

## למידה של מושגים בכימיה דרך חקירת מודלים ממוחשבים מבוססי-סוכנים בקרב תלמידי חטיבת ביניים

שרונה ט. לוי

אוניברסיטת חיפה  
stlevy@construct.haifa.ac.il

סיגל סמון

אוניברסיטת חיפה  
samon638@gmail.com

### Learning of Concepts in Chemistry through Exploring Agent-Based Computer Models among Junior High School Pupils

Sigal Samon

University of Haifa

Sharona T. Levy

University of Haifa

#### Abstract

The structure of matter is one of the basic concepts in the study of sciences. Understanding the structure of particles in matter constitutes the basis for comprehending most of the concepts in the world of science in general and in chemistry in particular. Many students find difficulties in understanding the depth of the particle structure. Main difficulties concern both inconceivable magnitude involved in understanding the structure and the systemic nature of the concepts associated with it. Within this article, we'll present study that examined the contribution of systems approach Learning environment, to the learning of concepts: pressure, diffusion and temperature of gas. The study involved learning chemistry topics among 92 junior-high students in a quasi-experimental pretest-posttest design, participating in either an experimental model-based learning unit with a complex systems perspective or a widely-used program that emphasizes the macro-level and transitions between micro-and macro-levels. The results of the study demonstrate the advantage of the use of agent-based computerized models anchored upon physical laboratory experiments for the abstraction of the phenomenon, for knowing it at the micro level and in a way that will bridge between the micro and macro levels. This enables considerable development in the kinetic molecular theory perception and the concepts relating to the gas phase of matter among junior high school pupils.

**Keywords:** Particle model of matter, complex systems, Agent-Based Modeling (ABM).

#### תקציר

מבנה החומר הוא אחד מהמושגים הבסיסיים ביותר בלימודי המדעים. הבנת המבנה החלקיקי של החומר מהווה בסיס להבנת חלק גדול מהמושגים בעולם המדע בכלל והכימיה בפרט. תלמידים רבים מגלים קשיים בהבנה לעומק של המבנה החלקיקי. הקשיים העיקריים נוגעים הן בסדרי הגודל הבלתי נתפסים הכרוכים בהבנת מבנה זה והן בטבען המערכתית של המושגים הקשורים בו. במסגרת מאמר זה, נציג מחקר אשר בחן את תרומתה של סביבת למידה מבוססת מודלים ממוחשבים בגישה מערכתית, ללמידה של המושגים: לחץ, פעפוע וטמפרטורה של גז, בקרב תלמידי כיתה ז'.

במחקר השתתפו 92 תלמידים, מתוכם 47 תלמידים היוו את קבוצת הניסוי ו-45 תלמידים שימשו כקבוצת ביקורת. ההתערבות הלימודית ארכה כ-12 שעות לימוד. מתוך ממצאי המחקר ניתן ללמוד על יתרון השימוש במודלים ממוחשבים מבוססי סוכנים המעוגנים בניסויי מעבדה פיזיים, לפישוט התופעה, להכרתה ברמת המיקרו ובצורה המגשרת בין רמות המיקרו והמאקרו, אשר מאפשר התפתחות ניכרת בתפיסת התיאוריה הקינטית מולקולארית ומושגים הנוגעים בפאזה הגזית של החומר בקרב תלמידי חטיבות הביניים.

**מילות מפתח:** המודל החלקיקי של החומר, מערכות מורכבות, מודלים ממוחשבים מבוססי סוכנים (ABM).

## מבוא

הבנת מבנה החומר ותכונותיו מאפשרת הבנה של תופעות מחיי היומיום מחד ופיתוח טכנולוגיה העוסקת בפתרון בעיות ובמענה על צרכים אנושיים מאידך. אחת ממטרות תכנית הלימודים החדשה במדע וטכנולוגיה לחטיבת הביניים בנושא "חומרים" היא לערוך לתלמיד הכרות עם מבנה החומר, על פי המודל החלקיקי, כמסביר תופעות בחיי היומיום. למרות המאמצים המושקעים בלימוד הנושא בבתי הספר, תלמידים רבים מגלים קשיים בהבנה לעומק של המבנה החלקיקי (Dori & Hameiri, 2003; Johnstone, 1991; Nussbaum, 1985). הקשיים העיקריים נוגעים הן בסדרי הגודל הבלתי נתפסים הכרוכים בהבנת מבנה זה והן בטבען המערכתי של המושגים הקשורים בו (Levy & Wilensky, 2009a). מתוך כך עולה הצורך בשימוש באמצעי ייצוג והמחשה ובהוראה בגישה מערכתית של מושגים הקשורים במבנה החומר.

במאמר זה, נפתח בתיאוריה על המושגים הנלמדים והקשיים בהבנתם. מכאן, נפנה לטכנולוגיה המזמנת ותומכת בלמידה של המושגים מתוך גישה מערכתית, נתאר מחקר הבוחן את תרומתה של סביבת למידה המשלבת מודלים ממוחשבים מבוססי סוכנים המעוגנים בניסויי מעבדה, ללמידה של מושגים מערכתיים המבוססים על המבנה החלקיקי של החומר, בקרב תלמידי כיתה ז' ולסיום נדון בממצאים שעלו מהמחקר ובהשלכות שלהן לשדה הפדגוגי והמחקרי.

## תיאוריה

### המושגים הנלמדים

בסעיף זה יבוארו המושגים ברמת הבנה המצופה מתלמידי חטיבות הביניים. הבנת המבנה החלקיקי של החומר מהווה בסיס להבנת חלק גדול מהמושגים בעולם המדע בכלל והכימיה בפרט (Margel, 2008; Eylon & Scherz, 2008; Merritt, Schwartz & Krajcik, 2008). המחקר מתמקד בתפיסת מושגים המבוססים על המודל החלקיקי של החומר. לחץ – מוגדר ככוח ליחידת שטח, סך כל הכוח שמפעילים חלקיקים על הדופן של גוף מסוים בעת ההתנגשות (שינוי בתנע), (Atkins, 1982). פעפוע – מוגדר כמהלך החופשי הממוצע של מולקולות חומר אחד בין מולקולות של חומר אחר. המהלך החופשי מתייחס למרחק הממוצע שמולקולה אחת עוברת בין שתי התנגשויות עוקבות. מהירות הפעפוע תלויה במסה של החלקיק ובקיבול החום שלו (Hildebrand & Powell, 1965). קיבול החום מוגדר כתוספת החום הדרושה בכדי להעלות את הטמפרטורה של גז במצב נתון במעלת צלזיוס אחת (Hildebrand & Powell, 1965). טמפרטורה – מוגדרת כביטוי לממוצע מהירות תנועת החלקיקים ומהווה מדד לאנרגיה הקינטית של החלקיקים (Atkins, 1982).

### קשיים בלימוד הנושא

מחקרים רבים מראים בעקביות כי למרות המאמצים המושקעים בלימוד הנושא בבתי הספר, תלמידים רבים מגלים קשיים בהבנה לעומק של המבנה החלקיקי (Johnstone, 1991; Nussbaum, 1985), ושל המושגים לחץ פעפוע וטמפרטורה. מושגים אלה נתפסים כמאתגרים וקשים להבנה כיוון שתלמידים רבים מגיעים לכיתה עם תפיסות אונטולוגיות<sup>1</sup> המבוססות על ניסיונם הגופני (Clark &

<sup>1</sup> אונטולוגיה מוגדרת כענף בפילוסופיה החוקר את הקיום, ההווה, במציאות המוחשית ומתייחסת לדרך בה אנו תופסים את העולם סביבנו (Wikipedia, 2010)

תלמידים רבים (Jorde, 2004; Samuel, 1992; Paik, Cho & Go, 2007; Harrison et al., 1999). תופסים את המושג לחץ, ככוח כללי חיזוני המשפיע על החומר (Lin, Cheng & Lawrenz, 2000). תלמידים מתקשים להבין את התנועה האקראית של החלקיקים (תנועה בראונית), ומתייחסים לכיוון ולתנועה של החלקיקים ביחס למטרה סופית שהיא השגת שווי משקל (Chi, 2005). לא מעט תלמידים מתייחסים לטמפרטורה כאל תכונה של חומר ונוטים לבלבל בין חום וטמפרטורה (Clark & Jorde, 2004; Chiou & Anderson, 2009).

### מודלים מבוססי סוכנים (ABM) Agent-Based Modeling

סביבת הלמידה במחקר שלבה חקירה של מודלים ממוחשבים בגישת ABM. לפי גישה זו המערכת מורכבת מהמוני "סוכנים" (הפרטים המרכיבים את המערכת), והתנהגות המערכת מתהווה מתוך ההתנהגויות של הסוכנים: התכונות שלהם ויחסי הגומלין שבניהם (Goldstone & Wilensky, 2008). Goldstone ו-Wilensky (2008) טוענים כי גישה זו מתאימה במיוחד ללמידה על מערכות מורכבות כיוון שהיא היחידה המגשרת בין התנהגות הפרטים ברמת המיקרו לבין התיאור הסימבולי של התהליכים המתרחשים במערכת. הגישה של ABM מתאימה באופן טבעי לצורת החשיבה בכימיה, כיוון שניתן להסביר את המנגנון הגורם לתופעות במאקרו מתוך האינטראקציות שבין המוני "סוכנים", אטומים או מולקולות, ברמת המיקרו (Johnstone, 1991; Rappoport & Ashkenazi, 2008; Levy & Wilensky, 2009a).

### למידה של כימיה בסביבת מודלים ממוחשבים מבוססי סוכנים

מודלים רב-ייעוציים הוכרו כתורמים רבות לפיתוח הבנה וידע מדעי. סביבת הלמידה (CC) Connected Chemistry, כוללת מודלים ממוחשבים ב-NetLogo<sup>2</sup> בליווי מלל ושאלות, המציגות מערכות כימיות סגורות. התלמיד יכול לבצע אינטראקציות רבות עם הסימולציות הקיימות. סביבת הלמידה במחקר מבוססת בחלקה על סביבה זו. בסביבת הלמידה במחקר בוצע תרגום, הרחבה, עיבוד והתאמה ללימוד מושגים בכימיה, באופן איכותי, לאוכלוסיית כיתות ז' בארץ. בנוסף, בוצע עיגון של המודלים בניסויי מעבדה ופיתוח יחידה העוסקת בנושא פעפוע.

### הטכנולוגיה

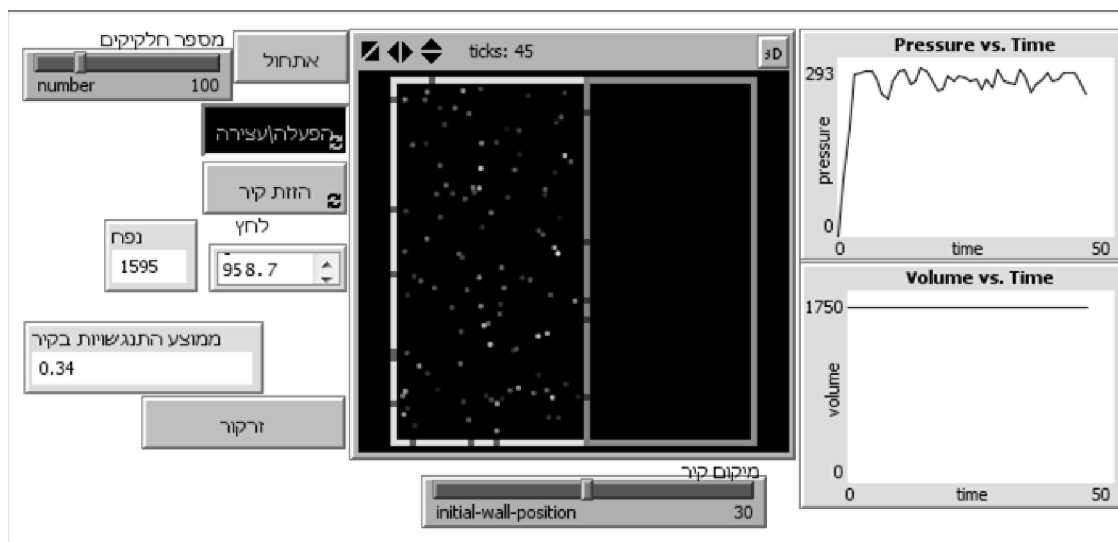
סביבת הלמידה במחקר משלבת חקירת מודלים מבוססי סוכנים. חלון אופייני במודל (ראה איור 1), מציג מערכת כימית סגורה ובה הדמיה של חלקיקי גז בקופסה ולצידם כפתורים לשינוי פרמטרים, מחוונים, וייצוג גרפי של התופעה. התלמידים יכולים לשלוט בפרמטרים כמו: מספר החלקיקים, מהירות החלקיקים, גודל החלקיקים, האם הם יתנגשו אחד בשני? האם הם יקפצו על דפנות הקופסה? התלמידים יכולים לצפות בהתנהגות החלקיקים ולהבחין בהשפעתה על גורמים כמו לחץ וטמפרטורה של המערכת.

בעיצוב סביבת המחקר הנוכחי נכללות מספר התנסויות אשר ממקדות את הלומדים בחלקיקים ומעודדות התבוננות קפדנית בהתנהגותם ובאינטראקציות שלהם כפרטים עם מרכיבים בסביבתם. לדוגמה, התלמידים מתבקשים לעקוב אחר היסטוריית התנועה של חלקיק בודד ולתאר את אופן תנועתו. בפעמים אחרות, התלמידים מתבקשים לשים זרקור על חלקיק בודד וסביבתו הקרובה ולתאר את האינטראקציות שלו עם חלקיקים אחרים ואו רכיבים במערכת. התלמיד החוקר מודלים אלה, מתוודע למספר חוקים פשוטים הנוגעים להתנהגות החלקיקים, ואשר ניתן באמצעותם להסביר תופעות רבות. במהלך חקירת המודלים תלמידים רבים האטו את מהירות תנועת החלקיקים ואו צמצמו את מספרם, פעולות אלה סייעו בידם לעקוב באופן ממוקד יותר אחר התנהגות החלקיקים.

בתכנית הניסוי הושם, בין השאר, דגש על גישור בין ההיבט המיקרוסקופי לבין ההיבט המאקרוסקופי של התופעה. דבר זה נעשה תוך שינוי ועיוות סדרי הגודל במודלים כדי שניתן יהיה לצפות בהתנהגות שתי הרמות בו זמנית על גבי מסך המחשב. דוגמה לכך היא משימה של הוספת

<sup>2</sup> נטלוגו סביבת מידול רב-סוכנים הניתנת לתכנות, שפותחה על ידי פרופסור אורי ווילנסקי מאוניברסיטת Northwestern בארצות הברית. באמצעות נטלוגו, ניתן לחקור מאות מודלים מדעיים אשר מדגימים תופעות טבעיות ותופעות חברתיות ואף לבנות מודלים חדשים. התוכנה ניתנת להורדה בחינם מהאתר: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>

חלקיקים למיכל והתבוננות בגרף המראה שינויים בלחץ. דוגמה נוספת, הגדלת מהירות החלקיקים של גז מסוים והתבוננות גלובלית בקצב פיזור הצבע במסך במטרה להתחקות אחר קצב הפעפוע. העיגון של המודלים בניסוי מעבדה ובתופעות מחיי היומיום תרם אף הוא ליצירת גשר בין הרמות ולהפנמת הייצוג החלקיקי של התופעה במאקרו.



איור 1. מודל לחקירת הקשר שבין נפח המיכל לבין הלחץ

## מתודולוגיה

### שאלות המחקר

- 1) האם ובאיזו מידה לימוד יחידת הוראה בנושא הפאזה הגזית, בסביבת למידה המשלבת חקירה של מערכות מורכבות באמצעות מודלים ממוחשבים, מוביל לשיפור הישגים בשאלון ידע בנושא, בהשוואה ללימוד הנושא בדרך מסורתית?
- 2) האם וכיצד משתנה תפיסת המושגים המדעיים: לחץ, פעפוע וטמפרטורה של גז, בקרב תלמידי כיתות ז' מתוך חקירה של מודלים ממוחשבים בגישה מבוססת סוכנים?
- 3) האם וכיצד משתנה תפיסת מערכות מורכבות בתחום הכימיה בקרב תלמידי כיתה ז' הלומדים באמצעות מודלים מבוססי סוכני?

### מערך המחקר

כדי לאמוד את הלמידה בתנאים השונים, שימש מערך מחקר מסוג קדם-התערבות-סיכום עם השוואה לקבוצת ביקורת. לצורך השוואה בין מבחני הקדם והמבחן שלאחר התהליך שימשה גישת עיצוב של ניסוי לכאורה (Quasi experimental Design) (Shadish & Luellen, 2006).

### משתפי המחקר

במחקר השתתפו 92 תלמידי כיתות ז' משלושה בתי ספר שונים בצפון הארץ, מתוכם 58 בנים ו-34 בנות.

### מהלך המחקר

השלב במחקר התנהלו על פי הרצף: ראיונות קדם עם תלמידי קבוצת מיקוד ( $n=5$ ), שאלוני קדם בקבוצות הניסוי והביקורת, תכנית התערבות: בקבוצת הניסוי, למידה דרך חקירת מודלים ממוחשבים בגישה מערכתית בשילוב ניסויי מעבדה פיזיים. בקבוצת הביקורת, תכנית הלימודים

הרגילה הכוללת הוראה פרונטאלית, ניסויי מעבדה וספר לימוד<sup>3</sup>. לאחר הלמידה התקיימו ראיונות סיכום עם תלמידי קבוצת המיקוד והועברו שאלוני סיכום בשתי הקבוצות. המחקר בשתי הקבוצות התפרס על כ-12 שעות לימוד במשך כ-2-3 שבועות. איור 2 מתאר את המסגרת הפדגוגית של המחקר.



איור 2. המסגרת הפדגוגית של המחקר

#### איסוף וניתוח הנתונים

- כלי המחקר אשר שימשו להשגת מטרות המחקר היו:
- שאלוני ידע, הפריטים הכלולים בשאלון הורכבו משאלות סגורות ומשתי שאלות פתוחות ונלקחו ממחקרים שתעדו תפיסות שגויות בקרב תלמידים. השאלות בדקו ידע והבנה של התופעות הנלמדות.
  - ראיונות עומק חצי מובנים בני כ-15 דקות, נוסח הראיון הוכן מראש וכלל שאלות מובנות אודות התופעות הכימיות הנלמדות ומגוון שאלות ברירה, בהתאם לתשובות והסברי המרואיינים. טבלה 1 מציגה מספר פריטים מתוך מבדקי הידע וראיונות.
- ניתוח הנתונים:
- ניתוח הנתונים כלל שימוש בסטטיסטיקה תיאורית והסיקית, השאלות קודדו לפי בדיקת ידע התוכן ובדיקת הבנה של: המושגים שנלמדו, התיאוריה החלקיקית ומרכיבים מהתיאוריה הקינטית של הגזים. בנוסף נערך ניתוח איכותני של ראיונות הקדם בהשוואה לראיונות הסיכום בגישת "תיאוריה מעוגנת בשדה" (שקדי, 2003).

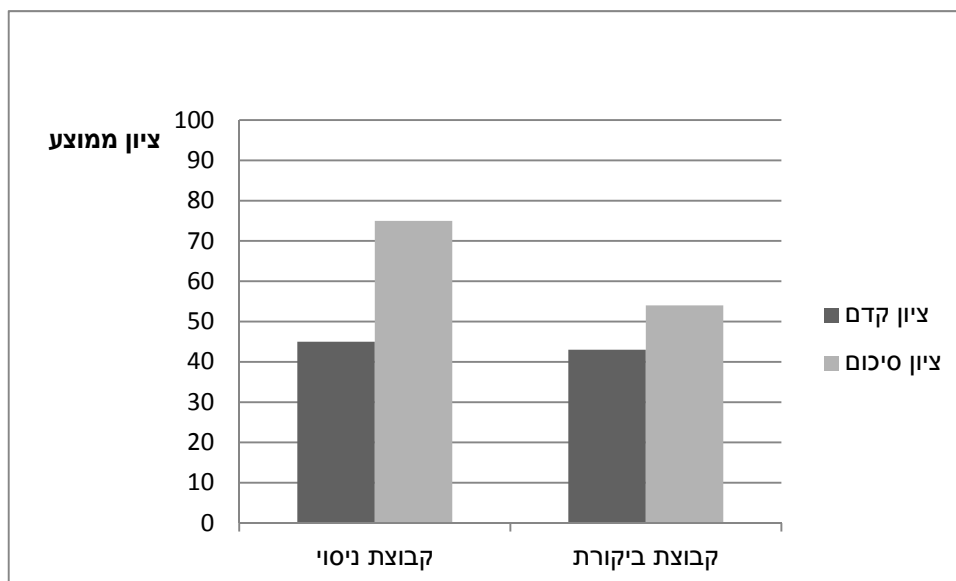
## טבלה 1. דוגמאות לפריטים מתוך שאלוני הידע ופרוטוקול הראיונות

מקור	נושא נבדק	דוגמה לשאלה
שאלוני ידע	KMT – רמת המיקרו	<p>כאשר שני חלקיקי גז מתנגשים:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ החלקיקים משנים כיוון אך מהירותם נשארת קבועה.</li> <li>○ החלקיקים משנים כיוון ומהירות.</li> <li>○ החלקיקים משנים מהירות אך הכיוון שלהם לא משתנה.</li> <li>○ החלקיקים לא משנים לא את הכיוון ולא את המהירות</li> </ul>
	לחץ – רמת המאקרו	<p>לשני כדורי סל יש את אותו הנפח ושניהם נמצאים באותה הטמפרטורה. הלחץ בתוך הכדור הראשון גדול מהלחץ בכדור השני. מהו הקשר בין מספר החלקיקים בשני הכדורים?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ בכדור השני מספר החלקיקים גדול יותר.</li> <li>○ בכדור השני מספר החלקיקים קטן יותר.</li> <li>○ בשני הכדורים יש את אותו מספר חלקיקים.</li> <li>○ לא ניתן לדעת באיזה כדור יש מספר חלקיקים גדול יותר.</li> </ul>
	פעפוע – גישור בין רמות המיקרו והמאקרו	<p>קראו את המידע בקטע הבא וענו על שאלות:</p> <p>נערה התיזה מעט בושם על צווארה. אמה שעמדה בקצה השני של החדר קראה: "איזה ריח טוב!".</p> <p>- תארו באיור, כיצד הגיעו חלקיקי הבושם מצווארה של הנערה אל אפה של אמה שנמצאת בקצה השני של החדר. השתמשו בעיגולים קטנים בכדי לצייר חלקיקים.</p> <p>- הסבירו את האיור שלכם. תארו במילים כיצד הגיעו חלקיקי הבושם מצד אחד של החדר לצידו האחר. הסבירו בהרחבה לגבי כל הפרטים המשתתפים בתהליך.</p>
ראיונות	לחץ – גישור בין רמות המיקרו והמאקרו	<p>לפני המרוויינים מוצגת שקית פלסטיק מנופחת באוויר. בוא ונסתכל בשקית, מה יש בתוכה? אילו יכולנו לענוד "משקפי קסם" שיאפשרו לנו לראות, בהגדלה של פי מליון מה יש בתוך השקית, מה היית רואה? האם תוכל לצייר זאת? (המרוויין מקבל דף A4 ועפרון) הסבר את מה שציירת. מהם הפרטים בציור? מה הם עושים? מה יש ביניהם? מה גודלם? האם הם כבדים? האם הצורה שלהם קבועה?</p>
	לחץ – רמת המאקרו	<p>לפני המרוויינים מוצג בקבוק פלסטיק בנפח 1.5 ליטר ומשאבת יניקה. כעת אשאב את האוויר מהבקבוק, מה לדעתך יקרה? הדגמה: הבקבוק מתכווץ כתוצאה משאיבת האוויר. הסבר מדוע הבקבוק התכווץ לאחר שאבתי מתוכו את האוויר?</p>

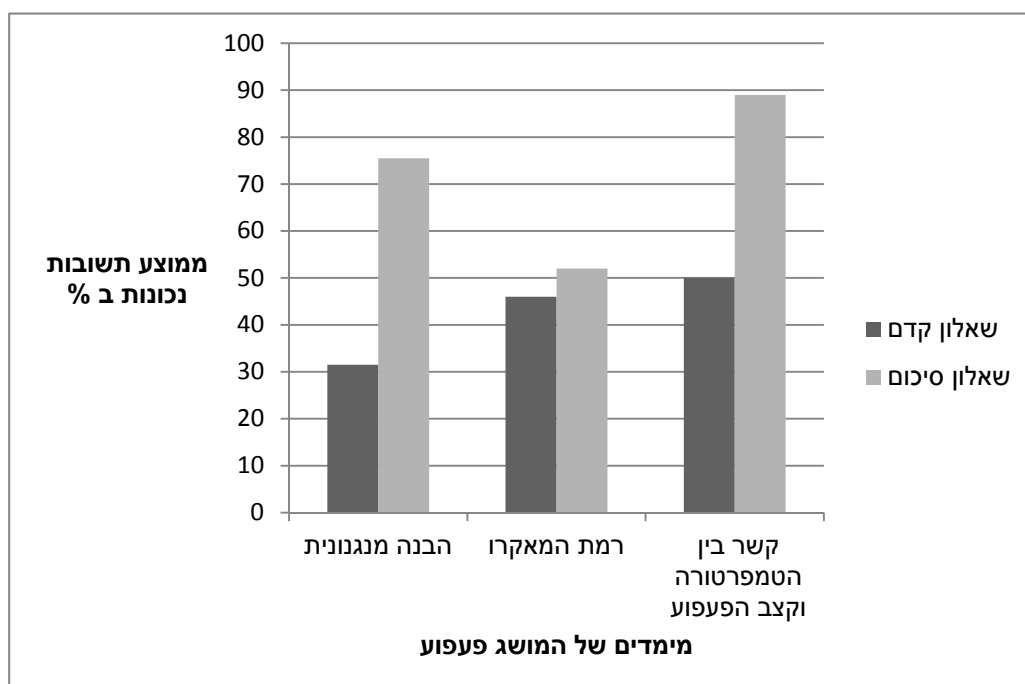
## ממצאי המחקר

ממצאי המחקר מצביעים על שיפור ניכר בהישגי התלמידים לאחר לימוד היחידה ביחס לשיפור מסוים בתכנית המסורתית. שתי הקבוצות דומות בציון הידע שלהן לפני תחילת הניסוי. קבוצת הניסוי שיפרה את הישגיה ב-80% לעומת קבוצת הביקורת ששיפרה את הישגיה ב-28% בלבד. ההבדל בין הקבוצות מובהק ובעל אפקט גבוה ( $p < 0.01$ ). איור 3 מציג את ממוצע ההישגים של קבוצת הניסוי ביחס לקבוצת הביקורת בשאלוני הקדם ושאלוני הסיכום. פיזור הציונים דומה בשתי הקבוצות (ניסוי: קדם, סיכום  $SD=0.5$ . ביקורת: קדם, סיכום  $SD=0.43, 0.49$ ).

שיפור ההישגים נגע לכלל המושגים שנלמדו, בנוסף עבור המושגים – פעפוע, התורה הקינטית וטמפרטורה – בהם יש צורך להבין את רמת המיקרו או לקשר איתה, קיימים פערים גדולים בלמידה לטובת תכנית הניסוי. נמצאו שני צברים המאפיינים שתי תפיסות שונות של מושג הפעפוע. צבר אחד מציג, באופן חלקי, תנועה של חלקיקים (27%) ופיזור אחיד של חלקיקים במרחב (22%), אך אין בו התייחסות לתנועה אקראית של החלקיקים ולאינטראקציות בין שני סוגי החלקיקים ובנוסף קיימת האנשה של החלקיקים. צבר שניים מציג תפיסה אמרגינטית מדעית של מושג הפעפוע. איור 4 מציג את חלקם באחוזים של המשיבים נכונה בשאלוני הקדם והסיכום בשאלות הנוגעות למושג הפעפוע.

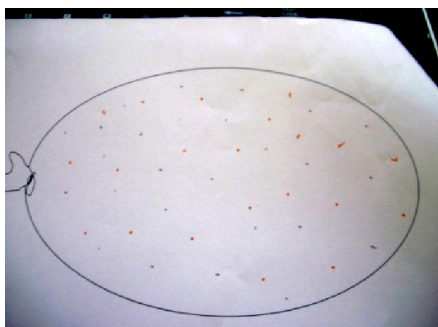


איור 3. ממוצע ציוני השאלונים

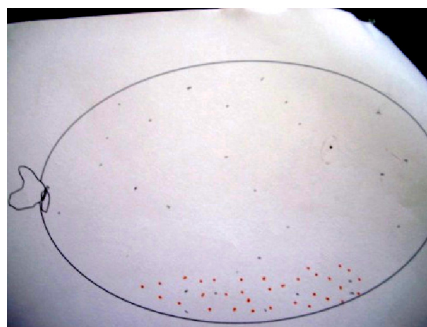


איור 4. אחוז התשובות הנכונות לגבי מימדים הקשורים במושג הפעפוע בקבוצת הניסוי

ניתוח הראיונות תמך בממצאי הניתוח הכמותי, תרם להבנת אופן תפיסת המושגים הנלמדים בצורה מעמיקה יותר בהשוואה לשאלונים ובנוסף תרם לאיתור תפיסות אינטואיטיביות של תלמידים לגבי מבנה החומר. איורים 5 ו-6 מציגים שרטוטים של בושם שרוסס לתוך שקית המנופחת באוויר. השרטוטים צוירו במהלך הראיונות לפני ולאחר לימוד היחידה.



איור 6. שרטוט של בושם בשקית בראיון המסכם (ב')



איור 5. שרטוט של בושם בשקית בראיון הקדם (ב')

## דיון

המחקר הנוכחי עסק בבחינת תרומתה של סביבת למידה מבוססת מודלים ממוחשבים ללימוד המבנה החלקיקי של החומר והתיאוריה הקינטית מולקולארית. הגישה הכללית מאחורי סביבת הלמידה והמחקר בוחנת את התופעות הנלמדות מנקודת מבט מערכתית. זאת מתוך הבנה כי המושגים הנלמדים ביחידה מתייחסים למערכת מורכבת (חומר המורכב מהמוני חלקיקים, אשר התנהגותם שונה מהתנהגותו ברמת המאקרו ואשר התנהגות החומר מתהווה, באופן לא לינארי, מהאינטראקציות שבין החלקיקים). סביבת הלמידה כוללת חקירה של מודלים מבוססי סוכנים במקביל להצגת ניסויים מעבדתיים. ממצאי המחקר מצביעים על שיפור ניכר הן בידע המושגי והן בידע המערכתי של התלמידים לאחר ההתערבות החינוכית. ממצאים אלה תומכים בממצאיהם של Jacobson, (2001); Goldstone ו-Wilensky (2008); Pfeffer ו-Hmelo-Silver (2004), בדבר למידה מתוך גישה מערכתית. בממצאיהם של חוקרים בתחום, בדבר למידת חקר בשילוב מודלים ממוחשבים (Clark & Jorde, 2004; Treagust, Chittleborough & Mamiala, 2003).

ובממצאים בדבר שילוב של השניים (Levy & Wilensky, 2009b; Levy & Wilensky, 2008; Levy,; Wilensky, 2003; Stieff & Wilensky, 2003; Vicsek, 2002). כמו כן ניתן למצוא בממצאים מענה לקשיים רבים המדווחים בספרות המחקרית אודות למידת כימיה בכלל ולמידת המושגים לחץ, פעפוע וטמפרטורה בפרט (Clark & Jorde, 2004). החוקרות סבורות כי תרומת סביבת הלמידה לשיפור ההישגים נעוצה בגישה המערכתית, גישה זו ממקדת את התלמיד ברמת המיקרו ותומכת בהבנה מנגנונית של התופעות הנלמדות: המודלים מאפשרים את הרחבת היכולות הקוגניטיביות של הלומד באמצעות הרצה בו זמנית של מאות סוכנים וצפייה בהתנהגות המערכת הנובעת מתוך האינטראקציות שבין הסוכנים. הניסויים המעבדתיים מאפשרים לעגן את המודלים בתופעות אמיתיות ולתרום לגישור בין רמות המיקרו והמאקרו.

החידוש בעיצוב המחקר הנוכחי ביחס למחקרים קודמים מצוי בהיבטים הבאים של תכנית הלימודים: (1) למידת כימיה בחטיבת ביניים בארץ באמצעות מודלים מבוססי סוכנים בנטלוגו; (2) שילוב של ניסויי מעבדה במקביל לחקירת המודלים; (3) הידע בתכנית נלמד באופן איכותי ולא כמותי; (4) סביבת הלמידה נבחנה ביחס לקבוצת ביקורת שלמדה את הנושא בדרך מסורתית; (5) בדרכי הניתוח שולב ניתוח צברים לבניית מודלים מנטאליים קוהרנטיים של משתתפי המחקר מתוך אוסף גדול של מאפיינים שעלו מתוך הספרות ומתוך ניתוח מעוגן בשדה.

## מקורות

- שקדי, אי (2003). **מילים המנסות לגעת: מחקר איכותני תיאוריה ויישום**. עמודים: 97-155. תל-אביב: רמות.
- Atkins, P. W. (1982). *Physical chemistry* (Second ed.). San Francisco: W.H.Freeman and Company.
- Chi, M. T. H. (2005). Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *The Journal of the Learning Sciences*, 14(2), 161-199.



- Christianson, R., & Fisher, K. (1999). Comparison of student learning about diffusion and osmosis in constructivist and traditional classrooms. *International Journal of Science Education*, 21(6), 687-698.
- Clark, D., & Jorde, D. (2004). Helping students revise disruptive experientially supported ideas about thermodynamics: Computer visualizations and tactile models. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(1), 1-23.
- Clough, E. E., & Driver, R. (1986). A study of consistency in the use of students. *Science Education*, 70(4), 473-496.
- De Jong, T., & van Joolingen, W. R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, 68(2), 179.
- Dori, Y. J., & Hameiri, M. (2003). Multidimensional analysis system for quantitative chemistry problems: Symbol, macro, micro, and process aspects. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(3)
- Goldstone, R. L., & Wilensky, U. (2008). Promoting transfer by grounding complex systems principles. *Journal of the Learning Sciences*, 17(4), 465-516.
- Harrison, A. G., Grayson, D. J., & Treagust, D. F. (1999). Investigating a grade 11 student's evolving conceptions of heat and temperature. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(1), 55-87.
- Hildebrand, J. H.; Powell, R. E. (1965). *Principles of chemistry* (7th ed.). New York: The Macmillan Company.
- Hmelo-Silver, C. E., & Pfeffer, M. G. (2004). Comparing expert and novice understanding of a complex system from the perspective of structures, behaviors, and functions. *Cognitive Science*, 28(1), 127-138.
- Jacobson, M. J. (2001). Problem solving, cognition, and complex systems: Differences between experts and novices. *Complexity*, 6(3), 41-49.
- Johnson, P. Papageorgiou, G. (2010). Rethinking the Introduction of Particle Theory: A Substance-Based Framework. *Journal of Research In Science Teaching*, 47(2), 130-150.
- Levy, S. T., Kim, H., & Wilensky, U. (2004). Connected chemistry-A study of secondary students using agent-based models to learn chemistry. J. Gobert (Chair) and NH Sabelli (Discussant) Modeling Across the Curriculum (MAC): Technology, Pedagogy, Assessment, & Research. the Annual Meeting of the American Educational Research Association, San Diego, CA,
- Levy, S. T., & Wilensky, U. (2008). Inventing a "mid level" to make ends meet: Reasoning between the levels of complexity. *Cognition and Instruction*, 26(1), 47.
- Levy, S. T., & Wilensky, U. (2009a). Crossing levels and representations: The connected chemistry (CC1) curriculum. *Journal of Science Education and Technology*, 18(3), 224-242.
- Levy, S. T., & Wilensky, U. (2009b). Students' learning with the connected chemistry (CC1) curriculum: Navigating the complexities of the particulate world. *Journal of Science Education and Technology*, 18(3), 243-254.
- Lin, H., Cheng, H., & Lawrenz, F. (2000). The assessment of students and teachers' understanding of gas laws. *Journal of Chemical Education*, 77(2), 235-238.
- Nussbaum, J. (1985). The particulate nature of matter in the gaseous phase. *Children's Ideas in Science*, 124.
- Paik, S. H., Cho, B. K., & Go, Y. M. (2007). Korean 4-to 11-year-old student conceptions of heat and temperature. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(2), 284-302.
- Panizzon, D. (2003). Using a cognitive structural model to provide new insights into students understandings of diffusion. *International Journal of Science Education*, 25(12), 1427-1450.
- Rappoport, L., & Ashkenazi, G. (2008). Connecting levels of representation Emergent versus submergent perspective. *International Journal of Science Education*, 30(12), 1585-1603.

- Stieff, M., & Wilensky, U. (2003). Connected Chemistry – Incorporating interactive simulations into the chemistry classroom. *Journal of Science Education and Technology*, 12(3), 285-302.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G., & Mamiala, T. L. (2003). The role of submicroscopic and symbolic representations in chemical explanations. *International Journal of Science Education*, 25(11), 1353-1368.
- van Rens, L., van der Schee, J., & Pilot, A. (2009). Teaching molecular diffusion using an inquiry approach. Diffusion activities in a secondary school inquiry-learning community. *Journal of Chemical Education*, 86, 1437–1441.
- Vicsek, T. (2002). The bigger picture. *Nature*, 418(6894), 131.
- Westbrook, S. L., & Marek, E. A. (1991). A cross-age study of student understanding of the concept of diffusion. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(8), 649–660.
- Wilensky, U. (2003). Statistical mechanics for secondary school: The GasLab multi-agent modeling toolkit. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*, 8(1), 1-41.
- Wilensky, U., & Resnick, M. (1999). Thinking in levels: A dynamic systems approach to making sense of the world. *Journal of Science Education and Technology*, 8(1), 3-19.