

אני, שתיים, שלוש... הרבה! סימולציות שיתופיות ללמידה על מערכות מורכבות¹

שרה ט. לוי

stlevy@construct.haifa.ac.il

המגמה לטכנולוגיות בחינוך, אוניברסיטת חיפה

הבנתן של מערכות מורכבות תופסת תאוצה ב-25 השנים האחרונות, עם פיתוחם של כלים לבניית מודלים מבוסטי-סוכניים (multi-agent models). במקביל, מתקיים פיתוח של סביבות למידה מגוונות, התומכות בלמידה על מערכות מורכבות. במסגרת מאמר זה, נציג סביבת למידה התומכת בלמידה שיתופית ופעילה: סימולציות שיתופיות. מרחיב היכתה משמש כמערכת מורכבת, בה כל תלמיד שולט באחד מן הפרטיהם במערכת. מתוך דיוון, הגדלה והבהרה, התלמידים מתכוונים ניסויים במערכות מורכבות, המתבצעים באמצעות משותף.

במסגרת פעילויות שהתקיימו עם כיתה ו', בת 27 תלמידים בשיקגו, נערכו ראיונות עם עשרה תלמידים, במטרה לברר ולזהות כיצד הם מבינים, מסבירים ומפענחים מערכות מורכבות, כאשר אלה מערכות מוכרות היטב. נמצא כי ככל התלמידים נקטו באסטרטגיית פענוח הכלוכה במבנה ומת ביניים, בין רמת הפטטים לבין רמת כלל המערכת. רמת בינוי זו מאופיינת בבנייה קבוצות קטנות באחת משתי דרכים. בדרך אחת, המערכת נחלקת לקבוצות קטנות, המשמשות כיחידות, תוך התעלמות מרמת הפרט. בדרך שנייה, מספר קטן של פרטיטים נאספים לקבוצה קטנה דרך אינטראקציות מקומיות, תוך התעלמות מכלל המערכת. נמצא מתאם רב בין עומק ההבנה של מערכות מורכבות לבין המהלך בו נבנית רמת הבינויים.

בדיוון, מפורשים הממצאים בהתייחס למחקרים קודמים, ומתואר עיקרונו עיצוב, המשמש בתכנון סביבות למידה נוכחות ועתידיות.

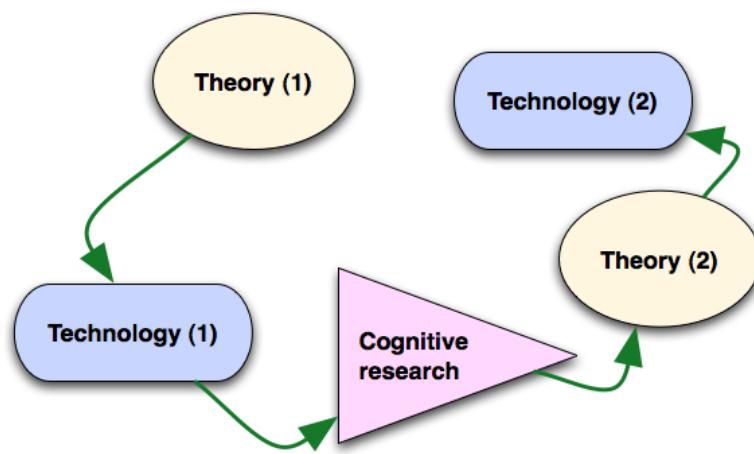
מבוא

ນחשוב לרגע על הביטויים "המשמעות התפשטה כאש בשדה חיטה" ו"אמור לי מי הם חברי ואומר לך מי אתה". בשעה שככל אחד מהם עוסק בתופעה שונה, הם חולקים מספר מאפיינים: הביטויים מתארים מערכות דינמיות, מערכות מיחדים רבים, הפעילים בדרכים מגוונות; כמו כן, הם מציגים התנהגות צפואה מראש. מערכות מסווגות כ"מערכות מולכבות".

במאמר זה (ראו אייר 1), נפתח בתיאוריה על מערכות מורכבות, חשיבות למידתן והידע על הבנתם של תלמידים לגבייהן. מכאן, נפנה לטכנולוגיה, המזמנת ותומכת בלמידה על מערכות מורכבות. יתוואר מחקר קוגניטיבי הבוחן את הבנתם של תלמידים לגבי מערכות מורכבות יומיומיות.ណון בשינויים בתיאוריה הקשורה בהבנת מערכות אלה; ובשינויים שנעשו בטכנולוגיה לאור המחקר.

¹ Levy, S.T., & Wilensky, U. (accepted). Inventing a "mid-level" to make ends meet: Reasoning between the levels of complexity. *Cognition and Instruction*.

איור 1: מסגרת ארגונית של המאמר

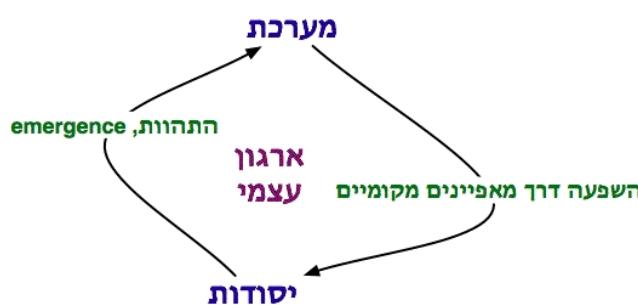


תיאוריה

מערכות מורכבות

גישה "מערכות מורכבות" מאפשרת תיאור, בניה וחקירה של מודלים של מערכות, בהן המונחים "סוכנים" פועלים לפי מספר כלליים פשוטים (ראו איור 2). מתוך פעולות הסוכנים ויחסי הגומלין ביניהם, נובעת התנהגות קולקטיבית מסדר גובה יותר. למרות שאין במערכות אלה בקרה מרכזית, הן מתארגנות-עצמה לדגמים גלובליים קוגהרטטיבים (Holland, 1995; Kauffman, 1995) (emergence²), תהליך שבו התנהגות בעובדה הנוכחית ובתחום המערכות המורכבות, הוא אמרגניטיות (emergence²), השפיע שבו התנהגות קולקטיבית עולה מתוך תכונות הפרטים ויחסי הגומלין ביניהם.

איור 2: מסגרת מושגית לדין במערכות מורכבות



מדוע חשוב ללמידה על מערכות מורכבות?

nymok מרכזיו הוא נוכחותם של מערכות מסווג זה בעולמנו. אנו מוקפים במערכות רבות, טבעיות ומלאכותיות, אותן ניתן לאפיין כמורכבות, כגון מערכות אקולוגיות וכלכליות. יתרה מזאת, בעיות

² תורגם לאחרונה לעברית ל"הപצעה". עם זאת, הכוונת אינה מוצאת מילה זו כנוחה לתקשות.

רבות בעולמנו הן בעלות אופי מערכתי, למשל: אסונות אקולוגיים, השפעות ארכוכות-טווח של מהלכים כלכליים והתפשטותן של מחלות.

nymok שני מקורו במהות תחום הדעת ומחקרים אודוט העברה (transfer) בלמידה. תחום המערכות המורכבות מאפשר את ניתוחן ופענוחן של תופעות, שבאופן מסורתי שייכות לתחומי דעת שונים, באמצעות כלים משותפים. תוכנה זו של תחום הדעת מזמנת למידה שנייה להעbara. עדויות ראשונות תומכות בטענה זו ניתן למצוא במחקריהם של Chi & Goldstone & Sakamoto (2003) וכן Slotta (2006).

nymok תומך הוא "כי אפשר": התפתחות המחשבים מאפשרת כיום את העברתה של חלק מן החשיבה אודות מערכות מסווג זה למחשב. אם מוגלוינו מונעות התמודדות עם מרכיבים רבים הפועלים במקביל ובאנטראקטיבית, היום קיימים מגוון כלים, התומכים במבנה מודלים של מערכות מסווג זה, ובכך מרחיבים את יכולותינו הקוגניטיביות.

הבנותם של תלמידים לגבי מערכות מורכבות

בצד אנו מבינים ומפונחים תופעות אמרגןטיות? האם זהו התחום הבלעדי של מומחים? או, האם בידינו אינטואיציות המסייעת בפונחו ובניבוי תופעות מסווג זה?

קיים גוף מחקרי נרחב, המצביע על קשיים משמעותיים של תלמידים בהסביר ובניבוי תהליכי שינוי בערכות מורכבות. מתוארים מחסומים שונים להבנה: עירוב בין רמות תיאור (Wilensky & Resnick, 1999), הנחת בקרה מרכזית (Resnick & Wilensky, 1993), נטייה לראות סדר כנובע מהתנהגות דטרמיניסטית (Wilensky & Resnick, 1999; Silver & Pfeffer, 2004) מיקוד במבנים ופחות בתפקודים ובמנגנונים (Hmelo-Emerson et al., 2005).³ עם זאת, מחקרים אלה פנו לביאור תופעות, שהן אין לתלמיד נגישות אמרגןטיות (Chi, 2005). עם זאת, מומחים אלה פנו לביאור תופעות, שהן אין לתלמיד נגישות לאחת מرمות התיאור (למשל, רמה מולקולרית בדיפוזיה, אבולוציה המתறחת על-פני סקלת זמן עצומה).

עם זאת, אנו חיים בתחום מערכות מורכבות. צופים ומשתתפים בהן באופן תדי. ניתן לטעון כי למרות הממצאים המחקרים שתוארו, קיימים משבבים קוגניטיביים כשליהם כדי להתמודד איתן. במחקר זה, יצאנו ליבור כיצד אנשים מסבירים ומפונחים מערכות מורכבות מוכרות, בהן קיימת נגישות לרמות התיאור השונות:

1. מה מופיע את חשבותם של תלמידים אודות תופעות אמרגןטיות יומיומיות בהתיחס למינדים, המאפיינים מערכות מורכבות?
2. מצאנו כי בניסיונים להסביר ולהבין תופעות מסווג זה, התלמידים יצרו רמות-ביניים, תיאור של קבועות קטנות. מה מופיע קבועות ביניים אלה?
3. מה הקשר בין הדרכם בה התלמידים יצרו את קבועות רמת-הביניים לבין חשבותם במונחים של מערכות מורכבות?

³ יחד עם הקשיים המתוארים, חוקרים אלה מ担忧ים על הצלחות תלמידים בלמידה על מערכות מורכבות באמצעות סביבות למידה מתאימות.

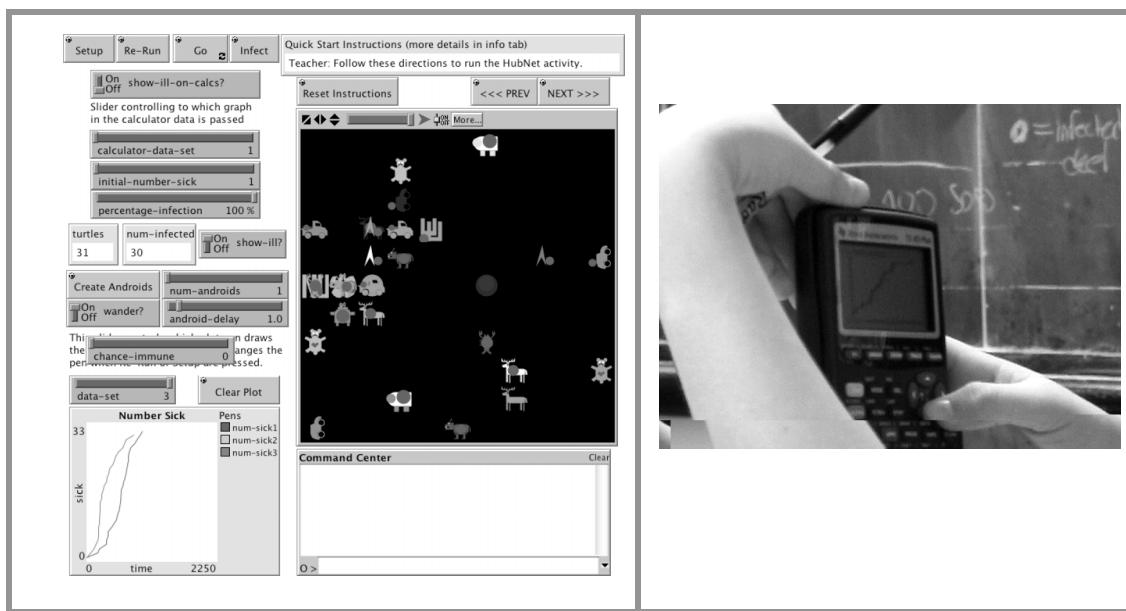
טכנולוגיה

אנו משתמשים בנטלווגו (Wilensky, 1999), שפה לבניית מודלים ובי-מרכיבים לעיצוב סביבות למידה מגוונות: דרך של **בנייה מודלים** (Wilensky & Reisman, 2006), **חקירת מודלים** (Levy & Wilensky, 2006) או **השתתפות במודלים** (Wilensky & Stroup, 1999).⁴ בהצגה זו, אנו מתמקדים בסביבות למידה מן הסוג האחרון, **סימולציות שיתופיות** (HubNet; Wilensky & Stroup, 1999).

בסימולציה שיתופית (ראו איור 3), הכתיבה עצמה היא מערכת מורכבת. כל תלמיד מפעיל סוכן יחיד באמצעות מחשב או מחשבון. מחשב המורה משמש להרצאת הסימולציה, מתפקיד כשרת ומציג את כל השותפים לסימולציה במרחב משותף.

לדוגמה, בסימולציה של "מחלה", כל תלמיד הוא פרט באוכולוסיה. כל הפרטים נעים למרחב המשותף. אחד הפרטים נדבק במחלה. כל מפגש בין חולה לבריא עשוי להניב הדבקה. התקדמות המחלה באוכולוסיה היא בעלת צורה קבועה, העוקמה הלוגיסטיבית, המבטאת גדילה מבוקרת-משאבים.

איור 3: סביבת הלמידה של סימולציות שיתופיות – כל תלמיד מפעיל את הנציג ("סוכן") שלו בסימולציה באמצעות מחשבון גרפי (ימין); כל הכתיבה פועלת למרחב הסימולציה (שמאל).



סביבת למידה זו מנצלת את הזדהותם של התלמידים עם הנציג שלהם בסימולציה, יחד עם היותם פעילים למרחב המשותף בדרך משחיקת, לצורך השגת מעורבות עמויקה. במחקר שיתורא להלן, שימושה פעילות זו למידה במסגרת שיעור מדעים. התלמידים יזמו ניסויים מגוונים, כגון "מה קורה כאשר לא יודעים מי חולה?"; "כיצד ניתן לגרום להתיישר?". מהלכה של הריצה כללת הצעה של ניסויים על-ידי התלמידים, שכנוו חברותם עד לקבלת הסכמה כתיתית, תכנון מפורט של אופן ביצוע הניסוי, הרצת הסימולציה ודיוון בתוצאותיו.

⁴ אלה הן דוגמאות בלבד. קיימים מגוון עשיר של דוחות מחקר ומקורות נוספים בדבר סביבות למידה אלה, <http://ccl.northwestern.edu/papers>

שיטת המחקר

אוכלוסיה

המחקר נערך בשיקגו, ארה"ב, בחטיבת-ביניים, בה תלמידים מגוון מקורות אתניים. מתוכם, 25.4% בעלי מגבלה בידיעת אנגלית, ו-62.7% משפחות בעלות הכנסתה נמוכה.

הסימולציות התקיימו בכיתה ו', עם 27 תלמידים. מתוך הкласс, נבחרו עשרה תלמידים בדגימת שכבות אקלטאיות (לפי רמה אקדמית ומגדר), לצורך ראיון.

כלי המחקר

פותח פרוטוקול ראיון. הפרוטוקול כלל ארבעה פריטים, ובهم שאלות המתייחסות לפרטים, לכל המרכיבים בינויהם. בהצגה, נתקדם בפריט אחד הקרוי "התפזרות". חלק זה נעשה ללא מחשב ומתבסס על תיאורים והסבירים מילוליים, יחד עם שימוש במושגים וציורים כדי לייצג את השינויים במערכות. לתלמידים הוצע התיחסש הבא: "בתחילה שיעור התעמלות, התלמידים עומדים בקבוצה ומדוברים ביניהם. המורה אומר לתלמידים להתפזר על-מנת שיוכלו להתעמל. מה קורה?"

תופעת ההתפזרות אינה מכונה מלמעלה. התלמידים מתרחקים זה מזה כדי להגיע למרחב אישי מספק. במבט מלמעלה, ניתן לראות התכזיות במהלך ההתפזרות; מסלולי הפרטים המבטים התרחקות מרכיבים מקומיים (Wilensky, Levy et al, 2003). לפיכך, מערכת זו היא מורכבת, ומציגה תופעות מפתיעות.

הליך המחקר

הפעילות נערכו במשך ארבעה חודשים. במסגרת ההצגה, נתייחס לסימולציה הראשונה בה השתתפו התלמידים, הקרוי "מחלה", ושטווארה במבוא. שני הראיונות נערכו עם התלמידים באופן יחידני במהלך סדרת הפעולות. אלו מתמקדים בראיון הראשון. הראיונות צולמו בוידיאו, ותומלו ונערך ניתוח תוכן.

תוצאות וניתוח

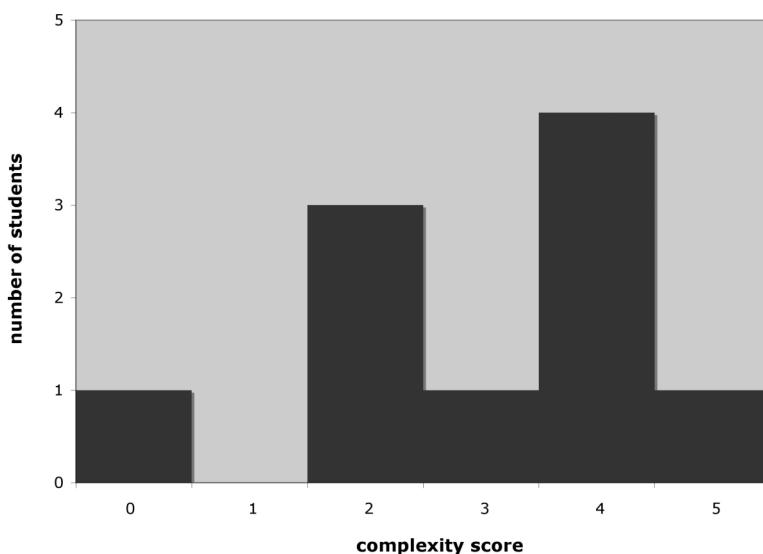
מה מאפיין את השיבתם של תלמידים אודוטות תופעות אמרגנטיות יומיומיות בהתייחס למינדים המאפיינים מערכות מורכבות?

לצורך תיאור חשיבותם של התלמידים, השתמשנו במינדים הבאים, תוך התבוסות על מחקרו של ג'ייקובסון (2001). בין המינדים ששימושו אותו לאפיון הבנת מערכות מורכבות, בחרנו באלה שבינויהם מתאימים, ושווים מוחנים בין טירונים לבין מומחים. הוספנו מידע אחד, אבחנה בין רמות תיאור (Wilensky & Resnick, 1999):

1. אבחנה בין רמות תיאור: תיאור המפרט וככל המערכת נעשה בעוזרת מאפיינים ותהליכיים שונים.
2. בקרה מבוצרת: הקבוצה מתנהלת מתוך החלטות הפרטים שבה, ללא הכוונה מרכזית.
3. אי-זודאות: אין ברמת הפרט והן ברמת האוכלוסייה, לא ניתן לנבא מראש את ההתפתחות הספציפית בזמן מאוחר והתהליכים הם סטוכסטיים.
4. תהליכי אקוויילברציה: במערכות קיימים תהליכיים מקומיים דינמיים העשויים להביא אותה למצב של שיווי-משקל (динامي או סטטי).
5. פועלות קטנות-השפעות גדולות: ייצנו השפעות כלל-מערכות לתופעות מקומיות.

הריאוונות נותחו בהתייחס למינדים אלה, כאשר מידת ההבנה של מערכות מורכבות מיוצגת כמספר המינדים שבאו לידי ביטוי בהסבר התלמיד.

איור 4: מימי ממערכות מורכבות הבאות לידי ביטוי בתיאורי התלמידים



נמצא כי סדרת המינדים לעיל היא מקוונת. ככלומר, תלמיד שביטא תהליכי אקווליברנציה, הדגים גם את שלושת המינדים הראשונים.

ניתן לראות (ראו איור 4) התפלגות בי-מודאלית, שתי קבוצות מובחנות: תלמידים שהביעו מספר קטן של עקרונות הקשורים במערכות מורכבות, ותלמידים שביטאו הינה עמוKA יותר.

מצאנו כי בניסיונים להסביר ולהבין תופעות מסווג זה, התלמידים יצרו רמות-ביניים, תיאור של קבוצות קטנות.

במהלך ניתוח הריאוונות, נתגלה הדבר הבא: התלמידים המציאו רמת תיאור נוספת, "רמת-ביניים", קבוצות קטנות של תלמידים - רמת תיאור שהוא בין תיאור התלמידים כפרטים, לבין תיאור אוכלוסיית הכיתה כולה. חלקם פירק את הקבוצה הגדולה לקבוצות קטנות וטיפל בקבוצות הקטנות כאלו היו יחידה, תוך התעלמות מן הפרטים בתוכה. לדוגמה, סם מחלק את הכיתה המתפזרת לאربع שורות, ומציין כל שורה כקו. לאחר מכן, הוא מסמן חצים על-גביו הציר כדי לתאר את תנועתה של כל שורה. אין כאן התיחסות לתלמידים הבודדים. חלק אחר התייחס לקבוצה קטנה יותר של פרטים, תוך הסבר הדגמים בקבוצה כnobעים מrone אינטראקטיות בין הפרטים, תוך התעלמות מן המערכת כולה. לדוגמה, ריצ'ל מתארת את התפזרותה של הכיתה כאשר התלמידים מתרחקים זה מזו. תוך כדי תהליך זה, היא מתארת התקשרות של התלמידים זה לזה, כתוצאה לכך שאינם יודעים لأن עמייתיהם יגעו. דבר זה גורם לייצרתם של צברים של תלמידים.

מה מאפיין קבוצות ביניים אלה?

נבחנו הממדים הבאים:

1. כל אחד מן התלמידים בנה "רמת-ביניים". מספר סוגים רמות-הביניים שבנו התלמידים הוא $M = 1.6, SD = 0.7$.
2. מבין 16 התיאורים (ראו איור 5), שניתנו על-ידי כל התלמידים, תשעה פירקו את הקבוצה הגדולה לתת-קבוצות, בשעה שבעה בנו את הקבוצות היחידים. פרט לתלמיד אחט, התלמידים נקטו רק באחת מהגישות.

איור 5: סוג התיאורים של קבוצות רמות הביניים



3. מספר תת-הקבוצות בקבוצה הגדולה, או מספר הפרטים בקבוצה קטנה מצוי בטוחה צר של 5–2: $M=3.3, SD=1.6$.
4. רמת-הביניים נבחנה ביחס לכל ההסבר, כדי לעמוד על הכרחיותה. מבין 16 תיאורים, 12 רמות-ביניים היו חלק הכרחי מליבת ההסבר.

מה הקשר בין הדרך בה התלמידים יצרו את קבוצות רמת-הביניים לבין חשיבותם במונחים של מערכות מורכבות? השאלה בין אופן בניית רמת-הביניים (שאלה 2, סעיף 2) לבין הבנת מערכות מורכבות (שאלה 1).

נמצא מתאם חזק בין השניים: תלמידים שפירקו את הקבוצה הגדולה לתת-קבוצות ביטאו פחות עקרונות של מערכות מורכבות. תלמידים שבנו קבוצה קטנה מאיינטראקטיות בין פרטים ביטאו יותר עקרונות של מערכות מורכבות. מקדם המתאים של ספירמן של $r_s=.808, p<.05$.

דיון

פתחנו בהצגת ביטויים כגון "המשמעות החפשטה כאשר בשדה חייה", המתארים מערכות מורכבות. שאלנו שאלות בדבר ידע ספונטני של אנשים בהבנת תופעות מסווג זה, כאשר הן מוכנות יומיומיות. כעת, אנו פונים חוזרת לתיאוריה ולטכנולוגיה כדי לבחון את תרומת המחקר.

תיאוריה

בניגוד למחקרים קודמים, המUIDים על קשיים בהבנתן של מערכות מורכבות, מצאו שabitנים מתאימים, חלק מהתלמידים השתמשו בעקרונות גישת מערכות מורכבות כדי להסביר תופעות אמרג'נטיות. הם זיהו תופעות כגון הצברות מקומית על רקע פיזור הקבוצה, וمسلمלים אישיים התלויים בERICזים מקומיים. כך, על-ידי פניה למערכות יומיומיות, ניתן לראות כי כחץ מן התלמידים היטיב לבטא רעיונות כגון אי-ודאות ביחס לאבולוציה של המערכת ותהליכי אקוואיליברציה. בצירוף בין מוכנות המערכת, ונגישות לשתי רמות התיאור, הדגימו התלמידים יכולות חשיבה מתקדמות יותר.

בנוסף, גילינו אסטרטגייה נפוצה בה הם משתמשים לצורך פענוח מערכות מורכבות: **במיות רמת-ביניים**. סימולציה של המערכת ברמת-הבנייה מקטינה את מספר העצמים עליהם מתבצעות מניפולציות מנטאליות ומקרה על העומס הקוגניטיבי. רמות-ביניים אלה מאפשרות בחינה של האינטראקציות במערכת ובת-מרכיבים במידדים אפשריים לקוגניציה האנושית. כך, תלמידים בכיתה ו', מסוגלים לטפל במערכת חברתית דינמית, כאשר יש להם נגישות לרמת הפרט (אני), רמת-הבנייה (אני, שניים, שלישי) והכל (הרביה).

נמצא כי התלמידים בנו את רמות-הבנייה בשתי אסטרטגיות שונות הקשורות לעומק הבנתם לגבי מערכות מורכבות - **בגישה up-bottom**, הם נטו לחשב על המערכת במונחים של אינטראקציות מקומיות שמהן נוצרת התנהלות קולקטיבית של המערכת; **בגישה top-down**, פירוק המערכת לתת-מערכות, הם נטו פחות לנתח את המערכת אמרג'נטית. כך, ניתן לראות, מצד אחד כי שתי הגישות משלימות זו את זו להבנה שלמה של המערכת; ומצד שני, מודגשת עדיפות הגישה של מודלים מבוסטי-סוכניים להבנהعمוקה יותר.

טכנולוגיה

מתוך המחקר, יצרנו עיקרון עיצוב מרכזי בסביבות למידה המשמשות למידה על מערכות מורכבות: **אפשרות רמת-ביניים בחקירת המערכת**. האפשרות להתמקד בפרטים מעתים מבין ההמון הפכה לחלק מסביבות הלמידה שפותחו בעקבות המחקר, אשר יתוארו במסגרת ההציג.

ביבליוגרפיה

- Chi, M.T.H. (2005). *Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust*. *Journal of the Learning Sciences*, 14(2), 161-199.
- 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, 127-138.
- Holland, J. (1995). Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. Cambridge, MA: Helix Books/Addison-Wesley.
- Jacobson, M. J. (2001). Problem solving, cognition, and complex systems: Differences between experts and novices. *Complexity*, 6(3), 41-49.
- Kauffman, S. (1995). At home in the universe: The search for the laws of self-organization and complexity. Oxford, NY: Oxford University Press.
- Levy, S.T., & Wilensky, U. (2006). Emerging knowledge through an emergent perspective: High-school students' inquiry, exploration and learning in Connected Chemistry. Paper presented at the annual meeting of the American Educational Research Association, San-Francisco, April 7-11, 2006.
- Slotta, J.D., & Chi, M.T.H (2006). Helping students understand challenging topics in science through ontology training. *Cognition and Instruction*, 24(2), 261-289.
- Wilensky, U. (1999b). NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>.
- Wilensky, U., & Reisman, K. (2006). Thinking Like a Wolf, a Sheep or a Firefly: Learning Biology through Constructing and Testing Computational Theories -- an Embodied Modeling Approach. *Cognition & Instruction*, 24(2), pp. 171-209.
- Wilensky, U., & Resnick, M. (1999). Thinking in levels: A dynamic systems perspective to making sense of the world. *Journal of Science Education and Technology*, 8(1), 3-19.
- Wilensky, U., & Stroup, W. (1999). Learning through participatory simulations: Network-based design for systems learning in classrooms. Paper presented at Computer Supported Collaborative Learning (CSCL'99). Stanford, CA, December 12 - 15.
- Wilensky, U., & Stroup, W. (1999e). Partipatory Simulations. The project was funded by an NSF ROLE Grant no. REC - 9814682
- Wilensky, U., Levy, S. T., Abrahamson, D., Levy, S., & Bezold, S. (2003). *NetLogo Scatter model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Scatter>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.