

התפקיד הכפול של טכנולוגיה: הנעה ומדידה של מעורבות תלמידים בסיכון הלומדים מתמטיקה באמצעות תכנון והדפסה בתלת-ממד

ישראל צימרמן
ברנקו וייס
Israel.zimmerman@gmail.com

סיגל-חווה רותם
אוניברסיטת אוטרקט, הולנד
s.h.rotem@uu.nl

לאורה לוי
מכללת סמינר הקיבוצים
Laura.levin@smkb.ac.il

Technology's Dual Role: Motivating and Measuring Engagement of At-Risk Students through 3D Design and Printing

Laura Levin
Kibbutzim College of
Education
Laura.levin@smkb.ac.il

Sigal-Hava Rotem
Utrecht University, The
Netherlands
S.h.rotem@uu.nl

Israel Zimmerman
Branco Weiss
Israel.zimmerman@gmail.com

Abstract

At-risk students face educational and emotional challenges that lead to disengagement from learning, particularly in subjects like mathematics, which require persistence and complex problem-solving. This study examines the dual role of 3D design and printing technologies: as a lever for motivating students toward meaningful learning and as a tool for measuring engagement patterns and perseverance through learning analytics. This case study involved 20 tenth-grade students from a high school for at-risk youth. Students worked with the Onshape software as part of a year-long program comprising seven learning units aligned with the mathematics curriculum. Each unit presented a real-life design challenge requiring mathematical application to solve. Activity data were collected through Onshape's learning analytics, including dashboards, audit logs, design snapshots for process documentation, and teacher interviews. The findings revealed three levels of engagement (low – 20% of students, partial – 25%, and active – 55%) and exceptional patterns of perseverance. Analysis of individual case studies demonstrated how personally meaningful projects, such as creating unique objects, enhanced motivation and led to sustained engagement with challenges. Learning analytics provided researchers with tools to identify engagement patterns through precise tracking of working times, trial-and-error processes, and students' sequential actions during the learning process. The study highlights how integrating 3D design and printing can enhance motivation, engagement, and perseverance in mathematics learning among at-risk students, offering an innovative methodological tool for assessing learning processes.

Keywords: Learning analytics, 3D design and printing, At-risk students, Learning motivation, Mathematics learning.

תקציר

תלמידים בסיכון מתמודדים עם אתגרים לימודיים ורגשיים המובילים לחוסר מעורבות בלמידה, במיוחד בתחומים כמו מתמטיקה, הדורשים התמדה ופתרון בעיות מורכבות. המחקר הנוכחי בחן את תפקידה הכפול של טכנולוגית תכנון והדפסה בתלת-ממד: כמנוף להנעת תלמידים ללמידה משמעותית וככלי למדידה של דפוסי מעורבות והתמדה באמצעות אנליטיקות למידה. במסגרת חקר מקרה, השתתפו 20 תלמידי כיתה י' מבית ספר לנוער בסיכון. התלמידים עבדו עם תוכנת Onshape במסגרת תוכנית שנתית הכוללת שבע יחידות לימוד בהלימה לתכנית

הלימודים במתמטיקה. כל יחידה כללה משימת אתגר עיצובי בהקשר יומיומי ודרשה יישום מתמטיקה לפתרונה. נתוני הפעילות נאספו באמצעות אנליטיקות הלמידה של Onshape, כגון לוחות מחוונים, יומני פעילות ותיעוד תהליכים וראיונות עם המורה. הממצאים חשפו שלוש רמות מעורבות (נמוכה – 20% מהתלמידים, חלקית – 25%, ופעילה – 55%) ודפוסי התנהגות יוצאי דופן של התמדה. ניתוח דוגמאות פרטניות הצביע על האופן שבו פרויקטים בעלי משמעות אישית, כמו יצירת אובייקטים ייחודיים, הגבירו את המוטיבציה והובילו להתמודדות מתמשכת עם אתגרים. אנליטיקות הלמידה סיפקו לחוקרים כלי לזיהוי דפוסי מעורבות באמצעות מעקב מדויק אחר זמני עבודה, תהליכי ניסוי וטעייה, ורצף הפעולות של התלמידים לאורך התהליך הלמידה. המחקר מדגים כיצד שילוב תכנון והדפסה בתלת-ממד עשוי לשפר את המוטיבציה, המעורבות והתמדה בלמידת מתמטיקה בקרב תלמידים בסיכון, ומציע כלי מתודולוגי חדשני להערכת תהליכי למידה.

מילות מפתח: אנליטיקות למידה, תכנון והדפסה בתלת-ממד, תלמידים בסיכון, מוטיבציה ללמידה, למידת מתמטיקה.

מבוא

תלמידים בסיכון מתמודדים עם אתגרים רבים הכוללים קשיים רגשיים, הערכה עצמית נמוכה, חוסר מעורבות בלמידה, קושי בהשלמת משימות, קשיים לימודיים והיעדר סביבה תומכת (Hirt et al., 2021). אלו בתורם, עלולים לפגוע משמעותית במוטיבציה שלהם ללמידה (Ng et al., 2018). מוטיבציה ללמידה מתייחסת לדחף או לרצון המניע תלמידים להשתתף בפעילויות חינוכיות ולרכוש ידע. מוטיבציה ללמידה כוללת גורמים פנימיים, כמו עניין אישי וסיפוק, וגורמים חיצוניים, כגון תגמולים והכרה. באופן כללי, היא מתבטאת במעורבות - השתתפות פעילה בלמידה והשקעת מאמץ - ובהתמדה במשימה למרות קשיים ומכשולים (Eccles & Wigfield, 2020; Hershkovitz & Nachmias, 2009). טיפוחה קריטי לתלמידים בסיכון, נוכח אתגריהם הייחודיים. תחושות הניכור מכישלונות מצטברים מקשות עליהם לראות ערך בלמידה ולהישאר מעורבים בה, במיוחד במשימות הדורשות מאמץ מתמשך ופתרון בעיות מורכבות, למשל במתמטיקה (Hirt et al., 2021).

מחקרים מראים כי תלמידים בעלי הישגים נמוכים עשויים להפגין ביצועים גבוהים כאשר הם לומדים בסביבות למידה לא קונבנציונליות או מעורבים בפתרון בעיות יישומיות (Iversen & Larson, 2006). אחת הגישות שנמצאו יעילות לטיפול פתרון בעיות יישומיות היא באמצעות תכנון והדפסה בתלת-ממד של אובייקטים שימושיים. מחקרים מראים כי שיטה זו מקדמת למידה יישומית ומגבירה את המוטיבציה והמעורבות של התלמידים על ידי טיפוח יצירתיות ומיומנויות פתרון בעיות מעשיות. תפיסת הרלוונטיות של יצירת אובייקטים מוחשיים מעצימה את תחושת המטרה של התלמידים ומגבירה את המוטיבציה שלהם להתעמק במשימות (Huang & Wang, 2022; Levin & Verner, 2021).

באופן כללי, תכנון והדפסה בתלת-ממד דורשים יצירה של מודל שאינו קיים ומתהווה בתהליכי תכנון באמצעות תוכנת CAD (תכנון בעזרת מחשב, למשל תוכנת Onshape). דרך מעברים בין תכנון האובייקט הפיזי (של המוצר הסופי שרוצים להדפיס) לבין המתמטיקה הנדרשת לתכנון מתפתחת הבנה מתמטית עמוקה המאפשרת ליישם מושגים מופשטים על אובייקטים מוחשיים (Levin & Rotem, accepted). לפיכך, במחקר זה השתמשנו בתכנון והדפסה בתלת-ממד כדי לקדם את למידת המתמטיקה של תלמידים בסיכון.

כאשר תלמידים מתכננים מודל תלת-ממדי במחשב, טכנולוגיית התכנון וההדפסה מספקת הצצה על דרך העבודה של התלמידים באמצעות אנליטיקות למידה. מחקרים קודמים הראו את יעילות השימוש באנליטיקות למידה בהערכת התנהגות תלמידים בסביבות למידה דיגיטליות (Talbi & Ouared, 2022). פלטפורמת ה-Onshape, עליה עבדו התלמידים במחקר זה, מתעדת באופן אוטומטי את פעולות התלמידים ומייצרת מאגר נתונים עשיר המאפשר להתחקות אחר מידת המעורבות וההתמדה שלהם. נתונים התנהגותיים, כגון זמן על משימה, חוסר פעילות וניסיונות חוזרים של ניסוי וטעייה, משמשים כמדדים למוטיבציה פנימית (Hershkovitz & Nachmias, 2009).

למרות שקיימים מחקרים שזיהו את הפוטנציאל של שימוש באנליטיקות למידה כמדדים למוטיבציה, מעט מחקרים חקרו פוטנציאל זה בקרב תלמידים בסיכון או בפעילויות למידה בתכנון והדפסה בתלת-ממד. מטרת המחקר היא לבחון כיצד משימות של תכנון והדפסה בתלת-ממד משפיעות על המוטיבציה של תלמידים בסיכון נשירה ללמידת מתמטיקה, וכיצד באמצעות אותה טכנולוגיה ניתן לאסוף נתונים אודות מידת המעורבות וההתמדה במשימות.

שאלות המחקר הינן:

1. כיצד באים לידי ביטוי המעורבות וההתמדה של תלמידים בסיכון בלמידת מתמטיקה באמצעות פעילויות תכנון והדפסה בתלת-ממד?
2. באיזה אופן מאפשרות אנליטיקות הלמידה של תוכנת Onshape לזהות ולאפיין את דפוסי המעורבות וההתמדה של התלמידים לאורך תהליך התכנון וההדפסה בתלת-ממד?

מתודולוגיה

מחקר זה בוצע בשיטת חקר מקרה (Yin, 2018). המקרה הנחקר כלל 20 תלמידי כיתה י' (13 בנים ו-7 בנות) בעלי הישגים אקדמיים נמוכים, בתיכון לנוער בסיכון במרכז הארץ. התלמידים למדו את התוכנית למ"ה-3D! (לומדים מתמטיקה בהדפסת 3D) בשנת הלימודים תשפ"ד והשלימו שבע יחידות הלימוד של התוכנית.

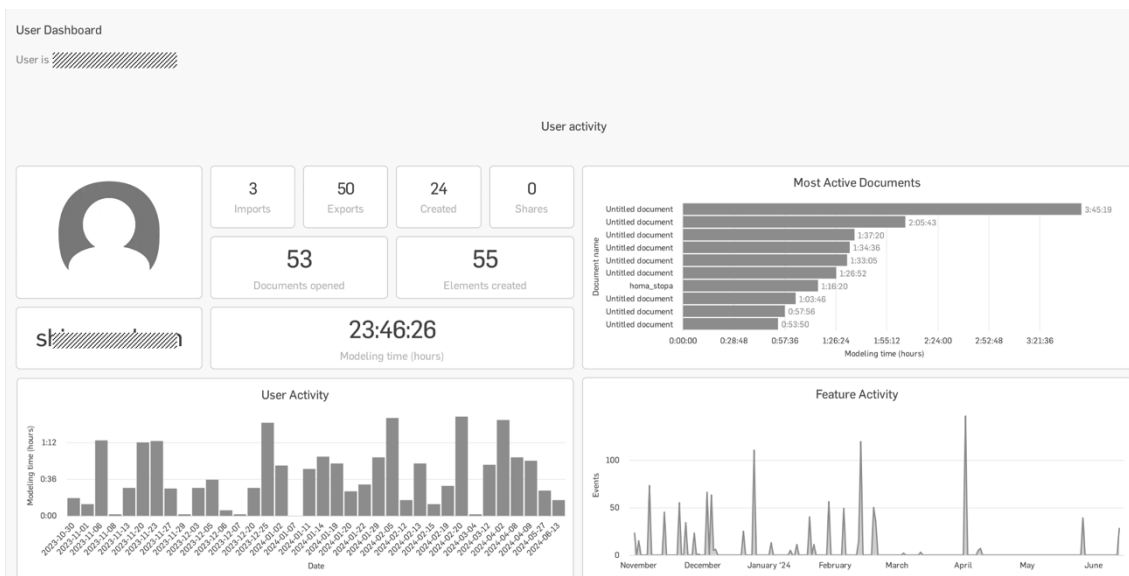
סביבת המחקר

מחקר זה בוצע במסגרת התוכנית למ"ה-3D! התוכנית, יוזמת הרכז פדגוגי בבית הספר שגם לימד את התכנית (המחבר השלישי), מקדמת למידת מתמטיקה יישומית וקישורה לחיי היומיום של התלמידים. התכנית מורכבת משבע יחידות לימוד המתוכננות בהלימה לתכנים נרחבים מתוכנית הלימודים למתמטיקה בכיתה י' ל-3 יחידות לפי התוכנית החדשה. מבין הנושאים השונים ניתן למצוא מדידה והמרת יחידות מידה, תכונות מצולעים, הסתברות, שטח מצולעים ומעגל, נפח גופים, משוואות עם נעלם אחד, יחס, התמצאות במישור ובמרחב, הבנת היצגים וזואליים. כל יחידת לימוד מציגה משימת אתגר עיצובי בהקשר יומיומי, ללא ציון מפורש של המתמטיקה הנדרשת לפתרונן. התלמידים עובדים באופן עצמאי או בזוגות בסדנה השבועית. כל יחידת לימוד נפתחת בהצגת משימת העיצוב, בהמשך התלמידים מתכננים את האובייקט ומעצבים אותו בתוכנת Onshape. תהליך התכנון וההדפסה בתלת-ממד מורכב ממספר שלבים: התלמידים מתחילים בתכנון ראשוני של האובייקט (על נייר או באופן מנטלי), ועוברים לעיצוב דיגיטלי בתוכנת Onshape. בתוכנה הם יכולים לראות את העיצוב מזוויות שונות, לבחון אותו ולערוך שינויים עד להשגת התוצאה הרצויה. לבסוף, שולחים את העיצוב הסופי להדפסה במדפסת תלת-ממד. האובייקט שהודפס הופך בעצמו לאובייקט חקר הדורש חשיבה מתמטית נוספת.

במחקר זה, משימה מוגדרת כאתגר מתמטי-יישומי, העיצוב הוא תכנון ממוחשב של אובייקט, והתוצר הוא האובייקט המודפס.

איסוף וניתוח נתונים

הגרסה של Onshape שבה השתמשו התלמידים מתעדת אוטומטית את תהליכי העיצוב ומאפשרת מעקב אחר התקדמות התלמידים. במחקר זה השתמשנו בנתונים שנאספו באמצעות התוכנה: (1) לוח מחוונים עבור כל תלמיד (משתמש) המספק מידע כמותי, כגון זמני העבודה ומשך הפעילות (איור 1); (2) יומן פעילות (audit trails) המתעד את תהליכי העיצוב (איור 2); (3) צילומי מצב היסטוריים (snapshot) של העיצובים המאפשרים בחינה מעמיקה של תהליך העיצוב (איור 3); (4) התוצרים הסופיים המודפסים; ו- (5) ראיונות חצי מובנים שהתקיימו לאחר כל שיעור עם המורה. הראיונות עם המורה סיפקו תובנות על התהליך הלימודי ותמכו בטריאנגולציה. לאור תפקידו הכפול כמחבר במחקר, הממצאים נותחו בקפידה בין שלושת החוקרים להפחת הטיה אפשרית. ניתוח הנתונים נעשה בשלושה שלבים. ראשית, בוצע ניתוח תוכן מכוון (Hsieh & Shannon, 2005) של הנתונים הכמותיים מלוח המחוונים ויומני הפעילות. לאחר מכן, הניתוח התמקד בזיהוי דפוסי התנהגות של תלמידים במהלך העבודה על עיצוב כפי שהעולים מתוך יומני הפעילות וצילומי המצב ההיסטוריים, כגון עריכת העיצובים, כגון מחיקות ועריכות חוזרות של סקיצות העיצובים. לדוגמא, מחיקה ועריכה חוזרת של סקיצת העיצוב מדגימה את ההתמדה של התלמיד במשימה, והניסיונות שלו להתמודד עמה למרות הקושי שהוא חווה. בנוסף, ניתחנו בניתוח תמטי את הראיונות החצי-מובנים עם המורה בהיבט של ביטויי המעורבות וההתמדה של התלמידים. לבסוף, הצלבנו בין שני סוגי הניתוח לזיהוי דפוסים משותפים של מעורבות והתמדה.



איור 1. לוח מחוונים של פעילות התלמיד ב Onshape.

ממצאים

בחלק זה נציג את האופן שבו טכנולוגית תלת-ממד תמכה בהנעה ובמדידת מעורבות התלמידים בלמידה. ראשית נתחיל מהאופן שבו הטכנולוגיה מאפשרת למדוד את מעורבות וההתמדה של התלמידים ולאחר מכן נביא עדויות לכך שהיא הניעה אותם ללמידה.

שימוש בטכנולוגיה כדי למדוד את מעורבות התלמידים והתמדתם בלמידה

ניתוח הנתונים המופיעים בלוח המכוונים של כל תלמיד כחלק מאנליטיקות הלמידה של Onshape (איור 1), מאפשר ללמוד על פעילות התלמידים במשימות השונות והאינטראקציה שלהם עם הכלי לתכנון ועיצוב בתלת-ממד. טבלה 1 מציגה סיכום של פעילות התלמידים בתוכנה, את מינימום, מקסימום וממוצע העיצובים למשתמש והשעות שהושקעו בעבודה למשתמש. נזכיר כי חלק מהתלמידים עבדו בזוגות על אותו מחשב ולכן עבודתם נרשמה ברמת שם המשתמש ולא ברמת התלמיד. ניתן ללמוד מהטבלה שבממוצע כל משתמש יצר 5.35 עיצובים והזמן הממוצע שהושקע בעבודה הוא כמעט 7 שעות. כלומר, בממוצע התלמידים יצרו כמעט עיצוב אחד לכל משימה מתוך שבע המשימות של התכנית והשקיעו בה בממוצע כשעה אחת (בערך זמן השיעור). הטבלה מראה שונות מאוד גדולה בין התלמידים הן בכמות העיצובים לתלמיד (משתמש) ($SD=3.3$) והן בסך הזמן שהושקע בתוכנה לאורך תקופת התוכנית ($SD=3:42$). ניתוח הנתונים חשף שלוש רמות מעורבות: נמוכה – 4 תלמידים (20%) עם אחד או שני עיצובים (מתוך שבע משימות); חלקית – 5 תלמידים (25%) עם 3-4 עיצובים, (כמחצית המשימות); ו-פעילה – 11 תלמידים (55%), עם 5 עיצובים ומעלה (רובם בין 5 ל 10 עיצובים, כולל עיצובים אישיים). אחד התלמידים בקבוצה זו אף ביצע 15 עיצובים, בהם יצר אובייקטים שונים לשימוש האישי, דבר המעיד על מעורבות גבוהה ביותר.

טבלה 2 מציגה את פעילות התלמידים ב-Onshape ב-7 יחידות הלימוד. נתוני העמודה הראשונה התקבלו מהמורה, ונתוני העמודות 2-4 נלקחו מרשימת העיצובים למשתמש ב-Onshape (תלמיד בודד או זוג). למעט משימת "קוביית רמאים", מספר העיצובים קטן ממספר המשלימים, המעיד על עבודה בזוגות בחלק מהמקרים. אולם, מההפרשים הקטנים ניתן להסיק כי מרבית התלמידים בחרו לעבוד ולהתמודד לבד עם המשימות.

טבלה 1. פעילות התלמידים ב-Onshape בתקופת התוכנית

זמן שהושקע בעבודה ב-Onshape לשם משתמש (בשעות)	כמות עיצובים לשם משתמש	
0: 53	1	מינימום
16: 35	15	מקסימום
6: 58	5.35	ממוצע
3: 42	3.3	סטיית תקן

טבלה 2. פעילות התלמידים ב-Onshape בשבע יחידות הלימוד

יחידת לימוד	מספר התלמידים שהשלימו את המשימה (N=20)	מספר העיצובים ב-Onshape למשימה	זמן ממוצע שהושקע במשימה ב-Onshape למשתמש (בשעות)	ממוצע הימים שהושקעו במשימה ב-Onshape למשתמש (בימים)	אחוז התלמידים שהשלימו את המשימה
מחזיק מפתחות אישי	16	14	1:06	1.86	80%
דיסקית חטופים	6	4	1:22	1	30%
יזמות (אישי, דגל ישראל)	12	10	1:16	1.8	60%
סביבון	10	7	0:57	1.29	50%
קוביית רמאים	11	11	2:55	3	55%
חיתוכיות לעוגיות	14	10	1:15	1.7	70%
טנגרם	13	9	0:55	1.44	65%

טבלה זו מדגימה את המעורבות של התלמידים במשימות השונות ומדגישה שונות משמעותית בין המשימות, עם הבדלים באחוזי ההשלמה ובזמן שהושקע, מה שיכול לרמז על מידת העניין או המורכבות שלהן. מרבית התלמידים השלימו את המשימות השונות, למעט משימת הדיסקית שהתקיימה באוקטובר עם פרוץ המלחמה. מעבר לקשיים הצפויים בתקופה זו, חלק מהתלמידים לא הגיע כלל לבית הספר מה שיכול להסביר למה רק שישה תלמידים השלימו את המשימה.

הנתונים מראים כי במשימת "קוביית רמאים" התלמידים השקיעו בממוצע כמעט 3 שעות במשך 3 ימים. השקעת זמן זו, חורגת משמעותית מזמן השיעור המוקצה. התלמידים בחרו לעבוד לבד ומעבר לשעות המערכת כדי לעצב ולתכנן את הקובייה האישית שלהם. ממצאים אלה מעידים על מעורבות והתמדה יוצאות דופן ועל העניין שהמשימה זו עוררה בתלמידים.

מעבר למשימות המתוכננות, 17 מתוך 20 התלמידים ביצעו פרויקטים אישיים ותכננו אובייקטים לשימוש האישי. חלק מפעילויות אלו נעשה בזמן השיעור, במקום הפעילות המתוכננת על ידי המורה ובעידודו, וחלק מחוץ לשעות השיעור. בממוצע, התלמידים ביצעו 2.05 פרויקטים אישיים כל אחד (SD=1.96) תוך השקעת 11:2 שעות במצטבר בממוצע (SD=1:58). תלמיד אחד אף ביצע 9 פרויקטים אישיים במשך 7:26 שעות במצטבר. הנתונים מעידים על המעורבות והתמדה של התלמידים בתהליך התכנון וההדפסה עד להשגת מוצר שימושי.

תכנון והדפסה בתלת-ממד כמנוף להנעה ולהתמדה בלמידה

שילוב הניתוח הכמותי עם בחינה מעמיקה של תהליכי העבודה מראה כיצד תרמו פעילויות התכנון וההדפסה להנעה ולהתמדה. נדגים זאת בשלוש דוגמאות.

מעורבות והתמדה בביצוע המשימה – הדוגמה של נתן

במשימת קוביית הרמאים התלמידים יצרו קוביות הוגנות ומוטות (רמאים), ונדרשו לזהות את הקוביות המוטות באמצעות התפלגות תוצאות ההטלה. פעילות זו קשורה למושגים מתמטיים כמו הסתברות וסימטריה, ומושגים גאומטריים כגון מידות, אמצע קטע ומפגש אלכסונים. יומן הפעילות (audit trail) של Onshape (איור 2) מתעד כיצד במשך שישה ימים, בהיקף של יותר מחמש שעות עבודה, נתן הפגין התנהגויות של מעורבות והתמדה שאינן אופייניות לתלמידים בסיכון.

יומן הפעילות מתעד את התפתחותו, מגישה אינטואיטיבית ביום הראשון (27 דקות עבודה), דרך ניסיונות חוזרים של עיצוב ומחיקה ביום השני (שעה ושלוש דקות), ועד לשימוש בתכונות מתמטיות לביצוע מדויק יותר. ביום השלישי, נתן עבד 37 דקות נוספות. הוא המשיך בתהליך של מחיקה, ביטול ושחזור פעולות רבות, מה שמעיד על תהליך למידה חקרני המבוסס על ניסוי וטעייה, כפי שניתן לראות בשורות 102-112 (ממוספרות בסדר כרונולוגי הפוך) ביומן הפעילות (איור 2), המדגימות רצף של מחיקות ועריכות חוזרות. התנהגותו זו מדגימה את ההתמדה שלו והנכונות שלו להתמודד עם אתגרים מורכבים.

Onshape מאפשרת צפייה בצילומי מצב היסטוריים, להבנת הפעולות המתועדות. למשל, איור 3 מציג צילום מצב היסטורי של שורה 109 באיור 2. ניתן לראות באיור כי בשלב זה של העבודה, נתן עסק בסרטוט ארבע נקודות על הפאה ומיקומן באופן סימטרי על ידי שימוש במידות ומרחקים.

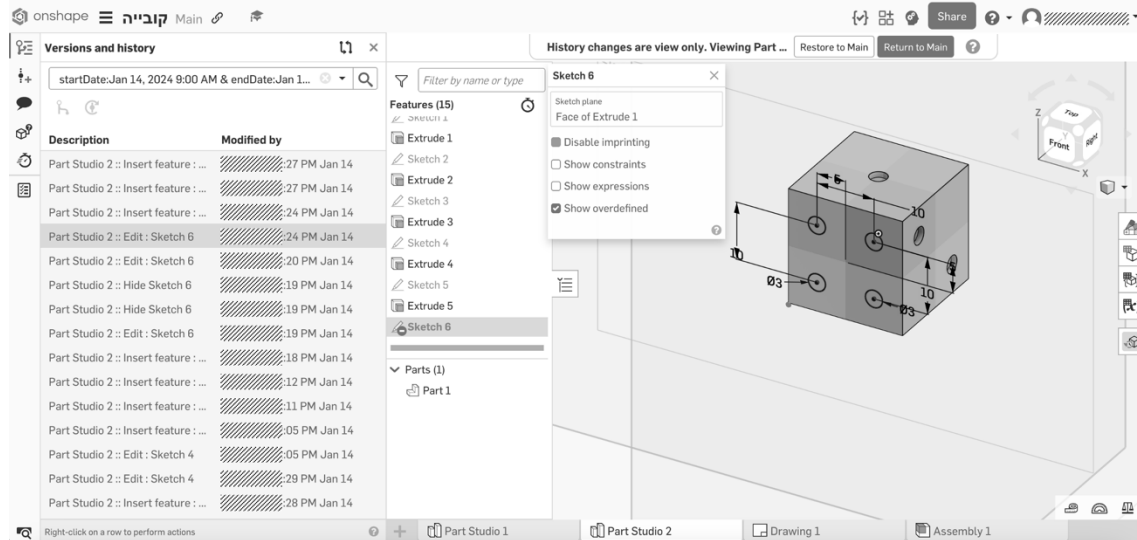
Date	Project	Folder	Document	Document type	Feature	Event	User status	User
is any time	is any value	is any value	קובייה	is any value	is any value	is any value	any value	is any value
Description	User id	Team	Active					
is any value	is any value	is any value	any value					
Time	Document	Tab	User	Description				
102 2024-01-14 12:27:15	קובייה	Part Studio 2	[User Icon]	Add or modify a sketch				
103 2024-01-14 12:27:15	קובייה	Part Studio 2	[User Icon]	Insert feature : Sketch 7				
104 2024-01-14 12:28:35	קובייה	Part Studio 2	[User Icon]	Undo Redo Operation				
105 2024-01-14 12:24:35	קובייה	Part Studio 2	[User Icon]	Add part studio feature				
106 2024-01-14 12:24:23	קובייה	Part Studio 2	[User Icon]	Insert feature : Extrude 6				
107 2024-01-14 12:24:23	קובייה	Part Studio 2	[User Icon]	Commit add or edit of part studio feature				
108 2024-01-14 12:24:16	קובייה	Part Studio 2	[User Icon]	Add part studio feature				
109 2024-01-14 12:24:11	קובייה	Part Studio 2	[User Icon]	Edit : Sketch 6				
110 2024-01-14 12:24:11	קובייה	Part Studio 2	[User Icon]	Commit add or edit of part studio feature				
111 2024-01-14 12:24:11	קובייה	Part Studio 2	[User Icon]	Add or modify a sketch				
112 2024-01-14 12:23:57	קובייה	Part Studio 2	[User Icon]	Undo Redo Operation				

איור 2. יומן פעילות (audit trail) של פעילות הקובייה של נתן ב-Onshape.

ביום הרביעי, נתן הקדיש למשימה שעתיים ושלוש דקות – הזמן הארוך ביותר שהשקיע ביום אחד. במהלך 15 הדקות הראשונות, הוא שוב עסק בביצוע, ביטול ושחזור של פעולות קודמות. הוא הצליח למקם נקודה במרכז אחת הפאות באמצעות יישום ידע גאומטרי (מפגש אלכסונים). הוא המשיך להשתמש בשיטה זו למיקום הנקודות בפאות האחרות באופן שיטתי. עבודה שיטתית זו מעידה על רמת השליטה שהצליח להשיג נתן לאור ההתמדה שלו, הן בתוכנת ה-Onshape והן ביישום העקרונות המתמטיים המאפשרים ביצוע מדויק. בסוף יום זה, הוא העתיק את העיצוב של הקובייה התקנית ויצר קובייה מוטה על ידי שינוי חלל הפנים שלה. בימים החמישי והשישי, נתן השקיע 7 ו-9 דקות (בהתאמה) בשיפורים קלים, הורדת הקבצים הדיגיטליים והדפסתם בתלת-ממד. במשך כל התקופה הזו, היו מעט מאוד פרקי זמן שבהם הוא ישב מול המחשב ללא פעילות; רוב הזמן הוא היה מעורב באופן פעיל במשימה.

התנהגותו של נתן – הקדשת שעות מרובות, תיקונים חוזרים, והתמדה – חריגה בקרב תלמידים בסיכון, המתאפיינים בחוסר מעורבות במשימות מורכבות. ההתמדה שלו תרמה לשיפור משמעותי בהבנתו המתמטית.

המעבר מעיצובים אינטואיטיביים ולא מדויקים לעיצובים מדויקים ושיטתיים מעיד על פיתוח בהבנה של מושגים מתמטיים וגאומטריים. דוגמה זו ממחישה כיצד מעורבות והתמדה בפעילויות תכנון והדפסה בתלת-ממד יכולות להגביר את המוטיבציה והמעורבות בלמידת מתמטיקה בקרב תלמידים בסיכון.



איור 3. צילום מצב היסטורי של העיצוב כפי שהיה ברגע המתועד בשורה 109 באיור 2.

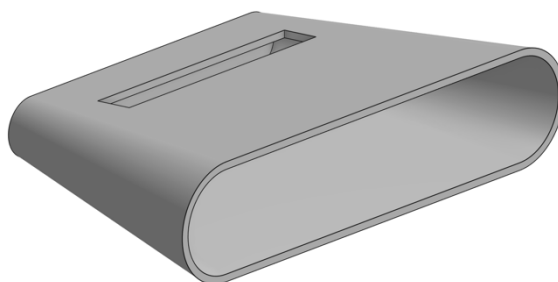
הנעה מתוך עניין ורלוונטיות – הדוגמאות של אחמד ומתן

אחמד ומתן נמנו בין התלמידים הפחות פעילים במהלך התוכנית. אחמד ביצע חמישה עיצובים ומתן רק שניים לאורך כל התקופה. אולם בחלק מהעיצובים הם השקיעו שעות רבות והתמידו בביצועם. אחמד הינו ערבי ישראלי עם קשיים בשפה העברית, שגרמו לפער גדול בהבנת הנקרא ובפרט לקשיים בהבנת דרישות בשאלות מתמטיקה. עם השנים המוטיבציה שלו ללמידה ירדה, כפי שבא לידי ביטוי בקושי שלו להתמיד בפעילות על משימה.

המורה סיפר: "כמורה ניסיתי לברר מה מעורר בו סקרנות ואחמד שאל אם אפשר לייצר מגן למכשיר". אחמד החל בתהליך הלמידה של לקיחת מידות, שרטוט על גבי נייר כדי להמחיש לעצמו באופן "קל" את כיוון העבודה. תהליך המידול הממוחשב לקח במצטבר כחודש, שבו כל מפגש נעשתה עוד התקדמות. העברת מידה כתובה מהנייר אל המודל, ניסיונות חוזרים להבנת המיקום במרחב של האובייקטים (חללים לכפתורים), הבנה של יחידות ועוד. "כשאחמד החליט שהמודל מוכן, הדפסנו אותו ובדקנו האם הוא מתאים למכשיר הטלפון. התגלה שהמגן אינו מתאים בגודל ולמרות תסכול מובן, אחמד הצליח להמשיך בעבודה, לבדוק איפה הטעויות בהעברה מהמידות שנלקחו אל השרטוט, ביצע תיקונים והמגן הודפס שוב". לאחר מכן התוצר הגמור נבדק שוב והתגלה צורך בתיקון והדפסה נוספים. "בהשוואה ללמידה במקצועות אחרים בבית הספר בתקופה הזו, אחמד גילה מעורבות והתמדה למרות אתגרים חוזרים בפרויקט. לא היה שום מקצוע אחר שבו הוא התמיד כפי שהתמיד בעבודה על המגן לסלולרי שלו".

הדוגמה הזו אינה חד-פעמית, התנהגות דומה נצפתה גם אצל מתן. מתן, תלמיד שמתנגד ללמידה באופן עקבי, ניחן יכולת טכנית טובה ותפיסה מרחבית המקדמות הצלחה בתחום שרטוט בתלת-ממד. מתן "הסכים" לעבוד בסדנה רק על דברים שמעניינים אותו וסירב בעקביות לבצע את המשימות המתוכננות. כאשר התאפשר לו לבחור פרויקט, הוא תכנן מגבר פסיבי לטלפון (איור 4). העניין בפרויקט הוביל אותו מעבר לתכנון והדפסה, לחקר מדעי של השפעת המגבר על עוצמת הקול. תהליך העבודה כלל לקיחת מידות, הדפסות ניסיון, ואף שיעור בנושא מדידת עוצמת קול שבסופו השתמש באפליקציה למדידת רעש לבדיקת יעילות המגבר. עבודה רציפה על פרויקט חקר לאורך זמן אינה מאפיינת את התנהגותו של מתן, ומדגימה את האופן שבו הטכנולוגיה רתמה אותו לעשייה לימודית משמעותית ורב-תחומית.

הרלוונטיות האישית של הפרויקט והעניין העמוק שגילו אחמד ומתן בתכנון התוצרים האישיים שלהם, יצרו מוטיבציה חזקה שאפשרה להם להתגבר על חסמי השפה, ודפוסי הימנעות מוטמעים ולהתמיד בתהליך מורכב של תכנון, מדידה ותיקון. בניגוד לשיעורי מתמטיקה רגילים, הפעילות המעשית והתוצר המוחשי דרבנו אותם להתמודד עם האתגרים ולהתמיד עד להצלחה.



איור 4. תכנון המגבר הפסיבי של מתן.

דיון ומסקנות

מחקר זה בחן את התפקיד הכפול של טכנולוגיית תכנון והדפסה בתלת-ממד בהוראת מתמטיקה לתלמידים בסיכון: מצד אחד, כסביבה המזמנת פעילות מתמטית משמעותית, ומצד שני, כמקור לנתונים המאפשרים לעקוב אחר דפוסי המעורבות וההתמדה של התלמידים. הממצאים מתבססים על מגוון מקורות מידע: נתונים כמותיים מאנליטיקות הלמידה (לוח מחוונים ויומני פעילות), תיעוד איכותני של תהליכי העבודה (צילומי מצב היסטוריים), וראיונות עם המורה. שילוב זה מאפשר הבנה מעמיקה של דפוסי המעורבות וההתמדה של התלמידים.

הניתוח הכמותי זיהה שלוש רמות של מעורבות: נמוכה (20% מהתלמידים), חלקית (25%) ופעילה (55%). הניתוח האיכותני של הדוגמאות של אחמד, מתן ונתן חשף דפוסי מעורבות והתמדה שאינם טיפוסיים לתלמידים בסיכון (Hirt et al., 2021). אחמד ומתן גילו מעורבות לא אופיינית להם כשעסקו בפרויקט שאפתני אך מעניין עבורם, תוך התמודדות מתמשכת עם אתגרי תכנון. התהליך אופיין בניסוי וטעייה שכלל הדפסת המוצר, ניסיון להשתמש בו וחזרה לשלב העיצוב כדי להגיע למוצר המוגמר. דפוס דומה נצפה אצל נתן, בתהליך מעבר הדרגתי מעבודה אינטואיטיבית למתמטית שיטתית תוך ניסיונות חוזרים של ניסוי וטעייה.

אנליטיקות הלמידה של Onshape התגלו ככלים יעילים לזיהוי ואפיון דפוסי המעורבות וההתמדה. בהמשך למחקרים קודמים על יעילות השימוש באנליטיקות למידה (Talbi & Ouared, 2022), המחקר שלנו הדגים כיצד ניתן להתחקות שילוב של נתונים כמותיים עם ניתוח איכותני מאפשר לזהות דפוסי למידה שקשה לאתר בתצפית כיתתית רגילה. במיוחד בולטת היכולת לעקוב אחר תהליכי ניסוי וטעייה, השקעת מאמץ, התמודדות עם אתגרים, והתמדה במשימה למרות קשיים ומכשולים (Eccles & Wigfield, 2020) כפי שהודגם בתהליך הלמידה של נתן, במהלכו הוא התמיד בניסיונות לייצר קובייה, תוך התפתחות השליטה בכלי והבנתו המתמטית. המחקר מרחיב את הידע הקיים בהדגמת עוצמת האנליטיקות ככלי התומך בהערכת תהליכי הלמידה ולא רק תוצרים סופיים (Levin & Rotem, accepted).

תכנון והדפסת תלת-ממד בהוראת מתמטיקה הוא תחום חדשני הנמצא בקדמת ההתפתחות הטכנולוגית והמחקרית. אנו מתכננים להמשיך ולחקור על היחס ההדדי בין הלמידה בתלת-ממד ללמידה המסורתית, כמו גם לשפר ולטייב את התכנית למי"ה 3D!

תודות

נודה לבית הספר ברנקו וייס שפתח את שעריו ללמידה ולמחקר, למכללה האקדמית אחווה שאפשרה ותמכה בפרויקט מראשיתו ולקרן אלון לחינוך על הליווי המסור.

מקורות

- Eccles, J. S., & Wigfield, A. (2020). From expectancy-value theory to situated expectancy-value theory: A developmental, social cognitive, and sociocultural perspective on motivation. *Contemporary Educational Psychology*, 61, 101859. <https://doi.org/10.1016/J.CEDPSYCH.2020.101859>
- Hershkovitz, A., & Nachmias, R. (2009). Learning about online learning processes and students' motivation through web usage mining. *Interdisciplinary Journal of E-Learning and Learning Objects*, 5(1), 197–214.

- Hirt, C. N., Karlen, Y., Merki, K. M., & Suter, F. (2021). What makes high achievers different from low achievers? Self-regulated learners in the context of a high-stakes academic long-term task. *Learning and Individual Differences, 92*, 102085. <https://doi.org/10.1016/J.LINDIF.2021.102085>
- Hsieh, H.-F., & Shannon, S. E. (2005). Three approaches to qualitative content analysis. *Qualitative Health Research, 15*(9), 1277–1288. <https://doi.org/10.1177/1049732305276687>
- Huang, C. Y., & Wang, J. C. (2022). Effectiveness of a three-dimensional-printing curriculum: Developing and evaluating an elementary school design-oriented model course. *Computers & Education, 187*, 104553. <https://doi.org/10.1016/J.COMPEDU.2022.104553>
- Iversen, S. M., & Larson, C. (2006). Simple thinking using complex math vs. complex thinking using simple math – A study using model eliciting activities to compare students' abilities in standardized tests to their modelling abilities. *ZDM, 38*(3), 281–292.
- Levin, L., & Rotem, S. H. (accepted). Opportunities for low-achieving students to learn mathematics through design and 3D printing of usable objects. CERME25.
- Levin, L., & Verner, I. (2021). Student practice in 3D design and printing for promoting analytical and applied mathematical thinking skills. *International Journal of Engineering Pedagogy, 11*(3), 39–53.
- Ng, C., Bartlett, B., & Elliott, S. N. (2018). Engaging in learning: the challenges and consequences for students from challenging backgrounds. In *Empowering Engagement* (pp. 1–16). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94652-8_1
- Talbi, O., & Ouared, A. (2022). Goal-oriented student motivation in learning analytics: How can a requirements-driven approach help? *Education and Information Technologies, 27*(9), 12083–12121. <https://doi.org/10.1007/S10639-022-11091-8/FIGURES/21>
- Yin, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications*. Sage Publications.