

# כימיה מכול וחול:

## מרמת הננו למיקרואלקטרוניקה – לחשוב ולא רק לחשב

ורד דנגור, אורי פסקין ויהודית דורי\*

סטודנטים בטכניון הלומדים קורס במכניקת הקוונטים 'תורת הקוונטים ויישומיה בכימיה' (Dangur, Dori & Peskin, 2009). בקורס האקדמי נלמדים חלק מהתכנים המופיעים במבנית בגישה המתמטית הקונבנציונלית, ובדגש על יישומי התאוריה בכימיה.

מחקרים הראו כי חלק מהסטודנטים הלומדים כימיה יודעים לפתור בעיות הדורשות חשיבה אלגוריתמית, אך מתקשים לפתור בעיות הדורשות חשיבה מושגית (Zoller, 1999; Zoller, 1999; Zoller, 1999; Zoller, 1999). במחקר זה בחנו אם סטודנטים הלומדים בגישה מתמטית יכולים להיפרם מלימוד התכנים בגישה המושגית-חזותית כפי שמוצגת במבנית המותאמת לתלמידי תיכון.

מטרות המחקר היו: א. לבחון את ההשפעה של לימוד המבנית על הבנה כימית של מושגים ועקרונות ממכניקת הקוונטים ועל פיתוח מיומנויות חשיבה בקרב תלמידי תיכון המתמחים בכימיה ובקרב סטודנטים לתואר ראשון; ב. לחקור האם קיימים הבדלים בין קבוצות המחקר השונות, ואם כן אילו הבדלים; ג. לאפיין את תפיסותיהם של תלמידים וסטודנטים ביחס למאפיינים הייחודיים של המבנית.

### רקע תאורטי

מכניקת הקוונטים היא נושא בסיסי במדעי הפיזיקה והכימיה. מחקרים רבים מצביעים על קשיים בהוראה ובלמידה של מושגים ועקרונות ממכניקת הקוונטים ועל תפיסות שגויות

### הרקע ומטרות המחקר

השינויים שהתרחשו בהוראת המדעים בשנים האחרונות הביאו לפיתוחה של תכנית הלימודים החדשה בכימיה המיושמת בשנת תשע"א בכל בתי הספר בארץ. מטרות התכנית החדשה הן בין השאר פיתוח מיומנויות חשיבה, קישור הכימיה לחיי היום יום והצגת הכימיה כמדע הנושק לתחומי דעת נוספים – כגון פיזיקה וביולוגיה – ומהווה בסיס לתעשיות עתירות ידע.

אחת מהמבניות החדשות שפותחו בטכניון לאור מטרות אלו היא המבנית כימיה מכול וחול: מרמת הננו למיקרואלקטרוניקה. המבנית מיועדת לתלמידי י"ב המתמחים בכימיה. נושאי המבנית הם המבנה האלקטרוני של האטום, המולקולה והמצב המוצק, ונכללים בה מושגים ועקרונות ממכניקת הקוונטים אשר לא נלמדו עד כה בתיכון.

המבנית מתאפיינת בגישה ייחודית ללימוד הנושאים המופשטים ממכניקת הקוונטים, גישה המשלבת מגוון ייצוגים חזותיים, יישומים מחיי יומיום ונושאים הנמצאים בחזית המדע. המבנית מותאמת לתלמידי תיכון שחסר להם הרקע המתמטי הנדרש ללימוד הנושא מכניקת הקוונטים בגישה המקובלת באוניברסיטאות.

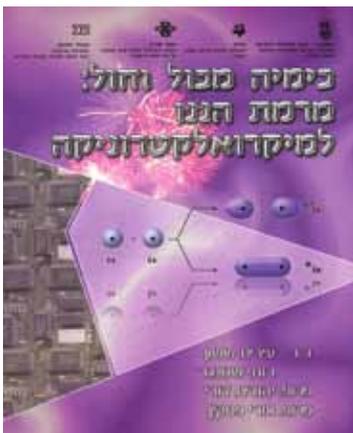
המחקר ליווה את יישום המבנית בקרב תלמידי תיכון ובחן את השפעת לימוד המבנית על הבנת מושגים ממכניקת הקוונטים, על פיתוח מיומנויות חשיבה ועל הבנת ייצוגי מידע בקרב התלמידים. במחקר זה שולבו בנוסף לתלמידי התיכון, גם

\* ד"ר ורד דנגור מורה לכימיה בבית ספר "הר וגיא" המחקר המוצג הנו חלק מעבודת הדוקטוראט שנערך בטכניון בהנחיית פרופ' יהודית דורי ופרופ' אורי פסקין. פרופ' אורי פסקין, הפקולטה לכימיה ע"ש שוליק, הטכניון, חיפה.  
פרופ' יהודית דורי, ראש קבוצת הכימיה במחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים, ודיקנית היחידה ללימודי המשך וחוץ בטכניון, חיפה.



איור 1) היא חלק מתכנית הלימודים החדשה בכימיה ומהווה נושא בחירה במסגרת לימודי ההשלמה מ-3 ל-5 יחידות לימוד. המבנית נכתבה בטכניון (ששון, שטנגר, דורי ופסקין, 2007).

במבנית נלמדים נושאים הקשורים למבנה האלקטרוני של האטום, למולקולה ולמצב המוצק - מושגים ועקרונות ממכניקת הקוונטים אשר לא נלמדו עד כה בבית ספר תיכון.



איור 1- כריכת המבנית  
כימיה מכול וחול: מרמת הננו  
למיקרואלקטרוניקה

### מטרות המבנית

« העמקה בתכנים כימיים והבנת תכונות החומר מתוך מבנהו בסקלה ננו-מטרית.

« הכרת המבנה האלקטרוני של חומרים ותכונות החומר הנגזרות מן המבנה האלקטרוני כגון צבע ומוליכות.

« למידה סביב מוקדים יישומיים והדגשת חשיבות הכימיה בחיי היום יום ובתעשיות עתירות ידע כגון המיקרואלקטרוניקה והננו-טכנולוגיה.

כל פרק במבנית פותח בהצגת תופעה מחיי יומיום, לאחריה עולה שאלה מרכזית היוצרת את הצורך להעמיק בתכנים הכימיים. לימוד המושגים והתכנים במהלך הפרק מוביל למתן תשובה לשאלה המרכזית וכן מסביר יישומים נוספים המוצגים בפרק.

הפרק הראשון פותח בשאלה **מה מקנה לזיקוקים את צבעיהם האופייניים?** (ראו איור 2). שאלה זו מובילה לתיאור המבנה האלקטרוני של האטום, ללימוד מושגים כגון עירור אלקטרוני, ספקרום רציף וקווי, ספקטרום פליטה ובליעה של אטומים ואורביטלים אטומיים.



איור 2- תמונת הזיקוקים כפתיח לפרק הראשון

וחלופיות בנושא. סוגיות - כגון האופי הכפול (דואליות) של האור והאלקטרון, אורביטלים אטומיים ומולקולריים והתיאור ההסתברותי שלהם - אינם ברורים לתלמידי תיכון (Harrison & Treagust, 1996; 2000; Olsen, 2002; Papaphotis & Tsaparis, 2008 Ireson, 2000;). באוניברסיטאות (Stefany & Tsaparis, 2009; Taber, 2001).

לטענת החוקר Taber (2001), אחד ההסברים להתפתחות תפיסות שגויות וחלופיות בנושאים הקשורים למבנה האטום ולקשר כימי טמון בעובדה שנושאים אלה מוצגים בעזרת מודלים היסטוריים שונים ולפיכך עלולים ליצור בלבול בקרב חלק מהלומדים.

Stefani ו-Tsaparis (2009) מציינים כי המודלים המוקדמים הנלמדים בתיכון - כגון מודל לואיס ומודל בוהר, אשר אמורים להוות בסיס למודלים המתקדמים, לעתים דווקא מעכבים ברכישת מושגים במכניקת הקוונטים. החוקר Mashhadi (1995) בחן את הבנת הלומדים את סוגיות האופי הכפול (דואליות) של האור והאלקטרון ומצא כי הלומדים אינם בוחנים את התפיסות המוקדמות שלהם ואינם מודעים להן. הם מחברים או "מכופפים" את התאוריות החדשות לתוך התאוריות הקודמות שלמדו ואינם מודעים לכך שמכניקת הקוונטים היא פרדיגמה חדשה. Olsen (2002) אשר בחן גם הוא סוגיות אלו מציע לשים דגש על היבטים איכותיים בהוראת מכניקת הקוונטים בתיכון.

במחקרים נמצא כי שילוב ייצוגים חזותיים וגישה איכותית בהוראת נושאים ממכניקת הקוונטים עשוי לסייע להבנה מעמיקה יותר בקרב סטודנטים (Kalkanis, Hadzidaki & Stavrou, 2003) ותלמידי תיכון (Gunel, Hand & Gundus, 2006). המבנית כימיה מכל וחול: מרמת הננו למיקרואלקטרוניקה פותחה בגישה ייחודית להוראת נושאים ממכניקת הקוונטים, המשלבת לימוד כמותי עם דגש על הבנה מושגית אגב שימוש במגוון ייצוגים חזותיים.

### הסביבה הלימודית

המבנית כימיה מכל וחול: מרמת הננו למיקרואלקטרוניקה (ראו

באיור 3 מובאת דוגמה ללמידה סביב מוקדים יישומיים. הפעילות קושרת בין נוסחת המבנה של המולקולה לאורך הגל הנבלע ולצבע הנראה לעינינו.

הפרק השלישי פותח בדיון על מקורות אור, והשאלה המוצגת היא **במה שונה המבנה האלקטרוני של מוליך למחצה מזה של מוצקים אחרים? כיצד פועלת דיודה פולטת אור המבוססת על מוליך למחצה?** במהלך הפרק נלמד המבנה האלקטרוני של חומרים מוליכים מבודדים ומוליכים למחצה, וכן המבנה הייחודי של התקנים מיקרואלקטרוניים - הדיודות (כמתואר באיור 4). בסיום המבנית מופיע קטע המקשר בין תכני המבנית ליישומים מתחום הננו-טכנולוגיה.



איור 4 - דיודות פולטות אור, מתוך הפרק השלישי

הפרק השני פותח בשאלה **מדוע חומרים מולקולריים מסוימים הם בעלי צבע ואחרים חסרי צבע?** במהלך הפרק נלמד המבנה האלקטרוני של מולקולות. נלמדים מושגים הקשורים באורביטלים מולקולריים. נלמד הקשר בין מערכת הקשרים הכפולים המצומדים במולקולה לבין המבנה האלקטרוני שלה, המשפיע על ספקטרום הבליעה ותכונת הצבע.

ליקופן (lycopene) נמצא במגוון ירקות ופירות.

ליקופן בליעה חזקה באורך גל 505nm. היעדרו בגלגל הצבעים וקבעו אילו ירקות ופירות מבין אלה המופיעים כאן מכילים ליקופן

איור 3 - משימה המשלבת הבנה כימית ויישומים מחיי יומיום

יישומים מחיי יום יום ומחזית המדע	דוגמה לייצוג חזותי	מושגים מרכזיים	תכני המבנית
כיצד עינינו רואות צבע? מה קובע את הצבעים של זיקוקי דינור?		ספקטרום קווי של אטומים, ספקטרום פליטה, אורביטלים אטומיים	<b>המבנה האלקטרוני של האטום</b>
מה הופך חומר לצבעוני? פעולת מקלות זוהרים? כיצד פועל חומר מלבין? מהן ננו-צינורית פחמן?		אורביטלים מולקולריים, אורביטלי HOMO LUMO, ספקטרום בליעה של מולקולות	<b>המבנה האלקטרוני של המולקולה</b>
כיצד פועלת דיודה מיישרת זרם? כיצד פועלת דיודה פולטת אור (LED)? ננו-גבישים מוליכים למחצה.		מוליך מבודד, מוליך למחצה, פסי ערכיות והולכה	<b>המבנה האלקטרוני של השריג</b>

טבלה 1 - ייצוגים חזותיים ויישומים המופיעים בפרקי המבנית



בדרכים שונות לסימול כימי של אורביטלים אטומיים ומולקולריים, וכמו כן נלמד הקשר בין מבנה מולקולות אורגניות מורכבות למבנה האלקטרוני ולספקטרום הבליעה שלהן. אחת המיומנויות שנבחנה במחקר היא ייצוג ופירוש נוסחאות מבנה וסימולים כימיים. המיומנות נבחנה על ידי שתי משימות. בשאלון המקדים התמקדו המשימות בתכנים של מבנה וקישור. בשאלון המסכם דרשו המשימות יישום של המודל הקוונטי הנלמד במבנית. אחת המשימות בחנה את יכולתם של הלומדים לקבוע באיזו מבין שתי המולקולות (a או b) יש מערכת ארוכה יותר של קשרים כפולים מצומדים, להסביר את המבנה האלקטרוני של המולקולות ולקשר לתכונה מאקרוסקופית - אורך הגל הנבלע. ההסבר דרש הבנה של המודל הקוונטי, התייחסות לרמות האנרגיה של המולקולות והמרווח הבין אורביטלי HOMO-I-LUMO.

להלן דוגמאות לתשובות תלמידים. התשובה הראשונה המוצגת היא חלקית:

*חוליה ב - יש לו מספר קשרים כפולים מצומדים של חוליה א לפיכך אורך גל האורק של חוליה ב יהיה ארוך יותר וחוליה א אין. (תלמיד 687731)*

תלמיד 687731 קובע נכון כי מולקולה עם יותר קשרים כפולים מצומדים בולעת באורכי גל ארוכים יותר, אך אינו קושר תופעה זו למבנה רמות האנרגיה של המולקולה, ולכן מגלה הבנה חלקית ביותר לאחד מהנושאים המרכזיים הנלמדים. תשובתו אינה נוגעת כלל במודל הקוונטי הנלמד במבנית.

יש לציין כי רוב התלמידים ביטאו בתשובותיהם את הקשר בין מספר הקשרים הכפולים מצומדים במולקולה לבין המבנה האלקטרוני שלה ותכונת בליעת הצבע. להלן דוגמה לתשובה מלאה של תלמיד:

*חוליה ב הולך באורך גל 600nm [גומא האור הנראה]. ניתן להסיק שאם גל ציור האנרגיה למולקולה שבו רואים כי האנרגיה ב היא למולקולה זי אנרגיה הנלמדת מספר רב יותר של קשרים כפולים מצומדים בין אטומי הפחמן שלה, לאשר האנרגיה a. האנרגיה הרבה של הקשרים הכפולים האנרגיה אורם להקטין. הפחמן האנרגטי בין רואי ה-HOMO של האנרגיה לראי ה-LUMO. ככל שהפחמן*

טבלה 1 מציגה את פרקי המבנית והמושגים המרכזיים הנלמדים בה ומדגימה כיצד משולבים במהלך לימוד התכנים ייצוגים חזותיים ויישומים מחיי יום יום ומחזית הטכנולוגיה.

## משתתפים וכלי מחקר

במחקר השתתפו 198 תלמידי תיכון אשר למדו את המבנית ו-65 סטודנטים אשר למדו את הקורס האקדמי תורת הקוונטים ויישומיה בכימיה. מבין הסטודנטים שהשתתפו במחקר, 34 סטודנטים עברו קורס העשרה קצר שעסק בתכני המבנית.

כיוון שנושאי המבנית לא נלמדו עד כה בתיכון, לא נמצאו תלמידים אשר למדו נושאים אלו בדרך אחרת. מסיבה זו חסרה קבוצת השוואה של תלמידים.

כלי המחקר כללו שאלונים לבחינת הבנה כימית ומיומנויות חשיבה. השאלונים הועברו לתלמידים לפני ואחרי לימוד המבנית כימיה מכול וחול: מרמת הננו למיקרואלקטרוניקה. בסיום לימוד המבנית ענו התלמידים על שאלת משוב, ונערכו ריאיונות עומק עם קבוצה קטנה של תלמידים. לסטודנטים הועברו שאלונים דומים בתחילת הסמסטר, ולאחר שסיימו את קורס ההעשרה בתכני המבנית. השאלון המסכם כלל גם הוא שאלת משוב.

השאלונים כללו משימות אשר בחנו מעבר בין ייצוגי מידע והסבר תופעות ועקרונות בכימיה. בשאלון המקדים התמקדו השאלות בנושאי מבנה וקישור שלמדו התלמידים קודם. בשאלון המסכם נדרש הסבר הכולל את המודל הקוונטי אשר נלמד במבנית.

## ממצאים

במחקר זה נבדקו מספר מיומנויות כגון תיאור ופירוש מושגים בייצוגים חזותיים ומילוליים, מיומנויות ייצוג ופירוש נוסחאות מבנה, מיומנויות גרפיות (Dori & Sasson, 2008) ומיומנות העברה (Sasson & Dori, 2011). במאמר זה נתמקד במיומנות אחת בלבד ובמשובי התלמידים והסטודנטים.

## מיומנויות ייצוג ופירוש נוסחאות מבנה וסימולים כימיים

במבנית מרמת הננו למיקרואלקטרוניקה מתוודעים התלמידים





## משובי תלמידים וסטודנטים

כדי לבחון את תפיסות התלמידים בהקשר למאפייני המבנית ענו התלמידים על שאלת המשוב הבאה: **האם המבנית הצטיינה במאפיינים ייחודיים? פרטי/ (השווה/י לנושאים אחרים בכימיה)?**

תשובות התלמידים נותחו ניתוח תוכן וחולקו להיגדים, על פי קטגוריות שעלו מהתשובות. על שאלה זו השיבו 165 תלמידים, ובתשובותיהם ציינו 216 היגדים.

רוב ההיגדים (96%) היו חיוביים, רק כ-4% מהם היו שליליים (התייחסו בעיקר לדרגת קושי גבוהה או למחסור בשאלות תרגול). בטבלה 2 מוצגת התפלגות ההיגדים על פי הקטגוריות יחד עם דוגמאות לתשובות תלמידים ממוינות על פי הקטגוריות. מהתפלגות ההיגדים על פי הקטגוריות עולה כי ההיבט השכיח ביותר שהוזכר בתשובות התייחס לרמת העניין במבנית, לאחריו ציינו ההיבטים הבאים בסדר יורד: יישומים - יישומים מחיי יום יום וקישור לתחומי דעת נוספים.

היבט חזותי - מתייחס לייצוגים חזותיים ואנימציות ממוחשבות,

היבט מושגי - מתייחס לחשיבה מושגית שהלומדים נדרשים לה בידע וביישום של ארבע רמות הבנה בכימיה (Dori & Hameiri, 2003), הבנה ברמה הקוונטית (דנגור, 2010) וכל זה בניגוד לחשיבה אלגוריתמית-מתמטית המתמקדת בפתרון תרגילים.

ההיבט של דרגת הקושי כולל בתוכו היגדים חיוביים והיגדים שליליים, מספר מצומצם של היגדים שלא נכנסו לקטגוריות הנ"ל וציינו בקטגוריה "אחר" (9%).

השאלון המסכם של הסטודנטים כלל שאלת משוב: **האם נתרמת מההעשרה? האם תמליצי/ לחברך/תן להצטרף לפעילות העשרה שבה השתתפת?**

### פרטי/ את תשובתך.

תשובותיהם של הסטודנטים אשר למדו העשרה בנושאי המבנית נותחו. לשאלה ענו 32 סטודנטים והם ציינו בתשובותיהם 43 היגדים. רוב התשובות הביעו גישה חיובית להעשרה אך היו גם היגדים אשר ביטאו יחס שלילי. הקטגוריות אשר עלו מהתשובות:

קטגוריה	שכיחות	דוגמאות
עניין	30%	הנושא מעניין ושונה בחידוש שהוא מביא לתלמידים בתחום המדע. מראה פן חדש של הכימיה (תלמיד 100192).
יישומים	26%	הקשר המיוחד לחיי היומיום זה מה שייחד את המבנית בשבילי, לדוגמה, צבעים של חומרים ומדוע יש להם צבע (תלמיד 901541).
חזותי המחשה	16%	המון מצגות והדמיות וירטואליות כי זה נושא שקשה לדמיין לבד... (תלמידה 1406102)
מושגי	10%	התכנית הייתה יותר פיזיקלית מנושאים אחרים. יותר חשיבה ופחות חישובים (תלמיד 89871).
דרגת הקושי	9%	1. המבנית הצליחה להעביר מושגים קשים ומופשטים מאוד בצורה טובה וברורה מאוד (תלמיד 919311). 2. היא הצטיינה בסתירות רבות ובהסברים מעורפלים בספר הלימוד... (תלמידה 270102).

טבלה 2 - דוגמאות לתשובות תלמידים לשאלת המשוב בחלוקה לקטגוריות

יישומים מחיי היומיום. בניגוד לתלמידים, הם העלו מעט מאוד היגדים המתייחסים להיבט החזותי (3% בלבד). ניתן לשער כי סטודנטים נחשפים במהלך לימודיהם למגוון גדול של ייצוגים חזותיים, הרבה יותר מאשר תלמידי תיכון, וכי הם רגילים ללמוד בעזרת מצגות, בעוד שלתלמידים בתיכון הייתה דרך הוראה זו חדשה. 23% מהיגדי הסטודנטים היו שליליים – כלומר, לחלקם נראתה ההעשרה מיותרת ולא תורמת למהלך לימודיהם האקדמיים.

1. חיובי – העמקת ידע והבנה, הגברת עניין ומוטיבציה, יישומים בינתחומיים, מבט חדש ושונה על הכימיה, ייצוגים חזותיים (77%).  
 2. שלילי – חוסר רלוונטיות וחוסר בהירות (23%).  
 טבלה 3 מתארת את התפלגות ההיגדים על פי הקטגוריות. מטבלה 3 עולה כי ההיבט השכיח ביותר שהסטודנטים הדגישו היה ההבנה המושגית אשר רכשו במהלך ההעשרה בנושאי המבנית. לאחר מכן הדגישו הסטודנטים בדומה לתלמידים

דוגמאות	קטגוריה	שכיחות	חיובי / שלילי
אמליץ להשתתף בהעשרה כיוון שהשיעורים עזרו להפנמת מושגים כגון node, AO, MO, [צומת]... אשר לא היו מובנים לי כראוי לפני כן (סטודנטית 250512).	הבנה מושגית	32%	חיובי
ההרצאות חידדו לי הרבה נושאים ושפכו אור מרתק על נושאים שאמורים להיות יבשים (סטודנט 392111).	עניין	23%	
ההעשרה תרמה להבנת תהליכי טבע מסקרנים (כמו צבע המים, מקור הפיגמנטים) והוסיפה להבנה הרחבה בין הפיזיקה שאני לומד לבין הכימיה שאני לומד (סטודנט 363511).	יישומים	12%	
הייתי מאוד ממליץ להשתתף בהעשרה היות שזה נתן לי מבט נוסף על הכימיה (סטודנט 58711).	מבט חדש, שונה	7%	
לא. כי זה לא היה קשור לקוונטים ולא עזר בהבנת הקורס (סטודנטית 393312).	חוסר רלוונטיות ואי בהירות	23%	שלילי

טבלה 3 – דוגמאות לתשובות של סטודנטים לשאלת המשוב בחלוקה לקטגוריות

## סיכום והמלצות

מהשאלון המקדים למסכם במיומנויות ייצוג ופירוש נוסחאות מבנה וסימולים כימיים. רוב התלמידים ביטאו בתשובותיהם את המודל הקוונטי הנלמד במבנית, ורק מיעוטם הסתפקו בתיאור מבנה המולקולה ברמת המיקרו.

בהשוואה בין תלמידים ברמות אקדמיות שונות נמצא כי תלמידים ברמה הבינונית שיפרו הישגיהם מהשאלון המקדים למסכם, אך מידת השיפור נמוכה יותר מאשר תלמידים ברמה האקדמית הגבוהה. ממצא זה אינו תואם מחקרים אחרים

מחקר זה בחן את ההשפעה של לימוד המבנית **כימיה מכול וחול: מרמת הננו למיקרואלקטרוניקה** על הבנת מושגים ועקרונות ממכניקת הקוונטים ועל פיתוח מיומנויות חשיבה בקרב תלמידי תיכון המתמחים בכימיה. כמו כן נבחנה ההשפעה של העשרה בנושאי המבנית בגישה המושגית-חזותית על הבנה כימית ושיפור מיומנויות חשיבה בקרב הסטודנטים הלומדים את התכנים בגישה מתמטית בקורס האקדמי.

במחקר נמצא כי התלמידים שיפרו את הישגיהם באופן מובהק



מגוונים. עם זאת יש ללוות את הפעילות בהדגשת מגבלות הייצוגים השונים והמעברים ביניהם.

« חשוב לפתח דרכים להתמודד עם קשייהם של תלמידים ברמה הבינונית. יש לפתח חומרי למידה נוספים כדי שיענו על צורך זה.

« מומלץ להמשיך לחקור את התרומה של הגישה המושגית-חזותית כהשלמה לגישה הכמותית-מתמטית גם בהוראה בקורסים האוניברסיטאים בכימיה.

« מחקר זה נערך לפני יישומה של התכנית החדשה בכימיה לשלוש יחידות. בתכנית החדשה נלמדים המושגים אורביטלים אטומיים ומולקולריים כבר בכיתות ' ו-'א. במחקר המשך ניתן יהיה לבחון את השפעת התכנית החדשה על הבנה והפנמה של מושגים במכניקת הקוונטים.

ממצאי המחקר תורמים לגוף הידע העוסק בהוראה, למידה והערכה של נושאים במכניקת הקוונטים ולהבנת תהליכי חשיבה ושלבים בהפנמת המושגים והעקרונות בקרב תלמידי תיכון וסטודנטים. כמו כן, ממצאי המחקר תורמים לגוף הידע העוסק בפיתוח מיומנויות חשיבה, אגב התמקדות בהבנת ייצוגי מידע ומעבר בין סימולים כימיים שונים ופירושם. המחקר מצביע על יתרונה של גישה המשלבת יישומים מחיי יומיום ונושאים מחזית המדע ומקרבת את הנושאים ממכניקת הקוונטים לעולמם של הלומדים ובכך מגבירה את המוטיבציה ללמידה בקרב תלמידי תיכון וסטודנטים.

כמו כן במחקר מוצגת תרומתה האפשרית של למידה בגישה המושגית-חזותית, בנוסף לגישה הכמותית-מתמטית, ללמידה של נושאים ממכניקת הקוונטים ולפיתוח מיומנויות חשיבה בקרב סטודנטים באוניברסיטאות.

שבהם נמצא כי תלמידים ברמה גבוהה במיומנויות מעבר בין ייצוגים שונים של נוסחאות מבנה של מולקולות (Dori & Barak, 2001; Kaberman & Dori, 2009). ההסבר לשוני בממצאים יכול לנובע מחד מרמת המורכבות הגבוהה של המולקולות שהוצגו במחקר זה לעומת מודלים של מולקולות פשוטות יותר במחקרן של דורי וברק או קברמן ודורי; מאידך, ייתכן שהשוני בממצאים נבע מרמת ההפשטה הגבוהה הנדרשת בהבנה הכימית בנושאים של מכניקת הקוונטים לעומת נושאים במבנה וקישור או תרכובות הפחמן.

הסטודנטים שנחשפו למבנית שיפרו את הישגיהם, אך מידת השיפור הייתה נמוכה יותר בהשוואה לתלמידים. ייתכן כי מידת החשיפה הרבה יותר של התלמידים למבנית היא אשר תרמה להבדל זה כמו גם הדגש בלימוד האוניברסיטאי על ההיבט המתמטי שלא נבחן במחקר זה.

משובי התלמידים והסטודנטים מדגישים את חשיבות שבשילוב היישומים מחיי היום יום ומחזית המדע במהלך הלמידה. יישומים אלה תורמים לדבריהם להגברת העניין והמוטיבציה וכן מקלים על ההבנה, כפי שהתבטאה התלמידה ר. בראיון:

"מה שלמדינת אולי יוגר לך ללמוד, וסוף יוגר כיף ללמוד וסוף יוגר לך ללמוד... לאשר ללמוד - גאים חשלתים".

בעקבות המחקר עולות ההמלצות הבאות:

« חשוב להעלות את רמת המודעות של המורים ליחודיות של הוראת תכנים ממכניקת הקוונטים בגישה המושגית-חזותית.

« מומלץ להוסיף פעילויות התנסות בהדמיות והמחשות במהלך הוראת נושא זה ולהשתמש בייצוגים חזותיים

## מקורות

דנגור, ו. (2010). יישומים בינתחומיים וייצוגים חזותיים בלמידה של המבנית כימיה מכול וחול: מרמת הננו למיקרואלקטרוניקה. חיבור לשם קבלת תואר דוקטור, המחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים, הטכניון, חיפה.

ששון, ע., שטנגר, ר., דורי, י. ופסקין, א. (2007). כימיה מכול וחול: מרמת הננו למיקרואלקטרוניקה, הוצאת יסוד, חולון.

- Kalkanis, G., Hadzidaki, P., & Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, 87, 257–280.
- Mashhadi, A. (1995). Advanced level physics students' conceptions of quantum physics. Paper presented at the Annual Meeting of the Singapore Educational Research Association, Singapore, November, 1995.
- Olsen, R.V. (2002). Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: A study in Norway. *International Journal of Science Education*, 24(6), 565–574.
- Papaphotis, G., & Tsaparlis, G. (2008). Conceptual versus algorithmic learning in high school chemistry: the case of basic quantum chemical concepts. Part 2. Students' common errors, misconceptions and difficulties in understanding. *Chemistry Education Research and Practice*, 9, 332–340.
- Sasson, I. & Dori, Y.J. (2011). Transfer skills and their case-based assessment. In B.J. Fraser, K.G. Tobin and C.J. McRobbie (Eds.), *The Second International Handbook of Science Education*, Dordrecht: Springer.
- Stefani, C., & Tsaparlis, G. (2009). Students' levels of explanations, models, and misconceptions in basic quantum chemistry: A phenomenographic study. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(5), 520–536.
- Taber, K.S. (2001). Building the structural concepts of Chemistry: Some considerations from educational research. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 2, 123–158. [<http://www.uoi.gr/cerp>]
- Zoller, U. (1999). Scaling-up of higher-order cognitive skills-oriented college chemistry teaching: An action-oriented research. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(5), 583–596.
- Zoller, U., Lubezky, A., Nakhleh, M.B., Tessier, B., & Dori, Y.J. (1995). Success on algorithmic and LOCS vs. conceptual chemistry exam questions. *International Journal of Science Education*, 72 (11), 987–989.
- Dangur, V., Dori, Y.J., & Peskin, U. (2009). Teaching quantum mechanical concepts via the learning unit Chemistry: From the nano-scale to Microelectronics. Paper presented at the annual meeting of the National Association for Research in Science Teaching, Garden Grove, CA, April 2009.
- Dori, Y. J., & Barak, M. (2001). Virtual and physical molecular modeling: Fostering model perception and spatial understanding. *Educational Technology and Society*, 4(1), 61 – 74.
- 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), 278-302. <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract/102530030/START>
- Dori, Y.J. & Sasson, I. (2008). Chemical understanding and graphing skills in an honors case-based computerized chemistry laboratory environment: The value of bidirectional visual and textual representations. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(2), 219-250.
- Gunel, M., Hand, B., & Gundus, S. (2006). Comparing student understanding of quantum physics when embedding multimodal representations into two different presentation format versus writing formats: Presentation format versus summary report format. *Science Education*, 90, 1092–1112.
- Harrison, A.G., & Treagust, D.F. (2000). Learning about atoms, molecules, and chemical bonds: A case study of multiple-model use in grade 11 chemistry. *Science Education*, 84, 352–381.
- Ireson, G. (2000). The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, 31(1), 15 – 21.
- Kaberman, Z., & Dori Y.J. (2009). Question posing, inquiry, and modeling skills of chemistry students in the case-based computerized laboratory environment. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 7, 597–625.