

פעילות אותנטית של תלמידים ומורים עם מיקרוסקופ אלקטרוני סורק במכון ויצמן

אלה יונאי*

“There is plenty of room at the bottom”
 “יש שפע מקום בתחתית”

ריצ'רד פיינמן

פיתחות למדע ולטכנולוגיה. חוקרי הוראה בתחומי ננו-מדע וטכנולוגיה מאמינים כי גם הוראת המדעים יכולה להרוויח משמעותית מעיסוק בתחום זה.

היום במכון ויצמן אנו חוקרים ומפתחים את הפוטנציאל הפדגוגי של תחום הננו-טכנולוגיה כחלק ממחקר בקבוצת הכימיה במחלקה להוראת המדעים. שמנו למטרה להנגיש את הכימיה של המחר בשיעור הכימיה היום. כדי להגשים זאת, אנו מקדמים מחקר בפעילויות מדעיות אותנטיות בעלות מרכיבים פורצי דרך במדע ובהוראת המדעים (Jones, Blonder & Kähkönen, 2020).

פעילות מדעית עם מיקרוסקופ אלקטרוני סורק (SEM) ביוזמת מכון ויצמן למדע היא דוגמה להנגשה מסוג זה. הפרויקט הוקם במכון בתחילת 2018, עם רכישת מיקרוסקופ אלקטרוני סורק שולחני המיועד להוראה (Yonai, Shimoni)

ציטוט מוכר זה של ריצ'רד פיינמן, הפיזיקאי זוכה פרס הנובל בפיזיקה, לקוח מהרצאה שנתן בנושא ננו-טכנולוגיה ב-1959, כאשר המושג ננו-טכנולוגיה כלל לא היה קיים. דווח כי חברי האגודה האמריקאית לפיזיקה שהקשיבו להרצאה היו מרותקים בזמן שפיינמן תיאר את הפוטנציאל של התחום. הוא מנה דברים שהאמין שיראה עוד בחייו, כמו מניפולציה של פני שטח ברמת האטום, ובליעת ננו-מכונה שמתקנת את הגוף ברמת התא – לבלוע את ה"רופא" במקום את התרופה... הייתה גם תחזית פחות נועזת, כמו כתיבה ממוזערת של אנציקלופדיה בריטניקה כולה על ראש של סיכה. פיינמן הציג את מזעור הכתב כאתגר שיושם כ-25 שנה מאוחר יותר. אגב, הסטודנט שהצליח לעשות זאת קיבל אלף דולר מפיינמן עצמו. כשפיינמן אמר ש"יש שפע של מקום בתחתית" הוא התכוון לשפע האפשרויות שיכולות מעשיות בתחום הננו-טכנולוגיה

* **גב' אלה יונאי**, דוקטורנטית להוראת המדעים בהנחייתה של פרופ' רון בלונדר במכון ויצמן, חוקרת ומפתחת סביבות למידה המקדמות שיתוף של תלמידים ומורים בעשייה מדעית עכשווית באמצעות תקשורת אותנטית, ויזואליזציה והנגשה של רב תחומיות ellayonai@gmail.com

(Kahil & Blonder, accepted). עד היום מעל 400 תלמידי מדעים וכ-60 מורים בחינוך העל יסודי התנסו בהפעלת מיקרוסקופ אלקטרוני סורק, יחד עם מדעני המכון. הפרויקט מציע למורים השתלמות בת שלושים שעות המאפשרת היכרות מעמיקה עם המיקרוסקופ ככלי מחקר והוראה. ההשתלמות מעניקה למורים רקע מספק כדי להפעיל בעצמם את המיקרוסקופ ולהגיע לפעילות במיקרוסקופ עם התלמידים שלהם במהלך שנת הלימודים. בנוסף יש למורים אפשרות להשתתף בסדנאות קצרות או פעילויות חשיפה המאפשרות היכרות בסיסית עם תוכני ה-SEM.

התנסות בפעילות של מדע אותנטי היא ציר מרכזי בפרויקט ה-SEM וגם תחום מחקר פורה בהוראת המדעים. הנחת היסוד של המחקר היא שילדים (וגם לומדים מבוגרים) מעדיפים "להתעסק" בדברים אמיתיים, כמו עריכת סרטון, בניית שרפרף או צילום תמונה במיקרוסקופ אלקטרוני. מדע אמיתי, או מדע אותנטי, ככלי בהוראת המדעים מבוסס על תיאוריות הוראה מהזרם הקונסטרוקטיביסטי. לפי הקונסטרוקטיביזם הקלאסי, למידה היא פעולה המתרחשת כתוצאה מחוויות במצבים שונים, ובתוך כך היא מתבצעת בתוך הקשר (Von Glasersfeld, 1995). ההקשרים האלו יוצרים את מבנה הידע של התלמיד. למידה בסביבה אותנטית היא ביטוי קיצוני של קונסטרוקטיביזם, מכיוון שבלימוד מסוג זה הידע והלימוד

נחשבים אישיים וכאלה המונעים על ידי התלמיד (Roth, 1995). החוויה האותנטית היא אישית וייחודית למי שחווה אותה וכך גם הידע שנבנה הוא ייחודי. דוגמה טובה לכך המושרשת במערכת החינוך היום היא למידת מדעים דרך חקר. הגישה מתבססת על החוויה האותנטית בכך שמניחים שהתלמיד רוכש ידע באותו האופן שבו מדען מגלה אותו; ומבחינת תוצר הלמידה, הידע שנבנה אצל כל תלמיד הוא ייחודי ומשקף את החוויה האישית שלו במהלך החקר.

החוויה האישית הזו יכולה להיות משמעותית עד מאוד. המחקר מראה כי פעילות חינוכית המאופיינת כאותנטית מהווה כר פורה לחוויות מפתח עם השפעות ארוכות טווח על השכלה, על תפיסת עולם ואפילו על מוסר. ללומדים ניתנת האפשרות לפתח תפיסות מציאותיות יותר של מדע ומדענים ושל ה"תרבות" סביב מחקר מדעי, אם הדבר נעשה מתוך פעילות אותנטית. תפיסות אלו עשויות להישאר איתם זמן רב יותר ולהשפיע באופן נרחב יותר לעומת ידע מדעי תוכני שמועבר בפעילות.

עקרונות העיצוב

כדי לאפשר את החוויה האותנטית אנו מתמקדים בכמה עקרונות בעיצוב הפעילות של הלומדים במיקרוסקופ האלקטרוני. המחקר החינוכי המלווה את התוכנית בוחן את

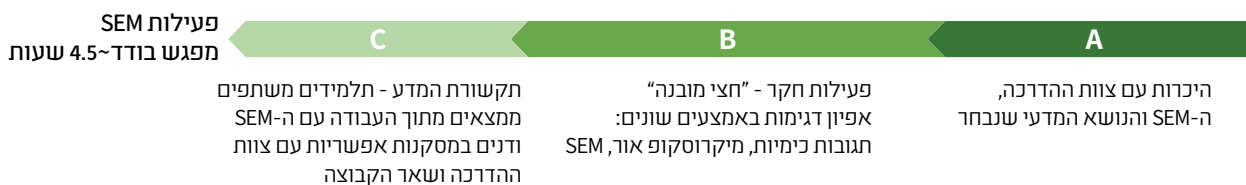
טבלה 1. עקרונות העיצוב של פעילות אותנטית במיקרוסקופ האלקטרוני

עקרון עיצוב לסביבת עבודה אותנטית SEM-ב	הקשר ללמידת מדעים אותנטית	כיצד העיקרון בא לידי ביטוי בסביבת הלמידה של SEM
1. סקרנות מדעית	סקרנות היא העיקרון המניע את עולם המדע. הספרות המקצועית מראה שסקרנות מדעית נתמכת על ידי סביבות למידה אותנטיות המאופיינות במטלות רלבנטיות לחיי היומיום ומוגדרות באופן שמשאיר מרחב פעולה ויצירתיות ללומדים.	שימוש נגיש ובלתי אמצעי ב-SEM פותח לתלמידים אפשרות להתבוננות בפני שטח בסקלת מיקרו-ננו. התלמידים מבצעים תהליך חקר שחלקו חופשי ואינטואיטיבי וחלקו מובנה על ידי המדען המוביל והמורה שלהם.
2. בין-תחומיות	מחקר עכשווי הוא לרוב בין-תחומי. כלומר נוגע במושגים מתחומי דעת הנלמדים בבית הספר בנפרד (ביולוגיה, כימיה, פיזיקה, מדעי כדור הארץ, גיאולוגיה ועוד)	כל פעילות מתבצעת בהקשר של מחקר עכשווי שלרוב מתקיים במכון ויצמן. הקשר לפעילות נבחר כך שתחום הדעת המרכזי הוא התחום שבמסגרתו הקבוצה מגיעה לפעילות ומתאים לידע התוכנית של המורה (לדוגמה: כימיה). תחום הדעת המרכזי יהיה מודגש אך יוצגו גם מושגים רלבנטיים מתחומי דעת אחרים.
3. שיתוף פעולה	עבודה מדעית נעשית בתוך שיח מתמיד עם שותפים או עמיתים מקרוב ומרחוק. בהתאמת סביבה ללמידה אותנטית של מדע, הספרות ממליצה על אימוץ פרקטיקות מדעיות באינטראקציות חברתיות.	רוב הפעילות, ובייחוד העבודה המעשית ב-SEM, מתבצעת בקבוצות קטנות. הפעילות מזמנת ומאפשרת דיון והתייעצות עם המורה, המדען וחברי צוות נוספים. בחלק המסכם, כל קבוצה משתפת את הקבוצות האחרות בתמונות שצילמה. המדען מוביל דיון על מה שאפשר ללמוד מהתמונות.
4. פיתוח פדגוגי מותאם SEM מורים בלבד*	ידע פדגוגי תוכני (PCK) הוא תחום תוכן בהוראה העוסק בגישות הוראה מותאמת לתחום ההוראה ולכלי ההוראה.	הפרויקט נותן הזדמנות לבחון את ה-SEM ככלי הוראה חדשני בהוראת המדעים ולפתח עבורו ידע פדגוגי בשיתוף פעולה עם המורים.

התלמידים פותחה בשיתוף פעולה בין מדעני מכון ויצמן, מן המדע (כימיה ביולוגיה פיסיקה) ומהוראת המדעים וסגל ההדרכה הבכיר של מכון דוידסון. בתוך כך פותחו שש פעילויות בנושאים שונים של מחקר עכשווי. כל פעילות מורכבת משלושה חלקים, כמתואר באיור 1:

ההשפעה של אותם עקרונות על חוויית הלמידה ועל מאפיינים אפקטיביים שונים אצל הלומד, כמו חוויית האוטנטיות, רגשות ועמדות כלפי למידת מדעים.

עקרונות העיצוב הבאים לידי ביטוי בסביבת הלמידה של ה-SEM מתוארים בטבלה 1. הפעילות המדעית עבור



איור 1: מבנה כללי של פעילות SEM

המחקר המלווה

המחקר החינוכי המלווה את הפעילות עוסק בשני תחומים מרכזיים:

- **מידת האוטנטיות של הפעילות**
- **ההשפעה של הפעילות על הלומדים**

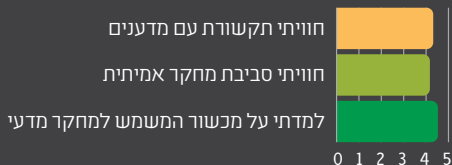
בשאלון שהעברנו על חוויית הפעילויות עם המיקרוסקופ מצאנו כי הפעילות דורגה על ידי התלמידים בציון חציוני מקסימלי (5 בסקלה של 1-5) במדד האוטנטיות המתייחס ללמידה על מכשור מדעי מתקדם. ציון חציוני גבוה של 4 התקבל בשאר מדדי האוטנטיות, לדוגמה: התקשורת עם המדענים וחוויה של סביבת מחקר אמיתית. שלוש המדדים הנ"ל גם הובילו את הטבלה בציון הממוצע (איור 2).

במחקר השתמשנו גם בכלים איכותניים מתוך תצפיות שנערכו במהלך הפעילות של התלמידים, ובייחוד במהלך העבודה על המיקרוסקופ. אנו רואים את התלמיד "נקלע לסיטואציה" של סביבה מדעית אותנטית בעבודה עם ה-SEM. בעודו חווה סביבת מחקר אמיתית הוא לעיתים בוחן אם היא מתאימה לו ויכולה להיות חלק מהעצמי האמיתי הפוטנציאלי שהוא – או היא – מפתחים. אנו שומעים תכופות את התלמידים במהלך הפעילות שואלים את המדענים שאלות על היומיום שלהם במעבדה ברמה המעשית – "מה אתה עושה כשאתה מגיע לעבודה בבוקר?", "איך יום העבודה שלך נראה?" בתוך כך עולות גם שאלות רבות על המסלול האקדמי ועל ההתקדמות. בשאלות אלו מנסים התלמידים להרחיב לעצמם את חוויית הסביבה האוטנטית, על מנת להמשיך ולבחון אם היא מתאימה להם.

החלק האוטנטי ביותר בפעילות הוא השלב שבו התלמידים מפעילים את המיקרוסקופ בעצמם ובוחנים דגימות שהכינו בליווי המדען והמורה שלהם. השיח והדינמיקה בין המדען לתלמידים מזכירים מאוד את המתרחש בעבודה במעבדות המחקר בין חוקר לתלמידיו. רוב התלמידים שנשאלו מה לדעתם יזכרו מהפעילות בעוד עשר שנים העלו נקודות מהחלק הזה של הפעילות. המדען או המדענית שמלווים את הפעילות מרכזיים מאוד בחלק הזה. הם מנחים את התלמידים ועוזרים להם לבטא את הסקרנות שלהם. המחויבות והיכולת שלהם ליצור סביבה אותנטית עבור התלמידים היא קריטית, ועל פי כן גם המדענים המשתתפים בפרויקט נתרמים מליווי של צוות החוקרות בתהליך הלמידה וההתפתחות שהם עצמם עוברים.

החוויה האוטנטית של תלמידים ומורים ב-SEM

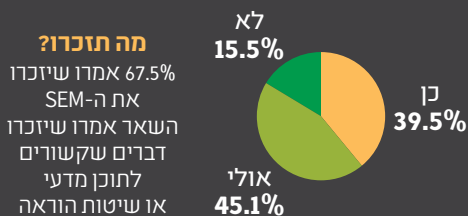
היגדים מובילים בדירוג 1-5 (ממוצע עבור 175 תלמידים)



"להשתמש במיקרוסקופ אלקטרוני זה חוויה שלא אשכח, להסתכל על דברים מקרוב, להתעניין, לחקור עם הקבוצה בשיתוף פעולה ולהעשיר את הידע בתחומים כה רבים."

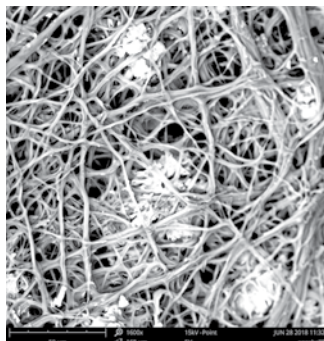
תלמידת כיתה יב

האם לדעתך תזכרי את פעילות ה-SEM בעוד 10 שנים?



איור 2: ממצאים מרכזיים מפעילות SEM

“פְּנִיָּשָׁה הִינּוּ שְׁנֵי אֲנָשִׁים כְּמוֹהַ כֶּסֶף חוֹמְרִים כִּי־אִיִּם הֵבֵאִים הַחֶלֶץ זֶה אֶם זֶה;
אִם יִשְׁנֶה גְּזוּבָה, שְׁנֵיהֶם זוֹבְרִים גְּהֹאֵךְ שֶׁל הַשְּׁגָעָה”
קארל יונג, האדם המודרני בחיפוש אחר הנפש (1933)



איור 3:

ימין – מרכזי התגבשות של סידן כחמתי על מצע אורגני; החלק הפנימי של קליפת ביצה. התמונה צולמה על ידי מורי כימיה בעזרת מיקרוסקופ Phenom SEM שולחני, במתח האצה 15kV ובהגדלה פי 1600 שמאל – תלמידים בליווי המדען והמורה בוחנים דגימה SEM-ב

עוד מחזונו של פיינמן ויעשירו את תחום הננו בידע וביכולות מופלאות.

עבור תמונות נוספות של המיקרוסקופ במכון וייצמן וסיפורים מתוך פעילויות של מורים ותלמידים ניתן לעקוב אחרי הדף הבא: [We.SEM](#). דפים נוספים עם תוכן מיקרוסקופיה המופעלים על ידי מדענים וכוללים תמונות והסברים: [1. nanoshorts](#), [2. sciencephotolibrary](#), [3. nanoscape](#), [4. microscope meup](#), [5. microart2020](#).

מקורות מרכזיים

Jones, M. G., Blonder, R. & Kähkönen, A.-L. (2020). "Challenges in nanoscience education". In: K. D. Sattler (Ed.), *21st Century Nanoscience – A Handbook: Public Policy, Education, and Global Trends* (Volume Ten) (Vol. 10). Taylor & Francis (CRC Press). <https://doi.org/doi.org/10.1201/9780429351631>

Roth, W.-M. (1995). *Authentic School Science. Knowing and Learning in Open-Inquiry Science Laboratories*. Kluwer: Dordrecht.

Von Glasersfeld, E. (1995). "Constructivism: A way of knowing and learning". *Studies in Mathematics Education 6th ser*, 2, 18.

Yonai, E., Shimoni, E., Kahil, K., Blonder, R. (accepted). *Authentic science learning during COVID-19: The adaptive design of a SEM outreach activity*.

יאיר, גד. (2006). *מחוויות מפתח לנקודות מפנה*, ספריית פועלים.

מבט מרחוק על העתיד הקרוב - Remote SEM

בימים של הוראה מרחוק (תקופת הקורונה), סביבת הלימודים של ה-SEM מתקיימת אף היא גם במרחב הווירטואלי, זאת כדי להמשיך לאפשר לתלמידים ולמורים לחוות את העבודה במיקרוסקופ גם בימי הקורונה. עיצוב הפעילות עבר תהליך של התאמה להוראה מרחוק. הממד הפעיל נשמר בכך שהתלמידים משתלטים על המיקרוסקופ מרחוק (מביתם או מהכיתה) ומפעילים אותו על מנת לאפיין דגימות שהם שולחים לנו מבעוד מועד.

בפריקט ה-SEM, מעבר לידע הייחודי החוויה האוטנטית נותנת הזדמנות מיוחדת ליצור קשר, לקיים שיחות ולפתח רגש בין התלמיד לעולם המדעי והמדענים כפי שהם. בהקשר הזה אפשר לציין את ריצ'רד פיינמן כאדם שניפץ תקרת זכוכית מיוחדת בעולם המדעי – הוא ידוע בשל אופיו והגיגיו יוצאי הדופן לא פחות מאשר בשל תרומתו למדע. פיינמן נחשב למרצה רב השראה בזכות האישיות פורצת הגבולות שהביא לכיתה וכמובן גם בזכות ראייתו הייחודית ביחס לפיזיקה.

גד יאיר, אשר חקר חוויות מפתח חינוכיות, מתאר את המחקר שלו בספרו, **מחוויות מפתח לנקודות מפנה**, ומציין כי חוויות מפתח יכולה להתרחש בפרק זמן קצר ביותר והשפעתה יכולה להיחקק בלומדים לכל חייהם. אנו מאמינים שסביבת הלמידה האוטנטית עם ה-SEM ומדעני המכון יכולה לזמן חוויות מסוג זה ומנסים לבחון זאת במחקר החינוכי המלווה את הפרויקט. אנו מקווים שנצליח לשתף בחוויה זו תלמידים ומורים רבים ככל האפשר. חלק מהם אולי יגשימו בעתיד