

למידת מכניקה תוך כדי התנסות חושית בסביבה ממוחשבת

מרים ריינר

miriamr@tx.technion.ac.il

המחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים, הטכניון,
מכון טכנולוגי לישראל

גלית בוצר

botzer@construct.haifa.ac.il

המכון לחקר אלטרנטיבות בחינוך, הפקולטה לחינוך,
אוניברסיטת חיפה

המחקר עוסק בתהליכי למידה שחוו תלמידי חטיבת ביניים, תוך כדי התנסות חושית בהפעלה וחקירה של סימולציות ממוחשבות במכניקה. הלמידה התרחשה בסביבה ממוחשבת ייחודית המאפשרת למשתמש להפעיל כוחות על עצמים וירטואליים ולחוש כוחות באמצעות ג'ויסטיק עם ממשק כוח. מטרת המחקר היא לזהות ולאפיין תהליכים של בניית משמעות פיסיקלית המתרחשים תוך כדי התנסות חושית ויזואלית וכוחית ולבחון את התפקיד של הפעולות המוטוריות ותחושת הכוח בבניית משמעות פיסיקלית לקלט חושי. המשתתפים בצעו שלוש פעילויות למידה שכללו ייצוג של מצבים מכניים, חקירה של פרמטרים פיסיקליים ופתרון בעיות ניבוי. הנתונים שנאספו כללו תרשימים, תשובות כתובות ופרוטוקולים מצילום וידאו של השיח ותנועות ידיים ציוריות. הנתונים נותחו אינדוקטיבית משלושה היבטים: דפוסי ההתנהגות של המשתתפים, המנגנונים הקוגניטיביים בהם השתמשו והמושגים והרעיונות הפיסיקליים שבטאו. ממצאי המחקר מצביעים על העוצמה של למידה תוך כדי התנסות חושית. המשתתפים לא השתמשו כמעט במושגים או חוקים פיסיקליים פורמליים ובכל זאת הצליחו לייצג עקרונות פעולה של מערכות פיסיקליות מורכבות למדי. תחושת הכוח תרמה לייצוג מצבים פיסיקליים וסייעה לאפיון פרמטרים פיסיקליים ולפתרון בעיות. ממצאי המחקר מצביעים על הפוטנציאל הלימודי הטמון בסביבות ממוחשבות עם ממשק כוח, ומציעים קווים מנחים לפיתוח סימולציות נוספות עם ממשק כוח ופעילויות למידה שיגשרו בין הפיסיקה הפורמלית וההתנסות החושית.

מבוא ורקע לבעיית המחקר

מחקר זה מתמקד בתהליכי למידה שחוו תלמידי חטיבת ביניים שפתרו בעיות בסביבה ממוחשבת ייחודית המשלבת ממשק כוח. בסביבה זו היא התלמיד יכול לבצע פעולות על סימולציה ממוחשבת, המדמה מערכת מכנית, על ידי הפעלה של ג'ויסטיק. הג'ויסטיק כולל ממשק כוח (Haptic interface), כך שהמשתמש מרגיש כוחות על היד בהתאם לפעולות שהוא מבצע ובמקביל הוא צופה בתהליכים הפיסיקליים המתרחשים על המסך. סביבת הלמידה מוצגת בתרשים 1. המסגרת התיאורטית העומדת בבסיס המחקר, נשענת על מחקר בתחום ה־embodied cognition המעלה את הטענה כי להתנסות חושית עם הסביבה יש תפקיד מרכזי בהבניית ידע (Lakoff and Nunez 2000; Wilson 2002). רכישת מיומנויות מוטוריות מערבות זכירה של רמזים חושיים. כך למשל הידע של מנתחים מתואר לעיתים כ"ידע דרך הידיים" הנרכש תוך כדי התנסות ונשמר בזיכרון לצורך פרשנות ופעולה עתידיים (Reiner 2004). להתנסות חושית יש תרומה לא רק ללמידה מוטורית אלא גם להבנה והפשטה של מצבים פיסיקליים (Reiner 2004). וילסון (Wilson 2002) מדגישה כי תפקודים קוגניטיביים כגון זיכרון קצר טווח וארוך טווח, תהליכים של הדמיה מנטלית ופתרון בעיות כולם נשענים על ידע המעוגן בגוף. מחקרים חינוכיים שבחנו למידה בסביבות ממוחשבות המאפשרות התנסות חושית, הראו כי תלמידים בנו משמעות לייצוגים סימבוליים כגון גרפים של תנועה (Arzarello and Robutti 2002) כוחות (Roth and Lawless 2001) ואפילו מושגים מופשטים כגון שדות (Reiner 1999), על בסיס התנסות חושית. עם זאת

ניתוח מדוקדק של המעבר בין ההתנסויות החושיות למושגים וסמלים פורמליים עדין חסר. זיהוי ואפיון התהליכים הקוגניטיביים המעורבים במעבר שבין ההתנסות החושית של התלמידים לבין בניית ייצוגים פורמליים והמשגה של ההתנסות שחוו הם המוקד של מחקר זה.

איור 1: סביבה ממוחשבת המשלבת ממשק כוח: הסימולציה מדמה כדור (העיגול הבהיר) ומטקה גמישה (הקו הלבן) הנשלט באמצעות הג'ויסטיק. כאשר מרימים את הכדור, מרגישים כוח נגדי ורואים את המטקה נמתחת



מטרות המחקר

למחקר שתי מטרות עיקריות:

1. לזהות ולאפיין תהליכי המשגה המתרחשים במהלך פעילות למידה, הכוללת התנסות חושית ויזואלית וכוחית עם סימולציות במכניקה
2. לבחון את התפקיד של הפעולות המוטוריות ותחושת הכוח בתהליכי המשגה

ממטרות אילו נגזרות שאלות המחקר

1. מהם המאפיינים של תהליכי המשגה המתרחשים במהלך פעילות הלמידה בהיבטים הבאים:
 - א. מהם דפוסי ההתנהגות של התלמידים?
 - ב. באילו מנגנונים קוגניטיביים משתמשים התלמידים?
 - ג. אילו מושגים ורעיונות פיסיקליים מבטאים התלמידים?
2. כיצד מתפתחים המאפיינים של תהליכי המשגה לאורך פעילות הלמידה ?
3. מהי התרומה של תחושת הכוח לתהליך הבנייה של משמעות פיסיקלית

מהלך המחקר

סביבת הלמידה

הסביבה הממוחשבת¹ מאפשרת לעבוד בשלוש תצוגות: תצוגת כוח (מסך כבוי ותחושת כוח דרך הג'ויסטיק), תצוגה ויזואלית (המנוע של הג'ויסטיק כבוי כך שניתן לנוע על פני המסך ללא תחושת כוח) ותצוגה משולבת (ויזואלית-כוחית).

¹ ממשק הכוח הוא ג'ויסטיק Impulse Engine 2000 של חברת Immersion
http://www.immersion.com/industrial/products/impulse_engine2000.php

סימולציות כללו סימולציה סטטית המדמה עצמים בעלי מאפיינים פיסיקליים שונים. סימולציה דינמית המדמה הקפצת כדור על ידי מטקה גמישה וסימולציה דינמית המדמה כדור הנע על משטח מתנדנד. הסימולציות הדינמיות מאפשרות שליטה בפרמטרים הפיסיקליים מסה, קבוע גרביטציה וקבוע האלסטיות.

הגישה המחקרית שנבחרה לביצוע מחקר זה היא הגישה האתנוגרפית. זאת במטרה לאפיין תהליכי למידה מורכבים, תוך התייחסות להקשר של הקלט החושי שחוו התלמידים. המחקר כולל תשעה חקרי מקרה. כל חקר מקרה מתמקד בתהליך הביצוע של פעילות למידה, על ידי זוג תלמידי חטיבת ביניים. התלמידים התנדבו להשתתף במחקר במסגרת לא פורמלית במהלך חופשת הקיץ ולא היה להם רקע פורמלי בפיסיקה.

פעילות הלמידה כללה שלושה חלקים. בחלק הראשון התלמידים התבקשו לייצג שלוש סימולציות, תחילה באופן חופשי ובהמשך באמצעות סכמת כוחות. החלק השני כלל חקירה של הפרמטרים הפיסיקליים והחלק השלישי כלל בעיות ניבוי. התלמידים התבקשו לענות על שאלות בנוסח "מה יקרה אם...". למשל כיצד ינוע הכדור בסימולציה המדמה כדור מתגלגל על משטח אם מקטינים או מגדילים את המסה. לאחר מכן הם יכלו לצפות בהתנהגות הסימולציה ולבחון את ההשערה שלהם. שלושה זוגות עבדו בתצוגת כוח. תלמידים אילו בצעו את מטלות הייצוג בלבד, משך ביצוע הפעילות היה כשעה-שעה וחצי. שלושה זוגות עבדו בתצוגה ויזואלית ושלושה זוגות עבדו בתצוגה משולבת. משך הפעילות בתצוגות אילו היה כשש שעות, שנפרשו על שלושה מפגשים.

איסוף הנתונים בוצע באמצעות תצפית בעת שפעילות הלמידה. נאספו דפי הפעילות שכללו תרשימים ותשובות בכתב. פעולות התלמידים ובכלל זה תנועות הידיים תועדו בווידיאו. בנוסף בוצע רישום ביומן החוקר, לצורך תיעוד התנהגויות שאינן נקלטות על ידי המצלמה (למשל מהלך שרטוט התרשימים). בתום הפעילות בוצעו ראיונות קצרים, המבוססים על התצפיות ונועדו להשלמת הנתונים ותיקופם.

ניתוח הנתונים בוצע באופן אינדוקטיבי, תוך שימוש בעקרונות של בניית תיאוריה המעוגנת בשדה (Strauss & Corbin 1998), במטרה לאפיין את תהליכי ההמשגה. הנתונים נותחו באופן ספירלי בהתאם לשאלות המחקר: א. ניתוח תיאורי של דפוסי התנהגות ב. ניתוח פרשני של מנגנונים קוגניטיביים ג. ניתוח תוכן של ייצוגים של מושגים ורעיונות פיסיקליים. קטגוריות הניתוח תוקפו בעזרת שני חוקרים מתחום הוראת המדעים. לאחר זיהוי המאפיינים, בוצע ניתוח אורכי על פני שלוש פעילויות הלמידה כדי לזהות דפוסי התפתחות של מאפיינים אילו וניתוח רוחבי על פני שלוש תצוגות של הסימולציה כדי לבחון את התרומה של תחושת הכוח לבניית משמעות פיסיקלית.

ממצאים


מאפיינים של תהליכי ההמשגה

דפוסי התנהגות: זוהו חמישה דפוסי התנהגות: עידון תנועה מוטורית, זיהוי מידי של משמעות ראשונית, עיבוד קלט חושי, חשיפה מכוונת של קלט חושי ועידון המשמעות הראשונית. ארבעת הדפוסים הראשונים כוללים תנועת היד עם הג'ויסטיק שבעקבותיה השתמשו התלמידים בייצוגים מילוליים.

מנגנונים קוגניטיביים: התלמידים שיתפו זה את זה באינפורמציה חושית שחוו כדי לבנות ייצוגים משותפים ולנמק משמעות שבנו. הם השתמשו באופן ספונטני במרכיבים של חקר מדעי כמו העלאת השערות, תכנון וביצוע מדידות וניסוח חוקים. בנוסף הם השתמשו בהדמיה מנטלית של כוחות ותנועה כדי לייצג מצבים פיסיקליים ולפתור בעיות. הדוגמא הבאה מציגה שימוש בהדמיה מנטלית:

גילי וענת, שעבדו בתצוגה משולבת מתמודדות עם בעיית ניבוי: לאחר שבשלים קודמים של הלמידה הם חקרו את קבוע האלסטיות של המטקה המקפצה את הכדור, כעת הן מתמודדות עם בעיית ניבוי במצב חדש וצריכות לענות: מה יקרה אם יגדילו או יקטינו את קבוע האלסטיות של המשטח בסימולציה 'כדור מתגלגל על משטח'?

גילי: קבוע האלסטיות גדל אז הגומי נמתח יותר
 ענת: לא ב-S גדול הגומי נמתח פחות... את לא זוכרת באפס הגומי נמתח בלי סוף
 גילי: אז ב-S קטן המשטח יהיה ככה *מציירת את המטקה* *מציירת את המטקה*
 ענת: *מציירת את המטקה* *מציירת את המטקה* *מציירת את המטקה* *מציירת את המטקה* *מציירת את המטקה*
 ואי אפשר יהיה להכניס אותו למטרה



תצוגה משולבת, בעיות ניבוי, קבוצה מס' 3, שורות 1-6

ענת משתמשת בדימוי שנגזר מהתנסות חושית שחוותה, כאשר אפיינה את קבוע האלסטיות בסימולציה 'כדור קופץ'. היא מתייחסת להתנהגות הסימולציה 'כדור קופץ' בקבוע אלסטיות אפס. הדימוי של צורת המטקה משתקף במלל, בתרשים ובתנועת היד שגילי מתווה באוויר צורה קעורה. השימוש בדימויים מנטליים מאפשר לענת וגילי לייצג את תנועת הכדור והכוחות שיש להפעיל במצב פיסיקלי לא מוכר.

ייצוגים של מושגים ורעיונות פיסיקליים. בצד רעיונות המתנגשים עם הפיסיקה הפורמלית בטאו התלמידים באופן ספונטני גם רעיונות המתקרבים לפיסיקה המוסכמת. ניתוח המבנה של הייצוגים שבנו התלמידים חשף שלושה אופנים של ייצוגים: *ייצוג ראשוני* המתייחס לייצוג של מאפיין כלשהו של המצב הפיסיקלי, ללא התייחסות להקשר של התופעה בכללותה, *ייצוג מקשר* המשקף קשר בין שני גורמים או יותר הקשורים בתופעה הפיסיקלית ו*ייצוג מסביר* המשקף תפיסה של התלמידים לגבי הסיבה בגללה מתרחשים התהליכים הפיסיקליים.

התפתחות תהליכי ההמשגה לאורך פעילות הלמידה: המאפיינים של תהליכי ההמשגה התפתחו במהלך פעילות הלמידה: ביצוע פעולות מוטוריות בשלבים הראשונים של הלמידה אפשר בניית משמעות ראשונית ששימשה בסיס לחשיפה מכוונת של קלט חושי ועידון המשמעות בהמשך. הייצוגים שבנו התלמידים הלכו ונעשו מורכבים יותר: מייצוגים ראשוניים שהיו שכיחים יותר בתחילת הפעילות, דרך ייצוגים מקשרים ועד ייצוגים מסבירים שהיו שכיחים יותר בהמשך. במהלך פעילות הלמידה התלמידים השתמשו יותר ויותר בדימויים מנטליים שנבנו בשלב מטלות הייצוג כדי לאפיין פרמטרים פיסיקליים ולפתור בעיות ניבוי.

התרומה של תחושת הכוח לבניית המשמעות: התלמידים הצליחו לבנות משמעות פיסיקלית על בסיס תחושת כוח בלבד, מבלי לראות את העצמים. בנוסף קיים יתרון לעבודה בתצוגה משולבת על פני עבודה בתצוגה ויזואלית. בתצוגה משולבת התלמידים בנו ייצוגים עשירים יותר שכללו לרוב סכמה מפורטת של כוחות, הבחינו ביתר קלות בין פרמטרים פיסיקליים ופתרו בעיות בצורה טובה יותר. תלמידים שעבדו בתצוגה ויזואלית טענו לעיתים כי המצב "לא אמיתי" (למשל כיוון קפיץ מבלי להרגיש כוח נגדי). הבדלים אילו מצביעים על כך שלתחושת הכוח יש תפקיד מרכזי בבניית משמעות פיסיקלית.

סיכום דין והשלכות

מטרות המחקר היו לזהות ולאפיין תהליכי המשגה המתרחשים תוך כדי התנסות חושית ויזואלית וכוחית בסביבה ממוחשבת ולבחון את התפקיד של הפעולות המוטוריות ותחושת הכוח בבניית משמעות פיסיקלית לקלט חושי.

לתנועה המוטורית ולתחושת הכוח היה תפקיד מרכזי בתהליך ההמשגה: התלמידים למדו את אופן הפעולה של המערכת הפיסיקלית דרך תנועות הידיים. למידה זו שימשה בסיס לביצוע תנועות מכוונות שאפשרו חשיפה של אינפורמציה חושית נוספת ועידון של המשמעות הפיסיקלית. ניתן אולי לייחס את השימוש הנרחב בתנועות הידיים לגילם הצעיר של התלמידים ולאופי הקונקרטי של חשיבתם, ברוח התיאוריה ההתפתחותית של פיאז'ה (Piaget 1954). אולם קלמנט (Clement 1994) מביא עדויות לכך שגם פיסיקאים מומחים משתמשים בפעולות מוטוריות או דימויים של פעולות מוטוריות כדי לפתור בעיות פיסיקליות לא מוכרות. שוורץ (Schwartz 1999) מסביר את החשיבות של פעולות פיסיקליות בכך שהתנועה המוטורית כרוכה בהבנה של מאפיינים פיסיקליים. מתרחש תהליך מעגלי: התנועה מספקת קלט חושי המאפשר בניית משמעות פיסיקלית והמשמעות הפיסיקלית מאפשרת תנועה יעילה (Reiner 2004).

השלכות על פיתוח סימולציות ממוחשבות המשלבות התנסות חושית: האפשרות לבצע פעולות פיסיקליות על מערכת פיסיקלית סיפקה לתלמידים הזדמנות להתנסות חושית במצבים פיסיקליים שלא ניתן לחוות במציאות ואף לא במעבדה פיסיקלית סטנדרטית. התלמידים צפו בנפילה בקבוע גרביטציה קטן מאוד או הניעו עצם על משטח חסר חיכוך. במחקר זה האינטראקציה עם המערכת הוירטואלית התאפשרה הודות לממשק כוח משוכלל ורגיש למדי. העלות הגבוהה של החומרה עלולה למנוע שילוב למידה בעזרת סימולציות עם ממשק כוח בבתי הספר. ניתן לאפשר פעולות פיסיקליות על מערכת פיסיקלית וירטואלית עם ממשקים פשוטים (וזולים) יותר. ויליאמס ועמיתיו (Williams et al 2003) מתארים פרויקט שכלל פיתוח סימולציות פיסיקליות, המתאימות לג'ויסטיק, בעלות נמוכה יחסית, כאשר התוכנה הייתה זמינה לבתי הספר שהשתתפו בפרוייקט ברשת.

לסיכום: ממצאי המחקר מצביעים על פוטנציאל הלמידה הטמון בסביבות למידה ממוחשבות המשלבות ממשק כוח. טכנולוגיה זו נמצאת בתחילת דרכה ולכן יש צורך בפיתוח סביבות למידה שיאפשרו למידה עם סימולציות ברמות הפשטה שונות ובמגוון של תכנים פיסיקליים. בנוסף נדרש פיתוח של פעילויות למידה שייגשרו בין ההתנסות החושית הקונקרטית וייצוגים פורמליים בפיסיקה.

ביבליוגרפיה

- Arzarello, F. & Robutti, O. (2002). Approaching Functions through Motion Experiments, [Videopaper]. *Educational Studies in Mathematics* [On CD-ROM]
- Clement J. (1994), Use of physical intuition and imagistic simulation in expert problem solving in Tirosh D. (Eds.), *Implicit and explicit knowledge*, Norwood, NJ, Ablex publication Corp.
- Lakoff G. and Nunez R.E. (2000). *Where mathematics comes from. How the Embodied Mind Brings Mathematics into Being*, New York: Basic Books
- Piaget J. (1954), *The Construction of Reality in the Child*, (Cook M. Trans), N. Y. Basic Book
- Reiner M. (2004), The role of haptics in immersive telecommunication environments IEEE, Transactions on CSVT 14(3) 394-404
- Reiner M. (1999) Conceptual Construction of Field with a Tactile Interface, *Interactive Learning Environments*, 7(1), 1-30
- Roth, W. M. and Lawless D. V (2001). Gestures: Their role in teaching and learning. *Review of Educational Research*, 71, 365-392.
- Schwartz D.L. (1999), Physical imagery: kinematic versus dynamic models, *Cognitive psychology*, 38 433-464
- Strauss A. L. & Corbin J. (1998) *Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory* (2nd edition) Thousand Oaks, Ca: Sage
- Wilson M. (2002) Six views of embodied cognition, *Psychological bulletin Review*, 9(4), 625-636 20/11
- Williams R. L. Chen M. & Seaton J. M. (2003) Haptic-augmented simple machine educational tools, *Journal of Science Education and Technology* 12(1) pp. 1-12