

תפקיד התאום הדיגיטלי בתעשייה 4.0

פרופ' יעקב בורטמן¹ ופרופ' רון קנת²

מבוא

המהפכה התעשייתית הרביעית (תעשייה 4.0) מספקת תשתיות מתקדמות לאיסוף וניתוח נתונים שמאפשרות להביא למקבלי החלטות תובנות והמלצות מבוססות נתונים. הפעילות הזו נוגעת לתחומים רבים כגון פיתוח מוצרים, תכנון תהליכי ייצור, בקרה על תהליכי ייצור, הגנות סייבר, ניהול אנרגיה, ניהול שרשרת אספקה ואחזקה. אחזקה יעילה הכוללת: אחזקה תלויה מצב, קבלת החלטות תפעוליות להורדת עלויות ולהעלאת רמת הבטיחות ושיפור בניהול קשרי לקוחות. יותר מאי פעם, מנהל או מהנדס בכיר במפעל נדרש לבחון את מה שמתבצע על בסיס ניתוח נתונים.

קיימות מספר מסגרות המגדירות את המרכיבים של תעשייה 4.0. דוגמא אחת היא [RAMI4](#) – ארכיטקטורת ייחוס לתעשייה 4.0³. דוגמא שניה היא [ACATECH](#) שפותח גם הוא בגרמניה⁴. מודל הערכת בשלות לתעשייה 4.0 פותח במוסד שמואל נאמן בטכניון. המודל כולל [שאלון](#) הערכה עצמית בעברית⁵.

תעשייה 4.0 משלבת שלושה מרכיבים עיקריים והם:

1. טכנולוגיות חישה המאפשרות מעקב על תהליכים ומערכות
 2. גמישות יצורים המשלבת יכולות כגון הדפסת תלת מימד ורובוטיקה
 3. אנליטיקה מתקדמת המפיקה תובנות מנתונים שמספקים חישנים ומיכולות יצריות מתקדמות
- כל אלה מספקות יכולות מידול המאפשרת לשפר את התכן, לחסוך בניסויים, להגיע לביצועים אופטימליים ולבסוף גם לחסוך באחזקה
- המאמר ירחיב על תפקידי האנליטיקה ומודלים פסיקליים. ינתן דגש לשילוב ביניהם שבה לידי ביטוי בפיתוח "אח תאום" או "כפיל" וירטואלי למפעל פיזי.
- פיתוח תאום דיגיטלי מספק גמישות משמעותית בניטור ואופטימיזציה של תהליכים, בדיאגנוסטיקה מתקדמת ובמודלים פרוגנוסטיים שמספקים תחזיות. נרחיב על הנושאים האלה בסעיף הבא. מטרת המאמר היא להציג תמונה רחבה של הנושא עם הפניה למקורות לקבלת פרטים נוספים.

אנליטיקה בתעשייה 4.0

לאנליטיקה בסביבת תעשייה 4.0, ארבעה תפקידים מרכזיים (המשימות האנליטיות):

1. בקרה וניטור (Monitoring)
2. אבחון ודיאגנוסטיקה (Diagnostics)
3. חיזוי והערכת משמעות (Prognostics)
4. הנחיות מכוונות עשייה והתערבות (Prescriptive analytics)

¹ המחלקה להנדסת מכונות, אוניברסיטת בן גוריון

² מוסד שמואל נאמן בטכניון, אוניברסיטת טורינו באיטליה וקבוצת KPA, רעננה. ron@kpa-group.com

³ <https://www.youtube.com/watch?v=ffIQ2o-5QLo>

⁴ <https://i40mc.de/en/>

⁵ <https://surveys.sni.technion.ac.il/survey/index.php/485943?lang=he>

במסגרת המרכז למצוינות תעשייתית, מוסד שמואל נאמן בטכניון הפיק דוח המפרט את השיטות הסטטיסטיות המשתלבות במשימות האנליטיות בתעשייה 4.0. לדוגמא, אחזקה חזויה מבוססת על מודלים שחוזים את משמעות התפתחות של כשל. המודלים מגיעים מתחום האמינות. במסגרת הזו, ניתן לשלב אמינות בייזינית ומודלים מבוססי AI [4, 5, 9, 10]. דוגמא נוספת היא של בקרת תהליכים שמאפשרת להתריע בזמן אמת על מגמות או שינויים בתהליכי ייצור. בקרת תהליכים סטטיסטית מתבססת על תרשימי בקרה שקיימים גם בגרסה חד ממדית וגם בגרסה רב ממדית. תחום נוסף, מאוד משמעותי, הוא תחום תכנון הניסויים שמאפשר האצת תהליכי רכישת ידע על ידי תכנון התערבויות ממוקדות בתהליכים ובמוצרים. פרטים ב [8, 10, 11 ו 12] ובדוח של מוסד שמואל נאמן בטכניון⁶ עבודה אנליטית ביישומי תעשייה 4.0 נוגעת לתחומים רבים כגון פיתוח, ייצור, רכש, משאבי אנוש, אחזקה ואיכות.

דוגמא לנושאים בתעשייה 4.0, שמקבלים מענה בעזרת אנליטיקה:

1. קשר ישיר למקורות וסוגי מידע רבים
2. יכולת לטפל במידע בהיקף של טרה-בייטים
3. יכולת לשלב מידע מובנה ובלתי מובנה
4. שימוש ביכולות ענן כדי לאפשר אחסון בלתי מוגבל ונגישות למידע בכל מקום ובכל זמן
5. לוח מכוונים שמתעדכן בזמן אמת, המשלב יכולות אנליטיקה להעמקה ו"צלילה" כדי לקבל תובנות אופטימאליות לצורך קבלת החלטות
6. יכולת זיהוי חכם של אנומליות, חריגות ותקלות בייצור ובהרכבה
7. יכולות מידול וסימולציות של מוצרים, מערכות ותהליכים
8. יכולות הערכת אופטימיזציה רב מימדית של מערכות ותהליכים

ראיה מערכתית של אנליטיקה בתעשייה 4.0, מבוססת על ניתוח איכות המידע המופק מאנליטיקה.

איכות המידע, בכינויה *InfoQ*, נקבעת על ידי ארבעה מרכיבים והם – g : מטרות ניתוח הנתונים – X , הנתונים ששימשו את הניתוח – f , שיטות הניתוח שיושמו ו – U התועלת שמופקת מהעבודה. איכות המידע נקבעת תמיד בצורה שמתחשבת במטרות ניתוח הנתונים. ההגדרה של איכות מידע היא: ($InfoQ = U(f(X|g))$). פרטים בספר בשם איכות המידע של קנת ושמואלי [7].

הערכה של *InfoQ* מתבצעת על ידי שמונה ממדים והם:

- רזולוציית הנתונים מול המטרות שהוגדרו
- מבנה הנתונים במקורות המידע השונים
- שילוב נתונים ממקורות שונים
- עדכניות הנתונים
- תאימות בין נגישות נתונים ומטרות מקבלי החלטות ברמות השונות
- הכללה של ממצאים ברמה תהליכית ובהקשר של מוצרים ושירותים שונים
- יישומיות מסקנות הנובעות מהניתוח האנליטי כולל תוכניות פעולה ותהליכי אסקלציה
- תקשור המידע שהופק מניתוח הנתונים ואמצעים לוויזואליזציה עם הנגשה

המסמך ב⁷ סוקר היבטים שונים של ניתוח סטטיסטי ואיכות מידע במטרה לסייע לארגונים לבחון תוצרם בתחום האנליטיקה. המאמר מספק רשימות תיוג מפורטות של איכות המידע לשימוש מהנדסי תהליך, מהנדסי מוצר, מנהלי פיתוח, מנהלי תפעול, אנשי רכש, מדעני נתונים וסטטיסטיקאים תעשייתיים.

⁶ <https://www.neaman.org.il/EN/Data-Analytics-approaches-and-tools-survey-for-promoting-advanced-manufacturing>

⁷ https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3591808

מערכת זמן אמת כחול לבן שמאפשרת ניטור תהליכי עיבוד שבבי בעזרת בקרת תהליכים סטטיסטית יושמה במספר מפעלים בישראל⁸.

מידול מתקדם

שימוש במודלים אנליטיים מבוססי פיסיקה וכימיה הולך וגובר בשנים האחרונות. הדבר נובע מהתקדמות רבה בכלים המשמשים את המהנדס. למשל, כלים בתחומים כמו "אלמנטים סופיים" מאפשרים למדל בצורה טובה ויעילה תופעות מורכבות. מודלים בתחומים כגון מכניקה, דינמיקה, מעבר חום, פיזור מאמצים, חשמל ועוד, נעשו שימושיים וזמינים. יכולת הפתרון הנומרי השתפרה משמעותית, נפח העיבוד והאחסון גדל והתהליכים, כולל ממשקי המשתמש, הפכו להרבה יותר פשוטים ונגישים. בנוסף, מידול תלת ממד שבעבר היה מורכב מאוד ודרש השקעת משאבי זמן ומחשוב רבים, מתאפשר היום למימוש בהשקעה לא גבוהה. הממשק בין כלי תיכון ושרטוט לכלי אנליזה, היכולות הגרפיות וכוח העיבוד מנגישים את כלי המידול לאוכלוסיית המהנדסים והופך אותן לכלי נפוץ. עדיין חובה על המהנדס המבצע את האנליזה, להבין את התאוריה ואת מגבלות הכלי בו הוא משתמש ולבצע בדיקות תקינות והתכנסות.

המידול המתקדם מאפשר לשפר את התכן ולהגיע לרמות גבוהות של אופטימיזציה בתכן וגם לשפר את יכולות ניטור הבריאות של מערכות קריטיות, כגון, מערכות סובבות במטוסים ובמסוקים ובאמצעי תחבורה, במערכות ייצור, במתקני אנרגיה ועוד. במאמרים [6, 13, 14] נעשה שימוש במודלים דינמיים לפיתוח אלגוריתמים לניטור חסין של אלמנטים סובבים, מסבים ותמסורות גלגלי שניים. ב [14] מוצג הקונספט של שימוש במודלים כאלה בשילוב עם ניסויים תומכים, לפיתוח אלגוריתמים מבוססי פיסיקה לניטור מערכות מורכבות. ב [2] מוצג כיצד כלי הניטור מאפשרים את ההתמודדות עם סיכונים הסייבר כולל איתור התקפות על מערכות קריטיות. כלי המידול גם מאפשרים לבצע פרוגנוסטיקה יותר מדויקת. בעוד כלי הדיאגנוסטיקה מאפשרת איתור התחלת התפתחות של פגמים ולהעריך את גודלם או חומרתם, כלי הפרוגנוסטיקה מאפשרים חיזוי והערכה של קצב התפתחות הפגם בהמשך תפעול המערכת ומאפשרים קבלת החלטות מושכלת לגבי עיתוי ביצוע פעולות אחזקה ותיקון נדרשות, ראה [3].

ראוי להדגיש כי כלי הניטור מבוססים על סנסורים אוספי מידע והמאפשרים את ביצוע הדיאגנוסטיקה למערכות המתופעלות. המודלים המתקדמים מאפשרים לתכנן ולשלב סנסורים מדויקים יותר בעלי יחס אות לרעש המשפרים באופן משמעותי את היכולת הדיאגנוסטיקה. למשל ב [1] מוצג שימוש בסיבים אופטיים לפיתוח יכולות מתקדמות לניטור חומרת הנזק המתפתח במסב. ניטור כזה עשוי לחסוך בפעולות אחזקה מיותרות ולהוריד את עלות הקיום.

המדרגה החדשה הנדרשת הינה פיתוח כלים היברידיים המשלבים יכולות מידול מתקדמות, כדוגמת אלה שהוצגו לעיל, עם יכולות אנליטיקה מתקדמות [16, 17]. כלים אלה יאפשרו את השימוש בסימולטורים כדי "ללמד" את מערכות האנליטיקה אשר ישמשו לשיפור נוסף ביכולת הדיאגנוסטיקה והפרוגנוסטיקה הנדרשות בתפעול ואחזקת המערכות.

התאום הדיגיטלי

במסגרת היכולות האנלטיות התרחב שימוש, בתעשייה 4.0, במושג "התאום הדיגיטלי". הכוונה היא לסביבה סימולטיבית המדמה את המפעל הפיזי ואשר מסוגלת לקחת בחשבון את הנתונים הנאספים בטכנולוגיות החישה השונות ואת האמצעים היצורים הקיימים. הפלטפורמה הסימולטיבית מסייעת באופן משמעותי בכל ארבעת המשימות של האנליטיקה.

תפיסת התאום הדיגיטלי מבוססת על שילוב של מודלים פיסיקליים המתארים את התנהגות המכונה ואת תהליכי ההתדרדרות שלה לאורך זמן עם יכולות אנליטיקה אשר מאפשרים את הפקת הלקחים, קבלת ההחלטות ושיפור המודל. המודלים הפיסיקליים יכולים לכלול את מודל הבקרה, מודל העומסים, מודל

⁸ <https://www.youtube.com/watch?v=2V1vG9UGHFs>

השחיקה, מודל התפתחות סדקים ועוד ואילו מודל האנליטיקה אשר מתבסס על נתוני ניסויים ונתוני תפעול מהשטח.

התאום הדיגיטלי משלב חמישה מרכיבים: (1) החלק הפיזי כגון פריסת הציוד בשטח, (2) החלק הוירטואלי שכולל את תוכנות הסימולציה השונות, (3) מרכיב הקישוריות בין הציודים השונים ובין התוכנות בסביבה הוירטואלית, (4) הנתונים במערכת המורחבת גם בעולם הפיזי וגם בעולם הוירטואלי ו (5) והשרותים שמספקת סביבת האח התאום.

הסביבה הפיזית והסביבה הוירטואלית משתפים מידע בעזרת רכיבי הקישוריות. הממשק בין המפעיל ומקבלי ההחלטות מתבצע ברובד השירותים השונים שמספקת המערכת. פרטים נוספים ודוגמאות, כולל שילוב סביבה מדומה וסביבה מורחבת הכוללת גם אמצעים פיזיים וגם אמצעים וירטואליים ניתן למצוא ב [11].

סיכום וכיוונים לעתיד

בסקירה הזו התמקדנו בהקמת סביבה וירטואלית התואמת סביבה פיזית, התאום הדיגיטלי. יכולות מסוג זה מחיבות תשתיות פיתוח ידע מתקדמות מהסוג שקיימות [במחלקה להנדסת מכונות באוניברסיטת בן גוריון](#)⁹. מפעלים שמעוניינים להתקדם לעבר יכולות ברמה של תעשייה 4.0 יכולים להתחיל בהערכה מבוססת שאלון שפיתח מוסד שמואל נאמן כחלק ממודל [IMAM](#)¹⁰, מודל בשלות לסביבה תעשייתית מול אתגרי תעשייה 4.0.

האתגרים להבאת בשורת המהפכה התעשייתית הרביעית לישראל משלבים מחקר אקדמי והטמעה בשטח. כדי לוודא שהיזמות השונות בתחומים האלה ברמה נאותה, יש לבצע פעולות השוואה, בנצ'מרק, מול הטובים בעולם.

המהפכה התעשייתית הרביעית (תעשייה 4.0) מובילה לתשתיות מתקדמות בתחום של האנליטיקה ושל המידול הפיסיקלי. לשילוב בין שני התחומים יש פוטנציאל לקדם את תחומי התעשייה השונים באופן משמעותי. גישת האח התאום מאפשרת כבר היום לעשות שימוש בשילוב הזה לשיפור משמעותי לאורך כל חיי המחזור של מערכות מורכבות. לצורך פיתוח יכולת אח תאום נדרש כבר בשלב בניית הדרישות ותהליכי הנדסת המערכת הראשונים לאפיין אותן. יכולת זאת תלווה את המערכת מלידתה ועד מותה.

המגפה העולמית שפקדה את כדור הארץ ב 2020 שינתה משמעותית את כללי המשחק בסביבה התעשייתית. מגמות של העברת ייצור למזרח הרחוק, ושימוש בקבלני חוץ כמענה לצרכי ליבה נבחנות מחדש. לדוגמא, בארה"ב [קודאק](#)¹¹ זכתה לאחרונה במענק של 765 מיליון דולר ממשלת ארה"ב כדי להקים שם מפעל ליצור רציף של חומרים פעילים המשמשים את התעשייה הפרמצבטית. עד תחילת 2020 רוב הייצור של חומרים פעילים שפותחו במערב עבר לסין, הודו ווייטנאם. דוח של [מוסד שמואל נאמן](#)¹² בטכניון בחן היבטים אלה בהקשר הישראלי ונראה שגם בזה, ישראל תלך בעקבות ארה"ב.

⁹ <https://in.bgu.ac.il/en/engn/me/Pages/meResearchLab.aspx>

¹⁰ <https://www.neaman.org.il/EN/Assessing-the-Maturity-Level-of-the-Industry-for-Advanced-Manufacturing-The-IMAM-Model>

¹¹ <https://cen.acs.org/pharmaceuticals/pharmaceutical-chemicals/Kodak-wins-US-loan-enter/98/i30>

¹² <https://www.neaman.org.il/EN/Economy-and-Society-Adjustments-to-the-Post-Corona-Era-Recommendations>

1. Alian, H., Konforty, S., Ben-Simon, U., Klein, R., Tur, M. and Bortman, J. (2019). Bearing fault detection and fault size estimation using fiber-optic sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 392-407.
2. Gazizulin, D., Cohen, E., Klein, R. and Bortman, J. (2019) Critical Rotating Machinery Protection by Integration of a "Fuse" Bearing. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*.
3. Gazizulin, D., Rosado, L., Schneck, R., Klein, R. and Bortman, J. (2019). A New Efficient Rolling Element–Spall Edge Interaction Model. *International Journal of Fatigue*, 105330.
4. Halabi, A., Kenett, R.S. and Sacerdote, L. (2017) Using dynamic Bayesian networks to model technical risk management efficiency, *Quality and Reliability Engineering International*, 33, pp. 1179–1196.
5. Halabi, A., Kenett, R.S. and Sacerdote, L. (2018) Modeling the Relationship Between Reliability Assessment and Risk Predictors Using Bayesian Networks and a Multiple Logistic Regression Model, *Quality Engineering*, 30, 4, pp. 663-675.
6. Dadon, I., N. Koren, R. Klein and J. Bortman (2018) A realistic dynamic model for gear fault diagnosis, *Engineering Failure Analysis*, Volume 84 pp. 77-100.
7. Kenett, R.S. and Shmueli, G. (2016) *Information Quality: The Potential of Data and Analytics to Generate Knowledge*, John Wiley and Sons.
8. Kenett, R.S. and Redman, T. (2019) *The Real Work of Data Science: Turning data into information, better decisions, and stronger organizations*, John Wiley and Sons.
9. Kenett, R.S. and Zacks, S. (2014) *Modern Industrial Statistics: with applications in R, MINITAB and JMP*. John Wiley and Sons.
10. Kenett, R.S., Faltin, F. and Ruggeri, F. (2018) *Analytic Methods in Systems and Software Testing*, John Wiley and Sons.
11. Kenett, R.S., Swarz, R. and Zonnenshain A. (2020) *Systems Engineering in the Fourth Industrial Revolution: Big data, Novel Technologies, and Modern Systems Engineering*, John Wiley and Sons.
12. Kenett, R.S., Zonnenshain, A. and Fortuna, G. (2016) A road map for applied data sciences supporting sustainability in advanced manufacturing: the information Quality dimensions, *Procedia Manufacturing*, 21, pp 141-148.
13. Kogan, G. R. Klein, J. Bortman (2018), A physics-based algorithm for the estimation of bearing spall width using vibrations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 104, Pages 398-414.
14. Madar, E., Klein, R. and Bortman, J. (2019). Contribution of dynamic modeling to prognostics of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 123, 496-512.
15. Reis, M. and Kenett, R.S. (2017) A structured overview on the use of computational simulators for teaching statistical methods, *Quality Engineering*, 29, 4. pp. 730-744.
16. von Stosch, M., Oliveira, R., Peres, J., and de Azevedo, S. (2014). Hybrid semi-parametric modeling in process systems engineering: Past, present and future. *Computers and Chemical Engineering*, 60(0), 86–101.
17. von Stosch, M., Portela, R. M. C. and Oliveira, R. (2018). Hybrid Model Structures for Knowledge Integration. In M. von Stosch and J. Glassey (Eds.), 12-35, *Hybrid modeling in Process Industries*. CRC Press LLC.