

## "הוראה קשובה" כדרך לקידום ההבנה של המושג "שבירת אור"

ירון שור, עינת גוברמן וסבטלנה אובסיאניקוב

### מבוא

בעשורים האחרונים התגבשה ההבנה כי ההוראה צריכה להיות מכוונת להבנה (Perkins, 1993). הבנה מאפשרת ללומדים לראות את הרלוונטיות של הידע שרכשו לחייהם, וליישם אותו בהצלחה בהקשרים חדשים. למרות שהמודעות לחשיבות של הוראה לשם הבנה היא גבוהה, מחקרים רבים מראים כי לעתים קרובות, לומדים אינם מאמצים את המושגים המדעיים שלמדו במלואם, וכי תפיסות שגויות, סתירות פנימיות והבנה חלקית שכיחות בקרב לומדים בכל הגילים (diSessa, 2017; Sherin, 2017; Vosniadou, 2017). מטרתו של מחקר זה היא להראות כיצד אפשר לקדם את ההבנה של המושג "שבירת אור" באמצעות הוראה הקשובה להמשגות שהלומדים מביאים אתם, ומשימות הדורשות "ביצועי הבנה", כלומר - חשיבה ויציאה מן ההקשרים המוכרים (Perkins, 1993). במהלך המחקר, נערוך שימוש במסגרת שפותחה לאחרונה כדי לתאר התפתחות של תפיסות אקולוגיות חברתיות אצל לומדים מבוגרים על מנת להעריך את ההתקדמות של הלומדים בתחום "שבירת אור" (שור, נבו, גל וגן, 2020).

### הקשיים הכרוכים בהבנת המושג "שבירת אור"

כדי להבין את המושג "שבירת אור", יש להתייחס לכך שלאור יש מהירות סופית. דבר זה אינו ברור מאליו, ומנוגד להתנסות היומיומית שלנו. על פני כדור הארץ, נדמה שברגע שאור נדלק, הוא מגיע אל העין באופן מיידי. גם גדולי הפילוסופים כמו אריסטו ודקארט חשבו שהאור מגיע לעיניים באופן מיידי. גלילאו ערך ניסוי לקביעת מהירות האור, ולא הצליח לקבוע "אם האור מגיע לעין באופן מיידי או שמהירותו היא גדולה באופן יוצא דופן" (Clegg, 2002, p. 155). רק ברבע האחרון של המאה ה-17 הצליחו המדענים לקבוע את מהירות האור בסדר גודל דומה למהירות שאנחנו מכירים כיום. (Clegg, 2002).

תכונה נוספת שיש להבין בכדי להתייחס לשבירת אור היא העובדה שהאור משנה את מהירותו כשהוא עובר בתוך חומרים שקופים שונים. ככול שהחומר צפוף יותר, מהירות האור תהיה קטנה יותר בתוכו. השינוי במהירות האור במעבר מתווך אחד למשנהו מביא לכך שכיוון ההתקדמות של האור משתנה במעבר, ועצמים הנראים במעבר מאוויר למים ולהיפך, נראים כאילו הם "נשברים".

ההתייחסות אל תופעת האור על מרכיביה השונים אינה קלה להבנה. האתגר הוא לאפשר ללומדים לקשר בין שבירת אור לבין האופן בו אנחנו רואים את העולם סביבנו, כמו, לדוגמה, המראה ה"שבור" של כפית בכוס תה (Hewitt, 1993).

הוראה קשובה (שור, 2019: 2015; Schur, 2015) היא הוראה דיאלוגית, שבה המורה קשוב לאופן שבו כל אחד מהלומדים ממשיג את הנושא הנלמד. במהלך השיעורים, מתקיים שיח בין הלומדים לבין עצמם ובינם לבין המורה. הלומדים מציגים את ההמשגות שלהם, חושפים אותן לעיון ביקורתי, ומנמקים את עמדותיהם. תפקידו של המורה הוא להקשיב ללומדים ולהציע תיווך שיועיל ללומדים לשנות את ההמשגות הראשוניות שלהם ולהתקדם לקראת ההמשגות המדעיות המקובלות. הוראה קשובה מתבססת על שלושה רכיבים מרכזיים: 1. תיווך כיתתי, אינטראקטיבי. 2. אינטראקציה מתמשכת. 3. צפייה בהמשגות ובהשתנות שלהן לאורך זמן. להלן נדון מעט בכל אחד מהרכיבים הללו:

תיווך כיתתי אינטראקטיבי. המורה והתלמידים משתתפים בשיח כיתתי אינטנסיבי. השיח מאפשר לכל אחד מהלומדים לבטא את הידע שלהם, את החוזקות שלהם, הלבטים, התהיות ולבטא את העולם שממנו הם באים. השיח מחייב את כל הלומדים להיות פעילים, להעמיק את חשיבתם, ולהגיב לדברי הזולת. כך, הלומדים הופכים להיות שותפים להוראה, ובעזרת המורה – הכיתה יוצרת הבנה משותפת של הנושא הנלמד. המורה הוא שותף פעיל בשיח, שבמהלכו משתנים הדרכים שבהן המורה תופס את תלמידיו, וההבנה של הנושא הנלמד מתרחבת ומתרעננת, משום שבזכות התלמידים, הנושא נקשר לעולמות שונים משלו.

אינטראקציה מתמשכת. כדי להבין נושאים מאתגרים יש צורך בהתנסויות מגוונות לאורך זמן. כל אחת מההתנסויות מקשרת בין הלומדים לבין נקודת מבט אחרת על הנושא הנלמד. ההצטברות של התנסויות מאפשרת ליצור תפיסה רחבה וקוהרנטית של הנושא הנלמד שנקשרת אל עולמם של הלומדים בדרכים שונות ובהקשרים שונים. כך, נמנעת יצירה של "קפסולות" מבודדות ומנותקות של "ידע" משונן (Perkins, 1993). התנסויות מתאימות מאפשרות להתבונן על העולם מנקודת מבט שונה מזו שהלומדים רגילים אליה. נקודות המבט השונות מזמנות השוואה, ומדגישות את המשותף בין המופעים השונים של המושג הנלמד. ההתבוננות מנקודות מבט שונות יוצרת "מרחב למידה" (Marton et al., 2004) ומעמיקה את ההבנה של המושג הנלמד (Carey, 2009). ההתבוננות יכולה להיעשות בכוח החשיבה, ואינה מחייבת מסע פיזי. לדוגמה, חשיבה על השאלות הבאות: האם אדם העומד על הירח חווה "לילה" ו"יום", ואם כן – כמה זמן הם נמשכים, ובמה הם שונים מיום ולילה על פני כדור הארץ. צורה זו של התבוננות מכונה "מסע חשיבתי", והיא מאפשרת השוואה בין נקודות מבט שונות על הנושא הנלמד. הוראה גם משנה את אופן ההתבוננות על הנושא הנלמד, כך שהבנתו משתנה בכל פעם שחוזרים אל הנושא ולומדים משהו נוסף על אודותיו

(Schur & Galili, 2009; Schur, Galili & Shapiro, 2009; Schur, 2015; Stein, Galili & Schur, 2015). המהלך של התבוננות בידע של הלומדים, הוראה והתבוננות מחודשת מכונה "למידה דינמית". השיח האינטראקטיבי, כפי שתואר בסעיף הקודם מתקיים בכל אחת מההתנסויות במהלך האינטראקציה המתמשכת (שור ואקסלרוד-טייר, 2014: Schur & Valanides, 2005).

צפייה בהמשגות ובהשתנות שלהן לאורך זמן. ההוראה הקשובה מדגישה את האפשרות להשתמש בציורים, לבקש הסבר עליהם, ולהביא לידי שיח כיתתי על הנלמד תוך התבססות על הציורים של הלומדים, שמוצגים בפני חבריהם לכיתה. כאשר לומדים מתבקשים לייצג את ההמשגות שלהם בשפה דבורה או כתובה, הם נוטים לשחזר טקסטים ששמעו או קראו בלי להבין אותם באמת (Perkins, 1993). לעומת זאת, להצגה של ידע באמצעות ציור יש יתרונות רבים (Ainsworth, Prain & Tytler, 2011; Quillin & Thomas, 2015): 1. ציור מבטא המשגה. ציור מחייב בחירה של אלמנטים שנראים ללומד מרכזיים, וארגון של מכלול היחסים ביניהם באופן מפורש, תוך שימוש במרחב של הדף ככלי מארגן. 2. ציור מתאים במיוחד לייצוג של יחסי גודל ומידע מרחבי. 3. ציור הוא כלי לתקשורת. העובדה שציור מייצג מושגים באופן מפורש, הופכת אותו למצע נוח לשיח ולבחינה ביקורתית של התכנים המיוצגים מבחינת הבהירות שלהם, מידת ההתאמה לתפיסות המדעיות המקובלות והקוהרנטיות שלהם. 4. ציור הוא כלי ללמידה. מאחר שציור מארגן יחד בצורה בהירה ותמציתית פיסות מידע מרובות, הוא מעודד שאילת שאלות, הסקת מסקנות ושינוי בהמשגה. 5. ציור מחייב את הלומדים להיות פעילים ומעורבים. מידע מילולי ששונן באופן פסיבי אינו מספיק על מנת לצייר. ציור הוא אם כן כלי שיכול לבטא את הדרך הייחודית שבה כל לומד ממשיג את הנושא הנלמד. עם זאת, הוא אינו יכול לשאת בכל הנטל של העברת המשמעות, שכן האופן שבו יש לפרש את האלמנטים המצוירים ואת היחסים שביניהם עשוי להיות בלתי ברור לצופים. לשם כך, יש צורך לעתים קרובות לשלב בין דימויים גרפיים לבין שפה דבורה או כתובה (Kress, 2015).

עיון בציורים והקשבה להסברים המילוליים שמתארים אותם מאפשרים למורה להבין את האופן האישי והייחודי שבו כל אחד מן הלומדים מבין את הנושא הנלמד (שור, 2019; Best, 2009; Acher & Arca, 2014; Teubal & Guberman, 2014; Dockrell & Braisby, 2006; Brooks, 2009; Ehrlén, 2009), ולהתאים את ההוראה באופן שעונה ישירות על הצרכים שלהם (Vosniadou, 1994; Fello & Renck Jalongo, 2007; Paquette, 1993; McConnell, 1993). כאשר חוזרים על משימת הציור וההסבר לאורך ההוראה של הנושא הנלמד אפשר לעקוב אחרי שינויים מושגיים שחלים אצל הלומדים. ההוראה הקשובה מדגישה את האפשרות להשתמש בציורים באופן רחב בכדי ליצור שיח מתווך בכיתות הלימוד ובכדי להגיע להמשגה של נושאי לימוד מגוונים בגילים שונים. הציורים והסבריהם יחד עם השיח הכיתתי הנלווה והתייחסות לידע הנדרש הם אמצעים שמאפשרים ללומדים לחוות תהליכי שינוי אישיים בהבנתם (שור, 2019).

#### ציורים ככלי לאבחון רמת ההבנה של מושגים

במאמר שהתקבל לפרסום לאחרונה (שור, נבו, גל וגן, 2020) הועלתה הטענה כי אפשר להשתמש בציורים גם כדי לאבחון את רמת הידע של הלומדים בהשוואה ללומדים אחרים, ולא רק על מנת להבין את ההמשגות הייחודיות לכל לומד. המודל פותח בהקשר של תיאור התפיסות של המושג מערכות חברתיות - אקולוגיות אצל לומדים מבוגרים. הוא מחלק את התפיסות הללו לחמש רמות. רמה 1: הבנה פרה-מערכתית. ברמה זו, הציור הוא כללי ואינו משקף מקום ספציפי. רמה 2: הבנה חלקית של רכיבי המערכת. ציורים שנמצאים ברמה זו מציגים רק חלק מהרכיבים שבאים לידי ביטוי במערכת החברתית - אקולוגית. רמה 3: הבנת רכיבי המערכת. ברמה זו, כל המרכיבים של המערכת החברתית - אקולוגית

באים לידי ביטוי בציור או בהסבר שמלווה אותו. רמה 4: ברמה הרביעית רואים את כל רכיבי המערכת, ואת קשרי הגומלין שביניהם. 5. הרמה החמישית היא הגבוהה ביותר. ברמה זו, ההבנה היא מופשטת וכוללת מסר רעיוני. בהמשך ננסה ליישם את המודל גם לניתוח התפתחות ההבנה של שבירת אור.

*הקשר שבין היבטים קוגניטיביים להיבטים רגשיים בלמידה*

רגשות הם חלק בלתי נפרד מתהליכי חשיבה ולמידה (שור ונבו, 2018: Schur, 2015). למידה אופטימלית מתרחשת במצבים שאינם מעוררים דאגה או חרדה גבוהות מדי, מצד אחד, ושעמום – מצד שני (Pekrun, & Garcia, 2012). הצגה של משימות שמחייבות חשיבה עמוקה וביצועי הבנה מעוררת מצד אחד, רגשות שליליים של חוסר ביטחון, ספקות בנוגע ליכולת של הפרט לעמוד במשימה, תחושת בושה מחשיפת חוסר הידע בפני שאר הלומדים והמורה ובלבול. מצד שני, הצגה כזו מעוררת אתגר אצל הלומדים, מפתחת סקרנות, מפתיעה את הלומדים, ומביאה אותם לחשוב על דרכים לא שגרתיות להתמודדות. מורים קשובים ערים להיבטים המורכבים הללו, מטפחים אקלים כיתתי תומך שמאפשר לכל לומד להתבטא באופן חופשי, בלי לוותר על עיון ביקורתי ובדיקה של הטענות והעדויות שהלומדים מביאים. תהליכי אי וודאות ברמה הרצויה הם חשובים בכדי שתתחולל למידה לצורך הבנה (שור ונבו, 2018).

*המחקר הנוכחי*

מחקר זה בא לעקוב אחרי התפתחות ההבנה של לומדים את המושג "שבירת אור". המושג נלמד בכיתה י' הטרונגנית, כחלק מתכנית הלימודים הרגילה. המורה לימדה את הנושא בהתאם לעקרונות של הוראה קשובה ותיעדה את עבודתה במסגרת לימודים לתואר שני. לצורך המחקר הנוכחי נבחרו חמישה מתלמידי הכיתה. שאלות המחקר הן: (1) כיצד הבינו הלומדים את המושג "שבירת אור" לפני הלמידה ואחריה? (2) כיצד השפיע התיווך שהתרחש במהלך ההוראה על הבנת המושג? (3) מה הקשר בין תהליכי הלמידה של הלומדים לבין הרגשות שבטאו ?

## **שיטה**

המחקר זה נערך במתודולוגיה של חקר מקרה (Flyvbjerg, 2011).

חומרים: החומרים כללו ציורים של העולם כפי שהוא נראה מבעד לטיפת מים לפני הלמידה ואחריה, ראיונות עם התלמידים על הציורים ועל הרגשותיהם במהלך הלמידה, ציורים שהתלמידים הפיקו בקבוצות קטנות במהלך ההוראה, כדי להתמודד עם שתי משימות שניתנו להם במהלכה, וכן תכנון השיעורים, תיעוד השיעורים ויומן רפלקטיבי שהמורה כתבה. החומרים נאספו במהלך ההוראה, ושימשו את המורה כדי ללמד את הנושא.

משתתפים: המשתתפים במחקר זה הם חמישה מתוך 15 תלמידי הכיתה. המורה (כותבת 3) פנתה אל התלמידים לפני שערכנו ניתוח של החומרים שנאספו וביקשה את רשותם להשתמש בחומרים הללו לצורך המחקר. הפנייה אל התלמידים

נעשתה שלוש שנים לאחר שסיימו ללמוד עם המורה, כשהיו בגירים וכבר סיימו את לימודיהם בתיכון. השמות במאמר הם פסאודונים.

ניתוח הנתונים: ניתוח הנתונים מתבסס על ניתוח הציורים ועל התיעוד של המורה ביחס לתהליכי התיווך. ציורי הלומדים נותחו תוך השוואה לטקסט שכתבו ליד הציורים, ולהסברים המילוליים שסיפקו במהלך הראיונות. כל ציור נבחן מבחינת האלמנטים שמופיעים בו והיחסים ביניהם (Jewitt, Kress, Ogborn, & Tsatsarelis, 2001; Kenner, 1999; Kress & van Leeuwen 2006). לאחר מכן, השתמשנו במודל שפותח על ידי שור ועמיתיו (2020), כדי למקם את רמת ההבנה שהציורים מבטאים זה יחסית לזה: רמה 1. הבנה פרה-מערכתית: ציור שאינו מאפשר לזהות שמדובר בהתבוננות בעולם מתוך טיפת מים. רמה 2. הבנה חלקית של רכיבי המערכת: ציורים שמציגים רק חלק מהרכיבים שבאים לידי ביטוי במערכת כולה, לדוגמה: הקיעור של הדמויות. רמה 3. הבנת רכיבי המערכת: כל המרכיבים של המערכת באים לידי ביטוי בציור או בהסבר שמלווה אותו, אך הציור אינו מתאר את קשרי הגומלין ביניהם, כלומר את התהליך של שבירת קרני האור. רמה 4. ברמה הרביעית רואים את כל רכיבי המערכת, ואת קשרי הגומלין שביניהם: קרני האור, האופן שבו הן נשברות בטיפה, והדמויות שהן יוצרות. 5. הרמה החמישית היא הגבוהה ביותר. ברמה זו, ההבנה היא מופשטת. התהליך הפיזיקאלי של שבירת קרני האור מאפשר להתבונן בתופעה של שבירת האור מתוך קישור רחב אל האופן בו היא באה לידי ביטוי בעולם. היומן הרפלקטיבי, תכנון השיעורים ותיעוד השיעורים שימשו לתיאור תהליכי התיווך.

## ממצאים

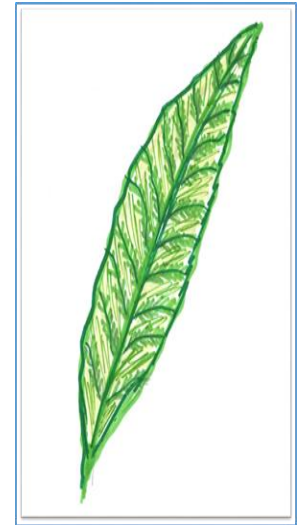
### נקודת ההתחלה היא שונה ואישית לכל תלמיד

מיד בתחילת הלמידה, התבקשו הלומדים לצייר את סביבתם, כפי שהיו רואים אותה מבעד לטיפת מים, שנמצאת על דשא. כול אחד מהלומדים תיאר בציור את נקודת מבטו על הדרך בה יראה את העולם מתוך טיפת המים, והסביר באופן מילולי את תהליכי החשיבה שהנחו את הציור. הניתוח יתייחס לטקסטים המולטי-מודאליים שהילדים הפיקו, כלומר לשילוב שבין השפה הדבורה, השפה הכתובה והייצוגים הגרפיים האחרים.

תמונות 1 – 5 מציגות את נקודות ההתחלה של כל תלמיד.

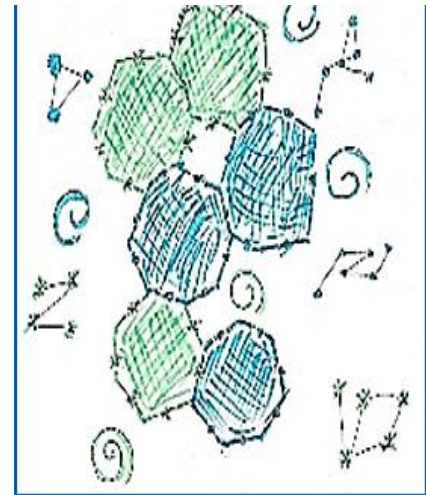
חן מתחילה מהידוע: טיפת מים מצויה על עלה של דשא. אם היא נמצאת בתוך טיפה – פרטים קטנים יראו לה גדולים. ואמנם, הציור של העלה תופס את כל העמוד. בתיאור המילולי היא אומרת: "בהתחלה חשבתי אולי אני רואה מולקולת קטנות, כי אני קטנה, אז מה אני בדיוק רואה? אולי משהו קטן... ואז אולי אמרתי טוב, אולי זה בעצם יותר גדול מה שאני רואה. ואז התחלתי לצייר משהו כזה שאיפה טל... איפה טיפה יכולה להימצא? אז טל בדשא איפשהו אולי. ואז הבנתי שזה יכול להיות יותר גדול מאשר מולקולות או משהו." התהליך הפיזיקאלי שמעורב בראייה אינו בא לידי ביטוי בציור.

בתיאור המילולי שהסביר את הציור אפשר לראות שחן רואה במים את מקור האור. "איך אנחנו רואים את העולם מחומר אחר שהוא מים, כמו שאיך שהאור יוצא מתוך המים, ואז מגיע לבחויץ". טיפת מים משנה את המראה, אך לא ברור לה איך, ונדמה לה שיש קשר בין שינוי המראה לגודל: "ואז חשבתי, אם זה מתוך טיפת מים אז מה הקשר לבחויץ? כאילו אם אני במשהו כזה קטן וזה... טיפת מים זה תמיד איכשהו משנה את המציאות". מאחר שהקשרים בין הגודל, מקור האור והמראה אינם ברורים לה – היא לא מציירת אותם. הטקסט של חן מצוי ברמה 1, שכן שהוא אינו מאפשר לצופה לדעת שהעלה מתואר מתוך טיפת מים.



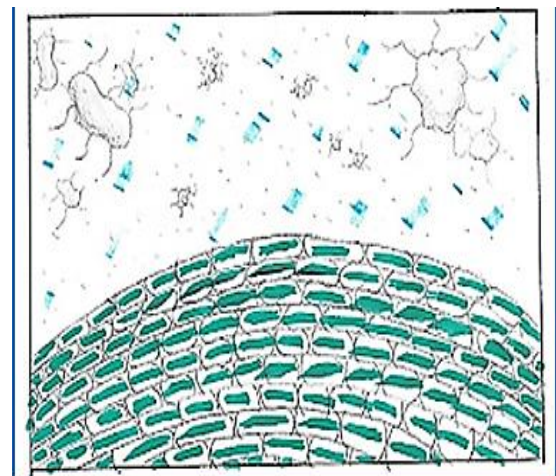
תמונה 1: עלה מתוך טיפת מים, חן

שירה (ראו תמונה 2) מציירת וחושבת תוך כדי ציור. "גם כשציירתי זה היה כזה מהראש ואז כשהתחלתי להסביר יותר הבנתי מה אני ציירתי... זה כאילו כמו ליצור עולם ואז לתת לו חוקים כאלה." כדי לצייר את העולם הזה, היא מסתמכת על מושגים שרכשה בכימיה. "נו, אני יודעת שבמים החלקיקים הם לא מפוזרים כמו באוויר, אבל גם לא כל כך מסודרים כמו במוצק." שירה תארה את המבנה המולקולרי של מים ושל אוויר, לכן היא ציירה מולקולות שחלקן מסודרות, וחלקן לא. תוך כדי הציור היא חשבה על גוליבר, אבל הגיעה למסקנה שהעולם בתוך טיפת מים נראה אחרת: "תמיד התעניינתי בדברים של התכווצות וכל זה. וכאן זה היה אפילו יותר להתכווץ וכאילו להסתכל בעולם עוד יותר שונה. אתה לא רואה את העולם שלנו כקטן, אתה רואה עולם שהוא יותר עמוק." גם הטקסט של שירה נמצא ברמה 1 בהבנה של שבירת אור. התיאור של המולקולות יכול להתאים באותה מידה לאדם שמתבונן במים מבחויץ. המחשבה שמתוך טיפת מים אפשר לראות מולקולות מצביעה על כך ששירה אינה מבינה את סדרי הגודל של מולקולות וגם אינה מתייחסת לתהליכים שעובר האור בדרכו אל העין, הנמצאת בתוך טיפת המים.



תמונה 2: מולקולות של מים, שירה

בן (ראו תמונה 3) צייר תאים של דשא, חיידקים, בקטריה ואבק. החיידקים והבקטריות גדולים יחסית לתאים, דימוי שאינו מתאים למציאות: "אז תהיה כמו רצפה של דשא מקרוב מאוד, שיראו את התאים... ומסביב כל מיני קבוצות של חיידקים או בקטריה ואבק וכל מיני דברים קטנים שקשה לראות בדרך כלל." בן היה מודע לכך שתהיה שבירה של האור בשל טיפת המים, אך אינו בטוח כיצד לייצג זאת: "והייתה לי מחשבה אחת שאולי אני אראה את זה.. שהאור טיפה ישבר בגלל המים וזה. אבל לא ציירתי את זה ככה בסוף." בציור אפשר לראות, עם זאת, שהעלה קמור. מאחר שבן מתייחס לשבירת אור בטיפה ומצייר התעגלות, הוא נמצא ברמה 2.



תמונה 3: תאים של עלה, בקטריה, חיידקים ואבק בתוך טיפת מים, בן

הציור של אביטל (ראו תמונה 4) מתאר עולם קעור ומוגדל מבעד לטיפת מים. אביטל התעניינה בטיפות של טל בגלל הקרבה הפונולוגית לשמה, ואספה הרבה מידע על טל ועל מים. הטקסט הדבור, לעומת זאת, מצביע על ניסיון לארגן סביבה שיש בה מרכיבים רבים, תוך ניסיון לתאם בין שיקולים ומשתנים מרובים.



תמונה 4: רחוב מבעד לטיפה, אביטל

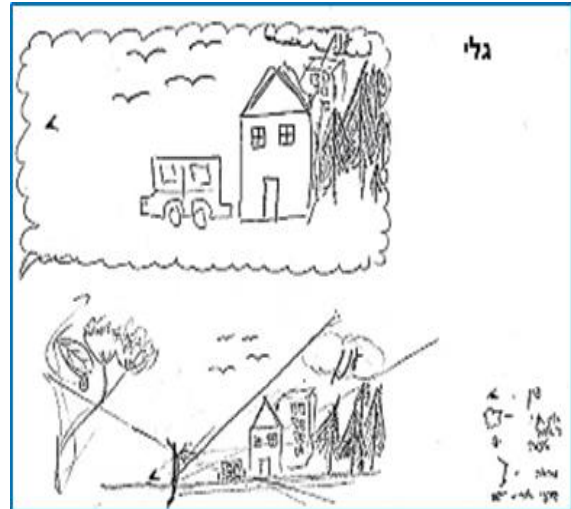
**מה זה טל?** על כך הייתה לה תשובה ברורה: טל זה מים. ככל הנראה, היא אינה זוכרת כיצד טל נוצר: "גדלתי ואז למדתי איך זה נוצר בגלל המשקעים וערפל ומדעים כיתה ו'". **בהנחה שטיפת מים היא עגולה, האם העולם שמחוץ לטיפה צריך להיראות עגול?** "אם היא עגולה היא אמורה לראות אותי עגולה, נכון? או שלא..." **האם טיפת מים היא בהכרח עגולה?** מצד אחד, טיפת מים, כשהיא מטפטפת אותה היא קמורה, אבל מצד שני - כשכמות גדולה של מים נשפכת המים נראים שטוחים, וכך גם באקווריום שצורתו תיבה: "אז בעיקרון טיפה.. כאילו איך שלקחתי זה... וטפטפתי, ולא משנה כאילו באיזה ניסוי או איפה עשיתי את זה, זה תמיד נוצר עגול או שטוח אחרי שנשפך נגיד מים. שזה גם, בסוף רואים בקצוות שזה נסגר. ובאקווריום מרובע לא רואים קימור". אביטל לא הגיעה לתשובה ברורה. **האם מים מעוותים את הראייה בהכרח?** אביטל העלתה מספר שיקולים שתומכים בתשובה חיובית: ההתנסות שלה בים, והניסויים שמדגימים "שבירה" של מקל וכפית כאשר מכניסים אותם לכוס תה. "נגיד אם את בתוך ים ואת פותחת את העיניים ומסתכלת למעלה אז את רואה כזה הכול שברים ומים ואת השמש עקומה. אז התחלתי להבין שגם עם טיפה, כל מים אחרת תראי עקום. אז כמו שהראיתם את הניסוי עם המקל, התחלתי לראות את זה לפעמים עם כפית תה או דברים פשוטים של היום יום". מאידך גיסא, אפשר שההתנסות בים נובעת מהתנועה, ואילו המקל והכפית תלויים בזווית ההסתכלות: "כאילו במים זה נשבר איך שבא לו ובמקורי את יכולה לראות את זה מהצד. אז התחלתי לחשוב כזה... כי



נגיד ים זה הכול זו ובתנועה, ואמבטיה זה לא. וטיפה אני אמורה לדעת אם היא באמצע החלקה מהדשא או פשוט נחה?".  
בנקודה הזו הטיעון נעצר, משום שגם אם היא תגיע למסקנה ביחס לשאלה האם העיוות בראייה נובע מתנועה, הדבר לא יעזור לה להתמודד עם השאלה המקורית, שכן היא לא יודעת אם הטיפה נעה או לא. אביטל שמה לב לכך שהמבנה העגול של הטיפה מעוות את הראייה ומגדיל את העצמים: "נגיד במרובע את רואה את זה אותו דבר, חוץ מזה שזה קצת נשבר וזה. אז מהעגול אם את מכניסה את היד את מתחילה לראות שהיא יותר גדולה. אז הזווית של ה... הצורה שאת שמה את המים שם זה גם משנה. ואם טיפה עגולה אז כנראה שאת רואה את הדברים יותר מורחב". היא גם רואה את הדמיון שבין טיפת מים לבין עדשת עין דג: "אז ניסיתי לעשות את התמונה לא כזאת ישרה וניסיתי לעשות אותה כאילו יותר כזה... כמו עין הדג שרואים כזה".

אביטל רואה אם כן מספר משתנים שיכולים להשפיע על התשובה: החומר שדרכו מתבוננים (מים), צורת הטיפה ('עגולה' או 'ישרה'), זווית ההסתכלות (מלמעלה או מהצד), והתנועה (האם הטיפה נעה או נייחת). היא לא מצליחה להגיע לכללים ברורים איך כל אחד מהמשתנים הללו משפיע על הצורות הנראות, ואיך תיאור נכון של כל אחד מהמשתנים הללו יביא למסקנה – כיצד יש לתאר את העולם מתוך הטיפה. הציור נותן תשובות טובות לשאלות שאביטל מעלה, אך נשאר ברמה האימפליציטית: אביטל יודעת שדברים ייראו עגולים ומעוותים כמו מתוך אקווריום עגול, או עדשת עין דג. נקודת המבט המצוירת היא מלמטה. היא מגדילה מאוד את הקרקע הסמוכה לטיפה, ומקטינה את העצמים היותר מרוחקים. הטקסט של אביטל נמצא ברמה 3: הציור מתאר כיצד העולם נראה מבעד לטיפת מים, אולם היא לא הבינה את התהליך במלואו.

גלי (ראו תמונה 5) ציירה את שבירת האור והתעניינה בתהליך הראייה. הציור מראה קרני אור שנשברות בטיפה, מגיעות אל העין, שרואה את הסביבה בהגדלה. גלי הדגישה שהמחשבה שהעולם ייראה גדול יותר אינה נובעת מתפיסה אינטואיטיבית: "אם אני הייתי כאילו בן אדם רגיל, יכולתי לחשוב שזה ככה. בגלל שאני בטיפה או שאני קטן יותר אז הכול יראה לי גדול יותר". גלי ייחסה לעצמה חשיבה מדעית. "אני חושבת שכל דבר מבוסס על מדע". בציור, מקור האור הוא בחוץ, קרני האור מגיעות אל העין, ויוצרות דמות מוגדלת. למרות שהקימור לא בא לידי ביטוי בציור, היה לו ביטוי בטקסט הדבור: "לפי דעתי הייתי משווה את זה לעדשה. כאילו מעוגלת, נגיד ככה." המאמץ לייצר ציור מדעי בא לידי ביטוי במקרא שגלי מוסיפה, ובציור של העין, במנותק משאר הגוף, כפי שמקובל באיורים מדעיים. הטקסט המשולב שגלי מפיקה נמצא ברמה 4. מהלך הקרניים מהשמש, מקור האור, פגיעתן בבתים והחזרת האור מהם בדרך אל הטיפה ואל העין, חסרים לתיאור השלם של התהליך.

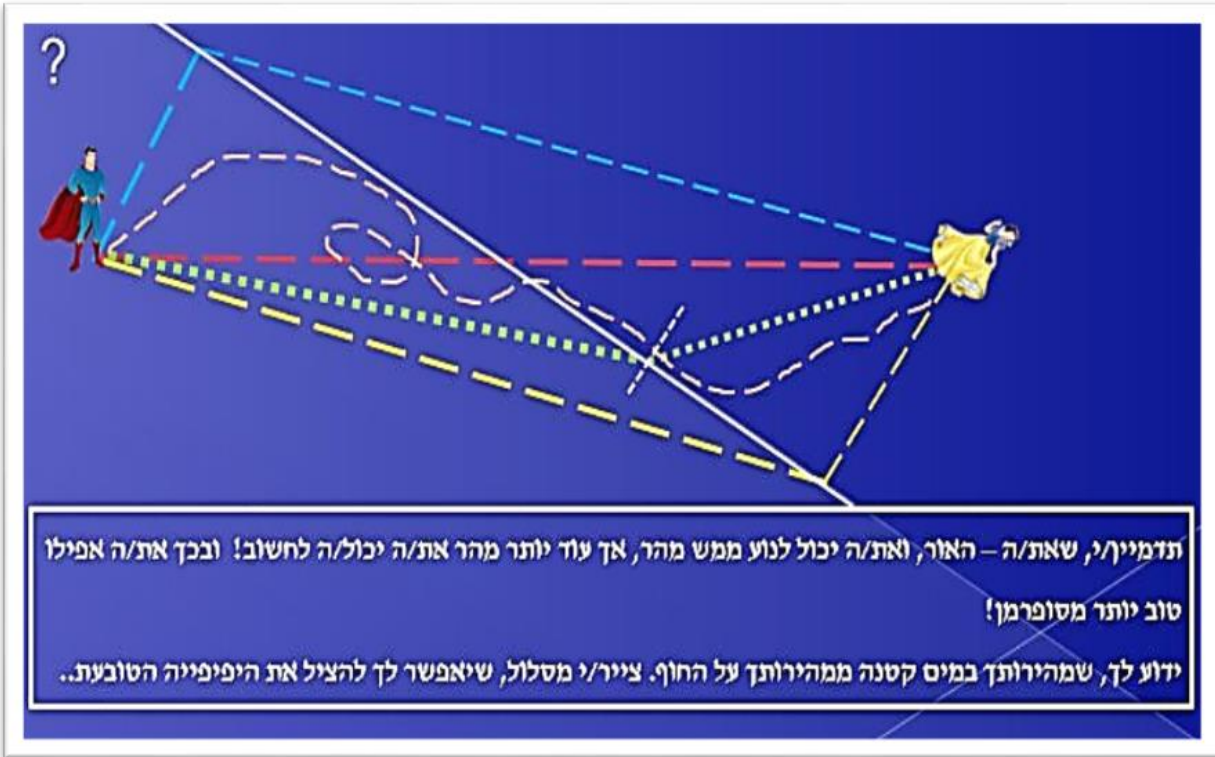


תמונה 5: בתים ועצים מבעד לטיפה, גלי

לסיכום: כל אחד מהלומדים ראה את העולם מבעד לטיפת מים באופן שונה וברמות ידע שונות. כדי לעמוד על האופן שבו הלומדים מבינים את שבירת האור יש צורך בשילוב של היצוג החזותי עם ההסבר המילולי. הלומדים העלו שאלות רבות לגבי האופן בו יראו את העולם מבעד לטיפת מים. מן ההסבר של הלומדים אפשר ללמוד שהתמונה שהם ציירו היא חלקית, משום שהיו גורמים נוספים שהם לא ידעו איך להתייחס אליהם בציור. היה חסר להם ידע מדעי על שבירת אור ועל הקשר בין שבירת אור לבין היכולת להבין מה יראו מבעד לטיפת המים.

### תהליך התיווך

תהליך התיווך כלל שתי אינטראקציות של "מסע חשיבתי". האינטראקציה הראשונה הייתה עיבוד של תרגיל החשיבה שיצר פרמה ב-1661 (Clegg, 2002 p. 85 – 87), ומתוארת בספרו של היואיט (1997). הלומדים התבקשו לדמיין את האור כסופרמן, שעומד על קו החוף וצריך להציל נסיכה שטובעת במים. בהנחה שתנועתו על החוף מהירה מתנועתו במים, הלומדים התבקשו לצייר את הדרך שבה עליו לנוע כדי להגיע אל הנסיכה הטובעת במהירות המקסימלית. הלומדים התייחסו אל המשימה כאל משחק, ושיתפו זה את זה במחשבותיהם. תמונה 6 מציגה את ההצעות שהועלו בכיתה. מספר לומדים ביקשו מן המורה להגדיר מהו היחס בין מהירויות הסופרמן על החוף ובתוך המים. במקום לקבל תשובה, הם החליטו לנסות יחסים שונים, וכך התקיים מעבר מתיאור איכותני, בלתי פורמאלי, להצגה האלגברית של המושג "מקדם השבירה". השינוי במהירות האור במעברו בתווכים שונים, הוא היוצר את תופעת שבירת האור. מהירותו באוויר גדולה ממהירותו במים. לכן האנלוגיה של סופרמן המציל את הנסיכה מתאימה לשבירת האור במעבר מאוויר למים.

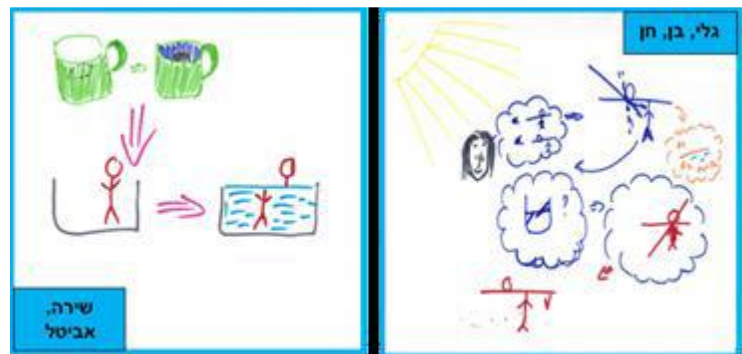


**תמונה 6:** דרכים שונות שבהן סופרמן יכול להגיע אל הנסיכה הטובעת. הדרך המהירה ביותר מסומנת בנקודות. המשימה השנייה, שנבנתה גם היא בעקבות היואיט (1997), הייתה להתבונן בתצלומים שמופיעים בתמונה 7 ולקבוע, לאחר דיון בקבוצות בנות 2-3 תלמידים, איזו משתייהן היא התמונה המזויפת.



**תמונה 7:** מבט אל דמות שנמצאת בחלקה במים כל הלומדים הגיעו לתשובה הנכונה והצליחו להסביר את הבחירה שלהם. הם הגיעו למסקנה, שדמות הנראית כגוף שלם ולא שבור אינה אפשרית, שהרי מדובר במעבר האור בין חומרים שקופים בעלי צפיפות אופטית שונה. תהליכי ההגעה

לפתרון היו שונים בשתי הקבוצות. האחת, של שירה ואביטל, התייחסה באופן ישיר אל המקרה של מקל הנמצא בתוך כוס מים, ונראה שבור, והסיקה מכך שגם גוף האדם יראה שבור. השנייה, של גלי, בן וחן, התייחסו אל הקביעה הקלאסית של "עומק מדומה", כלומר אל העובדה, שאם מסתכלים על עצם ארוך הנמצא בתוך מים, רואים אותו שבור. לכן גם אדם המצוי בתוך מים, לא יראה שלם, וכך הגיעו בדרך השלילה למסקנה, שלא יתכן, שהגוף המצולם יראה שלם, כלומר שהראש יראה מופרד מהגוף (ראו תמונה 8).



תמונה 8: הסברים של שתי קבוצות לומדים

#### בעקבות ההוראה חל שינוי בהמשגה, והוא שונה אצל כל לומד

ציורים 9 – 13 נערכו לאחר הלמידה. בשלושה מתוך החמישה אפשר לראות ביטוי למושגים חדשים שנלמדו בשיעורי הפיזיקה. הציור של חן (ראו תמונה 9) מראה קוים שמייצגים ככל הנראה את קרני האור. הקווים יוצאים במאונך מהשמיים (ולא מהשמש, למרות שהיא מצוירת), וברקע התמונה (אולי – על דופן הטיפה) מצוירים קוים אופקיים. הציור מראה פיזור של קרני האור, ושינוי כיוון. לעלים יש נטייה להתעקל לימין, ויתכן שבכך הציור מבטא את ההשפעה של המבנה הקמור של הטיפה על צורת העלים הנראית. אפקט ההגדלה בא לידי ביטוי גם בציור וגם בהסבר המילולי שמתחתיו: "... אחרי שלמדנו על אופטיקה אני יודעת שכאשר אור עובר דרך חומרים שונים הוא משנה את כיוונו. במים כאשר האור עובר דרכו אז קרני האור מתפזרים ומגדילים את העצם".

השוואה בין שני הציורים, זה שנערך לפני הלמידה וזה שנערך אחריו, מראה שלתפיסה הראשונית נוספו התייחסות לקרני אור, להשפעת הטיפה על קרני האור ועל מראה העלים. הציור של חן אחרי הלימוד נמצא ברמה 3, ומבטא התקדמות יחסית למצב ההתחלתי.



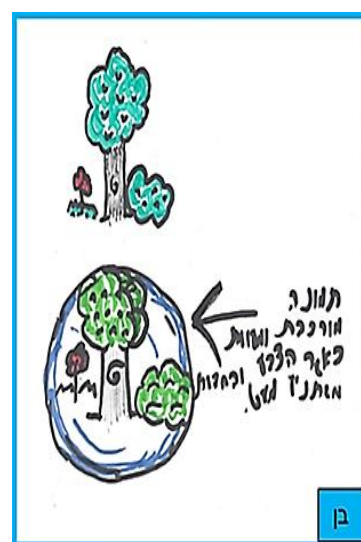
תמונה 9: עלים מתוך טיפת מים, חן

בציור של שירה (ראו תמונה 10) רואים קרני אור מקבילות שנשברות בטיפת המים לגלי אור בצבעים שונים. שירה מתארת היטב את תופעת הנפיצה, אולם נמנעת מלתאר כיצד העולם נראה מתוך טיפת מים. היא נשארת באזור הבטוח, ואינה מצטרפת אל המסע החשיבתי של התייחסות לעולם הנראה מבעד לטיפה. הציור של שירה נמצא ברמה 4 ביחס להבנת האינטראקציה בין האור לבין טיפת המים.



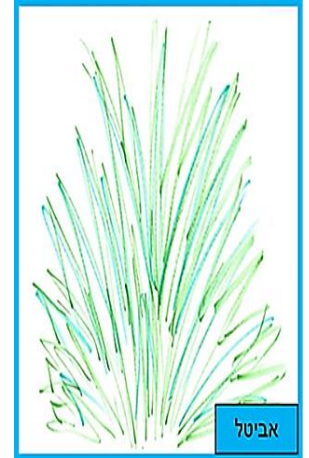
תמונה 10: נפיצה, שירה

הציור של בן (ראו תמונה 11) מבטא התקדמות בכך שהוא מתייחס אל העולם. הוא מתייחס אל השינוי בצבע, בגודל ואל יצירת העיוות, הנוצרים כפועל יוצא משבירת האור בטיפת המים. בציור הראשון הוא תיאר עולם מיקרוסקופי, שאין בו קשר אל העולם הניבט באופן ריאלי מתוך טיפה של מים. גם בציור של בן באו לידי ביטוי העקרונות המדעיים של שבירת אור, כמו אצל חן ואצל שירה. כמו חן, הוא מנסה לבטא את האופן הריאלי בו תיראה הסביבה הקרובה מתוך טיפת המים. עם זאת, הוא כותב שיתרחש שינוי בחדות ובצע אך אינו מספק הסבר לאופן שבו התהליך מתרחש. הטקסט של בן נמצא אפוא בין רמה 3 לרמה 4, וגם הוא מבטא התקדמות.



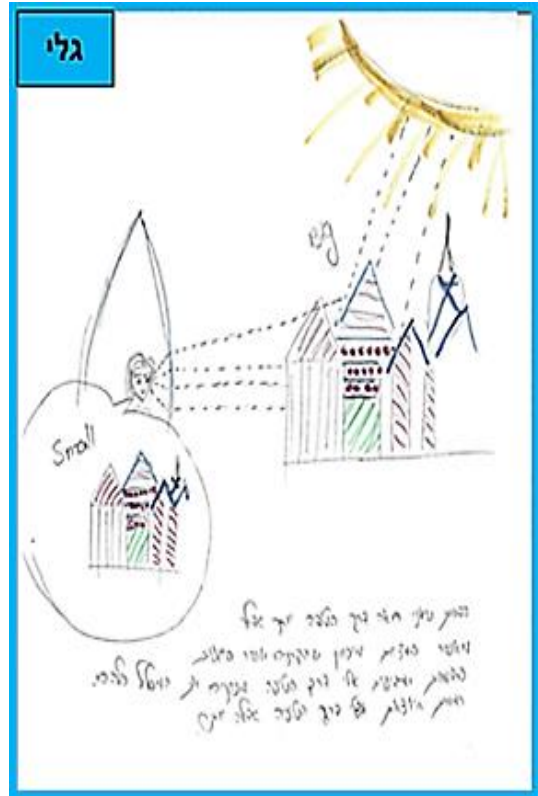
תמונה 11 עצים מתוך טיפה, בן

הציור של אביטל אינו מבטא תובנות חדשות. נראה שאביטל לא הצליחה להתגבר על הבלבול שחשה נוכח כל המידע שאליו נחשפה. היא נטשה את הציור הריאליסטי והאינטואיטיבי, שהיה אולי המדויק ביותר מבין כל הציורים שצוירו לפני הלמידה, ומבטאת בציור מצב רגשי (ראו תמונה 12). תחושת הבלבול וחוסר הוודאות שעולה מן הטקסט הדבור שליווה את הציור הראשון ומן הציור השני מצביעים אולי גם על רצון ללמידה, ונכונות לוותר על התפיסה האינטואיטיבית שנראית בציור הראשון. הציור של אביטל אחרי הלמידה נמצא ברמה 1 ומבטא נסיגה.



תמונה 12 – רסיסי מים, אביטל

הציור של גלי (ראו תמונה 13) מבטא למידה רבה. הציור מראה את קרני האור שיוצאות מהשמש, פוגעות בבתים, מוחזרות אל השטח החיצוני של הטיפה, ונשברות בדרך אל העין. העין מצוירת בהגדלה מתחת לדמות הרואה, ובה נוצרת דמות מוקטנת של עצמים. גלי חושבת שיהיה עיוות בקרניים ולא רק בדמות: "קרני אור שפוגעות בחפצים אחר כך הן בטיפה ודרכה הן מגיעות לעיניים שלי מתעוותות בדרך". היא מתלבטת גם ביחס לגודל הדמות. מצד אחד היא אומרת "הדמות מוגדלת ובמיקום שונה מהאמתי... המרחקים שונים". מצד שני, היא כותבת באנגלית על הציור שתהיה הקטנה. הציור של גלי מבטא את ההמשגות שלה בצורה מפורשת, ומציג הן את החוויה של האדם הרואה, והן את התהליכים המדעיים שאינם ניתנים לצפייה ישירה. המבט הרחב של גלי על תהליך של המסע של האור מהשמש ועד להגעתו אל העין של הצופה, המצויה בתוך טיפת המים, שמצוירת כעדשה קמורה, מאפשר להבין את תהליך הראייה האנושי ואת הקשר שלו עם התנועה של האור, והמפגש שלו עם העין. משום כך, הטקסט של גלי נמצא ברמה 5.



תמונה 13: בתים מבעד לטיפת מים, גלי

לסיכום, חמישה לומדים חוו תהליכי הבנה אישיים. כולם נכחו באותם השיעורים בכיתה שעסקו בשבירת האור. כל אחד מהלומדים התחיל את הלמידה מנקודת מבט אישית וייחודית. ארבעה מתוך חמשת הלומדים סיימו את התהליך בהתייחסות לידע מדעי שנלמד ובהתקדמות יחסית למצב שבו התחילו את הלמידה. התפיסות של הלומדים אינן חזרה על מה שלמדו בכיתה, אלא עיבוד אישי של הנלמד. הציורים של ארבעת הלומדים הללו מתארים תהליכים שקשורים לשבירת האור, ואפשר ללמוד מתוכם גם על מה שטרם נלמד ויכול להיות בסיס לתיווך ולמידה נוספת.

#### למידה קשורה ברגשות מעורבים

ציורים 14 – 17 מתארים את הרגשות שהלומדים חוו במהלך הלמידה. כל הלומדים מבטאים תחושות של אי וודאות שמשלבות חוסר ביטחון וספקות יחד עם סקרנות ורצון ללמוד (שור, 2019, שור ונבו, 2018: 2015, Schur). דווקא סימני השאלה מאפשרים ללומדים לבטא את סקרנותם ואת יכולותיהם, ולהגיע לידי ביטוי אישי של הנלמד. הציור של חן (ראו תמונה 14) מראה עננים על רקע של שמים כהים. מעליהם בוקעת שמש גדולה בצבע צהוב, וקרניה ורודות. חן הסבירה, שהרגשות שלה בדרך כלל מבולבלים וכבדים, אבל כאשר היא מרגישה שהבינה משהו חדש, הדבר מאיר לה

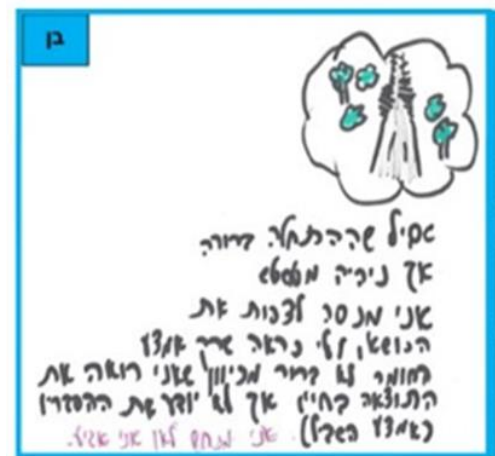


את הראש ואת הלב. חן הייתה מודעת לכך שלמדה וקיבלה תשובה על שאלות שהטרידו אותה במהלך הציור הראשון, והיא בטאה הן את הספקות והן את תחושת הסיפוק שהלמידה הסבה לה.



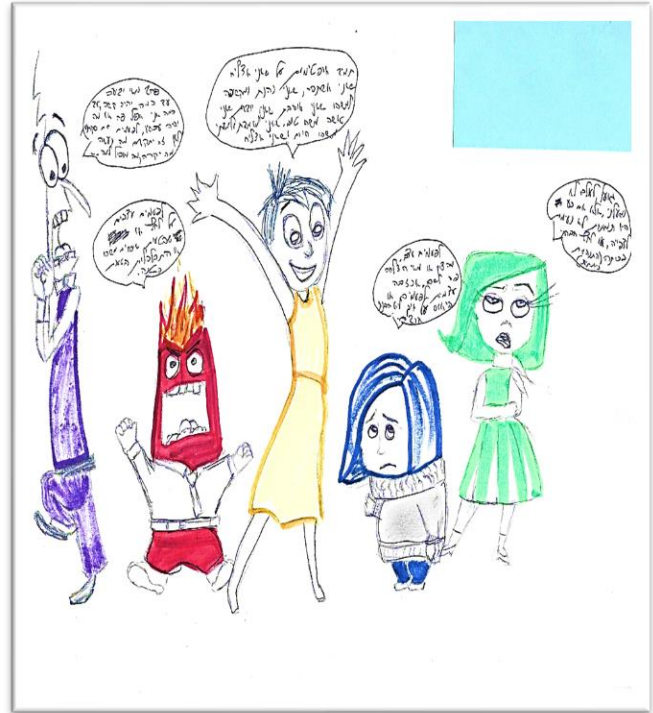
תמונה 14: שמש מפציעה מבעד לעננים, חן

בן הרגיש שהנושא לא ברור לו עד תומו. הוא צייר שביל ואמר שהוא מרגיש שהוא נמצא באמצע הדרך, והסוף אינו נראה בברור, אולם הוא מקווה שבסופו של התהליך הוא יגיע להבנה (ראו תמונה 15).



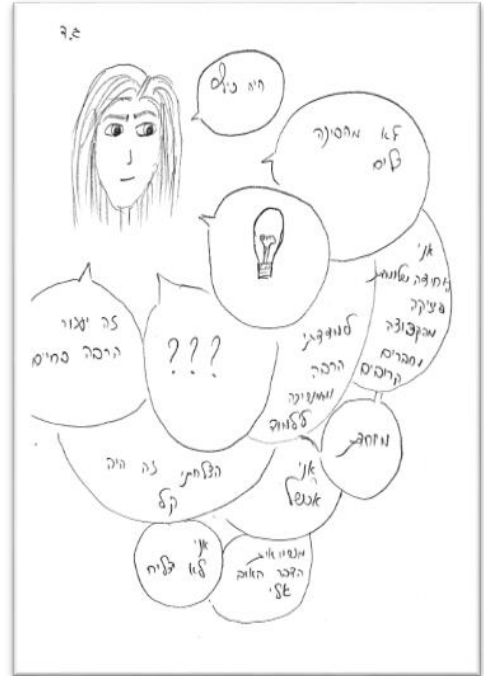
תמונה 15: שביל מטושטש, בן

גם אביטל ציירה שילוב של רגשות שליליים עם תקווה ואופטימיות (ראו תמונה 16), אולם לרגשות השליליים שהיא בטאה יש עצמה רבה. היא תארה את רגשותיה כקבוצה של דמויות שכל אחת מהן מבטאת רגש אחר. רוב הדמויות מבטאות תחושות קשות: פחד, עצבנות, דיכאון וגועל (מן ההתנהגות של חבריה לכיתה). הדמות שבמרכז מבטאת אופטימיות. היא נהנית ללמוד משהו שהיא אוהבת, מאמינה שהוא חשוב, ומקווה להשתפר ולהצליח.



תמונה 16: רגשות כדמויות, אביטל

גלי אהבה לדעת שיש פתרון, ושיש דרך מסודרת להגיע אליו. הבקשה להיכנס לתוך טיפת מים עוררה אצלה חושות של חוסר ביטחון וספק: "למה אני עושה את זה, למה אני צריכה את זה ולמה אין פה תרגיל נורמלי במתמטיקה או משהו בסגנון... זה יותר קל לי, כי אני פשוט אוהבת יותר דברים כאלה, אני יותר אוהבת שזה מסודר ומאורגן מאשר... לפתח מחשבה אני אוהבת, אני אוהבת לחשוב, אבל אני אוהבת גם שיש לי את ה... שאני יודעת שיש לי פתרון בסוף. כאילו אני יכולה לא לדעת אותו אבל אני יודעת שיש אותו. שהוא קיים. כאילו זה מרגיע אותי." גם גלי ציירה רגשות מעורבים (ראו תמונה 17): ערך לפיזיקה "זה יעזור הרבה בחיים", אהבה לנושא "היה כיף", "משוואות הדבר האהוב עלי", חשש מכישלון "אני לא יצליח", אי הבנה "???", "לא הבנתי כלום", למידה "למדתי הרבה, ממשיכה ללמוד". גלי הרגישה בדידות חברתית מסוימת: אני [הבת] היחידה שלומדת פיזיקה מקבוצת החברים הקרובים. אך גם "מיוחדת". מאחר שהיא מודעת להישגיה הגבוהים, היא הייתה מסוגלת לעמוד בלחצים חברתיים, למרות הספקות העצמיים: "אבל כשהבנתי שאני כן... הייתי לחוצה, אבל הבנתי שאני כן צודקת, ולמרות שכל הכיתה כאילו אמרה לא, לא, זה טעות... היה לי כזה מחשבה של מה, אני טעיתי? ואז הבנתי שלא, ואז רציתי להסביר את זה גם מול הכיתה כאילו".



תמונה 17: רגשות מעורבים, גלי

לסיכום, ההתייחסות לתהליכי אי הוודאות של הלומדים מרחיבה את השיח על התהליך שחוו בדרך אל הבנה של שבירת האור. התהליכים הרגשיים הם חשובים בכדי להתייחס אל מה שחווה כול אחד מהלומדים. עבור גלי, היכולת שלה להיות בולטת בהבנת הפיזיקלית, מגדירה אותה חברתית יחד עם קבוצת הבנים. עצם ההצטיינות בתחום אינה נתפסת אצלה כברורה מאליה. היא לומדת להכיר עצמה. אצל חן בולט המאבק שלה בדרך אל ההבנה. השמש מפציעה לאחר הרבה מאוד לבטים. ממש לפני שכבר חשבה שההבנה לא תגיע, היא ראתה את השמש מפציעה. תהליך של גילוי מרגש. עבור אביטל, התיאור של היחסים החברתיים הלא פשוטים עם חבריה לכיתה יכול להסביר את הירידה בהבנה שחוותה בתהליך. מתלמידה הבולטת בידע שלה ובנכונות לשאול שאלות ולהתייחס למורכבות של התופעה היא עברה תהליך של ירידה במוטיבציה, שבא לידי ביטוי בציור מאוד פשוט בסיום תהליך הלמידה. בן התקשה לבטא את רגשותיו, והתייחס יותר לתהליכי ההבנה המתייחסים אל שינויים בידע שחווה.

### דיון

#### תהליכי למידה והמשגה

תהליך הלמידה נבנה כך שהלומדים חוו למידה דינמית, בתחילת התהליך ובסופו, שבה הם נכנסו בחשיבתם אל טיפה של מים, וראו דרכה את העולם. בין שתי האינטראקציות המתווכות של ראיית העולם מבעד לטיפת מים, חוו הלומדים תיווך, באמצעות מסע חשיבתי, שנבנה באמצעות שתי אינטראקציות מתווכות נוספות, ואפשר ללומדים ללמוד את העקרונות של שבירת האור.

כול חמשת הלומדים חוו תהליכי שינוי תפיסתי אישיים בהבנתם את שבירת האור. בכדי לאפשר להם לבטא נקודות מבט אישיות, היה צורך לאפשר להם לחוות משימות לימודיות מאתגרות בתחילת תהליך הלמידה ובסופו. הלומדים נדרשו להשתמש בדמיון בכדי להכניס עצמם לתוך טיפה של מים, ולראות את העולם מבעדה. הכניסה לתוך הטיפה באמצעות הדמיון, הייתה תחילתו של תהליך הלמידה הדינמית שחוו וגם סיומו. בתחילת התהליך הופתעו הלומדים, ונדרשו לחשוב באופן לא שגרתי.

החזרה על אותה משימה בתחילת התהליך ובסופו, כשבשני המקרים, נדרשו הלומדים לצייר ולהסביר את מה שציירו, אפשרה לראות את תהליכי השינוי התפיסתי שחוו, ולנתח את התהליך האישי שחווה כול אחד מהלומדים. הציורים של חמשת הלומדים מראים כי כל תלמיד התחיל מנקודה שונה, ולכל אחד היו המשגות שונות. בזכות התיווך, ארבעה מתוך חמשת התלמידים התקדמו, והתחילו להתייחס לעקרונות המדעיים של מהות האור ותנועתו בתיאור העולם. הלמידה הייתה כרוכה ברגשות של אי וודאות. כאשר אי הודאות הייתה רבה מדי – הציור של הלומדת ביטא נסיגה.

תהליכי הלמידה הייחודיים לפרט שנמצאו במחקר זה מתיישבים עם טענותיו של דיססה (diSessa, 2017), כי אנשים חושבים על סיטואציות מדעיות בדרכים ייחודיות ושונות, וכי התובנות האינטואיטיביות אינן קוהרנטיות (diSessa, 2017; Sherin, 2017; Vosniadou, 2017). קיים פער בין הוראה ללמידה, כך שחשיפה להוראה פורמאלית אינה מביאה להחלפה של תובנות אינטואיטיביות בתובנות מדעיות, אלא ליצירה של מושגי ביניים, בין המושגים המדעיים לבין המושגים הראשוניים שהיו ללומדים לפני התחלת הלמידה (Vosniadou, 2017). מושגים אלה אינם יציבים: הלומדים חשים כי התובנות השונות שלהם אינן קוהרנטיות, ומנסים לשנות אותן כך שיתיישבו זו עם זו (Sherin, 2017; Vosniadou, 2017). במחקר זה, חוסר הקוהרנטיות בא לידי ביטוי בייצוג של יחסי הגודל שבין מולקולות לבין חיידקים ותאים של צמחים (תמונות 2 ו-3), בתיאור הדמויות שבתוך הטיפה כקטנות וגדולות בו זמנית (תמונה 13), ושל קרני האור כמנותקות מן השמש, שמופיעה בציור (תמונות 9 ו-10).

המודל של שור ועמיתיו (2020) שפותח כדי לתאר את ההתפתחות של תפיסות אקולוגיות חברתיות אצל לומדים מבוגרים נמצא מתאים גם כדי לתאר את התפתחות ההבנה של שבירת האור אצל בני נוער. השימוש בציורים ובהסברים מילוליים, והניתוח שלהם באמצעות המודל של שור ועמיתיו מאפשרים לתאר באופן שיטתי את רמות ההבנה של לומדים שונים בנקודת זמן מסוימת, בלי לוותר על ההתייחסות לאופי האישי והייחודי של המשגות של כל לומד. בעתיד כדאי יהיה לבחון אם אפשר להשתמש במודל גם בהקשרים נוספים.

*מהו הקשר שבין ההתקדמות שהלומדים חוו לבין התיווך שקיבלו?*

התיווך נעשה כאמצעות מסע חשיבתי שבו נפגשו הלומדים עם עקרונות בסיסיים של שבירת האור מנקודות מבט מגוונות. המסע החשיבתי אפשר ללומדים לחוות בחשיבתם את סוגי הייצוגים, שאליהם מתייחס ברונר (Bruner, 1966), שתיאר שלושה סוגים של ייצוג שקשורים בשלוש דרכים של למידה: (1) למידה דרך התנסות פיזית שמתווכת באמצעות חפצים,

מחוות והבעות פנים (Enactive learning). לדוגמה – צפייה בתנועה של כדור. (2) למידה איקונית באמצעות ציורים (Iconic learning). (3) למידה סמלית באמצעות שפה (Symbolic learning). באמצעות שילוב בין שלוש הדרכים הללו, התנסות פיזית, דימויים ושפה, התנסויות הופכות לידע. השילוב שלהן חיוני גם בלמידה פורמלית. בהקשר של הוראת המדעים, כאשר ההוראה היא סמלית בלבד, הלמידה מתבטאת במלל ריק ובפתרון "טכני" של תרגילים שאין להם משמעות עבור הלומד (Tang, 2016). במהלך המסע החשיבתי, המורה השתמשה בהתנסויות הפיזיות של הלומדים, תנועה על היבשה ובמים, בייצוגים גרפיים ובשיח כיתתי על אודותיהם, כדי לקדם את ההבנה של הלומדים ביחס למהות האור ולהתייחסות אל שינויי המהירות שלו בתווכים שונים, שיוצרים את שבירת האור. הבנת העקרונות המדעיים אפשרה ללומדים לשנות את הבנתם לגבי ההשתקפות של העולם מבעד לטיפת המים.

השיח בכיתה תואר על ידי מורטימר וסקוט (Mortimer & Scott, 2003) כרצף שמתחיל בשיח דיאלוגי אינטראקטיבי. בהמשך, השיח הופך לאינטראקטיבי סמכותני (מתן הסברים), ומסתיים כשיח סמכותני לא דיאלוגי (סיכום). באופן כללי, השיח שהתקיים בין המורה לבין הלומדים בשלב התיווך, שנעשה כמסע חשיבתי, בהקשר של שבירת האור, התנהל בהתאם לתיאור שלעיל: המורה הציגה חידות, ולאחר מכן התנהל דיון אינטראקטיבי שבו הלומדים העלו רעיונות שונים ודנו בהם. השיח שבין הלומדים הוא חשוב, משום שהוא מאפשר להם להציג את ההמשגות הייחודיות שלהם, לקבל עליהן משוב, להתמודד עם ביקורת וטיעונים נגדיים, להעמיק את החשיבה, ולטפח את כישורי ההסבר וההנמקה. האזנה לשיח שבין הלומדים אפשרה למורה להציע הסברים רלוונטיים, שהתייחסו ישירות להתנסויות, לדימויים ולקשיים שהלומדים העלו.

השיח בעת הלמידה הדינמית, בתחילת התהליך ובסופו, אפשר ללומדים להציג את נקודות המבט שלהם על שבירת האור שבאה לידי ביטוי בהתבוננות בעולם מתוך טיפת המים. השיח בלמידה הדינמית היה דיאלוגי אינטראקטיבי לכול אורכו, כשהסברי הלומדים, היו חשובים בעיצוב ההבנה הכיתתית של שבירת האור. המורה הקשיבה למקומם של הלומדים, והקפידה על התייחסות לדרכי הבנתם את שבירת האור. עם זאת, חוסר המודעות של המורה לכל הקשיים שאביטל העלתה לא אפשר לה להתקדם, והביא בסופו של דבר לייאוש של הלומדת, ולוויתור על הניסיון להבין.

ציורים היוו אמצעי מרכזי אך לא יחיד לייצוג של המשגות הלומדים. במהלך ההוראה, הלומדים שילבו הסברים מילוליים, נוסחאות מתמטיות וציורים. לכל אחד מהאופנים הללו יש זמינויות ומגבלות משלו, וכל אחד מהם מעביר חלק מהמסר. השילוב ביניהם הוא "אנסמבל מולטי מודאלי" (Kress, 2015). דוגמה בולטת לכך היא הטקסט שהפיקה אביטל לפני הלמידה: הציור אינו מסגיר את המבוכה שחשה, ואילו הטקסט המילולי אינו מבטא את הראייה האינטואיטיבית המדויקת שלה. צפייה בציורים והאזנה להסברים שמלווים אותם מעניקה למורים הזדמנות ללמוד על ההמשגה הייחודית של כל לומד ולהעניק ללומדים את התיווך הספציפי שהם זקוקים לו באותה עת (שור, 2019).

רגשות הם חלק בלתי נפרד מתהליכי חשיבה ולמידה (שור ונבו, 2018). למידה אופטימלית מתרחשת במצבים שאינם מעוררים דאגה או חרדה גבוהות מדי, מצד אחד, ושעמום – מצד שני (Pekrun, & Garcia-Linnenbrink, 2012). השאלות שהמורה הציבה ללומדים הן שאלות שמבקשות "ביצועי הבנה": יישום של ידע פיזיקלי בסיטואציות חדשות (Perkins, 1993). משימות אלה מחייבות חשיבה עמוקה (כהנמן, 2013), ומעוררות תחושות של אי וודאות (Shulman, 2005). הממצאים מראים שכל הלומדים חשו רגשות מעורבים: תחושות שליליות של בלבול וחוסר וודאות, לצד רגשות חיוביים – סיפוק מן ההתקדמות וההבנה, תקווה וגאווה על כך שהם מתמודדים בהצלחה עם חומר קשה וחשוב. במקרה אחד אי הוודאות והבלבול היו רבים מדי. למרות זאת, היכולת של הלומדת לנסח את השיקולים והתובנות שאינם מתיישבים אלה עם אלה מהווה נקודת פתיחה מצוינת לתיווך וללמידה נוספת. ההתייחסות אל תהליכי אי הוודאות של הלומדים מקשר את הידע הנרכש בכיתה אל הדימוי העצמי של הלומדים. הצלחה בתחום פתרון בעיות בפיזיקה הביאה את גלי להרהר לגבי מקומה החברתי ולהיות מודעת לכוחותיה האינטלקטואליים. עבור חן, תהליך ההתמודדות עם הבנה פיזיקלית נתן לה תחושה של מסוגלות לגבי ההתנהלות שלה בעולם.

לסיכום, המחקר מראה שאפשר לאבחן כיצד כל תלמיד תופס את הנושא הנלמד באמצעות ציורים והסברים שמלווים אותם. תיווך שמשלב משימות לא שגרתיות שמזמנות חשיבה מעמיקה, שיח כיתתי באווירה תומכת שמעודדת דיון ביקרתי והנמקה, והסברים שמתייחסים ישירות להמשגות הקיימות של התלמידים, מאפשר שינוי מושגי. אפשר ללמוד על השינוי המושגי שהתרחש בכל אחד מהלומדים כתוצאה ממהלך ההוראה באמצעות ניתוח של הציורים שהלומדים מפיקים וההסברים המילוליים שמתלווים אליהם. המודל של שור ועמיתיו (2020) מאפשר למורה להעריך את רמת הידיעות היחסית של הלומדים, בנוסף על ההערכה הייחודית לכל לומד. לימוד של תכנים חדשים כרוך בתחושות של אי-וודאות וחששות, ויש להיזהר מ"הצפה" רגשית וקוגניטיבית של הלומדים.

מגבלות המחקר הם המספר המצומצם של הלומדים והגישה הפרשנית לניתוח הציורים. בעתיד כדאי לבחון את הרעיונות הללו במספר גדול יותר של לומדים ובמגוון רחב יותר של לומדים ונושאי לימוד.

## מקורות

כהנמן, ד' (2013). *לחשוב מהר לחשוב לאט*. (תרגום: י' סלע־שפירו וע' נבו; עריכה מדעית של המהדורה העברית: מ' בריהלל) תל אביב: מטר וכנרת.

שור, י' (2019). *אומנות ההוראה הקשובה: מסע לימודי דיאלוגי המקדם הבנה*. תל אביב: מכון מופ"ת.

שור, י' ואקסלרוד-טייר, נ' (2014). למידה דינמית – ראייה, חשיבה, התבוננות והבנה מושגית. *כמעגלי החינוך*, 4, 96-

שור, י' ונבו, א' (2018). תהליכי אי-ודאות בלמידה לצורך הבנה. *דפים*, 67, 41 – 81.

שור, י', נבו, א', גל, א' וגן, ד' (2020). הוראה קשובה כבסיס ליצירת שינוי תפיסתי אישי בהבנה של מערכות חברתיות-אקולוגיות. *דפים*,

Archer, A., & Arca, M. (2009). Children's Representations in modelling scientific knowledge construction. In: C. Andersen, N. Scheurer, M. del Puy, L. Pérez Echeverría and E. Teubal (Eds.) *Representational systems and practices as learning tools* (pp. 109–131). Rotterdam, The Netherlands: Sense / Brill.

Ainsworth, S., Prain, V., & Tytler, R. (2011). Drawing to learn in science. *Science*, 333, 1096–1097.

Best, R. M., Dockrell, J. E., & Braisby, N. R. (2006). Real-world word learning: exploring children's developing semantic representations of a science term. *British Journal of Developmental Psychology*, 24(2), 265–282.

Brooks, M. (2009). Drawing, visualisation and young children's exploration of “big ideas”. *International Journal of Science Education*, 31(3), 319–341.

Bruner, J. (1966). *Toward a Theory of Instruction*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Carey, S. (2009). *The origins of concepts*. New York: Oxford.

Cazden, C. B. (2001). *Classroom discourse: the language of teaching and learning*. Portsmouth, NH: Heinemann.

Clegg, B. (2002). *Light Years*. London. Mcmillan Paperback.

diSessa, A. A. (2017). Knowledge in pieces. In: T. G. Amin & O. Levrini (Eds.) *Converging perspectives on conceptual change: mapping an emerging paradigm in the learning sciences* (pp. 9-16). London: Routledge.

Ehrlén, K. (2009). Drawings as Representations of Children's Conceptions. *International Journal of Science Education*, 31(1), 41-57.

Flyvbjerg, B. (2011). Case study. In: N. K. Denzin and Y. S. Lincoln (Eds.). *The Sage handbook of qualitative research* (4th ed., pp. 301–316). Thousand Oaks, CA: Sage.

- Hewitt, P. G. (1993). *Conceptual physics* (7<sup>th</sup> ed.). New York: Harper Collins College
- Jewitt, C., Kress, G., Ogborn, J., & Tsatsarelis, C. (2001). Exploring learning through visual, actional and linguistic communication: the multimodal environment of a science classroom. *Educational Review*, 53(1), 5-18.
- Kenner, C. (1999). Children's understandings of text in a multilingual nursery. *Language and Education*, 13(1), 1-16.
- Kress, G. (2015). Semiotic work: applied linguistics and a social semiotic account of multimodality. *AILA Review*, 28, 49–71.
- Kress, G., & Jewitt, C. (2003). Introduction. In: G. Kress & C. Jewitt (Eds.), *Multimodal literacy* (pp. 1-18). NY: Peter Lang.
- McConnell, S. (1993). Talking drawings: A strategy for assisting learners. *Journal of Reading*, 36(4), 260–269.
- Marton, F., Tsui, A. B. M., Chik, P. P. M., Ko, P. Y., & Lo, M. L. (2004). *Classroom discourse and the space of learning*. Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum.
- Mortimer, E. F., & Scott, P. H. (2003). *Meaning making in secondary science classrooms*. Buckingham: Open University Press.
- Paquette, K. R., Fello, S. E., & Renck Jalongo, M. (2007). The talking drawings strategy: using primary children's illustrations and oral language to improve comprehension of expository text. *Early Childhood Education Journal*, 35(1), 65 -73.
- Pekrun, R., & Garcia-Linnenbrink, L. (2012). Academic emotions and students' engagement. In: S. L. Christenson, A. L. Reschly & C. Wylie (Eds.) *The handbook of research on student engagement* (pp. 259-282). New York: Springer.
- Perkins, D. (1993). Teaching for understanding. *American Educator*, 17(3), 28-35.
- Quillin, K., & Thomas, D. (2015). Drawing-to-learn: a framework for using drawings to promote model-based reasoning in biology. *CBE–Life Sciences Education*, 14(1), es2, 1-16.
- Schur, Y. (2015). Thinking journeys in the classroom: The power of uncertainty and mediation. *Professional Development Today - PDT*, 18(1), 44-53.



- Schur, Y., & Valanides, N. (2005). Dynamic learning and perceptual changes. In D. Koliopoulos & A. Vavouraki (Eds.), *Science education at the crossroads: Meeting the challenges of the 21st century* (pp. 121-134). Athens: EDIFE.
- Schur, Y., & Galili, I. (2009). Thinking journey: A new mode of teaching science. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 7, 627-646.
- Schur, Y., Galili, I., & Shapiro, T. (2009). Multiple perspectives of science learners using thinking journey for understanding the day-night concept. *Journal of Science Education*, 10(2), 94-98.
- Sherin, B. (2017). Synthesis I: Elements, ensembles, and dynamic constructions. In: T. G. Amin & O. Levrini (Eds.) *Converging perspectives on conceptual change: mapping an emerging paradigm in the learning sciences* (pp. 61-78). London: Routledge.
- Shulman, L. S. (2005). Pedagogies of uncertainty. *Liberal Education*, 91(2), 18-25.
- Stein, H., Galili, I., & Schur, Y. (2015). Teaching a new conceptual framework of weight and gravitation in middle school. *Journal of Research in Science Teaching*, 52, 1234-1268.
- Tang, K. -S., (2016). The interplay of representations and patterns of classroom discourse in science teaching sequences, *International Journal of Science Education*, 38(13), 2069-2095.
- Teubal, E., & Guberman, A. (2014). *Graphic texts: Literacy enhancing tools in early childhood*. Rotterdam, Rotterdam, The Netherlands: Sense / Brill.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69.
- Vosniadou, S. (2017). Initial and scientific understandings and the problem of conceptual change. In: T. G. Amin & O. Levrini (Eds.) *Converging perspectives on conceptual change: mapping an emerging paradigm in the learning sciences* (pp. 17-23). London: Routledge.