

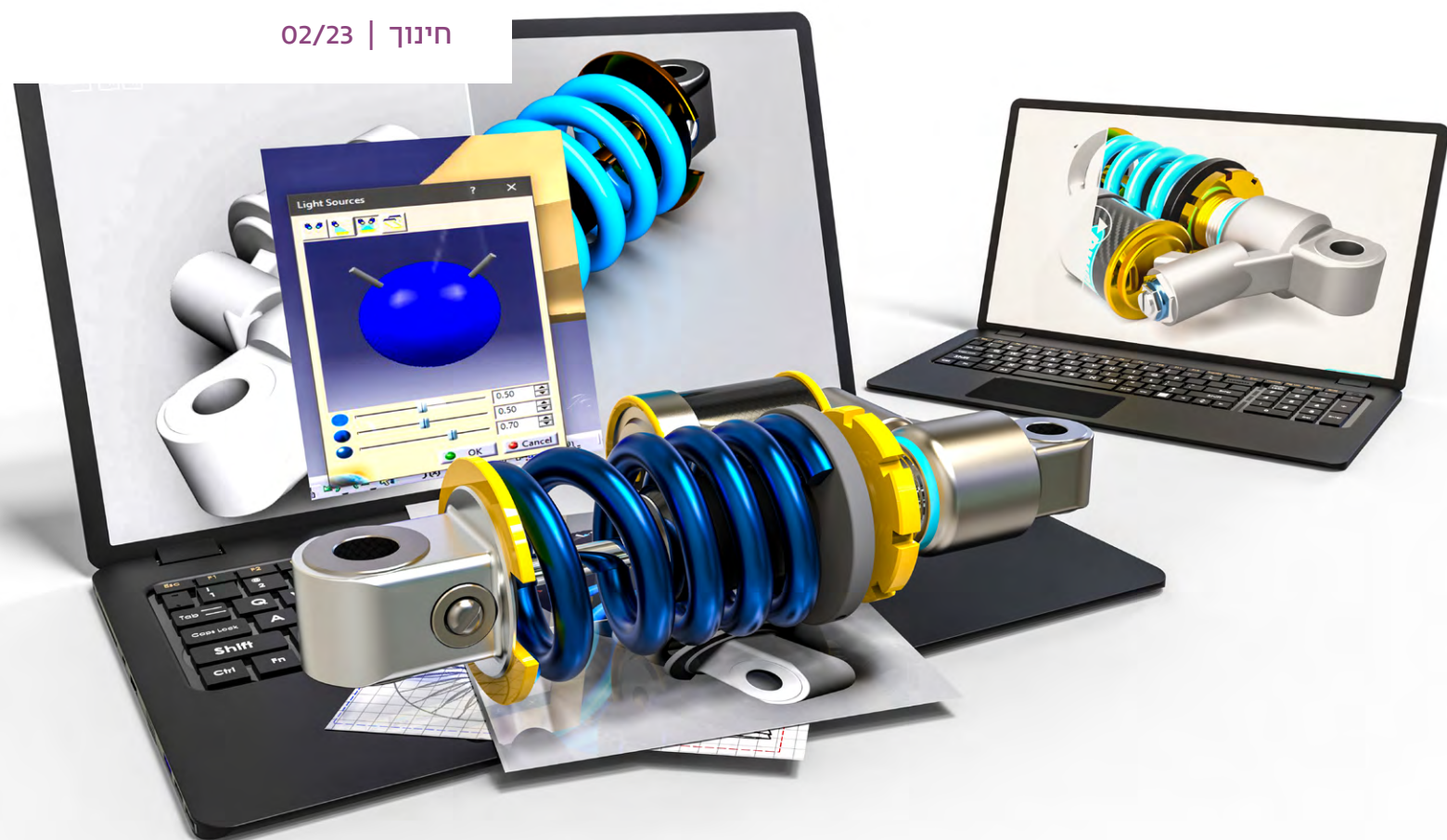
הנדסה דיגיטלית והטמעתה בחינוך מהנדסים

ד"ר אביגדור זוננשיין
פרופ' ארנון בנטור
תמר דיין
ציפי בוכניק
ד"ר קובי ריינר
פרופ' ראובן כץ

מוסד שמואל נאמן
למחקר מדיניות לאומית



02/23 | חינוך





מוסד שמואל נאמן
למחקר מדיניות לאומית

הנדסה דיגיטלית והטמעתה בחינוך מהנדסים

ד"ר אביגדור זוננשיין

פרופ' ארנון בנטור

תמר דיין

ציפי בוכניק

ד"ר קובי ריינר

פרופ' ראובן כץ



גרסה מעודכנת | פברואר, 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 העניינים

7	תקציר מנהלים.....	
9	1. הגדרות, מושגים, עקרונות, אתגרים, מחסומים והזדמנויות.....	
9	1.1 מטרות האסטרטגיה של הנדסה דיגיטלית.....	
11	1.2 אתגרים ביישום הנדסה דיגיטלית.....	
12	1.3 מכשולים וחסמים בדרך ליישום הנדסה דיגיטלית.....	
16	1.4 הזדמנויות ויתרונות הנובעים מיישום הנדסה דיגיטלית.....	
18	2. תועלות צפויות, מודגמות ומדווחות מאוריינות והנדסה דיגיטלית.....	
20	3. שיטות נבחרות בהנדסה דיגיטלית.....	
20	3.1 תכן ג'נרטיבי ותכן להדפסות תלת ממד.....	
21	3.1.1 יישומים.....	
23	3.1.2 תכן ועיצוב ג'נרטיבי וייצור בהוספה (Generative Design & Additive Manufacturing).....	
25	3.2 הנדסת מערכות מבוססת מודלים (Model Based Systems Engineering (MBSE)).....	
26	3.3 הנדסה מבוססת נתונים/דאטה.....	
27	3.4 תאום דיגיטלי (Digital Twin).....	
30	3.5 תפקיד המידול והסימולציות בפיתוח מערכות מסובכות.....	
33	4. יישום הנדסה דיגיטלית בתחומים נבחרים.....	
33	4.1 יצור מתקדם / תעשייה 4.0.....	
34	4.2 תחזוקה חזוייה / ניטור בריאות מבנים.....	
35	4.3 אינטרנט של הדברים (Internet of Things (IoT).....	
38	4.4 תכן מערכות ומוצרים להדפסת תלת ממד.....	
39	4.5 הנדסת איכות, אמינות ובטיחות.....	
39	4.6 תכן קונספטואלי מבוסס מודלים (MBCD (Models Based Conceptual Design).....	
40	4.7 בינה מלאכותית (Artificial Intelligence (AI)) ולמידת מכונה (Machine Learning (ML)).....	
43	4.8 הנדסת מערכות דיגיטליות (Digital Systems Engineering).....	
45	5. סקר אוריינות דיגיטלית - הפער הקיים במיומנויות דיגיטליות באקדמיה ובמגזר העסקי.....	
47	6. תכניות חינוך, מתודולוגיות לימוד והכשרה בתחומי הנדסה ואוריינות דיגיטלית.....	
48	6.1 תוכנות מתכניות חינוך של אוניברסיטאות ומוסדות מובילים בעולם ובארץ.....	
48	6.1.1 סקירת תכניות באוניברסיטאות ומכללות בארץ.....	

53	6.1.2 סקירת תכניות באוניברסיטאות ומכללות בעולם
59	6.1.3 תובנות
60	6.2 תכניות מסגרת לחינוך להנדסה ואוריינות דיגיטלית
63	6.2.1 מתווה מוצע ללימודי הנדסה דיגיטלית למהנדסים במסגרת תכנית ללימודים לאורך החיים
64	6.2.2 המלצה לאשכול אוריינות דיגיטלית
64	6.2.3 מתווה מוצע של "הזירה הטכנולוגית" (חל"ץ) (מתוך ראיון עם נעמי בלנק מובילה ויזמת (09.01.2023))
66	6.3 כלים ללמידה של הנדסה ואוריינות דיגיטלית, תרגול והדגמה
68	7. סיכום
69	8. מקורות
74	נספח 1 - הרחבה ודיון על שוק ה- IoT
76	נספח 2 - סקר אוריינות דיגיטלית וממצאים
89	נספח 3 – סיכומי ראיונות עם מכללת בראודה ועם המרכז האקדמי רופין

רשימת טבלאות

- טבלה 1: חסמי מערכת אקוסיסטם ושוק על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית..... 13
- טבלה 2: מדיניות, רגולציה וחסמים משפטיים על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית..... 14
- טבלה 3: אסטרטגיית חדשנות ארגונית, שיתוף פעולה וחסמים תהליכיים על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית..... 14
- טבלה 4: חסמים כלכליים ופיננסיים על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית..... 15
- טבלה 5: מחסומי טכנולוגיה טכניים על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית..... 15
- טבלה 6: מחסומי נתונים על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית..... 16
- טבלה 7: חסמי תרבות וניהול על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית..... 16
- טבלה 8: השוואה בין גישות מסורתיות לגישות מתקדמות בהנדסת מערכות..... 43
- טבלה 9: אוניברסיטאות ומכללות, תארים ומסלולים במוסדות בארץ..... 48
- טבלה 10: התכנים שנלמדים במסלולים השונים..... 50
- טבלה 11: אוניברסיטאות, תארים ומסלולים במוסדות בעולם..... 53
- טבלה 12: התכנים הנלמדים במסלולים השונים..... 55
- טבלה 13: פילוח רמת ההכשרה הדיגיטלית של המהנדסים לפי שיעור העובדים בעלי השכלה גבוהה..... 77
- טבלה 14: קורסים ותכנים דיגיטליים הנכללים בתוכניות הלימודים להנדסה..... 87

רשימת איורים

- איור 1: מודלים מקושרים דרך מקור סמכותי לאמת במשרד ההגנה האמריקאי..... 10
- איור 2: המטרות העיקריות ליישום הנדסה דיגיטלית..... 11
- איור 3: שמונת האתגרים ביישום הנדסה דיגיטלית..... 11
- איור 4: גישת ה-MBSE מספקת חיסכון כמותי משמעותי..... 19
- איור 5: תיאור תהליך התכן הג'נרטיבי..... 21
- איור 6: תרשים זרימה של תהליך עיצוב ג'נרטיבי..... 22
- איור 7: תפיסת מחזור החיים של ניתוח נתונים, בהקשר של המערכת האקולוגית הארגונית בה מתרחשת העבודה..... 27
- איור 8: גישת הסיב הדיגיטלי..... 28

- איור 9: תהליך הפיתוח המלא של סימולציה ספרתית 31
- איור 10: הטכנולוגיות שמניעות את המהפכה התעשייתית הרביעית 33
- איור 11: השלבים בשילוב IoT במערכות, מוצרים ושירותים 37
- איור 12: מערכת אקולוגית טכנולוגית של למידת מכונה 42
- איור 13: הייטק 3 - אקדמיה מותאמת הייטק 47
- איור 14: התפלגות התארים לפי מוסד 50
- איור 15: ענן מילים של התכנים הקשורים להנדסה דיגיטלית באוניברסיטאות ומכללות בארץ 53
- איור 16: התפלגות התארים לפי אוניברסיטה 55
- איור 17: ענן מילים של התכנים הקשורים להנדסה דיגיטלית באוניברסיטאות בעולם 58
- איור 18: מסגרת מיומנות הנדסה דיגיטלית (DECF) 61
- איור 19: מדדי יישום ואפקטיביות של הנדסה דיגיטלית בארגונים ובפרויקטים 62
- איור 20: האיכויות של הישגים והתרומות של הנדסה דיגיטלית 62
- איור 21: באיזה מידה רמת ההכשרה הדיגיטלית של מהנדסים שנקלטים לעבודה מספקת בהשוואה לדרישות התפקיד? 77
- איור 22: המיומנויות הדיגיטליות העיקריות הנדרשות מהמהנדסים 78
- איור 23: היקף ההכשרות הפנימיות/החיצוניות הניתנות למהנדסים בנושאים של מיומנויות דיגיטליות 79
- איור 24: באיזה מידה רמת ההכשרה הדיגיטלית של מהנדסים שנקלטים לעבודה מספקת בהשוואה לדרישות התפקיד? 83
- איור 25: המיומנויות הדיגיטליות העיקריות הנדרשות מבוגרים המסיימים הנדסה 84

תקציר מנהלים

המהפכה התעשייתית הרביעית המתרגשת עלינו בשני העשורים האחרונים, כוללת בתוכה מספר מגמות חשובות, שאחת מהן היא המהפכה הדיגיטלית או כפי שהיא מכונה הטרנספורמציה הדיגיטלית. במסמך זה אנו מציגים היבטים מגוונים של הטרנספורמציה הדיגיטלית, עם דגש על מרכיביה ומשמעויותיה להנדסה דיגיטלית, שהיא הטרנספורמציה הדיגיטלית של ההנדסה בתחומים השונים. ההיבטים השונים של הנדסה דיגיטלית כוללים בין השאר היבטים אסטרטגיים. יישום הנדסה דיגיטלית בארגונים הוא מהלך אסטרטגי וארגוני וחברות מובילות בעולם גיבשו תכנית אסטרטגית לקידום ויישום הנדסה דיגיטלית (כמו: משרד ההגנה האמריקאי, חברות רכב ותעופה מובילות). זהו מטרת, אתגרים, הזדמנויות ומכשולים ביישום אפקטיבי של הנדסה דיגיטלית והוערכו התועלות המשמעותיות. בעלויות וקיצור משמעותי בלוחות זמנים בפיתוח מערכות, ייצורן, תחזוקתן ואספקתן. מידע זה מאפשר ומסייע לארגונים, מנהלים ומהנדסים לגבש תכנית אסטרטגית ליישום הנדסה דיגיטלית בתחומי אחריותם. תכנית זו אמורה לענות בצורה מובהקת על האתגרים של הארגון בהיבטים שיווקיים, טכנולוגיים, הנדסיים ותהליכיים. יישום תכנית זו צפויה לשנות לטובה באופן מהותי את התהליכים בהם מיושמת ההנדסה ונגזרותיה בארגונים ופרויקטים אלו.

פורום חינוך מהנדסים למאה ה-21 המתקיים ומונהג, במוסד שמואל נאמן, מקדם יישום והטמעת הנדסה דיגיטלית ואוריינות דיגיטלית באקדמיה ובתעשייה בישראל. מסמך זה מהווה חלק מתשתית הידע למאמצים אלו.

בהמשך לגיבוש האסטרטגיה ליישום הנדסה דיגיטלית, פיתוח וקידום הנדסה דיגיטלית מחייבת חינוך והכשרה למנהלים, למהנדסים ולכל סגל העובדים המקצועי העוסק בפיתוח, בהנדסה, בייצור, בתחזוקה ובאספקה של המערכות המורכבות.

בדו"ח זה מתוארות תכניות קיימות בארץ ובעולם באקדמיה להכשרת דור המהנדסים העתידי לעידן ההנדסה הדיגיטלית, והענקת כישורים דיגיטליים. כמו כן, מתוארות תכניות חינוך לאורך החיים עבור סגל העובדים הקיים כדי לשדרג אותם לעידן החדש. גם התעשייה יוזמת תכניות חינוך והכשרה לאוריינות דיגיטלית והנדסה דיגיטלית לסגל העובדים הקיים, כשדרוג הכרחי של הידע של העובדים. הארגונים (אקדמיה או מגזר עסקי) המתכננים הכשרה בתחומי הנדסה דיגיטלית יכולים ללמוד מהתכניות האלו להכשרה להנדסה דיגיטלית.

במסגרת עבודה זו יזמנו וביצענו סקר אוריינות דיגיטלית להערכת הפערים הקיימים במיומנויות הדיגיטליות באקדמיה, בתעשייה ובמגזר העסקי. ממצאי ותובנות הסקר נכללים במסמך זה. התובנות המרכזיות מסקר זה הן:

- בקרב רוב אנשי התעשייה הובע הצורך שהמהנדסים יהיו בעלי מיומנויות דיגיטליות מגוונות כדי שיתרמו לתהליכי ההנדסה המודרניים. במצב הנוכחי יש פער בין הרצוי והמצוי בתחום ופער זה על פי הערכותיהם ילך ויגדל.
- בקרב רוב אנשי האקדמיה הובע הצורך להכליל יותר לימודי מיומנויות דיגיטליות בתכניות לימודי ההנדסה, כדי להכין את הסטודנטים לעולם העבודה הדיגיטלי המתפתח ומשתנה. אבל עדיין קצב שילוב תכנים דיגיטליים בתכניות הלימודים הוא איטי ולא מספק את הצרכים.

בדו"ח זה גם סקירה של שיטות נבחרות בהנדסה דיגיטלית, כמו: תכן ג'נרטיבי, תכן להדפסות תלת ממד, הנדסת מערכות מבוססת מודלים, הנדסה מבוססת נתונים ודאטה, ותאום דיגיטלי. כמו כן, מתואר יישום הנדסה דיגיטלית בתחומים נבחרים, כמו: יצור מתקדם ותעשייה 4.0, תחזוקה חזויה וניטור בריאות מבנים, אינטרנט של הדברים, הנדסת איכות 4.0, תכן קונספטואלי מבוסס מודלים, שילוב בינה מלאכותית ולמידת מכונה בהנדסה דיגיטלית.

תודה מיוחדת לפרופ' ראובן כץ, לפרופ' איגור ורנר, לד"ר רונן בן חורין מחברת PTC, לשלמה וולפמן, לפרופ' אריה מהרשק, פרופ' ח/שרית סיון, לפרופ' פרדי גבאי ולגב' נעמי בלנק על הסיוע המקצועי בהכנת מסמך זה.

1. הגדרות, מושגים, עקרונות, אתגרים, מחסומים והזדמנויות

הנדסה דיגיטלית היא מיזוג של טכנולוגיות דיגיטליות מתקדמות עם יכולות הנדסת מוצר מהטובות מסוגה, המספקות תהליכים עתירי משאבים וירטואליים בסביבה דיגיטלית.

היכולות ההנדסיות הקיימות כיום, בהן נעשה שימוש המבוססות על גישות עוקבות ובדיקות פיזיות נרחבות, אינן מסוגלות לספק את המוצרים המורכבים של העתיד. פתרונות הנדסה דיגיטלית יהוו חלק קריטי במסע לפיתוח מוצרים ושירותים של המחר תוך עמידה בציפיות הלקוחות של הדור הזה.

טכנולוגיות דיגיטליות מתקדמות יאפשרו לדמיין ולבדוק מיליארדי תרחישים כדי לקבל את המידע התפעולי הדרוש להצלחה. הנדסה דיגיטלית מאפשרת להנדס ולייצר מוצרים מורכבים טוב יותר, מהיר יותר וזול יותר, ולהסתגל תוך ימים, לא חודשים, לכל מה שהעתיד יביא.¹

טום מקדרמוט ממרכז המחקר להנדסת מערכות (Systems Engineering Research Center) מגדיר הנדסה דיגיטלית כגישה דיגיטלית משולבת המשתמשת במקורות מוסמכים של נתוני מערכות ומודלים כרצף בין דיסציפלינות כדי לתמוך בפעילויות מחזור החיים, מהרעיון ועד לגריטה.²

חיל האוויר האמריקאי³ (The Air Force Digital Literacy core competency) הגדיר את כישורי הליבה ואת הפרופיל של המיומן בהם, כאדם אשר משתמש בטכנולוגיה כדי לזהות, להעריך באופן ביקורתי ולתכלל נתונים ומידע; לחקור, ליצור ולנהל תוכן דיגיטלי; ולקיים אינטראקציה מתאימה בסביבה וירטואלית.

חינוך לאוריינות דיגיטלית ב-AFIT (Air Force Institute of Technology) מתמקד בעיקר בשישה נושאים מרכזיים: הנדסה דיגיטלית, רכישה דיגיטלית, מדעי נתונים, אבטחת סייבר, הנדסת משימה ופעולות משותפות בתהליכים דיגיטליים בכל התחומים.

Grant Mills מביה"ס Bartlett School, UCL מגדיר הנדסה דיגיטלית כ"שימוש בטכנולוגיות דיגיטליות כדי לקדם מודל עסקי הנדסי חדש ולספק מקורות הכנסה חדשים והזדמנויות להפקת ערך". הנדסה דיגיטלית עשויה למזג ולשלב מגוון טכנולוגיות כמו פעולות אוטונומיות, חצי אוטונומיות ופעולות ידניות עם ענן, חיישן, נתוני עתק (big data) וטכנולוגיות הדפסה תלת ממד כדי לפתוח אפשרויות בלתי צפויות וליצור מוצרים, שירותים ומערכות אקולוגיות (ecosystems) הנדסיות חדשות.

1.1 מטרת האסטרטגיה של הנדסה דיגיטלית

הנושא המרכזי של אסטרטגיית ההנדסה הדיגיטלית של משרד ההגנה האמריקאי (US DoD, 2018) הוא ייצוג דיגיטלי של מערכות בעלות עניין ולאפשר פיתוח, אינטגרציה ושימוש פורמלי של מודלים בכל

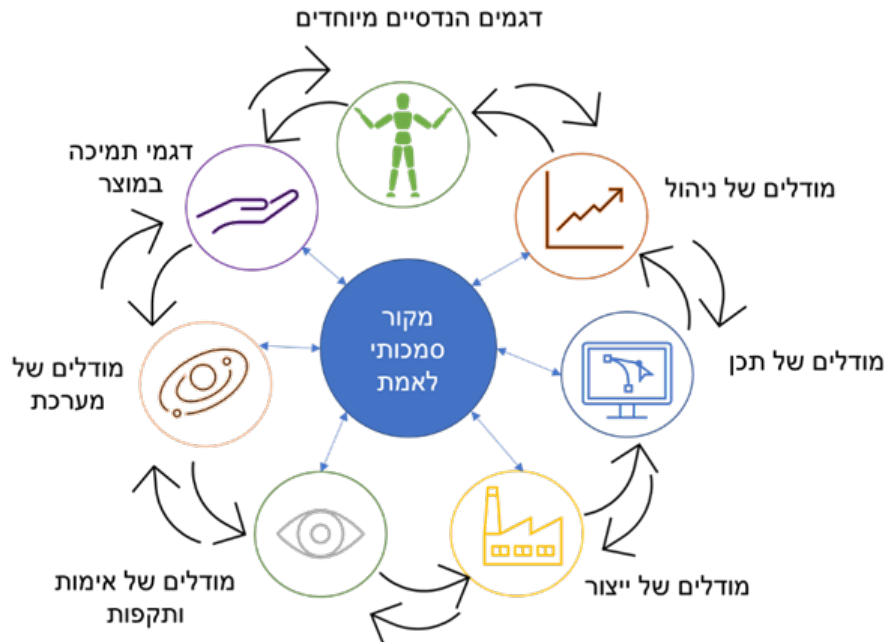
¹<https://www.ide.uk/>

² <https://insights.sei.cmu.edu/blog/some-challenges-in-making-the-transition-to-digital-engineering/>

³ <https://www.afit.edu/diglit/>

מחזור החיים של המערכת באמצעות "מקור סמכותי לאמת"⁴ (The Authoritative Source of Truth (ASoT)), כפי שמוצג באיור 1.

איור 1: מודלים מקושרים דרך מקור סמכותי לאמת במשרד ההגנה האמריקאי



היבט חשוב ביותר: "בסיס נתונים יחיד ואחוד". מתוך ניסיוני במערכי פיתוח וייצור גדולים ובהיקפים גדולים (הן בפלסן בהיקף כולל של כ-4.5 מיליארד דולר, והן בפעילות מילואים בה אני עוסק לאחרונה בהיקף מיליארדי \$), כאשר גורמי הפיתוח מרוחקים פיזית ותרבותית מכמה גורמי ייצור (למשל ישראל, ארה"ב וצרפת), כאשר מעורבים בפרויקט יחיד מאות יצרנים, עולה והופכת לקריטית ממש עדכניות המידע. תארו לעצמכם זרימת תיעוד מהפיתוח לייצור דרך גורמי הרכש, כאשר במהלך כמה חודשים של התהליך מתבצעים עדכוני תכן, והמהדורה בידי היצרן איננה תואמת את המהדורה העדכנית בפיתוח. נתקלתי לא פעם בזוג שרטוטים בעלי אותו מספר אך עם מידות שונות. (עמי הראל, מנכ"ל, e2eS – end to end Systems, חבר נשיאות האיגוד הישראלי להנדסת מערכות INCOSE_IL, מוביל קבוצת העבודה HSI-Human Systems Integration (INCOSE_IL & Gordon Center - Technion)

⁴ "מקור סמכותי לאמת" הוא ישות כגון אדם, גוף שלטוני או מערכת המיישמת שיקול דעת וכללים של מומחים כדי להכריז על חפץ דיגיטלי תקף ומקורו לגיטימי.
https://www.omgwiki.org/MBSE/doku.php?id=mbse:authoritative_source_of_truth

במסמך זה של משרד ההגנה האמריקאי מודגשות 5 מטרות עיקריות ליישום הנדסה דיגיטלית בחברות, ארגונים ופרויקטים:

איור 2: המטרות העיקריות ליישום הנדסה דיגיטלית



1.2 אתגרים ביישום הנדסה דיגיטלית

ע"פ Jingwei Huang et al יישום הנדסה דיגיטלית הוא אתגר משמעותי במגוון היבטים. ג'ינגווי מתאר שמונה אתגרים ביישום:

איור 3: שמונת האתגרים ביישום הנדסה דיגיטלית



1.3 מכשולים וחסמים בדרך ליישום הנדסה דיגיטלית⁵

יחסי הגומלין מורכבים ולכן Mills ניסה לסווג חסמים לפי חמש קטגוריות רחבות של שלבי ההנדסה הדיגיטלית:

- תכן מונע כלים דיגיטליים (Digital enabled design)
- רכש מונע כלים דיגיטליים (Digital enabled procurement)
- ייצור / תת-מכלולים מונע כלים דיגיטליים (Digital enabled manufacture / subassemblies)
- בנייה דיגיטלית / אתרים חכמים (Digital construction / smart sites)
- ניהול דיגיטלי של מתקנים ותשתיות / תאום דיגיטלי (Digital facilities management/digital twin)

במונחים כלליים, ניתן לסכם את החסמים להנדסה דיגיטלית כך:

חסמי מערכת אקוסיסטם ושוק – חוסר מוכנות של התעשייה, יישום נמוך של צרכנים, חוסר ביכולות מקצועיות חדשות, רשתות תקשורת, תרבות רכש במחיר הנמוך ביותר, קשרים בתעשייה.

חסמי מדיניות, רגולציה וחסמים משפטיים – GDPR - General Data Protection Regulation⁶, רכש, קניין רוחני (Intellectual property), חקיקה נדרשת, אבטחת מידע, כפילות של פיתוח מדיניות.

פערים באסטרטגיית חדשנות ארגונית, שיתוף פעולה וחסמים תהליכיים – תהליכי חדשנות חלשים, חוסר שיתוף פעולה על פני שרשרת אספקה מפוצלת, חוסר אמון ותקשורת בין השותפים למערכת, חוסר סטנדרטיזציה, הגבלה למכרזים במחיר הנמוך ביותר.

הקורונה המיטה הרס על שרשרות האספקה הגלובליות המורכבות של חברות המכוניות, בעיקר בתחום המוליכים למחצה. בשוק יצרני הרכבים חל שינוי, ככל שמכוניות נהיות חשמליות יותר ומומוחשבות יותר, שרשרות האספקה נבנות מחדש למציאות חדשה, שמשנה את פני התעשייה בצורה המעמיקה ביותר כבר עשורים.

יצרניות המכוניות רוצות שליטה רבה יותר בשרשרת הערך שלהן – ממתכות שמרכיבות את הסוללות והתוכנה שמפעילה את אותן מכוניות חשמליות – ועד החנויות שהן נמכרות בהן. ייצור כל חלקי הרכב תחת גג אחד (דה מרקר, 03 ביולי 2022).

פערים בתשתית אנושית – חוסר ידע ואוריינות דיגיטלית לאורך כל שרשרת הניהול והאספקה – מנהלים, מהנדסים, ספקים, מערכות תובלה ואספקה, לקוחות ושווקים, חוסרים בהכשרות מתמידות בתחומי האוריינות הדיגיטלית.

חסמים כלכליים ופיננסיים – מיעוט תמריצים מוחשיים, קצב מהיר של פרויקטים, השקעה גבוהה, היעדר משאבים זמינים והחזר ROI.

⁵ Mills, G. (11 September 2019) Barriers to Digital Adoption Report. UCL Bartlett School of Construction and Project Management.

⁶ חוק הגנת המידע והפרטיות של האיחוד האירופי EU האיחוד הכלכלי האירופי EEA

מחסומי טכנולוגיה טכניים – צורך בהשקעה במחקר טכנולוגי ו- scalability, רמות שונות של בשלות, היעדר תקנים וסטנדרטיזציה, חוסרים בתאימות ובתשתיות.

מחסומי נתונים – בהיבטי עיבוד, אחסון, ניקיון, חששות אתיים, תפיסות שליליות.

חסמי תרבות וניהול - אי הבנה של העולם הדיגיטלי, חוסר במעורבות והתנגדות, חוסר התמקדות ביעילות ובייצוריות רזה, חוסר מיקוד לקוח ומחויבות ההנהלה הבכירה.

מה שחשוב לציין הוא שרוב החסמים הם פונקציה של בשלות של הקטגוריות השונות בהנדסה דיגיטלית. ככזה, קיים משחק גומלין מורכב של חסמים המשתנים לאורך זמן ובין הטכנולוגיות של הנדסה דיגיטלית.

פירוט החסמים ותיאורם בטבלאות 1 – 7.

טבלה 1: חסמי מערכת אקוסיסטם ושוק על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית

עיצוב מאופשר דיגיטלית	רכש מאופשר דיגיטלי	ייצור / מכלול משנה מאופשר דיגיטלית	בנייה דיגיטלית / אתרים חכמים	FM דיגיטלי / תאום דיגיטלי
למשל Building Information Management (BIM), ספריות BIM, ניהול תהליכים ועיצוב דיגיטלי ו- Virtual Reality (VR)	למשל ניתוח נתונים של שרשרת אספקה, מחשוב בלוקצ'יין ומחשוב ענן, תכנון שיתופי ואינטגרציה	למשל שיטות בנייה מודרניות (MMC), ייצור רזה ומתועש ורובוטיקה	למשל מל"טים, בקרה מספרית במחשב, הדפסת תלת ממד, אוטומציה, מציאות רבודה, סקינים דיגיטליים	למשל חיישנים, BIM FM, GIS מיקום, חישה מרחוק או חדשנות באינטרנט
• יתרונות לא ברורים • מעט תמריצים • קניבליזציה • IP וידע • תדמית מותג • חוסר מנהיגות • תרבות תביעות קיימת • ניהול עיצוב	• אינטנסיביות תחרותית גבוהה • חוסר צורך נתפס • תיאום • מדרגיות של אחסון נתונים ומהירות • מגוון בעלי עניין ודיסציפלינות • גישה מבוססת פרויקט זמני ועסקאות • מודל קבלני משנה מקוטע • חסמי עיצוב	• תמריצים • תמיכה ממשלתית בחדשנות • עלות הון ראשונית גבוהה • רכש וחוזים מסורתיים • יחסי יריבות / אמון • חוסר מדד לאובדי איכות ופרודוקטיביות • ביקוש בשוק • גישה לעבודה • שרשרת אספקה מורכבת • שונות בפרויקטים • היעדר ספק מעורבות / תכנון שיתופי חלש • יכולת ועמדות	• עלות טכנולוגיה • שולי רווח נמוכים של התעשייה • פערים בהשקעה במו"פ • מחסור במהנדסים בעלי יכולת טכנולוגיה • אבטחת נתונים • איום של סביבה מלאכותית	• מגוון אמצעים • היקף יישום • נגישות לתוכנות מסחריות • מקורות פתוחים של קוד

טבלה 1 מראה שהחסמים הדיגיטליים בתכנון ורכש קשורים במי מוביל, מי מרוויח ומדוע חברות צריכות ליישם הנדסה דיגיטלית, בעוד שהחסמים הדיגיטליים בבנייה וניהול תשתיות קשורים לעלות המופחתת של היישום והיעדר משאבים. חסמים משמעותיים קיימים במהלך יישום גישות ייצור דיגיטליות חדשות.

טבלה 2 מראה שהחסמים הדיגיטליים בקטגורית מדיניות ורגולציה מתמקדים במידה רבה במי שמפתח מדיניות, מי נושא בעלות אכיפתה ומי לוקח אחריות. נראה שהמחסומים הללו להנדסה דיגיטלית עקביים יחסית בכל שלבי התכנון, הרכש, הייצור, הבנייה וניהול המתקנים, אם כי צפויות להיות שונות בהתאם למורכבות סוג הפרויקט ואופי הסטנדרטים הספציפיים לפרויקט.

טבלה 2: מדיניות, רגולציה וחסמים משפטיים על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית

עיצוב מאופשר דיגיטלי	רכש מאופשר דיגיטלי	ייצור / מכלול משנה מאופשר דיגיטלי	בנייה דיגיטלית / אתרים חכמים	FM דיגיטלי / תאום דיגיטלי
<ul style="list-style-type: none"> אתיקה והשקפות משפטיות של מעקב וניטור בעלות ו-IP אחריות לטעויות מיסוי היעדר תקנים הליכי רכש מסורתיים 	<ul style="list-style-type: none"> חוסר עדיפות חוזית ומשפטית אילוצים של מוניטין משותף סודיות 	<ul style="list-style-type: none"> תקציבי מו"פ נמוכים בדיקות מוגבלות קודים ותקנים תרבות חדשנות 	<ul style="list-style-type: none"> עלות זמן רישוי רחפנים הגבלות על ממשק רובוט-משתמש 	<ul style="list-style-type: none"> היעדר רגולציה, תקנים וקודים ברורים

טבלה 3 מראה כי אסטרטגיית חדשנות ארגונית, שיתוף פעולה וחסמים בתהליך מתמקדים במידה רבה במי המעורב, מהו המבנה, כיצד היכולות והעצמת הצוותים מחולקות בתהליך וכיצד מושגת התאמה בין האינטרסים המסחריים. נראה שיש חסמים הנדסיים דיגיטליים עקביים לאורך שלבי התכנון, הרכש, הייצור, הבנייה וניהול המתקנים, בכל הנוגע להיבטי האינטגרציה הארגונית.

טבלה 3: אסטרטגיית חדשנות ארגונית, שיתוף פעולה וחסמים תהליכיים על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית

עיצוב מאופשר דיגיטלי	רכש מאופשר דיגיטלי	ייצור / מכלול משנה מאופשר דיגיטלי	בנייה דיגיטלית / אתרים חכמים	FM דיגיטלי / תאום דיגיטלי
<ul style="list-style-type: none"> חוסר תכנון אורך וחוסר גמישות של שרשרת האספקה חוסר שיתוף פעולה ואינטגרציה שינוי תהליכי חדשנות בשותפות בשרשרת האספקה מומחיות בשרשרת האספקה מנהיגות חוסר סיכונים משותפים 	<ul style="list-style-type: none"> שיתוף מידע וגישה לנתונים בשיתוף פעולה אמון, אתיקה, אבטחה תחרות קונפליקטים עיקריים-סוכנים תמריצים תרבות ויכולות מנהיגות 	<ul style="list-style-type: none"> כוח אדם קבלנות משנה מפוצלת שיפור מיומנות והכשרה מצוקה לשינוי תקשורת תרבות חדשנות מורכבות הלקוח, הטכנולוגיה והאתר היעדר תהליך סטנדרטי 	<ul style="list-style-type: none"> מציאת פתרונות מפוצלים אינטגרציה ולמידה מוגבלת חולשות באחסון ועיבוד נתונים הכללה טכנולוגית ומדרגיות אתרים שיתוף ידע תכנון בנייה לא שלם תיאום ובקרת איכות חלשים 	<ul style="list-style-type: none"> עמימות דרישות תקשורת פערים שגיאות תכנון מקוטע תהליכי עבודה

טבלה 4 מראה שהחסומים הכלכליים והפיננסיים מתמקדים במידה רבה בפרשנות של המודלים העסקיים וצרכי המשאבים. הוכח כי סוגיות כלכליות ופיננסיות משפיעות על הפרודוקטיביות במהלך התכנון, הרכש, הייצור, הבנייה וניהול המתקנים.

טבלה 4: חסמים כלכליים ופיננסיים על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית

FM דיגיטלי / תאום / דיגיטלי	בנייה דיגיטלית / אתרים חכמים	ייצור / מכלול משנה מאופשר דיגיטלית	רכש מאופשר דיגיטלי	עיצוב מאופשר דיגיטלית
--	<ul style="list-style-type: none"> עלות טכנולוגיה עלות ניסויים זמן מסחרי לחצים להתמודדות בעיות רישוי יחסים קצרי טווח 	<ul style="list-style-type: none"> עלות לאימוץ רובוטיקה השקעה הון ראשונית גבוהה קנה מידה קטן של רוב החברות מעט משאבים לבדיקת מוצר רכש במחיר הנמוך ביותר עלות הכשרה גבוהה עלות רכישת מיומנויות מתקדמות יתרונות לגודל 	<ul style="list-style-type: none"> צריכת אנרגיה שערי חליפין טעות אנוש התקפה זדונית טווח זמן זמינות משאבים יכולות מוגדלות החזר ROI עלויות תוכנה ורישוי גבוהות 	<ul style="list-style-type: none"> עלות גבוהה של ציוד יתרונות לא ברורים חוסר הערכה עסקית מורכבות הסביבה המבוססת על אתר הבנייה גישה להון סיכונים פיננסיים תחזיות ביקוש אופטימיות מדי

טבלה 5 מציגה את החסמים הטכניים שמתרכזים ברובם בהגדרה ברורה של דרישות התהליך והמוצר. חסמים טכניים ביישום הנדסה דיגיטלית יתקיימו כמעט בוודאות בתכנון, רכש, ייצור, בנייה וניהול מתקנים. חסמים בקטגוריה זו קשורים במיוחד לידע על הזדמנויות ועל יכולות הגדרת דרישות מתקדמות וניהול חדשנות ובשלות טכנולוגית לאורך מחזור החיים של עסק.

טבלה 5: מחסומי טכנולוגיה טכניים על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית

FM דיגיטלי / תאום דיגיטלי	בנייה דיגיטלית / אתרים חכמים	ייצור / מכלול משנה מאופשר דיגיטלית	רכש מאופשר דיגיטלי	עיצוב מאופשר דיגיטלית
<ul style="list-style-type: none"> שילוב תרגום BIM, מעבר ותפעול חולשות בתחזוקת הנתונים 	<ul style="list-style-type: none"> ידע רובוטים-אוטומציה חוסר מחקר, בשלות ניהול מידע מהירות ייצור גיוון בגודל אצווה מגבלות חומרים סטנדרטיזציה שיפור מיומנות ספריות מוצרים תהליכים טכנולוגיים משולבים 	<ul style="list-style-type: none"> טכנולוגיות לא מוכחות / לא בשלות עובד לצד בטיחות רובוטיקה מורכבות משימות גבוהה חוסר סטנדרטיזציה הפרדת תכנון ובנייה 	<ul style="list-style-type: none"> היקף טכנולוגי דרישות קנה מידה ביקוש סכנת חבלה 	<ul style="list-style-type: none"> חוסר תקנים אי התאמה ארכיטקטורות התייחסות חוסר יכולת SME ניהול טכנולוגיה תשתית

טבלה 6 מציגה את הצורך במבני נתונים משותפים ובסטנדרטיזציה. חסמים בקטגוריה זו מתייחסים ספציפית לגישות שנקטו לשימוש בנתונים.

טבלה 6: מחסומי נתונים על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית

עיצוב מאופשר דיגיטלי	רכש מאופשר דיגיטלי	ייצור / מכלול משנה מאופשר דיגיטלי	בנייה דיגיטלית / אתרים חכמים	FM דיגיטלי / תאום דיגיטלי
<ul style="list-style-type: none"> חוסר שיתוף מידע פיתוח ארכיטקטורת תוכנה שיתוף נתונים על פני שרשרת האספקה ניהול ידע אבטחת מידע 	<ul style="list-style-type: none"> אימות נתונים יציבות קיבולת קישוריות יכולת פעולה הדדית תאימות נעילה 	<p>----</p>	<ul style="list-style-type: none"> שינוי נדרש בעסק מודלים של דיווח בתעשייה פרטיות תקנים לאומיים מבני נתונים לגיטימיות של הקשר שימוש אתגרי אינטגרציה 	<ul style="list-style-type: none"> איכות נתונים יכולת פעולה הדדית אוטומציה

כפי שניתן לראות בטבלה 7, מחסומי תרבות וניהול מתמקדים במידה רבה במה מניע אנשים ומה היכולות שלהם בתחומים הדיגיטליים.

טבלה 7: חסמי תרבות וניהול על פני קטגוריות הנדסה דיגיטלית

עיצוב מאופשר דיגיטלי	רכש מאופשר דיגיטלי	ייצור / מכלול משנה מאופשר דיגיטלי	בנייה דיגיטלית / אתרים חכמים	FM דיגיטלי / תאום דיגיטלי
<ul style="list-style-type: none"> ליקויים בהדרכה מיומנויות ניהול שרשרת אספקה יכולת טכנית נמוכה קישוריות מהירה ואמינה התנגדות לשינוי חוסר מודעות מוניטין שימוש תיאום ראייה קצרת טווח של אתיקה עמדות יריבות העצמה מנהיגות 	<ul style="list-style-type: none"> התנגדות לשינוי מיומנויות פחד מאובדן יתרון תחרותי מנהיגות תפקידים חדשים שימוש בנתונים בזמן אמת חוסר אינטגרציה 	<ul style="list-style-type: none"> סלידה משינויים תרבות ביטחון תעסוקתי תקשורת אמון סיכונים תכנון חומרים וזרימת עבודה אינטגרציה ושיתוף פעולה בין קבלני משנה מפוצלים 	<p>---</p>	<ul style="list-style-type: none"> הכשרה מומחיות שיתוף פעולה שיתוף מידע פתוח

1.4 הזדמנויות ויתרונות הנובעים מיישום הנדסה דיגיטלית

להלן כמה דוגמאות ליתרונות הנובעים מיישום הנדסה דיגיטלית ומהווים הזדמנויות לשיפור בארגונים ובהצלחה של פרויקטים:

- קיצור מהותי בזמני פיתוח מערכות, הוכחתם וכניסתם לשוק (Time to Market (TTM)).
- יכולות פיתוח והנדסה של מערכות מורכבות עם פחות תקלות ופגמים.
- יכולות ייצור והרכבה של מערכות ומוצרים מאד מורכבים ומסובכים באיכות טובה ולוח זמנים תחרותי.

- יכולת ניהול ובקרת תצורה ומידע של משפחות מוצרים מגוונים למגוון שווקים ולקוחות. לדוגמא חברת אימפקס: המטרה שלה לחולל מהפכה בתחום הדאטה הצרכני, תחום שבניגוד לשלבים אחרים בחיי המוצר – ייצור, שילוח וקמעונאות – סובל כיום ממחסור במידע שחיוני מאוד לחברות כדי להגדיל את המכירות על ידי ייעול השירות (דה מרקר, 2022).
- יכולת תחזוקה חזויה מרחוק ובזמן אמת, תוך צמצום עלויות תחזוקה וצמצום זמני השבתה מיותרים.
- פיתוח ויישום מודלים עסקיים חדשניים, תחרותיים והפצתם לשווקים חדשים.
- פיתוח, ייצור ואספקת מערכות ברות קיימא תוך עמידה בביצועים משופרים של קיימות.
- יכולות מפותחות לשימוש חוזר במערכות, תת מערכות ותהליכים.

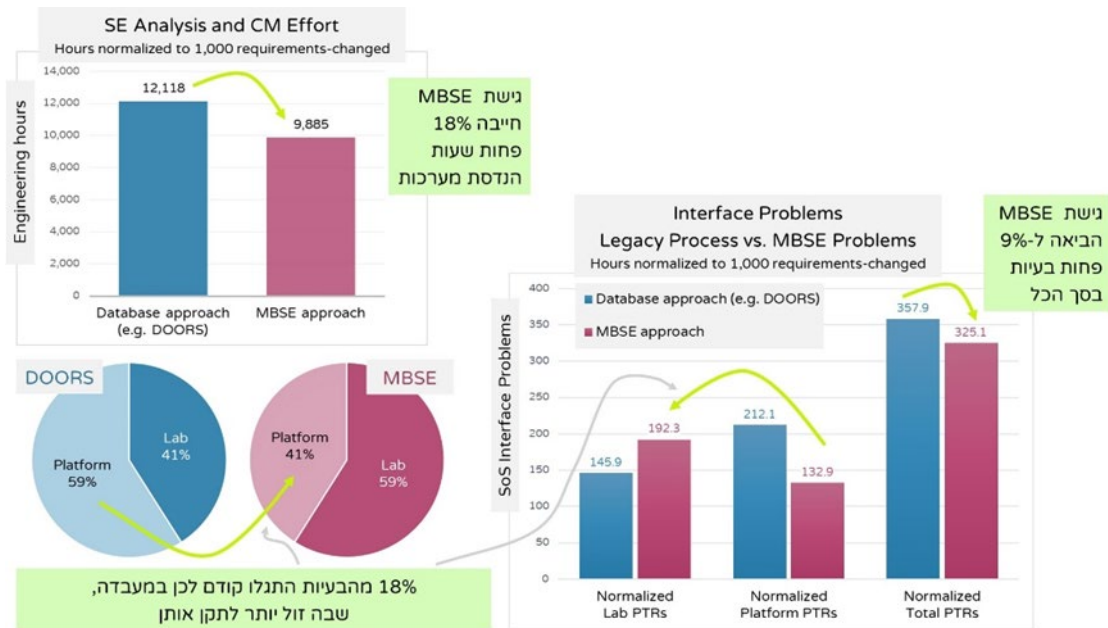
2. תועלות צפויות, מודגמות ומדווחות מאוריינות והנדסה דיגיטלית

ההזדמנויות המצוינות שתוארו בסעיף לעיל יוצרות תועלות וערכים מוספים ניהוליים, כלכליים, עסקיים, תחרותיים, תפעוליים ומבצעיים משמעותיים ברמת הפרויקטים, ברמת החברות וברמת שרשראות האספקה. אפשר להעריך כמותית ואיכותית את התועלות של סעיפים אלו, באם נשווה פיתוח, ייצור ואספקת של מערכות בשיטות מסורתיות לפיתוח, ייצור ואספקת המערכות בשיטות דיגיטליות. במאמר של Rogers & Mitchell (2021) חברת לוקהיד מרטין מוצגת ניתנת הערכת החזר על ההשקעה בהנדסה מערכת מבוססת מודלים (Model Based Systems Engineering (MBSE)) בפיתוח ואספקת מערך של מערכות (System of Systems) בדמות מערך צוללות מורכבות, כאשר ההשוואה היא לפיתוח מבוסס מסמכים. במסגרת זו הם תיארו את מרכיבי המעבר מפיתוח מבוסס מסמכים לפיתוח מבוסס MBSE, ניתחו את הישגים והממצאים בשינוי זה, הגדירו מדדים להערכת תועלות, והעריכו כמותית את המדדים ואת ה- Return of Investment (ROI). המאמר סוקר את עיקרי הממצאים של הערכת ROI אשר מתוכו עולים הממצאים העיקריים:

- הפרויקט שבוצע היה גדול יותר מפרויקט ההשוואה ב- 42% (נמדד בכמות היקף דרישות הממשקים).
- הפרויקט שבוצע צרך 16% יותר משאבי כ"א במחקר, שינויים נדרשים, עדכון דרישות ובקרת תצורה ביחס לפרויקט ההשוואה.
- הפרויקט שבוצע צרך 18% פחות משאבים בנייתו הנדסת מערכות ומאמצי ניהול תצורה.
- בפרויקט זה נתגלו 32% יותר טעויות ממשק לשינוי בדרישות, בשלבי האינטגרציה המעבדתית.
- בפרויקט זה נתגלו 37% פחות תקלות לשינוי בדרישות, בשלבי הבחינות המערכתיות של הפלטפורמה.
- הפחתה של 9% בהיקף הכשלים בממשקים המערכתיים.
- הפחתה של 18% בהיקף הכשלים שהתגלו בשלבים מאוחרים של הפרויקט

לפי ממצאים אלו בפרויקט החדש, שהיה יותר מורכב, השתמשו בצורה יעילה יותר במשאבי כוח האדם לפיתוח והנדסה (-18%). חלק גדול של התקלות בפיתוח התגלו בשלבים מוקדמים של הפרויקט (18%), וסך הבעיות בפיתוח ירד ב- 9% כפי שמוצג באיור 4.

איור 4: גישת ה-MBSE מספקת חיסכון כמותי משמעותי



מקור: עיבוד של מוסד נאמן לאיור 14 מתוך Rogers & Mitchell

בסיכום, הערכת החזר ההשקעה היה 3.28 מיליון דולר ב- 5 שנים, החזר של 10.62 מיליון דולר על השקעה של 3.28 מיליון דולר.

במאמר זה גם מדווח על תועלות איכותניות, כמו: שיפור התקשורת הטכנית בין צוותי הפרויקט ועם צוותי הלקוחות והמשתמשים ביישום תהליכים בפרויקט, הבנה טובה יותר של התהליכים בפרויקט ושל ביצועי המערכות של הפרויקט.

3. שיטות נבחרות בהנדסה דיגיטלית

3.1 תכן ג'נרטיבי ותכן להדפסות תלת ממד

מעצבי ומתכנני מוצר מתמודדים עם מחזורי תכן ועיצוב מהירים יותר ודרישות תכן ועיצוב תובעניות יותר. העיצובים שלהם צריכים להיות קלים יותר, זולים יותר, נראים טוב יותר ומותאמים יותר. אבל הכלים שהמהנדסים משתמשים בהם מציעים מעט עזרה. כלי (Computer Aided Design (CAD), למשל, מפרטים במדויק את הגיאומטריה אבל לא יכולים לעזור למהנדסים לחשוב על עיצובים חדשים.

בזמן עיבוד העיצובים, מהנדסים ומעצבים עומדים בפני האתגר של ייעול התהליכים הכרוכים בעיבוד במטרה להוזיל את עלות המוצר הסופי. למרות שהעיצוב המסורתי השיג הפחתה משמעותית עם הגעתה של טכנולוגיית הדפסת תלת מימד, עדיין יש לו עלויות זמני עיבוד גבוהים.

היתרון של תכן ועיצוב ג'נרטיבי הוא שניתן להשתמש בו להפחתת עלויות. זה נעשה בעיקר על ידי שימוש בפחות חומר, מכיוון שניתן לייעל צורה כך שלא יהיה קיים חומר במקום שבו אין צורך בו. עיצובים ג'נרטיביים, מטבעם, יוצרים גם צורות שעשויות להיחשב נעימות יותר, אורגניות או אפילו אומנותיות. החידוש והנדירות של צורות המיוצרות בעיצוב ג'נרטיבי שהן מפותלות, חטובות, אורגניות ולא סדירות או גבשושיות, ימשכו את מירב תשומת הלב.

Generative Design: שימוש באלגוריתמים חכמים, על מנת לייצר עשרות או מאות אלטרנטיבות תכן שונות⁷.

תכן ג'נרטיבי הוא טכנולוגיה בה מודלים תלת ממדיים שהמוצר/מערכת נוצרים ועוברים אופטימיזציה רב פרמטרית על ידי תוכנת מחשב.

המתכנן מגבש דרישות למודל בהיבטים השונים, כמו: אילוצי גיאומטריה ומשקל, עומסים סטטיים ודינמיים, אילוצי ודרישות חומרים, היבטי ייצוריות, תחזוקה ושימוש.

התוכנה מציעה מרחב פתרונות תכן אפשריים הנותנים מענה לדרישות והעומדים באילוצים המוגדרים.

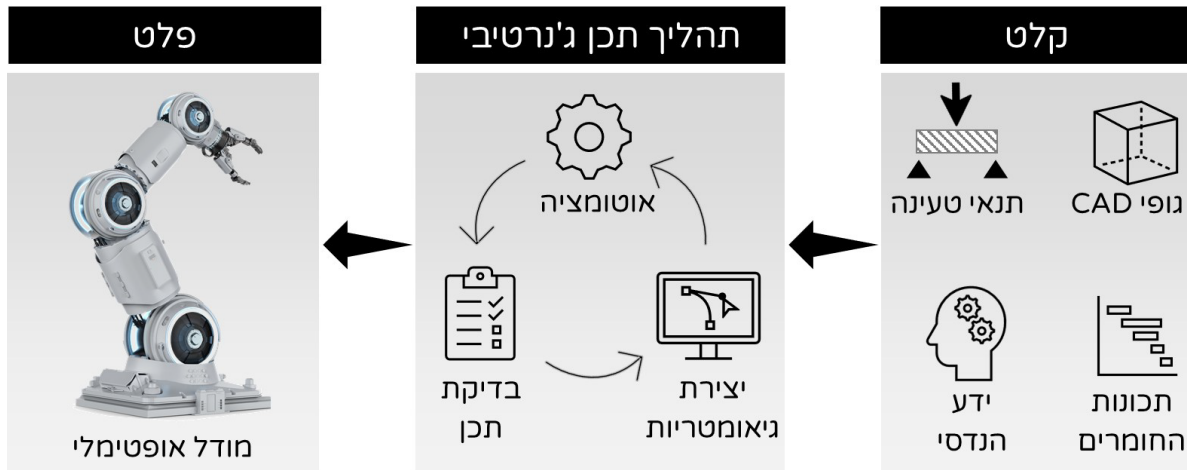
תכן ג'נרטיבי נעזר בבינה מלאכותית ומייצג כלי מצוין לייצור, עיצוב ובמיוחד, אופטימיזציה ויצירת אפשרויות עיצוב מרובות, כאשר מחפשים להפחית עלויות, זמן ושימוש בחומרים חלופיים. התכן הג'נרטיבי יוצר תהליכי עיצוב חדשים המאפשרים לנו להשיג עיצובים חדשניים ויעילים, שכן במקרים מסוימים נעשה שימוש בחומר רב מהנדרש כדי לעמוד בדרישות המבוקשות.

בכל תהליך פיתוח מוצר, שלב התכנון הרעיוני הוא שלב חשוב בתכנון הנדסי של מוצר. שלב זה הוא מורכב ונדרשת לו כמות גדולה של זמן.

המראה של המוצר מבוסס על צרכי הצרכן ליצירת מספר עיצובים. לכן, בהתבסס על דרישות העיצוב (כלומר פרמטרים עיצוביים, הטווח והאילוצים הגיאומטריים שלו) של המוצר, חשוב שתהיה מערכת שאמורה לספק מספר עיצובים/צורות אופטימליים מובהקים בחלל העיצוב, והשיטה ידועה כשיטת העיצוב הג'נרטיבית, איור 5.

⁷teamcad.co.il

איור 5: תיאור תהליך התכן הג'נרטיבי



מקור: עיבוד של מוסד נאמן מתוך nTopology⁸

3.1.1 יישומים

שיטת העיצוב והתכן הג'נרטיבי שימשה בתחילה בתחום העיצוב האדריכלי, אך כיום היא משמשת ביישומים שונים, כמו עיצוב והתכן התעשייתי, עיצוב תכשיטים, עיצוב מוצרי צריכה ועוד. יישומים ויתרונות:

- בשלב העיצוב והתכן הרעיוני או הראשוני מכיוון שהוא מספק מספר צורות עיצוב. לדוגמה, ניתן להשתמש בה בעיקר בעיצוב תכשיטים כדי ליצור מספר עיצובים בפחות מאמץ.
- ניתן לשלב אותה עם תוכנת Design for Manufacturing (DfM) כדי להבטיח ייצוריות.
- מאפשר למהנדס המתכנן לחקור רעיונות מרובים ולקבל החלטות מושכלות יותר בשלב התיכון המוקדם.
- מקטין את זמן התהליך, כיוון שהמעצב לא צריך לחקור את העיצוב השונה בשיטה מסורתית כמו ציור דו ממדי ושרטוט ידני וכו'.

התיכון הג'נרטיבי אינו מוציא את המתכן ממעגל התיכון וההנדסה - המתכן קובע את הדרישות והאילוצים מבחינת עומסים, גיאומטריה, משקל וזמינות חומרים ועוד. המתכן קובע ובוחר את הפתרונות המתאימים ביותר מבין אלו שהתוכנה מציעה.

בנוסף, התוכנה מסייעת למתכן לנתח את האילוצים והדרישות והשפעתם על הפתרונות המועדפים, כחלק בלתי נפרד של התכנסות התכן האופטימאלי. כמוכן, התוכנה מסייעת למתכן לבצע ניתוחים מפורטים, כולל סימולציות, של מאמצים מכניים ותרמיים, כחלק מהבטחת איכות ואמינות התכן.

תוכנת התכן הג'נרטיבי מאפשרת גם ליצור פתרונות שונים לשיטות יצור שונות כמו עיבוד שבבי, יציקה, והדפסה תלת ממד, דוגמאות ניתן לראות ב- [PTC, Engineering.com](https://www.ptc.com/en/engineering).

⁸ [nTopology](https://www.ntopology.com/)

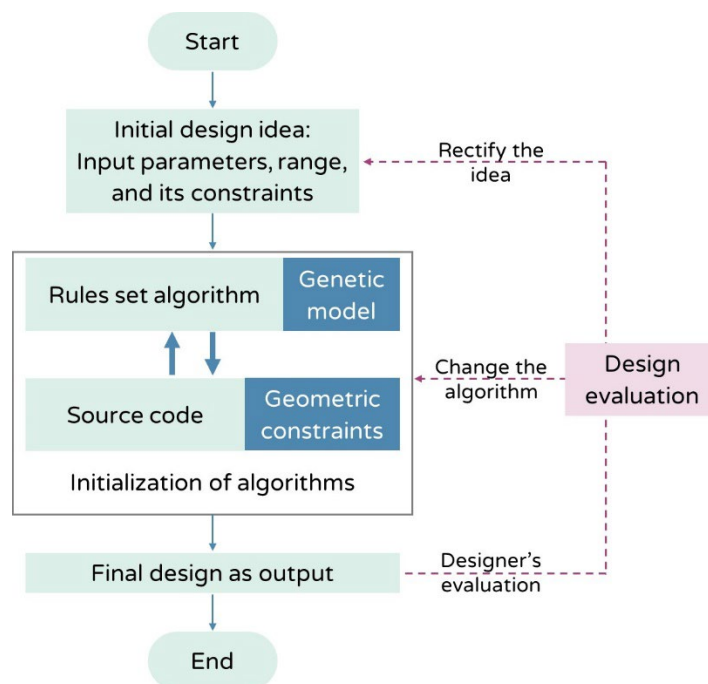
תכן ג'נרטיבי יוצר חלופות רבות לפתרונות תכן בזמן קצר יחסית, תוך מתן אפשרות למתכן להשוות את החלופות לפי קריטריונים שונים. זה כמובן מאפשר להציג מוצרים חדשים בשוק בזמנים קצרים יותר.

תוכנת תכן ג'נרטיבי כוללת גם בינה מלאכותית שמעשירה ומשפרת את תהליכי התכן, תהליכי יצירת החלופות והאופטימיזציה, תהליכי הניתוח ההנדסי, ותהליכי ניתוח האמינות.

ניתן לסווג את שיטת העיצוב הג'נרטיבי לחמש קטגוריות שונות שהן: אסטרטגיית חיפוש פרמטרית מוגבלת (constrained parametric search strategy), אלגוריתם אבולוציוני (evolutionary algorithm), חיפוש מקומי חוזר (iterated local search (ILS)), דקדוק צורות (shape grammar) וכלי אופטימיזציה של טופולוגיה (topology optimization tool):

- אסטרטגיית חיפוש פרמטרית מוגבלת (constrained parametric search strategy) - שיטה זו היא שיטה מונעת על ידי מעצבים והיא אינה מגבילה את הדמיון של המעצב, וזה היתרון העיקרי של טכניקה זו. באיור 6 מוצגת מערכת העיצוב הג'נרטיבי המבוססת על CAD שבה מודל גנטי ואילוצים גיאומטריים מחליפים את האלגוריתם וקוד המקור בהתאמה. מסיבה זו, מערכת העיצוב הג'נרטיבית המוצעת היא יותר ממוקדת מעצב.

איור 6: תרשים זרימה של תהליך עיצוב ג'נרטיבי



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל- לאיור 1 מתוך Generative Design Method (GDM) – A State of Art

- אלגוריתם אבולוציוני (evolutionary algorithm) -
- טכניקת דגימה (sampling-TLBO⁹ technique (S-TLBO)), היא טכניקת עיצוב יצירתית ליצירת כל אפשרויות עיצוב אפשריות עבור דגמי CAD במרחב עיצוב מוגבל ובלתי

⁹ Teaching Learning Based Optimization (TLBO)

מוגבל במסגרת אילוצי העיצוב שהוגדרו מראש, כך שמעצב או לקוח יכולים לחשוב על כל העיצובים האפשריים.

- שטח-מילוי- GDT (space-filling-GDT¹⁰ (Sf GDT)) ליצירת חלופה עיצובית אופטימלית עבור מודלים של CAD בחלל עיצוב במסגרת אילוצי עיצוב מוגדרים מראש.
- טכניקת SSA¹¹ design sampler (SSA-DS) כדי ליצור את מספר העיצובים היצירתיים במרחב העיצובי שנקבע מראש. זוהי טכניקת חיפוש אוטומטית המבוססת על חישוב מדומה (spatial simulated annealing (SSA)) ליצירת מספר N של עיצובים במרחב עיצוב מוגבל/לא מוגבל.
- חיפוש מקומי חוזר (iterated local search (ILS) – 3 שיטות):
- טכניקת דגימה – בחינה של החלופה העיצובית של דגמי ה-CAD במרחב עיצובי מוגבל וגבוה. ישנה מגבלה של טכניקת דגימה זו שהעיצובים המתקבלים לא תמיד מספקים את תכונת מילוי החלל מכיוון שהיא תלויה בתכנון הקלט.
- גישת דגימת צורות, חקירת הצורות השונות בחלל באילוצי מרחב הצורה בתוך מפרט מוצר מוגדר מראש. טכניקה זו מבוססת על שיטת עיצוב ג'נרטיבית המשתמשת באלגוריתם של מעקב אחר חלקיקים (particle tracing (PT)).
- מערכת דגימה ג'נרטיבית ליצירת מספר פרופילים דו-ממדיים בהתבסס על אילוצים נתונים בתוך שטח עיצוב מוגדר מראש. המערכת מציעה בעיה דו-ממדית (כלומר תמונה כקלט) המשתמשת באלגוריתם דגימה על ידי תכנות עבור שטח עיצוב.
- דקדוק צורות (shape grammar) – מערכת עיצוב ג'נרטיבית, המשתמשת ב-GDT המבוסס על דקדוק צורה (shape grammar) ובמערכת של כללים כדי לחקור עיצובים שונים; כללים אלו מבוססים על כללי שינוי צורה (שימוש בעיקר בעיצוב טבעות). גישה נוספת מציעה להשתמש בשיטה זו לדגמים של אופנוע הארלי-דיווידסון.
- כלי אופטימיזציה של טופולוגיה (topology optimization tool) - כלי עיצוב ג'נרטיבי (מכונה Dreamsketch tool) המבוסס על אופטימיזציה של טופולוגיה כדי לחקור את הצורות השונות באמצעות מיומנויות סקיצות דיגיטליות דו-ממדיות. אופטימיזציה נוספת של הטופולוגיה מתבצעת כדי לקבל צורה אופטימלית אפשרית. הדפסת תלת מימד מסוגלת לייצר צורות מורכבות ללא עלות נוספת למורכבות ולכן הדפסת תלת ממד היא הטכנולוגיה הטובה ביותר כדי להפיק את המרב מעיצובים שעברו אופטימיזציה טופולוגית.

3.1.2 תכן ועיצוב ג'נרטיבי וייצור בהוספה (Generative Design & Additive Manufacturing)

תכן ועיצוב ג'נרטיבי מאפשר פיתוח של מוצרים מודפסים בתלת ממד בעלי ביצועים גבוהים והוא כמעט הכרחי עבור כל זרימת עבודה של Design For Additive Manufacturing (DfAM).

¹⁰ Generative Design Technique (GDT)

¹¹ Spatial Simulated Annealing (SSA)

אחד היתרונות המרכזיים של הדפסת תלת ממד תעשייתית הוא שהיא מעניקה למהנדסים את היכולת לייצר חלקים מורכבים ובעלי ביצועים גבוהים, שבלתי אפשרי או יקר באופן בלתי אפשרי לייצור באמצעות טכניקות מסורתיות.

מודל גיאומטריות מורכבות ומוטבות אלה באופן ידני בתוכנת CAD מסורתית היא משימה כמעט בלתי אפשרית. ערכת הכלים הדיגיטלית של עיצוב ג'נרטיבי מאפשרת למהנדסים לנהל את המורכבות של ייצור תוסף ולהשתמש בה לטובתם.

לדעתו של ג'ף אולסן¹², נשיא [Hiller Measurements](#), עיצוב ג'נרטיבי וייצור בהוספה (AM) הוא שילוב אידיאלי המאפשר לשלב אנכית תהליכים שנעשו בעבר במיקור חוץ, הכוללים חברות הדפסת תלת ממד לפי דרישה. זה גם מאפשר איטרציה של עיצוב באמצעות ניסוי וטעיה - או, "גישת ההדפס והשבירה" (the print-and break approach).

ב-Hiller Measurements העמידו את העיצוב הג'נרטיבי במבחן על ידי תכנון מחזיק מתג ממסר בתדר רדיו מורכב מבחינה מבנית, המשמש בפעולות טלקום אלחוטיות. העיצוב האידיאלי חייב להכיל מספר מתגי ממסר עם חיבורי הכבלים הקצרים ביותר ביניהם. יש למקם את הרכיבים בכיוון הטוב ביותר עם חופש גדול יותר, במקום לפרוס אותם בצורה אורתוגונלית על מגשי אלומיניום כפי שנעשה בעבר. עם המעבר לעיצוב ג'נרטיבי בתוספת ייצור בהוספה, Hiller Measurements שיפרה את ביצועי ה-RF, הפחיתה את כמות החלקים ב-90% והורידה את זמני העיצוב עד הגימור בפקטור של 10. עיצוב הדפסה תלת מימד בודד החליף למעלה מ-10 לוחות אלומיניום ומנגנוני הרכבה עבור ספקי כוח, מעגלים מודפסים ורכיבים אחרים.

עם עיצוב ג'נרטיבי, "זה לא התפקיד שלך לעצב את המוצר יותר. התפקיד שלך הוא לתכנן את האילוצים ולאפשר לתוכנה לעצב", אומר אולסן.

כדי לעזור למשתמשים פוטנציאליים לקבוע אם עיצוב ג'נרטיבי מתאים לפרויקטים שלהם, ASSESS¹³ פרסמה רשימת בדיקה של יכולות מפתח. הארגון מציינ כי אלגוריתמי העיצוב הג'נרטיביים צריכים לשקול "גורמים מתחומים רבים, כולל ביצועים תפעוליים, משקל/מסה, ייצור, הרכבה או בנייה, שימושיות, אסתטיקה, ארגונומיה ועלות".

השילוב של תוכנת עיצוב ג'נרטיבית וטכנולוגיות AM מתגלה כבחירה משמעותית לאסטרטגיות lightweighting ואיחוד חלקים. יונדאי מוטור מעצב סוג חדש של רכבי ניידות אולטימטיביים חשמליים (UMV) במטרה להפחית 500 ק"ג מכלי רכב בעיצוב קונבנציונלי בגודל דומה. עם יעדים ספציפיים כאלה, אסטרטגיית lightweighting מהווה בסיס הכרחי, וכלי עיצוב יצירתיים בשילוב עם טכנולוגיות ייצור בהוספה (AM) הפכו למרכיב חשוב שלא יסולא בפז. צוות יונדאי, כמו אינספור ארגוני הנדסה על פני מגזרי התעשייה, נותן עדיפות לאסטרטגיות lightweighting כדרך לצמצם עלויות, לשפר את ביצועי המוצר ולפשט את הייצור באמצעות איחוד חלקים. תוכנת תכן ג'נרטיבי, הידועה ביכולתה לגבש צורות אורגניות בהשראת הטבע, הוא כלי הכרחי לתיכון חלקים קלים או לתיכון מחדש של רכיבים קיימים במטרה להפחית מסה וחומרים ללא השפעה על שלמות מבנית¹⁴.

¹² <https://www.digitalengineering247.com/download/digital-engineering-april-2022>

¹³ ASSESS Initiative on Generative Design: ASSESSInitiative.com/themes/generative

¹⁴ https://www.digitalengineering247.com/article/generative-design-a-heavyweight-for-lightweighting-with-additive?oly_enc_id=3570G3199845J9H

אסטרטגיה זו רלוונטית גם לאיחוד חלקים וכתוצאה להפחתת משקל. לאפשרות להמציא צורות ייחודיות המשלבות באופן מלא מספר חלקים במכלול אחד יש השלכות עצומות להפחתת משקל, עלויות ועוד, לדברי אבי רייכנטל, מייסד, מנכ"ל ויו"ר XponentialWorks. XponentialWorks בשיתוף פעולה עם Arcimoto, סטארט-אפ שמפתח קו של רכבי עזר קלים וחשמליים (FUVs), מתנסה בטכנולוגיות שונות של הדפסת תלת ממד ובתוכנת העיצוב הג'נרטיבית CogniCAD מבית Paramatters, כדי להפחית את משקל הרכב הכולל עם רכיבים קלים. עד כה, הצוות הפחית את המשקל של זרוע דנדאה אחורית ב-34%, זרוע שליטה עליונה ב-52% וזרוע בלם ב-49%, אומר רייכנטל.

אפילו ללא AM כמדד התפוקה האולטימטיבי, לתכן הג'נרטיבי יכולה להיות השפעה גדולה על הפחתת משקל. התוכנה הופכת את תהליך האיטרציה לאוטומטי - במקום שאדם יקבל החלטות באופן ידני היכן להסיר או להוסיף חומר, האלגוריתם מבצע אוטומטית את התהליך, בהתבסס על פרמטרי קלט ואילוצים ובנייה ואיטרציה של התוצאות.

עם זאת, מהנדסים צריכים להבין שרכות מהצורות הקלות שמייצרים כלי עיצוב ג'נרטיביים אינן בהכרח מועמדות להדפסת תלת ממד ישירות מהתהליך - לעתים קרובות, הם משמשים כדי להזניק את התהליך על ידי מתן תובנה לחידוד ופיתוח רעיונות תוך שימוש בידע הארגוני שלהם.

3.2 הנדסת מערכות מבוססת מודלים (Model Based Systems Engineering) (MBSE)

לפני למעלה משני עשורים גובשו תהליכי תכן, הנדסה וייצור מוצרים וחלקים באמצעות מחשב - CAD/CAM.

בתהליך זה נוצר מודל של המוצר לצורך אנליזות הנדסיות מסוגים שונים - גיאומטריה, חוזק, טרמית, ועוד. כמו כן המודל משמש ליצור החלקים במכונות CNC. בשנים האחרונות קובץ המודלים משמש גם ליצירת תיקי ייצור ותחזוקה של המוצר.

גם בהנדסת מערכות גובשה הפרדיגמה של הנדסת מערכות מבוססת מודלים (MBSE), המשמשת לניהול ובקרת תהליכי הנדסת מערכות לאורך חיי המוצר, כמו: ניתוח והנדסת דרישות, תכן ארכיטקטורות, ניהול והנדסת ממשקים, הנדסת אינטגרציות, תכנון ניסויים לתיקוף והוכחת המערכות, ניתוח והנדסת תרחישים תפעוליים, עסקיים ומשימתיים, תכן ותחזוקת המערכת, ועוד. בנוסף, ה-MBSE כולל את המידע והידע על המערכת כמקור הסמכותי של האמת - The Authoritative Source of Truth (ASoT).

מערכת המודלים הזו נותנת תועלות חשובות למנהלי פרויקטי הפיתוח, מהנדסי המערכות, מפתחים ובודקים כמו: שיפור שיתוף הפעולה בין כל הגורמים המעורבים במערכת ובפיתוחה על ידי שיתוף במידע ובנתונים, שיפור התקשורת בין כל בעלי העניין, שיפור היכולת להתמודד עם סיבוכיות המערכות, שיפור יכולת הסימולציה והוויזואליזציה של התנהגות המערכות בתנאים שונים, וכבסיס מידע להפעלת המערכת ותמיכה בכשלים.

יישום ה-MBSE נעשה בפועל על ידי יישום שפה מתודולוגית מערכתית סטנדרטית כגון SYSML ושפות נוספות, ופלטפורמות תוכנה שונות המספקות על ידי ספקי תוכנות מידול הנדסיות.

למרות החשיבות והתועלות של MBSE, היישום בפועל בחברות ובפרויקטים התעכב לאורך השנים. רק בשנים האחרונות יש יותר יישומים מוצלחים שמוכיחים בפועל את התועלות ואת ההחזר על ההשקעה. בישראל, התהליך הזה הוא רק בתחילתו, ומעט חברות מיישמות בפועל MBSE. בתקופה האחרונה עקב התפתחות המגמות של הנדסה דיגיטלית (Digital Engineering - DE), יש יותר התחלות של MBSE בחברות ישראליות. הכרזתו של משרד ההגנה האמריקאי (ה-DoD) על ארכיטקטורה סטנדרטית ליישום דיגיטלי הנתמכת ע"י סט של מודלים עבור כל הדיסציפלינות, דוחפת יצרנים רבים, הפועלים בתחום הביטחוני, לגבש תפיסת יישום כזו. תעשיית הרכב, ובעיקר הרכבים המודרניים, נכנסת גם היא לתחום, שוב עקב סט סטנדרטים המחייבים זאת.

3.3 הנדסה מבוססת נתונים/דאטה

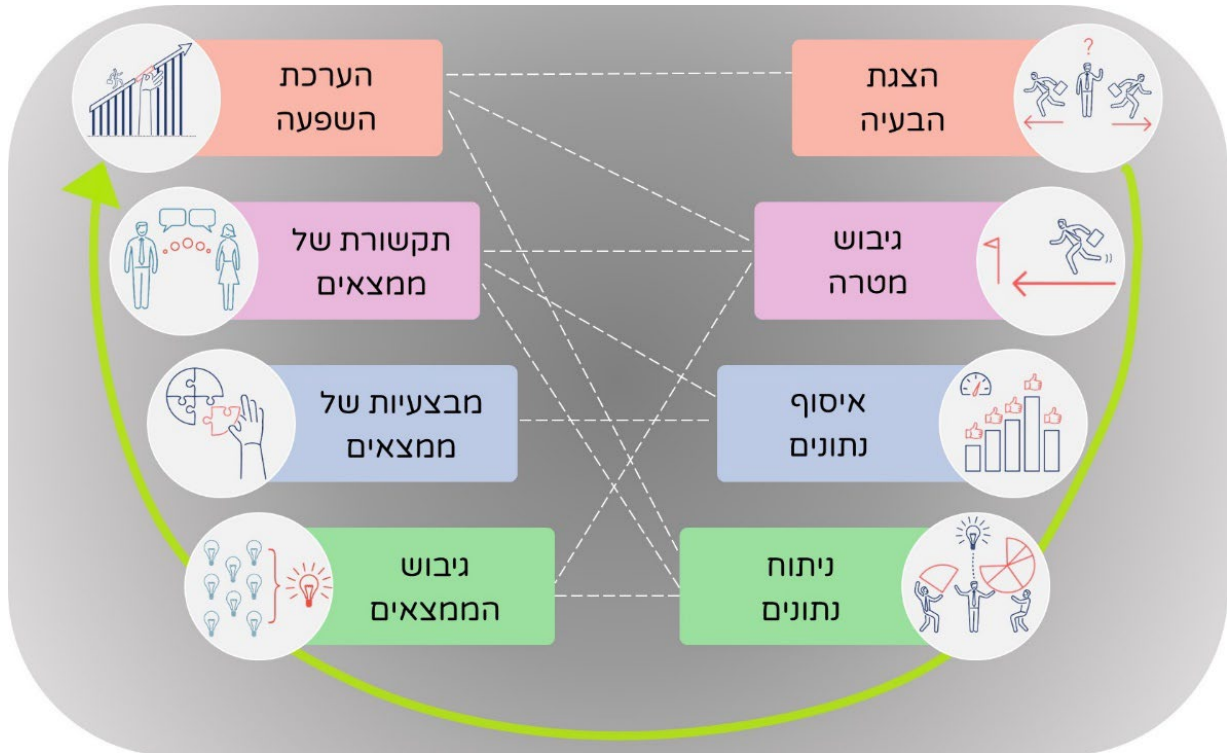
בעידן הנוכחי מקובל להתייחס לנתונים כנפט החדש או כזהב, ומבססים תהליכים חשובים והחלטות חיוניות על נתונים ומידע. גם דיסציפלינת ההנדסה מונעת היום על בסיס נתונים, לביצוע הערכות וחישובים הנדסיים, לקבלת החלטות הנדסיות וייצוריות, ולהוכחת תכן הנדסי בהתבסס על ניתוח נתונים מניסויים וסימולציות.

בהקשר זה נכון להתייחס לתכונות הרצויות של הנתונים (Kenett and Redman, 2019):

- רצוי להביא נתונים מגוונים המייצגים נקודות מבט שונות
- כדאי להשתמש בנתונים המעמיקים את ההבנה בבעיות ההנדסיות ובשאלות העסקיות
- נכון לפתח הערכה לשונות של הדאטה ושל ההשפעות הסביבתיות
- יש לדון בכובד ראש באי וודאיות בנתונים, בתנאי הסביבה ובקבלת החלטות שיכולות להביא לטעויות
- נכון להשקיע ביצירת דאטה ונתונים איכותיים על ידי השקעה במקורות מידע אמינים

בנוסף, נכון להתייחס לשילוב נכון של הנתונים במחזור החיים של ההנדסה וגיבוש הפתרון הנדסי כפי שמודגם באיור 7. שילוב נתונים בהבנת ואיתור הבעיה, בגיבוש המטרות, איסוף הנתונים, ניתוח הנתונים, גיבוש הממצאים והפיכתם ליישומיים, תקשור הממצאים עם בעלי העניין והערכת ההשפעות.

איור 7: תפיסת מחזור החיים של ניתוח נתונים, בהקשר של המערכת האקולוגית הארגונית בה מתרחשת העבודה



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל- Kenett & Redman (2019), איור 1.1

יש לציין ולהדגיש שבתקופה המודרנית, ברוב הבעיות משולבים נתונים רבים שנקראים נתוני עתק (Big Data) שמחייבים כלי ניתוח, אנליזה וחישוב דיגיטאליים חכמים ומתוחכמים ורמת אוריינות דיגיטאלית גבוהה של המהנדסים ומנתחי המידע. לאחרונה הוציאו (Kenett et al., 2022) ספר חדש הכולל תיאור ותרגול שיטות סטטיסטיות מתקדמות המנתחות נתוני עתק תוך שימוש בשפת התכנות פייתון.

3.4 תאום דיגיטלי (Digital Twin)

המושג תאום דיגיטלי התפתח בעשור האחרון במסגרת התקדמות המהפכה התעשייתית הרביעית, בה מתקיימים בו זמנית הייצוגיים הפיסיים והווירטואליים של מערכת, תהליך, רכיב ועוד. הייצוג הפיסי מתאר את ההתנהגות בפועל של המערכת/תהליך/רכיב באמצעות תמונות, מדידות ונתונים פיזיים. הייצוג הווירטואלי של המערכת/תהליך/רכיב מתואר על ידי מודל או סימולציה מבוססת מודל. הכוונה היא שהתאום הדיגיטלי קיים באופן מתמיד ולאורך זמן כדי לייצג את המערכת/תהליך/רכיב לאורך מחזור החיים ותוך מעקב אחרי השינויים במערכת/תהליך/רכיב.

התאום הדיגיטלי מאפשר לאתר אנומליות במערכת/תהליך/רכיב על ידי השוואה רציפה ומתמידה בין הייצוג הפיזי והייצוג הווירטואלי, אם עקב תקלות ואם עקב שינויים לא צפויים. התאום הדיגיטלי גם מאפשר הדרכות, הכשרות ואימונים על ביצועי המערכת/תהליך/רכיב ו/או תפעול שלהם במצבים שונים וסביבות שונות, תוך כדי שימוש בסימולציות של המערכת/תהליך/רכיב בעת ההדרכה ואימון.

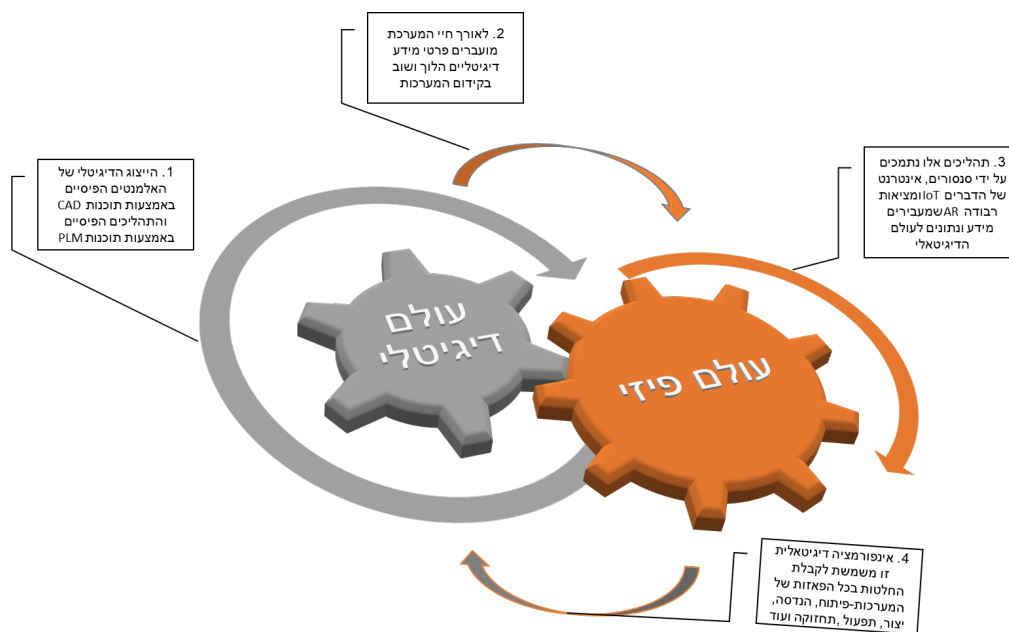
לפי תחזית של BCC Research (מרץ 2022) השוק העולמי של תאומים דיגיטליים צפוי לגדול מ-4.9 מיליארד דולר בשנת 2021 לכ-50.2 מיליארד דולר עד 2026, בקצב צמיחה שנתי (CAGR) של 59.0% בשנים 2021-2026.

בשימוש הקצה של תעשיית הרכב והתחבורה השוק העולמי צפוי לגדול מ-1.2 מיליארד דולר ב-2021 ל-11.4 מיליארד דולר עד 2026, ב-CAGR של 56.3% בשנים 2021-2026.

בשימוש הקצה של תעשיית הבריאות השוק העולמי צפוי לגדול מ-521.4 מיליון דולר בשנת 2021 ל-5.9 מיליארד דולר עד 2026, ב-CAGR של 62.4% בשנים 2021-2026.

בחלק מהחברות מכונה גישה זו סיב דיגיטאלי (Digital Thread) כדי לציין את הקישוריות הדיגיטלית בין הייצוגים הפיסיים והווירטואליים לאורך כל מחזור חיי המערכת, ולרוחב כל מרכיבי המערכת. לפי חברת PTC לכלי הנדסה דיגיטאלית¹⁵, גישת הסיב הדיגיטאלי (איור 8) מקשרת בין (1) הייצוג הדיגיטלי של האלמנטים הפיסיים באמצעות תוכנות CAD והתהליכים הפיסיים באמצעות תוכנות PLM, (2) לאורך חיי המערכת מועברים פרטי מידע דיגיטליים הלוך ושוב בקידום המערכות, (3) תהליכים אלו נתמכים על ידי חישנים, אינטרנט של הדברים IoT ומציאות רבודה AR שמעבירים מידע ונתונים לעולם הדיגיטאלי, (4) אינפורמציה דיגיטאלית זו משמשת לקבלת החלטות בכל הפאזות של המערכות-פיתוח, הנדסה, יצור, תפעול, תחזוקה ועוד.

איור 8: גישת הסיב הדיגיטלי



מקור: עיבוד של מוסד נאמן ל-⁶What is Digital Thread?

פירוט מגוון יישומים של תאום דיגיטאלי - בפיתוח, הנדסה, בבקרת יצור, במעקב תקלות ואנומליות ביצור מוצרים, וכן שימוש בתאום דיגיטאלי בהדרכות והכשרות - ניתן במאמר של Kenett & Bortman (2022).

¹⁵ <https://www.ptc.com/en/blogs/corporate/what-is-a-digital-thread>

להרחבה מומלץ לצפות בוובינר בנושא: Topics on Digital twins: Hybrid modeling, befitting cross validation and dynamical systems של פרופ' רון קנת.¹⁶

עקרונות לתכן ויישום מוצלח של תאום דיגיטלי¹⁷:

- תכן בגישה אינטרדיסציפלינרית.
- הגדרה ברורה של המטרות העסקיות.
- הגדרה ברורה של הדרישות הקלסיות - ביצועים, עלויות, זמן, איכות ועוד.
- יישום נכון של בינה מלאכותית ושימוש בדאטה, תוך דאגה לאיכות הנתונים, פרטיות, ביטחון, מובנות ואתיקה.
- הבנה מעמיקה בתחום בו מקימים את התאום הדיגיטלי - מכניקה, אלקטרוניקה, תקשורת, פיזיקה, תחבורה ועוד.
- קיום תשתיות טכנולוגיות טובות ליישום תאום דיגיטלי, כמו: MATLAB, ANSYS, AZURE, NVIDIA, Digital Twin ,

היתרונות הכמותיים הגלומים ביישום תאום דיגיטלי לפי מקינזי (Brossard et al., 2022) הם גידול של 10% בהכנסות, האצת זמן לשוק ב 50% ושיפור איכות ב- 25%. היתרונות האיכותיים הגלומים ביישום תאום דיגיטלי הם:

- בהנדסה - תצורה דיגיטלית של המוצר בשלבים מוקדמים של הפיתוח, דגמים דיגיטליים לניסויי פיתוח והדגמות, יצירת סביבה דיגיטלית למהנדסים.
- בייצור - חסינות של שרשרת האספקה דרך ניהול תצורה של הנתונים הדיגיטליים, ניהול משווא של האיכות, וצמצום תקלות וכשלים.
- בשירותים – אופטימיזציה תהליכי שירות במעגל סגור, שיפור מוצרי הדור הבא.

לטווח ארוך יותר, מימוש ההבטחה המלאה של תאומים דיגיטליים עשוי לדרוש שילוב מערכות ונתונים על פני מערכות אקולוגיות שלמות. יצירת הדמיה דיגיטלית של מחזור החיים המלא של הלקוח או של שרשרת אספקה הכוללת לא רק ספקים מהשורה הראשונה אלא את הספקים שלהם, עשויה לספק תמונת מאקרו עשירה בתובנות של הפעילות, אך היא תדרוש גם שילוב של ישויות חיצוניות במערכות אקולוגיות דיגיטליות פנימיות. כיום, מעט ארגונים מרגישים בנוח עם אינטגרציה חיצונית מעבר לחיבורים מנקודה לנקודה. התגברות על חששות אלה יכול להיות אתגר מתמשך, אבל בסופו של דבר שווה את המאמץ. בעתיד, צפוי לראות חברות משתמשות בכלוקצייין כדי לפרק ארובות (סילוס) של אינפורמציה, ולאחר מכן לאמת ולהזין את המידע הזה לסימולציות תאומים דיגיטליים. זה יכול לשחרר נתונים שלא היו נגישים בעבר בנפחים מספיקים כדי להפוך סימולציות למפורטות, דינמיות ובעלות פוטנציאל ערך מאי פעם (דלויט 2020).

¹⁶ https://mox.polimi.it/mox-seminars/?id_evento=2120

¹⁷ על פי הרצאתו של איתי דטנר "Design Principles for Digital Twins" בכנס כנרת לתוכנה ונתונים שהתקיים ב- 7.9.22.

3.5 תפקיד המידול והסימולציות בפיתוח מערכות מסובכות

בפרק זה ברצוננו להבהיר מהן מערכות מסובכות ולהעביר את המסר כי העבודה בסימולציות היא קריטית במענה לתכן יעיל של מערכות אלה. תכנון וניהול הנכון של כל מרכיבי הסימולציות במהלך הפרויקט מהווים את המפתח להצלחת הפרויקט המסובך. כמו כן נראה כיצד ניתן להשתמש באותו המחשב המאפשר את תכנון של מערכות מסובכות גם ככלי לבניית תהליכי פיתוח מבוססי סימולציות להעלאת רמת הבדיקות של המערכת.

יכולות המחשב המתקדמות מאפשרות לכל הדיסציפלינות ההנדסיות לבצע תכן באמצעות מחשב (Computer Aided Design – CAD). לכל דיסציפלינה יש את כלי התכן שלה. לדוגמה, לאנשי התכן המיכני יש את ה-Pro-E וה-SolidWorks, לאנשי התכן האלקטרוני יש את ה-Mentor וה-Cadence, לאנשי התוכנה יש את ה-Rhapsody, לאנשי האלגוריתמים יש את ה-Matlab ולמהנדסי המערכת יש את ה-SysML. יכולות אלה מאפשרות לתכנן מערכות מרובות מרכיבים (מכניים, אלקטרוניים,...), מרובות תהליכים, מרובות מצבים, מרובות אלגוריתמים, מרובות דיסציפלינות, מרובות פיסיקות (Multi-Physics) ומעל הכל מרובות ממשקים (בין פיסיקות, בין דיסציפלינות ובין כלל המפתחים). ידוע שרוב התקלות בפרויקט נובעות מאי מושלמות בממשקים.

פיתוח באמצעות מחשב הוא אם כן המפתח להיווצרותן של מערכות מסובכות המורכבות מחלקים רבים המחוברים זה לזה בצימודים הדוקים ו/או רופפים, המקיימים בדרך כלל אינטראקציה זה עם זה בצורה לא ליניארית. מערכות אלו מאופיינות בין היתר בקושי להבנתן ולניבוי התנהגותן, בקושי בהשגת איתנות (רובוסטיות), בקיומם של שחקנים רבים הנדרשים לאשר את המערכת ובצורך בריבוי ניסויים ללימוד המערכת ולתיקוף המודלים.

הפיכתו של המחשב לכלי תכן מוביל מאפשר את יצירתו של מודל ספרתי כחלק אינהרנטי בתכן. המודלים מפותחים ברמות שונות של הפשטה, החל ממודלים מפורטים הלוכדים את ההתנהגות הכוללת של המערכת ועד למודלים מפורטים המייצגים את ההתנהגות המפורטת יותר של רכיבים או תת-מערכות. השימוש במודלים מאפשר למתכננים לבחון אפשרויות תכן שונות, ולאמת את התכן מול הדרישות לפני המסירה ללקוח/למשתמש.

שילוב קריטיים באישור תכן המוצר הם שלב האנליזה ושלב האימות והתיקוף. כל כלי האנליזה, שאינם ניסויים בפועל, הם כלים ספרתיים (אנליזות חזק, חום, זרימה, אלקטרומגנטיות,...) השייכים למשפחת ה-CAA (Computer Aided Analysis). המפתח לתהליך פיתוח יעיל הוא שיפור הממשקים וההיזון החוזר בין כלי ה-CAD וה-CAA. הבאת סביבת התכן וסביבת האנליזה לסביבה אחודה למימוש הנדסה אינטגרטיבית ממומשת מחשב, המוכרת בשם CAE (Computer Aided Engineering), תאפשר היזון חוזר מהיר ויעיל בין האנליזה לבין התכן ובכך תיעל את התכן ההנדסי בל"ז ובעלות. כל תכן הנדסי המושתת על מודלים מכונה בשם תכן מבוסס מודלים (Model Based Design - MBD). ככל שהצימוד בין כלי התכן, האנליזה והאימות/תיקוף הדוקים יותר יעילות ה-MBD תהיה גבוהה יותר. עבודה בסימולציה בראייה מערכתית מאפשרת שילוב יעיל יותר של מימוש ה-MBD.

ברצוננו להעלות את חשיבות הגישה של מידול וסימולציה בתהליכי פיתוח בעולם התכן של מערכות מסובכות. כל מודל הוא ייצוג פיסי, מתימטי או לוגי של מערכת, ישות, תופעה או תהליך. על פי ההגדרה מודל של מערכת יכול להיות גם דגם פיסי כדוגמת, מודל מוקטן של גוף מוטס לניסוי במנהרת אווירודינמיקה, בובות פלסטיק לניסויי התנגשות של רכבים ועוד. הסימולציה היא שיטה לשימוש במודל (ניסוי) במנהרת רוח על מודל אווירודינמי בתנאי טיסה היא סימולציה, ניסוי התנגשות של מודל פיסי של

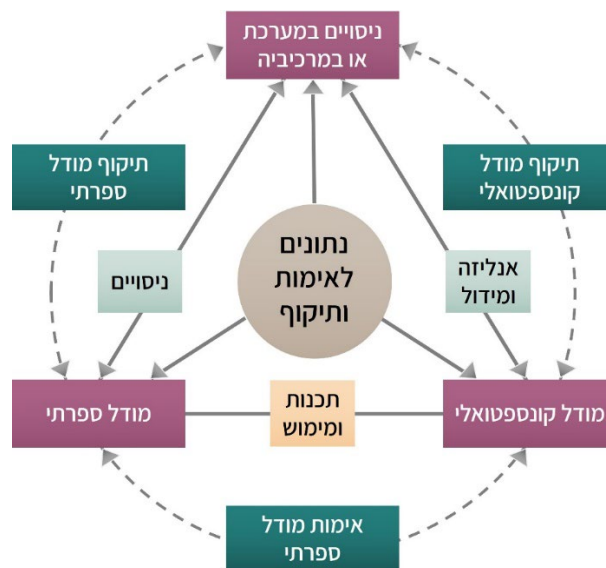
רכב עם בובות היא סימולציה, חישובים הסתברותיים לדיוק נחיתה אוטונומית על הירח היא סימולציה) כשמידול וסימולציה היא הדיסציפלינה המקצועית האחראית לפיתוח ולשימוש במודלים ובסימולציות. מתוך האמור לעיל מודלים וסימולציות מייצגים משהו מהעולם האמיתי, אך כאמור מעלה, הם אינם מחויבים להיות מבוססי מחשב. המודל מהווה ייצוג סטטי של מרכיב במערכת והסימולציה מהווה ייצוג דינמי של המערכת כולל הממשקים בין מרכיביה. מידול וסימולציה הם תהליכים מבוססי מחשב המשמשים ליצירת מודלים וסימולציות בסביבת המחשב.

סימולציה ספרתית היא כאמור חיקוי הפעולה לאורך זמן של תהליך או של מערכת בעולם האמיתי. הסימולציה מאפשרת לחוקרים, למתכננים ולאנליסטים ללמוד ולנתח את התנהגותה של המערכת ולהעריך אסטרטגיות ואפשרויות תכן שונות מבלי לבנות את המערכת הפיזית עצמה. זהו כלי רב עוצמה שיכול לעזור לשפר את הבנתנו את המוצר האמיתי ולקבל החלטות טובות יותר בכך שהוא מאפשר לנו להתנסות בתרחישים שונים, לנתח את התוצאות שלהם ולחזות את התנהגותן. בעולם ההנדסה תכן באמצעות סימולציה מאפשר בין היתר תכן ארכיטקטורה מערכתית, אנליזת ביצועים, אוולואציה טכנולוגית, תמיכה בגיבוש דרישות, תמיכה בבניית מערכות אימון, תמיכה בניהול סיכונים ותמיכה בתהליכי האימות והתיקוף של הפרויקט. ניהול יעיל של המידול והסימולציה במערכות מסוגים שונים מאפשר אספקת נתונים למקבלי ההחלטות בכל שלבי הפרויקט, הקטנת עלויות והורדת סיכונים לאורך כל שלבי הפרויקט. הסימולציה מהווה תאום ספרתי של המערכת האמיתית מאפשרת מימוש מספר רב ביותר של ניסויים 'ספרתיים' לגילוי תקלות החל מהשלבים הראשונים של הפיתוח.

על מנת שהסימולציה תהא סגורה על עצמה ותדע לדמות את התנהגות המערכת המפותחת, יש לממש בסימולציה גם מודלים לדימוי סביבת העבודה בה המערכת עובדת. לדוגמא, אם המערכת משלבת חיישן ו/או מפעיל שאינם חלק מהמערכת המפותחת, המתקשרים בתקשורת סטנדרטית אל המערכת ושהתנהגותם הפיסיקאלית פשוטה נדרש לדמות למערכת את הפיסיקה של החיישנים עם התקשורת הרלוונטית למערכת המפותחת.

פיתוח הסימולציה כמרכיב חשוב של הפרויקט דורש מימוש הן של תהליכי אימות והן של תהליכי תיקוף. סכמת הפיתוח הרעיונית מוצגת באיור 9.

איור 9: תהליך הפיתוח המלא של סימולציה ספרתית



סימולציה היברידית היא סביבת עבודה בה חלקים מסוימים של המערכת מיוצגים פיזית, בעוד שאחרים מדומים באמצעות מודלים ממוחשבים. תצורה זו של סימולציה מאפשרת ייצוג ריאליסטי יותר של המערכת, שכן היא משלבת הן את ההתנהגות בעולם האמיתי של רכיבים פיזיים והן את הגמישות והדיוק של מודלים ממוחשבים. הסימולציה ההיברידית הינה שלב בדרך מהמודל הסימולטיבי המלא, עליו עובדים המפתחים, אל המוצר הסופי, הנמסר למשתמש. לדוגמא, מערכת המשלבת אלגוריתמים הפועלים מול חיישנים ומפעילים תשלב הסימולציה ההיברידית את האלגוריתמים הממומשים על המחשב או המעבד האמיתי מול דימויים ספרתיים של החיישנים והמפעילים. יש לציין שהמערכת המדמה נדרשת לסנכרן גם בזמן וגם בהתנהגות הפיסיקאלית בין המרכיבים האמיתיים לאלו המדומים. את שני החלקים, זה הממומש וזה המדומה נדרש לקבל, לאחר אישורם, מהסימולציה הספרתית המייצגת את כלל המערכת. החלקים המדומים, משולבים בצידוד בדיקה (צב"ד) ייעודי המממש מצד אחד את התקשורת הפיזית מול היחידה הפיזית בסימולציה ההיברידית, ומצד שני, בצורה ספרתית, את המדמה שנמסר אליו מהסימולציה הספרתית.

כבר בתחילת הפיתוח נדרש להגדיר בראיית Top-Down את כלל הסימולציות הנדרשות להיות ממומשות במהלך הפיתוח. מהמערכת הסופית יש לגזור לאחור את הסימולציה ההיברידית (בחלק ניכר מהיישומים הסימולציה ההיברידית יכולה להכיל מספר תצורות של יחידות פיזיות ויחידות מדומות) וממנה את הסימולציה הספרתית המערכתית וממנה את סימולציות המפתחים השונות. פיתוחה של כל סימולציה כולל גם את המרכיב הספרתי המפותח במסגרת הפרויקט וגם את הדימוי הנדרש על מנת לעורר את המרכיב המפותח. תהליך הפיתוח מחייב ניהול Bottom-Up של כל המסירות של הקבוצות המקצועיות לסימולציות, האינטגרציות והשילובים על מנת לממש הלכה למעשה את שהוגדר בתחילת הפרויקט. תכנון וניהול נכון של כל מרכיבי הסימולציות במהלך הפרויקט מהווים את המפתח להצלחת הפרויקט המסובך. מכל מה שהוצג ניתן להבין שהמודלים והסימולציות הן מרכיב חיוני בהנדסה הדיגיטאלית.

4. יישום הנדסה דיגיטלית בתחומים נבחרים

4.1 יצור מתקדם / תעשייה 4.0

המהפכה התעשייתית הרביעית (המכונה גם Industry 4.0 ו/או יצור מתקדם) נמצאת בשלבים מתקדמים של התפתחות בעולם. היא מבוססת על גישה רב תחומית של אינטגרציה של טכנולוגיות (איור 10) ועיקריה הם:

- מחשוב ואנליטיקה מתקדמת של כל תהליכי הייצור תוך שימוש בדיגיטציה מתקדמת, סנסורים חכמים, אינטרנט של הדברים ואחסון בענן
- הנדסת ננו של חומרים, סיבים ומשטחים
- ייצור בהוספה, הדפסות תלת ממד, וייצור מדויק
- רובוטיקה מתקדמת, אוטומציה מותאמת, בינה מלאכותית, מציאות רבודה
- הדור הבא של האלקטרוניקה
- תכן וניהול ממוחשב ומרושת של שרשראות אספקה מבוזרות
- ייצור ירוק ובר קיימא, תוך כדי שימוש בשיטות חדשניות, כמו: בקרת בריאות מערכות, תחזוקה חזויה

איור 10: הטכנולוגיות שמניעות את המהפכה התעשייתית הרביעית



מהפכה זו מתאפיינת גם בתפוצה ובזמינות של רשת האינטרנט באמצעים ניידים וזולים, בתלות ההדדית ובהשתלבות של גורמים ללא קשר למקום המצאם. היא מהווה הזדמנות פז לתעשייה הישראלית להוביל מרכיבים של המהפכה ולהפוך את התעשייה, במהלך לאומי משולב, לתעשייה מתקדמת ואיכותית, בעלת פריון גבוה, מובילה בתרומה לתל"ג, תחרותית בייצוא, ברת קיימא,

אטרקטיבית למשאב אנושי מוביל ומצטיין במגוון רחב של מקצועות (כגון: מהנדסים, טכנאים, מפעילי ציוד מתוחכם, מדעני מידע, תכנתים, מעצבי מוצר ועוד). לצד ההזדמנות, קיים סיכון של אי השתלבות ישראלית, ברמה של מהלך לאומי. אי נקיטת המהלך עלולה להיות בעלת השלכות קשות על המשק ועל החברה במדינת ישראל ובכלל זה בריחת מוחות מאסיבית. לפני כ- 3 שנים הקים משרד הכלכלה מכון ליצור מתקדם, אשר מסייע למפעלים וחברות לבצע טרנספורמציה בכוון של יצור מתקדם.

בפרסום של מוסד נאמן – ייצור מתקדם¹⁸ (זונגשיין ופורטונה, 2016) מתוארות המגמות בתחומים אלו בעולם ובישראל.

אחד התחומים המתפתחים והמבטיחים של ייצור מתקדם המצוינים לעיל הוא הדפסת תלת ממד, אשר לה יתרונות רבים (הארץ 17 יולי 2022):

- יכולת ייצור מתקדם תוך דילוג על כל שרשרת האספקה שכיום מהווה צוואר בקבוק משמעותי
- החזרת חלק מהייצור "הבייתה" עקב אי התלות בעובדים בשכר נמוך
- יכולת ייצור חלקים מורכבים מאד שאי אפשר לייצר בשיטות מסורתיות
- יכולת העתקת חלקי חילוף ישנים, שכבר לא ניתן לייצר
- יכולת ייצור בר קיימא עם פחות בזבז משאבים

דוגמה לשימוש בעזרת טכנולוגיות לייצור תלת ממד - קונסורציום של חוקרים באוניברסיטת אוקספורד פיתח רובוט שיכול ליצור העתקים מדויקים של פריטים היסטוריים גדולים. ב-2016 הציג הקונסורציום בכיכר טרפלגר בלונדון דגם של השער המונומנטלי בתדמור – העיר העתיקה בסוריה. הדגם הוא שני שלישים מהמונומט המקורי, שנבנה על ידי הרומאים לפני כ-2,000 שנה והוחרב ב-2015 בידי אנשי דאעש (הארץ, 27 ביולי 2022).

מומחים טוענים שכיום יש פוטנציאל לייצור רחב של מוצרים בתלת ממד, לא רק של קבוצה מצומצמת של מוצרי נישה. שוק ההדפסה בתלת ממד צפוי לשלש את עצמו לשווי מוערך של כ-45 מיליארד דולר עד 2026, לפי דו"ח של Hubs, פלטפורמה לשירותי ייצור (דה מרקר, 17 יולי, 2022).

המהפכה התעשייתית הרביעית כוללת תחומי ידע וניסיון מעשי חדשים וחדשניים שמחייבים חינוך והכשרה ברמה גבוהה ויישומית לכל המעורבים בפיתוח והנדסת מוצרים ומערכות מתקדמות, ייצור מתקדם ותחזוקה מתקדמת של מוצרים ומערכות בעידן החדש. מרכיב מהותי בתחומי ידע והתנסות אלו הם אוריינות והנדסה דיגיטלית.

4.2 תחזוקה חזויה / ניטור בריאות מבנים

במסגרת ההתפתחויות הטכנולוגיות המשמעותיות המובילות ליצור מתקדם והנדסה דיגיטלית, קיימת מגמה ממוקדת בפיתוח ויישום יכולות בתחומי תחזוקה חזויה (Predictive Maintenance) של ציוד, תשתיות ומערכות. תחזוקה חזויה באה להשלים ו/או להחליף מתכונות תחזוקה מסוג תחזוקת שבר ותחזוקה מונעת. תחזוקה חזויה מבוססת על ניטור מתמיד בזמן אמת באמצעות סנסורים של פרמטרים פיזיקאליים (כמו רעידות, חתימה אקוסטית, חתימה מגנטית) המנבאים על ידי מודלים מתאימים, שינויים במצב הציוד שעלולים להביא לכשל או לירידה בביצועים. מתכונות מקובלות לתחזוקה חזויה

¹⁸ ייצור מתקדם (neaman.org.il)

מבוססת מצב (CBM (Conditioned Based Maitenance, ניהול ואבחון בריאות PHM (Prognosis Health Monitoring) ומערכת בקרת בריאות HMS (Health Monitoring Systems).

בכל הגישות האלו יש שימוש בניתוח חכם של המידע הרב שנאסף בחיישנים והשוואתו למודלים הפיזיקליים המתאימים והרלוונטיים (יישום גישת תאום דיגיטלי).

בגישת תחזוקה חזוייה צפוי שיפור משמעותי באמינות ובזמינות המערכות, וצפויה הקטנה של עלויות מחזור החיים של המערכות, כיוון שנמנעות תקלות שמביאות להשבתות ארוכות ועלויות טיפול בתקלות הציוד.

במפגש שולחן עגול שהתקיים במוסד שמואל נאמן ב-31.10.17 סביב נושא דטה אנליטיקס ביצור מתקדם, התחדד הצורך לקדם את הידע והיישום של מודלים בתחזוקה חזוייה באקדמיה ובתעשייה.

פרק 10 בספר (Kenett, Swarz, & Zonnenshain, 2019) Systems Engineering in the Fourth Industrial (Condition-Based Maintenance via a Targeted Bayesian Network Meta-Model), מציג גישה מערכתית לגיבוש מדיניות תחזוקה מבוססת מצב שמביאה לצמצום תקלות, הפחתת זמני השבתה והקטנת עלויות על ידי שימוש כמותי ברשתות ביאסיניות.

חברת המחקר הייעוץ מקינזי (Bradbury et al, 2018) חקרה היבטים שונים של גישת התחזוקה החזוייה והוציאה מספר מאמרים בנושא. במאמר מ-2018 הכותבים הציעו לחברות לגבש תכנית אסטרטגית לפיתוח ושיפור אמינות המערכות שלהן, ביצוע התכנית בפועל והערכה מתמידה של תרומתה. הגישה המובילה בתכניות אלו היא RCM - Reliability Centered Maintenance, כאשר במרכזה תחזוקה חזוייה. במעקב אחר תרומות תכניות אלו התקבלה הגדלת אמינות תשתיות וציוד ב-5-15%, וצמצום עלויות תחזוקה ב-18-25%.

במאמר חדש יותר מ-2021 (Decaix, 2021) מוצגות התפתחויות והתקדמות באמצעים דיגיטליים של אמינות ותחזוקה בגישה המכונה. הכותבים מציינים ש-Digital work Management כוללת:

- דיגיטציה של תהליכי העבודה
- ביצוע הפעילויות באמצעות מכשירים ניידים וטכנולוגיות מציאות רבודה
- ניהול ביצועים בזמן אמת

ביום עיון שהתקיים במרכז גורדון להנדסת מערכות בטכניון (18-19 לינואר, 2021) גבריאל דוידיאן מאוניברסיטת בן גוריון הציג מחקר¹⁹ על יישום גישת תחזוקה חזוייה למערכת רכבתית על פי תפישת תאום דיגיטאלי, שצפויה להעניק לרכבת תועלות גדולות מאד בתחומי שיפורי אמינות ותחזוקה.

4.3 אינטרנט של הדברים (IoT) Internet of Things

המונח אינטרנט של הדברים - Internet of Things או בקיצור IoT, נקרא על ידי האקדמיה ללשון עברית **מרשתת של הדברים**. זוהי רשת של חפצים פיזיים או דברים, המשובצים באלקטרוניקה, תוכנה

¹⁹ Davidyan, G., Bortman, J., & Kenett, R. (2021, January 18-19). Developing a new digital twin for a rail system: The Gordon Center for Systems Engineering. Ben-Gurion University in the Negev, The Samuel Neaman Institute.

וחיישנים מגוונים המאפשרים תקשורת מתקדמת בין החפצים ויכולות איסוף והחלפת מידע ונתונים, יכולות עיבוד וניתוח נתונים, וכן יכולות הפעלת ותפעול החפצים מרחוק באופן אוטומטי²⁰.

ה-IoT הוא מושג המשמש להגדרת רשת של דברים והתקנים מחוברים זה לזה המוטמעים או מחוברים באמצעות חיישנים, תוכנה, קישוריות רשת והאלקטרוניקה הדרושה, המאפשרים איסוף והחלפה של נתונים דרך האינטרנט, מה שהופך את הנתונים והמכשירים מרחוק לנגישים ואוטומטיים.

מקינזי (Chui, Collins & Patel, 2021) מגדירים את האינטרנט של הדברים כחיישנים ומפעילים (actuators) המחברים באמצעות רשתות למערכות מחשוב. מערכות אלו יכולות לנטר או לנהל את תקינותם ופעולותיהם של עצמים ומכונות מחוברים. חיישנים מחוברים יכולים גם לנטר את עולם הטבע, אנשים ובעלי חיים.

האופי הרב-גוני של האינטרנט של הדברים (IoT) יוצר מחלוקת סביב הגדרתו. בניסיון להבהיר, The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) פרסמה במאי 2015 מסמך ראשוני (white paper) לקראת הגדרה של ה-IoT. IEEE קובע שה-IoT כולל טכנולוגיות, רכיבים ומנגנונים המאפשרים שילוב יעיל של רכיבים אלה. לרוב זה מסתכם ברשת המאפשרת את האינטגרציה ומערכת רכיבים שיכולה לנוע מחיישנים אוטונומיים ועד לסמארטפונים.

הביטוי IoT הוטבע לראשונה על ידי מומחים המבקשים לבסס את קוד המוצר האלקטרוני האוניברסלי באמצעות מערכות זיהוי תדרי רדיו (RFID). יישומים ותעשיות רבות המאפשרות רשתות IT עם רכיבים משולבים המגדירים מחדש את ה-IoT מעבר ל-RFID, בחיבוריות מכונה-למכונה (M2M) או כל טכנולוגיית חיבור נקודתית קודמת. IoT מקיף את כל אלה. דרך האינטרנט, מכשירים ניידים וניתוח נתונים, מתווספות כל הזמן שכבות חדשות של יכולות למערכת, כגון: תקשורת, תפעול ועיבוד נתונים.

התפתחות האינטרנט של הדברים והשימוש בו קיבלה דחיפה עקב התפתחות האינטרנט האלחוט, מחשוב ואחסון בענן, מערכות מיקרו אלקטרו-מכניות, מערכות משובצות מחשב. גורם נוסף, שתרם להתפתחותה של התפישה היא הקישוריות הזולה והתפתחות רשתות הסלולר, עם כניסת הדור הרביעי (4G) מבוסס טכנולוגיית ה-Long Term Evolution (LTE), שהוא תקן לתקשורת אלחוטית מהירה של מכשירים ניידים.

על פי תאגיד הייעוץ "מקינזי" (Chui, Collins and Patel November, 2021) שווי השוק הגלובלי של תחום האינטרנט של הדברים צפוי לצמוח ל- 5.5 טריליון עד 12.6 טריליון דולר ברחבי העולם עד שנת 2030.

את האינטרנט של הדברים ניתן לשלב כמעט בכל מערכת או מוצר כדי לשדרג את הקישוריות הפנימית שלו, הקישוריות עם העולם החיצון-המפעילים, הלוקוחות והמשתמשים ואפשרות הניהול של המערכות לאורך כל מחזור החיים-ייצור, שיווק, תפעול, תחזוקה ושדרוג.

האינטרנט של הדברים הוא הלב של מערכות חכמות כמו הבית החכם, המפעל החכם, עיר חכמה ותחבורה חכמה.

ההנדסה של האינטרנט של הדברים מבוססת על רישות של רכיבי קצה חכמים מהמדף (Cost-Components of The Shelf) כמו חיישנים מגוונים, מפעילים ואלמנטי תקשורת.

במהפכה התעשייתית הרביעית אינטרנט של הדברים התעשייתי (Industrial IoT – IIoT) הוא מרכיב מרכזי בחיבוריות בין מכונות, אמצעי ייצור ואמצעי בדיקה.

²⁰האינטרנט של הדברים

מהנדסים ומנהלים בכל הדיסציפלינות רצוי שיתמחו בתחום האינטרנט של הדברים ודרכי השילוב שלו במערכים, מערכות, במוצרים ובשירותים. תהליך התכן ההנדסי והנדסת המערכות של מערכת משולבת IoT יכולים לכלול 6 שלבים כמתואר באיור 11:

איור 11: השלבים בשילוב IoT במערכות, מוצרים ושירותים



שלב 1- ניתוח עסקי.

שלב 2 - תכן ארכיטקטורה אפשרית העונה על הדרישות.

שלב 3 - גיבוש מודל הדאטה, כולל השילוב של היבטי מידע עסקי BI, והיבטי למידת מכונה ML ולמידה עמוקה DL.

שלב 4 - גיבוש ותכנון החומרה הנדרשת.

שלב 5 - גיבוש ותכנון הרשת הנדרשת כולל היבטי אספקות לרשת.

שלב 6 - תכנון וגיבוש התוכנה הנדרשת לתמיכה במערכת הכוללת במיקומים שונים - edge, fog, cloud.

תכן ויישום מערכת IoT מיושם לרוב בצורה איטרטיבית, וששת הצעדים לעיל מבוצעים במספר מחזורים.

הרחבה ודיון על שוק ה-IoT (מתבסס על דו"חות של BCC, August 21, May 2022) בנספח 1.

הצמיחה של האינטרנט של הדברים התעשייתי (IIoT)

למכשירי חשמל עדכניים, כגון מקררים, רמקולים חכמים, טלוויזיות ומכונות כביסה, יש יכולות משולבות של גישה לאינטרנט על ידי חיבור לחיבורי אינטרנט קוויים או אלחוטיים. מכשירים אלה מיועדים לתקשורת מכונה למכונה (M2M) ומתחברים לסמארטפונים, טאבלטים ומכשירים אחרים לפונקציונליות נוספת. הנתונים ממכשירים כאלה משותפים דרך רשת הטלפון והגישה אליהם היא באמצעות אפליקציות סמארטפונים וטאבלטים.

קישוריות מוגברת הובילה לבסיס גדול יותר של אנשים וחברות המעוניינים ברכישת והתקנת מכשירי IoT לצורך תחזוקת מכונות ואופטימיזציה של תפעול. היצרנים חייבים לקדם את שרשראות האספקה כדי להגיע לרמות חדשות של יעילות ואיכות. יצרנים נתנו חסות ליוזמות וקבוצות (קונסורציום אינטרנט תעשייתי בארה"ב או הרעיון של Industry 4.0 בגרמניה) שבהם התעשייה והאקדמיה פועלות יחד כדי לקדם ולמנף טכנולוגיות ופלטפורמות דיגיטליות חדשות. ממשלות באופן כללי גם דוחפות מאמצים לעבר ה-IoT, מתוך הכרה בתפקידו של הייצור בתקופות של התאוששות וצמיחה כלכלית. כל אלה מלווים במשאבים פיננסיים גדולים המושקע בייצור חכם. חברות גדולות כמו ג'נרל אלקטריק ו-IBM החלו לפתוח באגרסיביות חטיבות IoT ומעבדות חדשות. היו מגוון של רכישות IoT, כולל רכישת Intel ו-Google Nest ורכישת Basis. המימון לסטארט-אפים של IoT גדל בהתמדה. אלו יהיו גורמים חשובים שיניעו את צמיחת שוק חיישני ה-IoT.

4.4 תכן מערכות ומוצרים להדפסת תלת ממד

בעשור האחרון טכנולוגיית הדפסות תלת ממד התפתחה מאד במגוון תחומי הפעולה - מערכות מכניות, מערכות ורכיבי בניין, מערכות רפואיות, אברים תחליפיים לאנשים וחיות, מערכות ועיצוב ארכיטקטוני ועוד. בנוסף, התפתחו תהליכי ההנדסה והייצור הדיגיטלי הכרוכים ותומכים בהדפסות תלת ממד. כמו כן, תחום חדשני זה משולב בחינוך בבתי ספר ובאקדמיה ובמחקרים יישומיים באקדמיה ובתעשייה.

התפתחויות טכנולוגיות אלו גם הובילו להקמת חברות ישראליות מובילות בעולם בתחום חדשני זה, כמו חברת סיסטמטיקס, וגם חברות הזנק מצליחות כמו MASSIVit3D¹⁸.

היתרונות העיקריים בהדפסות תלת ממד הוא בשיפור יעילות הפיתוח על ידי יכולת יצירה מהירה של דגמי פיתוח פיזיים לבדיקות וניסויים, בייצור מהיר של סדרות לשוק ללא צורך להקים קו ייצור ייעודי, גם כדי להיות ראשון בשוק וגם כדי לאפשר משוב מהיר מלקוחות ומשתמשים.

הצעד הראשון בתכן מערכות ומוצרים בטכנולוגיה זו, הוא בחירת טכנולוגיית ההדפסה המתאימה ביותר. לפעמים נכון לשלב בין טכנולוגיות הדפסה שונות כדי להשיג אפקטיביות בפיתוח ובייצור. צעד זה נכון לעשות כחלק אינטגרלי של הפיתוח והייצור. מדפסות התלת ממד הגיעו כיום כבר לבשלות טובה, במיוחד בטכנולוגיות הדפסה בחוט (FFF) או בהדפסת אבקות.

הצעד הבא שמאפשר לנצל באופן מיטבי את מה שטכנולוגיות ההדפסה מאפשרות, הוא בחירת כלי התכנון התלת ממדי שיאפשרו למהנדסים לחשוב ולתכנן בסביבת הדפסות תלת ממד, שאלו צורות חשיבה ותכנון שונות מאלו בסביבת הייצור המסורתית. היום כבר יש כלי תיב"מ בעלי יכולות שמאפשרות לתכנן באופן אפקטיבי חלקים מותאמים להדפסת תלת-ממד. הכלים האלו מאפשרים בניית מודלים וביצוע סימולציות של הדפסות תלת ממד לצרכי אופטימיזציה של השימוש בחומרים ותכן המוצרים, כדי שכבר בהדפסה הראשונה יתקבלו חלקים הנדסיים העומדים בדרישות ההנדסיות - משתמשים בחומר ההדפסה המתאים ומאפשרים הדפסה חלקה ואיכותית. האמור לעיל מצביע על תהליך תכן המותאם למוצרים ומערכות להדפסות תלת ממד.

4.5 הנדסת איכות, אמינות ובטיחות

להנדסת האיכות, האמינות והבטיחות יש תפקיד חיוני בהנדסת מערכות מוצרים ומערכות מודרניים. היבטי איכות, אמינות ובטיחות חייבים להיות משולבים בפיתוח והנדסה של מוצרים ומערכות מתקדמות, כיוון שהיבטים אלו הם קריטיים להצלחת מוצרים בשוק ובחברה. שלושת דיסציפלינות מקצועיות אלו מתחילות לאמץ שיטות ומתודולוגיות דיגיטליות והמקצוענים בתחומים אלו עוברים הכשרות בתחומים הדיגיטליים. במסגרת זו קנת וזונגשיין (2020) גיבשו מתווה לאיכות 4.0 כולל מספר מרכיבים:

- קידום איכות כדיסציפלינה מונעת נתונים.
- שימוש במודלים וסימולציות להנדסת איכות מבוססת ראיות.
- גיבוש תהליכי חיזוי לאיכות.
- הפעלת מודל ניהול איכות כולל ומשולב.
- יישום סולם בשלות האיכות למהפכה תעשייתית רביעית.
- שילוב חדשנות עם איכות וניהול לחדשנות.
- שילוב איכות 4.0 ומדעי הנתונים.
- שילוב הנדסת אמינות עם הנדסת איכות.
- הערכת ושיפור איכות מידע.
- גיבוש תכנית מסגרת ליישום איכות 4.0.

בצורה דומה נדרש לקדם אמינות 4.0. זיו (Zio, 2016) גיבש כוונת פעולה מעניינים שכינה אותם KID ה"גדול" - Knowledge, Information, Data. להבנתנו צריך להמשיך במאמצים אלו תוך שימוש נרחב במודלים וסימולציות בניתוחי אמינות, פיתוח ויישום מודלי התדרדרות וכשל (SHAHRAKI et al, 2017), יישום מודלים של פיזיקת הכשל, יישום הערכות והדגמות אמינות באמצעות גישות של תכן ניסויים (DOE) וניסויים מואצים מבוססי מודלים. כמו כן נכון לעודד יישום תחזוקה חזוייה ותחזוקה מבוססת מצב, אשר משפרת את אמינות וזמינות המערכות. תחזוקה חזוייה משתמשת גם במודל התאום הדיגיטאלי אשר יכול להוות בסיס טוב לניתוח וחיזוי אמינות מערכות.

גם תחום הנדסת הבטיחות עובר שינוי (Leveson, 2012) במסגרת צוות של ה-MIT, אשר פיתח את הגישה המערכתית לבטיחות (STAMP) Systems Theoretic Accident Model and Process, אשר יכולה לשמש גם כמודל להבטחת ביטחון וסייבר. גישות אלו צריכות גם כן להשתלב בהנדסה דיגיטלית על ידי שימוש מושכל במודלים, סימולציות ואנליזות של נתוני עתק.

4.6 תכן קונספטואלי מבוסס מודלים (MBCD (Models Based Conceptual Design)

תכן קונספטואלי של מוצרים, תהליכים ומערכות הוא שלב חיוני בפיתוח סדור של מערכות, מוצרים ותהליכים. למרות חשיבות הנושא, יש יחסית מעט שיטות סדורות לתכן קונספטואלי.

ICDM-an integrated methodology for the conceptual design of new systems (Hari et al. 2004) פיתח את הגישה המכונה ICDM-an integrated methodology for the conceptual design of new systems. מתודולוגיה מוכללת לתכן קונספטואלי, שמורכבת מעשרה שלבים. גם בתהליכי הנדסת מערכות מבוססת מודלים, יש חוסר בתהליך סדור לתכן קונספטואלי. לפתרון הבעיה לשילוב בין ICDM ל-MBSE פותחה מתודולוגיה (Peleg et al. 2022) לתכן קונספטואלי מבוססת מודלים, על ידי התמרת והתאמת מתודולוגיית ICDM למתודולוגיה מבוססת מודלים Model Based Integrated Conceptual Design Methodology (MBICDM). מתודולוגיה זו זוכה לטוב משני העולמות - הגישה היצרית והסדורה של ICDM לתכן קונספטואלי, וגישה המודלים המאפשרת שיתוף וניתוח מידע ונתונים לאורך כל מחזור החיים של המערכת בין כל בעלי העניין במערכת.

4.7 בינה מלאכותית (Artificial Intelligence (AI)) ולמידת מכונה (Machine Learning (ML))

אכן AI משנה נורמות ומוסכמות. לאן יגיע? השמים הם הגבול. כוחם של האלגוריתמיקאים עולה והם הגורמים את כל האחרים למחוזות גבוהים יותר. (ד"ר קובי ריינר)

זה לא סוד שבינה מלאכותית (AI) משנה את הדרך בה אנו חיים. כיום, אנשים משתמשים בטכנולוגיית AI לעתים קרובות בחיי היומיום, כגון עבור חיפוש אינטרנט, חנויות ושירותים מקוונים, מכשירי בית חכם, סמארטפונים, מכוניות חכמות ומזל"טים, מדיה חברתית, ניווט ואבטחה/מעקב. עבור ארגונים, AI עוזר לזהות צרכים עסקיים, להעריך סיכונים, להגדיל מכירות, לזהות הונאה, לשפר את חווית הלקוח, להאיץ תהליכי עבודה ולהפיק תחזיות וניתוחים.

BCC Research (April 2020) מגדיר מערכות בינה מלאכותית כמערכות מבוססות מכונה שיש להן את היכולת לבצע תחזיות, המלצות או החלטות להשפיע על סביבות אמיתיות או וירטואליות עבור קבוצה נתונה של יעדים מוגדרים על ידי אדם. מספר תחומים יעברו בשנים הקרובות מהפכות הודות ליישום טכנולוגיות AI ובהם שירותים פיננסיים, שירותי בריאות, נסיעות ותחבורה, מדיה ובידור, אבטחה, קמעונאות צרכנית, ייצור, שיווק, חקלאות ומכוניות ועוד.

שוק הבינה המלאכותית העולמית (AI):

- אמור להגיע ל-294.8 מיליארד דולר עד 2026 מ-55.3 מיליארד דולר ב-2021, בקצב צמיחה שנתי (CAGR) של 39.7% לשנים 2021 עד 2026.
- מחולק לתוכנות AI Software, שירותי AI, וחומרות AI. בשלב זה עיקר שוק ה-AI הוא בתוכנה, במגוון תעשיות כמו: שירותים פיננסיים, בריאות, שווק ושירותים ציבוריים.
- ניתן לסווג את השוק העולמי של AI על בסיס טכנולוגיה לקטגוריות הבאות: למידת מכונה (ML), ראייה מחושבת, עיבוד שפה טבעית (NLP) ומחשוב מודע להקשר.
- בחלוקה לפי תעשיות המשתמשות ב-AI, השוק העולמי מתחלק ל-BFSI (Banking, Finance Services, Insurance) (בנקאות, שירותים פיננסיים וביטוח), מסחר, ייצור, שווק, בריאות, רכב, ביטחון, תקשורת, חקלאות, משאבי אנוש, ועריכת דין.

היישום של AI יכול להיות בתוך החברות, או בענף.

היתרונות העיקריים של טכנולוגיית AI הם:

- יכולת לפעול 24/7 ללא הפסקה.
- יכולת לבצע תהליכים במהירות רבה, עם יכולות קבלת החלטות.
- יכולת ביצוע משימות מורכבות ללא השקעות גדולות.

כיום אנשים משתמשים ביכולות AI בחיפושים חכמים ברשת, בתרגומים, בשירותים מקוונים, ניתוח חכם של מידע ונתונים רבים (Big data), בתפעול מכשירים חכמים, מכוניות חכמות, ייצור ותחזוקה חכמה, ברשתות חברתיות, בזיהוי חלקים ופנים.

AI מחולק ל- AI חלש ול- AI חזק. ב- AI חלש אנחנו יכולים להיעזר בפעילויות מוכרות. ב- AI חזק נכללות פעילויות שלא מוכרות לנו.

AI יכול לסייע לעסקים בזיהוי צרכי העסק על בסיס ניתוח מצב העסק וניתוח מצב השוק, להבין ולהעריך את הסיכונים, לאפשר הגדלת מכירות, איתור רמאויות, שיפור חווית משתמש ולקוח, האצת תהליכי עבודה, חיזוי ואנליזה של מגמות.

למידת מכונה היא תת-קבוצה של בינה מלאכותית (AI), המאפשרת למערכת או לתוכנה לחקות את המוח האנושי. בלמידת מכונה, מערכת או תוכנה מוזנת בנתונים באמצעות מנגנונים שונים ללמידה, כדי לחזות תוצאות בצורה מדויקת כמו המוח האנושי. מערכות למידת מכונה אינן צריכות להיות מתוכננות באופן בלעדי עם הוראות מוגדרות מראש, אלא באמצעות אינטגרציה עם מודלים של למידת מכונה המאפשרות להן להשיג אינטליגנציה ולכן לבצע פעולות על סמך הלמידה.

לפי IBM, "למידת מכונה היא ענף של בינה מלאכותית ומדעי המחשב המתמקד בשימוש בנתונים ובאלגוריתמים כדי לחקות את הדרך שבה בני אדם לומדים, תוך שיפור הדרגתי של דיוקם".

למידת מכונה כוללת מערכת אקולוגית עצומה של מדעני נתונים, מהנדסי נתונים, ארכיטקטים של נתונים, מפתחי מודלים ומהנדסי למידת מכונה שמבצעים משימות של בחירה וניקוי הנתונים ויצירת מודל למידת המכונה ועד לשילוב תוצאות המודל והתחזיות לעסקים של משתמשי הקצה. עם התקדמות הטכנולוגיות שבהן עסקים נותנים מענה לבסיס לקוחות רחב המותאם לאינטרנט, ויישומים המתפתחים בשוק למשתמשי קצה, חלה עלייה משמעותית בנתונים שעזרה לאקוסיסטם של למידת מכונה לצמוח בעוצמה. פתרונות למידת מכונה מוצעים באמצעות פלטפורמות המסוגלות לבצע ניהול מחזור החיים של כל תהליך למידת המכונה, עם שדרוגים מתקדמים של הטכנולוגיה עם הזמן. לכן, המערכת האקולוגית של למידת מכונה מטופלת בעיקר על ידי ספקי פלטפורמת מדעי הנתונים ולמידת חישובית.

איור 12 ממחיש שמדע הנתונים מהווה את טכנולוגיית האב של בינה מלאכותית, למידת מכונה ולמידת עמוקה. מדעי הנתונים היא הפלטפורמה שהופכת את כל הנתונים לזמינים עבור תהליך האימון של מודל למידת מכונה. בינה מלאכותית עוקבת אחר הרעיון של חיקוי התנהגות אנושית, ועם העלייה בביג דאטה, בינה מלאכותית היא גם טכנולוגיה מונעת נתונים כעת. עם זאת, ל-AI יש מגוון עצום של יישומים, הכוללים גם למידת מכונה. למידת מכונה היא ספציפית לתשומות מבוססות נתונים וחיזוי תוצאות המבוססות על למידה דרך הנתונים הללו.

איור 12: מערכת אקולוגית טכנולוגית של למידת מכונה



מקור: עיבוד שמואל נאמן ל-BCC

השוק העולמי ללמידת מכונה אמור לצמוח מ-17.1 מיליארד דולר ב-2021 ל-90.1 מיליארד דולר עד 2026 עם קצב צמיחה שנתי (CAGR) של 39.4% בשנים 2021-2026 (BCC, March 2022).

העתיד של AI

היכולות הקיימות של Machine Learning (ML) כוללות רשתות נוירונים עמוקות ומודלים הסתברותיים, מאפשרים מגוון פעילויות, כמו: תרגום אוטומטי של שיחות מדוברות וטקסט כתוב, זיהוי עצמים, זיהוי פנים וסיוע במטלות אישיות (כמו ניהול יומן). כמו כן, גידול בכושר המחשוב מאפשר יישום מודלים הסתברותיים מגוונים, שמאפשרים מתן שירותים אוטומטיים ללקוחות ומשתמשים, כמו תיקון תקלות ורכש שירותים ומוצרים באמצעות Chatbots. AI מתפתח גם לתחומי סיוע לתכן והנדסה של מוצרים ביישום מודלים הנדסיים מתאימים. כמוכן מכונות אוטונומיות וציוד אוטונומי משתמשים ב AI לתפעול, בקרה והבטחת בטיחות.

מגמות קרובות שאפשר להתבסס עליהן (BCC 2020):

- בינה מלאכותית תמשיך לחולל מהפכה בתעשיות, אך תראה את השינויים הגדולים ביותר בתחום הבריאות, שירות הלקוחות והטלקומוניקציה.
- בשנים הקרובות, בינה מלאכותית צפויה למלא תפקיד מכריע במערכת הבריאות העולמית כדי לחזות, לבנות תגובות ואפילו לעזור לתכנן תרופות להילחם במגיפות כאלה כמו נגיף הקורונה.
- בינואר 2020, הסטארט-אפ הבריטי Exscientia הפך לחברה הראשונה שהכניסה מולקולת תרופה חדשה שהומצאה לחלוטין על ידי AI לניסויים בבני אדם. לתרכובת שתוכננה בבינה מלאכותית נדרשו רק 12 חודשים ליצור את התרופה, בשעה שלמחקר מסורתי לוקח בדרך כלל ארבע עד חמש שנים.

4.8 הנדסת מערכות דיגיטליות (Digital Systems Engineering)

בספר Kenett, Swarz & Zonnenshain,) Systems Engineering in the Fourth Industrial Revolution (2019) מוצגים פנים מגוונות של הנדסת מערכות בעידן המהפכה התעשייתית הרביעית, שלמעשה מציגה היבטים שונים של הנדסת מערכות דיגיטליות.

בטבלה 8 מתוארת ההתפתחות של הנדסת מערכות במתכונת של גישות מסורתיות היוצאות משימוש (out) וגישות מתקדמות הנכנסות לשימוש בעידן המודרני (in).

טבלה 8: השוואה בין גישות מסורתיות לגישות מתקדמות בהנדסת מערכות

OUT	IN
מודל מפל המים	מודלים איטרטיביים ואגיליים
מודל ה-V, מתכונת T&E	מודלים וסימולציות
גבולות המערכת מוגדרים היטב	גבולות המערכות מעורפלים, מחוררים ומשתנים
ניהול דרישות קפדני	דרישות משתנות כהזדמנות
ניהול סיכונים מבוסס על הערכות איכותניות	ניהול סיכונים מבוסס על עובדות, נתונים ומודלים כמותיים
גישות שמרניות והימנעות משינויים	חדשנות וייזמות כתרבות
שילוב מועט של היבטי הנדסת אנוש במערכות - HSI כדיסציפלינה משמעותית	יישום מקיף של אינטגרציית היבטי אנוש במערכות - HSI כדיסציפלינה משמעותית
יישום מוגבל של הנדסת אמינות, זמינות, בטיחות ותחזוקתיות RAMS	יישום גישה משולבת של RAMS בהנדסת מערכות
יישום גישה תהליכית לבטיחות	יישום גישה מערכתית להיבטי בטיחות STAMP
אבטחות נוהליות ופילטרים לאיומים חיצוניים	הגנה והבטחה מערכתית לאיומי סייבר (STAMP)
חשיבה ליניארית	חשיבה מערכתית מתקדמת ויישומית
מדיניות תחזוקה מונעת	מדיניות תחזוקה חזוייה-CBM, PHM
יישום גישות פסיביות של תכן לקיימות	יישום גישות פרואקטיביות של תכן לקיימות
יישום מוגבל של היבטי אתיקה	יישום נרחב ומתקדם של היבטי אתיקה, כמו: זכויות פרט, שקיפות, שוויון
הנדסת מערכות מבוססת על מסמכים	יישום נרחב של הנדסת מערכות מבוססת מודלים MBSE, ותאום דיגיטאלי

OUT	IN
פיתוח פנימי והדגמה פנימית של ביצועי המערכות	שימוש במערכות מוכחות באינטרנט ובשוק הווירטואלי כמו GitHub
ההיבטים העסקיים אינם חלק מהנדסת המערכות	מודלים עסקיים הם חלק מהנדסת המערכות
עובדים עם חברות ממוסדות	עובדים עם חברות הזנק (סטרטאפים)
יישום הנדסת מערכות מונעת דאטה ומבוססת על עובדות	הנדסת מערכות מבוססת על מסמכים וניירת
אין שימוש בבינה מלאכותית בתהליכי הנדסת מערכות, ואין שילוב בינה מלאכותית במערכות	שילוב נרחב בבינה מלאכותית בתהליכי הנדסת מערכות ובמערכון עצמן
שימוש מועט באינטרנט של הדברים - IoT במערכות	שילוב נרחב של אינטרנט של הדברים במערכות לצרכי קישוריות מידע ונתונים ועיבודם בזמן אמת, ולצרכי אינטגרציה חכמה של המערכות
שימוש מועט במציאות רבודה AR	שילוב מושכל במערכות AR כחלק מיכולות וביצועי המערכת, ו/או לצרכי הדרכת המערכת

5. סקר אוריינות דיגיטאלית - הפער הקיים במיומנויות דיגיטליות באקדמיה ובמגזר העסקי

מטרת סקר זה הייתה להעריך את הפער הקיים בתחום זה ואת החשיבות בלימוד ויישום של מיומנויות דיגיטליות בחברות תעשייתיות, עסקיות וציבוריות. לצורך כך, נשלח שאלון למרצים ובעלי עניין באקדמיה ולמנהלי חברות במגזר העסקי (פירוט ותוצאות הסקר בנספח 2).

סיכום ותובנות עיקריות

בסקר אוריינות דיגיטלית שקיימנו בקרב אוכלוסיית אנשי תעשייה ואנשי אקדמיה, קיבלנו את הערכותיהם לגבי מידת השימוש במיומנויות דיגיטליות בתחומי ההנדסה, ולגבי החשיבות של הכללת מיומנויות אלו בחינוך מהנדסים במאה ה-21.

- בקרב רוב אנשי התעשייה הובע הצורך שהמהנדסים יהיו בעלי מיומנויות דיגיטליות מגוונות כדי שיתרמו לתהליכי ההנדסה המודרניים. במצב הנוכחי יש פער בין הרצוי והמצוי בתחום ופער זה על פי הערכותיהם ילך ויגדל.
- בקרב רוב אנשי האקדמיה הובע הצורך להכליל יותר לימודי מיומנויות דיגיטליות בתכניות לימודי ההנדסה, כדי להכין את הסטודנטים לעולם העבודה הדיגיטלי המתפתח ומשתנה. אבל עדיין קצב שילוב תכנים דיגיטליים בתכניות הלימודים הוא איטי ולא מספק את הצרכים.
- ברוב המוסדות האקדמיים שענו לסקר לא נקלטו חברי סגל במטרה לקדם חינוך דיגיטלי.
- בהשוואה לאנשי התעשייה, אנשי האקדמיה, העריכו שההכשרה הדיגיטלית של המהנדסים החדשים פחות מספקת.
- באקדמיה ציינו כי המיומנויות הדיגיטליות העיקריות הנדרשות היום למהנדסים הן בתחומי התוכנה והתכנות שמהווים תשתית למיומנויות דיגיטליות רבות. גם בתעשייה צוין כי המיומנויות הנדרשת היא תכנות אך יחד עם זה צוינו מיומנויות כגון תיב"מ, ERP, QA וכד' שהם כלים המהווים בסיס למיומנויות דיגיטליות בעיקר בתעשייה.
- רוב חברי הסגל תומכים בעדכון תוכנית הלימודים להרחבת החינוך הדיגיטלי.
- רוב אנשי התעשייה שענו חושבים שהפערים הדיגיטליים יתרחבו בעתיד, מה שמחזק את הצורך בלימוד לאורך החיים למהנדסים.
- המלצות למדיניות ממשלתית שתוכל לתרום לצמצום הפער היו קידום לימוד לאורך החיים (LLL); חשיפה, הסברה, קידום ועידוד הנושא בקרב התעשייה ואולי אף מימון חלק מההכשרות; שילוב וקידום הנושא כבר בשלב הלימודים.

במהלך הסקר נאסף מידע מגוון על צרכי הכשרות באקדמיה ובתעשייה, שישמש אותנו בהמשך העבודה לקידום אוריינות דיגיטלית באקדמיה ובתעשייה. מספר המשיבים לסקר היה נמוך, יחד עם זאת

התקבל מידע רלוונטי וחשוב. נבחן בעתיד ליזום סקרי השלמה בתחומים חשובים אלו כדי לתקף את המגמות שהתקבלו.

6. תכניות חינוך, מתודולוגיות לימוד והכשרה בתחומי הנדסה ואוריינות דיגיטלית

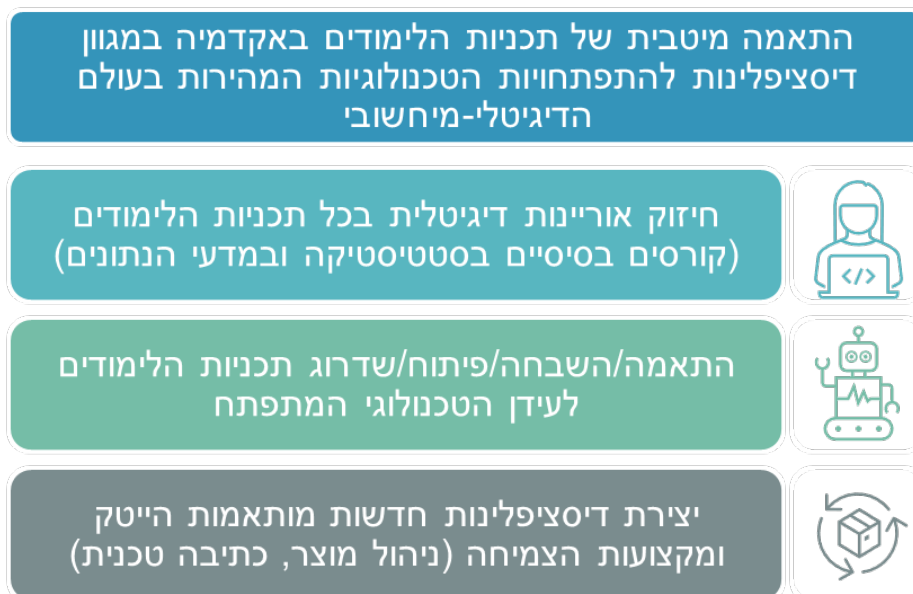
בעולם יש הבנה שיש להטמיע בתכניות הלימודים למידה בעולם דיגיטלי.

מבחן PISA הוא סקר בינלאומי מוביל שמוודד את יכולתם של תלמידים בני 15 ליישם את הידע והכישורים שלהם לבעיות ומצבים מהחיים האמיתיים. בנוסף למדידת ביצועים בקריאה, מתמטיקה ומדעים, כל מחזור PISA מעריך גם את מיומנות התלמידים ב"תחום חדשני". התחום החדשני של PISA 2025 הוא למידה בעולם הדיגיטלי. המבחן יעריך את המידה שבה תלמידים יכולים להשתמש במשאבים דיגיטליים כדי ללמוד לפתור בעיות באופן חישובי. זה כולל הן את היכולת שלהם ליישם קבוצה של פרקטיקות קוגניטיביות שרלוונטיות ללמידה עם כלים דיגיטליים, והן איך הם מווסתים את החשיבה וההתנהגויות שלהם תוך כדי למידה עם משאבים דיגיטליים.

משימות ההערכה "למידה בעולם הדיגיטלי" נועדו להעריך מיומנויות חשובות במקצועות STEM ומדעי החברה. מגוון רחב של כלים ומשאבים אינטראקטיביים, כגון סרטונים עם כתוביות, גרפיקה מונפשת, כלים לבניית מודלים וכלים לניתוח נתונים, תכנות, סביבות סימולציות וטקסט עם היפר-קישור, ישמשו ליצירת משימות פתוחות המספקות הזדמנויות למידה לתלמידים, בצורה של דוגמאות אמיתיות ומשוב אוטומטי²¹.

בארץ ות"ת הציגו את תוכניות הפיתוח שלהם, עם התייחסות לאוריינות דיגיטלית במסגרת של תוכנית הייטק²².

איור 13: הייטק 3 - אקדמיה מותאמת הייטק



²¹ <https://www.acer.org/au/discover/article/acer-to-develop-global-assessment-of-digital-learning-skills>

²² <https://www.runi.ac.il/media/2dxkvcvs/michal-ophir.pdf>

6.1 תובנות מתכניות חינוך של אוניברסיטאות ומוסדות מובילים בעולם ובארץ

6.1.1 סקירת תכניות באוניברסיטאות ומכללות בארץ

נעשתה סקירה של האוניברסיטאות וחלק מהמכללות בארץ לבחינה של תארים הכוללים בתוכניות הלימודים תכנים של הנדסה דיגיטלית.

ממצאים

פירוט המוסדות שנסקרו והתארים הנלמדים שמכילים מרכיבים של הנדסה דיגיטלית מתוארים בטבלה 9.

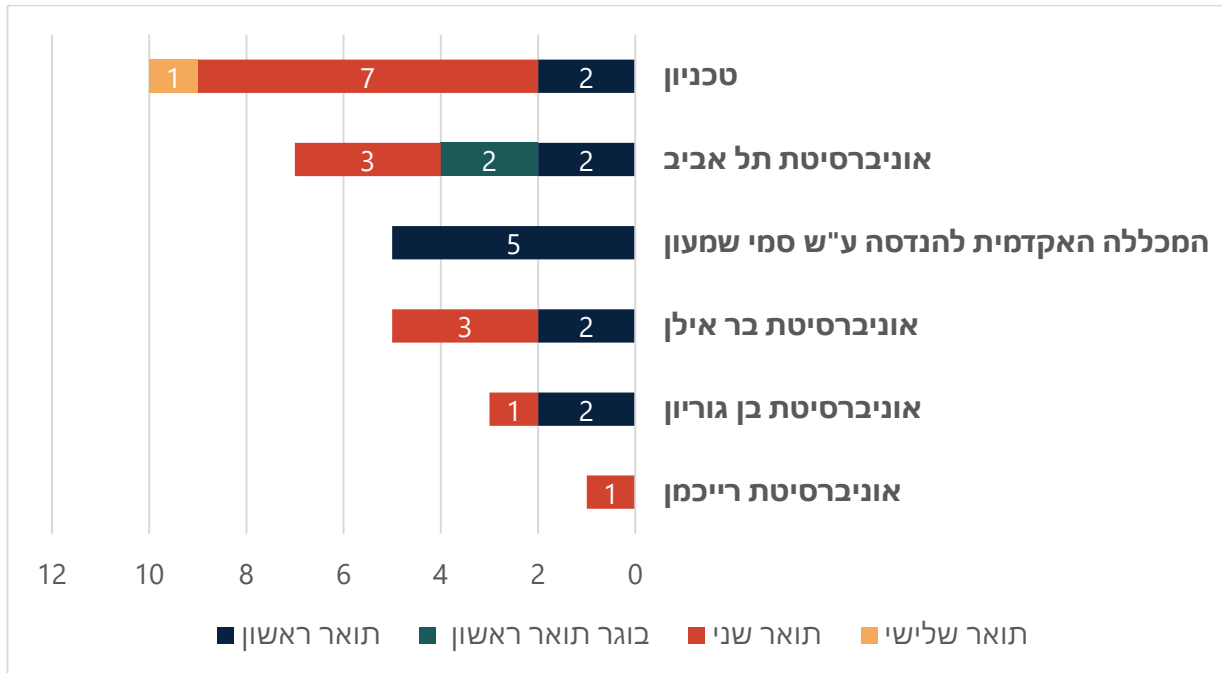
טבלה 9: אוניברסיטאות ומכללות, תארים ומסלולים במוסדות בארץ

אוניברסיטה / מכללה	תואר ראשון	לאחר תואר ראשון	תואר שני	תואר שלישי
אוניברסיטת בן-גוריון	הנדסת נתונים (מערכות תוכנה ומידע) סטטיסטיקה וניתוח נתונים (מדעי החברה)		למידה חישובית וניתוח נתוני עתק (מערכות מידע)	
אוניברסיטת בר-אילן	הנדסת תעשייה ומערכות מידע ניהול לוגיסטיקה עם לימודי מידע (ניהול)		מדעי הנתונים (מתמטיקה) ניהול תעשייתי - תעשייה 4.0 (מדעי החברה) עיבוד מידע ומדעי הנתונים (הנדסת חשמל)	
אוניברסיטת תל אביב	חטיבה בכינה מלאכותית ומדעי הנתונים (מדעי החברה ומדעי החיים) מדעי הנתונים (תשפ"ג)	מאסטר-טראק בהנדסה - AI - אינטליגנציה מלאכותית (הנדסת חשמל) מדעים דיגיטליים להייטק (תשפ"ג)	תחום מערכות (הנדסה מכנית) תחום תפעול ולוגיסטיקה בעידן הדיגיטלי (הנדסה תעשייה וניהול) תחום אנליטיקה עסקית (הנדסה תעשייה וניהול)	

תואר שלישי	תואר שני	לאחר תואר ראשון	תואר ראשון	אוניברסיטה / מכללה
מערכות אוטונומיות (בינתחומי)	מערכות אוטונומיות (בינתחומי) תכן וניהול הייצור (בינתחומי) תכן ייצור ותיב"ם (מכונות) מדעי הנתונים (תעשייה וניהול) ניהול מידע (תעשייה וניהול) עיצוב תעשייתי (ארכיטקטורה ובינוי ערים) תכנון ערים ואזורים (ארכיטקטורה ובינוי ערים)		הנדסת נתונים ומידע	טכניון
	למידה חישובית ומדעי הנתונים (מדעי המחשב)			אוניברסיטת רייכמן
			טכנולוגיות עילית - בינה מלאכותית (חשמל) רובטיקה ומערכות אוטונומיות (מכונות) תיכון ועיצוב המוצר (מכונות) מדעי הנתונים (מכונות) מערכות תעשייה (תעשייה וניהול)	המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון

עיקר המסלולים שבהם נלמדים תכנים הקשורים להנדסה דיגיטלית זה בטכניון (10) בעיקר בתארים מתקדמים. במכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון מירב המסלולים בתואר ראשון (איור 14).

איור 14: התפלגות התארים לפי מוסד



פירוט התכנים שנלמדים במסלולים השונים מסוכמים בטבלה 10.

טבלה 10: התכנים שנלמדים במסלולים השונים

תכנים	מסלול	אוניברסיטה/מכללה
למידת מכונה, כריית ידע, בינה עסקית, מערכות המלצה, עיבוד שפה טבעית	הנדסת נתונים	אוניברסיטת בן-גוריון
הנדסת נתונים, כריית ידע, למידת מכונה, למידה עמוקה, חיזוי אנליטי, נתוני עתק, בינה עסקית	למידה חישובית וניתוח נתוני עתק	
מדע הנתונים, פייתון, למידת מכונה, למידה עמוקה	סטטיסטיקה וניתוח נתונים	
למידת מכונה, תכנות מונחה עצמים, ניהול שרשראות אספקה ומע' לוגיסטיות, תכן הנדסי, סטטיסטיקה תעשייתית וכלי תכנה, למידה עמוקה, אופטימיזציה, תכן מערכות ייצור ורובוטיקה, הנדסת איכות, סדרות עיתיות וחיזוי	הנדסת תעשייה ומערכות מידע	אוניברסיטת בר-אילן
למידת מכונה, למידה עמוקה	עיבוד מידע ומדעי הנתונים	
ניהול טכנולוגיות מידע בתעשייה, ניהול מו"פ טכנולוגי בתעשייה, חקר ביצועים, תעשייה 4.0	ניהול תעשייתי - תעשייה 4.0	

תכנים	מסלול	אוניברסיטה /מכללה
יסודות התכנות, איחזור, תכנות ווב, נתוני עתק, מדעי הנתונים, פייתון	ניהול לוגיסטיקה עם לימודי מידע	אוניברסיטת תל-אביב
למידת מכונה, למידה עמוקה, נתוני עתק	מדעי הנתונים	
מערכות מידע, נתוני עתק, למידת מכונה, למידה סטטיסטית, בינה מלאכותית	מדעי הנתונים (תשפ"ג)	
למידת מכונה, מערכות מידע ובסיסי נתונים, מבני נתונים ואלגוריתמים, שפת C, פייתון	מדעים דיגיטליים להיי-טק (תשפ"ג)	
למידת מכונה, תורת הלמידה החישובית, למידה עמוקה, אופטימיזציה	מאסטר-טראק בהנדסה AI - אינטליגנציה מלאכותית	
רובוטיקה, בינה מלאכותית, שיטות חישוביות רכות בתכן ובקרת מערכות, תיב"מ, גרפיקה בעזרת מחשב, תכן מכני, שיטות תכן, מודלים קומבינטוריים בהנדסה	הנדסה מכנית - תחום מערכות	
מדעי הנתונים, טכנולוגיות נתוני עתק, כריית ידע, למידת מכונה, ויזואליזציה של נתונים	הנדסת תעשייה וניהול - תחום אנליטיקה עסקית	
תכן קווי ייצור	הנדסת תעשייה וניהול - תחום תפעול ולוגיסטיקה בעידן הדיגיטלי	
פייתון, למידת מכונה, למידה עמוקה, אלגוריתמים	חטיבה בבינה מלאכותית ומדעי הנתונים	
עיצוב ממשקים (UI ו-UX), IoT, עיצוב מבוסס פרמטרים, אינטליגנציה מלאכותית	עיצוב תעשייתי	
תכן דיגיטלי, עיצוב תעשייתי, שיטות ייצור מבוססות מחשב, שיטות תכנון מתקדמות, בינה מלאכותית	תכנון ערים ואזורים	
סטטיסטיקה, חקר ביצועים, למידת מכונה, אלגוריתמים, תכנות במערכות, נתוני עתק	מדעי הנתונים	
מסדי נתונים ומחסיני נתונים, בינה מלאכותית, מערכות אוטונומיות	ניהול מידע	
למידה חישובית, ניתוח נתונים מבוסס מודלים, מערכות נתוני עתק, בינה מלאכותית	הנדסת נתונים ומידע	

תכנים	מסלול	אוניברסיטה /מכללה
למידת מכונה, למידה עמוקה, נתוני עתק, מערכות אוטונומיות	מערכות אוטונומיות	טכניון
תיכון לייצוריות ולהרכבה, עקרונות תכן, ייצור מיקרו-מערכות אלקטרומכניות, רובוטיקה, תכן הנדסי	תיכון וניהול הייצור	
פיתוח וייצור מוצרים חדשים, תכנון וייצור ממוחשב, שיטות תכנון מנקודת ראות של חיי המוצר, מערכות ושיטות מידול וייצור מתקדמות כגון: הנדסה לאחור, מערכות אופטיות ומיקרו מערכות, מערכות ייצור גמישות ותהליכי ייצור כגון: הרכבה וייצור חלקים, עיבוד מכני ופלסטי	תכן ייצור ותיב"ם	
נתוני עתק, מסדי נתונים, למידה עמוקה	למידה חישובית ומדעי הנתונים	אוניברסיטת רייכמן
למידת מכונה, פייתון, למידה עמוקה	טכנולוגיות עילית - בינה מלאכותית	המכללה האקדמית להנדסה ע"ש סמי שמעון
תיכון ופיתוח מערכות אוטונומיות, אוטומציה תעשייתית, רובוטיקה, מערכות ייצור ממוחשבות, תכן בעזרת אלמנטים סופיים, טכנולוגיות ייצור	רובוטיקה ומערכות אוטונומיות	
תכן הנדסי ועיצוב, טכנולוגיות ייצור, מערכות ייצור ממוחשבות, תכן בעזרת אלמנטים סופיים	תיכון ועיצוב המוצר	
אחזור מידע, מערכות המלצה, כריית ידע, למידה עמוקה, כלים מתקדמים במדעי הנתונים	מדעי הנתונים	
רובוטיקה ואוטומציה, יישום מערכות מידע בתעשייה, מערכות ייצור ממוחשבות, מדעי הנתונים, יישומי מחשב, תכנות	מערכות תעשייה	

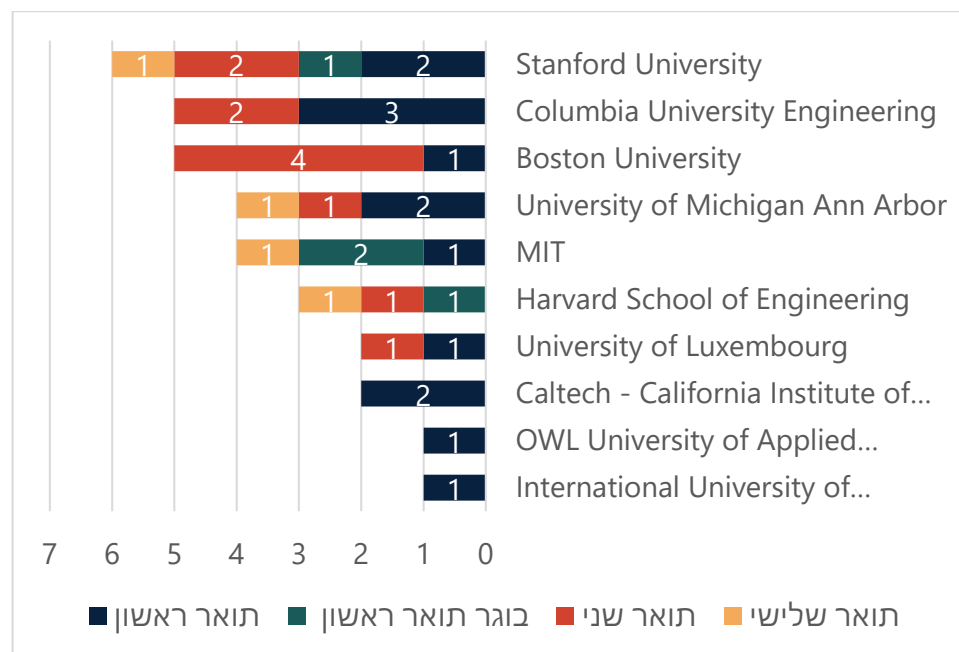
תואר שלישי	תואר שני	לאחר תואר ראשון	תואר ראשון	אוניברסיטה
	Computational and Data-Driven Engineering Mechanics (Civil Engineering and Engineering Mechanics)		Operations Research: Analytics (Chemical Engineering) Operations Research: Engineering Management Systems (Industrial Engineering)	
Data Science (Arts and Sciences)	Data Science (Computer Science and Statistics)	BUSINESS ANALYTICS CERTIFICATE (HBS & SEAS & FAS)		Harvard School of Engineering
			Digital Engineering	International University of Applied Sciences (IU)
Statistics and Data Science		Data Science professional certificate program (IDSS) MicroMasters program	Statistics and Data Science - Minor	MIT
			Digital Engineering	OWL University of Applied Sciences and Arts
Data Science – Minor Science and Engineering (Management Science and Engineering)	Data Science – Minor Artificial Intelligence (Computer science) Systems (Computer science) Information Management and Analytics (Computer science)		Data Science – Minor Science and Engineering – Major Science and Engineering – Minor	Stanford University
	Sustainable Product Creation		Digital Engineering	University of Luxembourg

תואר שלישי	תואר שני	לאחר תואר ראשון	תואר ראשון	אוניברסיטה
Robotics	Robotics	Robotics	Robotics Data Science - Minor	University of Michigan Ann Arbor

באוניברסיטת לוקמבורג , ב- International University of Applied Sciences (IU) וב- OWL University of Applied Sciences and Arts יש תואר בהנדסה דיגיטלית (טבלה 11).

כפי שניתן לראות באיור 16, עיקר המסלולים שבהם נלמדים תכנים של הנדסה דיגיטלית הם ב- Boston University (6). ב- Stanford University עיקר המסלולים הם בתואר שני (4 מתוך 5).

איור 16: התפלגות התארים לפי אוניברסיטה



פירוט התכנים שנלמדים במסלולים השונים מסוכמים בטבלה 12. ניתן לראות כי באוניברסיטאות בהן יש תואר בהנדסה דיגיטלית רשימת התכנים עשירה ומקיפה יותר.

טבלה 12: התכנים הנלמדים במסלולים השונים

תכנים	מסלול	אוניברסיטה
Machine Learning, Soft Robotics, Feedback and Control Systems, Smart City Technologies	Science in Robotics & Autonomous Systems	Boston University
Deep Learning, Machine Learning, Design by Software, Advanced Algorithms, IoT	Data Analytics	

תכנים	מסלול	אוניברסיטה
IoT, Robotics, Autonomous Systems, Embedded systems, Machine learning, Artificial intelligence	Robotics	
Additive Manufacturing, Product Design, Simulation of Physical Processes, Process Modeling and Control	Product Design & Manufacture	
Information Theory, Deep Learning, Machine Learning, Robotics, Cloud Computing, Data Structures, Algorithms	Machine Learning	
Machine Learning, Data Mining	Computing + Mathematical Sciences (CMS)	Caltech - California Institute of Technology
Data Analysis, Artificial Intelligence, Data Science, Machine Learning	concentration in Data and Computational Science	Columbia University Engineering
Digital Operating Models, Systems Engineering, Machine Learning, Algorithms, Data Science, Deep Learning, Supply Chain Analytics, Artificial Intelligence	Operations Research: Analytics	
Data Science, Advanced Programming, Algorithms, Data Analytics, Applications Programming, Designing Digital Operating Models, Machine Learning	Operations Research: Engineering Management Systems	
Supply Chain Analytics, Systems Engineering, Demand & Supply Analytics, Big Data, Deep Learning, Machine Learning, Applications Programming, Algorithms	MS in Operations Research	
Data-driven, Machine Learning, Engineering Mechanics, Computer Systems, Data Science, Machine Learning, Data Science, Deep Learning	Computational and Data-Driven Engineering Mechanics	
Data Systems, Visualization, Machine Learning, Artificial Intelligence, Time Series & Prediction, Linear Models, Machine Learning	Data Science	Harvard School of Engineering

תכנים	מסלול	אוניברסיטה
Statistical modeling, Machine learning, Optimization, Massive data sets, Data acquisition	Data Science (PhD)	
Artificial intelligence, Operations and Supply Chain Management, Programming, Data Systems	BUSINESS ANALYTICS CERTIFICATE	
C/C++, Digital and information technology, Data modeling, Database programming, Algorithms, Data structures, Programming languages, Quality assurance, Industry 4.0, Robotics, Sensors, Mechatronic systems, Software development, Object-oriented programming, Java, Embedded Systems, Smart Devices, Industry 4.0 manufacturing processes, IoT	Digital Engineering	International University of Applied Sciences (IU)
IoT, Robotics, Digital transformation	INDUSTRY 4.0	
Robotics, Computer Science, Python, Machine Learning	Statistics and Data Science	MIT
Machine Learning	Statistics and Data Science (PhD)	
Data science, Statistics, Machine learning	MicroMasters program	
Modern manufacturing technologies, Factory planning, Production data analysis, System engineering, Additive manufacturing, Machine tools, CNC technology	Digital Engineering	OWL University of Applied Sciences and Arts
Programming, Programming in R, Data Science, Machine Learning	Data Science - Minor	Stanford University
Artificial Intelligence, Deep Learning, Machine Learning, Data mining, Algorithms, Robotics	Artificial Intelligence, Systems, Information Management and Analytics	
Programming, Failure Analysis, Data Science, Prediction, Inference, Causality, Machine Learning, Artificial Intelligence	Science and Engineering	

6.1.3 תובנות

אין כיום אסטרטגיה ברורה בעולם לקידום הנושא של הנדסה דיגיטלית בחינוך מהנדסים למרות ההבנה הברורה בחשיבות הנושא.

ע"פ סקירה בארץ ובעולם נראה שאין כמעט תוכניות להנדסה דיגיטלית שעומדות בפני עצמן כתוכניות לתואר.

נכון יותר לשלב הנדסה דיגיטלית בתוכניות הלימוד, לאו דווקא כתואר בפני עצמו אלא בתוך התוכניות או כאשכול (מיינור) או כתכנית לימוד לאורך החיים.

האקדמיות הלאומיות למדעים, הנדסה ורפואה (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine) פרסמה מסמך ובו המלצות לשילוב ייצור מתקדם ללימודי הנדסה לתואר ראשון²³:

1. כל דיסציפלינה הנדסית צריכה לכלול יישום ריאלי (למשל, ייצור).
2. אגודות הנדסה מקצועיות צריכות לעודד בקריטריוני ABET הוספה מפורשת של ייצור (או "יישום").
3. הרחבת מסלולים אופציונליים באמצעות השכלה הנדסית, במיוחד עבור מעבר ממכללות קהילתיות.
4. חיזוק שיתוף הפעולה בין האקדמיה לתעשייה.
5. להציע למידה חווייתית, כגון קורסי אבן ראשה (capstone courses), המדגישים ייצור מתקדם.
6. לכלול למידה חווייתית לאורך לימודי הנדסה.
7. להעסיק בוגרי תואר ראשון במחקר יישומי כדי לרכוש ניסיון מעשי בייצור מתקדם.
8. הרחבת חוויות ייצור מתקדמות שמחוץ לתכנית הרגילה.

האגודה האמריקנית של מהנדסי מכונות (ASME) ואוטודסק (AUTODESK) הובילו פרויקט מחקר רב-שלבי שחשף פער בין תוכניות חינוך לצורכי כוח העבודה של תעשיית הייצור²⁴. הם מציינים רשימה של טכנולוגיות מתפתחות הכוללות:

- תכן לייצור (Design for manufacturing (DfM)).
- תשתית טכנולוגיית של תפעול (Operation Technology (OT)).
- טכנולוגיות מונעות בינה מלאכותית (AI)/למידת מכונה (ML) כמו עיצוב ג'נרטיבי.
- פלטפורמות תוכנה מבוססות ענן כמו תכנון וייצור משולבים בעזרת מחשב (computer-aided design and manufacturing (CAD/CAM)).
- ניהול מחזור חיים של פרויקטים (Project lifecycle management (PLM)).
- מערכות ביצוע ייצור (Manufacturing execution systems (MES)).

²³ Infusing Advanced Manufacturing into Undergraduate Engineering Education. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2022)

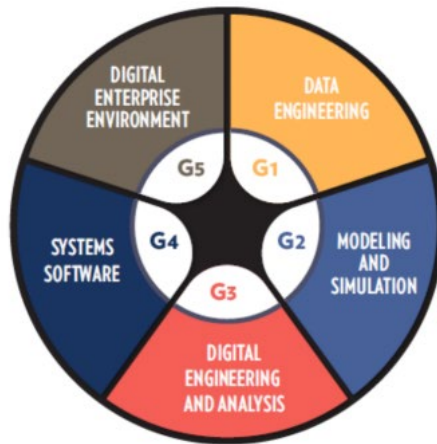
²⁴ <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/pdfs/autodesk-asme-future-of-manufacturing.pdf>

- פתרונות בינה עסקית (BI).
 - ניהול נתונים מרכזי לשיתוף פעולה וניתוח נתונים.
- בנוסף בוצעו ראיונות עם מכללת בראודה ומכללת רופין. (נספח 3). מתוך הראיונות עלו מספר תובנות:
- דגש על למידה חווייתית ושימוש בלמידה יישומית.
 - תכנון תכנית האסטרטגית גם בנושא הנדסה דיגיטלית.
 - יישום מהיר של התכנית האסטרטגית בהטמעה של הנדסה דיגיטלית.
 - סגל – מתחילים עם "משתפי הפעולה" ודואגים למערכת תמיכה פדגוגית והכשרתית.
 - הסטודנטים – שמחים על כל שינוי ומגלים עניין.
- בפרק 6.2 מפורטות הצעות להנדסה דיגיטלית כתכנית המשך בלימודים לאורך החיים ותכנים מומלצים לשילוב בתכניות ההנדסה השונות.

6.2 תכניות מסגרת לחינוך להנדסה ואוריינות דיגיטלית

המהפכה הדיגיטלית מחייבת את הארגונים ליזום וליישם בתוכם טרנספורמציה דיגיטלית בה יהיו שותפים המנהלים והעובדים בארגון, תוך שינוי מתחייב בתהליכים בארגון. ממסד הביטחון האמריקאי הפיץ ב-2018 מסמך אסטרטגיה לקידום הנדסה דיגיטלית בתהליכי הפיתוח, ההנדסה והרכש הבטחוני האמריקאי. במחקר מקיף (Hutchison, Verma and Beling, 2022) שמבוצע במכון סטיבנס לטכנולוגיה, לומדים ומעריכים את תהליכי החינוך וההכשרות הנדרשים בתחומי הנדסה דיגיטלית לאנשי הנדסה וההרכשה, כדי לקדם טרנספורמציה דיגיטלית זו בהנדסת המערכות ובתהליכי הרכש. במסגרת זו גובשה הארכיטקטורה של החינוך וההכשרות מבוססות סימולציות להנדסה דיגיטלית. נכללים בה בין השאר: שני ניתוחי אירוע, חומרים לימודיים לקורסים, ספר לימוד להנדסה דיגיטלית, תשתיות לימוד, תכניות לימוד, תרגילים לתרגול. את יישום התכנית מלווה צוות חוקרים בכירים, המעריכים את תרומות התכנית. ממצאי מחקר מלווה זה יכולים לשמש מפתחי תכניות הכשרה להנדסה דיגיטלית. בנוסף, פותחה במהלך זה מסגרת עבודה כללית (Hutchison & Tao, 2022) למיומנויות הנדרשות להנדסה דיגיטלית (Digital Engineering Competencies Framework) DECF, שיכולה להוות מתווה לתכניות הכשרות להנדסה דיגיטלית מבחינת תחומי לימוד עיקריים ותחומי משנה (איור 18).

איור 18: מסגרת מיומנות הנדסה דיגיטלית (DECF)



FOUNDATIONAL DIGITAL COMPETENCIES	
F1	Digital Literacy
F2	Digital Engineering Value Proposition
F3	DoD Policy/Guidance
F4	Coaching and Mentoring
F5	Decision Making
F6	Software Literacy

LEGEND:
C# - Competency Title
F# - Foundational Competency Title
G# - Competency Group
S# - Competency Subgroup

G1 DATA ENGINEERING		
S1	Data Engineering	C1 Data Governance
		C2 Data Management
G2 MODELING AND SIMULATION		
S2	Modeling and Simulation	C3 Modeling
		C4 Simulation
		C5 Artificial Intelligence/Machine Learning
		C6 Data Visualization
		C7 Data Analytics
G3 DIGITAL ENGINEERING AND ANALYSIS		
S3	Digital Systems Engineering	C8 Digital Architecting
		C9 Digital Requirements Modeling
		C10 Digital Validation and Verification
		C11 Model-Based Systems Engineering Processes
S4	Engineering Management	C12 Digital Model-Based Reviews
		C13 Project and Program Management
		C14 Organizational Development
		C15 Digital Engineering Policy and Guidance
		C16 Configuration Management
G4 SYSTEMS SOFTWARE		
S5	Systems Software	C17 Software Construction
		C18 Software Engineering
G5 DIGITAL ENTERPRISE ENVIRONMENT		
S6	Digital Enterprise Environment Development	C19 Digital Environment Development
		C20 Management
S7	Digital Enterprise Environment Management	C21 Communications
		C22 Planning
S8	Digital Enterprise Environment Operations and Support	C23 Digital Environment Operations
		C24 Digital Environment Support
S9	Digital Enterprise Environment Security	C25 Digital Environment Security

Used with permission of the Systems Engineering Research Center | Stevens Institute of Technology (Hutchison et al. 2021)

בהמשך לאמור לעיל גיבשו במכון סטיבנס נושאים להכללה בהשתלמויות בהנדסה דיגיטלית²⁵ שכוללים בין השאר:

Digital Transformation (from SE to MBSE/DE), Modelling and Simulation, Using Models to Make Decisions, Digital Foundations

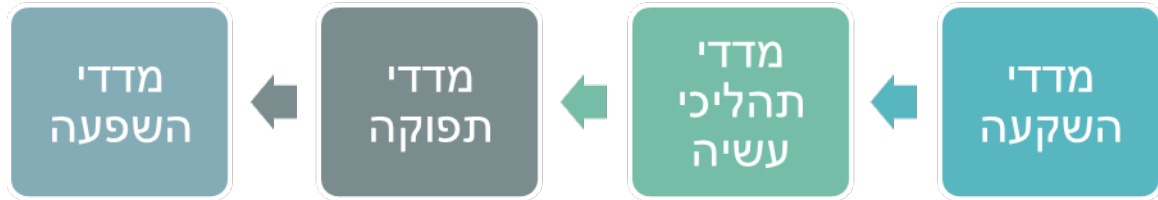
בנוסף, קיימו במכון סטיבנס מספר צוותי חשיבה ועבודה לניתוח הנושאים הכלולים במסגרת העבודה למיומנויות דיגיטליות (DECF) שתוארה לעיל. הצוותים בחנו צרכים במשרד ההגנה האמריקאי להכשרות בתחומי הנדסה דיגיטלית. Hutchison et al. (2021) מתארים תהליך זה ובו גם מודגמים יישומי חלוץ שבוצעו בתחום, ומהם הלקחים והתובנות מיישומי חלוץ אלו. תהליכים אלו אפשרו לצוותי עבודה אלו להמליץ על תכניות השתלמות מתאימות לצרכים שאותרו במשרד ההגנה האמריקאי.

מאמץ נוסף שהובל על ידי צוות מכון סטיבנס, היה לאפיין מדדים ליישום מוצלח ואפקטיבי של הנדסה דיגיטלית בארגונים ובפרויקטים. מקדרמוט ואחרים (2020) מתארים את המאמץ הזה ותובנותיו בפירוט. המאמצים האלו כללו סקר ספרות של מאמרים ודוחות על יישום הנדסה דיגיטלית בגופי ממשל ותעשייה בעיקר בארה"ב, ממצאי סקר שאלונים על יישום הנדסה דיגיטלית בגופי ממשל ותעשייה

²⁵ Professional communication with Dr. Nicole Hutchison- Stevens Institute of Technology

בארה"ב, וסיכום תוכנות מכמה יישומי חלוץ (פיילוטים) שבוצעו בגופי ממשל בארה"ב. מסגרת העבודה המדדים האלו כללה ארבעה תחומים, שמתוארים באיור 19.

איור 19: מדדי יישום ואפקטיביות של הנדסה דיגיטלית בארגונים ובפרויקטים



מדדי השקעה (INPUT), מדדי תהליכי עשייה (PROCESS), מדדי תפוקה (OUTPUT), מדדי השפעה (OUTCOMES & IMPACT). מדדים אלו אמורים לתת תמונה די טובה על מידת האימוץ של הנדסה דיגיטלית על ידי הארגונים ואנשיהם, וכן את האיכויות של ההישגים והתרומות של הנדסה דיגיטלית לפרמטרים המתוארים באיור 20.

איור 20: האיכויות של ההישגים והתרומות של הנדסה דיגיטלית



זו בהחלט רשימת תרומות מרשימה, ומצביעה על הפוטנציאל הגדול של הנדסה דיגיטלית לשיפור איכות כוללת, לשיפור הנגישות למידע ושיפור השיתוף במידע, שיפור ויעול בתהליכי עבודה הגורמים לקיצור מהותי בתהליכים וגמישותם, והתמודדות משופרת עם מערכות מורכבות. כמו כן, מוצגת החשיבות של תמיכת ההנהלה ומנהיגותה להצלחת התהליך ויצירת משאבי אנוש יותר מיומנים.

לארגונים המיישמים הנדסה דיגיטלית מומלץ לעיין בדוח המחקר והסקרים (McDermott et al 2020) הכולל פרטים של התהליכים שננקטו ותוצאותיהם.

6.2.1 מתווה מוצע ללימודי הנדסה דיגיטלית למהנדסים במסגרת תכנית ללימודים לאורך

החיים

הצעד הראשון בפיתוח וקידום הנדסה דיגיטלית היא חינוך והכשרה למנהלים, למהנדסים ולכל סגל העובדים המקצועי העוסק בפיתוח, בהנדסה, בייצור, בתחזוקה ובאספקה של המערכות המורכבות. יש לציין שרוב אוכלוסיית היעד הזאת היא וותיקה, וחלקה הגדול לא זכה להכשרה דיגיטלית מסודרת לאורך חייו.

מוצגת כאן הצעת מתווה ללימודי הנדסה דיגיטלית למהנדסים במסגרת תכנית ללימודים לאורך החיים.

מטרות

גיבוש מתווה ותכנית מסגרת להכשרה מעשית של מהנדסים להנדסה דיגיטלית, במסגרת תכנית ללימודים לאורך החיים למהנדסים בכל הדיסציפלינות המקצועיות ובכל טווח הניסיון והגיל.

שיטה

לימודים של מגוון נושאים בתחומי הנדסה דיגיטלית, לפי פרשיות מקצועיות מוגדרות. כל פרשייה מתוכננת לעמוד בפני עצמה, אבל בין מספר פרשיות מומלצים קשרים מסוימים, כמו: שרשראות מומלצות ללימוד, מקצועות קדם.

בכל פרשיית לימודים הכוונה לכלול הדגמות מעשיות על ניתוחי אירועים, סימולציות, פרויקטים מעשיים מונחים, ותרגילים להתנסות הלומדים.

מתווה ראשוני מוצע

המתווה המוצג כאן הוא ראשוני ובנוי על פי דוח זה ועל סקר תכניות הלימודים הנהוגות בנושא זה בארץ ובעולם. מתווה זה מהווה בסיס להמשך פיתוח התכנית עם מומחים בארץ ובעולם.

נושאי לימוד המוצעים

- מבוא ליישום הנדסה דיגיטלית: הגדרות, מושגים, עקרונות, אתגרים, תועלות ויתרונות, מחסומים ומכשולים.
- יסודות ויישומי פייתון להנדסה.
- יסודות ויישומי אלגוריתמיקה להנדסה.
- הנדסה מבוססת נתונים ודאטה (יישום מדעי הנתונים להנדסה).
- יסודות בינה מלאכותית ולמידת מכונה ויישומן בהנדסה.
- תכן ג'נרטיבי ותכן להדפסות תלת ממד.
- יישום מודלים וסימולציות בתכן והנדסה.
- יסודות הנדסת מערכות, חשיבה מערכתית, הנדסת מערכות מבוססת מודלים MBSE.
- יסודות התאום הדיגיטלי ויישומו בתכן והנדסה.

- יישום והדגמות של הנדסה דיגיטלית בייצור מתקדם ותעשייה 4.0.
- יסודות ויישום תחזוקה חזויה במפעלים ותשתיות וניטור בריאות מבנים.
- תכן והנדסה של מערכות עתירות תוכנה, כולל יישום גישות אגיליות.
- תכן והנדסה של מערכות הכוללות אינטרנט של הדברים IoT.
- תכנון ויישום הנדסה דיגיטלית בהנדסת איכות, אמינות ובטיחות.
- תכנון ויישום הבטחת סייבר למערכות המבוסס על הנדסה דיגיטלית.
- התנסות, תרגול והדגמת שימוש במדגם תוכנות ליישום הנדסה דיגיטלית.
- פרויקט התנסות בפיתוח מערכות חכמות ומקושרות.

6.2.2 המלצה לאשכול אוריינות דיגיטלית

במסגרת צוות אוריינות דיגיטלית שפועל במסגרת מוסד נאמן, נבחנו דרכים שונות לשפר את האוריינות הדיגיטלית של סטודנטים להנדסה (למעט אולי הנדסת חשמל). בין היתר עלתה האפשרות להציע אשכול של "מקצועות בסיס" הנדרשים להכשרה של מהנדס שיהיה בעל כישורים דיגיטליים הנדרשים כבר היום בשוק העבודה. במסגרת זאת הוצעו המקצועות הבאים:

1. פייתון

2. יסודות אלגוריתמיקה

3. איסוף וניתוח נתונים (ביג דאטה) ויישומי AI

4. תכן מונע סימולציה

5. קורס/מעבדה התנסותית-אינטגרטיבית לסיכום הידע באשכול

האשכול מתוכנן כך שלא יהיה משויך לפקולטה ספציפית, אולם יהיה זמין לכל הסטודנטים להנדסה שיהיו מעוניינים בכך, כאשר קורס אחד (קורס/מעבדה התנסותית) יכול להיות בנוי כך שהוא רלוונטי לדיסציפלינה הפקולטית ואולי גם קורס נוסף של תכן מונע סימולציה.

6.2.3 מתווה מוצע של "הזירה ההנדסית טכנולוגית בישראל" (חל"ץ) (מתוך ראיון עם נעמי

בלנק מובילה ויזמת (09.01.2023))

הערה - התכנית עדיין בהכנה ע"י הצוות המקצועי - התהליך בעיצומו

רקע כללי

נושא הלמידה לאורך החיים בתחומי ההנדסה אינו מתקיים בישראל במימון הרגולטור וכל ארגון עושה כמיטב יכולתו ועל פי ראות עיניו בתחום.

הארגונים הגדולים בישראל מקיימים מרכזי למידה פנימיים על פי צרכיהם ובהתאם לגישתם לנושא.

הארגונים הקטנים והבינוניים נעדרים תקציבים ומסגרת לימודית מספקת.

מתוך הבנה והכרה בצורך החלטנו לקדם את אותם מהנדסים בתחומים שלא נלמדו באקדמיה ונוצר בהם חסר של ידע.

למדנו מדגם למידה המתקיים בנושא הבינה המלאכותית והחלטנו לקדם תחום אינטרדיסציפלינרי באופן פרקטי וממצה.

חשוב להדגיש, קצב הפיתוח הטכנולוגי יוצר פער עצום בין הנלמד באקדמיה לבין הדרישות של התעשייה ממהנדס המשתלב בשעריה.

דיונים רבים מתקיימים סביב הפער הזה במטרה לצמצמו עד כמה שניתן ולהשאיר את המהנדסים רלוונטיים למקום עבודתם באמצעות למידה לאורך החיים.

בשלב זה אנו מעוניינים לקדם את התחום באופן שיאפשר למידה אפקטיבית, מעשית - פרויקטלית ועדכנית.

אנו מאמינים ביכולת של המהנדסים הבוגרים להשתלב ביתר קלות בפרויקטים בתעשייה, הפיכתם לרלוונטיים ובכך תרומתם לעצמם ולסביבתם תלך ותתרחב.

מטרת התכנית

- הכשרה מולטי-דיסציפלינרית למהנדסים שסיימו את לימודיהם לפני כ-10 שנים ויותר והמעוניינים להתעדכן בתחומי הנדסה חדשים שאותם לא למדו באקדמיה.
- בפועל ניתן לדבר על upskilling ו- reskilling של בוגרי הנדסה.
- הכשרה שתועיל לאדם ולסביבתו המפעלית.

חשוב להדגיש, נכון להיום מדברים על מחסור במהנדסים. הכשרות מעין אלה מצרפות למעגל העבודה מהנדסים שיכולים להשתלב בתחומי הנדסה מתקדמים - "חכמים" - אם רק יאפשרו להם באמצעות הכשרה מתאימה.

תכנים של התכנית: הנדסה דיגיטלית

- האקוסיסטם הדיגיטלי
- תכנות - צעדים נדרשים להנדסה דיגיטלית
- סיווג ליישומי מחשב
- סיבוכיות ובדיקותיות באמצעות מחשב
- עולם התקשורת.
- עולם ה- IoT
- תפקיד הסימולציה בתהליך הנדסת המערכת
- פיתוח סימולציות במסגרת הנדסה דיגיטלית
- אבטחת סייבר
- WEB 3.0
- מבוא לבינה מלאכותית וניתוח של BIG DATA כנדרש להנדסה דיגיטלית

- תעשייה 4 - תכנון ויישום היבטי הנדסה דיגיטלית

ועוד... (הסדר לא קבוע עדיין).

קהל היעד

מהנדסים שסיימו את לימודיהם לפני כ-10 שנים. לחלקם חסר ידע בחידושי הטכנולוגיה, לחלקם אין מסגרת לימודית במפעל כפי שיש לחברות הגדולות ובכל זאת הם נדרשים לעדכון מקצועי מתמיד כדי להתקדם ולקדם את סביבתם ברמה המקצועית.

תנאי הקבלה

לא נבחנו עדיין. הדגם העומד לרשותנו כרגע הוא מאגד AI שבו הבחירה מתבצעת ע"י המנהלים ומלווה בחינת כניסה. הלומדים נבחרים בהתאם לשילוב העתידי בפרויקטים ספציפיים בתעשייה.

היקף התכנית

קורס מבוא ראשון בן כ-40 שעות. במידה ויהיה ביקוש יהיו קורסי המשך בהתאם לתחומי ההתמחות שנבחר ובהתאם לביקוש ולנדרש בתעשייה.

שיטת הלמידה

מקוון/ פרונטלי/ היברידי.

גורם מממן

עדיין לא נקבע מי הגורם המממן. בעקרון התעשייה אמורה לשלם עבור הכשרת עובדיה. אנו מקווים לקבל מימון מהרשות לחדשנות כדי להקל על התעשייה בתשלום בעיקר עבור מפעלים קטנים ובינוניים החסרים מרכזי לימוד פנימיים וחסרים תקציבים הולמים להכשרה.

* נכתב בלשון זכר כאשר הכוונה למהנדסים ומהנדסות גם יחד!

6.3 כלים ללמידה של הנדסה ואוריינות דיגיטלית, תרגול והדגמה

יש מגוון שיטות וכלים ללמידה, תרגול והדגמה של הנדסה ואוריינות דיגיטלית. בסעיף זה נתמקד ביוזמות למידה שהתקיימו בפקולטה לחינוך למדעים וטכנולוגיה בטכניון, שהובלו ונחקרו על ידי צוות חוקרים בראשות פרופ' (אמריטוס) איגור ורנר. צוות חוקרים זה התמקד בשימוש בכלים דיגיטליים כדי ללמד ולתרגל הנדסה ואוריינות דיגיטלית. כלומר למעשה לכלים הדיגיטליים היה תפקיד כפול - ללמד באופן אפקטיבי הנדסה דיגיטלית, ולהדגים ללומדים כלים דיגיטליים מעשיים. הכלים הדיגיטליים ששימשו ללמידה היו: מודלים וסימולציות, מציאות רבודה (AR) ומציאות וירטואלית (VR).

במפגש פורום חינוך מהנדסים במאה ה-21 בנושא יוזמות חינוכיות מתקדמות, הציג פרופ' איגור ורנר שימוש במודלים וסימולציות, מציאות רבודה ומציאות וירטואלית להוראת סטודנטים להנדסת תעשייה וניהול. הנושאים היו תכנות רובוטים, הפעלה והנעה של רובוטים מרחוק. הממצאים העיקריים מסדנאות מעשיות אלו הם שהסטודנטים רכשו ידע על הרובוטים ומרכיביהם, למדו היטב להפעיל את הרובוטים (פיזיים ווירטואליים) בתרחישים שונים ובסביבות שונות. בנוסף רכשו הסטודנטים מיומנויות בתחומי ההבנה וההתמצאות המרחבית.

בצורה דומה מציגים ורנר וקופרמן ועוד (2022) בפירוט התנסות סטודנטים להנדסה ביישום פרויקטי רובוטיקה, תוך שימוש במציאות רבודה ווירטואלית. הסטודנטים רכשו ידע ברובוטיקה, במציאות רבודה ווירטואלית תוך כדי התנסות בפועל. בנוסף הסטודנטים רכשו מיומנויות של חשיבה וראיה מתכללת (אינטגרטיבית). כל המיומנויות הללו תומכות בהבנת ויישום הנדסה דיגיטלית בפרט, ואוריינות דיגיטלית בכלל.

7. סיכום

מסמך זה מסכם היבטים שונים של הנדסה דיגיטלית המסייעים ליזום טרנספורמציה דיגיטלית של תהליכי הנדסה בארגונים:

- מההיבט האסטרטגי - זיהוי אתגרים, הזדמנויות ותועלות של הנדסה דיגיטלית, והצעת מתווים להכנת אסטרטגיה ארגונית ליישום הנדסה דיגיטלית.
- מהיבט החינוכי-הכשרתי - איתור תכניות חינוך והכשרה מובילות בארץ ובעולם של תהליכי הנדסה דיגיטלית וכישורים דיגיטליים, וגיבוש הצעות לתכניות הכשרה מגוונות להנדסה דיגיטלית במסגרות שונות, כמו: אקדמיה, תעשייה, לימודים לאורך החיים.
- מההיבט התהליכי-מתודולוגי - הצגת מתודולוגיות ושיטות מתקדמות נבחרות לתכן בגישות דיגיטליות.
- מההיבט של הערכת פערים במיומנויות דיגיטליות באקדמיה ובתעשייה, על ידי סקר שערכנו באקדמיה ובמגזר העסקי.

הנדסה דיגיטלית מהווה הזדמנות גדולה לתעשייה ולמגזר העסקי ליישום שיטות תכן והנדסה מתקדמות הנותנות יתרונות גדולים לאלו שמאמצים שיטות אלו בפועל, על ידי פיתוח והנדסה של מוצרים ומערכות מורכבות יותר איכותיות, בפחות זמן ועם חיסכון בעלויות. האקדמיה ומערכות חינוך וההכשרה המתקדמות, יכולות להיות בעלי תרומה משמעותית להכשרת מהנדסי העתיד במתודולוגיות ובפרקטיקות של הנדסה דיגיטלית, ולשדרוג ההון האנושי ההנדסי והניהולי הקיים במסגרת תכניות חינוך לאורך החיים.

מסמך זה נועד לשמש מסמך מנחה למאמצים חשובים ומגוונים אלו.

פורום חינוך מהנדסים למאה ה-21 הפועל במסגרת מוסד שמואל נאמן בטכניון, ממשיך ביוזמותיו ובפעילויותיו לקידום הנדסה דיגיטלית באקדמיה ובתעשייה, על בסיס הממצאים והתובנות הכלולות במסמך זה.

8. מקורות

BCC Publishing Staff (April 2020). Innovation Spotlight: Artificial Intelligence

BCC Publishing Staff (August 2021). The Internet of Things

BCC Publishing Staff (February 2022). Global Artificial Intelligence (AI) Market: Investments vs Potential

BCC Publishing Staff (March 2022). Digital Twin Market

BCC Publishing Staff (May 2022). Sensors for the Internet of Things (IOT): Global Markets

Bradbury, S., Carpizo, B., Gentzel, M., Horah, D., & Thibert, J. (2018). Digitally enabled reliability: Beyond predictive maintenance. McKinsey and Company.

Brossard, M., Chaigne, S., Corbo, J., Mühlreiter, B., and Stein, J.P. (2022). Digital representations of physical products are coming to life. Here's how to make them work for you. McKinsey and Company.

Chui, M., Collins, M. and Patel, M. (November, 2021). IoT value set to accelerate through 2030: Where and how to capture it. McKinsey Company

Coşkun, S., Kayıkcı, Y., & Gençay, E. (2019). Adapting engineering education to industry 4.0 vision. *Technologies*, 7(1), 10.

Das, S., Kleinke, D. K., & Pistrui, D. (2020, June). Reimagining engineering education: does industry 4.0 need education 4.0?. In 2020 ASEE Virtual Annual Conference Content Access.

Dattner, I. (September 2022). Design Principles for Digital Twins. [Presentation]. 'Software and Data' conference .

Davidyan, G., Bortman, J., & Kenett, R. (2021, January 18-19). Developing a new digital twin for a rail system: The Gordon Center for Systems Engineering. Ben-Gurion University in the Negev, The Samuel Neaman Institute.

Decaix, G., Gentzel, M., Luse, A., Neise, P., and Thibert, J. (2021). A smarter way to digitize maintenance and reliability. McKinsey and Company.

Generative Design on the Cloud <https://www.engineering.com/story/generative-design-on-the-cloud>

Grodzki, J., Ortelt, T. R., & Tekkaya, A. E. (2018). Remote and virtual labs for engineering education 4.0: achievements of the ELLI project at the TU Dortmund University. *Procedia manufacturing*, 26, 1349-1360.

- Hari, A., Weiss, M. P., & Zonnenshain, A. (November, 2004). ICDM-an integrated methodology for the conceptual design of new systems. International Conferences and Events (ICE) Australia.
- Huang, J., Gheorghe, A., Handley, H., Pazos, P., Pinto, A., Kovacic, S., ... & Daniels, C. (2020). Towards digital engineering: the advent of digital systems engineering. *International Journal of System of Systems Engineering*, 10(3), 234-261.
- Hutchison, N., & Tao, H. Y. S. (2022). The Digital Engineering Competency Framework (DECF): Critical Skillsets to Support Digital Transformation. *INSIGHT*, 25(3), 35-39.
- Hutchison, N.H., D. Verma, P. Beling. 2022 Final Technical Report: DAU DIGITAL SIMULATIONS (BASE YEAR). Hoboken, NJ: Systems Engineering Research Center. Technical Report SERC-2022-TR-003. 26 May 2022.
- Hutchison, N.H., K. Pepe, M. Blackburn, H.Y. See Tao, D. Verma, C. Whitcomb, R. Khan, R. Peak, & A. Baker. 2021. *WRT-1006 Technical Report: Developing the Digital Engineering Competency Framework (DECF) – Phase 2*. Hoboken, NJ: Systems Engineering Research Center. Technical Report SERC-2021-TR-005. 23 March 2021. Available at: https://sercproddata.s3.us-east-2.amazonaws.com/technical_reports/reports/1616668486.A013_SERC%20WRT%201006_Technical%20Report%20SERC-2021-TR-005_FINAL.pdf
- J. D. Salguero Paz and A. A. P. Bustamante, "Applicability of Generative Design in the Construction of UAVs," 2022 7th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), 2022, pp. 106-110, doi: 10.1109/ICCRE55123.2022.9770256.
- Kenett, R. S., & Bortman, J. (2022). The digital twin in Industry 4.0: A wide-angle perspective. *Quality and Reliability Engineering International*, 38(3), 1357-1366.
- Kenett, R. S., & Redman, T. C. (2019). *The Real Work of Data Science: Turning data into information, better decisions, and stronger organizations*. John Wiley & Sons.
- 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.
- Kenett, R., Zacks, S., Gedeck P. (2022). *Modern Statistics: A Computer-Based Approach with Python*. Springer International Publishing.
- Leveson, N. (2012). *Engineering a Safer World, Systems Thinking Applied to Safety*. MIT Press
- Long, D., & Scott, Z. (2011). *A primer for model-based systems engineering*. Lulu. com.
- McDermott, T., Van Aken, E., Hutchison, N., Blackburn, M., Clifford, M., Zhongyuan, Y., ... & Henderson, K. (2020). *Digital engineering metrics*. Technical Report SERC-2020-TR-002 .

Mills, G. (11 September 2019) Barriers to Digital Adoption Report. UCL Bartlett School of Construction and Project Management. <https://getitright.uk.com/live/files/reports/8-giri-ucl-barriers-adoption-future-digital-engineering-technology-1-452.pdf>

Mussomeli, A., Parrot, A., Umbenhauer, B., & Warshaw, L. (2020). Digital Twins Bridging the physical and digital. Deloitte Insights.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2022. Infusing Advanced Manufacturing into Undergraduate Engineering Education. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26773>

nTopology. THE ENGINEERING GUIDE Generative Design <https://ntopology.com/generative-design-guide/#:~:text=benefits%20and%20limitations,-,What%20is%20Generative%20Design%3F,on%20user%2Ddefined%20engineering%20requirements> .

Peleg E., Shoshany S., Yudilevitz G., Zonnenshain (2022). Model-Based Integrated Conceptual Design Methodology, a research report for the Gordon Center for Systems Engineering, Technion, 2022.

Peleg, E., Shoshany, S., Zonnenshain, A. (2021) Model Based Integrated Conceptual Design Method (MBICDM). The Gordon Center for Systems Engineering, Technion

Peleg, E., Shoshoni, S., Zonnenshain, A. and Yudilevitch, G. (2022) Model Based Integrated Conceptual Design Method (MBICDM). <https://gordon-se.technion.ac.il/publications>

PTC. A Beginner's Guide to Generative Design <https://www.ptc.com/en/blogs/cad/beginner-guide-generative-design>

Rajneesh Jaisawal and Vandana Agrawal 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1104 012036 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1104/1/012036/pdf>

Rogers III, E. B., & Mitchell, S. W. (2021). MBSE delivers significant return on investment in evolutionary development of complex SoS. Systems Engineering, 24(6), 385-408.

Shahraki, A.M.,Yadav,O.p., and Liano Habitaol. (2017). A review on degradation modelling and its engineering applications. International Journal of Performability Engineering 13(3) :299-314

Stackpole, B. (March 2021). Generative Design: A Heavyweight for Lightweighting with Additive. Digital Engineering 247. magazine. https://www.digitalengineering247.com/article/generative-design-a-heavyweight-for-lightweighting-with-additive?oly_enc_id=3570G3199845J9H

US DoD. (2018, June). Digital Engineering Strategy, Office of the Deputy Assistant Secretary of Defense for Systems Engineering.

Verner, I., Cuperman, D., Perez-Villalobos, H., Polishuk, A., & Gamer, S. (2022). Augmented and Virtual Reality Experiences for Learning Robotics and Training Integrative Thinking Skills. *Robotics*, 11(5), 90.

Wong, K. (April 2022). Generative design: Designers discover and learn generative design on YouTube; find AM to be complementary. *Digital Engineering 247. magazine*.
<https://www.digitalengineering247.com/download/digital-engineering-april-2022>

Zio, E. (2016). Some challenges and opportunities in reliability engineering. *IEEE Transactions on Reliability* 65 (4): 1769-1782

Zonnenshain, A., Kenett, R.S. Quality 4.0-The Challenging Future of Quality Engineering. *Quality Engineering* (2020).

זותן, ד. וחברת סיסטמטיקס. (13 מרץ, 2022). "הדרך לחדשנות בפיתוח וייצור עוברת דרך תכנון והדפסת תלת-ממד". דה-מרקר. <https://www.themarker.com/labels/3d/2022-03-13/ty-article-labels/00000180-5b99-dc66-a392-7fdb994d0000>

זוננשיין אביגדור, פורטונה גלעד. יצור מתקדם חיפה, ישראל, מוסד שמואל נאמן, 2016.
<https://www.neaman.org.il/Advanced-Manufacturing>

חרש, י. (13 יולי, 2022). "בעידן הדיגיטל אנחנו יודעים הכל, אבל לא יודעים כמה מים שותים הילדים שלנו". דה-מרקר. <https://www.themarker.com/markets/2022-07-13/ty-article/premium/00000181-f35a-daef-a79b-f7de8af70000>

כבר לא קוריוז: האם מדפסות תלת-ממד יחוללו מהפכה בייצור התעשייתי? (17 יולי, 2022). דה-מרקר. <https://www.themarker.com/wallstreet/2022-07-16/ty-article/premium/00000182-077f-d7d0-a3ae-cff9ff70000>

עם רובוטים וטקטיקות של גרילה משוחזרים פסלים שנבזזו מהפרתנון. (27 ביולי 2022). הארץ

תוכנה, שבבים, כרייה: המכונת עוברת מהפכה שסוחפת את כל התעשייה (03 ביולי 2022). דה-מרקר. <https://www.themarker.com/wallstreet/2022-07-03/ty-article/premium/00000181-bf9d-d21b-a1eb-ffdd08000000>

נספחים



נספח 1 - הרחבה ודיון על שוק ה-IoT

מתבסס על דו"חות של BCC August 21, May 2022

COVID-19 חיזק את שוק ה-IoT, במיוחד בתעשיות כמו IT, חינוך, בנקאות ושירותי בריאות. מכשירי IoT מיושמים בבתי חולים כדי לעצור את התפשטות הנגיף ולנטר חולים עם מכשירים מחוברים. מכשירי IoT אלו מנתחים את הגורמים והנתונים החיוניים של המטופל ולאחר מכן שולחים נתונים לצוות בית החולים. כדי לעזור לחברות לחזור לתחושת נורמליות כלשהי, נעשה שימוש במערכות IoT באפליקציות למעקב אחר אנשי קשר. עם זאת, אילוץ פיננסי משפיע על אימוץ ה-IoT בתעשייה. שוק ה-IoT צפוי לצמוח מ-370.5 מיליארד דולר ב-2021, ב-CAGR של 27.6%, כדי להגיע ל-1.3 טריליון דולר ב-2026. שוק ה-IoT מצביע על התמקדות גדולה יותר בפלטפורמה פתוחה, המציעה גמישות ועונה על הצרכים הבסיסיים הבאים של IoT:

- אבטחה מקצה לקצה של סודיות נתונים, מכשירים ויישומים. זהו אחד החששות הגדולים ביותר, יחד עם פרטיות הנתונים, והוא יהווה גורם קריטי להערכת הצלחה או כישלון של פלטפורמה זו בעתיד.
- יכולות מדרגיות מתאימות לצרכים הנוכחיים והעתידיים עבור יישומי IoT. יכולות מיקרו-מדרוג צומחות כדרך לענות על צורכי מדרגיות ספציפיים של משאבים.
- פרוטוקולים מבוססי תקנים פתוחים לתקשורת נתונים ולאינטגרציה עם מערכות עסקיות ומערכות עורפיות אחרות. מערכות מדור קודם עוברות לאט לאט לארכיטקטורה פתוחה יותר. תמיכה במספר מכשירים וסוגים של נקודות קצה הופכת חשובה.
- גמישות לפריסת פלטפורמות בתוך (on premise) או על תשתית אחסון נתונים חיצונית (Data Center או הענן) בהתאם למדיניות ולצרכים של הישות העסקית. מודל ה-PaaS (Platform-as-a-Service) מתפתח כדי לענות על הדרישה הזו.

שלוש קטגוריות שונות של פלטפורמות IoT תוכננו לתת מענה לצרכים מגוונים: ניהול מכשירים ובקורות (Device Management Platforms), יישומים (Application Enablement Platforms) ומרכזי בקרת רשת לתקשורת בין מכשירים ומערכות עורפיות (Network Connectivity Management Platforms).

במהלך שלבי הפיתוח הראשונים, רוב פלטפורמות ה-IoT סיפקו את אחת מהיכולות הנ"ל. עם התקדמות הטכנולוגיה, חלה תפנית הדרגתית של רוב הספקים לעבר פלטפורמות אופקיות מבוססות מודולים המציעות פתרון משולב מלא מקצה לקצה. BCC Research צופה כי מגמה זו תמשיך לגדול, שכן הביקוש לפלטפורמות IoT נישתיות שיכולות לתת מענה לצרכים הייחודיים של פרויקטים גדולים יותר של IoT, כלומר בגזרת הערים החכמות ושירותי הבריאות הדיגיטליים, יגדל בשנים הקרובות. היישום של פלטפורמות אלה נפוץ בשוקי פלטפורמות ה-IoT העסקיות והתעשייתיות. תעשיות יישומים מרכזיות המאמצות פלטפורמות IoT הן שירותי בריאות, רכב, קמעונאות ויוזמות של ערים חכמות של ממשלות.

בתעשיית הקמעונאות יש ביקוש חזק לטכנולוגיות IoT. קמעונאים כמו עליבאבא, אמזון, הום דיפו, נורדסטרום וסטארבקס פועלים לקראת פורמטים חדשים של חנויות, הן מקוונות והן in real life (IRL), הממזגים חוויות וירטואליות ופיזיות באמצעות IoT. רוב הקמעונאים מתמקדים בחוויית לקוח או ביעילות

תפעולית, בנפרד. עובדה זו יוצרת שוק מפוצל. מובילים ראשונים יוצרים הרחבות מותג ייחודיות, בעוד שאחרים מטמיעים את IoT בצורה בלתי נראית יותר במכירות, שיווק וניהול מלאי קיימים. מניע נוסף של IoT הוא הבשלות של טכנולוגיות IoT. קמעונאים השתמשו זה מכבר בטכנולוגיית רדיו, כגון תגי RFID, כדי לעקוב אחר מלאי. לרבים יש קטלוגים מקוונים, אבל הטכנולוגיה ליצירת פעולה קמעונאית חכמה הסתמכה על ערכות כלים מותאמות אישית של פלטפורמות טכנולוגיות אופקיות, כגון ניהול קשרי לקוחות (CRM) או תכנון משאבים ארגוניים (ERP).

נספח 2 - סקר אוריינות דיגיטלית וממצאים

המגזר העסקי

שאלון למגזר העסקי בנושא מיומנויות דיגיטליות

במסגרת העבודה נשלח שאלון, שכלל 6 שאלות על הנושא ו-6 שאלות על מאפייני החברה. השאלון נשלח לכ-90 מנהלי חברות שמתתפים בפורום לחינוך מהנדסים²⁶. בפורום משתתפים בעלי עניין ממגזרים שונים - אוניברסיטאות, מכללות, גופי ממשל ורגולטורים, תעשיית טכנולוגיה עילית, תעשייה מסורתית, מהנדסים צעירים וסטודנטים. רשימת המשתתפים בשאלון, נשענה על רשימת חברי הפורום, נציגי תעשייה מהרבדים השונים: תעשייה עילית, תעשייה מעורבת עילית, תעשייה מעורבת מסורתית ותעשייה מסורתית ממגוון תחומים. בנוסף, על מנת להגדיל את ההיענות, צוות החוקרים שלח את השאלון למנהלי/ות חברות נוספים על בסיס הכרות אישית.

להלן שש השאלות כפי שהופיעו בשאלון:

1. לפי ניסיוןך, מהנדסים שנקלטים אצלך לעבודה-עד כמה רמת ההכשרה הדיגיטלית שלהם מספקת בהשוואה לדרישות התפקיד?
 2. אילו מיומנויות דיגיטליות נדרשות כיום מהמהנדסים/ות בחברתך? (אנא פרטי/ בדומה לרשימה שמופיעה מעלה ונושאים ותחומים נוספים הנדרשים מניסיונכם)
 3. אנא פרטי/ באילו תחומים/מיומנויות דיגיטליות קיים פער בין הידע שהמהנדס/ת מגיע/ה איתו לידע הנדרש לעבודה?
 4. האם בחברתך ניתנות הכשרות פנימיות/חיצוניות למהנדסים/ות בנושאים של מיומנויות דיגיטליות?
 5. במידה והתשובה היא כן: באיזה היקף ניתנות הכשרות פנימיות/חיצוניות למהנדסים בחברתך בתחומים של מיומנויות דיגיטליות?
 - במידה והתשובה היא לא: אנא ציין/ני את הסיבות
 6. איזה מדיניות ממשלתית, לדעתך, תוכל לעודד מעסיקים ומועסקים להשלים פערים במיומנויות הדיגיטליות של המהנדסים/ות?
 7. האם לדעתך, הפער הדיגיטלי יגדל בשנים הקרובות ותידרשנה הכשרות נוספות בתחומים הדיגיטליים למהנדסים בחברתך? פרטי/
- בנוסף הנשאלים נתבקשו לציין לאיזה מגזר שייכת החברה בה הם עובדים, לתאר את סוג החברה והתחום בו היא עוסקת ומה אחוז העובדים בעלי השכלה גבוהה מסך העובדים.

²⁶ הפורום לחינוך מהנדסים הוקם ביוזמה של מוסד שמואל נאמן במטרה לבחון מחדש את החינוך של מהנדסים במוסדות האקדמיים בישראל ולהכשיר דור צעיר של מהנדסים בעלי יכולות לקידום חדשנות בתעשייה עתירת הטכנולוגיה והמסורתית, ורתימת החזית המדעית למטרות אלה.

תיאור העונים לשאלון למגזר העסקי

המענה לשאלון: התקבלו מ-15 מנהלי/ות חברות.

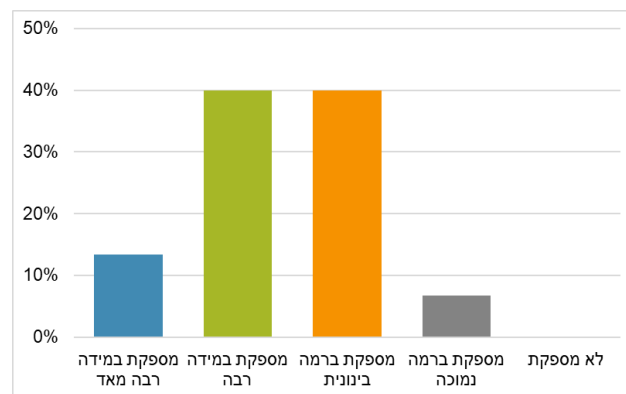
אופי החברות: החברות עוסקות בתחומים שונים: הנדסת רובוטיקה; מערכות חשמליות; רשתות תקשורת; יצור מסבים; יצור שבבי זיכרון; ייצור חלקים מכאניים; חברה תעשייתית לציפוי פני שטה; ייצור ציפים ל-AI; אוטומציה ובקרה; טכנולוגיות חכמות; פיתוח ציוד הנעה מדויק; בטחוני.

60% (9) מהחברות הן חברות ששייכות למגזר התעשייה, 13% הן חברות ביטחוניות, חברת סטארט-אפ וחברת שירותים יעוץ ומכירה, שתי חברות לא ציינו לאיזה מגזר הן שייכות. שליש מהחברות הן חברות בינלאומיות גדולות.

בשליש מהחברות שענו שיעור העובדים בעלי השכלה גבוהה עומד על 0-25%; ב-7% מהחברות שענו שיעור העובדים בעלי השכלה גבוהה עומד על 25-75%; ב-27% מהחברות שענו שיעור העובדים בעלי השכלה גבוהה עומד על 75-100% ובשליש נוסף שיעור זה עומד על 76-100%.

תפקיד בחברה: רוב העונים הם בתפקידים בכירים בחברה, מנכ"ל, יועץ, CTO, מנהל מו"פ, Product owner, ארכיטקט ראשי, מנהל וולידציה, מהנדס תוכנה, מנהל יחידה עסקית.

איור 21: באיזה מידה רמת ההכשרה הדיגיטלית של מהנדסים שנקלטים לעבודה מספקת בהשוואה לדרישות התפקיד



בטבלה 13 ניתן לראות כי בחברות בהן שיעור העובדים בעלי השכלה גבוהה הוא גבוה מאוד (76-100% מסך העובדים) ענו כי הרמה היא בינונית, לעומת חברות בהן שיעור העובדים בעלי השכלה גבוהה הוא נמוך (0-25% מסך העובדים), 60% ענו כי רמת ההכשרה היא מספקת במידה רבה ורבה מאוד.

טבלה 13: פילוח רמת ההכשרה הדיגיטלית של המהנדסים לפי שיעור העובדים בעלי השכלה גבוהה

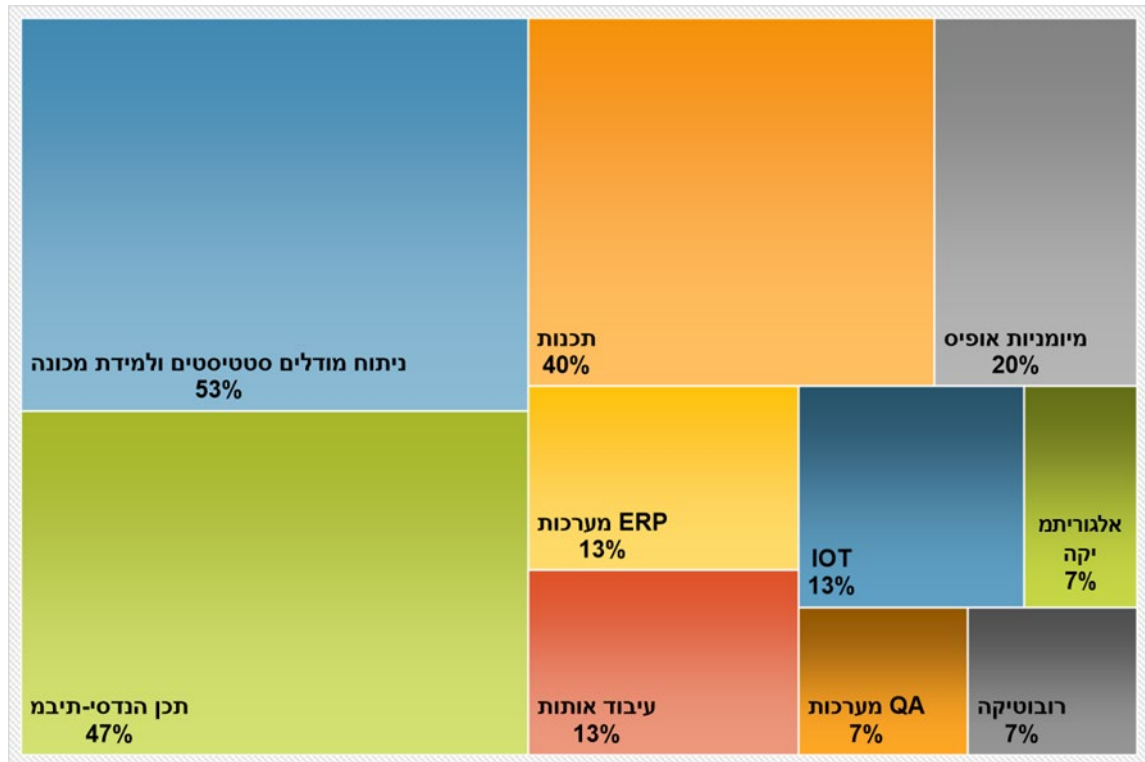
סה"כ	רמת ההכשרה הדיגיטלית של המהנדסים				שיעור העובדים בעלי השכלה גבוהה
	במידה רבה מאוד	במידה רבה	רמה בינונית	רמה נמוכה	
100%	20%	40%	20%	20%	0-25%
100%	0%	100%	0%	0%	26-50%
100%	0%	75%	25%	0%	51-75%
100%	20%	0%	80%	0%	76-100%
100%	13%	40%	40%	7%	סה"כ

שאלה אילו מיומנויות דיגיטליות נדרשות כיום מהמהנדסים עלו הנושאים הבאים (רשימה מלאה ניתן למצוא בנספח 2): יותר ממחצית מהנשאלים ענו כי נדרשת המיומנות של ניתוח מודלים סטטיסטיים

ולמידת מכונה; כמחצית מהעונים ציינו כי נדרש תכן הנדסי-תיב"מ (47%); 40% ציינו כי יש צורך בתכנות – בעיקר צויינה שפות התכנות פייתון ו-C; מיומנויות נוספות שעלו היו מערכות ERP; עיבוד אותות; IOT - אינטרנט של הדברים; מיומנויות אופיס; אלגוריתמיקה; מערכות QA; רובטיקה (איור 22).

התיב"ם הינו גם אינטגרציה מול דיסציפלינות חישוביות אחרות כגון תיב"ם אלקטרוני, תיב"ם אופטי, תוכנות תיעוד של סימוכי ייצור וכד' ונדרש להכיר, להבין ולהכשיר את הסטודנטים בכיוון זה. (יורם שכנר, רפא"ל, טכניון)

איור 22: המיומנויות הדיגיטליות העיקריות הנדרשות מהמהנדסים

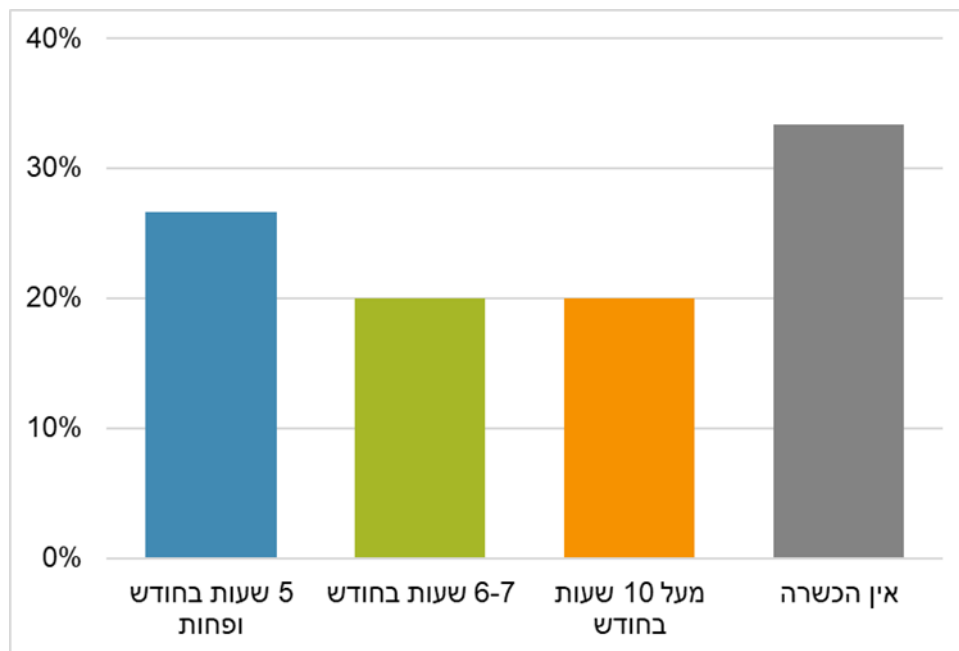


הנשאלים נתבקשו לפרט באילו תחומים/מיומנויות דיגיטליות קיים פער בין הידע שהמהנדס/ת מגיעה/איתו לידע הנדרש לעבודה. מהתשובות לשאלה זו עולים הנושאים הבאים:

- שלושה נושאים ענו כי קיים פער בכל התחומים וכי העובדים החדשים מגיעים עם ידע בסיסי שדורש העמקה ומיקוד תלוי בתחום העיסוק.
- רוב העונים העלו נושאים בדומה לשאלה הקודמת:
 - תכנות, ניתוח מודלים סטטיסטים ולמידת מכונה
 - ידע בתכנות מובנה וארכיטקטורות תוכנה
 - עיבוד אותות
 - עבודה עם software development and versions control
 - לקחת תוכנה מפיתוח לייצור (production)
 - עבודה בענן
 - שיתוף נתונים והעברת ידע

- עבודה בפרויקטים/מעבדות בתחום
 - כמו כן עלו הערות כלליות:
 - חוסר הידע גורם לאי שימוש בטכנולוגיות (לדוגמא: חלק מהחברות משתמשות עדיין בטבלאות אקסל במקום במערכת דיגיטלית תומכת מותאמת בעיקר בגלל החשש שיאבדו שליטה במרחב הדיגיטלי)
 - פער בין התאוריה לפרקטיקה (ניסיון פרקטי) - השתתפות בפרויקטים במהלך התואר בהם המהנדס נחשף לכלל ההיבטים של הפרויקט, כולל הסתכלות על סימולציות, ניהול דרישות וכו' – יכול ליעל ולקצר את עקומת הלימוד.
 - רק נשאל אחד ענה כי לא קיים פער
- לשאלות הנוגעות להכשרות הניתנות בחברה**, 67% ענו כי בחברתם ניתנות הכשרות פנימיות/חיצוניות למהנדסים/ות בנושאים של מיומנויות דיגיטליות. מתוכם בכ- 30% ניתנות מעל 10 שעות בחודש, ב- 30% ניתנות 6-7 שעות בחודש וב- 40% מהחברות ניתנו פחות מ-5 שעות.

איור 23: היקף ההכשרות הפנימיות/החיצוניות הניתנות למהנדסים בנושאים של מיומנויות דיגיטליות



קורסים לדוגמה שהעונים ציינו:

- בעיקר בתחום התכנון באמצעות מחשב
- הכשרת מהנדסים ל - DL/AI²⁷
- השתלמות למנהלים טכניים - כולל היכרות עם הכלים התהליכים וסביבות נדרשות
- השתלמות למהנדסי מערכת
- קורס בזיהוי דיבור

²⁷ DL - Deep learning ,ML - Machine learning ,AI - Artificial intelligence

- קורס בקרה הכולל שימוש ב פיתון/ SIMULINK
 - קורסים בבקרים מתוכנתים, קורס ב – AI
 - רישום שנתי²⁸ LinkedIn learning
 - תכנות בקרים, תכנות מערכות ראייה ממוחשבת - הדרכות פנימיות על ידי מהנדסי החברה.
- 33% מהעונים ענו כי בחברתם לא ניתנים הכשרות מהסיבות הבאות:**
- אין צורך, לומדים תוך כדי עבודה
 - ההנחה היא שכל מהנדס מגיע עם סט כלים ויכולות משלו ולומד את מערכת החברה תוך כדי עבודה. בנוסף לא קיים אדם מרכזי האחראי לנושא
 - הרוב הם עם תואר במקצוע הנדסי, וכבר יש להם את הידע הדרוש
 - יש קצת הכשרות OJT אבל אין קורסים ממוסדים
 - אין תרבות של הכשרת מהנדסי טכנולוגיה ומו"פ (חברת ייצור)
- לשאלה איזה מדיניות ממשלתית, תוכל לעודד מעסיקים ומועסקים להשלים פערים במיומנויות הדיגיטליות של המהנדסים עלו הנושאים הבאים:**
- להשקיע בהסברה לחברות שהעובדים הם הנכס הכי חשוב של החברה ואיכות החברה נקבעת על פי איכות ויכולות המהנדסים.
 - לעודד תוכנית התפתחות לכל עובד בליווי המנהל.
 - הוספת קורסי חובה בתחומים הדיגיטליים לתואר.
 - השתתפות תקציבית על פי שעות לימוד והכשרה שממומנים כרגע על ידי המפעל.
 - הממשלה צריכה לעודד מפעלים להכשיר ולייעד עובד שיהיה אחראי לקדם את החברה לעולם הדיגיטלי. עובד כזה, בעל ידע וסמכות עשוי לקדם את תחום ההכשרות למהנדסים ולגשר על הפער ובכך לשפר ולשנות את המצב הקיים.
 - לחייב מבחן באוריינות דיגיטלית כחלק מהתואר.
 - מימון הקורסים ע"ח הממשלה (למשל, רשות החדשנות), כאשר המפעל תורם את שעות העבודה של המהנדסים שנשלחים לעבור את ההכשרה.
 - פרסום רשימת הטכנולוגיות הנדרשות ביותר ופתיחת קורסי השתלמות בטכנולוגיות אלה.
 - גולציה המחייבת עבודה בסביבה דיגיטלית כדוגמת ה- DoD Digital Transformation תחייב ארגונים לתהליך שינוי.
 - תמיכה חזקה בלימודי המשך\לימודי תעודה \ קורסים שביחד מאפשרים Lifelong learning, רצוי בשיתוף של האקדמיה עם התעשייה.

²⁸ LinkedIn learning - מערכת הלימוד וקורסים - לינקדאין פיתחה מערכת לימוד אונליין של מאות נושאים מקצועיים שמועברים ע"י טובי מרצים מכל העולם.

- תקציבים נוספים שיעודדו קליטה והכשרה של מהנדסים בארגון. למרות שקיימות תוכניות כאלו - הן אינן מספיקות. אם המדינה הייתה מסבסדת למשל 3 חודשי העסקה ראשונים - זה היה מאפשר ביתר קלות לבצע את ההכשרות של העובדים החדשים.

מתוך 11 העונים לשאלה האם לדעתך, הפער הדיגיטלי יגדל בשנים הקרובות ותידרשנה הכשרות נוספות בתחומים הדיגיטליים למהנדסים – 10 ענו כי לדעתם הפער יגדל ורק אחד חשב שאין פער.

ההסברים שניתנו לכך שהפער יגדל היו:

- הטכנולוגיות מתפתחות בקצב גבוה ומתקדמות משנה לשנה, אך הרמה איתה מגיעים המהנדסים נשארת הרבה פעמים קבועה ולא מבחינים בשיפור בנושא. כלומר - הפערים גדלים משנה לשנה.
- העולם צועד דיגיטלית קדימה. הקורונה האיצה משמעותית את קצב והשינויים וההטמעה מצד אחד, ומצד שני חלק גדול מהעובדים לא מסוגל לסגור את הפער וקצב השינוי. בנוסף לכך הצעירים יותר גדלו לעולם הדיגיטלי והמבוגרים יותר חוששים מכך ומאיבוד מיומנותם שנרכשה בניסיון של שנים רבות במערכות ידניות.
- הטכנולוגיה מתפתחת בקצב מהיר ולכן בחברות שלא יבוצעו הדרכות הפער יגדל.
- אי אפשר להסתמך כבר על עובדים עם הרבה ניסיון שישלפו נתונים מהשרוול וצריך שהנגישות לנתונים תהייה גבוהה. שימוש גובר במערכת משולבות תוכנה / חומרה / מכאניקה, שימוש גובר ב AI, קבלת החלטות מבוססות נתונים.
- הפער כנראה יגדל, אם כי במפעל יצרני של תעשיית ייצור מסורתית הקצב כנראה יהיה נמוך.
- ידרשו התאמות לסביבות פיתוח תוכנה חדשות.
- סיבוכיות הפרויקטים, הל"ז הנדרש והאינטגרציה וכן הצורך בשימור יידע תחייב הטמעה והרחבה של כלים לאוטומציה והנדסה דיגיטלית של כלל תהליך הפיתוח
- עם הזמן, התחום מתחדש ומתקדם, ויהיה צורך בעדכון ובהכשרה מתמדת.

מיומנויות דיגיטליות נדרשות כיום מהמהנדסים

מענה לשאלה: אילו מיומנויות דיגיטליות נדרשות כיום מהמהנדסים/ות בחברתך? (אנא פרטי/ בדומה לרשימה שמופיעה מעלה ונושאים ותחומים נוספים הנדרשים מניסיונכם).

- תיב"מ והדפסה תלת ממדית
- שימוש בכלי תכנון מתקדמים עם התממשקות למערכת על המקשרת בין כל הגורמים בחברה בארץ ובעולם (פיתוח, רכש, ייצור, שיווק, מכירות וכו)
- תכנות, ניתוח נתונים, אופטימיזציה, אינטרנט של הדברים
- פייטון, ML, DL, AI
- ידע בסיסי בכלי AI - שימוש ומגבלות
- אנליזות וסימולציות, תכנון מכאני ב D3, תכנות בפיתון, תכנות C/C++/C#, אנליזות נתונים / סטטיסטיקה, שיתוף נתונים, העברת ידע יעילה בעקבות תחלופת עובדים גבוה

- ניתוח נתונים (סטטיסטי ובכלל), אופטימיזציה (על בסיס ניתוח נתונים סטטיסטי), הבנה ב-תיב"מ ובהדפסת תלת-ממד (לא בהכרח ניסיון פרקטי, בעיקר הכרת היכולות והמגבלות), תכן מבוסס סימולציות, יכולת הצגת נושא ושכנוע באמצעות PPT, הכרת תוכנות תפ"י וניהול רצפת ייצור (SAP או דומה), הוספת יכולות אוטומציה על בסיס האינטרנט של הדברים, הוספת יכולות אוטומציה על בסיס רובוטיקה ו-קובוטיקה.
- פייתון, עיבוד אותות, אלגוריתמיקה ומדע נתונים
- תכנות, ניתוח נתונים, אלגוריתמיקה, תכן מבוסס מודלים וסימולציות, למידת מכונה, עיבוד אותות
- עבודת צוות, יכולת לימוד עצמי - איסוף וניתוח נתונים, עבודה עם סביבות כלים - סימולציה, דרישות, בדיקות, בקרת תצורה, תיעוד, הכרות עם תהליכים ונהלים - לדוגמה ניהול מאפייני מפתח, אלגוריתמיקה, תכנות, ניתוח נתונים, תכן מבוסס מודלים וסימולציות, תיב"מ
- עבודה בחברת הייטק. כל העבודה דורשת מיומנויות דיגיטליות. תוכנה, מיילים, יצירה וקריאת גרפים ממוחשבים, עבודה עם סביבות דיגיטליות שונות.
- אופיס (מצגות, אקסל, מסמכים), תיב"מ

המגזר האקדמי

שאלון לאקדמיה בנושא מיומנויות דיגיטליות

במסגרת העבודה נשלח שאלון, שכלל 6 שאלות על הנושא ומספר שאלות על הרקע של הנשאלים. השאלון נשלח לכ-95 חברי סגל חברות שמתפתים בפורום לחינוך מהנדסים²⁹. בפורום משתתפים בעלי עניין ממגזרים שונים - אוניברסיטאות, מכללות, גופי ממשל ורגולטורים, תעשיית טכנולוגיה עילית, תעשייה מסורתית, מהנדסים צעירים וסטודנטים. רשימת המשתתפים בשאלון, נשענה על רשימת חברי הפורום, וכללה את נציגי אקדמיה מאוניברסיטאות ומהמכללות השונות.

להלן שש השאלות כפי שהופיעו בשאלון:

1. אילו מיומנויות דיגיטליות נכון שיהיו לבוגרי/ות הפקולטה שלכם, על מנת שיהיו מוכנים לשוק העבודה או להמשך לימודי מחקר מתקדמים? פרט/י (בדומה לרשימה שמופיעה מעלה ונושאים ותחומים נוספים הנדרשים מניסיונכם)
2. באיזו מידה, לדעתך, בוגרי/ות הפקולטות להנדסה, קיבלו הכשרה העונה לדרישות השוק ומותאמת לעולם הדיגיטלי?
- אם ענית לא, אנא פרט/י אלו הכשרות/תחומים כדאי להוסיף לתוכניות הלימודים?
3. אנא ציין/ני מספר דוגמאות לקורסים/תכנים דיגיטליים הנכללים כיום בתוכניות הלימודים שלכם להנדסה? פרט (שם הקורס ובמידה וידוע לך היקף השעות/נ"ז)
4. ציין/ני דוגמאות לפרויקטים התנסוטיים בתחומים הדיגיטליים הנכללים כיום בתוכניות הלימודים שלכם להנדסה?

²⁹ הפורום לחינוך מהנדסים הוקם ביוזמה של מוסד שמואל נאמן במטרה לבחון מחדש את החינוך של מהנדסים במוסדות האקדמיים בישראל ולהכשיר דור צעיר של מהנדסים בעלי יכולות לקידום חדשנות בתעשייה עתירת הטכנולוגיה והמסורתית, ורתימת החזית המדעית למטרות אלה.

5. האם קלטתם בחמש שנים האחרונות סגל צעיר במטרה לקדם את תחומי ההוראה למיומנויות דיגיטליות?

6. האם לדעתך יש מקום לעדכן את תוכניות הלימודים כך שיכילו יותר נושאים/תחומים הקשורים למיומנויות דיגיטליות? - פרט/י.

בנוסף הנשאלים נתבקשו לציין לאיזה מגזר שייכת החברה בה הם עובדים, לתאר את סוג החברה והתחום בו היא עוסקת ומה אחוז העובדים בעלי השכלה גבוהה מסך העובדים.

תיאור העונים לשאלון – אקדמיה

המענה לשאלון התקבל מ-14 חברי סגל.

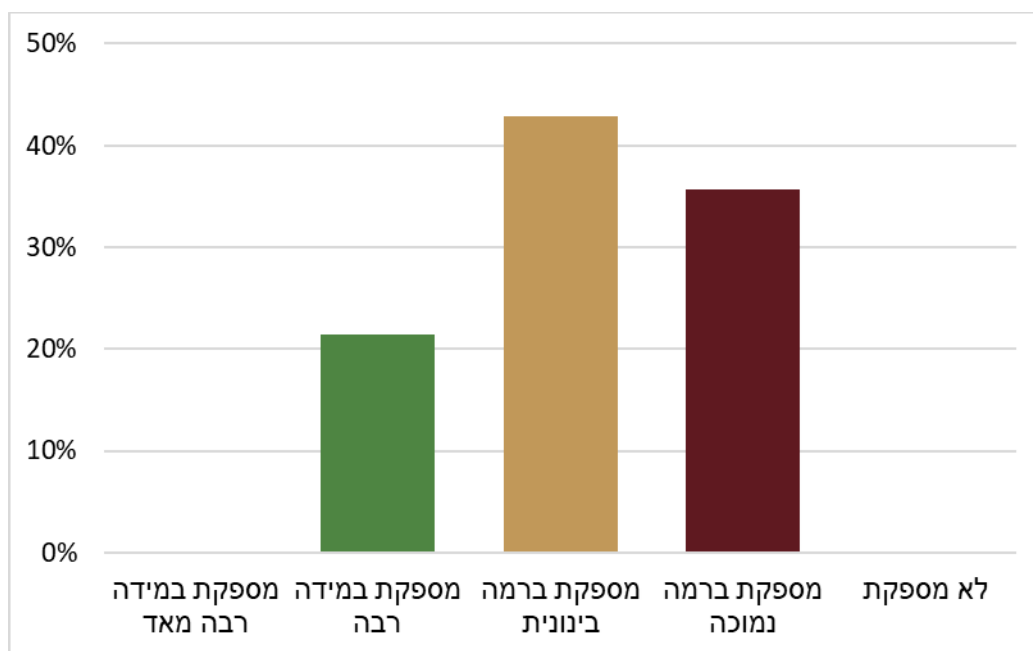
מאפייני העונים: חברי הסגל שענו לשאלון היו גם מהאוניברסיטאות (6) וגם מהמכללות (8). העונים שייכים למוסדות הבאים: אוניברסיטת בן גוריון (2); אוניברסיטת תל אביב (1); מכללת בראודה (3); טכניון (3); מכללת כנרת (1); מכללת עזריאלי ירושלים (3); מכללת שנקר (1).

העונים שייכים לפקולטות ומחלקות הנדסה שונות: הנדסה אזרחית; הנדסה פרמצבטית; הנדסת איכות ואמינות; פיסיקה והנדסה אופטית; הנדסת מערכות; הנדסת תעשייה וניהול; חשמל ומחשבים; מדעי ההנדסה; מרכז היזמות, יצירתיות וחדשנות; מתמטיקה; חשמל והנדסת חשמל. ובתפקידים שונים: חוקר ומרצה (2); מנהל חדשנות, פיתוח ואסטרטגיה (1); מרצה (1); נשיאה (1); סטודנט (1); פרופ' אמריטוס (3); ראש המחלקה (4).

ממצאים שעלו מניתוח השאלון לאקדמיה

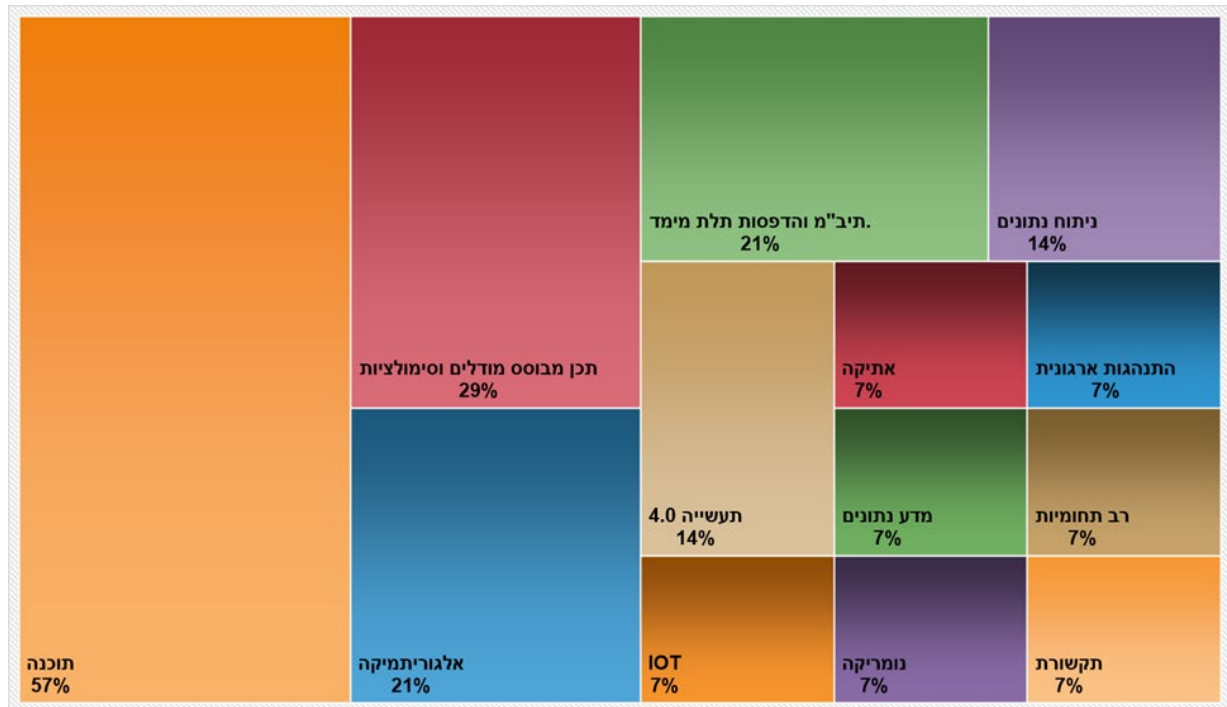
לשאלה הראשונה בסקר: **באיזו מידה, בוגרי/ות הפקולטות להנדסה, קיבלו הכשרה העונה לדרישות השוק ומותאמת לעולם הדיגיטלי**, אף אחד מהעונים לא ענה שההכשרה של הבוגרים מספקת במידה רבה מאוד, כחמישית (21%) ענו במידה רבה וכ-80% ענו שההכשרה מספקת ברמה בינונית (43%) או ברמה נמוכה (36%). אף אחד מהנשאלים לא ענה כי ההכשרה לא מספקת כלל, איור 24.

איור 24: באיזה מידה רמת ההכשרה הדיגיטלית של מהנדסים שנקלטים לעבודה מספקת בהשוואה לדרישות התפקיד?



לשאלה אילו מיומנויות דיגיטליות נכון שיהיו לבוגרים, על מנת שיהיו מוכנים לשוק העבודה או להמשך לימודי מחקר מתקדמים? עלו הנושאים הבאים (רשימה מלאה ניתן למצוא בנספח 2): יותר ממחצית מהנשאלים (57%) ענו כי נדרשת המיומנות של תוכנה ותכנות; כשליש מהעונים ציינו כי נדרש תכן מבוסס מודלים וסימולציות, מיומנויות נוספות שעלו היו אופטימיזציה; אלגוריתמיקה; תיב"מ והדפסות תלת מימד; ניתוח נתונים; תעשייה 4.0; IOT; אתיקה; א; מדע נתונים; נומריקה; רב תחומיות ותקשורת, איור 25.

איור 25: המיומנויות הדיגיטליות העיקריות הנדרשות מבוגרים המסיימים הנדסה



הנשאלים התבקשו לציין מספר דוגמאות לקורסים/תכנים דיגיטליים הנכללים כיום בתוכניות הלימודים שלכם להנדסה? פרט (שם הקורס ובמידה וידוע לך היקף השעות/נ"ז).

רוב המשיבים נתנו דוגמאות של קורסים, חלקם קורסים כלליים מעולם התוכן של מחשוב ותכנות כמו פייתון, Matlab, big data, תכנות הנדסי וקורס לשימושים של AI ו-ML בהנדסה. תחום נוסף של קורסים הגיע מעולמות היזמות והחדשנות כגון: חדשנות ויזמות, קיימות אימפקט, הנדסה ועיצוב בעולמות הרפואה, IoT וכד'. חלק מהמשיבים ציינו קורסים ייעודיים המשתייכים לדיסציפלינה אליה הם משתייכים כגון: יסודות הביולוגיה המולקולרית MBSE, (Blast) אופטימיזציה של משתנים מרובים, כימיה אורגנית לפארמה ומזון (Chimera). את הרשימה המלאה של הקורסים ניתן למצוא בנספח 2.

חלק מהנשאלים לא ציינו קורס ספציפי וציינו כי הסטודנטים רוכשים את המיומנויות במעבדות ובפרויקטים באופן כללי. יש צורך בקורסים כגון מבוא לכלכלת היצירתיות, חדשנות ויזמות, וכד', מאחר ואלה קורסים רב מחלקתיים המציבים תחום רחבי המאפשר לסטודנטים לעבוד.

הנשאלים התבקשו להביע את דעתם האם יש מקום לעדכן את תוכניות הלימודים כך שיכילו יותר נושאים/תחומים הקשורים למיומנויות דיגיטליות?

לשאלה זו ענו 13 נשאלים, רב הנשאלים ציינו שיש לעדכן את התוכניות וחלק מהם ציינו כי התוכניות אכן מתעדכנות. הנשאלים שהשיבו שנכון לעדכן את תכניות הלימודים בהיבטי מיומנויות דיגיטליות, ציינו כי:

- יש להכניס תכנים של מדע נתונים, שימוש במערכות מידע, בינה מלאכותית ושימוש בתוכנות מדף לביצוע מטלות שונות (בלמידה ובחיים המקצועיים).
- הדרך להטמיע את המיומנויות הוא על ידי שילובן בקורסים רבים ככל האפשר.
- התוכנית שלנו מעודכנת מאוד ואנו מיישמים את העקרונות של הדרכת מהנדסים במאה ה-21. התוכנית שלנו מעודכנת כל שנה והוכנסו קורסים ומעבדות חדשות בהתאם לדרישות של השוק. קורסים חדשים: פייטון במקום ג'אווה, קורס תעשייה 4.0, עדכון הקורס התנהגות ארגונית, קורס עבודת צוות, קורס בינה עסקית ועוד.
- הנושא של מערכות לניהול כ"א וזמן חסר בתוכניות הלימודים.
- יש לחזק ולהרחיב את המשבצות הרב מחלקתיות בחלוקה של התואר הבנוי מ 160 נ"ז להתמחויות משנה בעלות 16-20 נ"ז.
- יש להרחיב את הקורס מבוא במדעי המחשב כך שהסטודנטים יצאו ממנו עם יכולת תכנות טובה.
- לשלב יישום בקורסים שונים דרך כתיבת קוד, למשל בפיתוח.
- יש צורך להוסיף לקורסים קיימים מרכיבים של סימולציה, עדיף שתכנים אלה יהיו משולבים בתוך הסילבוס של הקורס ויקבלו את ההקשר המתאים.
- דוגמא לעדכון שנעשה, נפתח תואר של הנדסה פרמצבטית עם חוג לאחר תואר (שקול לחצי תואר) במדעי המחשב.

ההסבר לתשובה כי אין צורך לעדכן היה כי יש כרגע דגש יתר על כל דבר דיגיטלי ואנחנו בסכנה ממשית להזניח את העיצוב האנלוגי לחלוטין - להשאיר אותו לסינים. החומרה ההנדסית עדיין עובדת בעולם אנלוגי מתמשך.

הנשאלים התבקשו לענות האם בחמש השנים האחרונות נקלט סגל צעיר במטרה לקדם את תחומי ההוראה למיומנויות דיגיטליות?

8 מתוך 12 עונים ציינו שלא קלטו סגל חדש, רק ארבע ציינו כי קלטו סגל חדש רובו במכללות.

בנוסף, הנשאלים נתבקשו לתת דוגמאות לפרויקטים התנסוטיים, להלן הדוגמאות שניתנו:

- Digital implementation of analogue controllers -- achievement of "low-frequency" equivalence
- הקאטונים
- יזמות 360
- הנדסת תוכנה בשרות הקהילה- פיתוח מיזמים דיגיטליים לעמותות
- PBL - פרוייקט אינטגרטיבי המשלב תכנון ובנייה תוך שימוש בכלים דיגיטליים
- מעבדות רובוטיקה

- מדובר בהנדסה אופטית - אין לנו פרויקטים התנסותיים שהעיקר בהם הוא דיגיטלי.
 - סימולציות תהליכים + ביצוע במעבדה - Dynochem, Visimix
 - אנליזה ותכנון תרופות בעזרת Chimera
 - עיר חכמה
 - פרויקט במדע נתונים הכולל עבודה עם דאטא-סט אמיתי. ביצוע ראיון עם מהנדס תעשייה וניהול. ביצוע שיפור שיטות בארגון.
 - פרויקטים שונים הניתנים בפקולטות, פרויקטים רבי משתתפים במכונות (מכונית מרוץ ועוד)
 - פרויקטים שונים להדגמת התכנים
 - רק בפרויקט הסיום במידה והסטודנט בחר לעסוק בנושא שכזה.
 - תכנון הקריירה האישית - מטלה סיום קורס מבוא לכלכלת היצירתיות - הסטודנטים נדרשים לתכנן את הקריירה שלהם, להגדיר את הערכים המובילים שלהם, לזהות את המכשולים, לחשוב על פתרונות ולעצור לרגע להבין מה מפת הדרכים שאליהם הם נערכים. התשובות של הסטודנטים היו מרגשות ביותר.
- מיומנויות דיגיטליות נכון שיהיו לבוגרי/ות הפקולטה
- מענה לשאלה: אילו מיומנויות דיגיטליות נכון שיהיו לבוגרי/ות הפקולטה שלכם, על מנת שיהיו מוכנים לשוק העבודה או להמשך לימודי מחקר מתקדמים? פרטי/ (בדומה לרשימה שמופיעה מעלה ונושאים ותחומים נוספים הנדרשים מניסיונכם).**
- Most important for engineers is to understand that the world exists in continuous time and the "digital" everything interfaces with the world at discrete timepoints. The related hardware is ADC and DAC. This sampled interface makes "digital" an inferior
 - "אוריינות דיגיטלית - כל אחד מהמיומנויות הנ"ל משתנות בעולם בקצב מהיר, היכולת ללמוד מיומנויות היא המיומנות המרכזית שאותה יש לחזק ולחדד.
 - עולם ה"עיצוב" מכיל בתוכו אלמנטים רבים הרלוונטיים לעולם הדיגיטלי לצד גישות יצירתיות לפתרון בעיות - גם במרחב הדיגיטלי
 - למידת עמיתים בשילוב היכולת ללמוד לבד.
 - "הבנה בסיסית בנושא נתונים ואלגוריתמיקה: לא מיומנות אלא הבנה שתאפשר תקשורת עם מומחים בתחום ושימוש בכלים בתחום.
 - תמונת הטכנולוגיה המודרנית (מחשוב יכולותיו ומגבלותיו כולל אינטרנט של דברים)
 - ידע מקצועי בתחום הרלוונטי בשימוש בכלים מודרניים (תיב"מ למי שעוסק בתכן למשל)
 - בנוסף דרושה הבנה מערכתית ויכולת לנתח
 - מדע נתונים, תעשייה 4.0, התנהגות ארגונית, תכנות, אלגוריתמיקה, עבודת צוות
 - מיומנויות דיגיטליות לפי סדר החשיבות: ניתוח נתונים, אופטימיזציה, תכן מבוסס מודלים וסימולציות, תכנות

- ניתוח נתונים, תכן מבוסס מודלים וסימולציות, אינטרנט של דברים, הדפסת תלת מימד
- עבודת צוות; עבודה עם כלי תוכנה שיתופיים
- עבודת צוות, אתיקה, תקשורת, רב תחומיות
- "קורס תכנות בסיסי - אלגוריתמיקה ושיטות נומריות; שימושים של AI ו ML בהנדסה; יזמות וניהול פרויקטים/תוכנית עסקית - אציין כי אלו כבר ניתנים במירב התארים אצלנו"
- תוכנות בסיסית, סימולציות, תוכנות ייעודיות של אנליזה וגמלון.
- תכנות ברמה סבירה, ניתוח נתונים, נומריקה, אופטימיזציה.
- תכנות, אלגוריתמיקה, תכן מבוסס מודלים וסימולציות, תאום דיגיטלי, אופטימיזציה, תיב"מ והדפסת תלת מימד, תעשייה 4.
- תכנות, אלגוריתמיקה, תכן מבוסס מודלים וסימולציות, אופטימיזציה, תיב"מ והדפסות תלת מימד.

קורסים/תכנים דיגיטליים הנכללים כיום בתוכניות הלימודים להנדסה

טבלה 14: קורסים ותכנים דיגיטליים הנכללים בתוכניות הלימודים להנדסה

שם הקורס	הערות	נ"ז
תכנון אופטי	2ש"ש הרצאה + 1 ש"ש תרגול	2.5
מבוא למחשבים - תכנות בשפת MATLAB (הוזכר פעמיים)		1.5
Digital Control	It has not been offered because it is an elective course and only a few strong students have ever elected it.	2.5
Modelling and simulation of Dynamic Systems	This is a foundation course and includes numerical discrete-time simulation theory and algorithms for continuous-time non-linear state models.	3.5
תכנות הנדסי	3 ש' הרצאה; 2 ש' תרגול	
שימושים של AI ו- ML בהנדסה	3 ש' הרצאה; 1 ש' תרגול	
שיטות נומריות בהנדסה	3 ש' הרצאה; 2 ש' תרגול	
יזמות וניהול פרויקטים/תוכנית עסקית	3 ש' הרצאה	
MBSE אופטימיזציה של משתנים מרובים		

שם הקורס	הערות	נ"ז
מבוא לכלכלת היצירתיות	דוגמאות לקורסים רב מחלקתיים המציבים תחום רוחבי המאפשר לסטודנטים לעבוד בצוותים מולטידיסציפלינריים, ובכך גם ה"שלם הגדול מסך חלקיו" ומתבצעת למידת עמיתים המעצימה את היכולות	
חדשנות ויזמות		
קיימות אימפקט		
הנדסה ועיצוב בעולמות הרפואה		
ה-מטאוורס		
קורס IoT		
קורס בפייטון (הוזכר 3 פעמים)		
קורס מבוא למדמ"ח	בדגש תיאורטי	
קורס אלגוריתמים ומבנה נתונים	בדגש תיאורטי	
קורס סימולציות תהליכים		
DinoChem		
VisiMix		
תכנות בסיסי בפייטון (מבוא לתכנות)		
עבודה עם כימיה אורגנית לפארמה ומזון (Chimera)		
הכרת מסד נתונים (DrugBank ,PDB)		
יסודות הביולוגיה המולקולרית (Blast)		
MATLAB		
תיב"ם		
Big Data		

נספח 3 – סיכומי ראיונות עם מכללת בראודה ועם המרכז האקדמי רופין

הנושאים:

- דוגמאות ופרטים של תכניות לימודים בתחומים של יישום תכניות אוריינות והנדסה דיגיטלית לסטודנטים להנדסה
- האם ניסיתם לשלב אוריינות דיגיטלית בקורסי תוכן רגילים המתאימים לכך?
- איזה כלים הנדסיים דיגיטליים אתם מלמדים?
- איך המרצים והסטודנטים מתייחסים לקורסים אלו?

סיכום ראיון עם פרופ' ח שרית סיון, משנה לנשיא לעניינים אקדמיים, בראודה, המכללה האקדמית להנדסה כרמיאל (22.11.2022)

תיאור התהליך

בדצמבר 2021 התחלנו בתהליך הטמעת אוריינות דיגיטלית בתכניות הלימודים השונות במחלקות ההנדסה השונות. נעשתה הכנה - מרמת המחלקה ועד לרמת המרצה - בליווי, תמיכה וייעוץ מקצועי של מרצים מהמחלקה לתכנה.

הוחלט כי:

- התחומים שיילמדו במסגרת האוריינות הדיגיטלית הם: Big Data, בינה מלאכותית AI, ואלגוריתמיקה.
- המחלקה לתכנה תהיה הגורם המלווה, המייעץ והתומך מול כל מחלקות המכללה.
- המחלקה לתכנה תהיה אחראית על השמת יועץ מקצועי למחלקות האחרות, ברמת הקורס.

השינויים נעשו בכמה רבדים:

- עיבוי קורס קיים עם דגש על נושאי אוריינות דיגיטלית.
 - שילוב קורס חדש במקום קורס קיים.
 - המרת קורס בחירה לקורס חובה לסטודנטים במחלקה.
 - המרת קורס חובה בהתמחות אחת לכלל ההתמחויות במחלקה.
 - הוספת קורסי בחירה.
- אוריינות דיגיטלית: דוגמאות להטמעת תכנים בקורסים קיימים / חדשים במחלקות השונות
- הנדסת ביוטכנולוגיה:

- Big Data הוטמע בקורס ביו-אינפורמטיקה. מרצה הקורס מסתייע ביועץ מהמחלקה לתכנה המסייע לו בהטמעה ובשילוב תכני הקורס.
- הקורס בתכנות הנדסי ואלגוריתמיקה – עובה (מבחינת נ"ז) והוכנסו בו דגשים רלוונטיים.
 - הנדסת מכונות: למידת מכונה - קורס חובה חדש.
 - הנדסת חשמל: למידה עמוקה הפך לקורס חובה לכולם.
 - מתימטיקה שימושית ותעו"ן: כריית נתונים
 - תעשייה 4.0 – קורס בחירה רוחבי הכולל חשיבה הנדסית מתכללת, והתנסות בתעשייה. קורס זה כולל התנסות בכלים של Generative Design (למכללת בראודה הסכם עם PTC), תאום דיגיטלי, כלי תיב"מ וכו'.
- בנוסף שובצו 'נאמני תעשייה 4.0' – סגל המיישם כלים רלוונטיים (כולל אלה של PTC) ומעביר את הידע למעגל רחב יותר של מרצים.

תגובות הסגל והסטודנטים

- רוב המרצים ב-'ראש פתוח'.
- מחלקת תכנה מלווה ומייעצת לכלל סגל המכללה מתוך רצון טוב והבנת חשיבות הנושא.
- הסטודנטים גורסים כי השינוי והתכנים עשויים להועיל להם.

התמחות בתעשייה – המחלקות מקפידות על עמידה בסטנדרטים אקדמיים לאורך ההתמחות.

סיכום ראיון עם פרופ' פרדי גבאי, זיקאן הפקולטה להנדסה, ושרון ניסים, מנהלת היחידה לקידום ההוראה, המרכז האקדמי רופין (03.01.2023).

תיאור התהליך

בפקולטה להנדסה 1411 סטודנטים, 4 תכניות לתואר ראשון: הנדסת תעשייה וניהול, הנדסת מחשבים, הנדסת חשמל ואלקטרוניקה, מדעי המחשב והמידע ותכנית אחת לתואר שני: לוגיסטיקה ושרשרת האספקה הגלובלית.

בפקולטה להנדסה נבנתה תכנית אסטרטגית לפני כשנה ובמסגרת זאת נקבעו תכני מצוינות בתחום AI ו-ML. תכנים אלה הוטמעו בכל ת"ל של הפקולטה: AI, MA – נלמד בכל מחלקה בקורס או במסלול התמחות. כל בוגר יצא עם ידע בסיסי מה זה AI / ML ואיך להשתמש.

- בהנדסת מחשבים

יש אשכול מערכות תוכנה - אשכול זה מעמיק בתאוריה ובמתודולוגיות של פיתוח תוכנה. הקורסים באשכול זה הם: מבוא למערכות לומדות ולמידה עמוקה, פיתוח מערכות מציאות מדומה (Virtual Reality), מערכות זמן אמת, מערכות זמן אמת ניידות ומעבדה במערכות בסיסי נתונים.

- בהנדסת חשמל

יש אשכול מחשבים - אשכול זה מעניק בסיס ידע והתנסות בתחום התוכנה והחומרה של מחשבים. ההתמחות במחשבים מתמקדת בתחום החומרה וכוללת את הקורסים מערכות משובצות מחשב

ומערכות זמן אמת (realtime embedded), תכנון דיגיטלי באמצעות שפות תיאור חומרה (VHDL) ו- ארכיטקטורות מחשבים מתקדמות.

בנוסף יש קורסים לבחירה: מבוא ללמידת מכונה ובינה מלאכותית, תכן מתקדם של מעגלים משולבים ספרתיים (VLSI), בחשמל יש קורס Industrial AI.

מעבדת AI – הוקמה מעבדה הכוללת מאיצי AI, ומערכות עתירות מחשוב שקיבלו מחברות תעשייתיות. באמצעות מעבדה זו מעבירים קורסים יישומיים, פרויקטונים ופרויקטי גמר.

תכנון שבבים – הוכנסו לשימוש כלי CAD נרחבים (שת"פ עם Synopsys). מעבדת VLSI שבאמצעותה מנגישים לסטודנטים יכולות כתיבת מידול וגם קורסי Backend תוך שימוש בכלי CAD דיגיטליים.

▪ הנדסת תעשייה וניהול

התמחויות לבחירה: ייצור ושירות בסביבה הדיגיטלית, מערכות מידע, יזמות עסקית וחדשנות טכנולוגית, מדעי נתונים.

מדעי הנתונים מתבסס על התכנית של הטכניון – תכנית אסטרטגית שמנסה לעשות טרנספורמציה דיגיטלית.

ייצור ושירות בסביבה הדיגיטלית – דגש על צינורות המידע מרצפת הייצור, עיבוד המידע וזיקוק תובנות המובילות להחלטות ומעקב ובקרה.

האקדונים

ברופין מעודדים שימוש בהאקדונים כצורת הוראה:

- האקדון בינה מלאכותית - פיתוח מאיץ חישוב מהיר לבינה מלאכותית.
- האקדון בתחום data science – מודלים של AI או ML לטובת חיזוי.
- אתגר שבבים – גרסה שונה. מלווה בלמידה דיגיטלית על פני מספר שבועות עם שת"פ של אינטל ומובילאי. הפיתוח נעשה על כרטיס FPGA.
- האקדון משותף למספר פקולטות בהובלת תעשייה וניהול – פיתוח פתרונות דיגיטליים לבעיות אמיתיות של הגיל השלישי. שותפים לכך גופים קהילתיים כמו ג'ויינט אשלים.

קורסים חדשים

- תחום הענן – תחום חדש בשת"פ עם אמזון. קורס שמעניק גם תעודה וגם נקודות זכות. קורס זה מועבר גם בהנדסת תעשייה וניהול וגם בהנדסת מחשבים.
- קורס מיומנויות בחדשנות – מועבר בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה ובהנדסת מחשבים בשנה הראשונה. מבוסס על למידה פעילה. בקורס זה "זורקים" את הסטודנטים לאתגר של בניית רובוט (מכונת שנוסעת על מסלול קבוע). הקורס מתבסס על קורס ב-MIT. תוך כדי הקורס הם צוברים ידע והתנסות, שימוש בחמרה ותוכנה, תכנון מערכת וגם נחשפים למחלקות השונות. בסוף הקורס מתקיימת תחרות (מאתגרים במכשולים במסלולים).
- האקדון בינה מלאכותית הפך לקורס עם נקודות זכות. התעשייה שותפה לקורס ומגיעים נציגים מהתעשייה.

מעבדות

- מתעדים להקים מעבדת סייבר בשנה הבאה בנוסף למעבדת AI.
- גישה מרחוק למעבדה דרך VPN לכלל הסטודנטים.

תכניות עתידיות

- בתעשייה וניהול – שינוי של כל צורת הלמידה – למידה דרך סימולציה. שימוש בסימולטורים כיון שחווית הלמידה יותר משמעותית ולאורך זמן.
- Digital twins – תלוי גיוס חברי סגל. הרצון להעצים את התכנים.

שרון ניסים מפרטת לגבי שיטות ההוראה והלמידה

בשנים האחרונות ישנה הבנה שמה שבעבר היה – סטודנט יושב בכיסא ומקשיב למרצה – לא רלבנטי להיום. היום חל מהפך והלמידה היא בדגש על למידה חווייתית בהמון ווריאנטים – לא רק שיעור ותרגיל קצר. שימוש בלמידה יישומית.

כבר בשנה הראשונה הסטודנטים "נזרקים למים". מהווה אתגר גדול ולא פשוט לבנות את הקורס שיהיה ברמה של מיומנויות הנדסיות של שנה א'. שת"פ של מספר רב של חברי סגל.

האקדמונים – בעבר היו מחוץ לתכנית. דוגמאות מאוד טובות שמהוות אתגר עצום ומתאימים לשוק העבודה. מהווים גורם משיכה לסטודנטים.

למידה היברידית – מהשנה הנוכחית בצורה יותר מקצועית במספר קורסים כיחידות לימוד. פורמט משולב שבו 2 מתוך 13 המפגשים בסמסטר הם מפגשים מוקלטים שהוכנו בקפידה (כמו mooc) ובשיעור העוקב המרצה מתקדם לרמה היישומית.

תגובות המרצים – יש הרבה מאוד הכוונה והסברה למרצים. דורש רמת למידה גבוהה וחשיבה רבה. מתחילים עם אנשי הסגל שמשתפים פעולה ("I do"). הם השקיעו הרבה מאוד שעות, יש הרבה תובנות כמו איך מכינים את הלמידה, איך מפרקים למדרגות כך שיעזור לסטודנטים. ה- best practices נאספים ומשותפים לשאר חברי הסגל. חשוב שתהיה חווית מסוגלות וסיפוק.

הסטודנטים – שמחים על השינויים ומאוד רוצים למידה דרך התנסות – למידה פעילה.

יכולת הריכוז בעולמות כאלה יותר טובה מאשר בהנגשת החומר בדרך הקלאסית.



neaman.org.il

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

חינוך