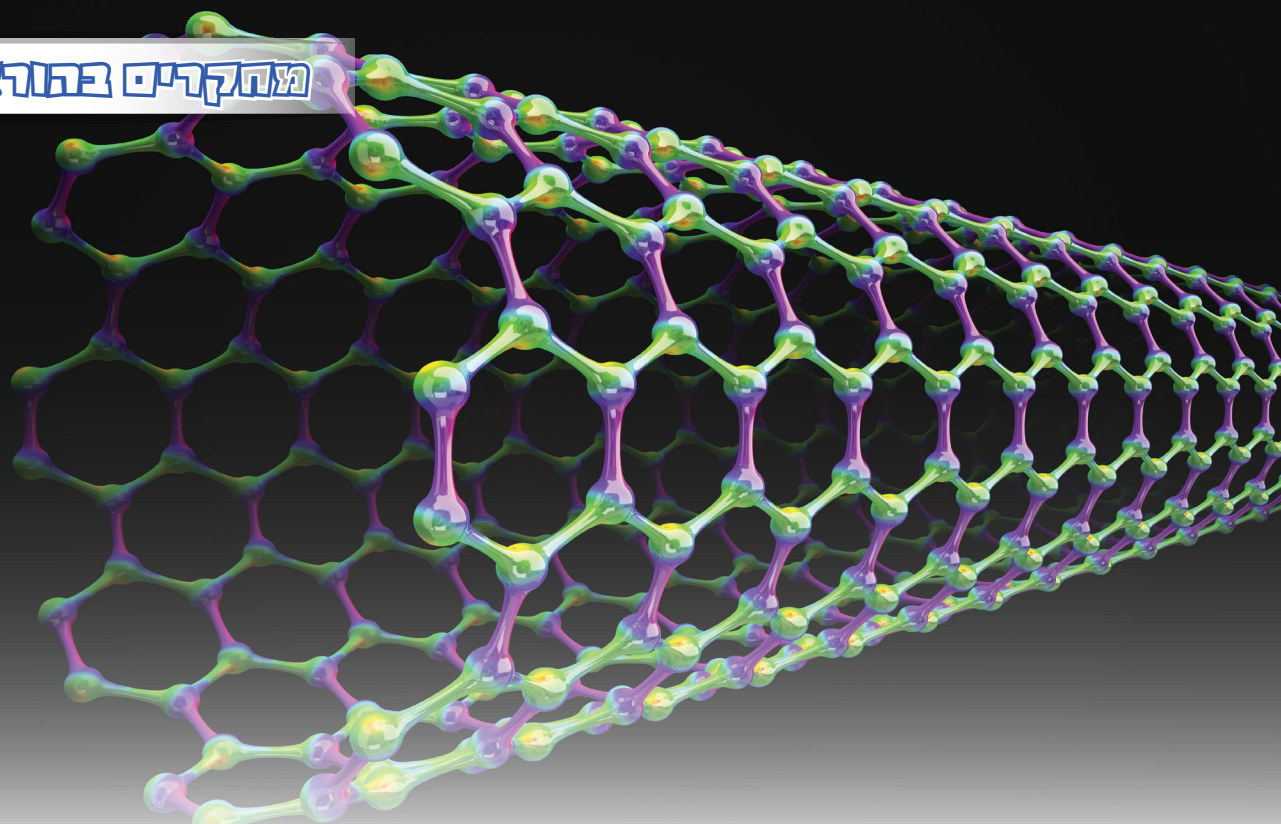




# המושגים הבסיסיים והאפליקציות הננוטכנולוגיות המומלצות להוראה בתיכון: תוצאות מחקר דלפי תלת-שלבי\*

סוהיר סחניני ורון בלונדר, המחלקה להוראת המדעים מכון ויצמן למדע

## הקדמה

ננוטכנולוגיה היא תחום מחקר ופיתוח העוסק בגדלים קטנים מאוד, אך הפוטנציאל הטמון בה גדול. מחקר ופיתוח בננוטכנולוגיה חדרו במהירות למודעות בכל תחומי המדע וההנדסה, עם השלכות על חיי היומיום, על סוגיות אתיות, על הכלכלה, על יחסים בין-לאומיים ואפילו על תפיסת האנושות לגבי מיקומה ביקום.

בבואנו ללמד מושגי יסוד בתחום תוכן מסוים אנו מסתמכים בדרך כלל על ספרי מבוא הפורשים את מושגי היסוד של התחום. אבל תחום הננוטכנולוגיה התפתח כולו בשלושה העשורים האחרונים, וספרי מבוא להוראת התחום עדיין לא זכו להכרה. בקבוצת המחקר שלנו הוחלט למפות את המושגים הבסיסיים ואת האפליקציות שחשוב ללמד בננוטכנולוגיה בבית-ספר העל-יסודי (Sakhnini & Blonder, 2015). ולשם כך החלטנו להשתמש במתודולוגיה

מחקרית הנקראת "דלפי" (Skulmoski, Hartman, and Krahn, 2007), המסייעת בקבלת החלטות המבוססות על הסכמה בין קהילות של מומחים.

במחקר הנוכחי בחרנו שתי קהילות של מומחים: 1. אנשי מחקר בננוטכנולוגיה, 2. מורים למדע בעלי רקע בננוטכנולוגיה. על פי שיטת הדלפי, המשתתפים התבקשו להציע מושגים בננוטכנולוגיה שחשוב לדעתם ללמד בתיכון, וכן להסביר את המשמעות של המושגים, לנמק מדוע חשוב ללמד כל מושג ולהציע דרכים ללמד. בסופו של תהליך הדלפי (הכולל 3 שלבים) מצאנו, באמצעות ניתוח סטטיסטי, מהם המושגים הבסיסיים והאפליקציות של ננוטכנולוגיה המתאימים להוראה בבית הספר העל-יסודי, אשר יש לגביהם הסכמה בקרב המומחים אשר השתתפו במחקר הדלפי. ממצאי המחקר עלו שמונה מושגים בסיסיים: (1) תכונות תלויות-גודל; (2) חדשנות ויישומים

\* המאמר מתבסס על חלק ממצאי עבודת הדוקטורט של ד"ר סוהיר סחניני בהנחיית פרופ' רון בלונדר במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן. עבודת הדוקטורט עוסקת בהוראת תחום הננוטכנולוגיה בתיכון הקשורים להוראת תחום הננוטכנולוגיה בתיכון

ההוראה והמחקר שלדעתנו משחקים תפקיד בסיסי וחשוב בהתפתחות החינוך הננוטכנולוגי.

## מטרות המחקר ושאלות המחקר

מטרות המחקר לזהות את המושגים הבסיסיים בננוטכנולוגיה שחשוב ללמד בתיכון, ולעמוד על ההבדלים בין שתי קהילות מומחים (חוקרים בננוטכנולוגיה ומורים) ובאופן שבו הן תופסות את החשיבות של המושגים השונים.

### שאלות המחקר

להשגת מטרות המחקר נשאלו שאלות המחקר הבאות:

1. מהם המושגים הבסיסיים בננוטכנולוגיה הנתפסים בעיניהם של חוקרים בננוטכנולוגיה ומורים למדעים שחשוב ללמד בבתי ספר תיכוניים?

2. מהם ההבדלים בין מורים ובין חוקרים באופן שבו הם תופסים את המושגים הבסיסיים בננוטכנולוגיה להוראה בתיכון?

כלי המחקר ואיסוף הנתונים: מחקר דלפי תלת-שלבי:

בהיעדר ידע לגבי תופעה או בעיה מסוימת, ומעוניינים להגיע להסכמה בין קהילות שונות של מומחים לגבי בעיה או תופעה זו, ניתן להשתמש בשיטת הדלפי לקבלת החלטות (Skulmoski, Hartman, and Krahn, 2007). שיטת הדלפי מבוססת על איסוף נתונים, בלי צורך בפגישות פנים מול פנים בין המומחים, במספר רב של חזרות באמצעות שאלונים המאפשרים למשתתפים במחקר להביע את דעותיהם, לכתוב הערות, להגיב על דעות של משתתפים אחרים והכול נעשה באנונימיות מוחלטת.

בננוטכנולוגיה; (3) קדם וגודל; (4) שיטות אפיון של ננוחומרים; (5) פונקציונליות; (6) מיון ננוחומרים; (7) שיטות הכנה של ננוחומרים; (8) מאחורי הקלעים של ננוחומרים. בנוסף עלו חמש אפליקציות אשר מומלצות להוראה בתיכון: (1) ננורפואה; (2) ננואלקטרוניקה; (3) תאים פוטו-וולטאים; (4) ננורובוטים; (5) ניקוי עצמי.

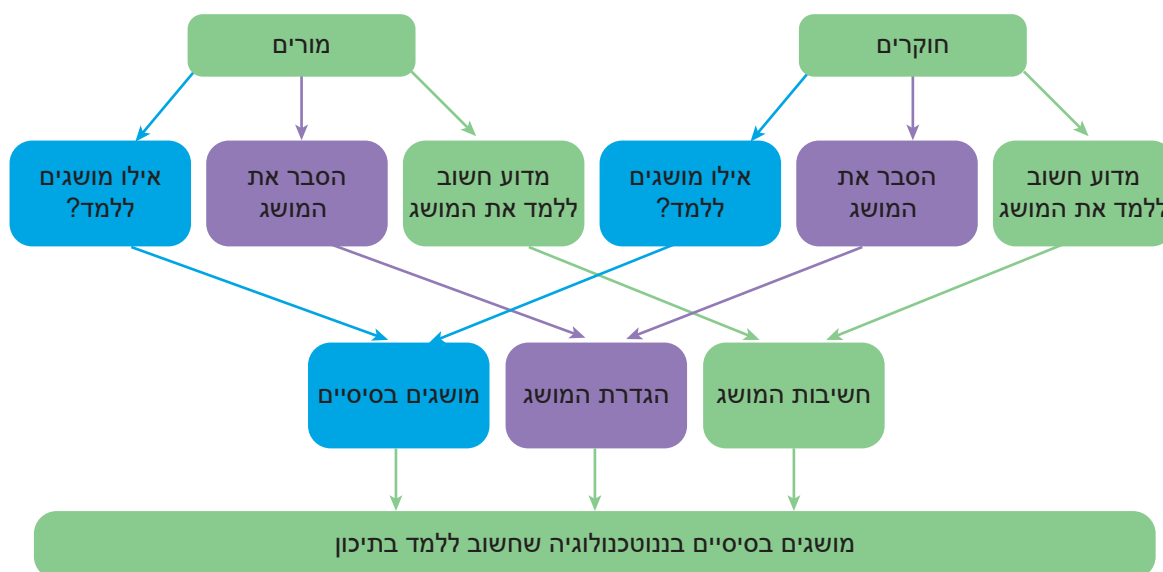
במאמר הנוכחי נציג את המושגים הבסיסיים בננוטכנולוגיה שחשוב ללמד בתיכון. כל מושג יוגדר, ויוסבר מדוע חשוב ללמדו, כפי שעלה ממחקר הדלפי (Sakhnini & Blonder, 2015; Sakhnini & Blonder, 2016).

## שיטת המחקר

### אוכלוסיית המחקר

במחקר השתתפו 21 חוקרים מכלל האוניברסיטאות בארץ, חוקרים בעלי רקע מדעי מגוון בשדה הננוטכנולוגיה (פיזיקה יישומית, כימיה, חומרים והנדסה), ו-21 מורים למדעים מדיסציפלינות שונות (כימיה, ביולוגיה, ביטכנולוגיה ופיזיקה) בעלי ידע בתחום הננוטכנולוגיה. המחקר התבסס על מתודולוגיית דלפי אשר מאפשרת להגיע להסכמה בין קהילות של מומחים (במקרה הנוכחי - קהילת מומחים של מדענים וקהילת מומחים של מורים). כל החוקרים הם בעלי תואר דוקטור, 13 מהם מכהנים כפרופסורים בתחומם, ושלושה מהם עובדים בתעשיית הננוטכנולוגיה. בקהילת המורים 4 מורים בעלי תואר ראשון, 13 בעלי תואר שני, ו-4 בעלי תואר דוקטור במדעים או בהוראת מדעים. כל המורים הם בעלי 15 שנות ניסיון בהוראה לפחות.

שתי הקהילות האלו נבחרו בעיקר במטרה לחבר בין גורמי



איור 1: תהליך קבלת ההסכמה לגבי המושגים הבסיסיים בננוטכנולוגיה שחשוב ללמד במדעים בתיכון

## המצאים

בפרק זה נציג את המושגים הבסיסיים בננוטכנולוגיה ואת האפליקציות שעלו במחקר, את ההגדרות שלהם, ונבהיר למה משתתפי המחקר סבורים שחשוב ללמדם בסופו של תהליך הדלפי. כלומר, נתמקד בשאלת המחקר הראשונה. לשאלת המחקר השנייה שנחקרה נתייחס בדיון.

בסופו של תהליך הדלפי התקבלו שמונה מושגים שחשוב ללמדם במדעים בבית ספר תיכון:

### 1. תכונות תלויות גודל

המושג **תכונות תלויות גודל** הוגדר כתכונות החומר המושפעות מגודלו. תופעה זו בעולם המקרוסקופי שעליו אנו מלמדים בכימיה של בית הספר. תכונות כגון טמפרטורת ההיתוך נתפסות כתכונות קבועות עבור כל יסוד. אולם כאשר יורדים לחלקיקים בסדרי גודל ננומטרי - תכונות אלה הופכות להיות תלויות בגודל החלקיק. למושג זה שלושה תת-מושגים אשר מסייעים בהבנתו: א. יחס שטח פנים לנפח: כאשר יורדים בגודל לממדים ננומטריים, יחס שטח הפנים לנפח עולה באופן דרמטי. וכתוצאה מזה אחוז האטומים הנמצאים על שטח הפנים עולה על אחוז האטומים הנמצאים בתוך החומר. היחס בין שטח הפנים לנפח מהווה גורם המשפיע מאוד על תכונות רבות של חומרים (לדוגמה: צבע, קטליזה, השפעות הכוחות הבין מולקולריים וקשיחות).



איור 2: יחס בין שטח פנים לנפח של גרגירי סוכר גדל בהשוואה לאותו יחס (של אותם גרגירים) בקוביית סוכר

ב. תכונות קוונטיות: תכונות ייחודיות, מבוססות על האופי הגלי של האלקטרון. תכונות אלו מופיעות בסקלה הננומטרית.

ג. דפקטים: מבנים ננומטריים הם בעלי מספר קטן של אטומים. לכן הסיכוי למצוא דפקטים במבנים

בשאלון השלב הראשון של הדלפי התבקשו המשתתפים: (1) להציע מושגים בסיסיים בננוטכנולוגיה ואפליקציות ננוטכנולוגיות שחשוב ללמדם במדעים בבית הספר; (2) לתת הסבר על המושג והאפליקציה המוצעים; (3) להצדיק את חשיבותם בעיניהם של המשתתפים כפי שמופיע באיור 1.

לאחר קבלת השאלונים מהמשתתפים, נערך ניתוח תוכן סטטיסטי על פי השלבים הבאים: (1) קריאת המידע שהתקבל בעיון רב; (2) זיהוי המושגים והאפליקציות; (3) מיון לקטגוריות; (4) תיקוף המושגים והאפליקציות הננוטכנולוגיים שעלו במחקר. בשלב מיון הקטגוריות לא התערבנו ולא שינינו את הניסוחים שהעלו המשתתפים. אפילו השמות של רוב הקטגוריות נגזרו מהמילים ומהמשפטים שבהם השתמשו משתתפי המחקר. בתהליך מיון הקטגוריות נערך דיון בין חוקר בננוטכנולוגיה ובין חוקרת בתחום של כינון מדעי יחד עם המחברת הראשונה של המאמר. הדיון הוביל לעיצוב מחדש של הקטגוריות. התוכן המדעי עבר תיקוף נוסף עם מומחה (חיצוני) בננוטכנולוגיה. בסיום הניתוח התוכני בוצע מבחן (Chi-square) המאפשר להשוות בין שתי הקהילות בכל הנוגע לכל מושג ולבחינת מידת ההסכמה ביניהן בשאלה אילו מושגים ואפליקציות חשוב ללמד במדעים בבית הספר.

בהסתמך על ממצאי השלב הראשון של הדלפי נבנה שאלון ליקרט של השלב השני. בשאלון זה הוצגו המושגים והאפליקציות שעלו מהשלב הראשון, ההגדרות של כל אחד מהם כפי שהוצעו על ידי המשתתפים באופן אנונימי. המשתתפים התבקשו לדרג את חשיבותו של כל אחד מהמושגים והאפליקציות בסקלה שבין 1-5, כאשר 5- מייצגת את הרמה הגבוהה ביותר של חשיבות. בנוסף הם התבקשו להצדיק את הדירוג שלהם ולהעיר על הדיוק בהגדרה ובניסוח של כל מושג ואפליקציה שעלו ועל המידה שבה משפיע הניסוח על הבנת המושגים. הניתוח הסטטיסטי שבוצע כלל את חישוב הממוצע והשונות עבור כל מושג. כמו כן נעשה מבחן סטטיסטי לבחינת ההבדלים באופן שבו שתי הקבוצות תופסות את החשיבות של כל אחד מן המושגים. בשלב השלישי והאחרון של תהליך הדלפי הוצגו למשתתפים המושגים, ההגדרות שלהם עם היגדים שנלקחו מהסבב השני התומכים או מתנגדים לחשיבות המושג כפי שדורגה בסבב השני של הדלפי. בנוסף הוצג אחוז המשתתפים שדירגו את המושג כחשוב להוראת מדעים בבית-הספר התיכון. שוב דירגו המשתתפים בסקלה שבין 1-5 את חשיבותו של כל מושג בעיניהם, שוב העירו והגיבו על ההיגדים שהוצגו בשאלון והצדיקו את החשיבות של המושג. בנוסף העלו המשתתפים קשיים פוטנציאליים שצפויים להתעורר בעת הוראת המושג.

אלה הוא נמוך מאוד. כאשר הסיכוי לדפקטים הוא נמוך, מתקבלים חומרים בעלי חוזק מכני גבוה מאוד בהשוואה לחומרים מאקרוסקופיים שיש בהם דפקטים רבים.

המשתתפים הסבירו את חשיבותו של המושג *תכונות תלויות גודל*: "להראות כמה אפשרויות ניתן להשיג מחומר ננומטרי בודד"; "להראות את חוזק הננוטכנולוגיה, את חשיבותה וייחודיותה"; "להראות את דרגות החופש שמעניקה הננוטכנולוגיה המראות תכונות חדשות".

## 2. המצאות ואפליקציות בננוטכנולוגיה

המושג המצאות ואפליקציות בננוטכנולוגיה מוגדר כפוטנציאל הטמון באפליקציות (יישומים) והמצאות ננוטכנולוגיות, והוא כולל ארבעה תתי-מושגים:

א. אפליקציות עכשוויות ועתידיות בננוטכנולוגיה: יישומים יצירתיים של ננוחומרים ומחקר בתחום הננו, כבסיס לטכנולוגיות עכשוויות ועתידיות, ושילובם במוצרים שימושיים בחיי היומיום. למשל, שימו בננוחלקיקים על מנת לפתח תאים פוטו-וולטאיים יעילים יותר, כפי שמוצג באיור 4.

המשתתפים הסבירו מדוע מושג זה חשוב: "להראות לתלמידים את הפוטנציאל הטמון באפליקציות הננוטכנולוגיות מוקדם ככל האפשר, יניע את התלמידים ללמוד ולהבין את הבסיס של הננוטכנולוגיה". זה גם חשוב ל-"הדגמת הצורך האמיתי, הנדרש למחקר רב-תחומי".

ב. חיקוי הטבע (ביומימקרי) דוגמא מוצגת באיור 3: בטבע ניתן למצוא מנועים טבעיים, מכונות טבעיות ומבנים על פני השטח אשר נשלטים על ידי מולקולה אחת או אוסף של מולקולות. ננוטכנולוגיה מאפשרת

חיקוי התקנים טבעיים אלה לביצוע משימות מגוונות כגון שימור והעברת אנרגיה, ניקוי משטחים ושכפול. ג. הקשר בין מדע וחברה: למה חשוב ללמד מושג זה: "העלאת המודעות לעולם סביבנו ובתוכנו; עוזר לתלמידים לדמיין איך על ידי שימוש בננוטכנולוגיה אפשר לבצע מטלות מסובכות בקלות". סיכונים ויתרונות הטמונים בננוטכנולוגיה. בתת-מושג זה בא לידי ביטוי הקשר בין מדע וחברה. והוא ומאפשר "לזהות את החסרונות הפוטנציאליים של ננו-חומרים על בריאות האדם ו/או על הסביבה, להבין שפיתוחים ננוטכנולוגיים הם בסדר כל עוד לא נעשה בהם שימוש לא מוסרי, להציג בפני התלמידים גורמים והיבטים אחרים הנלקחים בחשבון כאשר מעצבים מערכת מבוססת ננוטכנולוגיה".

ד. התאמה אישית של ננוחומרים לאפליקציה הדרושה, כלומר, בניית מערכות מורכבות על מנת לעמוד בדרישות מאפליקציה מסוימת.

ה. למה חשוב ללמד: "להמחיש שיטות חשיבה וביצועים חדשים, אשר מבוססים על תפירת חומרים בהתאמה אישית לבניית מערכות מסובכות, מה שמניע את התלמידים ללמוד מדע"; "התלמידים יהיו מסוגלים להבין את הקשר בין כימיה, חומרים, מדע וננו-הנדסה".

## 3. ממד וגודל

גודל מוגדר כמידה או כמות של האובייקט. ממד (סקלה) הוא הגודל שמאפיין את הצפייה, המדידה של אובייקט. מושג זה מוכר לנו, המורים לכימיה, וכאשר מעוניינים ללמד ננוטכנולוגיה מושג זה מקבל חשיבות נוספת. "נושא



איור 4: פאנלים פוטו-וולטאיים לייצור חשמל ממקור אנרגיה מתחדש



איור 3: עלי פרח הלנטוס שימשו כהשראה לפיתוח משטחים סופר-הידרופוביים אשר "מתנקים מעצמם". ומהווה דוגמא לתת המושג חיקוי הטבע (ביומימקרי)

זה יציג (אולי בפעם הראשונה) את הצורך במזעור ואת היתרונות של מערכות ממוזערות בסקלת המיקרו. הוא יצדיק את הצורך ללמוד על הננומדע ועל ננוטכנולוגיה; מִמד וגודל חשובים על מנת לתפוס את גודל האובייקטים סביבנו ולזהות את הגודל האמיתי של מולקולות אשר מלמדים עליהן בשיעורי כימיה. התלמידים מתקשים לדמיין את הסקלה הננומטרית, מפני שאין היא מוחשית עבורם. הבנת המושגים מִמד וגודל היא בסיס להבנת מושגים אחרים בננוטכנולוגיה כמו המושג תכונות תלויות גודל. בהמשך המאמר מצורף פוסטר "פוסטר סדרי גודל ושיטות ויזואליזציה" הניתן להדפסה ולתליה בכיתה הכימיה.

#### 4. שיטות אפיון של ננוחומרים

המושג שיטות אפיון של **ננוחומרים** מוגדר כך: הכלים המאפשרים לראות, למפות, ללמוד ולבצע מניפולציות בגדלים ננומטריים, והטכניקות המאפשרות לאפיון חומרים ננומטריים. המושג כולל שלושה תתי-מושגים. שניים מהם מתייחסים לסוג של מיקרוסקופיה, ואחד נוגע להבנה של מושג הרזולוציה:

א. מיקרוסקופ מנהור, סורק STM ומיקרוסקופ כוח אטומי AFM.

ב. מיקרוסקופ אלקטרוני (SEM, TEM).

ג. רזולוציה - מונח במדע המוגדר כגודל של מידת ההפרדה בין עצמים. המונח קשור לתחומים שונים כמו רזולוציה של תמונה, של פיקסלים ואודיו. בעולם הננומטרי רזולוציה מתייחסת ליכולת למדוד גודל של אובייקטים או את המרחק ביניהם. בנוסף רזולוציה מהווה כלי הקובע אם אובייקט ייחשב בעל ממדי ננו או לא.

משתתפי המחקר הסבירו למה חשוב ללמד את המושג: "להכיר כלים המשמשים לזיהוי ולבקרת תכונות של חומרים, ננוחומרים וננו-מערכות", להבהיר לתלמידים שנו-מדע אינו מדע בדיוני אלא מציאות (אנשים נוטים להאמין למה שרואים!) יהיה קשה להסביר את המושגים בסקלה הננומטרית אם התלמידים לא יבינו באופן בסיסי כיצד ניתן לראות ולמדוד ננוחומרים.

#### 5. פונקציונליות

תכונה שמקנים לחומר או לאזור מסוים בתוך החומר. תכונה זו מקנה לחומר פעילות מסוימת או יכולת קישור. הפונקציונליות היא זו שהופכת את הננומדעים

לננוטכנולוגיה. משתתפי המחקר הסבירו מדוע חשוב ללמד את המושג: "כדי לקבל פונקציונליות קושרים קבוצות פונקציונליות, למשל, קבוצות שיכולות להיקשר לנשא, שיקשור את החלקיק לקולטן ויגיב עם מולקולה מסוימת, הפונקציונליות חשובה מאוד בננוטכנולוגיה כי היא הופכת ננוחומרים מחומר רגיל למשהו שהוא חלק מטכנולוגיה". בהמשך המאמר מצורף פוסטר "פוסטר סדרי גודל ושיטות ויזואליזציה" הניתן להדפסה ולתליה בכיתה הכימיה. הפוסטר מתייחס הן למושג סדרי גודל והן לשיטות האפיון שלהם המאפשרות את הויזואליזציה של גופים בסדרי גודל שונים.

#### 6. מיון חומרים ננומטריים

זהו מושג המזכיר את ארגון היסודות בתוך הטבלה המחזורית וכולל זיהוי קטגוריות שונות של ננוחומרים כמפורט כאן:

א. סוגים של ננוחומרים: מיון ננוחומרים לפי הרכבם הכימי (ננוחלקיקים מפחמן, ננוחלקיקים אנאורגניים, ננוחלקיקים אורגניים).

ב. מוליכות חשמלית: מיון ננוחומרים לפי המוליכות החשמלית שלהם (מוליכים, מוליכים למחצה, ומבודדים).

ג. מקור הננוחומרים: מיון ננוחומרים לפי המקור שלהם (ננוחומרים טבעיים, ננוחומרים אורגניים וננוחומרים סינתטיים).

ד. ממדיות: מספר הממדים שנשארו הם מאקרוסקופיים בעוד ששאר הממדים הם ננוסקופיים, כלומר, מתחת ל-100 ננומטר (0D, 1D, 2D, 3D).

משתתפי המחקר הסבירו מדוע חשוב ללמד: "לזהות את הקטגוריות השונות של ננוחומרים ולעמוד על היתרונות והחסרונות של כל חומר, להבין שבננוטכנולוגיה תכונות החומר נקבעות לא רק על ידי החומר עצמו או המולקולות שמייצרות אותו אלא על ידי ממדי החלקיקים אשר קובעים את התכונות האלקטרוניות".

המורים אשר השתתפו במחקר הסבירו את חשיבות הוראת המושג **מיון חומרים ננומטריים** בצורה אחרת, ככל שהדברים נוגעים לפדגוגיה: "מאוד דומה לטבלה המחזורית. ממיינים יסודות כימיים לפי התכונות שלהם. המיון עוזר ללמד את הדפוס הכללי בכימיה, שימוש במיון של ננוחומרים עוזר בחיבור ננוחומרים למיונים, שימושיים שונים בכימיה אשר התלמיד מכיר כמו מוליכות חשמלית".

מותאם למחקר ופיתוח חדשני בננוטכנולוגיה. ולכן הוא מציג כיצד מדע עכשווי נעשה ומתפתח בימינו במעבדות המחקר. הוא כולל את התת-מושגים הבאים:

א. רב-תחומיות של מדע וטכנולוגיה: חיבור ידע המגיע ממקורות שונים ודיסציפלינות שונות במדע וטכנולוגיה.

למה חשוב ללמד: "הנושא הזה יאחד את ידע התלמידים שיש להם רקע שונה (בתי-ספר, כיתות ולא) דיסציפלינות שונות"; "נושא זה יציג לתלמידים לא רק את יתרונות הננוטכנולוגיה אלא את החסרונות של המציאות שבה מיוצרת הננוטכנולוגיה"; "להדגים את ההדדיות בגישה הרב-תחומית (במיוחד את החיבור בין הידע שנרכש מכל הקורסים המדעיים שנלמדו קודם על ידי שימוש במושגים שהתלמידים מכירים כבר מחוויית למידה נוכחית או קודמת".

ב. עבודת צוות: שיתוף פעולה בין כימאים, פיזיקאים, ביולוגים, מהנדסי חשמל ומהנדסי חומרים.

למה חשוב ללמד: "חשוב כי התלמידים יצטרכו לעבוד בקבוצות. כל תלמיד בקבוצה יביא ידע תוכני שונה (למשל, כימיה, ביולוגיה). התלמידים יתגברו על הפער בידע שלהם, תהיה להם ההזדמנות להשלים את הידע שלהם לגבי תופעה כלשהי מתלמידים אחרים בקבוצה".

ג. התפתחות תחום הננוטכנולוגיה: ההתפתחות הכרונולוגית של מחקרים ואפליקציות בננוטכנולוגיה.

למה חשוב ללמד: "לחשוף את התלמידים להתפתחות החשיבה שהובילה למחקר בננוטכנולוגיה ובתעשייה"; "התפתחות הננומדעים והננוטכנולוגיה היא פלטפורמה טובה המאפשרת לתלמידים ללמוד ולהבין איך עושים מחקר מדעי ואיך הרעיון המדעי הופך לאפליקציה".

7. שיטות ייצור של ננוחומרים

ניתן להשתמש במגוון רחב של גישות לייצור ננוחומרים. הגישות השונות מיוצגות בתת-הקטגוריות של המושג.

א. "מלמעלה למטה" לעומת "מלמטה למעלה".

(top-down) מלמעלה למטה: המיקום של כל מרכיב בחומר מוכתב מלמעלה באופן שבו הארגון נקבע על-ידי התערבות חיצונית שהיא בקנה מידה של החומר עצמו (למשל, ליטוגרפיה).

bottom-up (מלמטה למעלה): מולקולות או אטומים בתמיסה או בגז מתארגנים ליצירת מערך מוגדר במבנה ובכיוון ולעתים ע"ג מצע.

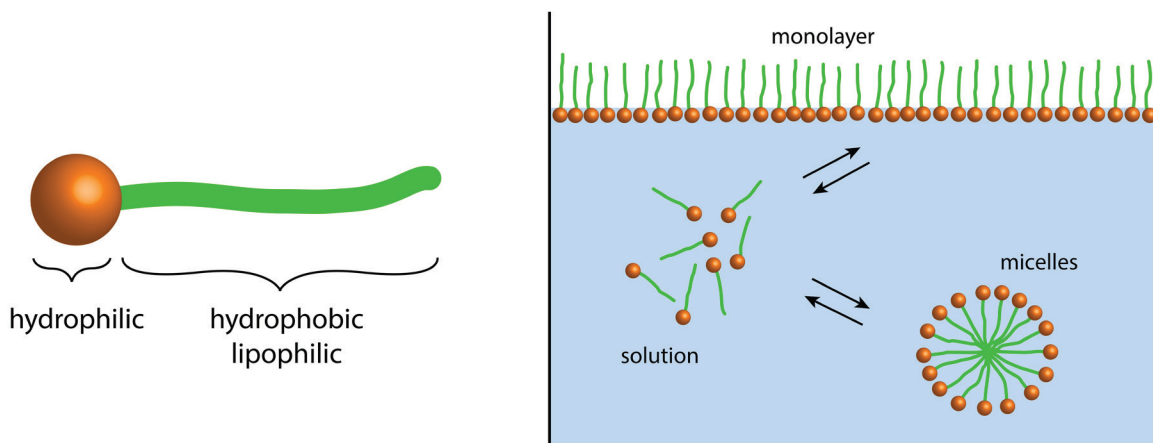
ב. התארגנות עצמית (Self-assembly)

התארגנות עצמית היא הדוגמה המובילה לגישת ה-bottom-up: היכולת של המולקולות להסתדר "בעצמן" במבנה מסודר על מנת להשיג יציבות תרמו-דינמית.

משתתפי המחקר הסבירו מדוע חשוב ללמד את המושג: "לזהות את הכלים לייצור ננוחומרים, היתרונות והחסרונות של כל טכניקה, להמחיש את שלל האפשרויות שהתלמיד יכול להשתמש בהן לייצור ננוחומרים. התארגנות עצמית היא הלב של הרבה תהליכים בסיסיים בסקלה הננומטרית. היא מאפשרת הכנת דברים מורכבים עם מינימום התערבות ומאמץ".

8. מאחורי הקלעים של הננוטכנולוגיה

המושג מתייחס לשאלה הכללית "כיצד נעשה המחקר בננומדעים?". מושג זה שונה משאר המושגים שזוהו במחקר כיוון שהוא אינו מושג תוכני, אלא מושג המייצג את "טבע המדע" (Nature of Science, NOS) אשר



איור 5: דוגמה להתארגנות עצמית - חד שכבה מולקולרית, אשר מתארגנת בעצמה על פני מים

המחקר הנוכחי התקיים על מנת למצוא את המושגים הבסיסיים בננוטכנולוגיה שתלמידי תיכון חייבים לדעת ולהבין. הממצאים שהוצגו לעיל אינם תלויים בתוכנית לימודים קיימת או ברפורמה בהוראת מדעים כפי שנעשה במחקרים אחרים בעולם (Stevens et al, 2009 Haung, Hsu, and Chen, 2011; Hutchinson et al., 2011). המחקר הנוכחי אפשר בחינה רחבה יותר של תחום החינוך הננוטכנולוגי והניב את המושגים הייחודיים לננוטכנולוגיה שאינם מושגים מדעיים כלליים. המחקר המוצג במאמר זה מהווה אבן דרך חשובה בתחום הוראת הננוטכנולוגיה בעולם, והוא פורסם בהרחבה בשני מאמרים משלימים (Sakhnini & Blonder, 2015; 2016). המחקר מהווה דוגמה לדרך שבה ניתן לנתח תחום מחקר חדשני הנמצא עדיין בפיתוח ולהתאים אותו להוראה ברמה של בית ספר תיכון. באופן דומה ניתן לטפל בתחומי מחקר חדשניים נוספים כגון חקר המוח.

בסופו של תהליך הדלפי לא היו הבדלים בין חוקרים למורים בנוגע לחשיבות לימוד המושגים הבסיסיים בננוטכנולוגיה במדעים בתיכון. כלומר, שתי הקהילות הגיעו להסכמה. אבל בסבב הראשון נמצאו הבדלים במושגים שהציעו משתתפי שתי הקהילות. המורים העלו את המושג "ממד וגודל" כמושג בסיסי לתלמידי מדע בתיכון. בעוד שבקהילת החוקרים לא חשבו עליו בשלב הראשון של המחקר. החוקרים "חיים" ופועלים בממד הננומטרי, ולכן לא תפסו כי יכולתם של תלמידים להבין סדרי גודל אינה טריוויאלית. המורים אשר השתתפו במחקר הם בעלי ידע פדגוגי וניסיון בהוראת המדעים ולכן העלו את המושג אשר אינו פשוט להבנה, כיוון שבחיי היומיום אין התנסות בסדרי גודל ננומטריים וקשה מאוד לתפוס ולהבין את המשמעות של סדרי גודל כה קטנים. בנוסף למושג סדרי הגודל, המורים היו הראשונים שהעלו את המושג "מיון של ננוחומרים". כמו הטבלה המחזורית המאפשרת למיין את היסודות והמהווה פלטפורמה מארגנת להוראת היסודות בכימיה, גם המושג מיון ננוחומרים מאפשר הכללה ומיון, והוא חשוב מאוד בהוראת ננוטכנולוגיה. המושג השלישי שבו נמצא הבדל בין המורים לחוקרים (בשלב הראשון של מחקר הדלפי) הוא בשיטות ייצור של ננוחומרים. מושג זה הוצע על ידי חוקרים שהשתתפו במחקר ולא על ידי המורים. עבור החוקרים עבודת המחקר במעבדה, הכוללת ייצור ננוחומרים, היא לב עבודת המחקר. לעומת זאת בעיני המורים תהליך הסנתיזה אינו חלק מפרטואר העבודה שלהם. כאמור, בסופו של תהליך הדלפי לא היו

הבדלים בין שתי קבוצות המחקר עבור מושגים אלה. כלומר, שתי הקהילות הגיעו להסכמה לגבי חשיבות שמונת המושגים שהוצגו במאמר. אבל התהליך של שיטת הדלפי אפשר לכל אחת מן הקבוצות לתרום לתוצר המחקר, דבר המעיד על חשיבות ההפריה ההדדית בין שתי קבוצות המחקר ועל התרומה שיכולה להביא כל קבוצה להוראת תחום מדעי חדשני.

## יישום

למיפוי המושגים הבסיסיים בננוטכנולוגיה שחשוב ללמד במדעים בתיכון, יש מספר יישומים בשדה החינוכי:

1. שמונת המושגים שזוהו יכולים לשמש כמדריך לאנשי חינוך מדעי בבניית תוכניות שלמות ומקיפות בננוטכנולוגיה. תוכניות אלה יכולו את כל הממדים החיוניים החשובים להתפתחות החינוך הננוטכנולוגי.
2. המחקרים הננוטכנולוגיים יכולים להתחבר ביחד ליצירת סביבת למידה שיתופית התומכת בהוראת שמונת המושגים הננוטכנולוגיים, סביבה שתגרום להבנה מעמיקה של מושגים אלה.
3. בנוסף רשימת המושגים שעלו במחקר יכולה לשמש כלי לניתוח תוכניות לימודיות קיימות המיועדות לתלמידי מדעים בבית הספר התיכון. שימוש בכלי כזה מאפשר להעריך כל תכנית קיימת בננוטכנולוגיה על מנת לזהות מושגים חסרים בתוכנית המוצעת ולאפשר את השלמתם.

## מחקר המשך

במאמר הנוכחי הוחלט להציג רק את הממצאים עבור המושגים הבסיסיים בננוטכנולוגיה שחשוב ללמד במדעים בבית הספר. המחקר שהתקיים רחב יותר, והוא כלל היבטים נוספים שלא הוצגו במאמר הזה. המחקר התייחס לשאלות הנוגעות לאפליקציות ננוטכנולוגיות החשובות להוראה בתיכון ושימש למיפוי המושגים הנחוצים על מנת ללמד כל אחת מהאפליקציות שעלו במחקר. בנוסף בחנו כיצד ללמד את המושגים הבסיסיים שהוצגו במאמר הנוכחי, בתוכנית הלימודים בכימיה בתיכון מופתה, ובדקנו איפה ניתן לשלב את המושגים שזוהו בתוכנית הלימודים הנוכחית בכימיה. ממצאים אלה יוצגו במאמר המשך אשר יפורסם בעל-כימיה.

Sakhnini, S., & Blonder, R. (2015). Essential concepts of nanoscale science and technology for high school students, based on a Delphi study by the expert community. *International Journal of Science Education*, 37 (11), 1699–1738. doi:10.1080/09500693.2015.1035687

Skulmoski, J. G., Hartman, T. F., & Krahn, J. (2007). The Delphi method for graduate research. *Journal of Information Technology Education*, 6, 1-21.

Stevens, S., Sutherland, L. M., & Krajcik, J. S. (2009). *The big ideas of nanoscale science and engineering*: A guidebook for secondary teachers. Arlington, VA: NSTA Press.

**מקורות**

Blonder, R., & Sakhnini, S. (2016). What are the basic concepts of nanoscale science and technology (NST) that should be included in NST educational programs. In K. Winkelmann & B. Bhushan (eds.) *Global Perspectives of Nanoscience and Engineering Education*, 117-127.

Hutchinson, K., Bodner, G. M., & Bryan, L. A. (2011). Middle-and high-school students' interest in nanoscale science and engineering topics and phenomena. *Journal of Pre-College Engineering Education Research*, 1, 30–39.

Jenkins, E. W. (2006). The student voice and school science education. *Studies in Science Education*, 42, 49-88.

