

יצירתיות וקוגניציה בלמידה מעוגנת גוף של מושגים בפיזיקה

רוני זהר, אסתר בגנו, בת־שבע אלון, דור אברהמסון

תקציר

כיצד ניתן לחזק את הזיקה בין מושגים מדעיים הנלמדים בבית הספר לבין מושגים ספונטניים המתפתחים באופן טבעי? כלומר מהו הקשר בין ידע נאיבי לבין ידע מובנה, כגון מושגים במכניקה הנלמדים במסגרת לימודי הפיזיקה? מחקרים אתנוגרפיים ומחקרים בנירופיזיולוגיה מראים שפיזיקאים פותרים בעיות מורכבות באמצעות סימולציות סנסומוטוריות דמיוניות של התופעות הנידונות, אולם לא ידוע מהן ההשלכות על אופן ההוראה בבתי הספר התיכוניים. כחוקרי למידה וחינוך, המושפעים מתאוריית ה־Embodiment (מוח וגוף כיחידה אחת), חקרנו את הפוטנציאל של פדגוגיה מעוגנת גוף בלימוד מושגים פיזיקליים מורכבים.

במאמר זה אנו מתארים שני חקרי מקרה של תלמידות תיכון, שלמדו מושגים מורכבים בפיזיקה, שיווי משקל ומהירות זוויתית, על ידי פתרון בעיות סנסומוטוריות כפרט וכקבוצה. גישת ההוראה התבססה על פדגוגיה מעוגנת גוף (זהר, 2015 2015; Zohar et al). כחלק מתהליך הלמידה, התלמידות הציגו עבודות סיכום שכללו את המושגים בפיזיקה וביטאו יצירתיות ועומק מדעי, פילוסופי ורגשי. אנו מנסים לאפיין את התהליכים שהובילו לתוצאות אלו, בעזרת ניתוח איכותני של האופניויות השונות (Multimodal analysis) בתהליך הלמידה ובעבודות הסיכום.

מבוא

כיצד ניתן לחזק את הזיקה בין מושגים מדעיים הנלמדים בבית הספר לבין המושגים הספונטניים המתפתחים באופן טבעי? כלומר מהו הקשר בין ידע נאיבי לבין ידע מובנה, כגון מושגים במכניקה הנלמדים במסגרת לימודי הפיזיקה? מחקרים רבים מראים כי סטודנטים הלומדים מכניקה בכל הרמות חווים קושי בהבנת המושגים, ולעיתים קרובות ממשיגים אותם בצורה אינטואיטיבית, שאינה מתאימה למושגים המקובלים בפיזיקה (McDermott, 1999). מחקרים מראים כי הוראה, המובילה ללמידה פעילה, מעבר להקניה פרונטלית, תומכת בחיבור בין הידע הנאיבי לידע המדעי (Meltzer, 2012). הייק (Hake, 1998), לדוגמה, חן את ידיעותיהם של 6,000 סטודנטים בקורסי מבוא בפיזיקה לפני הלמידה ואחריה באמצעות מבחנים הבודקים הבנת מושגים, הוא מצא כי אחוז התשובות, המצביעות על הבנה מושגית, היה גבוה פי שניים בקורסים, בהם נעשה שימוש בלמידה פעילה לעומת קורסים, בהם השתמשו בלמידה מסורתית.

גישה מעוגנת גוף (Embodiment), שמבוססת על פרדיגמה מדעית קוגניטיבית, הדוחה את ההפרדה הפילוסופית בין המוח לגוף, נועדה לחבר בין חוויה לידע מושגי. על פי גישה זו, החשיבה היא פעילות הנעשית בכל הגוף, בסביבה, בחברה ובתרבות (Abrahamson, 2017). תאורטיקנים

של קוגניציה מעוגנת גוף (Embodied cognition) מבקשים למקם את הפעילות הסנסומוטורית כטבועה בכל חשיבה, אך אין דעה אחידה לגבי משמעות המושג Embodied cognition.

"There is limited agreement on what the term 'embodied cognition' exactly means and to what extent "embodiment" includes sensorimotor versus higher level cognitive function", (Koziol et al., 2012, p.513).

הפסיכולוג לב ויגוצקי הסובייטי ניסה לנסח את מקומם של ההיבטים הסנסומוטוריים בתהליך החשיבה כבר במאה הקודמת:

"Every thought associated with movement induces on its own a certain preliminary straining of a corresponding muscular system that tends to be expressed in movement. If it remains only a thought, then since this movement is not brought to fruition and is not disclosed, it remains concealed in an entirely tangible and effectual form",

(Vygotsky, 1997: 157, Original work published. 1926).

חוקרים חינוכיים, המושפעים מתאוריית ה־Embodiment, יוצרים ובוחנים סביבות למידה המעניקות הזדמנויות לתלמידים לעסוק בפתרון בעיות סנסומוטוריות באמצעים פדגוגיים, התומכים בהתפתחות רעיונות (Abrahamson & Lindgren, 2014). לדוגמה אברהמסון וטרניניק (Abrahamson & Trninic, 2011) מדווחים על מחקר בו תאוריית ה־Embodiment היוותה השראה לבנייה של תוכנית לימודית עבור המושג המתמטי של שוויון פרופורציות; שר ואחרים חקרו מודל ללמידה של המושג אנרגיה בפיזיקה (Scherr et al., 2010; Scherr et al., 2013). במחקרים אלה ואחרים ריבוי האופניויות (modalities), כדוגמת מחוות ידיים, היו חשובים לתיווך של פעולה, הסקה ושיחה (Hall & Nemirovsky, 2007; Stephens & Clement, 2008; Scherr, 2012). מחקרים אלה מרחיבים את ההמשגה שלנו בנוגע למקום ואופן הלימוד. לדוגמה חוקרים מסוימים מאפיינים סביבות למידה היברידיות ככאלה שמגשרות בין לימוד מחוויית בחיי היומיום עם הלמידה המסורתית בבית הספר (Gutiérrez et al. 1999). במהלך תכנון של לימוד היברידי יעיל יש *" לוודא כי יעשה שימוש בשיטות היברידיות בדרכים אשר מקדמות את יעדי הלמידה בתחום"*. (338 Ma JY, 2016). במחקר הנוכחי, סטודיו למחול שימש כסביבה היברידית ללמידה מעוגנת גוף.

למידה מעוגנת גוף במחקר זה

במאמר זה אנו מציגים שני חקרי מקרה (case studies) של תלמידות בכיתה י', הלומדות מושגים מורכבים בפיזיקה; שיווי משקל ומהירות זוויתית. התלמידות השתתפו בקורס פיזיקה המשלב למידה מעוגנת גוף.

חקרי המקרה עוקבים אחר חווית התלמידות במהלך הקורס ובעבודות הסיכום, שהן הגישו כססיימו ללמוד את המושגים. עבודות הסיכום, שנעשו במגוון אופניויות, כגון מיצגי וידאו, מוזיקה ומחול, הביעו הבנה מושגית עמוקה וזיקה לחומר הנלמד.

הלמידה במחקר זה הייתה מבוססת על עיקרון יציוב מרכזי בפדגוגיה מעוגנת גוף שאנו מציעים: לאפשר לתלמידים להתנסות בחוויה גופנית חווייתית שתקדים את ההסבר המדעי ואת הנוסחאות שיבואו לאחר מכן, *"Experience first, signify later"* (2014; 2099 Abrahamson). הרציונל לעיקרון זה היה שההתנסות החווייתית מאפשרת לתלמידות להרגיש ולהבין בגופן את התופעות ואת המושגים הפיזיקליים עוד לפני שהגדירו והסבירו אותן מילולית. החוויה הגופנית יכולה לשמש כבסיס טוב להבנת המושג הפיזיקלי, אשר בהמשך מוגדר ומוסבר בשילוב רפלקציה על החוויה הגופנית.

במחקר זה התלמידות עבדו באופן עצמאי, בזוגות או כקבוצה. התלמידות קיבלו מטלות תנועתיות מורכבות. אנו טוענים כי מציאת הפתרונות למטלות אלה יצרה הזדמנויות ללמידה משמעותית. הוראת המושגים שיווי משקל ומהירות זוויתית יישמה את המרכיבים הבאים של 'למידה מבוססת גוף לצורכי המשגה מדעית', אשר נוסחו במאמר הקודם של זהר (זהר, 2015): **תנועות מושכלות** מאפשרות ללומד להתייחס למושגים פיזיקליים מורכבים (ולעיתים מופשטים) מתוך חוויות יומיומיות. התנועות המושכלות (שובל, 2006 ; Shoval, 2011) נועדו להבהיר לתלמידות רעיון חדש באופן חזותי וכן את ניתוחו, הבעתו ומימושו. דוגמה לכך היא 'פעילות המעגל הקבוצתית', המתוארת בהמשך המאמר בחקר המקרה הדן במהירות זוויתית. **אימפרוביזציה בתנועה** מקשרת בין הגורמים דמיון, תנועות גוף ורגשות (תמונה 1). בחקר המקרה, הדן בשיווי משקל בהמשך המאמר, מתואר כיצד נוצר הקשר בין גורמים אלה.



תמונה 1: דוגמה לאימפרוביזציה בתנועה - אחד המרכיבים של למידה מעוגנת גוף. רקדניות: תלמידות מגמת מחול מכיתה י. צילום: רויה מידן. 2015.

טכניקות המשלבות הליכה ודיבור (קישור לאתר Science choreography project). לדוגמה בהוראת תנועה מעגלית כמבוא להוראת נושא המהירות הזוויתית, לאחר אימפרוביזציה המשלבת תנועות מעגליות של חלקים שונים בגוף, התלמידות התבקשו לצעוד בסטודיו ולחשוב בעצמן על תנועות מעגליות בעולם האמיתי ובטבע. לאחר מכן, הן דיברו ביניהן והחליפו רעיונות. **מאפיינים נבחרים של שיטת פלדנקרייז** (Feldenkrais, 1980) המיועדים להגביר את המודעות לגוף ולהדגיש את הקשר לתופעות חיצוניות. לדוגמה בחקר מקרה, הדן בשיווי משקל, נעשה שימוש בתרגילי פלדנקרייז הקשורים ליציבות.

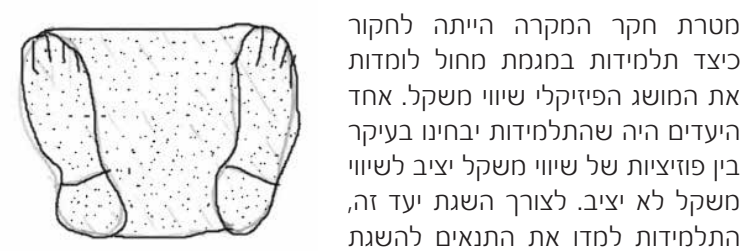
הרפיה - לדוגמה שכיבה על הגב ושימוש בתרגילי נשימה לבטן, כפי שרואים בתמונה 2.



תמונה 2: דוגמה להרפיה, אחד המרכיבים של למידה מעוגנת גוף. רקדניות: תלמידות מגמת מחול מכיתה י. צילום: רויה מידן. 2015.

כותבת המאמר, זהר, שימשה כמנחה של השיעורים המוצגים במאמר הזה. נעשה ניתוח וידאו של הפעילויות במטרה להתחקות אחר הופעתן ויצירתן של האופניויות השונות לביטוי החשיבה של התלמידות (כמו היגדים ומחוות גוף). מטרת הניתוח הייתה להבין כיצד הן מבטאות את התוכן הפיזיקלי שנלמד. אנו טוענים שפתרון בעיות שיתופיות על ידי המשתתפות והתקשרות ביניהן במהלך הלמידה יכולים לעגן את המשמעות של המושגים בהתנסויות חווייתיות משותפות, וכך לתרום להיבטים הסוציו־תרבותיים של הכיתה.

שיווי משקל - חקר מקרה



מטרת חקר המקרה הייתה לחקור כיצד תלמידות במגמת מחול לומדות את המושג הפיזיקלי שיווי משקל. אחד היעדים היה שהתלמידות יבחינו בעיקר בין פוזיציות של שיווי משקל יציב לשיווי משקל לא יציב. לצורך השגת יעד זה, התלמידות למדו את התנאים להשגת שיווי משקל ואת המושגים 'בסיס תמיכה' ו'מרכז כובד'. ההשראה לגישת

ההוראה הייתה עבודתו של לוס (Laws, 2008) עם רקדנים.

התלמידות למדו כי בסיס התמיכה הוא השטח התחום בתוך נקודות המגע של הגוף עם הרצפה. איור 1 מדגים את בסיס התמיכה כאשר עומדים ושתי הרגליים נמצאות על הרצפה.

נוצר קושי בהגדרת מרכז הכובד בהקשר לחקר המקרה הזה, שכן אי אפשר לתת הגדרה רשמית בגלל הצורך בחישובים מתמטיים, שאינם חלק מההוראה שננקטה במחקר הזה. התלמידות חוו את המושג של מרכז הכובד באופן אינטואיטיבי, כנקודה בה כוח הכבידה המושך מטה פועל על הגוף כמכלול. בתחום הריקוד נקודה זו מכונה לרוב בשם: "The center".

בהקשר לתנאי שיווי המשקל, אדם נמצא במצב של שיווי משקל יציב אם מרכז הכובד שלו נמצא ישירות מעל נקודה כלשהי בבסיס התמיכה. לגבי הריקוד, התלמידות חוו שתי אפשרויות למצב שיווי המשקל: שיווי משקל יציב, שבמהלך הפעלת כוח האדם אינו נופל, וזו של שיווי משקל לא יציב, שבמהלך הפעלת כוח, אפילו קטן מאוד (דחיפה קלה), האדם נופל.

תהליך הלמידה

בחקר המקרה, קבוצה של 12 תלמידות תיכון בכיתה י' השתתפה בארבעה שיעורים רצופים בני 90 דקות כל אחד. השיעורים נערכו בסטודיו למחול

שבבית הספר בהנחיית החוקרת לפי גישת 'למידה מבוססת גוף לצורכי המשגה מדעית', אשר כללה חוויה פיזית של כל אחד מהמושגים הנלמדים לפני הלימוד האקדמי בכיתה. בשיעור הרביעי והאחרון התלמידות נדרשו להציג רצף תנועתי, הכולל שלוש פוזיציות של שיווי משקל ומעברים ביניהן. להלן תיאור קצר של השיעורים.

שיעור ראשון

השיעור הראשון החל באימפרוביזציה של תחושת יציבות ואי יציבות. התלמידות הבינו את תרומתן של נקודות המגע עם הרצפה לשמירת היציבות. בהמשך, המנחה הסבירה את המושג בסיס התמיכה, ובעבודה בזוגות נדרשו לסמן את בסיס התמיכה של בת זוג בפוזיציה נתונה, כפי שמוצג בתמונה 3. נוסף לכך, התלמידות נתבקשו לדחוף קלות את בנות זוגן, על מנת לבדוק האם תאבדנה את שיווי משקלן. בתום הפעילות המנחה תייגה כל פוזיציה כמצב שיווי משקל יציב או כמצב שיווי משקל לא יציב.



תמונה 3: תרגול בסימון בסיס התמיכה בחקר המקרה של הוראת המושג שיווי משקל. רקדניות: תלמידות מגמת מחול מכיתה י. צילום: ריה מידן, 2015.

שיעור שני

השיעור השני החל בתרגילי פלדנקרייז (תמונה 4) העוסקים ביציבות (פלדנקרייז, 1989). בהמשך לתרגילים, כמה מהתלמידות הצהירו כי *"כאשר בסיס התמיכה גדול יותר, הפוזיציה יציבה יותר, ולכן קשה יותר ליפול"*. הדיון בסוף השיעור נסב סביב אספקטים תרבותיים ורגשיים של יציבות, כגון יציבות בחיים, יציבות כלכלית ויציבות במערכות יחסים.



תמונה 4: תרגילי פלדנקרייז בשימוש בחקר המקרה של הוראת המושג שיווי משקל. רקדניות: תלמידות מגמת מחול מכיתה י. צילום: ריה מידן, 2015.

שיעור שלישי

השיעור השלישי החל באימפרוביזציה. המנחה ביקשה מהתלמידות ללכת בסטודיו ולהרגיש את הרצפה כאשר המוזיקה מושמעת. היא ביקשה מהן לדמיין שכל חלק מגופן, שהמנחה מציינת, יהיה כמו מנוע המפעיל את שאר איברי הגוף. לאחר מכן, היא ביקשה מהן לדמיין שגופן הוא כדור קטן ועליהן לנסות לצמצם את משקל גופן לתוכו, כי הוא כמו מנוע התנועת הגוף כולו. הרציונל של פעילות זו היה לעודד את התלמידות לדמיין את הכדור כאילו שהוא מרכז הכובד. בסוף פעילות האימפרוביזציה, המנחה שאלה את התלמידות היכן הן חשו בגופן שנמצא הכדור הדמיוני. מרבית התלמידות חשו שהוא נמצא במרכז הבטן שלהן, וכאשר אנוחנו עומדים מרכז הכובד אכן נמצא במרכז הבטן.

התלמידות הופתעו לגלות שמרכז הכובד אינו חייב להיות תמיד באזור הבטן (תמונה 5), כפי שהן חוו בפוזיציות שונות, ותלוי בפוזיציה של הגוף. לדוגמה כאשר מרימים את הזרועות מעל הראש, מרכז הכובד גבוה יותר מאזור הבטן; כאשר מפנים את הזרועות ימינה, מרכז הכובד מוסט ימינה. התלמידות התפלאו מאוד לגלות כי מרכז הכובד אף יכול להיות חיצוני לגוף בפוזיציות מסוימות, לדוגמה כאשר נשענים קדימה, כפי שנראה בתמונה 5. מידע זה מפתיע לעיתים גם רקדנים מקצועיים.



תמונה A5: הדגמה של מרכז כובד חיצוני לגוף.

תמונה B5: תרגול במציאת מרכז הכובד בפוזיציות שונות.

רקדניות: תלמידות מגמת מחול מכיתה י. צילום: ריה מידן, 2015.

עם תום שלושת השיעורים, המנחה הסבירה את התנאים לשימור שיווי המשקל. ראשית, היא סימנה ארך ממרכז הכובד לבסיס התמיכה בעזרת אצבעה והראתה כי ככל שבסיס התמיכה קטן יותר, כך האפשרויות לשמירה על שיווי המשקל מוגבלות יותר. לאחר מכן, המנחה הדגימה עם אחת התלמידות עמידה על קצות האצבעות, כדוגמה לבסיס תמיכה קטן. כמו כן, התלמידות התאמנו בזוגות על שמירה של מבנה יציב, כאשר היו אחת, שתיים, שלוש או ארבע נקודות מגע עם הרצפה, אחת התלמידות בצמד הייתה צריכה לסמן את מרכז הכובד, הנמצא בדיוק מעל בסיס התמיכה בפוזיציה ששותפתה ביצעה, כפי שנראה בתמונה 6. לאחר מכן, המנחה ביקשה מהזוג לצפות בזוג תלמידות אחר, לבחון את ההסבר שסיפק ולערךר דיון.



תמונה A6: תנאי ליציבות - אימון בסימון בסיס התמיכה. תמונה B6: תנאי ליציבות - אימון במציאת מרכז הכובד. רקדניות: תלמידות מגמת מחול מכיתה י. צילום: ריה מידן, 2015.

שיעור רביעי

בשיעור הרביעי והאחרון המנחה ביקשה מהתלמידות לפתור מטלות גופניות, הקשורות למושג שיווי משקל. לדוגמה המנחה ביקשה מהתלמידות לעמוד כאשר רגליהן צמודות לקיר ולנסות לרכון קדימה, כמצוין בתמונה 7. התלמידות הבינו כי הדבר בלתי אפשרי ונתנו הסבר.



תמונה 7: דוגמה למטלה גופנית הקשורה למושג שיווי משקל. רקדניות: תלמידות מגמת מחול מכיתה י. צילום: ריה מידן, 2015.

פרויקט מסכם בנושא שיווי משקל

עם סיום השיעור האחרון, המנחה ביקשה מהתלמידות להתחלק לקבוצות וליצור רצף תנועתי של שלוש פוזיציות של שיווי משקל. לאחר הצגת הרצף התנועתי, התלמידות נדרשו להחליט האם הפוזיציות מייצגות שיווי משקל יציב או שיווי משקל לא יציב. היצירה של שלושת הפוזיציות דרשה מהן יצירתיות ורפלקציה על הלמידה. כל זוג תלמידות בחר את התנועות באופן אישי והציע את רצף התנועות יחד עם מעברים בין תנועה אחת לרעותה. תמונה 8 מציגה שני זוגות של תלמידות המסבירות את אחת התנועות ברצף שיצרו. בתמונה A8 התלמידה מסבירה כיצד הפוזיציה ממחישה את מצב שיווי המשקל. היא הסבירה כי בסיס התמיכה הוא השטח מתחת לכף הרגל, ואז ציירה קו דמיוני היורך אנכית ממרכז הכובד לבסיס התמיכה. התלמידות הראו כיצד תנודות קדימה ואחורה אינן משפיעות על יציבות הרקדנית ואינן גורמות לה לאבד את שיווי משקלה, כיוון שמרכז הכובד עדיין נמצא ישירות מעל בסיס התמיכה שמתחת לכף הרגל. לעומת זאת, תנוודות לצדדים יגרמו לה ליפול, לכן התלמידות הגדירו את הפוזיציה כמצב שיווי משקל לא יציב.



תמונה 8: מתוך הרצף התנועתי. שני זוגות של תלמידות (A, B) מציגים פוזיציה ושופטים האם שיווי המשקל יציב או לא יציב. רקדניות: תלמידות מגמת מחול מכיתה י. צילום: ריה מידן, 2015.

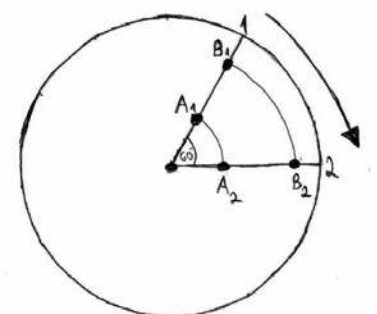
בתמונה B8 התלמידות סיווגו את הפוזיציה כשיווי משקל לא יציב, הן הסבירו כי התלמידה השמאלית סובבה את המותן שלה, כך שמרכז הכובד הוסט לקצה כף רגלה השמאלית. לטענתן, אף שבסיס התמיכה יחסית רחב וכולל את שתי כפות הרגליים, כל תזוזה נוספת של הרקדנית לצד שמאל תוציא אותה ממצב שיווי משקל.

תמונה	סיווג	הסבר התלמידה
A	שיווי משקל לא יציב	למרות בסיס התמיכה הרחב הכולל את שתי כפות הידיים וכף רגל, מרכז הכובד ממוקם בקצה גבול של בסיס התמיכה וכל תזוזה תוביל לאיבוד שיווי משקל של הרקדנית. למרות שהפוזיציה היא יחסית יציבה, כל תזוזה לכיוון הורעות ישמור את מרכז הכובד מעל לבסיס התמיכה, אולם כל תזוזה לכיוון אחר יגרם לאיבוד של שיווי משקלה של הרקדנית.
B	שיווי משקל לא יציב	פוזיציות מעבר. פוזיציה זו אינה חלק משלוש הפוזיציות שאותן התבקשו התלמידות לבצע אך היא הייתה הכרחית לשם מעבר בין פוזיציה המוצגת בתמונה A לפוזיציה המוצגת בתמונה D. התלמידה איבדה את שיווי משקלה כאשר הורידה את רגלה מעבר לפוזיציה הבאה (תמונה C).
C	שיווי משקל לא יציב	פוזיציות מעבר כפי בדרך לפוזיציה המוצגת בתמונה D.
D	שיווי משקל יציב	בסיס התמיכה הוא סביב שתי כפות הרגלים כאשר עומדים במישוק רחב ומרכז הכובד עדיין נמצא בקצה גבול בסיס התמיכה גם במקרה של תזוזת הרקדנית לכיוונים שונים. רק אם הרקדנית תדחף חזק קדימה היא לאבד את שיווי משקלה.
E	שיווי משקל מאוד לא יציב	מרכז הכובד נמצא בקצה גבול בסיס התמיכה.
F	שיווי משקל מאוד לא יציב	על מנת לשמור אל פוזיציה זו, נדרשת הרקדנית לפרט את זרועותיה למנים וכך להסיט מעט את מרכז הכובד. פעולה זו מסייעת על שמירה של מרכז הכובד מעל לבסיס התמיכה.

טבלה 1: רצף תנועתי של זוג תלמידות. השורות הצבועות באפור מייצגות את שלוש הפוזיציות שהן בחרו להסביר במסגרת פרויקט הסיכום. רקדניות: תלמידות מגמת מחול בכיתה י. צילום: נלקח מתוך סרט וידאו שצולם על ידי ריה מידן, 2015.

המחול וההתמיהה

טבלה 1 מתארת את רצף התנועות של זוג תלמידות והסברן. התמונות נלקחו מסרטון וידאו שלהן. התלמידות בחרו לפרט שלוש פוזיציות (תמונות A, D ו־F שבטבלה 1, אשר מסומנות באפור בטבלה). התלמידות השתמשו בפרויקט הסיכום בטרמינולוגיה מקצועית פיזיקלית, ביכולת מוטורית וכן במחוות גוף שונות. הן גם השתמשו כראוי מילולית במושגים שיווי משקל יציב ושיווי משקל לא יציב, ועל מנת להסביר אותם השתמשו במחוות גופניות, כגון הצבעה על מרכז הכובד, בסיס התמיכה והאנך הדמיוני ממרכז הכובד, אל בסיס התמיכה. ממצא מעניין הוא האבחנה שיצרו בין *שיווי משקל מאוד לא יציב*, כפי שנראה בתמונה F בטבלה 1, לבין שיווי משקל לא יציב, כדוגמת תמונות A ו־C שבטבלה 1.



איור 2: התרשים מציג את המושג 'מהירות זוויתית'.

באיור 2 נקודות A וB מתקדמות לאורך המסלול המעגלי בכיוון השעון מנקודת זמן 1 לנקודת זמן 2. נקודה A מתקדמת מ־A1 ל־A2 ונקודה B מ־B1 ל־B2. המהירות הזוויתית של נקודות A וB זהה כיוון שהמקטעים המקשרים בין הנקודות למרכז המעגל נעים באותו מרווח זמן באותה זווית (איור 2, זווית של 60°). לעומת זאת, המהירות של הנקודות על הקשתות הולכת וגדלה ככל שהקשת רחוקה יותר מהמרכז. כלומר B־2 המהירות גדולה יותר מאשר B־1. על נקודה B לעבור באותו פרק זמן מרחק רב יותר

(ראו את אורך הקשת כמסומן בתמונה), לעומת נקודה A. בשלב זה, נעשה שימוש במונח "מהירות קווית" לכינוי מהירות הנקודות לאורך הקשת.

תהליך הלמידה

המושג מהירות קווית נלמד במהלך שיעורי הפיזיקה בכיתה רגילה בדרך פורמאלית וע"י מורה מבית הספר. המושג מהירות זוויתית נלמד כחלק משיעורי הפדגוגיה מעוגנת גוף בסטודיו למחול ע"י מנחת מחקר זה. התלמידות למדו במגמת פיזיקה ובמגמת אומנות כלשהי (ציור, קולנוע, מוזיקה או מחול). המחקר נערך במשך ארבעה חודשים, שבמהלכם כל תלמידה נפגשה בסך הכול לשבע שעות עם המנחה. חלק מהמפגשים נערכו בקבוצה וחלק באופן אישי. בסוף התהליך, התלמידות נדרשו להגיש פרויקט גמר בקבוצות, כל קבוצה על פי ההתמחות היצירתית שלה בנושא מהירות זוויתית. ניתן להן חודש להכנת פרויקט הסיום, אשר מתואר ומנותח בהמשך המאמר. להלן תיאור קצר על תהליך הלמידה.

תהליך הלמידה בסטודיו החל באימפרוביזציה של תנועות מעגליות בחלקי הגוף השונים, ההנחיות היו "הניעו את הידיים בצורה מעגלית... הניעו את הראש במעגלים... כפות הרגליים במעגלים או חלקי מעגל... הניעו את האגן בצורה מעגלית...". התלמידות יכלו להניע את איבריהן בתנועות מעגליות כרצונן, בתנועות גדולות או קטנות. לאחר האימפרוביזציה, התלמידות התבקשו לעמוד אחת ליד השנייה בשורה. בקצה השורה, משמאלה של התלמידה עם החולצה הלבנה, הוצב בקבוק המסומן בתמונה A9 כמלבן אדום.



תמונה 9: הדגמה של מהירות זוויתית באמצעות הליכה סביב נקודה קבועה במסגרת פעילות המעגל הקבוצתית. התלמידות ממגמת פיזיקה. צילום: גזר מוידאו שצולם ע"י תלמידה ממגמת קולנוע. 2016.

התלמידות התבקשו ללכת סביב הבקבוק ביחד, כגוף אחד, ולשמור על מבנה של שורה ישרה. לאחר מספר ניסיונות, התלמידות פיתחו שיטה קבוצתית כדי להסתובב סביב הבקבוק, כאשר אלה שהיו רחוקות ביותר ממנו הלכו מהר יותר מאלה שהיו קרובות אליו.

במהלך הדיון על פעילות המעגל הקבוצתית המתוארת לעיל, המנחה קיבעה את מרפקה על הרצפה כציר וסובבה את האמה. למעשה, היא סימנה את התנועה הקבוצתית של כל התלמידות הנעות סביב רדיוס משותף, כפי שנראה בתמונה 9. היא הצביעה על הניגוד בין המהירות הזוויתית המשותפת לכל התלמידות לעומת המהירות הקווית, המשתנה על פי מיקומה של כל אחת מהתלמידות. המנחה, שהיא בעצמה מורה למחול ולאימפרוביזציה, השתמשה ב'סימון' (גרסה מוקטנת של התנועה המלאה), כפי שנראה בתמונה 10. סימון לרוב משמש רקדנים כעוגן מחשבתי, עמוד 2864 (OKirsh, 2010), לצורך רפלקציה אישית וקולקטיבית, הנחיה ותכנון התנועה.



תמונה 10: המנחה משתמשת בסימון ע"י האמה בהתייחסות לפעילות המעגל הקבוצתית. צילום: נלקח מוידאו שצולם ע"י תלמידה ממגמת קולנוע. 2016.

לאחר מתן הסבר, המנחה והתלמידות התיישבו על הרצפה, על מנת לעשות רפלקציה על הפעילות. לבסוף, המנחה ביקשה מהתלמידות לצייר את פעילות המעגל הקבוצתית בעזרת נייר ועיפרון.

חודש לאחר השיעורים, התלמידות השתתפו בראיונות שנמשכו בין 20-50 דקות לכל אחת מהן. הראיונות כללו (א) בקשה לצייר את פעילות המעגל הקבוצתית ולהסביר את הציור שציירו (ב) בקשה להשיב בכתב ובעל פה על שאלון בפיזיקה, שהשאלות בו התמקדו בהבדל בין מהירות קווית למהירות זוויתית. תשע מתוך 11 תלמידות הצליחו לענות נכון על השאלון במהלך הראיון. חמש מהן הסבירו את תשובותיהן באמצעות מחוות ידיים (אמה, כף יד או אצבעות) באופן זהה או אנלוגי לסימון, שהמנחה השתמשה בו כשהסבירה על פעילות המעגל הקבוצתית (כפי שנראה בתמונה 11).



תמונה 11: שימוש במחוות ידיים באנלוגיה לסימון שהמנחה השתמשה בו. צילום: נלקח מוידאו שצולם ע"י תלמידה ממגמת קולנוע. 2016.

תפקיד הסימון בחקר המקרה של מהירות זוויתית בהקשר לפדגוגיה מעוגנת גוף מתואר בהרחבה במחקר של זהר וחובריה (Zohar et al. 2016).

חודש לאחר הראיונות, התלמידות השתתפו בשיעור מסכם, בו כל אחת מהן התבקשה להסביר את המושג מהירות זוויתית לשלוש תלמידות שלומדות מדעים מכיתות נמוכות יותר בכל דרך שיבחרו. שבע מתוך שמונה התלמידות, שהתבקשו להסביר את המושג לתלמידות הצעירות יותר, בחרו להמחיש בפניהן את המושג. התלמידות הבוגרות ביקשו מהתלמידות הצעירות לעמוד ולחוות את המושג באופן דומה לפעילות המעגל הקבוצתית, שנעשתה בכיתה. כל תהליך הלמידה צולם במצלמת וידאו כהכנה לניתוח המיקרו אנליטי בשיטת ריבוי האופניויות Multimodal analysis – (Goodwin, 2000), בה מתייחסים גם למלל וגם לאופניויות שונות, כמו ציור ומחוות גוף.

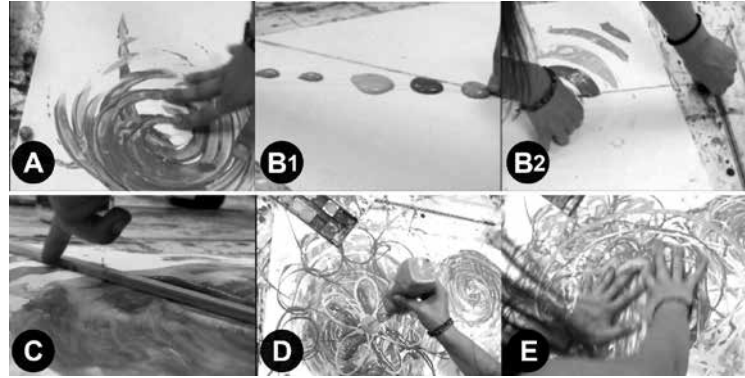
פרויקט סיכום בנושא מהירות זוויתית

בסוף תהליך הלמידה המנחה ביקשה מהתלמידות להכין פרויקט מסכם: "תכינו פרויקט סיכום יצירתי הקשור למושג מהירות זוויתית עם עוד בת זוג או שתיים". לתלמידות ניתן חודש כדי לעבוד על פרויקט הסיכום והן גם נדרשו להציגו בכיתה.

להלן תיאור של ארבעת הפרויקטים המסכמים.

פרויקט מס' 1

שתי תלמידות הלומדות פיזיקה, שאחת מהן לומדת גם במגמת אומנות והשנייה גם במגמת קולנוע, הכינו וידאו קליפ באמצעות וידאו ארט. תמונה 12 מציגה תמונות שנגזרו מהוידאו קליפ. ניתן לצפות בוידאו קליפ ב־ goo.gl/rFVEmk. התלמידות בחרו להשתמש בקליפ בשיר של בוני טיילור "Total Eclipse of the Heart". עם שמיעת המילים "turn around" בפזמון, אחת התלמידות השפריצה טיפות של צבע מבקבוק למשטח נייר ומרחה באצבעה עיגולים על הנייר.



תמונה 12: תמונות נזרות מתוך הוידאו קליפ המקורי, ששתי התלמידות יצרו. הן השתמשו בצבעי מים, נייר, חוט, מקל ובדידים וכן במילות השירים, שנקשרו לתנועה מעגלית. צילום: נלקח מהוידאו ששתי התלמידות יצרו. 2016.

לאחר מכן, המוזיקה השתנתה לשירה של להקת נערי החוף "I Get Around". כאשר המוזיקה הושמעה התלמידה השפריצה עיגולי צבע על משטח נייר נוסף מבקבוקי צבע במרחקים שווים זה מזה. לאחר מכן, לקחה חוט (תמונה B1-1) והזיזה אותו בתנועה מעגלית (תמונה B12-2). היא חזרה על הפעולה, והפעם עם מקל במקום החוט (תמונה C12). התלמידה שופכת צבעי מים ומציירת פרחים (תמונה D12), ולבסוף מערבבת את הצבעים בעזרת כפות הידיים על גבי הנייר בתנועות מעגליות (תמונה E12).

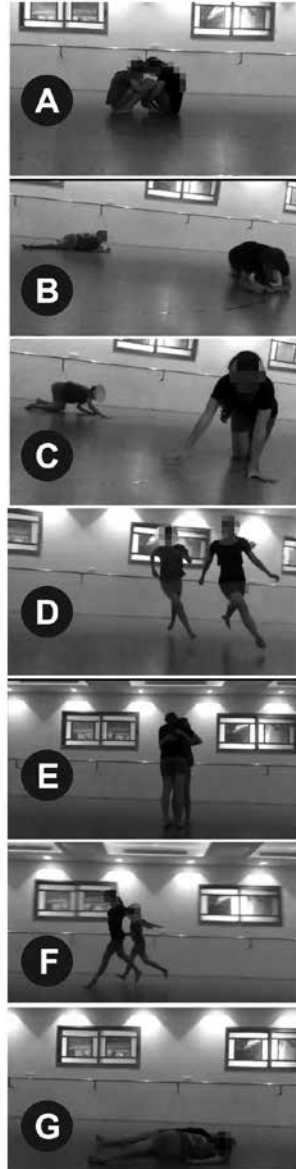
הפעילות, שהתלמידה עשתה באמצעות צבעי מים, חוט ומקל מקבילים לפעילות המעגל הקבוצתית שנעשתה בסטודיו. הצבעים השונים מקבילים לתלמידות שנעו במעגל. כמו פעילות קבוצתית, כל צבע בפרויקט הגמר מסמל מעגל אחר ומהירות קווית שונה. החוט והמקל אפשרו הדגמה של המושג מהירות זוויתית, אשר נשמרת דומה בכל המעגלים. בניגוד לסימון עם האמה, שמייצגת את כל הקבוצה ללא הבדל בין התלמידות הבודדות, תנועת כפות הידיים מאפשרת להתייחס לתלמידות הבודדות באמצעות האצבעות ולחדד את ההבחנה בין מהירות קווית לזוויתית.

במהלך הצגת הקליפ התלמידות הסבירו כי השתמשו באותה כמות של צבעים ליצירת כל המעגלים. הן טענו כי "הצבע במעגל החיצוני, אשר נמצא הכי רחוק מציר הסיבוב שאליו החוט והמקל שקובעו (ע"י התלמידה), נגמר מהר יותר, כיוון שהוא במעגל הגדול ביותר, ולכן יוצר את הקשת הגדולה ביותר". הן המשיכו להסביר כי "הצבע שנמצא רחוק ביותר מציר המעגל בעל מהירות קווית גדולה יותר בהשוואה לצבעים האחרים, שקרובים יותר לציר המעגל, אך למעשה לכל הצבעים ולכל כתמי הצבע שעל החוט או המקל יש את אותה מהירות זוויתית". הפעילות וההסבר המילולי של התלמידות מצביעים על הבנה של ההבדל בין מהירות קווית למהירות זוויתית, כפי שמוצג באיור 2.

בפרויקט זה התלמידות כללו את זווית ראייתן ואת תחומי התעניינותן. תלמידת האומנות בחרה להשתמש בצבע, בעוד שתלמידת הקולנוע בחרה להשתמש בכישרונה בתחום הצילום והעריכה בתיעוד של פרויקט הסיכום. לתלמידות ניתן החופש לבחור כיצד להציג את הפרויקט. תלמידות אלה בחרו להשתמש בצבע, חוט, מקל ומוזיקה. התלמידות דיווחו כי נהנו מאוד לעבוד על הפרויקט.

פרויקט מס' 2

שתי תלמידות פיזיקה, האחת לומדת גם מוזיקה והשנייה לומדת גם במגמת מחול, הציגו את פרויקט הסיכום במחול, שכינו "מעגל החיים". תמונות נבחרות מהריקוד מובאות בתמונה 13. הכוריאוגרפיה לריקוד נעשתה לצלילי השיר "מעגלים" מאת עידן רייכל. קודם כול הבנות הציגו את הריקוד ולאחר מכן את ההסבר. התלמידות הסבירו שפוזיציות הפתיחה (תמונה A13) מייצגת עובר, ואילו פוזיציות הסיום מייצגת מוות (תמונה G 13).



תמונה 13: קטעים מתוך ריקוד "מעגל החיים" שנעשה ע"י שתי תלמידות.

בפוזיציה השנייה הבנות זוחלות והולכות במעגל המסומן על רצפת הסטודיו (תמונה B13) ולאחר מכן עומדות ומתחילות לרוץ (תמונה D13). תחילה, כל תלמידה רצה בנפרד, ובהמשך, הן התחבקו (תמונה E13) ורצו, כשהחזיקו ידיים (תמונה F13). התלמידות הסבירו שהריצה בנפרד מבטאת את התקופה בה האדם בודד לפני שמוצא בן/בת זוג. הריצה בזוגות נעשתה לאורך שני מעגלים משויקים בעלי מרכז משותף, המציג את האינדיבידואליות של האדם במסגרת הזוגית, בעוד שאחיות הידיים מייצגת את האיחוד ביניהם. התלמידה, שרקדה במעגל החיצוני, הסבירה שכדי לעמוד בקצב של התלמידה השנייה נאלצה לרוץ מהר ובצעדים גדולים, וציינה " *שה מייצג את הדו קיום של החיים עם בן הזוג*".

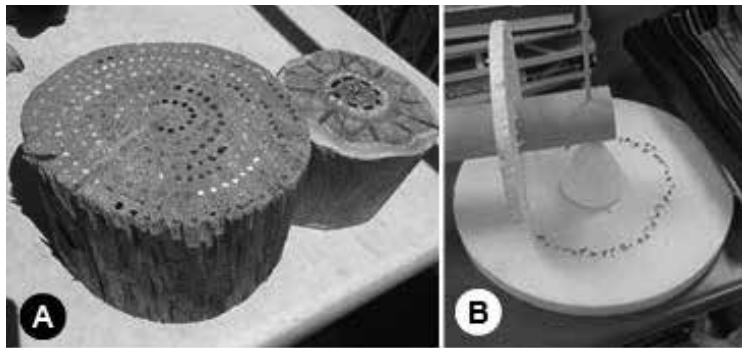
בריקוד 'מעגל החיים' הבנות נעו במעגל המצויר על רצפת הסטודיו, כשברקע המוזיקה של השיר 'מעגלים מעגלים' של עידן רייכל. בסיום הריקוד, התנועה במעגלים נקטעה בפתאומיות והתלמידות נשכבו על הרצפה בפוזיציות סיום המסמלת מוות. בפרויקט זה התלמידות הסבירו בברור את המושגים מהירות זוויתית באמצעות הריצה המשותפת, כאשר זרועותיהן פתוחות. התלמידות ציינו במהלך הריצה ש" לכל אחת יש מהירות קווית משלה, אך יש להן מהירות זוויתית משותפת".

בנוסף להבנת המושגים, התלמידות קישרו את המושגים לחיים עצמם, כאשר החיים בזוגיות אנלוגיים למהירות זוויתית, ואילו החיים של כל אחד מבני הזוג בנפרד בזוגיות מקבילים למהירות קווית. התלמידות קישרו בין המושגים הפיזיקליים, הנוגעים לתנועה מעגלית לרעיון מעגל החיים מהלידה ועד המוות דרך חיי המשפחה. הפוזיציות שנבחרו לריקוד, המוזיקה, שנבחרה ללוות את הריקוד, וכן הסיפור, שסביבו נסב הריקוד, קשורים לפדגוגיה מעוגנת גוף ולמושגים שנלמדו. ניתן לזהות בריקוד את ההשפעה של פעילות המעגל הקבוצתית, בה התלמידות השתתפו בשיעור הראשון.

התלמידות רצו זו לצד זו, כמו בהליכה במעגל, שנעשתה בשיעור הפעילות הקבוצתית בסטודיו. התלמידות הפגינו יצירתיות והבנה עמוקה של המושגים הנלמדים, וכן, הן קישרו את המושגים לעולמן האישי ולתחומי העניין שלהן.

שני פרויקטי סיכום נוספים

תמונה 14 מראה את המוצגים בשני פרויקטים נוספים של תלמידות הפיזיקה, שחלקן לומדות גם במגמת אומנות וחלקן לומדות גם במגמת מוזיקה. בניגוד לפרויקטים הקודמים, תלמידות אלה בחרו להציג מודל.



תמונה 14: A - גזע עץ צבוע ע"י שתי תלמידות B - מסיק זיתים. צילום: התלמידות שיצרו את עבודת הסיכום, 2016.

התלמידות, שהציגו גזע עץ גבוה בתמונה A14, הסבירו: "אנו בחרנו בגזע עץ כיוון שניתן לראות בו את גיל העץ. ניתן לראות זאת רק לאחר שהיא נגדע. העיגולים הנוצרים במהלך חיי העץ מעידים על סיפור חייו. החלטנו להוסיף צבע, המעניק יופי לסיפור חייו של העץ, כך בחרנו "להודות" לעץ על תרומתו לאנושות. על גזע העץ הקטן ציירנו מנדלה בעזרת העיגולים שבגזע, בעוד שבגזע העץ הגדול יותר יצרנו ספירלה העשויה ממספר רב של נקודות צבעוניות המסמלות את צמיחתו." התלמידות, אשר הכינו את מסיק הזיתים בתמונה B14, הסבירו: "אנו דמיינו אנשים מסביב לגליל הנייר, אשר מועכים את הזיתים".

כל הפרויקטים מצביעים על תהליך למידה בעל ערך בקרב התלמידות. התלמידות שאבו ידע והשראה מתוך המושגים הפיזיקליים וגם מראייתן התרבותית והרגשית. כל התלמידות יצרו פרויקטים מעניינים שביטאו את יכולתן האישית, תחומי העניין שלהן ומחשבה אבסטרקטית על החיים, תוך קישורם לידע המושגי של חומר הלימוד. אנו טוענים שממצאי המחקר יכולים לתרום משמעותית לפרט ולקבוצה במערך הסוציו תרבותי של הכיתה, כאשר משמעותיות של מושגים אבסטרקטיים מעוגנים בצורה קבוצתית באמצעות אופניויות רבות וחוויות משותפות. אנו מאמינים שפדגוגיה מעוגנת גוף אפשרה יצירת עבודות סיכום יצירתיות ומורכבות, שהוצגו ע"י התלמידות.

דיון וסיכום

מהן הפרקטיקות הטובות ביותר למינוף פעילות גופנית כאמצעי ללימודי פיזיקה? שני חקרי המקרה, שהוצגו במאמר הזה, הצביעו על הדרך שניתן לעשות זאת באמצעות יחסי הגומלין בין ידע סנסורי-מוטורי אינטואיטיבי לבין ידע דיסציפלינרי, הנלמד באמצעות פדגוגיה מעוגנת גוף. פדגוגיה קונסטרוקטיביסטית זו מערבת פעילות פיזית-דינמית, הכוללת: חוויות גופניות ישירות ע"י תנועות מושכלות; אימפרוביזציה בתנועה המתווכת בין דמיון לחשיבה, תנועות גוף ותחושות; טכניקות המשלבות הליכה ודיבור; היבטים נבחרים משיטת פלדנקרייז והרפיה. הפעילויות התנועתיות בוצעו בסטודיו למחול, שהיווה סביבת לימוד היברידית, שאפשרה לתלמידות להתחבר לנטיותיהן האומנותיות ולכישרונותיהן, מחד, וללמידה, מאידך. המימוש של חיבורים כאלה הוא תכונה רצויה בסביבות היברידיות. במחקר זה, פדגוגיה המעוגנת בגוף הותאמה לסטודיו למחול, אך ניתן להתאימה בקלות גם לאולמות ספורט ואפילו לכיתות לימוד ריקות.

עבודות הסיכום של התלמידות בסיום הלמידה בוצעו באופניויות שונות, כגון מיצג וידאו, מוזיקה וריקוד, וכללו רישום והמחשה של אלמנטים נבחרים מפעילויות התנועה. העבודות נותחו ולוו בפרשנות. לדוגמה פרשנות כזו של פרויקט הסיום בחקר המקרה בנושא מהירות זוויתית הצביעה על השפעה משמעותית של פעילות המעגל הקבוצתית, שהתבצעה בשיעור של פדגוגיה מעוגנת גוף, שהתלמידות חוו על תהליך הלמידה ועל תוצריה.

בשני חקרי המקרה שתוארו התלמידות הפגינו יצירתיות והבנה עמוקה של המושגים המופשטים שנלמדו. מעבר לכך, הצליחו לקשר את הרעיונות שנלמדו להצגה קונקרטיה ולעולמן ותחומי העניין שלהן וכן קישרו פילוסופיית חיים רגשית לחומר הנלמד (מעגל החיים ומוות). המורכבות של למידת המושגים שיווי משקל ומהירות זוויתית ניכרת מתהליך הלמידה, שתואר בשני חקרי המקרה. העומק והתובנות, שהתלמידות הפגינו בהבנת הרעיונות הפיזיקליים, הבאים לידי ביטוי בשלבים השונים של הלמידה ובעבודות הסיום, הם הרבה מעבר למה שניתן להשיג בהוראה בגישות מקובלות. חלק מהרעיונות שהועלו ע"י התלמידות הפתיעו אפילו את החוקרים.

ממצאי המחקר, שהוצגו במאמר הזה, תומכים בהיתכנות של עיצוב תוכנית הלימודים במדעים, המבוססת על עקרונות של פדגוגיה מעוגנת גוף ותומכת בבניית תובנות מדעיות. עיצוב התוכנית מעגן למידת מושגים מופשטים של קבוצת לומדים בפתרון בעיה סנסורית-מוטורית כלשהי וברפלקציה רבת אופניויות (מולטימודאלית) של חוויות שיתופיות משמעותיות.

ביבליוגרפיה

זהר רוני, 2015. "שילוב תנועה וידע מחול בהוראת הפיזיקה", מחול עכשיו, גיליון 28, עמ' 23-17.

פלדנקרייז משה, 1989. שכלול היכולת - הלכה ומעשה, הוצאת אל"ף.

שובל אלה, 2006. נעים ולומדים: תנועת הגוף ותרומתה ללמידה, הוצאת ספרים אח בע"מ והמכללה האקדמית לחינוך גבעת וושינגטון.

Abrahamson, D. 2017. "Embodiment and Mathematical Learning," in K. Peppler (Ed.), *The SAGE encyclopedia of out-of-school learning* (pp. 247-252). New York: SAGE.

Abrahamson, D., & Lindgren, R. 2014. *Embodiment and Embodied Design1*.

Abrahamson, D., & Trninic, D. 2011. *Toward an embodied-interaction design framework for mathematical concepts*. Paper presented at the Proceedings of the 10th International Conference on Interaction Design and Children.

Abrahamson D. 2009. "Embodied design: constructing means for constructing meaning," *Educational Studies in Mathematics*, 70 (1), pp. 27-47.

Feldenkrais M., & Eshkol N. 1980. *Ha-tenu'ah UT-AMI-İk*. Society MN, in. *50 Lessons by Dr. Moshe Feldenkrais: Movement Notation Society*.

Goodwin C. 2000. "Action and embodiment within situated human interaction," *Journal of Pragmatics*, 32 (10), pp. 1489-1522.

Gutiérrez KD, Baquedano-López P., & Tejada C. 1999. "Rethinking diversity: Hybridity and hybrid language practices in the third space." *Mind, Culture, and Activity*, 6 (4), pp. 286-303.

Hake R. R. 1998. "Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses." *American Journal of Physics*, 66 (1), pp. 64-74.

Hall R., & Nemirovsky R. 2012. "Introduction to the special issue: Modalities of body engagement in mathematical activity and learning", *Journal of the Learning Sciences*, 21 (2), pp. 207-215.

Kirsh D. 2010. *Thinking with the Body (Kirsh, 2010)*. *Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Cognitive Science Society* (T):176-194.

Koziol LF, Budding DE, & Chidekel D. 2012. "From movement to thought: executive function, embodied cognition, and the cerebellum," *The Cerebellum*, 11 (2), pp. 505-525.

Laws K. 2008. *Physiact and the Art of the Dance* (second edition), ed: Oxford University Press.

Ma JY. 2016. "Designing Disruptions for Productive Hybridity: The Case of Walking Scale Geometry," *Journal of the Learning Sciences*, 137.

McDermott, LC, & Redish EF. 1999. "Resource letter: PER1:: Physics education Research," *American Journal of Physics*, 1999; 67 (9), pp. 755-767.

Meltzer DE, & Thornton RK. 2012. "Resource letter ALIP-1: active-learning instruction in physics," *American Journal of Physics*, 80 (6), pp. 478-496.

Scherr RE, Close HG, Close EW, Flood VJ, McKagan SB, & Robertson AD et al. 2013. Negotiating Energyd Dynamics through Embodied Action in a Materially Structured," *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 9 (2), 020105.

Scherr RE, Close HG, McKagan SB, Close EW, Singh C, Sabella M, et al., (eds.) 2010. 'Energy Theater, Using The Body Symbolically To Understand Energy.' Aip Conference Proceedings.

Scherr RE. 2008. "Gesture Analysis for Physics Education Researchers," *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 4 (1): 010101.

Science choreography project Wu. *Toolbox: Activities for the Classroom*. Available from: <http://sciencechoreography.wesleyan.edu/toolbox/>

Shoval E. 2011. "Using Mindful Movement in Cooperative Learning while Learning about Angles, *Instructional Science*, 2011, 39 (4), pp. 453-466.

Stephens A. L., & Clement J. J. 2007. *Depictive gestures as evidence for dynamic mental imagery in four types of student reasoning*. Paper presented at the 2006 Physics Education Research Conference. 2012; 11 (2), pp. 505-525.

Vygotsky LS. 1997. *Educational psychology* (R H Silverman, Trans) Boca Raton, FL: CRC Press LLC. Original work published 1926.

Zohar R., Bagno E., & Eylon B. 2016. Abrahamson, D. "From Collective Choreography to Angular Velocity by Leveraging Marking and Discourse". Paper presented at JURE 2016, Finland.

Zohar R, Bagno, E., & Eylon, B. (2015). "Dance and Movement as Means to Promote Physics Learning," in *Proceedings of the 7th International Conference on Education and New Learning Technologies* (pp. 6881-6885). Barcelona: EDULEARN15.

רוני זהר ילידת 1974, אימא של עומרי ויהונתן. מדענית, יוצרת, מורה לפיזיקה, למחול ולאימפרוביזציה. דוקטורנטית בשלב מתקדם במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן בהנחיית פרופ' בת שבע אלון. בעלת תואר שני במדעי המוח וההתנהגות מטעם האוניברסיטה העברית בירושלים ובעלת תואר ראשון בפיזיקה מטעם האוניברסיטה העברית, בשיתוף לימודי תנועה באקדמיה למחול ע"ש רובין בירושלים. בעשר השנים האחרונות רוני מלמדת חוגי מחול ואימפרוביזציה לנשים, ומאמינה שהתנועה יכולה לקדם למידה בכל תחום, ובעיקר בפיזיקה.

דר' אסתר בגנו בעלת תואר שני ושלישי בהוראת המדעים ממכון ויצמן למדע. היא פרשה לגמלאות בשנה זו כחבר סגל בכיר של המחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע. עד שנת 2016 עמדה בראש המרכז הארצי לחמורי הפיזיקה. היום, כגמלאית, מובילה פרויקט לאומי של 11 קהילות לומדות של מורים לפיזיקה הפוזרות בכל רחבי הארץ. תחומי המחקר והעשייה העיקריים של דר' בגנו הם עיצוב מסגרות להתפתחות מקצועית של מורים ופיתוח חומרי הוראה ולמידה לקידום "למידה משמעותית" של התלמידים.

פרופ' בת־שבע אלון חברת סגל במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע. היא בעלת תואר שני בפיזיקה ותואר שלישי בחינוך מדעי מאוניברסיטת ברקלי. תחומי המחקר העיקריים שלה הם למידת פיזיקה והוראתה בכיתות ז'–ב וכן התפתחות מקצועית מתמשכת של מורים ומורי מורים לפיזיקה ולמדעים. היא עמדה בראש תוכנית אגם לחינוך חזותי לגיל הרך בישראל מאז היווסדה, ועסקה במחקרה, פיתוחה והפעלתה, המפתחת חשיבה חזותית ויצירתיות לילדים באמצעות אופניויות שונות. בשנת 2015 הוענק פרס א.מ.ת. (פרס האומנות, המדע והחברה) לפרופ' אלון על תרומותיה לחינוך המדעי ומדע הלמידה.

פרופ' דור אברהמסון ממחלקת החינוך של אוניברסיטת קליפורניה, ברקלי, עוסק במחקר מבוסס-עיצוב של למידה, חשיבה והוראת מתמטיקה. הוא למד פסיכולוגיה קוגניטיבית באוניברסיטת תל-אביב (מסטר) ומדעי הלמידה באוניברסיטת נורת'וסטרן (דוקטורט). בהתבסס על תאוריות סוציו-תרבותיות, קונסטרוקטיביזם וקוגניציה מעוגנת-גוף (embodiment theory), אברהמסון מפתח מודלים תאורטיים של למידה והוראה על בסיס מחקרים אמפיריים של ילדים באינטראקציות עם טכנולוגיות-למידה (Embodied Design Research) שלו (פרס המעבדה של Embodied Design Research Laboratory). במחקריו, אברהמסון משתף פעולה עם מומחים מתחום המחול, אומנויות לחימה ותרפיה סומטית.