



תאומים דיגיטליים: מניטור מדויק של מערכות שיווק חכמות לאסטרטגיות מותאמות לקוח



יעקב הורניק

פרופ' יעקב הורניק הוא פרופסור אמריטוס בפקולטה לניהול ע"ש קולר באוניברסיטת תל אביב. הוא פרסם כ-80 מאמרים מדעיים בנושאים של שיווק ופרסום במיטב כתבי העת האקדמיים הבין-לאומיים. ספריו (חלקם עם פרופ' פיליפ קוטלר) בנושאים ניהול השיווק, אסטרטגיות בפרסום וסקרים ומשאלים של דעת קהל, הם ספרות חובה ברוב התוכניות לתואר ראשון ולתואר שני במנהל עסקים בישראל. לצד עבודתו האקדמית מילא תפקידים מנהליים והיה סגן דקאן הפקולטה לניהול, דקאן מנהל עסקים במרכז האקדמי פרס, וסגן נשיא המרכז האקדמי גליל מערבי. שימש גם חוקר ומרצה כפרופסור אורח באוניברסיטאות חשובות בעולם: ביה"ס לניהול ע"ש קלוג באוניברסיטת נורת'ווסטרן, ביה"ס לניהול ע"ש בות' של אוניברסיטת שיקגו, ביה"ס לניהול של אוניברסיטת פריז, ביה"ס לניהול בוקוני במילאנו, אוניברסיטת קייפטאון, וביה"ס סאסין לניהול בבנגקוק.

תקציר

טכנולוגיות מתקדמות, כמו בינה מלאכותית, מציאות רבודה ואותות דיגיטליים, הופכות לכלים אנליטיים חשובים בניהול ומחקר מערכות מורכבות. מאמר זה מציג את אחת הטכנולוגיות הדיגיטליות החדישות, המכונה "תאומים דיגיטליים", ואת חשיבותה לניהול בכלל ולתחומים השונים של ניהול השיווק בפרט (ניהול מוצרים וניהול חיי המוצר, ניהול שרשרת האספקה, ניהול מלאי, פרסום וקידום מכירות). תאומים דיגיטליים הם ייצוגים דיגיטליים של ישויות קיימות, המאפשרים חיזויים בהתנהגות הישיות (כולל ישויות אנושיות כמו התנהגות לקוחות), באמצעות ניתוב הישיות ואיסוף וניתוח נתונים ממערכות ניתוב "חכמות". המאמר מציג את יסודות הטכנולוגיה, תוך שימוש בהדגמות מענפים שונים, עומד על המאפיינים הייחודיים לשיטה בהשוואה לשיטות אחרות, וסוקר טכנולוגיות משלימות, שיחד מהוות אסטרטגיה המניבה תועלת לארגונים ולבעלי עניין אחרים.

מאמר זה מבוסס על ששת המאמרים המופיעים ברשימת המקורות תחת Hornik.

(Wang et al., 2024) ולאחרונה גם בשיווק. לשם הבנת הטכנולוגיה הדיגיטלית הזאת חשוב להבהיר שני מושגים.

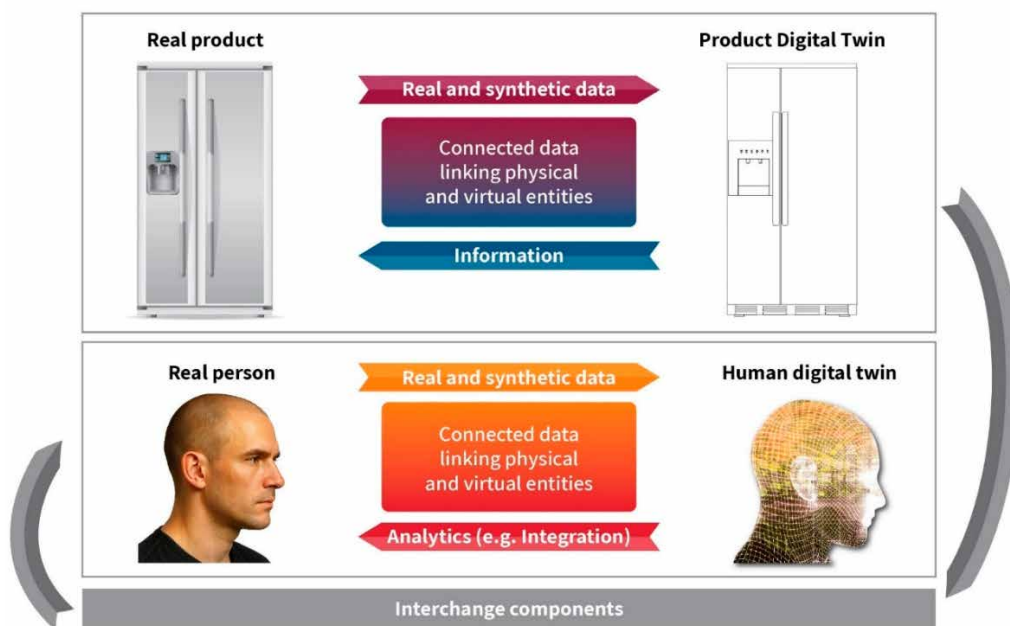
המונח הראשון, Industry 4.0 ("תעשייה 4.0"), מתאר את השילוב רחב ההיקף של טכנולוגיות מידע ותקשורת המאחדות את ההיבטים הפיזיים והדיגיטליים של ייצור ושיווק. ארגונים מצליחים משתמשים באוסף של טכנולוגיות כדי להשיג את היעדים של Industry 4.0: יעילות, מהירות, גמישות והתמקדות בלקוחות. הגורמים המדרבנים את הארגונים הם כוחות השוק, כגון תחרות ומחסור בעובדים מיומנים. ארגונים חייבים למנף את הטכנולוגיות הללו לא רק כדי לבדל את עצמם אלא גם כדי לפתח הזדמנויות עסקיות חדשות. טכנולוגיית "התאום הדיגיטלי" היא גישה חדשנית להבנה טובה יותר של המציאות המדומה במרחב באמצעות ייצוג וירטואלי של העולם האמיתי. היא מאפשרת לארגונים לאתר קשרי גומלין מורכבים בתהליכי הייצור והשיווק, לזהות תמורות ודפוסי התנהגויות מתקדמים, ולגבש את כלל הנתונים לתמונה משולבת אחת.

המושג השני, "האינטרנט של הדברים" (Internet of Things; IoT), מאגד את כל השיטות שעוקבות בזמן אמת אחרי ישויות פיזיות ומוזדות אותן. מדובר בעיקר בחיישנים ורחפנים העוקבים אחר תנועות של סחורות, מלאי, ציוד, טמפרטורה, פעולות ותפוקות, כולל ניטור עובדים ועוד. הנתונים מוזנים ליעדים שונים, ובכללם למודל התאום הדיגיטלי המאפשר תגובה מהירה לתקלות, למחסור או עודף במלאי ולמדפים לא שמישים, ובכך לייעל את תהליך קבלת ההחלטות (Hornik & Rachamim, 2025d).

שימוש נוסף הוא הדמיית תרחישים: מודל של מחסן וירטואלי, למשל, מאפשר לבחון מראש תוצאות והשלכות אפשריות של שינויי תכנון ושיטות עבודה שונות, כגון סדרי אחסון שונים של סחורות, פריסת ציוד על ריצפת המחסן, וניתוב תנועה של עובדים. הנתונים המתקבלים מסייעים בזיהוי התצורות המיטביות של רצפת המחסן מבלי לשבש את הפעילות השוטפת. התאום הדיגיטלי מספק תמונה בזמן אמת של כל פריט ומסייע לייצל את קצב האיסוף והביצוע של ההזמנות, למנוע עודפים או מחסור ולהוזיל עלויות תפעול. בנוסף, על ידי שימוש בתאום דיגיטלי של צי הרכב, מנהלים יכולים לנטר את צריכת הדלק, את התנהגות הנהגים ואת פעילות הרכב בזמן אמת. הדבר מאפשר לזהות צווארי בקבוק תפעוליים, כגון מסלולים משובשים או כלי רכב הדורשים תחזוקה דחופה,

עבור סטיב ליון, מנהל בכיר בחברת דאסו סיסטמס, העניין המקצועי והאישי התמזגו כבר בראשית דרכו המקצועית לכדי שליחות למציאת טכנולוגיה רפואית פורצת דרך. בתו גסי אובחנה עם "תסמונת הטרוטקסיה", שבה האנטומיה של הלב מתפתחת בצורה חריגה. כדי שליבה ימשיך לפעום, בתו נזקקה להשתלת קוצב לב, אך בשל מבנה הלב החריג שלה התהליך היה אמור להיות מסוכן. אי-הוודאות הייתה גדולה, ולמנתחים לא הייתה כל דרך לתכנן ולתרגל מראש את מהלך הניתוח. חברת דאסו סיסטמס מתמחה בפיתוח מערכות הנדסיות מורכבות לתעשיית החלל, הרכב והחקלאות. רוב המערכות הן דיגיטליות, תלת-ממדיות ודינמיות, ובאמצעותן ניתן לפתח סימולציות מורכבות כמו תאומים דיגיטליים. ליון סבר שאם ניתן לפתח סימולציות למכונות הנדסיות, ייתכן שאפשר לעשות זאת גם ל"מכונות ביולוגיות". כך, מתוך שילוב שבין האישי והמקצועי, ליון חשב על הרעיון להוביל בתוך החברה פרויקט חדש ושאפתני, "לב פועם תאום דיגיטלי" של הלב האנושי (Digital Twins; DT), שידמה את המבנה האנטומי, האלקטרו-מכני וההידראולי של הלב. מודל דיגיטלי כזה יאפשר למתמחים לתרגל מגוון רחב של תרחישים ופרוצדורות, לחברות תרופות ומכשור רפואי לערוך ניסויים קליניים בסביבה דיגיטלית, ולמנתחים לתכנן ולהתאמן מראש לקראת פרוצדורות מורכבות, כמו השתלת קוצב לב בילדה עם לב מיוחד. במקום להסתמך על ניסויים בבעלי חיים או על ניסויים קליניים מוקדמים, המודלים הללו מדמים איך הלב האנושי יתפקד בתנאים מגוונים, כולל הפרעות קצב וחריגות מבניות. התוצאה היא קיצור זמן וצמצום עלויות הפיתוח, ושיפורים משמעותיים בבטיחות וביעילות של התהליכים. גסי עברה בהצלחה את הניתוח ה"דיגיטלי", החלימה לחלוטין, וכיום היא ד"ר לנוירוכירורגיה, המתמחה בנוירולוגיה התפתחותית של ילדים.

מתברר שבעידן הדיגיטלי הגבולות בין העולם הפיזי לוורטואלי מיטשטשים. טכנולוגיית התאום הדיגיטלי מגלמת את התמזגות המרחבים הללו, ומציעה פתרונות מרתקים בתכנון, ניהול ושיפור מערכות מורכבות. "לתאומים דיגיטליים" יש פוטנציאל רב לחולל מהפכה בתחומים רבים ומגוונים, בין אם מדובר במכונה בודדת, בפס ייצור שלם, בבניין חכם או אפילו בערים ומדינות. העולם הופך לחכם, מעורר השראה ועמיד יותר בזכות השילוב המופלא בין המרחב הפיזי לדיגיטלי. העולם העסקי החל לאמץ את התפיסה והיכולות של העולמות הוורטואליים ומטמיע אותם בארגון בתחומים שונים (Thomas et al 2026);



מקור: Hornik and Rachamin (2025d)

הוא משמש ככלי רב-עוצמה לשיפור התפוקות והיעילות, ומאפשר לחברות לנתח את ביצועי המכונות, להבין את יחסי הגומלין בין קווי ייצור שונים ולחזות מראש צורכי תחזוקה. גישה יוזמת זו מסייעת במניעת זמני השבתה יקרים ומשפרת את היעילות התפעולית הכוללת. מודלים אלה מתעדכנים בזמן אמת באמצעות נתונים שמגיעים מחיישנים שמחוברים לישות הפיזית. החיישנים אוספים נתונים על פעולת הישות, כמו קצב הייצור, נתוני מכירות, טמפרטורה וצריכת אנרגיה, והמידע הזה מעובד על ידי המודל הדיגיטלי, מה שמאפשר לבצע סימולציות, לנתח בעיות ולמצוא דרכים לשיפור הביצועים של הישות הפיזית. בפיתוח ובהפעלה של תאומים דיגיטליים נעשה שימוש נרחב בבינה מלאכותית (Tao & Qi, 2019).

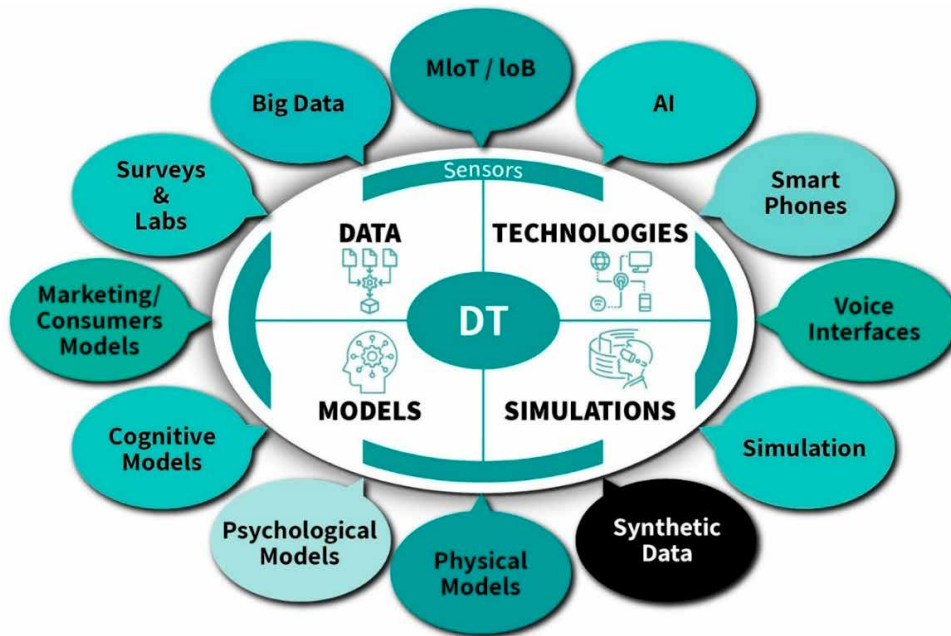
אם כן, תאומים דיגיטליים מציעים גישה חדשנית להבנה טובה יותר של המציאות במרחב באמצעות ייצוג וירטואלי של העולם האמיתי. הם מאפשרים לאתר קשרי גומלין, תמורות ודפוסי התנהגויות מתקדמים, תוך איחודם לתמונה משולבת אחת. אחת הסיבות העיקריות לכך שטכנולוגיית התאום הדיגיטלי זוכה לאימוץ כה מהיר היא תרחישי השימוש הרבים שיש עבורה בארגונים, כמו תהליכי הנדסה, ייצור ותפעול, תחזוקה ושירותים. תאומים דיגיטליים מתאפשרים (ומשתפרים)

ומספק תשתית שיכולה לסייע בקבלת החלטות מבוססות נתונים שחוסכות זמן ומשאבים. לדוגמה, חברת אמזון מיישמת את הטכנולוגיה הזאת ביותר מ-200 מרכזי הלוגיסטיקה שלה ברחבי העולם.

: (DT) Digital Twin תאומים דיגיטליים

תאומים דיגיטליים הם מודלים וירטואליים של ישויות קיימות או של מערכות שמטרתן לדמות בצורה מדויקת את הביצועים וההתנהגות של הישות הפיזית בזמן אמת. תאום דיגיטלי יכול להיות מוצר, אדם, מכונה או שירות. הטכנולוגיה מיושמת במגזרים שונים, כולל ייצור, שירותי בריאות ואפילו ערים חכמות. התאום הדיגיטלי פועל באמצעות איסוף שוטף של נתונים מהמקביל הפיזי שלו, בין השאר באמצעות חיישנים וטכנולוגיית האינטרנט של הדברים (איור 1). נתונים אלה מעובדים ומנותחים, מה שמאפשר לעסקים לשכפל התנהגויות ותנאים מהעולם האמיתי בסביבה וירטואלית. כך, בעזרת בחינת נתונים בזמן אמת, חברות יכולות לדמות תוצאות בדיוק מרבי. חשיבותו של התאום הדיגיטלי חורגת בהרבה מהדמיה פשוטה.

איור 2: טכנולוגיות יוצרות נתונים עיקריות עבור תאומים דיגיטליים



מקור: Hornik and Rachamin (2025d)

הפלטפורמה של אנבידיה, Omniverse, מאפשרת לערים לבצע הדמיות ולפרוס צני AI לניתוח וידאו בזמן אמת. טכנולוגיה זו מאפשרת לערים לשפר את תפעולן ולקצר את זמני התגובה לתקלות ב-80%, בייחוד בתחום התחבורה הציבורית וצמצום עומסי תנועה. ענף הרכב בכלל, ותעשיית הרכבים החשמליים והאוטונומיים בפרט, נהנים מפיתוחים שונים של התאומים הדיגיטליים. "רכבים חכמים" אלה מספקים באופן שוטף ובזמן אמת משובים מחיישנים שונים אל התאום הדיגיטלי שלהם, ובכך מאפשרים חדשנות ברכבים ובעיצובם. כמו כן, חוקרים מאוניברסיטת סטנפורד השתמשו בבינה מלאכותית ליצירת תאום דיגיטלי של קורטקס הראייה בעכבר, שמשוגל לנבא פעילות מוחית בתגובה לגירויים חזותיים חדשים. מודלים דיגיטליים אלו עשויים לחולל מהפכה בתחום הניוירולוגיה בכך שיאפשרו עריכת ניסויים וירטואליים יעילים ובלתי מוגבלים, שיחשפו כיצד המוח מארגן ומעבד מידע.

דוגמה נוספת היא של תאומים דיגיטליים שהצילו בנורבגיה גשר עתיק מקריסה באמצעות ניטור מצב הגשר בזמן אמת. לגשר המדובר, שכבר היה בן 80 שנה, היו אלמנטים תומכים רבים שהשתחררו מהתשתית והחלו להתפרק. אף אחד לא היה מודע לחומרת המצב, שכן התחזוקה השוטפת לא זיהתה

באמצעות שילוב מספר רב של טכנולוגיות Industry 4.0, האינטרנט של הדברים (IoT), מציאות רבודה (AR), תכנון בעזרת מחשב (CAD), ניהול מחזור חיי מוצר (PLM), בינה מלאכותית (AI) ומחשוב קצה ועוד (איור 2), הכול כדי ליצור כלים רבי-עוצמה שיניעו את הארגון. הטכנולוגיה מספקת גם הגנה חשובה בתחום הבטיחות: המערכת מזהה סיכונים כגון דליפות, טמפרטורות חריגות או כניסת גורמים שאינם מורשים, ואפשר לבצע באמצעותה הדמיות בטיחות מבלי לסכן עובדים. כך אפשר לשפר את הנהלים ולהיערך לתרחישי חירום.

אנליסטים ויועצים שונים סוברים שיישום תאומים דיגיטליים למוצרים, מכונות ותהליכים יתפוס תאוצה בשנים הבאות. חברת Deloitte צופה כי שוק טכנולוגיות התאומים הדיגיטליים העולמי יגיע ל-20 מיליארד דולר עד 2026. IDC טוענת ש-30% מחברות Global 2000 ישתמשו בנתונים של תאומים דיגיטליים למוצרים ונכסים מבוססי IoT לשם שיפור תוצאות עסקיות וחדשנות. למשל, תוכנית העיר החכמה של אנבידיה, המבוססת על בינה מלאכותית, מספקת לערים את הכלים הדרושים לבניית תהליכים ותפעולם בסיוע תאומים דיגיטליים.

שום בעיה במבנה הגשר. למרבה המזל, המהנדס האזורי שילב במקרה את הגשר בתוכנית שלו להשתמש במערכות ניטור וחיווי בזמן אמת, ולשם כך התקין עליו מספר רב של חיישני IoT. מטרתו הייתה ליצור עבור הגשר תאום דיגיטלי המשקף בזמן אמת את מצבו של הגשר. ההחלטה שלו התבררה כמצילת חיים. יום אחד המערכת התריעה בפני המהנדס על בעיות בתשתית התמיכה של הגשר, והוא הכריז מייד על מצב חירום וסגר את הגשר לתנועת מכונות והולכי רגל עד לתיקון הליקויים.

גולת הכותרת של טכנולוגיה זו היא הפרויקט "התאום הדיגיטלי של כדור הארץ", המכונה Earth-2. זוהי יוזמה שאפתנית של חברת אנבידיה, הנועדה לנטר באמצעים ויזואליים את השינויים האקלימיים על מנת להתריע על ההשפעות השונות בכל רחבי הגלובוס, ולספק למקבלי ההחלטות כלים למאמץ גלובלי שיפחית את ההשפעות ההרסניות של האנושות על הסביבה. היוזמה מבוססת על שילוב טכנולוגיות שונות, כולל בינה מלאכותית ושיתופי פעולה עם גופים ממשלתיים, גופים פרטיים וקהילת המחקר האקדמי. שיתוף פעולה כזה יאפשר פיתוח מודלים חזויים שמסייעים להבין כיצד טמפרטורות משתנות וכיצד הן ישפיעו על אזורים גאוגרפיים שונים. התאום הדיגיטלי שפיתחה אנבידיה לשם כך מבוסס על טכנולוגיית Omniverse, שנועדה ליצור עולמות וירטואליים ותאומים דיגיטליים בהיקפים גדולים במיוחד. התאום הדיגיטלי של כדור הארץ יעסוק גם בהתוויית כלים לניהול סביבתי ומניעת אסונות טבע, כמו חיווי התנהגות שריפות באמצעות הנתונים המתקבלים ממערכות תצפית שונות.

ממדים בתאומים הדיגיטליים

הקונספט של תאום דיגיטלי מורכב מכמה ממדים תיאורטיים מרכזיים (Thomas et al., 2026; Wang et al., 2024). ראשית, הממד הפיזי-גיאומטרי. זהו הממד הבסיסי ביותר, המתאר את המבנה והצורה של האובייקט, כולל רמת הדיוק, היקף גיאוגרפי וממדים מרחביים. שנית, הממד ההתנהגותי-פונקציונלי: ממד זה בודק כיצד האובייקט אמור לפעול, והקריטריונים כוללים שני היבטים: האם התאום הדיגיטלי צריך להריץ הדמיות (לדוגמה: זרימת אוויר, עומסים סטטיים)? והאם המערכת צריכה להבין מבחינה לוגית את יחסי הגומלין בין המשתנים, המודלים והמערכות השונות? שלישית, ממד הזמן (מחזור חיים): ממד זה בוחן האם התאום משתנה לאורך

זמן ומתייחס לשני היבטים: תיעוד העבר: האם צריך לאחסן מידע על העבר (תאריך התקנה, היסטוריית תקלות)? וחיווי העתיד: האם המערכת צריכה לחזות מצב עתידי (כמו בלאי צפוי)? רביעית: ממד נתוני העתק והקישוריות (Big Data & Connectivity): ממד זה מייצג את החיבור לעולם האמיתי, ומבוסס על חיישנים (IoT): אילו נתונים מוזרמים בזמן אמת לתוך המודל באופן שוטף (טמפרטורה, רטט, תפוסה)? ותדירות: באיזו תדירות המידע מתעדכן (כל שנייה, כל שעה)? חמישית, ממד האינטגרציה (מערכות חיצוניות): ממד זה בוחן את יכולת החיבור של התאום הדיגיטלי למערכות המידע והבקרה של הארגון, כגון מערכות ERP, ניהול משאבים ומערכות בקרה.

המדדים שישולבו במערכת נקבעים לפי המטרה (ניטור, סימולציה או תחזוקה), מי משתמש במערכת ובנתונים, וכן עלויות: האם הוספת ממד מסוים מצדיקה את עלות האיסוף והעיבוד שלה?

מנגנוני תיקוף

התאום הדיגיטלי הוא לא ליניארי בלבד, וגם לא רק מודל ניבוי. הוא משלב שלוש תכונות עיקריות במקביל: הוא תיאורי (אינסטרומנטלי), ניבויי (פרדיקטיבי), וגם נורמטיבי (פרסקריפטיבי). כלומר, באמצעות החיישנים התאום מקבל כל העת מידע המשקף את המצב הנוכחי. באמצעות מידע היסטורי ולמידת מכונה הוא יכול לחזות מתי למשל מכונה תתקלקל, או מה תהיה צריכת האנרגיה בעוד יום. כדי להבטיח שהתאום הדיגיטלי לא רק מציג יחסים בין משתנים, אלא מבין באמת את הסיבה והמסובב, הוא משתמש במספר שיטות תיקוף, ובהם: רשתות נוירונים פיזיקליות לשם תיקוף פיזיקלי של המערכת. ניתוח התערבות (Intervention Analysis) בדיקה אקטיבית של תגובת המערכת לשינויים מכוונים. שרשראות סיבה ותוצאה בזמן בדיקת סמיכות זמנים (Temporal Proximity) כדי לוודא שהגורם הסיבתי אכן קודם לתוצאה כרונולוגית. ניסויים מבוקרים. בסופו של דבר, התוקף הסיבתי מובטח בכך שלא מסתפקים במתאם סטטיסטי יבש אלא משלבים את המודל הסטטיסטי במודל פיזיקלי (חוקי הטבע) ובמודל מומחה (ידע אנושי), כדי לוודא שהמסקנות של התאום הדיגיטלי משקפות סיבות אמיתיות ולא "משחקים סטטיסטיים" מקריים.

מנגנוני עדכון

להבטיח אמינות ובטיחות מרביות גם כשאין שליטה אנושית ישירה, האדם נמצא בלולאה ומעורב בתהליכים קריטיים (Hornik & Rachamim, 2025a).

סוגיות אתיות, אחריות ושקיפות

כדי להבטיח שהמערכת האוטונומית לא תבצע פעולות מסוכנות או לא אתיות, ובכך תאפשר למפעיליה לתת בה אמון, משולב בה רכיב ייעודי המכונה "תאום אתי דיגיטלי" (Digital Ethical Twin – DET), המקדד מה "טוב" (סביבתי, כלכלי) ומה "רע" (סיכון לפרט, סיכון חברתי). התאום האתי פועל על פי עקרונות אתיים הנקבעים ומתעדכנים מדי זמן ובוחן אותם לפי עקרון התוצאות (Consequentialism). כלומר, הוא בוחן את ההשלכות הצפויות של כל פעולה ומעדיף באופן עקבי את הניתוב שמקדם את הטוב המרבי וממזער את הנזק. דוגמה מוחשית לכך היא רובוט אוטונומי במפעל, הבוחר מרצונו במסלול נסיעה ארוך יותר רק כדי להימנע ממעבר בסמוך לעובדים ובכך להקטין את הסיכון לפגיעה בהם. בסופו של דבר, מניעת הסתמכות יתר על שיקול דעת אנושי אינה מתבצעת על ידי מנגנון בודד, אלא על ידי ארכיטקטורה משולבת של "סוכנים" חכמים המחליפה את מקבל ההחלטות האנושי. ארכיטקטורה זו יוצרת מערכת שיכולה לפעול ברמה גבוהה של אוטונומיה, תוך שהיא מבטיחה שהפעולה האוטונומית היא בטוחה, מובנת וערכית. ההיבטים האתיים מסוכמים בטבלה 1.

כדי לשמר את הרלוונטיות של התאומים הדיגיטליים ולהבטיח שהם ימשיכו להיות מודלים דינמיים חכמים, הם משלבים גם מנגנוני עדכון מתמשכים (Continuous Update). מנגנונים אלה כוללים: עדכון מבוסס אירועים, עדכון דו-כיווני (התאום לא רק מקבל מידע, אלא גם מחזיר החלטות ויוצר לולאת משוב (Kherbache et al., 2024). כל המנגנונים האלו מתחברים ללולאה אחת רציפה: נתונים זורמים בזמן אמת על בסיס האירועים השונים, והאלגוריתם מזהה שהדפוס החדש שונה מהדפוס ההיסטורי המוכר לו. כדי להבטיח את דיוק המודל הסטטיסטי, נתונים חדשים מקבלים משקל גבוה יותר מאשר נתונים ישנים, ולכל הנתונים מוגדרים "תאריכי תפוגה". כל נתון או מידע שנאגר מקבל תנית המתארת את ההקשר שבה נאסף הנתון.

מקומו של הגורם האנושי

כדי להפחית את התלות בהתערבות אנושית מתמשכת, התאום הדיגיטלי מסוגל לקבל החלטות ולבצע פעולות בעצמו. להלן המנגנונים המרכזיים הנדרשים למניעת הסתמכות יתר על שיקול דעת אנושי או בקרה חיצונית, תוך שמירה על אמינות ובטיחות. במסגרת זו, מנגנוני אוטונומיה חכמה, "סוכנים" אוטונומיים מבוססי בינה מלאכותית, מחליפים את קבלת ההחלטות האנושית, ומפעילים מערכות לאופטימיזציה של תהליכים ולבקרה בזמן אמת ללא התערבות אנושית. כדי

טבלה 1

המנגנון	תיאור	מטרה אתית/שקיפות
ביקורת הוגנות (Bias Audits)	בדיקה שוטפת של תפוקות האלגוריתם לאיתור דפוסי אפליה (למשל, בדיקה אם קבוצת אוכלוסייה מסוימת מקבלת הצעות גרועות יותר).	מניעת אפליה סמויה וקידום שוויון
AI ניתן להסבר (XAI)	שימוש במודלים שמספקים פירוט על הגורמים שהובילו להחלטה (למשל, "מדוע חשבתי שהצרכן הזה יעדיף מוצר זה?").	מימוש הזכות להסבר ובניית אמון
"אדם בלולאה" (Human-in-the-Loop)	במצבי קצה מורכבים או בסיכון גבוה, המערכת אינה מבצעת החלטה אוטומטית אלא מעבירה אותה לגורם אנושי לאישור.	שמירה על פיקוח אנושי על החלטות קריטיות
תאום אתי דיגיטלי (Digital Ethical Twin)	רכיב ייעודי המדמה את ההשלכות האתיות של החלטה לפני ביצועה בפועל, ומסנן החלטות שעלולות לפגוע ברווחת הצרכן.	הטמעת שיקולים אתיים כחלק בלתי נפרד מתהליך קבלת ההחלטות

כדי לשמור על אתיקה ופרטיות, תאומים דיגיטליים אינם משתמשים בנתונים גולמיים המזהים את המשתמש, אלא בטכניקות של ערפול נתונים, שימוש בנתונים סינטיים, והוספת "רעשים" לנתונים כך שלא ניתן לשייך פעולה או נתון ספציפי לאדם מסוים, תוך שמירה על הדיוק של המגמות הכלליות (Thoms et al., 2026). על מנת למנוע פריצות לנתונים העלולים לחשוף מידע רגיש, משתמשים בטכנולוגיות מבוזרות (Blockchain) המתעדות כל פעולה בתייעוד שלא ניתן לשינוי, וכך נוצרת שקיפות מלאה לגבי מי, מתי ולמה השתמש במערכת ובנתונים. היבט אתי קריטי הוא הבטחה שהתאום הדיגיטלי לא מפלה אף אחד. לשם כך קיימת ביקורת אלגוריתמית: בדיקות תקופתיות שנועדו לוודא שהמודל הדיגיטלי לא מפתח הטיות נגד קבוצות אוכלוסייה מסוימות (למשל בקביעת תעריפי ביטוח או זכאות לאשראי).

כאמור, השימושים של טכנולוגיות דיגיטליות במערכות שיווק נמצאות בראשית דרכן, ובמיוחד טכנולוגיית התאום הדיגיטלי. לשם כך, הצענו לחוקרי שיווק ולמנהלים בתחום מספר מודלים ופיתוחים אפשריים של תאומים דיגיטליים המותאמים למערכות שיווק שונות.

תאומים דיגיטליים בתחומי השיווק

נתחיל בתחום ניהול מוצרים בשיווק. אחת הסוגיות המטרידות פירמות ברחבי העולם היא התופעה של מוצרים ומותגים מזויפים (Counterfeit brands), שהשפעתה על ענפים רבים, ובהם תעשיית האופנה, היא קשה מאוד. מסתבר שלזייפנים כיום יש יכולת טכנית גבוהה שבאמצעותה קשה לעיתים להבחין בין זיוף למקור אותנטי. הדרך המקובלת היום היא הגנה באמצעות הברקוד האמור לייחד כל מותג. אולם כאמור הזייפנים מסוגלים להנפיק ברקודים מזויפים שדומים למקוריים. אנו הצענו להשתמש בטכנולוגיית התאום הדיגיטלי כדי להילחם בתופעת הזיופים (Hornik & Rachamim, 2024a). המודל מוצג באיור 3.

המודל מפרט את האינטראקציה בין המותג המקורי והתאום הדיגיטלי, כאשר משלבים במותג המקורי סימנים שונים שאינם נראים לעין ולא ניתן לחקות אותם. מכיוון שכמות הסימנים הנראים והמוסותרים בכל ישות פיזית היא אין-סופית (כגון סימון נסתר של מקום הייצור, ראשי תיבות של מנהל המותג,

עובי אבזם בתוך המוצר), הסימנים הללו, העשויים להשתנות לפי הצורך ולאורך זמן, מוזנים באופן שוטף לתאום. כאשר יש חשש בכל מקום בעולם שהמותג מזויף, ניתן מיידית להעלות על המסך את התאום (בעל שירות זיהוי חיקויים) ולהשוות עם המוצר הנבחן. המודל גם מבליט את היסוד האנושי המכונה Human-in-the-Loop (HITL), שלפיו, על אף שכל התהליך מושתת על מערכות חכמות אוטומטיות, לעיתים עדיין יש צורך להשתמש בשיקול דעת אנושי.

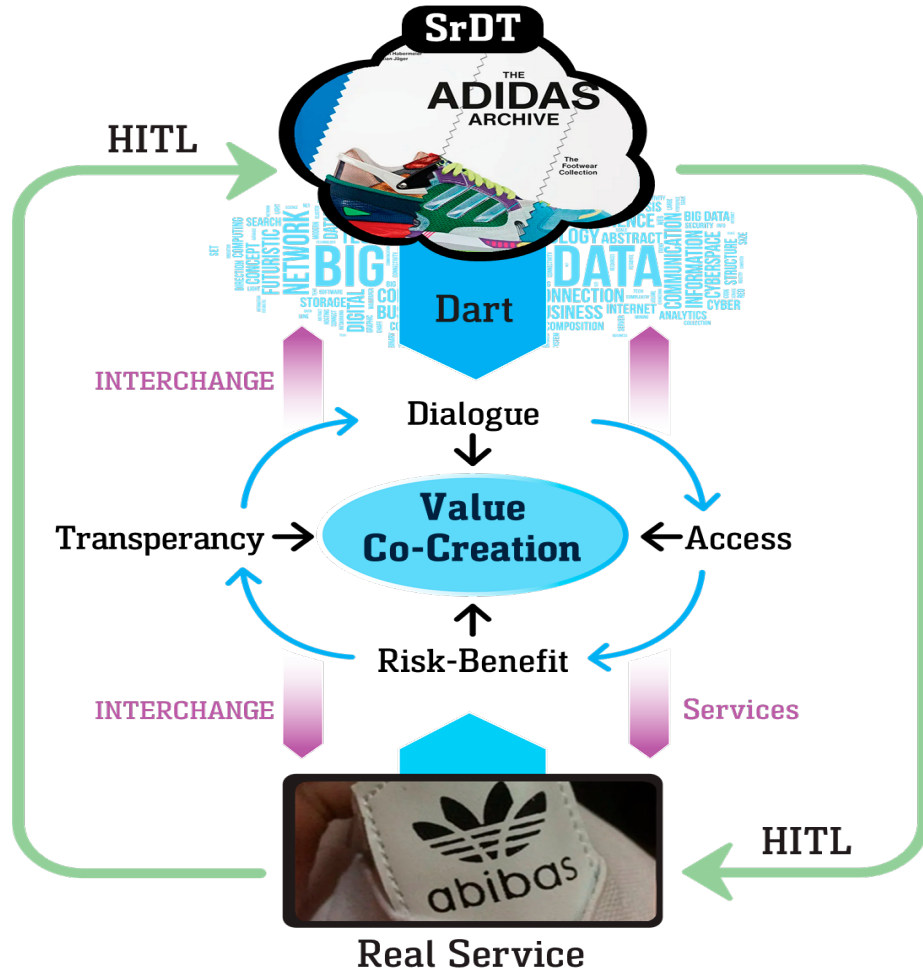
יישום נוסף של הטכנולוגיה הוא ניטור מצב המוצר לאורך חיי המוצר (Rachamim & Hornik, 2025b,c).

הרעיון בבסיס מודל מחזור חיי המוצר (Product Life Cycle – PLC) הוא לבחון את השינויים במכירות לאורך חיי המוצר, והתאום הדיגיטלי הוא פתרון למספר סוגיות חשובות בניטור וניהול מחזור החיים של מוצרים. בין היתר, הוא נותן מענה לנטייה הרווחת לתת משקל גדול יותר לנתוני הפתיחה של מחזור החיים לעומת הנתונים המאוחרים במחזור החיים. בנוסף, המערכת מאפשרת סנכרון בין נתוני זמן אמת על המוצר המקורי לנתונים היסטוריים של מוצרים אחרים (כולל מתחרים). הנתונים הנאגרים בתאום הדיגיטלי מאפשרים לא רק לאמוד את מצבו היחסי בהווה אלא לחזות התפתחויות עתידיות.

תאומים דיגיטליים בקידום מכירות

אחת מגישות קידום מכירות המתפתחת היא מכירות בשידור חי (Live streaming; Hornik & Ofir 2025c). בחרנו מסגרת זו על מנת להבליט את הפוטנציאל הרב של תאומים דיגיטליים לפרסום וקידום מכירות. המודל הזה, בהשוואה למודלים אחרים, מראה כיצד הטכנולוגיה של תאום דיגיטלי מאפשרת להתגבר על מספר חסרונות מובנים בשיטת השידור החי. היתרון הבולט של תאום דיגיטלי בתחום זה, היא היכולת לאגור מידע פרטני לכל לקוח ובכך להפוך את הצעת המכירה ל"תפורה אישית" לפי המאפיינים האישיים של הלקוחות והיסטוריית הקניות שלהם. מכיוון שהתאום מתעדכן מיידית ובאופן שוטף על כל המערכת השיווקית, הנתונים המתקבלים מאפשרים למקבלי החלטות להשתמש במודלים של אופטימיזציה כדי להפיק את המיטב מגישת מכירות בשידור חי. כך למשל, המודל מראה כמה לקוחות צפו בזמן אמת בשידור החי, והאם לנוכח הנתונים מוטב לחזור על אותו שידור שוב. מחקר דומה מציע מודל

איור 3: מניעת זיופים באמצעות שירותי תאומים דיגיטליים

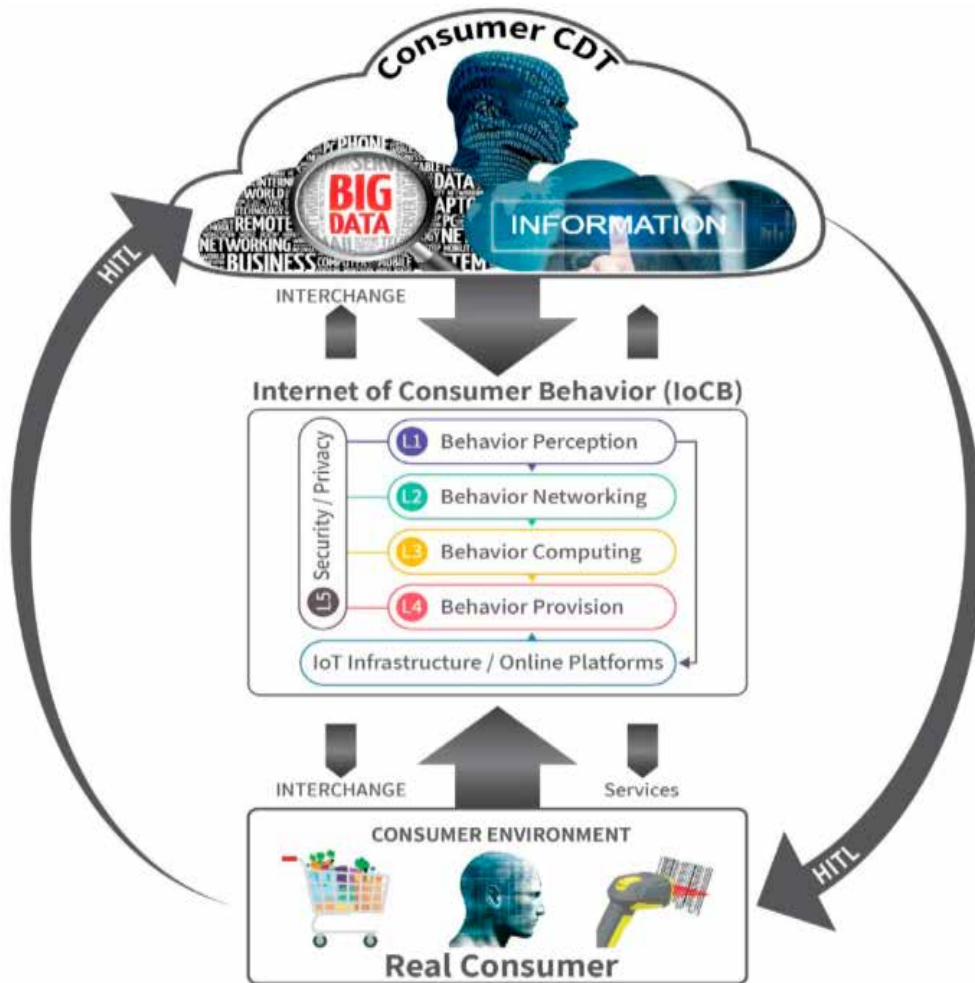


מקור: Hornik and Rachamin (2024a)

תאומים דיגיטליים בניהול רשת אספקה ומלאי

ניהול מלאי הוא סוגיה מורכבת הדורשת תיאום בין גורמים שונים בתוך המערכת ומחוצה לה. תאומים דיגיטליים יכולים לייעל את ניהול המלאי על ידי הדמיית תנועת הסחורות בשרשרת האספקה. חברות יכולות לבחון תרחישים שונים ולבדוק את ההשפעה של שינויים ברמות המלאי, בשינוע ובלוחות הזמנים. לדוגמה, חברה יכולה להשתמש בתאום דיגיטלי כדי לדמות את ההשפעה של שינוי רמות המלאי על רמות שירות הלקוחות. על ידי ניתוח נתונים היסטוריים והדמיית תרחישי מלאי שונים,

למידת חשיפה לתוכניות טלוויזיה כהשלמה לשיטות הרייטינג הקיימות (Hornik and Rachmim, 2024b). שיטת הדירוג הקיימת מסתמכת על מכשיר ה-People meter הצמוד למכשיר הטלוויזיה ויש לה חסרונות ברורים, בראשם התלות המוחלטת ברצונו של הפרט להפעיל את המכשיר ולדווח על צפייה. לעומת זאת, התאום הדיגיטלי שאוסף ואוגר נתונים רבים (איור 2), מאפשר לקבל תמונה כוללת יותר על דירוג תוכניות הטלוויזיה, החורגת מעצם פעולת הצפייה בלבד. המערכת מספקת, בין היתר, נתונים על מידת הנאמנות לתוכנית, מדדים קוגניטיביים (כגון חשיבות המשדר או למידה ממנו), וכן תגובות אמוציונליות (כגון התלהבות או פחד).



מקור: Hornik and Rachamin (2025d)

תאום דיגיטלי אנושי (Human Digital Twin; HDT)

לאחרונה הורחב המחקר והיישום של תאומים דיגיטליים גם למרחב האנושי, וזאת באמצעות ניטור גוף האדם (כמטופל, כנבדק או כצרכן) והתנהגותו. פיתוח זה מתבסס על שימוש בחיישנים מזעריים ושילוב מחקרי חשיבה קוגניטיבית ורגשית (Gui & Li, 2026).

תאום דיגיטלי אנושי הוא דמות מבוססת בינה מלאכותית שנראית ומתנהגת כמו בן אנוש, ומאפשרת תקשורת בין

החברה יכולה לקבוע את רמות המלאי האופטימליות המאזנות בין העלות לרמת השירות הרצויה ללקוחות. בנוסף, תאומים דיגיטליים יכולים לעזור לחברות לנטר את רמות המלאי בזמן אמת, ולאפשר להן לזהות ולהגיב במהירות למחסור או לעודפים במלאי. באמצעות שילוב נתונים ממקורות שונים, כגון ספקים, מחסנים ולקוחות, החברות יכולות להפיק תצוגה בזמן אמת של רמות המלאי לאורך כל שרשרת האספקה. תאומים דיגיטליים יכולים גם לעזור לחברות ליעל את פעילות המחסן על ידי הדמיית פריסות שונות של ציוד ותפקוד כוח אדם ברמות ובתהליכים שונים. באמצעות סימולציית התרחישים השונים, חברות יכולות לקבוע את רמת התכנון והאיוש היעילים ביותר של המחסן, להפחית עלויות ולשפר יעילות.

סיכום ומסקנות

העשור האחרון הוא עידן הבינה המלאכותית והטכנולוגיות המתפרצות. המורכבות של ניהול השיווק דורשת תכנון אסטרטגי, שיתוף פעולה בין שחקנים ושימוש חכם בטכנולוגיה המתקדמות הללו. תאומים דיגיטליים הם כלי רב-עוצמה שהופך לנפוץ יותר ויותר בתחומים שונים. תאומים דיגיטליים יכולים לדמות את ההתנהגות והביצועים של מערכות שיווק, כגון שרשרות האספקה, בזמן אמת, ומאפשרים לנתח תרחישים שונים עוד טרם יישום השינוי האסטרטגי בשטח. הניסיון המוצלח בשימוש בתאומים דיגיטליים ברפואה, בתחבורה, בניהול ערים ועוד, מלמד שלטכנולוגיה זו יש פוטנציאל רב במערכות השיווק השונות.

ניתן לצפות כי בעתיד יתפכו התאומים הדיגיטליים לחכמים עוד יותר באמצעות בינה מלאכותית ולמידת מכונה (Thomas et al., 2026). התפתחות זו תאפשר להם לקבל החלטות באופן עצמאי ותוביל לאוטומציה מלאה של תהליכי ייצור ושיווק. יתרה מזאת, הפיתוח יכול להוביל להקמת מפעלים וארגונים וירטואליים לחלוטין, שבהם כל המכונות, המערכות והתהליכים ממופים ומבוקרים באופן דיגיטלי.

בעוד שבעבר קבלת החלטות התבססה על אינטואיציה וניסיון בלבד, התאום הדיגיטלי מציע כיום תשתית חדשנית לבחינת תרחישי "מה אם...". במקום להסתמך על ניסוי וטעייה בלבד, ניתן להריץ תרחישים מורכבים בסביבה וירטואלית מדויקת, ובכך להוביל לשיפור מתמיד, תכנון עתידי מדויק, חיסכון בתשומות והעלאה ברווחיות. תחת תפיסה זו, כל מחסן יכול להקים לעצמו תאום דיגיטלי המותאם לתשתיות הקיימות שלו ולבחון באמצעותו את מלוא הפוטנציאל לשיפור. תאום דיגיטלי הוא לא עוד אופנה טכנולוגית חולפת, אלא מהפכה בדרך שבה מקבלי החלטות חושבים ומנהלים מערכות. זהו מעבר ממידע מבוזר למידע מאוחד, מקיבעון מחשבתי לניהול "חכם". התאומים הדיגיטליים יאפשרו קבלת החלטות מבוססות נתונים, ובכך ישפרו ביצועים ויחזקו קיימות סביבתית שיובילו לעידן חדש של מערכות שיווק חכמות לתועלת הצרכנים ובעלי עניין אחרים.

hornik@tauex.tau.ac.il

פרופ' יעקב הורניק

מערכות שונות (בניגוד לאוטוארים). התאום האנושי דומה לתאום הדיגיטלי בכך ששניהם חולקים את אותם מודלים לעיבוד מידע. לעיתים מודלים אלו אף משתלבים יחד ליצירת מערכות התנהגות משותפות, כמו מודלים לניטור מדפים בחנויות האוספים מידע לא רק על יעילות מיקום המוצר על המדף, אלא גם על התנהגות הצרכנים מול המדף, כמו זמן שהייה שלהם. ההבדל בין השניים נובע מהשוני בין הדומם לחי. בעוד שתאומים דיגיטליים של מדפים ומוצרים מייצגים ישויות דוממות, שהמשתנים לגביהן נוגעים לדרכי השימוש שלהם, הרי שבתאומים דיגיטליים אנושיים קיימת שונות אינהרנטית: שונות פיזית, פיזיולוגית והתנהגותית. כלומר, המודל הדיגיטלי האנושי חייב לשקלל מאפיינים ייחודיים אלו. הבדל זה חשוב במיוחד בתחום הרפואה והבריאות. כל תאום דיגיטלי אנושי חייב לנטר ולהבין את הישות ה"מועתקת" של מטופל נתון, לחזות את התפתחות המחלה, לצפות מחלות אפשריות, לבדוק את תגובות המטופל לדרכי טיפול שונים, ובדרך זו להתאים לו באופן אישי את התרופה המתאימה ביותר. השתמשנו במחקרים הללו לאחרונה כדי ליישם את הטכנולוגיה גם להבנת צרכנים וניטור התנהגותם (Hornik & Rachamim, 2025d).

הסוגיה שנבחנה היא איך מגבשים את הנתונים הרבים, המגוונים והמשתנים של הצרכנים ליחידה אחת של מודל ידידותי לחוקר ולמקבל ההחלטות. השתמשנו בניסיון הרב שנצבר בתחום ה"אינטרנט של דברים" לניבוי מודל חדש בשם "אינטרנט של צרכנים" (איור 4). המודל המוצע שונה ממחקרי צרכנים עכשוויים הנחשבים כמחקרים פולשניים, כמו שאלונים, קבוצות מיקוד, ניסויים, ואמינותם לא תמיד ברורה, ומציע שיטות מחקר דיגיטליות לא פולשניות. המודל מראה כיצד שיטות דיגיטליות העוקבות אחרי מה שמכונה "טביעות רגל" של צרכנים מוסיפות ממד חדש למחקר השיווקי בכלל ולהתנהגות צרכנים בפרט.

היתרון הבולט של התאום הדיגיטלי האנושי טמון ביכולתו הייחודית לעקוב באופן דיגיטלי אחר הצרכנים, לאחסן את הנתונים, לאחדם ולעבדם למודלים שמישים וידידותיים למקבל ההחלטות. על בסיס נתונים רבים ומבוזרים אלו, הטכנולוגיה המוצעת מגבשת שיטות מחקר חדשה המשלבת את כל הנתונים המתקבלים משיטות פולשניות ולא פולשניות. המודל מאפשר לרקום אסטרטגיות שיווקיות מגוונות המותאמות לצרכן בעידן של שיווק פרסונלי (מוצרים, קידום מכירות, ושיטות שכנוע לפי מאפיינים והעדפות אישיות).

- Gui, H., and Li, M. (2026). A temporal-spatial human digital twin approach for modeling human behavior with uncertainty. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 99, 103–134.
- Hornik, Jacob, and Matti Rachamim (2024a). "Leveraging AI-Enabled Digital Twins to Combat Counterfeit Brands." *J Forensic Sci & Criminal Inves.* 18(5): 555–568.
- Hornik, Jacob, and Matti Rachamim (2024b), "Television shows ideation, and testing with smart digital twins to advance ratings." *Electronic Commerce Research*, 36(2), 1–32.
- Rachamim, Matti, and Jacob Hornik (2024c) "AI-Enable Cognitive Digital Twins to Support Product Life-Cycle Management." *IEEE Explore, Computational Science and Computational Intelligence*. Cham: Springer Nature.
- Hornik, Jacob, and Matti Rachamim (2025a) "Digital twin-enabled interactive cockpits for smart products management and testing." *Frontiers in Artificial Intelligence* 8 (2): 168–179.
- Hornik, Jacob, and Matti Rachamim. (2025b), "AI-enabled consumer digital twins as a platform for research aimed at enhancing customer experience." *Management Review Quarterly*, 32(1), 1–34.
- Hornik, Jacob, Matti Rachamim, and Chezy Ofir. (2025c), "Leveraging real-time digital twins for smart livestreaming platforms to enhance consumers' experience." *The Journal of Supercomputing*. 81(8), 887–898.
- Hornik, Jacob, and Matti Rachamim. (2025d), "Transforming consumers' IoT data into behavioral insights with AI-enabled Consumer Digital Twins (CDT) for marketing analytics." *Journal of Marketing Analytics*, 31(1), 1–17.
- Kherbache, Mehdi, Moufida Maimour, and Eric Rondeau (2024), "Digital Twin Network for the IIoT Using Eclipse Ditto and Hono," *6th IFAC Symposium on Telematics Applications*, Nancy, France, 14, 76–88.
- Tao, Fei, and Qinglin Qi (2019), "Make More Digital Twins," *Nature*, 573 (75), 490–491.
- Thomas, G. Arun Sampaul, et al. (2026) "Unlocking Value: Big Data, Digital Twins, Exploring the Future Digital Transformation and Its Trends." *Handbook of Industrial and Business Applications with Digital Twins*. CRC Press 184–200.
- Wang, Jing., Li, X., Wang, P., & Liu, Q. (2024). Bibliometric analysis of digital twin literature: A review of influencing factors and conceptual structure. *Technology Analysis & Strategic Management*, 36(1), 166–180.