

# כימיה והוראת הכימיה במבט לעתיד

פרופ' רון בלונדר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

70 שנה לעצמאות מדינת ישראל, 70 שנה של כימיה בישראל ו-70 שנה של הוראת הכימיה בישראל. לאורך 70 שנותיה הראשונות של מדינת ישראל היו הכימיה והוראת הכימיה תמיד על סדר היום הלאומי. ימיה הראשונים של מדינת ישראל משתלבים בפיתוחים כימיים, אולי אף תלויים בהם ובאנשי מפתח מדיניים שהיו גם כימאים כדוגמת חיים ויצמן, הנשיא הראשון של מדינת ישראל. גם בתקופות קשות המשיכה מדינת ישראל לתמוך במחקר המדעי ולייחס חשיבות לפיתוח הכימיה בישראל. וכך תחום הכימיה ממשיך להתפתח לכיוונים חדשניים מניב מחקרים פורצי דרך, הצלחות ואף פרסי נובל בכימיה.

אבל חגיגות ה-70 נותנות גם הזדמנות לבחון את המצב של הכימיה והוראת הכימיה כפי שהוא כיום ואף את הכיוונים העתידיים בתחומים אלה. כימיה והסביבה שבה היא נלמדת משתנות באופן מתמיד. במאמר זה ארצה להציג כמה אפשרויות להתפתחות עתידית של תחום הכימיה, כדי שנוכל להתכונן באופן מיטבי לקראת השנים הבאות. וכן כדי להשיב לתלמידים ששואלים אותנו: "האם הכול כבר ידוע בכימיה או עדיין יש אתגרים חדשים?". ובכן, המאמר הנוכחי נועד גם להאיר את הדרך על כיוונים חדשים בתחום של הוראת הכימיה. התחזיות המוצגות במאמר זה מבוססות על מחקרים וסקרים (רשימת המקורות מפורטת בסוף המאמר) שנעשו בשנים האחרונות ואשר נועדו להצביע על המגמות העתידיות של מדעי הכימיה. אין מדובר בחיזוי העתיד באמצעות "כדור בדולח" אלא בניתוח שיטתי של העשייה העכשווית המתחשב במגמות חדשות שככל הנראה ילכו ויתחזקו.

## התפקיד של מדעי הכימיה - חיוני ומקושר

כימיה נקראת כבר היום "המדע המרכזי" בשל תפקידה המשמעותי בתוך תחומים רבים ומגוונים ומאוד. אנו צופים כי הכימיה תהפוך בין-תחומית יותר באופן שיוביל לאפשרויות פיתוח חדשניות מבוססות כימיה. המגמה הבין-תחומית מתאפיינת בכך שמדעי הכימיה יהפכו יותר ויותר למדעים של "פתרון בעיות". הבין-תחומיות והחיוניות של מדעי הכימיה ניתנות להמחשה בקשר של הכימיה עם מדעי החיים. ככל שהמחקר הביולוגי מגיע לחקר ולהבנה בסיסית יותר, כלומר, להבנה ברמה המולקולרית של המתרחש במערכות הביולוגיות, כך הביולוגיה מתקרבת למדעי הכימיה. היינו, הכימיה נמצאת בתוך המחקר של מדעי החיים, ומאפשרת לחוקרים בתחום לפתור את הבעיות עימן הם מתמודדים. בהקשר של הבין-תחומיות של מדעי הכימיה, חשוב לשים לב לכך שהכימיה לא תהפוך להיות מדע נלווה לדיסציפלינות השונות, אלא תהיה גורם מוביל של המחקר והחדשנות.



תמונה: Shutterstock, Dimitriy Razinkov and Vadim Almiev

## השפעה של הכימיה - מתן מענה למטרות פיתוח בנות קיימא

בשנת 2015 הציבו האומות המאוחדות (UN) 17 מטרות פיתוח בנות-קיימא (Sustainable Development Goals, SDGs), אשר אומצו בשנת 2017 בהחלטת האסיפה הכללית של האומות המאוחדות. הרעיון הוא להציב מטרות פיתוח שיענו על הצרכים העכשוויים של האנושות בלי התפשרות על היכולות לענות על הצרכים של הדורות הבאים. ה-SDG הן מטרות גלובליות ובין-לאומיות, הן בהיקפן והן בחשיבותן, והן כוללות מטרות שהמענה להן עתיר כימיה. למשל, מטרה SDG13 עוסקת בשינויי האקלים הקשורים למעגל הפחמן ולריכוזי פחמן דו-חמצני משתנים כמו גם במשתנים שונים המשפיעים עליהם. מטרה SDG7 עוסקת באנרגיה נקייה, מטרה SDG3 עוסקת במאמץ לקידום הבריאות, מטרה SDG2

עוסקת בהעלמת הרעב. דוגמה נוספת היא מטרה SDG6 אשר עוסקת במים נקיים. מדעי הכימיה יהפכו יותר ויותר נחוצים לפתרון הבעיות המרכזיות העולמיות הללו.

המקום המרכזי של מדעי הכימיה במתן מענה לאתגרים המרכזיים הללו מציב את כימאי העתיד כשחקנים מרכזיים בתוך צוותים בין-תחומיים הכוללים כימאים, מדענים מתחומי שונים וכן מומחים מתחום הרוח והחברה. וזאת בהתאם לתפיסה שהאתגרים הגלובליים הללו נוגעים להיבטים שונים בחברה ובכדור הארץ. לשינויים אלה השלכות על הוראת הכימיה בכל הרמות. בנוסף לביסוס חזק ועמוק בהוראת התכנים המרכזיים של הכימיה, הכיוון הבין-תחומי של מדעי הכימיה צריך להשתלב בתוך תוכנית הלימודים. נחוצה גישה שלפיה הוראת הכימיה עצמה ממחישה את שילוב הכימיה בתחומים השונים כגון ביולוגיה, רפואה, חישוביות, אנרגיה ועוד.

## גלובליזציה ותחרות

ניתוח המגמות העולמיות העוסקות בדרישת השוק לכימאים במדינות שונות, מעלה כי הדרישה הגלובלית למומחים בתחום מדעי הכימיה תוביל לעלייה בביקוש לכימאים בעיקר במדינות בעלות כלכלה צומחת (כגון סין). מדינות אלה משקיעות משאבים רבים בפיתוח תחום הכימיה. על מנת להיות שחקן מוביל בתחרות הגלובלית, ישראל - שכ-20% מן התל"ג שלה מבוסס על תעשיות הכימיה והקשורה קשר הדוק עם החדשנות והמחקר באקדמיה - צריכה להשקיע משאבים בשימור מקומה המרכזי בעולם בתחום הכימיה. שימור המעמד החזק של מדינת ישראל בתחום הכימיה חייב גם לכלול המשך וחיזוק שיתופי הפעולה הגלובליים במחקר ופיתוח בכימיה.

הנושא של הגלובליזציה ושיתופי הפעולה הבין-לאומיים יכול להשתקף ולהיבנות כבר בתקופת הלימודים. תוכניות בין-לאומיות לחילופי סטודנטים במסגרת האיחוד האירופי (כגון: TEMPUS, ERASMUS+) מציעות כבר היום לסטודנטים לכימיה להיחשף ללמידת התחום במדינה אחרת במסגרת שיתופי פעולה בהוראת הכימיה. תוכניות אלה יכולות להיות מותאמות גם למורי הכימיה ובכך לאפשר למורי הכימיה הבנה של תהליכי הגלובליזציה וחשיפה להוראת התחום במדינות שונות שאותה יוכלו להעביר לתלמידיהם (ראו לדוגמה)<sup>1</sup>.

## התפתחויות טכנולוגיות - מובילות לחדשנות במדעי הכימיה

ההתפתחות המואצת של הטכנולוגיה תשפיע על הכימיה כפי שאנו מכירים אותה היום. המחקר הכימי שהיום מזוהה ברובו עם עבודת מעבדה, יעבור בעיקרו אל מחקר הנעשה באמצעים טכנולוגיים ממוחשבים. האופן שבו מתקיים המחקר, כמו גם הצדדים הארגוניים שלו, ישתנו וישפיעו על הקריירה של כימאים. שיתופי פעולה יכלו להתקיים בזמן אמת תוך כדי עבודה על מאגרי נתונים משותפים או פתוחים. כאשר נתוני המחקר יהיו פתוחים לכול, ישתנו גם כללי המשחק של הפרסום המדעי. העיתונים המדעיים שכיום פתוחים רק לקהילה המדעית שמנויה עליהם, יהפכו לעיתונים הפתוחים לכול ויגישו את הגישה לידע הכימי המתפתח במחקר. באמצעות פתיחה והנגשה של מחקר בכימיה יתאפשר מעבר לתקופה שבה סודיות וחשדניות יוחלפו במידע פתוח אשר יוביל לכך פורה לשיתופי פעולה. פתיחה ושיתוף של מאגרי מידע ופרסומים מדעיים ישפיעו גם על העוסקים בתחום הוראת הכימיה, תחום שיצטרך להדגיש את האספקט של מהימנות מקורות המידע וכן את חשיבות היכולת להשתמש במקורות המידע כדי ללמוד ולחקור. זהו אחד מן התפקידים החדשים שהוראת הכימיה צריכה לקחת על עצמה כדי להתאים את הבוגרים לצרכים העתידיים של העוסקים בתחום מדעי הכימיה.

## הנושאים המרכזיים שבהם תעסוק הכימיה

ההתפתחות הטכנולוגית, הגלובליזציה, הבין-תחומיות והרלוונטיות להשגת המטרות הגלובליות מובילות למספר נושאים מרכזיים שבהם יעסקו מדעי הכימיה. נציין כאן ארבעה נושאי מחקר נבחרים, אשר נושאים בחובם את השינויים הצפויים שתוארו לעיל.

**ריפוי ולא רק טיפול.** כימאים הם אלה שמפתחים תרופות חדשות ודרכים חדשניות להשתמש בהן. בעשייה הזו הכימאים נעזרים בביולוגים ובחוקרי רפואה כדי לבחון את השפעתן. האתגר הגדול בפיתוח תרופות הוא לפתח תרופות חדשות לריפוי ולא רק לטיפול. פיתוח כזה של תרופות למחלות ויראליות, למשל, יוביל לעולם ללא איידס, ולעולם שבו מחלת האיבולה אינה מועברת על ידי עקיצת יתוש. פיתוח של תרופות לריפוי מחלת הסרטן, ממחלות לב, מסוכרת, מסכיזופרניה וממחלות גנטיות.

**חומרים לניצול מיטבי של אנרגיית השמש.** אנו זקוקים לחומרים עם תכונות משופרות. חומרים מוליכי חשמל בעלי תכונות של מוליכי-על בטמפרטורות קרובות לטמפרטורת החדר, על מנת שניתן יהיה להוליך חשמל ממקור המתח לנקודות המשתמשים, בלי הפסדים הנגרמים מהתנגדות התיל המוליך. כאשר חומרים אלה יפותחו נוכל לייצר חשמל מאנרגיית השמש במדבריות ולהוביל אותו למקומות שבהם הוא נחוץ. מובן שפיתוח חומרים לתאים סולאריים משופרים יעשה אז חיוני יותר. חומרים שממירים ביעילות את אנרגיית השמש לאנרגיה חשמלית, חומרים המסוגלים לתקן ולרפא בעצמם פגמים ושברים. כיום אנו משתמשים למעשה באנרגיית השמש של העבר בכך שאנו משתמשים בפחם וגז ליצור

<sup>1</sup> [http://chemcenter.weizmann.ac.il/\\_Uploads/dbsAttachedFiles.30-48/?SearchParam%=D7%92%D7%A8%D7%A0%D7%95%D7%91%D7%9C](http://chemcenter.weizmann.ac.il/_Uploads/dbsAttachedFiles.30-48/?SearchParam%=D7%92%D7%A8%D7%A0%D7%95%D7%91%D7%9C)

חשמל. אך באמצעות פיתוח חומרים חדשים אנו יכולים לרתום את קרינת השמש הנוכחית לייצור החשמל ובכך להפחית את ממדי ההתחממות הגלובאלית וזיהום האוויר.

**מערכות ולא חומרים.** אתגר נוסף של מדעי הכימיה הוא המעבר מהתמקדות בחומר אחד, למערכות מורכבות יותר שבהן חומרים נמצאים באינטראקציה זה עם זה. מערכות שמתארגנות בעצמן בהתבסס על שיקולים תרמודינמיים. ניקח לדוגמה את מולקולת ה-DNA, אשר המבנה שלה ידוע כבר מעל ל-50 שנה. המידע המבני על המולקולה הבודדת, מורכבת ככל שתהיה, לא מספיק כדי להסביר כיצד החיים עובדים, כיצד הם משתקפים בתוך מולקולת ה-DNA וכיצד ניתן ללמוד ולחקות את הפעילות שלה. בעתיד יוכלו כימאים לבנות מכונות מולקולריות, מערכות המורכבות ממספר מולקולות, שיכולות בעצמן לתפקד ולייצר מערכות מולקולריות, והבסיס לכך כבר כאן כפי שניתן לראות בפרס הנובל בכימיה לשנת 2016<sup>2</sup>.

**כימיה ירוקה.** מדעי הכימיה ניצבים בפני אתגר נוסף, אתגר שאינו נחלת המדעים האחרים - לשאת באחריות להשפעת החומרים שהכימאים מייצרים, על מנת למנוע תופעות לוואי אפשריות וגם כדי להגן על הסביבה, האוויר והמים מפני תופעות של זיהום לא צפוי. כימאים צריכים להבין את ההשלכות הללו ולמנוע בעיות שעלולות להתעורר בעקבות פיתוח של חומרים חדשים. האתגר הזה לא קיים בדיסציפלינות אחרות, שהרי לא קיים מושג מקביל לכימיה ירוקה כגון: אסטרונומיה ירוקה, או אלגברה ירוקה.

## הקמדת האנושי - הייחודיות של מדעי הכימיה והוראת הכימיה

על מנת שמדעי הכימיה לא יהפכו לתחום המושפע מן התחומים שאליהם הכימיה מתחברת, אלא תחום מדעי מוביל ובעל ייחודיות פנימית אשר מוביל חדשנות ויצירתיות, ועל מנת שהכימיה תוכל להיות כימיה ירוקה - על הכימאים להבין שבעתיד עליהם לקחת על עצמם שלושה תפקידים: הראשון הוא המשך פיתוח של ידע חדש בתחום הכימיה; השני הוא תרגום הידע הזה ליישומים ושימושים מועילים; והשלישי הוא סיוע ומתן מענה למשברים ובעיות גלובליות. בעוד ששני התפקידים הראשונים הם תפקידים מסורתיים של הכימיה לאורך השנים, הרי שהתפקיד השלישי הוא תפקיד חדש יחסית שימשיך גם בעתיד.

העיסוק בתפקידים אלו של הכימאים בעתיד משפיע גם על הוראת הכימיה. לפיכך על האמונים על הוראת הכימיה להרחיב את לימודי הכימיה ולא לתחום אותו לממדים צרים מדי. כדי להיות מסוגלים לפתח חומרים חדשים לרפואה, כימאים נדרשים להבין ביולוגיה מודרנית יחד עם ההתמחות שלהם בכימיה אורגנית ובכימיה אי-אורגנית. כימאים הממציאים חומרים חדשים צריכים יסודות חזקים בפיזיקה של מצב מוצק וכימיה פיזיקלית, יחד עם הידע שלהם בכימיה אורגנית וכימיה אי-אורגנית. כלומר, מקצוע הכימיה צריך להמשיך להיות מקצוע רחב עם נקודות חיבור מובנות בתוכו לתחומים רבים אחרים שעליהם הוא משפיע. כאשר הציפייה מן הכימאים בעתיד היא לתת מענה בעת משבר או להיערך באופן שימנע אותו, עליהם לקבל הכשרה מתאימה גם בהיבט הזה. הנושא של מדע וחברה וסוגיות אתיות הכרוכות בחיבור הוא למעשה ההיבט האנושי של הכימיה.

"ההיבט האנושי" הוא רמת הבנה נוספת שיש לשלב בהוראת הכימיה. כיום אנו מדברים על שלוש רמות הבנה המאפשרות להבין כימיה ונחוצות בהכשרה של הוראת הכימיה: הרמה המקרוסקופית העוסקת בתופעות הכימיות ובתכונות החומרים; הרמה המיקרוסקופית היא הרמה של האטומים והמולקולות אשר מתחברות למערכות מתפקדות ומגיבות בתגובות כימיות; והרמה השלישית היא רמת הסמל, הרמה אשר באמצעותה הכימאים מתקשרים ביניהם את המדע שהם עושים. הרמה האנושית היא הרמה הרביעית הנחוצה לכימיה בעתיד, והיא כוללת בתוכה את כל המורכבות הנובעת מן הקישוריות של מדעי הכימיה לתחומי ההשפעה שלה.

אמחיש את ארבע רמות ההבנה בדוגמה מתוך נושא הנמצא בפיתוח של מחקר עכשווי וגם רלוונטי לתוכנית הלימודים בכימיה בבית הספר התיכון בארץ - נושא הסוכרים בחלב, וליתר דיוק: אוליגו-סוכרים בחלב אם.

לאחרונה התגלה כי חלב אם מכיל אוליגו-סוכרים (סוכרים הבנויים משרשרת של מספר חד-סוכרים, אך קצרים מרב-סוכר, מורכבים מכ-4-10 יחידות של חד-סוכר). התגלית הזו היא תגלית ברמת המיקרו. נעשתה אנליזה של מרכיבי חלב האם והיא הובילה לתגלית, שאותה תיארו במאמרים באמצעות שרטוט המבנים של האוליגו-סוכרים שנמצאו. ברמת התופעה, החוקרים ניסו למצוא הסבר להימצאות סוג זה של סוכר בחלב אם. כיוון שחלב אם מכיל רק את המרכיבים החיוניים להתפתחות התינוק. אולם התברר כי במערכת העיכול של התינוק האוליגו-סוכרים הללו לא ניתנים לפירוק. מסתבר כי הפלורה בקיבת התינוק בנויה מחיידקים שניזונים מאוליגו-סוכרים אלה. כאשר חיידקים אלה מקבלים את האוליגו-סוכרים הם משגשגים, ושגשוג זה מוביל לאיזון בין סוגי החיידקים השונים בפלורה של מעי התינוק באופן שמפחית את כאבי הבטן שמהם סובלים התינוקות. בנוסף להסברים המדעיים בשלוש רמות ההבנה שתוארו לעיל, למחקר יש קשר לרמת ההבנה הרביעית, הרמה האנושית. התגלית הובילה לצורך של פיתוח סינתזות יעילות של אוליגו-סוכרים, ולאחר פיתוח זה הוספו אלה כתוספי מזון לתחליפי חלב לתינוקות. ולכך יש משמעות חברתית חזקה של השתלבות אימהות כשוות בשוק העבודה. כלומר, לעשייה המדעית של הכימאים יש השלכה מידית על הורים בעלי תינוקות, השפעה שיכולה להשפיע על אורך חופשת הלידה ולאפשר לנשים שבחורות בכך לחזור לעבודה בלי לפגוע בתזונת התינוק. דוגמה נוספת הם הפיתוחים של חומרים לבניית תאים סולאריים משופרים, אשר הוצגו קודם. ניתן לתאר את המדע העומד מאחורי בסיס הפיתוח של חומרים אלה בשלוש רמות ההבנה, וקל לדמיין כיצד פיתוח זה משפיע על הממד האנושי הכולל: אספקטים של זיהום אוויר וסביבה, אספקטים של ניתוק תלות במדינות שהן ספקיות דלקים פוסיליים וכדומה.

<sup>2</sup> <http://chemcenter.weizmann.ac.il/Uploads/dbsAttachedFiles.29-6/pdf>

אין לי ספק שהאתגרים העומדים בפני כימאי העתיד הם גדולים ומרתקים, כמו גם האתגרים העומדים בפני העוסקים בחינוך כימי. אבל יש דבר אחד שאני בטוחה בו - אני רוצה להיות בסביבה כדי לראות את כל זה קורה! וללמד את כימאיי העתיד.

## ביבליוגרפיה

Apotheker, J., Blonder, R., Akaygun, S., Reis, P., Kampschulte, L., & Laherto, A. (2017). Responsible Research and Innovation in secondary school science classrooms: experiences from the project Irresistible *Pure and Applied Chemistry* (Vol. 89, pp. 211).

Bertozzi, C. R., Chang, C. J., Davis, B. G., Olvera de la Cruz, M., Tirrell, D. A., & Zhao, D. (2016). Grand challenges in chemistry for 2016 and beyond. *ACS Central Science*, 2(1), 1-3. doi:10.1021/acscentsci.6b00010

Breslow, R. (2016). Perspectives: Back to the future of chemistry. *Chemical and Engineering News*, 94(18), 28-29.

Mahaffy, P. (2015). Chemistry education and human activity. In J. Garc'ia-Mart'inez & E. Serrano-Torregrosa (Eds.), *Chemistry education: Best practices, opportunities and trends* (pp. 3-26). Weinheim, Germany: Wiley-VCH.

Matlin, S. A., Mehta, G., Hopf, H., & Krief, A. (2016). One-world chemistry and systems thinking. *Nat Chem*, 8(5), 393-398. doi:10.1038/nchem.2498

Palermo, A. (2016). *Future of the chemical sciences*. Retrieved from <http://www.rsc.org/campaigning-outreach/campaigning/future-of-the-chemical-sciences/>

Sustainable Global Goals. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>

Towns, M. H. (2013). New guidelines for chemistry education research manuscripts and future directions of the field. *Journal of Chemical Education*, 90(9), 1107-1108. doi:10.1021/ed400476f