

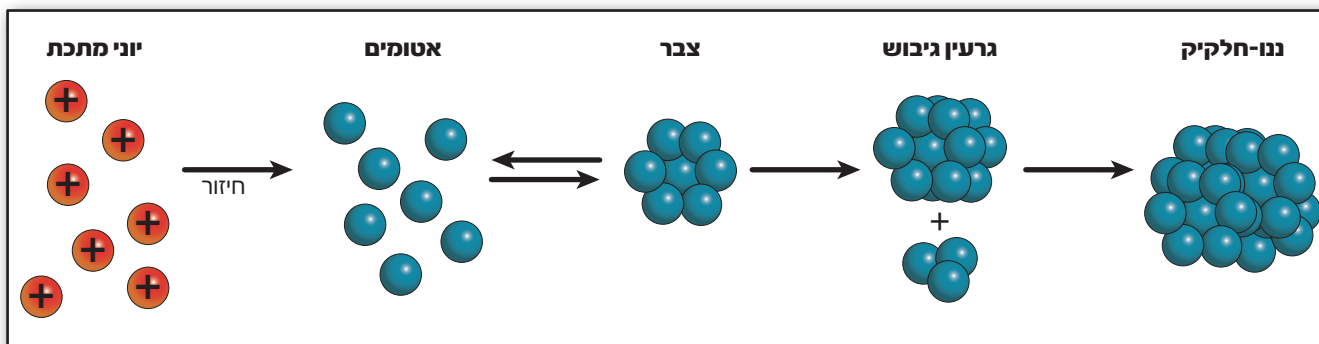
## ננו-חלקיקים ומעגל חשמלי על הנייר - משימת אוריינות

**יוליה שמש**, מורה לכימיה, תיכון שש שנתי "גוונים", עין שמר.



הקורס "כימטק - כימיה בהייטק" הופעל כקורס וירטואלי שהתקיים בו זמנית במכון ויצמן בהנחייתן של ד"ר מלכה יאיון וד"ר שלי ליבנה ובטכניון בהנחיית ד"ר אורית הרשקוביץ. הפעילויות שפותחו בקורס ניתנות להורדה מאתר המרכז הארצי של מורי הכימיה - לחצו על [הקישור](#).

משימת אוריינות לרוב עוסקות בנושא רב תחומי ללא גבולות דיסציפלינריים קשיחים. אוריינות בכלל, ואוריינות בכימיה בפרט, מקנה לתלמידים יכולת להבין מושגים, עקרונות ותהליכים וליישם במצבים השונים בהמשך הלימודים. לפי דו"חות עכשוויים וסקרים למיניהם, תלמידים רבים אינם בוחרים בלימודי הכימיה עקב אי המודעות להיותה מרכיב ידע מרכזי בתחומי תעשיית ההייטק, התרופות, הביוטק ועוד. האוריינות הכימית מאפשרת לתלמידים להכיר את עקרונות הכימיה, לפתח יכולת להשתמש בשפה מדעית ולהבין את הזיקה והרלוונטיות של הכימיה לחיי היום יום של כל אזרח. משימת האוריינות המוצעת פותחה במסגרת הקורס "כימטק - כימיה בהייטק" שהתקיים בחסות המרכז הארצי למורי הכימיה ומכון דוידסון לחינוך מדעי. המטרה העיקרית של הקורס הייתה להעשיר את ידע



איור 1. תיאור מופשט ליצירת ננו-חלקיק.

## ננו-חלקיקים ומעגל חשמלי מוליכות על הנייר - פעילות לתלמיד

תארו לכם שאתם יכולים לצייר תרשים וציור בעט כדורי "רגיל", ושהציור יתנהג כמעגל חשמלי ויוליך זרם!! זה אפשרי וזה כבר קיים! זה מה שעשו החוקרים הצעירים בסרטון הבא ([סרטון 1](#)).

היכולת ליצור דיו חשמלי כזה מבוססת על ננו-חלקיקים של מתכות כמו זהב וכסף.

בפעילות זו נדון בשני סוגי דיו מוליך וננסה להבין את העקרונות הכימיים שעליהם הם מבוססים.

במהלך שני העשורים האחרונים גדל בצורה ניכרת העניין בכימיה של צברים ננו-מטריים המורכבים מחלקיקים שגודלם נע בין 1 ל-100 ננומטר. בעקבות חקר של תכונות הצברים הננו-מטריים חלה פריצת דרך טכנולוגית בתחומים שונים כגון רפואה, אופטיקה ומיקרו-אלקטרוניקה.

אחת השיטות ליצירת ננו-חלקיקים היא ע"י חיזור של יוני מתכת. בתהליך זה נוצרים אטומי מתכת, המתלכדים ליצירת גרעין גיבוש שעליו גדל צבר ננו-מטרי המורכב מעשרות עד מאות אלפי אטומים (איור 1).

תכונות כימיות ופיזיקליות של חומרים המורכבים מננו-חלקיקים מתכתיים הן שונות מתכונות של גושי מתכת גדולים. למשל, צבעם של ננו-חלקיקי זהב תלוי בגודלם, והם יכולים להיראות אדומים, סגולים או כחולים: החלקיקים קטנים כל כך, שהאלקטרונים אינם חופשיים לנוע כמו בגוש זהב, והם בולעים באורכי גל שונים. בנוסף לשינוי בתכונות האופטיות, חל שינוי גם בטמפרטורת ההתכה של חומרים המורכבים מננו-חלקיקים מתכתיים. ככל שהננו-חלקיק קטן יותר, כך גדל אחוז האטומים בפני השטח שלו ביחס לגודלו. לכן אטומים בפני השטח נמצאים במגע עם פחות אטומים שכנים, וצריך

המורים בתרומת הכימיה לתחומי ההייטק, לעבד ולפתח עמם מאגר מגוון של פעילויות למידה הניתנות לשילוב בסילבוס הקיים בכיתות ט'-י"ב. בהתאם לכך, המטרה של משימת האוריינות המוצגת היא לקדם ולהעשיר את הידע הכימי של התלמידים, לפתח אצלם יכולת ללמידה עצמית ויכולת לשימוש במאגרי מידע אלקטרוניים. יתר על כן המשימה מדגישה בפני התלמידים את השילוב בין כימיה לבין תחומי מדע אחרים כמו פיזיקה ואלקטרוניקה, המהווים חלק בלתי-נפרד מחיי היום יום המודרניים.

במשימה המוצעת מוסבר פיתוח חדשני לייצור דיו על בסיס ננו-חלקיקים מתכתיים והדפסה ישירה של חלקים מיקרואלקטרוניים כמו מעגלים חשמליים או טרנזיסטורים. הפעילות מיועדת לתלמידי י"ב שלמדו את המבנית "כימיה פיזיקלית". ניתן לשלב פעילות זו כבר בכיתות י' במסגרת נושא "מבנה וקישור", לאחר שיש היכרות עם נושאים מסוימים כגון סוג תמיסות, חומרים מתכתיים, הולכה חשמלית במתכות וטמפרטורת התכה. במקרה הזה תהווה המשימה פעילות העשרה בנושא "ננו-חלקיקים".

אסכם ואגיד כי פיתוח משימת אוריינות זו בשיתוף מנחות הקורס (ד"ר מלכה יאיון וד"ר שלי ליבנה) היווה חוויה מאתגרת עבורי. תחום של הייטק בכלל, ושל ננו-חלקיקים בפרט, הוא לא פחות חדש לי מאשר לתלמידים עצמם. הסקרנות והרצון שלי להכיר את הכימיה המודרנית בכל תחומיה והיבטיה הובילו לפיתוח משימת אוריינות זו.

אני מקווה שבעקבות פעילות זו ופעילויות נוספות המוצעות באתר המרכז הארצי, ייחשפו התלמידים לעולם העשיר והמגוון של כימיה ויבינו את חשיבותה של הכימיה בתחומי העיסוק והחיים השונים.

הפעילות לתלמיד מוצגת כאן, וגם ניתנת להורדה, בנוסף להנחיות למורה [בקישור הבא](#).

חלקיקים מתקבצים, מתקרבים ועוברים איחוי בקלות. היתרון בשיטה זו הוא היכולת להדפיס על מצע בעל טמפרטורת התכה נמוכה מאוד כמו פלסטיק או נייר!

## שאלות

4. **תארו** ברמת החלקיקים את היכולת של המתכות להוליך זרם חשמלי במצב צבירה מוצק.
5. טמפרטורות התכה של מתכות שונות הן גבוהות. לעומת זאת טמפרטורות התכה של ננו-חלקיקים מתכתיים יורדות בצורה משמעותית.
  - א. ציירו מודל של סריג מתכתי.
  - ב. התייחסו ליון חיובי פנימי לעומת אחד הנמצא בשטח הפנים. איזה מהם קל יותר להזיז? מדוע?
  - ג. ננו-חלקיקים כוללים חלקיקים קטנים שגודלם נע בין 1 ל-100 ננומטר. בטאון: 1 ננומטר ו-100 ננומטר ביחידות של מטר.
6. באיור 4 נתונים שני חומרים הבנויים משני סוגי ננו-חלקיקים 1 ו-2.
  - א. חשבו את אחוז האטומים בפני שטח ביחס לסה"כ האטומים בכל חלקיק.
  - ב. קבעו לאיזה חומר תהיה טמפרטורת התכה נמוכה יותר? מדוע?
7. הביטו ב-3 האיורים באיור 5, המציגים בצורה מופשטת את תהליך האיחוי ללא חימום של ננו-חלקיקים מתכתיים שפותח על ידי חוקרים מהאוניברסיטה העברית, בהנחיית פרופ' שלמה מגדסי.
  - א. סדרו את האיורים לפי שלבים של איחוי.
  - ב. תארו במילים שלכם מה מייצג כל איור.
8. בטקסט מוזכרות 2 שיטות לייצור מוליכים מודפסים.
  - א. בנו טבלת השוואה בין שתי השיטות כדי לקבוע איזו מהן עדיפה. תנו כותרת לטבלה.
  - ב. בשתי השיטות מופיע שלב האיחוי. מדוע דרוש שלב האיחוי? הסבירו.
9. צפו בסרטון המופיע בקישור הבא ([סרטון 2](#)). הסרטון מתאר המצאה של "סוללת נייר": טובלים נייר בדיו על בסיס ננו-חלקיקים מתכתיים, מייבשים לצורך איחוי ומקבלים מוליך על נייר. חשבו והציעו שני יתרונות לפחות להמצאה זו. לאחר סיום הפעילות, דונו עם הכיתה על הרעיונות שלכם.

**עבודה נעימה!**

להשקיע פחות אנרגיה כדי להזיז אותם. כתוצאה מכך חלה ירידה בטמפרטורת ההתכה של חומרים אלה!

התכונות המיוחדות של חומרים המורכבים מננו-חלקיקים מתכתיים מוצאות ביטוי בתעשיות רבות כמו תעשיית המיקרו-אלקטרוניקה. לדוגמה, יצירת מעגלים חשמליים על גבי נייר או פלסטיק, כתחליף לייצור מעגלים חשמליים מחוטי מתכת.

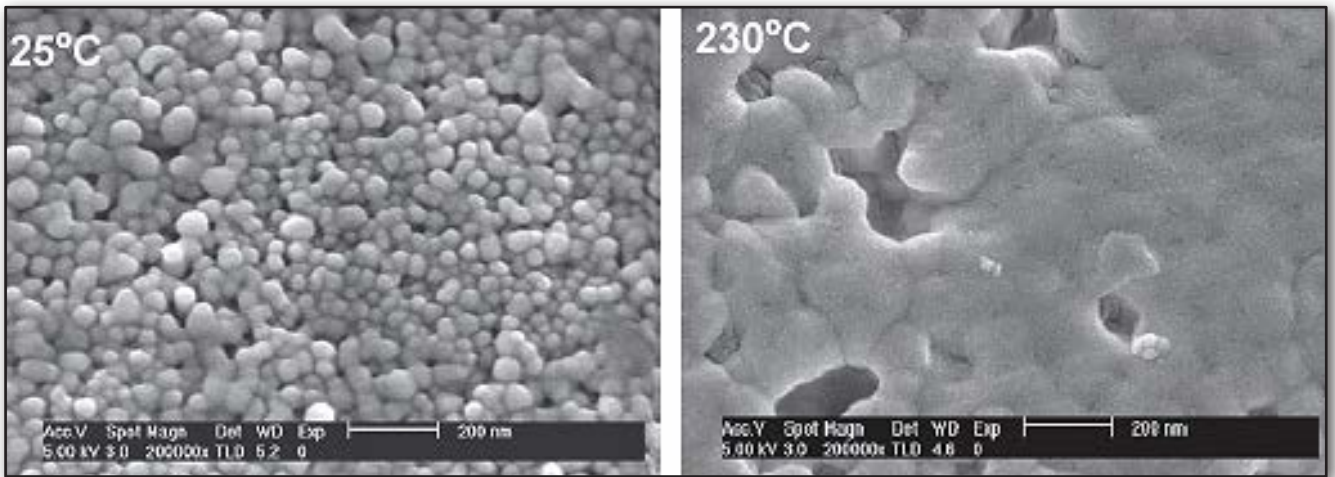
אחת השיטות לייצור מעגלים חשמליים אלו היא הדפסת דיו מתכתי במדפסות הזרקת דיו. איור 2 מציג אנטנה המיועדת לכרטיס חכם ("smart card") שהודפסה במדפסת הזרקת דיו משרדית ומורכבת מננו-חלקיקי כסף.



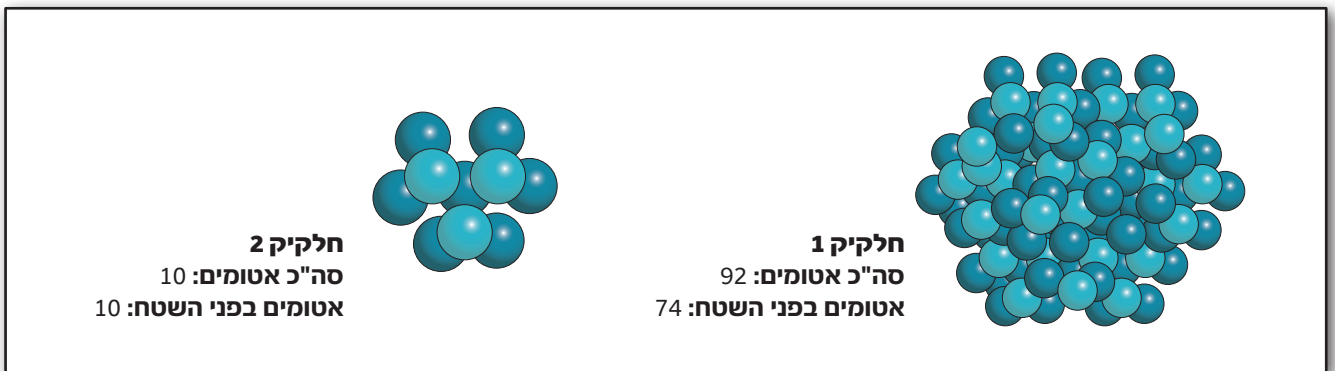
**איור 2.** אנטנה (באורך 7 ס"מ) המודפסת בדיו המכיל ננו-חלקיקי כסף מורחפים במים.  
\* האיור נלקח מתוך על-כימיה גיליון מס 12 עמוד 8.

אנטנה זו מורכבת מננו-חלקיקי כסף, שארוזים בצורה צפופה. כיוון שיש צורך בקבלת מוליכות במקטעים אלו, יש ליצור רצף רחב ככל האפשר בין הננו-חלקיקים. אחת הדרכים להשגת מטרה זו היא חימום האנטנה המודפסת, כך שהחלקיקים יעברו תהליך איחוי. בחינת ההשפעה של חימום האנטנה על החלקיקים ע"י מיקרוסקופ אלקטרוני סורק (SEM) המוצגת באיור 3, מראה כי למרות שטמפרטורת ההתכה של כסף היא  $961^{\circ}\text{C}$ , החלקיקים עוברים איחוי כבר בטמפרטורה של  $230^{\circ}\text{C}$ .

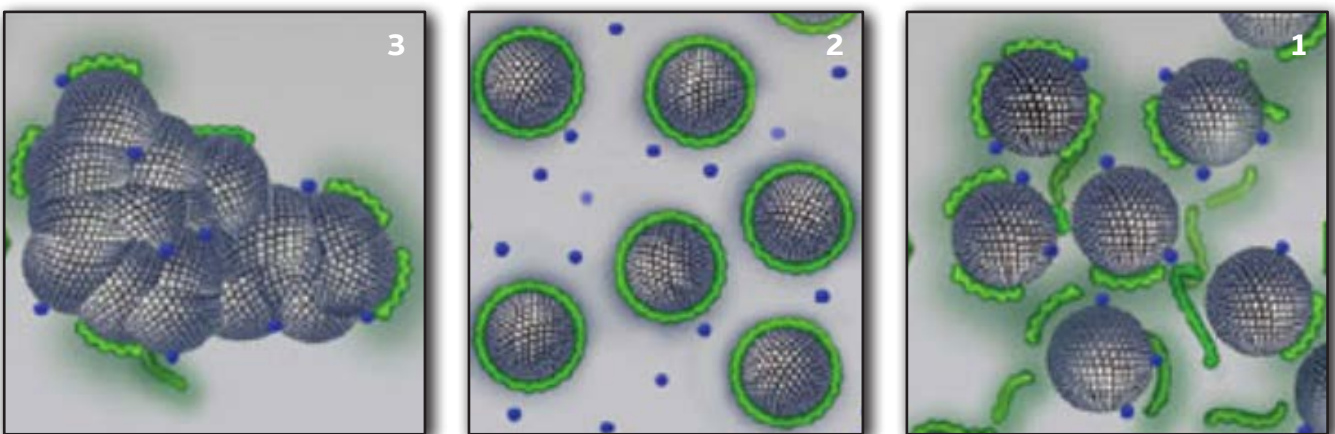
שיטה נוספת לייצור מעגלים חשמליים מודפסים פותחה על ידי חוקרים מהאוניברסיטה העברית, בהנחיית פרופ' שלמה מגדסי. שיטה זו כוללת שימוש בתחליב שיוצר איחוי עצמי בין ננו-חלקיקים ברגע שההדפסה מתייבשת בטמפרטורת החדר. תחליב זה מכיל ננו-חלקיקים של כסף ואלקטרוליט פשוט כמו מימן כלורי (HCl) או נתרן כלורי (NaCl). לפני שנוצר התחליב, ננו-חלקיקי הכסף נמצאים בצורה של צברים בודדים העטופים בפולימר מייצב. הפולימר מונע מהננו-חלקיקים להידבק זה לזה. האלקטרוליט בתחליב גורם לפירוק שכבת הפולימר המייצב. בהמשך, בעקבות הרחקת יוני הכלוריד מהאלקטרוליט, מורחקים מפני השטח של הננו-חלקיקים אטומים מייצבים שהיו צמודים ליוני הכלוריד. על-ידי כך הננו-



**איור 3.** תמונת SEM של ננו-חלקיקי כסף בפני שטח אנטנה מודפסת, בטמפ' החדר ולאחר חימום ל-230°C. \* האיור נלקח מתוך על-כימיה גיליון מס 12 עמוד 8.



**איור 4.** מבנה סכמטי של 2 ננו-חלקיקים. האיור מתייחס לשאלה 6.



**מקרא:** ננו-חלקיק מתכתי (גlobe), פולימר מייצב (blue dot), אלקטרוליט (green filament)

**איור 5.** תהליך האיחוי ללא חימום של ננו-חלקיקים מתכתיים שפותח על ידי חוקרים מהאוניברסיטה העברית, בהנחיית פרופ' שלמה מגדסי. האיורים לא מסודרים בהכרח בסדר הנכון. האיור מתייחס לשאלה 7.