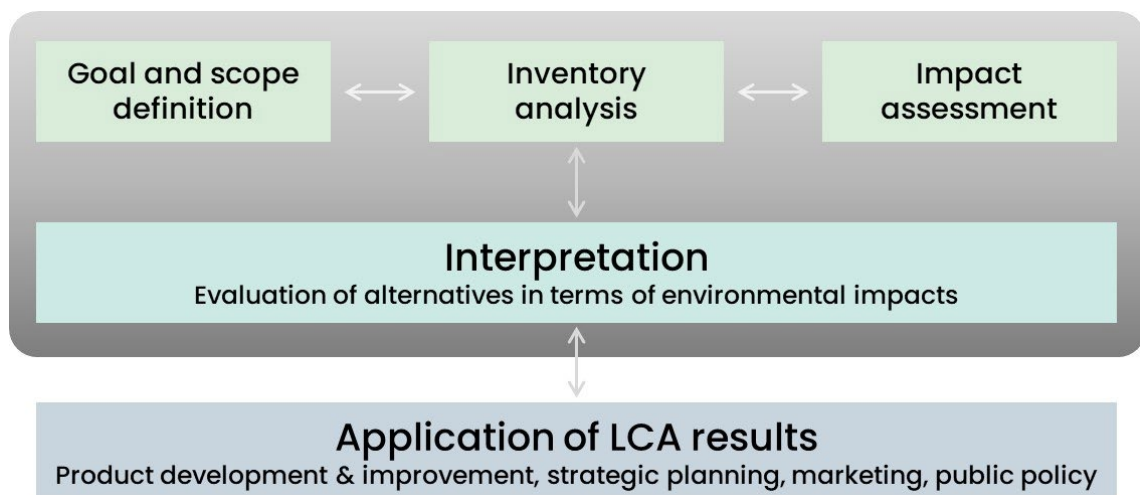
תקני LCA יכולים לסייע במספר מישורים (Zaychikova, 2022):

- זיהוי אפשרויות ושיפור תפקוד סביבתי של מוצרים בשלבים שונים של מחזור החיים שלהם
- דיווח למקבלי החלטות בתעשייה, ממשלה וארגונים למטרות של תכנון אסטרטגי, קביעת סדרי עדיפויות ותכנון של מוצרים
- בחירה של אינדיקטורים מתאימים לתפקוד סביבתי, כולל שיטות מדידה
- שיווק ע"י סימון של מוצרים לפי השפעתם הסביבתית
- עבור אנשי מקצוע תקני ISO משמשים כדרישות ומדריך להערכת מחזור החיים
- בחירת מוצרים ומערכות על בסיס אופטימיזציה של הערכת מחזור החיים

המתודולוגיות של LCA המוגדרות במסגרות של תקני ISO 14040 עבור הערכת מחזור חיים סביבתי (E) – LCA מתבססות על ארבעה צעדים³:

- הגדרת מטרות והיקף אפיון ה-LCA: גבולות המערכת, ההנחות ורמת הפרוט בתלות בנושא ומטרת ההערכה.
 - מלאי (inventory) של מחזור החיים: נתוני קלט ופלט בהתייחס למערכת אותה מעריכים, הנחוצים לצורך האנליזה כפי שמוגדרת במטרות ובהיקף. עבור השפעות סביבתיות מדובר בנתונים כגון צריכת אנרגיה וזהום הנגרם ע"י חומרים הנפלטים לאטמוספירה.
 - הערכת ההשפעה במהלך מחזור החיים: נתונים נוספים הנדרשים לצורך הערכת ההשפעה כדי להבין טוב יותר את ההשפעות הסביבתיות של המערכת וכן גם מודלים כמותיים. לדוגמא, בתחום השפעות סביבתיות של חומרים מזהמים מקודמים מודלים המבוססים על עקרונות של כימיה, פיזיקה, ביולוגיה וטוקסיקולוגיה.
 - ניתוח ופרשנות: סיכום וניתוח של כל הנתונים מהשלבים הקודמים כדי להגיע למסקנות שיאפשרו לפתח המלצות לקבלת החלטות בהתאם למטרות שהוגדרו.
- יש קשרי גומלין בין הצעדים האלה והם באופיים גם איטרטיביים וניתן לחזור עליהם מספר פעמים³, כפי שרואים בצורה סכמתית באיור 5-6.

איור 5-6: שלבים בניתוח של השפעות מחזור החיים וקשרי גומלין ביניהם



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל- Hajek 2018

קיימות כיום מתודולוגיות כמותיות שונות שעל בסיסן ניתן לבצע הערכות אלה ודוגמאות לכך יובאו בסעיף 5.5.

5.4.2 מחזור חיים חברתי, S-LCA

מחזור חיים חברתי מתייחס להשפעות חברתיות על ארגונים ובעלי עניין כדוגמת עובדים, צרכנים וקהילות מקומיות. במסגרת זו כלולות השפעות של בריאות הציבור, בטיחות, תנאי עבודה, זכויות אדם ושחיתויות. המתודולוגיות של S – LCA נגזרות במידה רבה מאלה של E – LCA שהן הרבה יותר מפותחות⁹. מסגרת לתחום זה ניתן למצוא במסמך של ה- (UNEP (Benoît Norris 2020).

השפעה חברתית מוגדרת כהשפעה של יחסים חברתיים משולבת עם פעילות פיזית (למשל: ייצור, צריכה וגריטה) ועם צעדים הננקטים ע"י בעלי העניין¹¹. ההשפעה החברתית היא מורכבת וגם סובייקטיבית הדרך לתת לה ביטוי היא באמצעות אינדיקטורים שמגובשים באמצעות בעלי העניין. ההשפעה יכולה להיות חיובית או שלילית.

המסגרת של השפעת מחזור חיים חברתית קשורה ביוזמות בינלאומיות כשהבולטת בהן היא ה- SDG של האו"ם שהוזכרה לעיל, במיוחד על חלק מהיעדים של ה- SDG 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 16 ו- 17 שברשימה שהוצגה c. בפרק 4 בסעיף יעדי החברה.

לאפיון ההשפעה יש להביא בחשבון שורה של מרכיבים, בעלי העניין והצורות השונות של השפעה (Benoît Norris, 2012), כפי שמתואר בצורה סכמתית באיור 5.7. המסגרת באיור 5.7 ובמיוחד קטגוריות המשנה בהן פותחה כך שתהיה בתאום עם תקן ISO 26000, מדריך לאחריות חברתית.

איור 5-7: מערכות לאפיון השפעות חברתיות

Stakeholder categories	Impact categories	Subcategories	Inventory indicators	Inventory data
Workers	Human rights	◆		
Local community	Working conditions	◆		
Society	Health & safety	◆		
Consumers	Cultural heritage	◆		
Value chain actors	Governance	◆		
	Socio-economic repercussions	◆		

מקורות: עיבוד של מוסד נאמן מתוך Yang et al 2020 - [What is Life Cycle Thinking?](#)

כאמור, המסגרות והמתודולוגיות להערכת השפעות מחזור החיים בתחומי סביבה וכלכלה הן יחסית מפותחות אך לא זה המצב בתחום של החברה, שהוא מהלך חדש יותר וגם מורכב יותר. במצב הידע הנוכחי יש קושי במהלכים בתחום זה בעיקר בתחום של נתונים אשר ניתן לעשות בהם שימוש

למתודולוגיות דוגמת זו של ה-UNEP¹¹. קושי מיוחד הוא האופי של הערכות חברתיות של השפעת מחזור החיים, הקשורות בערכים אנושיים שקשה לכמת אותם. הקושי הוא גם בהיבט האיכותני ובאגרגציה של נתונים המבטאים מרכיבים חברתיים. בתחום זה יש לערב את בעלי העניין ולהתייחס לנושאים של מדעי החברה וזה שונה מהתחום של סביבה ששם ההתייחסות הכמותית יכולה להתבסס על פרמטרים פיזיקליים וכימיים. בתחום זה באות לידי ביטוי גישות שהן סובייקטיביות ותלויות בתרבות ובערכים שלא קל לתת להם ביטוי כמותי והם בעלי אופי מגוון, דוגמת²:

- מאפיינים כמותיים כדוגמת שעות עבודה המושתות על ילדים, הפסד הכנסה
- אינדיקטורים כדוגמת הפסד השכלה
- נזק למגוון של ערכים, דוגמת בריאות, משך החיים, בטיחות, הזדמנויות שוות וערכי תרבות ומורשת

5.4.3 מחזור חיים כלכלי, C-LCA

מחזור חיים כלכלי, הידוע גם בשם עלות מחזור החיים (Life Cycle Cost) – LCC שונה מהערכה כלכלית רגילה של מוצר או פרויקט בכך שהוא מתייחס לעלויות במהלך החיים, החל משלב העריסה של כריית החומרים עד לגריטה, מעריסה לקבר (from cradle to grave). בכך הוא שונה מהערכה כלכלית רגילה משום שהעלויות המובאות בחשבון יכולות להתפרש על טווח רחב, בתלות במקרה, וגם בתלות בגישה, דהיינו האם רק עלויות פנימיות או גם גישה כוללת, המתייחסת לעלויות חיצוניות (externalities) שאינן קשורות ישירות למוצר אך מושפעות ממנו.

עלות מחזור החיים היא הערכה כלכלית של מוצר או פרויקט הנדסי המאפשרת לקבוע ולהחליט על החלופה הכלכלית ביותר כאשר מביאים בחשבון את כל העלויות על פני מחזור החיים, השקעה ראשונית, IC, הוצאות תפעול (למשל: אנרגיה, תחזוקה, תיקונים), OC ועלויות גריטה, DC⁷ (Yang 2020):

$$C - LCA = IC + OC + DC$$

5.5 תכן הנדסי לקיימות

כיום, בעקבות משבר האקלים יש חשיבות עליונה ליישום תכן הנדסי לקיימות בכל תהליכי פיתוח והנדסה של מערכות שיש להן השפעה ואימפקט על הסביבה והחברה. תכן לקיימות יכול להיות מוגדר בדרכים שונות, כמו "תכן המשלב מענה לדרישות וציפיות סביבתיות וחברתיות", או "תכן הנותן מענה לצרכים העכשוויים ללא פגיעה בצרכים של הדורות הבאים". לצורך יישום כיוונים אלו בתכן המערכות לקיימות, על המהנדסים להיות בעלי ידע רלוונטי והתנסות בתחומים הסביבתיים והחברתיים והבנה כיצד משלבים אותם בתכן המערכות (Sheps & Zonneshain 2008, Savitz 2006, Zonneshain 2006) כדי ליישם באפקטיביות תכן לקיימות בארגונים ובפרויקטים, נכון לקיים בהם מודל ניהולי משולב כמודגם בתרשים שבאיור 5.8:

⁷ Chapter 5

איור 5-8: מודל אינטגרטיבי לתכן לקיימות



מקור: עיבוד של מוסד שמואל נאמן ל- Zonnenshain & Shep, 2008

יישום צעדים מאפשרים לקידום קיימות:

- גיבוש ויישום אסטרטגיה לקיימות
- יצירת מעורבות וקשרים עם מחזיקי העניין השונים (רשימת תיוג בהמשך)
- גיבוש ויישום מבנה ארגוני תומך
- יישום מערכת ניהולית משולבת ומשלבת היבטי קיימות
- אימוץ אחת הגישות לאחריות חברתית וסביבתית, כמו: CSR, ESG, IMPACT, SDG (Zonnenshain 2006)

גיבוש ויישום תהליכים מערכתיים מתאימים:

- ניהול סיכונים והזדמנויות בהיבטי קיימות
- תהליכי תכן והנדסה המשלבים שיקולי קיימות
- ניהול מחזור חיים שלם "מעריסה לקבר"
- עידוד ייזמות בתחומי קיימות

מידת תוצאות בטווח הקצר ובטווח הארוך:

- השקעות בקיימות וההחזר על ההשקעות בשיטות כמו LCA
- הערכת נזקים עקב "אי קיימות"
- הערכת תחזיות אימפקט מערכתיות

לצורך הערכת תחזיות אימפקט, נכון בין השאר לגבש מטריצת תחומי השפעה של מחזיקי עניין שונים, כמוצג כדוגמא בטבלה 5.2:

טבלה 5-2: נושאי ההשפעה וההשפעות של בעלי העניין

בעלי העניין	זכויות אדם	אתיקה	השפעות כלליות	השפעה בטיחותית	השפעות סביבתיות
לקוחות	✓	✓	✓	✓	✓
קהילה	✓	✓	✓	✓	✓
אנשי איכות הסביבה					✓
רגולטורים	✓	✓		✓	✓
איגודים	✓		✓	✓	
מנהלים	✓	✓	✓	✓	✓
עובדים	✓	✓		✓	✓
ספקים	✓	✓		✓	✓
מדיה	✓	✓		✓	✓
מתחרים		✓			

מקור: Savitz 2006

מגמות אסטרטגיות שנכון לשלב בתכן לקיימות:

- ממינימיזציה לאופטימיזציה של שימוש בחומרים ובמשאבים בתהליכי התכן וביישום המערכות
- תכנון מראש של סיום חיי המערכת (מיחזור, כלכלה מעגלית)
- יישום חשיבת LEAN
- צמצום שימוש בחומרים בכלל, ואיסור שימוש בחומרים מזיקים
- מעבר ממוצרים לשירותים
- תכנון ויישום כלכלה מעגלית
- איתור הזדמנויות עסקיות בתחומי הקיימות

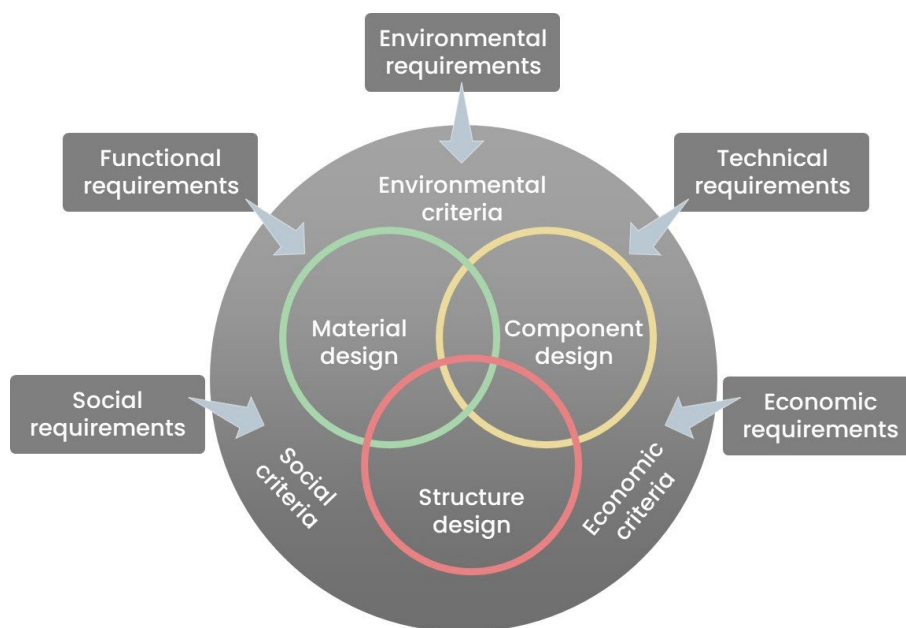
מסגרות מתאימות לתכן לקיימות המבוססות על עקרונות הגישה המערכתית מתבססות על הגישה של LCA שתוארה בסעיף 5.4. הן מהוות בסיס לתכן הנדסי הלוקח בחשבון את מגוון היבטים של סביבה, חברה וכלכלה, בנוסף לתפקוד הנדרש מהמערכת המתוכננת. בכך גישה זו מהווה כלי שמאפשר לבחור חלופות שהן מתאימות יותר כאשר מביאים בחשבון היבטים רחבים אלה ובנוסף

להוות מכשיר לעודד קידום חדשנות הנדסית וטכנולוגית המביאה בחשבון גם היבטי סביבה וחברה, בנוסף להיבטי תפקוד וכלכלה.

שימוש בגישה זו מקודם במיוחד בתחומי ההנדסה האזרחית כאשר אחד המניעים לכך הוא שמבנים, במיוחד מבני תשתית, אמורים לשרת על פני שנים רבות, כ- 100 שנים, בתנאי סביבה משתנים וקשים. על בסיס זה קודמו מתודולוגיות שונות בתוך מסגרות ה LCA המאפשרות בחירה של חלופות של טכנולוגיות שונות וגם קידום של חדשנות טכנולוגית.

הארגון הבינלאומי למבנים הוציא מדריך להנחיות לתכנון אינטגרטיבי 12 המתבסס על עקרונות 14040 ISO הכולל גם מאגר נתונים (אינוונטר) המאפשר תחשיבי השפעות מחזור החיים, תוך שמביאים בחשבון מגוון של השפעות כמתואר סכמתית באיור 5.9.

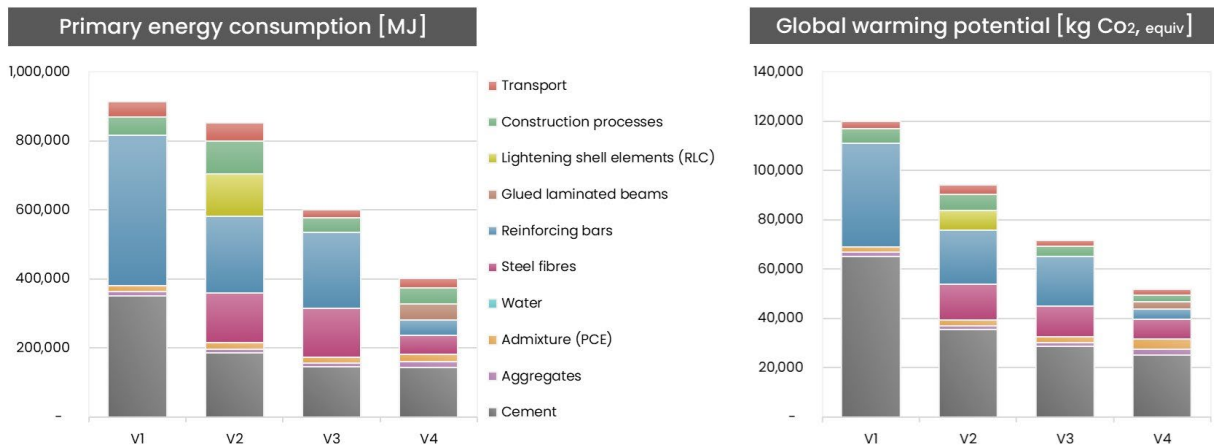
איור 5-9: עקרונות בסיסיים לתכן אינטגרטיבי המביא בחשבון השפעות סביבתיות חברתיות וכלכליות של מחזור החיים



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל- Hajek et al 2013, נספח B

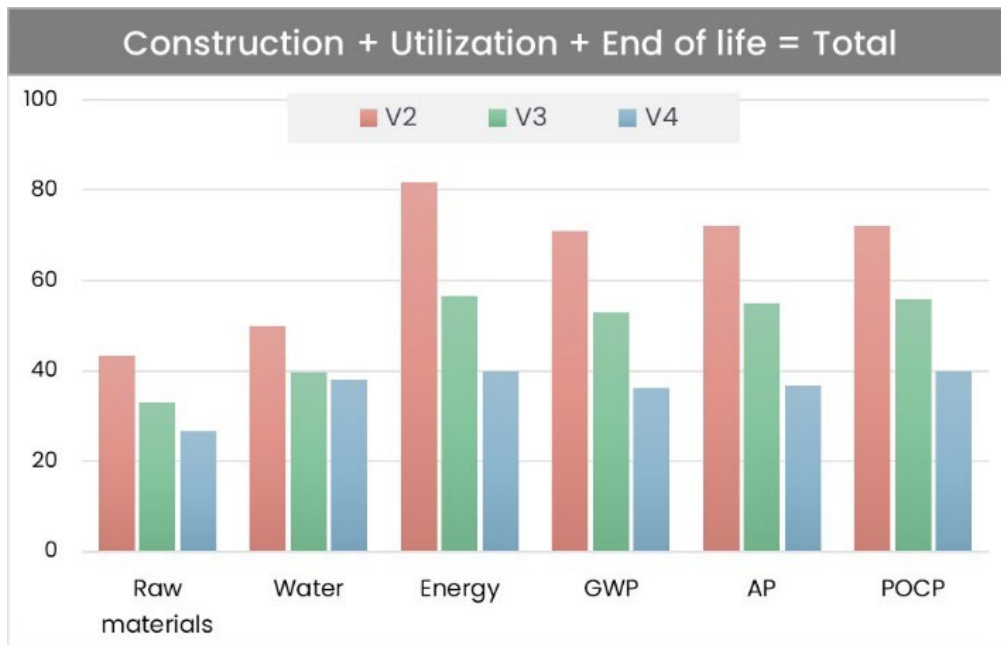
בנספח של מדריך זה מוצגת דוגמא להמחשת השימוש בגישה זו לבחירת מערכת מבנה עדיפה מנקודת מבט של שיקולי השפעת מחזור החיים (Hajek et al 2013). נערכה השוואה בין ארבע טכנולוגיות לבניית מערכת תקרה, קונבנציונלית מבטון מקשי (V1), מפנלים מתועשים מבטון בעל תפקוד גבוה (מטריצה חזקה במיוחד משוריינת בסיבים) המשולבים בתקרת "סנדוויץ" עם מילוי קרטון (V2), תקרה בחתך T מבטון בעל תפקוד גבוה (V3) ותקרה מרוכבת פלדה-עץ (V4). עבור כל אחד מאלה נערכו תחשיבים של השפעות על מחזור החיים בן 100 שנים עבור קריטריונים ספציפיים (דוגמא באיור 5.10) ואינטגרציה שלהם באיור 5.11 (אינטגרציה המוצגת ע"י הערכים היחסיים של ההשפעה, יחסית לתקרה הקונבנציונלית מבטון מזוין רגיל). התחשיבים הם הוליסטיים המתייחסים לחומרים, לתהליכי הבנייה ולהובלות הנדרשות לצורך הבנייה.

איור 5-10 : תחשיבי מחזור החיים של טכנולוגיות התקרה השונות להשפעות על אנרגיה טמונה והתחממות גלובלית (ד) (תחמוצת הפחמן)



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל- (Benoît et al 2020)

איור 5-11: תחשיבי מחזור החיים של טכנולוגיות התקרה השונות להשפעות יחסיות על מגוון של קריטריונים סביבתיים

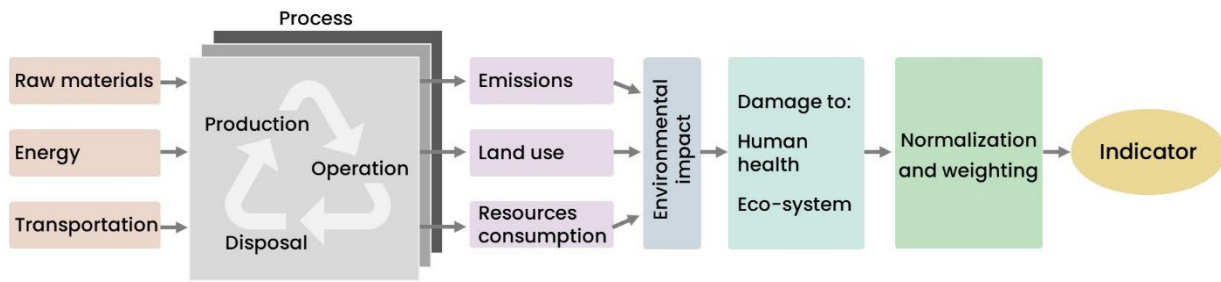


מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל- (Benoît et al 2020)

מאיור 5.11 ניתן להבחין ביתרון הברור של המערכת המרוכבת פלדה-עץ בכל אחד מההיבטים הסביבתיים.

הבחינה שתוארה לעיל התבססה על גישה שבה מחושבים ערכים פיזיקליים וכימיים המייצגים את ההשפעות הסביבתיות. גישה אחרת מתבססת על מתודולוגיות של אינדיקטורים המייצגים עומסים סביבתיים, כאשר כל אחד מהם מביא בחשבון שלושה מרכיבים: פגיעה בבריאות האדם, פגיעה במערכת הסביבתית וניצול משאבי הטבע. אחת המתודולוגיות Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations (Benoît et al, 2020) היא ECO 99 Indicator ותהליך החישוב מוצג בצורה סכמתית באיור 5.12. האינדקס המתקבל מייצג את העומס של התהליך הנבחן על הסביבה.

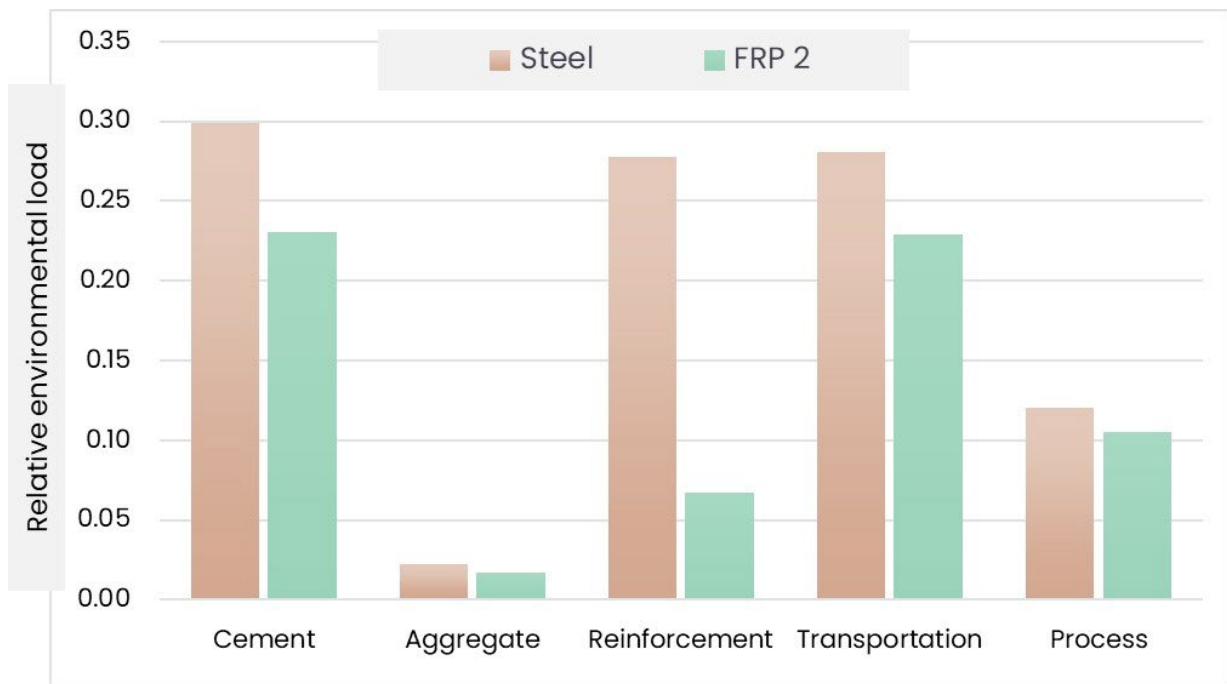
איור 5-12: תהליך חישוב של השפעה סביבתית של תהליך, לפי מתודולוגיית ECO Indicator 99



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל- (Benoît et al 2020)

על בסיס גישה זו נבחנה היעילות של החלפת פלדת הזיון במוטות מחומרים פולימריים מרוכבים (FRP) במשטח משוריין מבטון האמור לתפקד בתנאים קורוזיביים (Katz (2004). תחשיב של השפעות מחזור החיים להשוואה בין שתי טכנולוגיות השריון מוצג באיור 5.13. במסגרת זו הובאו בחשבון ההשפעות בתהליך הייצור של המשטח, ההשפעת במהלך השימוש, כולל תיקונים, והשפעות בשלב הגריטה.

איור 5-13: ההשפעה הסביבתית של משטחים מבטון עם חומרים משוריינים שונים, פלדה וחומר מרוכב, FRP, כפי שחושבה באמצעות אינדיקטורים של ECO Indicator 99 המייצגים עומס על הסביבה



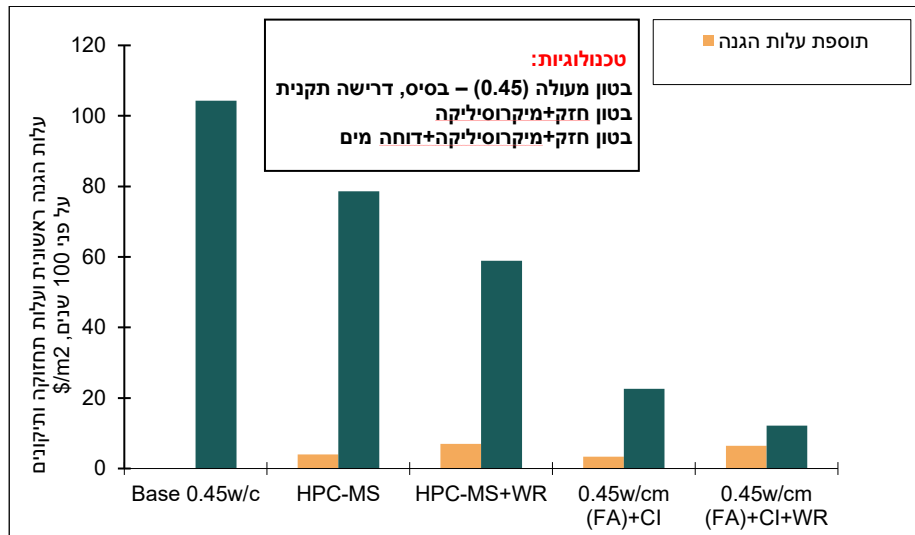
מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל- Yang, 2020

באיור 5.13 מוצגות ההשפעות הסביבתיות של כל אחד ממרכיבי המשטח, חומרים (צמנט, אגרגטים מוטות הזיון), הובלות של החומרים ותהליך הייצור של המשטח. הסיכום של כל אלה מצביע על יתרון ניכר למערכת המשוריינת בחומר המרוכב, עומס כולל של 122k נקודות ECO Indicator 99 לעומת 291k נקודות בפלדה.

חלופות טכנולוגיות לתפקוד לאורך זמן בהתבסס על תחשיב כלכלי של עלות מחזור החיים יכולות לשמש כבסיס להערכת טכנולוגיות חומרים שונות. דוגמא לכך היא תחשיב של קיר תומך מבטון מזוין באזור אקלימי קשה (סביבה ימית באילת) להשוואה בין בטון רגיל לסביבה קשה לפי התקן, עם בטונים משופרים בטכנולוגיות שונות של מוספים כימיים ותוספים מינרליים (Bentur, Berke & Lee, 2006).

בתחשיב למשך שרות של 100 שנה, שהתבסס על ניתוח מדעי של תהליכי קורוזיה ומשמעותם מבחינת תפקוד (הופעת סדקים וקורוזיה של הפלדה עצמה), ניתן היה להעריך את תוספת העלות הראשונית לשיפור הבטון התקני באמצעות הטכנולוגיות השונות והעלויות המצטברות על ציר הזמן לצורך תיקונים ושדרוג, איור 5.14.

איור 5-14: עלויות מחזור החיים, ראשוניות ותחזוקה, של בטון תקני לסביבה אגרסיבית ובטונים משופרים בטכנולוגיות שונות, של קיר תומך מזויין, עבור מחזור חיים של 100 שנים



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל- Bjørn et al (2018).

(בטון תקני לסביבה אגרסיבית - Base 0.45w/c, בטון מעולה עם מיקרוסיליקה - HPC - MS, בטון מעולה עם מיקרוסיליקה ומוסף מקטין ספיגות - WR + MS - HPC, בטון תקני לסביבה אגרסיבית בתוספת אפר פחם ומוסף מעכב קורוזיה - 0.45w/cm (FA) + CI, בטון תקני לסביבה אגרסיבית בתוספת אפר פחם, מוסף מעכב קורוזיה ומוסף מקטין ספיגות - 0.45w/cm (FA) + CI + WR)

ניתן לראות שהשילוב של טכנולוגיות לשיפור הבטון מגדילות את העלות הראשונית, אך ההקטנה בהוצאות התחזוקה והשדרוג על פני 100 שנה קטנות בצורה דרמטית, הרבה יותר מאשר הגידול בעלות הראשונית.

5.6 תכן מוצרים ומערכות ידודות למשתמש

חלק גדול של המערכות והמוצרים מתוכננות לשימוש על ידי אנשים ו/או לתפעול על ידי בני אנוש. לכן המהנדסים המתכננים מערכות אלו חייבים לשלב היבטי הנדסת גורמי אנוש בתכן מערכות אלו, לרווחת החברה האנושית בשימוש ותפעול ידודות שלהן (Walden 2015, Kenett, Swarz, & Zonnenshain 2019, Boy 2019, Gill, Zonnenshain & Lamoureux 2021). שימוש ותפעול ידודות משמעו תפעול בהתאם ליכולות הגופניות והקוגניטיביות של המשתמשים והמתפעלים (היבטים ארגונומיים) ובהתאם להיבטי בטיחות בתפעול. חלק מהמהנדסים זוכים להכשרה בהנדסת גורמי אנוש, ומשלבים היבטים אלו בתכן המערכות שבאחריותם. אבל, על פי ניסיונו, חלק גדול של המהנדסים לא מיומן באופן מספק בהיבטי גורמי אנוש, ואז נכון שיפעיל מומחי הנדסת גורמי אנוש, כבר בשלבים הראשוניים של תכן המערכות ולאורך כל מחזור חיי המערכות.

הנדסת גורמי אנוש ושילובה בהנדסת המערכות חוותה התפתחות לאורך ההיסטוריה: מארגונומיה בה משולבים היבטים גופניים של המשתמש, דרך הנדסת גורמי אנוש - HFE Human Factors Engineering בה נשקלות המגבלות הגופניות והקוגניטיביות של המשתמשים, דרך תכן מרוכז באנשים - HCD Human Centered Design וכלה בתקופה האחרונה - תפישת אינטגרציית האנשים במערכות - HSI Human Systems Engineering, כלומר האנשים נחשבים כחלק מהמערכות בתהליכי התכן וההנדסה. מה גרם להתפתחות זו בקשר בין הנדסת האנוש להנדסת המערכות? הגידול בסיבוכיות ובמורכבות של המערכות, ההחמרה במשמעויות של תקלות הנובעות משגיאות תפעול ושימוש על ידי אנשים, עליית חלקה של התוכנה במערכות המורכבות והתפתחויות תיאורטיות ויישומיות בתורת הנדסת גורמי אנוש ושילובה בהנדסת המערכות.

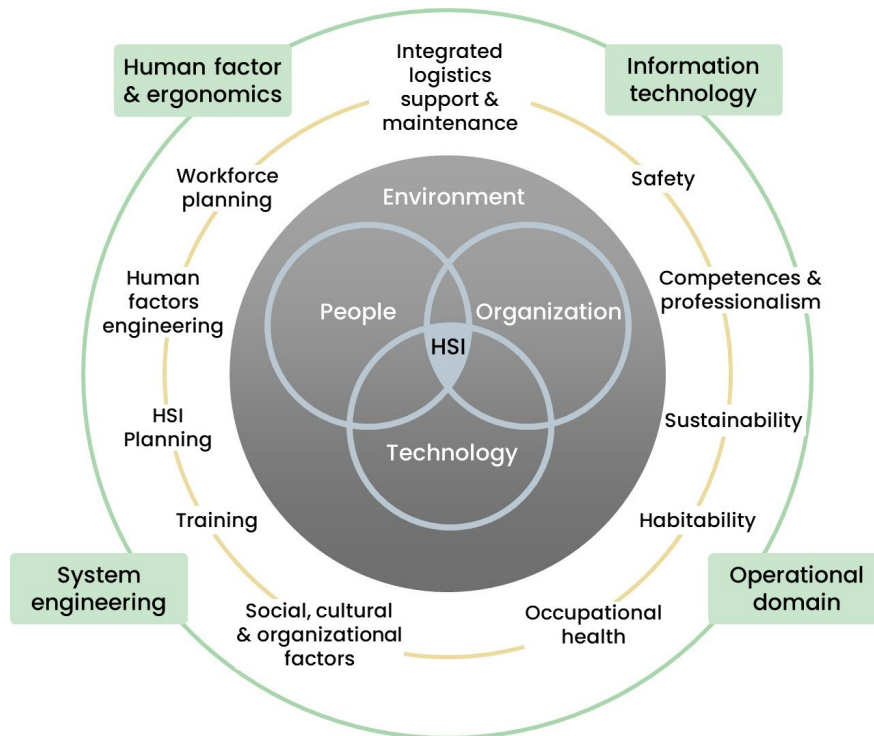
במדריך החדש להנדסת מערכות של המועצה הבינלאומית להנדסת המערכות - INCOSE International Council of Systems Engineering הגישה המובילה היא שהאנשים הם חלק מהמערכות, כלומר תפישת HSI. תרשים המציג אינטגרציה של האנשים במערכות מוצג באיור 5.15. במרכזו של התרשים מוצגת הסביבה המערכתית הכוללת ארגון, טכנולוגיות ואנשים. במעגל הבא מצוינים היבטים השונים המושפעים מהנדסת המערכות משולבת אנשים HSI, כמו: בטיחות, קיימות, תחזוקתיות, בריאות וגרות, הדרכות והכשרות ועוד.

בארבעת פינות התרשים מצוינות המתודולוגיות שנכון להפעיל בתכן מערכות משולבות אנשים: הנדסת מערכות, הנדסת גורמי אנוש וארגונומיה, טכנולוגיות אינפורמציה, הנדסת תפעול והנדסת בדיקות.

בשנים האחרונות מתפתחת מגמה בה מאופיינת הנדסת מערכות משולבת אנשים כהנדסת מערכות סוציוטכנולוגיות, בה נשקלים גם שיקולים חברתיים וסביבתיים באינטראקציה ואינטגרציה בין המערכות לאנשים לאורך מחזור חיי המערכות, בנוסף לשיקולים האנושיים שהוזכרו לעיל.

יש לציין, שלמרות ההתפתחויות המתודולוגיות והמקצועיות, עדיין יישום בפועל של תפישת HSI במפעלים ופרויקטים מורכבים היא בחסר ובפיגור לעומת המצופה ונדרש. לכן נעשים מאמצי יישום והטמעה בכל המקומות בהם יש מודעות לשילוב זה. דוגמאות: המהנדסים נכון שישלבו היבטי הנדסת אנוש כבר בתכן הקונספטואלי של המוצר או המערכת, כמו כן ישלבו היבטים אלו גם בתהליכי אימות ותיקוף של המערכת המתוכננת.

איור 5-15: קשרי גומלין ותכונות בהנדסת מערכות



מקור: עיבוד ל- Savitz, 2006

5.7 בטיחות וביטחון-היבטים חיוניים לחברה ולחיים בה

כאשר מפתחים ומיישמים מערכות בכל תחומי החיים והעשייה יש חשיבות גדולה וחיוניות משמעותית להיבטי הבטיחות (safety) והביטחון (security) של מערכות אלו, כיוון שהן מבטיחות את חיי האנשים, בגופם ובנפשם, המשתמשים במערכות או חיים ופועלים בתוכן (Leveson 2016, Thomas 2016). לכן מושקעת חשיבה ועשייה ממוקדת בתכן המערכות לבטיחות ולביטחון, וביישום היבטי הבטיחות והביטחון בבניין המערכות בפועל. במערכות בהן מעורבים מהנדסים בתכן וביישום, מכונה התחום העוסק בכך-הנדסת בטיחות. עקב החשיבות של התחום הזה, הגופים הרגולטוריים בעולם ובארץ, כמו מכוני התקינה והרישוי, מתקינים תקנים ותקנות רשמיים ומחייבים את כל העוסקים בפיתוח המערכות ויישומן, כולל המהנדסים. בבתי ספר להנדסה נוהגים ללמד את "הנדסת הבטיחות" כחלק חשוב של ההכשרה של המהנדסים לעתיד. גם לאחר השלמת לימודי ההנדסה קיימות רשויות שונות, כמו הרשות לבטיחות, שמציעות הכשרות נוספות לבטיחות כשדרוג ושיפור עבור העוסקים בהנדסה, עקב החשיבות והחיוניות של הנושא.

במסגרת דיון זה כרכנו יחד את היבטי הבטיחות והביטחון בתכן מערכות עקב הדמיון בחשיבות היבטים אלו, וכן עקב הדמיון בתהליכי התכן בתחומים אלו.

תחומים בהם יש חשיבות יתירה לבטיחות הם תחומי התעופה וחלל, מערכות תחבורה ביבשה ובים, מערכות בנייה ותשתיות, תעשיות ביטחון וצבא, בהן תקלות בטיחות עלולה להביא עשרות-מאות קורבנות בגוף ובנפש. לכן תקני הבטיחות בתחומים אלו הם יותר מחמירים, והמהנדסים העוסקים בתחומים אלו חייבים להיות מיומנים במיוחד בהיבטי הנדסת בטיחות. למרות החשיבות של הנושא,

מתרחשות לצערנו תקלות ותאונות משמעותיות שגורמות לעשרות הרוגים. במקרים אלו נדרש ונהוג לקיים תחקיר מקיף על גורמי השורש לתאונות לצורך הפקת לקחים לעתיד. דוגמאות ידועות בעבר בארץ הן קריסת הגשר במכביה, קריסת הרצפה במלון ורסאי, קריסת גשר שפירים, נפילת גשר תאורה בהר הרצל, ודוגמאות בולטות בחו"ל הן האסונות בחלליות צ'לנג'ר וקולומביה ועוד. בכולן התקיימו וועדות חקירה בדרגים שונים ופורסמו ממצאים, לקחים והמלצות לעתיד. הקו המקשר בין כל הלקחים האלו, שתקלות נגרמות משילוב היבטים הנדסיים, ניהוליים וארגוניים. נעשו שגיאות הנדסיות שגרמו לתקלות, ושגיאות אלו התאפשרו בסביבה ניהולית וארגונית המאפשרת לשגיאות אלו לחלחל ליישום המערכות בפועל עקב תרבות ניהולית וארגונית לא מספקת, ולעיתים מזלזלת בהיבטי בטיחות. לכן לשם הבטחת בטיחות וביטחון בחברה (society) נדרש להקפיד על שילוב אופטימלי של היבטים הנדסיים, ניהוליים וארגוניים.

לכן ההקפדה על קיום תקני ונהלי הנדסת בטיחות אינה מספקת, במיוחד במערכות גדולות ומורכבות. פרופ' ננסי לווסון וצוותה ב-MIT פיתחו ב-2012 מתודולוגיה מערכתית מתקדמת המכונה STAMP - Systems-Theoretic Accident Model and Processes לתכן בטיחות מערכות המשלבת שיקולים הנדסיים, תהליכיים, אנושיים, ארגוניים וחברתיים. לפי הניסיון שהצטבר במאות אירועים ועשרות ארגונים, מתודולוגיה זו נותנת מענה הולם לתכן מערכות לבטיחות. תהליך הניתוח המערכתי לבטיחות מכונה STPA- Systems-Theoretic Process Analysis, ותהליך ניתוח ותחקור תקלות ואסונות מכונה Causal Analysis based on STAMP-CAST.

העקרונות הכלולים בגישת STAMP הם:

- טיפול בתאונות כבעיית בקרה ולא כבעיית כשל
- תאונות הן יותר משרשרת של אירועים, הן כוללות תהליכים דינמיים מורכבים
- ניתן למנוע תאונות על ידי הפעלת אילוצים על רכיבים, התנהגויות תוכנה ואינטראקציות
- המודל הזה כולל התייחסות לגורמים שונים של תאונות, כמו: כשל של רכיבים, אינטראקציות לא בטיחותיות בין רכיבים, התנהגויות מורכבות של אנשים ותוכנה, שגיאות תכן, דרישות שגויות או לא שלמות

לסיכום, תכן מערכתי לבטיחות ולביטחון יכול לתרום לקיום מערכות בטיחותיות ובטוחות יותר לאוכלוסייה ולחברה, עם פחות סיכונים ופחות נפגעים בגוף ובנפש. מומלץ השימוש בפרקטיקות של הנדסת בטיחות גם לתחומי הבטחת ביטחון כולל בתחומי הסייבר.

5.8 אימפקט ואחריות תאגידית

למהנדסים יש מחויבות אתית ומקצועית להביא בחשבון את ההשפעה על החברה של מוצרים ומערכות שהם מתכננים ומייצרים, תוך התייחסות להיבטים הרחבים ביותר. אבל, כדי לממש מחויבות זו המסגרות שבהן הם פועלים חייבות להיות פתוחות לכך ומוכנות לאמץ שיקולים אלה. כלים הנדסיים למטרות כבר קיימים ונוספים נמצאים בפיתוח, כדוגמת אלה שתוארו בסעיפים 5.4 – 5.7. אבל, האתגר הוא היכולת לממש אותם ואת הנגזרות שלהם בפועל, במסגרת הפרויקטים אשר עליהם מופקדים המהנדסים. על הרקע הזה יש לא מעט קונפליקטים שיכולים להיווצר בין המהנדסים ובין היזמים והמנהלים של הפרויקטים, בין אם במגזר הציבורי או הפרטי-עסקי. קונפליקטים אלה יכולים להיות

חמורים במיוחד בתרבות הקפיטליסטית אשר באופן מסורתי ראתה את שורת הרווח והאינטרס של בעלי המניות כיעדים העיקריים ואף הבלעדיים שלה.

התרבות הזו עוברת כיום שינויים, על רקע האתגרים שמולם ניצבת החברה האנושית בצורה שהיא הרבה יותר ברורה וממשית מאשר היה בעבר, אשר להם משמעות על שימור איכות החיים כפי שהכרנו עד כה ואפילו השרידות של החברה האנושית על פני כדור הארץ. אתגרים אלה מוצאים ביטוי ביעדי הפיתוח בר קיימא, SDG, של האו"ם, שנוסחו ב- 2016 (סעיף 3.8 לעיל). בהקשר זה ראוי לתת גם את הדעת על המדד המרכזי במישור הלאומי שהיה בבסיס החשיבה המסורתית בכל הקשור לפיתוח והוא ה-GDP, מתוך מטרה שילך ויגדל כל הזמן. כיום אנחנו מודעים לכך שמשאבי כדור הארץ הם סופיים ולהמשך הגידול הזה יכולות להיות משמעותיות חמורות לגבי השרידות של החברה האנושית. לכן כיום מחפשים מדדים נוספים להערכת התפתחות והתקדמות כלכלות (למשל: Van den Bergh, 2009; Harvie et al., 2009; Kapoor and Debroy, 2019). ביטוי נוסף לכך בשטח נמצא במהלכים שיש להם משמעות מעשית ופילוסופית, כדוגמת התנועה לקפיטליזם קשוב (מאקי וסיסודיה, 2021) והחשיבה במונחים של אימפקט (Cohen 2020). מדובר בתהליכים שהולכים ומתעצמים החל משנות השמונים של המאה הקודמת (גוטליב 2023) אשר באופן הדרגתי פותחים אפיקים חדשים ומקדמים מחשבה אחרת ובכך מאפשרים כר פעולה רחב יותר למהנדסים ליצור אינטראקציות משמעותיות בין ההנדסה והחברה, במסגרת הפעילויות אשר בהם יש להם אחריות.

ארגונים וחברות למטרות רווח נמצאים במגמה של מעבר מארגונים אשר בהם שורת הרווח הכלכלי היא הגורם הכמעט יחיד במערכת השיקולים, לארגונים ותאגידים החייבים לקחת בחשבון גם גורמים סביבתיים וחברתיים רחבים, הרבה מעבר לארגון או לתאגיד, כלכלי, סביבתי וחברתי ולכך אף ניתן ביטוי בכינוי שורת הרווח המשולש (Triple Bottom Line). הרחבה נוספת לתארו של מהלכים אלה מתוארת בפרק 4 סעיף יעדי החברה.

6. אחרית דבר

לצד ההשפעה הפורמלית שיש למהנדסים על החברה מעצם היותם מתכננים מערכות ותהליכים לפי דרישה וצרכים, יש באפשרותם להשפיע לטובת החברה באמצעות החלטות בתחומים בהם לא קיימת דרישה ואינם סותרים דרישות קיימות.

בנוסף, מעצם היות המהנדסים נמצאים בצומת של הכרות עם אתגרי החברה והדרכים לבניית חוסנה לצד הכרות עם הטכנולוגיה המתפתחת, יש באפשרותם ליזום ולהציע דרכים לקידום אינטרסים של חברה.

יתירה מכך, במקומות בהם אין למהנדסים יכולת השפעה פורמלית בקבלת החלטות, יש באפשרותם, ואף מחובתם, להתריע על חשש מפגיעה בחברה ו/או בסביבה הידע שבידם מאפשר להם במקרים רבים לנמק את החששות שלהם באופן כמותי וחד משמעי כנדרש בתנאים של סיכונים ואי וודאויות, וכמו כן להציע כיווני פיתוח והנדסה מתאימים לנושא.

7. מקורות

- אדרס א., גל ר., קנת ר., ברזני א., 2021, Fake News – מושג חמקמק ומאתגר: הגדרה, התמודדות והשפעה על החוסן הלאומי – סיכום שולחן עגול' שהתקיים בנושא בתאריך 29 ביולי, 2021. מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית.
- אלדר ק., 2006, **הכול לפי מידה: המסע בן שבע השנים ששינה את העולם**. דביר.
- 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.
- גוטליב, ל. 2023. אחריות תאגידי של סקטורים בעלי השפעה סביבתית מוגברת בישראל - מאחריות תאגידי לערך ההשפעה חיפה, ישראל, מוסד שמואל נאמן.
- הקר דפנה, זיו נטע (עורכות), 2010, האם המשפט חשוב? הפקולטה למשפטים ע"ש בוכמן, אוניברסיטת תל-אביב.
- זהבי אמוץ, 1981, אמוץ זהבי: תשובות חדשות לבעיות ישנות, **מחשבות**, 50-51, עמ' 39-35. בהוצאת IBM ישראל.
- כרמית פ., גל ר., 2020, סיכום "שולחן עגול" – חוסן תרבותי. מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית.
- לוינסקי יום-טוב (מלקט ועורך), 1951, ספר המועדים: פרשת מועדי ישראל – ערכם, גילוייהם והשפעתם בחיי עם ישראל ובספרותו מימי קדם ועד היום הזה. כרך ה: ימי מועד וזיכרון. הוצאת אגודת עונג שבת וחברת דביר.
- מאקי ג' וסיסודיה, ר' (2021). קפיטליזם קשוב: הרוח האנושית של עולם העסקים. תל-אביב: די-נור.
- נחמיאס דוד, אורי ארבל-גנץ, אסף מיזני, 2010, מדיניות ציבורית: יסודות ועקרונות. האוניברסיטה הפתוחה.
- פדן כרמית, גל ראובן, 2020, הצעה למסגרת רב-ממדית להגדרת המושג "חוסן", **חוסן לאומי, חברה ופוליטיקה**, (1)2, אביב 2020, 41-78.
- קירש א., 2018, אוניברסיטאות ישראל – היבטים ייחודיים בעולם המשתנה: תהליכים, סוגיות, מגמות והערכות. מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית. פברואר 2018.
- בקרפ, א.זוננשיין, א.בנטור, עולם ההנדסה והמהנדסים: התפתחות היסטורית ודרכי פעולה בחברה המודרנית, מוסד שמואל נאמן, 2021
- ראובן גל, 2018, מה קורה בבית החרדי פנימה? מבט על מספר היבטים הנוגעים לחיי היום-יום של החרדים. מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית, אפריל 2018.
- שושן-רפאלי, ע., 2021. השפעתה של השתתפות אזרחית על שחיתות בשלטון המקומי. חיבור למילוי חלקי של דרישות לתואר דוקטור, אוניברסיטת חיפה.

- Abaté C.J., 2011, Should Engineering Ethics be Taught? *Science and Engineering Ethics* **17**(3):583-596.
- Ackermann W., 1981, Cultural Values and Social Choice of Technology. *International Social Science Journal: Technology and Cultural Values* XXXIII(3), 447-465, Unesco.
- Alder K., 1995, A revolution to measure: The political economy of the metric system in France. In: Wise M.N., (Editor), 1995, *The Values of Precision*. Princeton Un. Pr. (p. 39-72).
- Allen R.C., 2009, *The British Industrial Revolution in Global Perspective*. Cambridge Un. Pr.
- Anderson T.L., 2008, Cocaine and Crack. In: Parrillo V.N. (Editor), *Encyclopedia of Social Problems*. SAGE Publications, Inc.
- Banathy B.H., 1996, *Designing Social Systems In A Changing World*. Springer Science+ Business Media, LLC.
- Beckert S., Rockman S., (Editors), 2016, *Slavery's Capitalism: A New History of American Economic Development*. University of Pennsylvania Press.
- Benoît Norris, C., 2012. Social Life Cycle Assessment: A Technique Providing a New Wealth of Information to Inform Sustainability-Related Decision Making. In M. A. Curran (Ed.), *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products* (pp. 433–452). Scrivener Publishing LLC
- Benoît Norris, C., Traverzo, M., Neugebauer, S., Ekener, E., Schaubroeck, T., & Russo Garrido, S. (2020). Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020.
- van den Bergh J.C.J.M., 2009, The GDP paradox. *Journal of Economic Psychology* **30**, 117–135.
- Bentur, A., Berke, N. S., & Li, L. (2006). Integration of technologies for optimizing durability performance of reinforced concretes. In *ConcreteLife'06-International RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning: Curing, Crack Control, Performance in Harsh Environments* (pp. 247-258). RILEM Publications SARL.
- Bertocchi G., 2006, The law of primogeniture and the transition from landed aristocracy to industrial democracy. *J Econ Growth*, **11**, 43–70.
- Bjørn, A., Owsianiak, M., Molin, C., & Hauschild, M. Z. (2018). LCA history. *Life cycle assessment: theory and practice*, 17-30.
- Block F., Somers M.R., 2014, *The Power of Market Fundamentalism: Karl Polanyi's Critique*. Harvard Un. Pr.
- Boon M., 2011, In defense of engineering sciences: On the epistemological relations between science and technology. *Techné*, **15**(1), 49-71.
- Boudon R., 1986, *Theories of Social Change: A Critical Appraisal*. Translated by J. C. Whitehouse. Polity Press.

- Boy, G. A. (2019). FlexTech: From Rigid to Flexible Human–Systems Integration. *Systems Engineering in the Fourth Industrial Revolution*, 465-481.
- Bozeman B., 2007, *Public Values and Public Interest: Counterbalancing Economic Individualism*, Georgetown University Press.
- Bulleit W., Schmidt J., Alvi I., Nelson E., Rodriguez-Nikl T., 2015, Philosophy of Engineering: What It Is and Why It Matters. *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.*, 141(3): 02514003.
- Byers T.J., 1996, *Capitalism from Above and Capitalism from Below*. Palgrave.
- Chatterjee P., Finger M., 1994, *The Earth Brokers: Power, Politics and World Development*. Routledge.
- Christensen S.H., Delahousse B., Didier C., Meganck M., Murphy M., 2019, *The Engineering-Business Nexus*. Springer.
- Cohen, R. (2020). *Impact: Reshaping capitalism to drive real change*. Random House.
- 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*. 2nd Ed. 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.
- Deane P., 1979, *The First Industrial Revolution*. 2nd Ed. Cambridge Un. Pr.
- Dixon J.R., Duffey M.R., 1990, The neglect of engineering design. *California Management Review*, Winter 1990, 32(2), 9-23.
- Donovan A., Green R.M., 2003, Setup for failure: The Columbia disaster. *Teaching Ethics* 4 (1), 69-76.
- Deane , 1965/1978, *The First Industrial Revolution*.
- Dryzek J.S., 2013, *The Politics of the Earth*. 3rd Ed. Oxford Un. Pr.
- Edwards M.G., 2020, Mapping Resilience Theory: A Metatheoretical Exploration. In: Endreß M., Clemens L., Rampp B., (Eds), *Strategies, Dispositions and Resources of Social Resilience A Dialogue between Medieval Studies and Sociology*. Springer VS.
- Ellsberg D., 2002, *Secrets: A Memoir of Vietnam and the Pentagon Papers*. Pinguin Books.

- Ferguson E.S., 1993, *Engineering and the Mind's Eye*. The MIT Press.
- Fields J.D., 2021, Financial and Hierarchy Maintenance. In: Shackelford, T.K., Weekes-Shackelford, V.A. (eds) *Encyclopedia of Evolutionary Psychological Science*, p. 3138–3139. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19650-3_135.
- Franzini M., Granagila E., Raitano M., 2016, *Extreme Inequalities in Contemporary Capitalism Should We Be Concerned About the Rich?* Springer.
- Friedland N., Arian A., Kirschenbaum A., Amit K., Fleischer N., 2005, *The Concept of Social Resilience*. Samuel Neaman Institute for Advanced Studies in Science and Technology.
- Friedman M., 1962/2002, *Capitalism and Freedom*, 40th Anniversary Ed., The University of Chicago Press.
- Fulcher J., 2004, *Capitalism: A Very Short Introduction*. Oxford Un. Pr.
- 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. 1991, *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.
- Giddens A., 1979, *Central Problems in Social Theory Action: Structure and Contradiction in Social Analysis*. Palgrave.
- Giddens A., 1990, *The Consequences of Modernity*. Polity Press.
- Gill, J., Zonnenshain, A., & Lamoureux, D. (2021, July). Opportunities and challenges of sociotechnical systems engineering. In *INCOSE International Symposium* (Vol. 31, No. 1, pp. 453-467).
- Graber D., 2001, *Toward An Anthropological Theory of Value: The False Coin of Our Own Dreams*. Palgrave.
- Griseri P., 1998, *Managing Values Ethical Change In Organisations*. Macmillan Press Ltd.
- Haik Y., Shahin T., 2011, *Engineering Design Process*. 2nd Ed. Cengage Learning.
- Hajek, P., Ctislav, F., Birit Buhr, J., & Ivana, L. (2013). Integrated life cycle assessment of concrete structures. *Bulletin*, 71.
- Hamerow T.S., 1954, History and the German Revolution of 1848. *The American Historical Review*, **60**(1),p. 27- 44,
- Harlan, S.L., Pellow D.N., Timmons Roberts J., Bell S.E., Holt W.G., Nagel J., 2015, Climate Justice and Inequality. in *Climate Change and Society: Sociological Perspectives*, Dunlap R.E. Brulle R.J. (Editors). Oxford University Press.

- Harris C.E., 2008, The Good Engineer: Giving Virtue its Due in Engineering Ethics. *Science and Engineering Ethics* **14**, Article 153.
- Harvie D., Slater G., Philp B., Wheatley D., 2009, Well-being and British Regions: The Problem with GDP Per Capita. *Review of Social Economy*, **67**(4), pp. 483-505.
- Hayakawa E.I., 1971, *Modern Guide to Synonyms and Related Words*. Pinguin Books.
- Hendrickson III K.E. (Editor), 2015, *The Encyclopedia of the Industrial Revolution in World History*. ROWMAN & LITTLEFIELD.
- Hill D., 1996, *A History of Engineering in Classical and Medieval Times*. Routledge.
- Hissey L., 1986, *Each Thought and Thing Allied: Lewis Mumford on Technics and Society*. Thesis submitted in partial fulfillment of requirements for the degree of Masters of Arts in the Department of Communication, Simon Fraser University.
- Horgan J., 2020, Big Tech, Out-of-Control Capitalism and the End of Civilization. *Scientific American*, 7 Oct. 2020.
- Johnsen L., 2016, *Lost Masters: Rediscovering the Mysticism of the Ancient Greek Philosophers*. New World Library.
- Johnson P., 1987, *The History of the Jews*. Harper Perrenial.
- Kapoor A., Debroy B., 2019, GDP Is Not a Measure of Human Well-Being. *Harvard Business Review*, October 04, 2019.
- Katz, A. (2004). Environmental impact of steel and fiber-reinforced polymer reinforced pavements. *Journal of Composites for Construction*, 8(6), 481-488.
- Kenett, R. S., Swarz, R. S., & Zonnenshain, A. (Eds.). (2019). *Systems engineering in the fourth industrial revolution: Big data, novel technologies, and modern systems engineering*. John Wiley & Sons.
- Klöpffer, W. (2008). Life cycle sustainability assessment of products: (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13, 89-95.
- Landels J.G., 1978, *Engineering In the Ancient World*. University of California Press.
- Landes D.S., 1999, The Fable of the Dead Horse; or, The Industrial Revolution Revisited. In: *The British Industrial Revolution: An Economic Perspective*. Mokyr J. (Editor), 2nd Ed. Westview Press.
- Leveson, N. G. (2016). *Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety* (p. 560). The MIT Press.
- Mazzi, A. (2020). Introduction. Life cycle thinking. In *Life cycle sustainability assessment for decision-making* (pp. 1-19). Elsevier.
- McKeon R. (Editor), 1947, *Introduction to Aristotle*. A Modern Library Book.
- McNeil I. (Editor), 1990, *An Encyclopaedia of the History of Technology*. Routledge.

- Meiksins P., 1988, The "Revolt of the Engineers" reconsidered, *Technology and Culture*, **29**(2), 219-246.
- Mitcham C., 1998, The importance of philosophy to engineering. *Teorema: Revista Internacional de Filosofia* **17**(3), 27-47.
- Mitcham C., Briggle 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.
- More C., 2000, *Understanding the Industrial Revolution*. Routledge.
- Munns A.K., Bjeirmi B.F., 1996, The role of project management in achieving project success. *Int. J. Project Management* **14**(2), 81-87.
- Novalés A., Fernández E., Ruiz J., 2022, *Economic Growth Theory and Numerical Solution Methods*. 3rd Ed. Springer.
- OECD, O. (2019). future of education and skills 2030: OECD learning compass 2030.
- Outman J.L., Outman E.M., 2003, *Industrial Revolution Almanac*. Thomson, Gale.
- Pargas D.A., Roşu F., (Editors), 2018, *Critical Readings on Global Slavery*. Brill.
- Parrillo V.N. (Editor), 2008, *Encyclopedia of Social Problems*. SAGE Publications, Inc.
- Raelin J.A., 1991, *The Clash of Cultures: Managers Managing Professionals*. Harvard Business School.
- Robertson A, 1981, Introduction: Technological innovations and their social impacts. *International Social Science Journal: Technology and Cultural Values* **XXXIII**(3), 431-446, UNESCO.
- Rogan T., 2017, *The Moral Economists: R. H. Tawney, Karl Polanyi, E. P. Thompson, and the Critique of Capitalism*. Princeton University Press.
- Ross R., van Den Haag E., 1957, *The Fabric of Society: An introduction to the Social Sciences*. Harcourt, Brace & World.
- Safina C., 2016, *Beyond Words: What Animals Think & Feel*. Souvenir Pr.
- Saja A. M. A., Teo M., Goonetilleke A., Ziyath A.M., 2021, A Critical Review of Social Resilience Properties and Pathways in Disaster Management. *Int J Disaster Risk Sci* (2021) 12:790–804.
- Samuel A., Weir J., 1999, *Introduction to Engineering Design*. Elsevier Science & Technology Books.
- Sarfraz Z, Sarfraz A, Iftikar HM, Akhund R. Is COVID-19 pushing us to the Fifth Industrial Revolution (Society 5.0)? *Pak J Med Sci*. 2021;37(2):591-594. doi: <https://doi.org/10.12669/pjms.37.2.3387>

- Savitz, A. (2013). *The triple bottom line: how today's best-run companies are achieving economic, social and environmental success-and how you can too*. John Wiley & Sons
- Scott B.R., 2011, *Capitalism: Its Origins and Evolution as a System of Governance*. Springer.
- Sheps, I., & Zonneshain, A. (2008, June). Design for Sustainability–The Challenge for Systems Engineering. In *Proceedings of 18th Annual International INCOSE Symposium* (pp. 15-19).
- Smith M., 1995, A green thought in a green shade: A critique of the rationalization of environmental values. Ch. 4 In: Guerrier Y., Alexander N., Chase J., O'Brien M., (Eds), *Values and the Environment: A Social Science Perspective*. John Wiley & Sons.
- Snooks 1994, *Was the Industrial Revolution Necessary*. Palgrave.
- Surdam D.G., 2020, Slavery Throughout History. Ch. 15 in: *Business Ethics from Antiquity to the 19th Century*. Pulgrave.
- Thomas, J. (2016). Introduction to Systems Theoretic Process Analysis (STPA).
- US Gov, 2005, *Budget of the United States Government: Analytical Perspectives, Fiscal Year 2006*, Executive Office of the President of the United States, U.S. Government Printing Life Cycle Sustainability Assessment for Decision Making Office, Washington.
- Weidema, B. P. (2006). The integration of economic and social aspects in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11, 89-96.
- Walden, D. D. (2015). *Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities*. (No Title).
- Wang H., Li S., 2018, *Introduction to Social Systems Engineering*. Springer.
- Williams E., 1966, *Capitalism and Slavery*.
- Wood E.M., 2002, *The Origin of Capitalism: A Longer View*. Verso.
- Yang, S., Ma, K., Liu, Z., Ren, J., & Man, Y. (2020). Development and applicability of life cycle impact assessment methodologies. In *Life cycle sustainability assessment for decision-making* (pp. 95-124). Elsevier.
- Zaychikova, N. A. (2022, April). Industry 4.0 Technology in the Digital Economy. In *Proceedings of the International Conference Engineering Innovations and Sustainable Development* (pp. 197-205). Cham: Springer International Publishing.
- Zonneshain, A. (2006, July). 3.2. 1 Corporate Social Responsibility (CSR)-the System Perspective & the Systems Engineering Role: Sixteenth Annual International Symposium of the International Council On Systems Engineering (INCOSE) 8-14 July 2006. In *INCOSE International Symposium* (Vol. 16, No. 1, pp. 396-402).



neaman.org.il

מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית | קרית הטכניון,
חיפה 3200003 | טל. 04-8292329 | info@neaman.org.il

מדע וטכנולוגיה