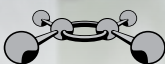


70 שנות כימיה לאנחנו



המרכז הארצי
למורי הכימיה



מינהלת מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי וטכנולוגי
על-שם עמוס דה-שליט



מדינת ישראל
משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
אגף א' למדעים
הפיקוח על הוראת הכימיה





עורכת אחראית אורחת: **רותי שטנגר**, המרכז הארצי למוריה הכימיה, המחלקה להוראת המדעים ומכון דוידסון לחינוך מדעי, מכון ויצמן למדע
ruth.stanger@weizmann.ac.il

- מערכת: - ד"ר דבורה קצביץ, מנהלת המרכז הארצי למוריה הכימיה
- ד"ר רחל ממלוק-נעמן, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע
- ד"ר דורית טייטלבוים, מפמ"ר כימיה
- פרופ' רון בלונדר, ראש קבוצת הכימיה, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע
- ד"ר מירי קסנר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע
- ד"ר שלי ליבנה, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

יעוץ מדעי: **פרופ' ליאור קרוניק**

עריכה לשונית: **נדין קלברמן**

גרסת אינטרנט: **ד"ר שלי ליבנה**

עריכה: **אבי טל**

עיצוב גרפי: **זיו אריאלי**

עיצוב שער: **זיו אריאלי**, עם תמונה מ-Shutterstock, gNesher

כתובת המערכת: המרכז הארצי למוריה הכימיה, מכון ויצמן למדע, רחובות 76100

הפרויקט מבוצע עפ"י מכרז 09/07.13 עבור המזכירות הפדגוגית, משרד החינוך. © כל הזכויות שמורות - משרד החינוך

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאחרים במאגר מידע, לשדר או לקלוט בכל דרך או אמצעי אקלטרוני, אופטי או מכני או אחר כל חלק שהוא מהחומר שבחוברת זו. שימוש מסחרי מכל סוג שהוא בחומר הכלול בחוברת זו אסור בהחלט אלא ברשות מפורשת בכתב מהמוציא לאור.



המחלקה להוראת המדעים

**המרכז הארצי
למוריה הכימיה**



מינהלת מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי טכנולוגי
על-שם עמוס דה-שליט



מדינת ישראל
משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
אגף א' לסדעים
הפיקוח על הוראת הכימיה



תוכן העניינים

3	דבר העורכת - רותי שטנגר
4	70 שנות כימיה במדינת ישראל -דבר המפמ"ר - ד"ר דורית טייטלבוים
6	במבט היסטורי
7	"הכימיה היא ענייני האישי,עניין שבו אני נח מפעילותי הציבורית" - ליאור הכט יעקבי וד"ר נטע מעוז
12	המכון לכימיה באוניברסיטה העברית בירושלים: החלוץ ואבי אבות הכימיה בישראל - פרופ' אמריטוס ששון צחייק
17	בתי הנחושת בחיפה - רותי שטנגר
19	אמנות - כלת מלח , סיגלית לנדאו ויותם פרום
20	מחקר
21	תרופת הקופקסון - ריאיון עם פרופסור מיכאל סלע - ד"ר רחל ממלוק-נעמן
23	מה חשוב יותר במדע - ההצלחה או הכישלון? - פרופ' עודד שוסיוב
25	איך מכניקת הקוונטים יכולה להשפיע על ניקיון הקרקע? - פרופ' רון נעמן
27	זיהוי מחלות בעזרת נשיפה באמצעות מערך חיישנים ננומטריים - ד"ר יואב ברזזה ופרופ' חוסאם חאיק
32	שירה - מלח , פרופ' אבנר טריינין ז"ל
33	פיתוחים וחומרים חדשים בהדפסות תלת-ממד, ד"ר מיכאל לאיאני ופרופ' שלמה מגדסי
38	מרכז בלווטניק לפיתוח תרופות - ד"ר חמוטל (טלי) אנגל, ד"ר אדי פיצ'נוק וד"ר אבי רוזה
41	חומרים מגיבים לאור בשירות הרפואה - אלונה שגן ופרופ' בעז מזרחי
44	מה הקשר בין כימיה לפטיש? - פרופ' צ'רלס דיזנדרוק ואור גלנט
47	אמנות - כמיקל ג'רוזלם , אליהו אריק בוקובזה
48	כימיה והוראת הכימיה במבט לעתיד - פרופ' רון בלונדר
52	הוראת הכימיה
53	התפתחויות בהוראת המדעים ובהוראת הכימיה בישראל - ד"ר דורית טייטלבוים, וד"ר רחל ממלוק-נעמן
59	מסע בזמן - אגודה להשתלמות במדע, 1944
60	ארבע שאלות לארבעה חתני פרס נובל לכימיה - רותי שטנגר
63	ננו-חלקיקים ברשת - אמילי אלחכם
65	אמנות - מאיוט קפסיה וחסר פיגמנט , אביב גרינברג

66	סקירות רוחב
67	פרס ישראל בכימיה - ד"ר מירה קיפניס
70	שבעים השנים הראשונות של התעשייה הכימית הישראלית - ד"ר גלעד פורטונה
76	ההתפלה בישראל - ד"ר שרית בסון
80	הכימיה בשירות מדעי כדור הארץ - גיאוכימיה - ד"ר יהודית הרלבן
86	מדע והנדסת קורוזיה בישראל - ד"ר אליק גרויסמן
92	קצת אחרת
93	על חמצן ומעבדן, על חיזור ועל פלמור - כימיה בעברית - רות גדיש
99	בולאות כימית - שיחה עם פרופ' צבי רפופורט על כימיה בבולים ישראלים - רותי שטנגר
106	הכימיה מאחורי החברות
107	80 שנות זיקוק, 70 שנות עצמאות - בזן
111	חברת ההזנק Bactusense, ריאיון עם אייל יוסקוביץ, מנכ"ל החברה - רותי שטנגר
114	חברת ההזנק Inspecto, ריאיון עם אבנר אבידן, מנכ"ל החברה - רותי שטנגר
116	חברת סול-ג'ל, ריאיון עם עופר טולדנו, סמנכ"ל המו"פ של החברה - רותי שטנגר
119	חברת Watergen - איריס טולידנו
121	מסע בזמן - אינסטיטוט לכימיה אינדוסטריאלית, 1931
122	מסע בזמן - משך זמן הלמודים - קבלת מתלמידים יום יום, 1929

דבר העורכת

70 שנה למדינה - זמן להתבוננות אחורה, לסיכום, למבט קדימה.

לכבוד שנת ה-70 יזמו המרכז הארצי למורי הכימיה ומפמ"ר כימיה במשרד החינוך את הוצאת העיתון "70 שנות כימיה" - גליון מיוחד של "על-כימיה".

עיתון זה אינו מתיימר להציג את מכלול הנושאים הקשורים ל"70 שנות כימיה". המאמרים שנקבצו הם תוצאה של רעיונות שעלו ושל כותבים נפלאים שנענו לאתגר - ותודתנו נתונה להם.

אוסף המאמרים כולל כמה מאמרים בהיבט היסטורי, תיאור מחקרים של חוקרים ותיקים וצעירים בתחומים שונים של הכימיה, סקירות רוחב על השינויים והתמורות שעברה התעשייה הכימית בארץ לאורך השנים, על ההתפתחויות בהוראת הכימיה בישראל, על פעילות המכון הגיאולוגי בתחום המחקר הגיאוכימי וחשיבותו למדינה, וסקירות נוספות, סיפוריהן של חברות ותיקות ושל חברות הזנק (start-up) בראשית דרכן, מאמר המתאר את האתגר של האקדמיה ללשון העברית בחידוש מילים עבריות בכימיה, ועוד מאמרים רבים. בין כל אלה שזורות מספר יצירות אמנות של אמנים ישראלים שלעבודותיהם יש קשר כזה או אחר לכימיה ומוזדעות מן העבר הקשורות ללימודי הכימיה בארץ.

מאמרים אלה משתקפים השינויים החלים בתחום הכימיה בארץ: ממפעלי כימיה מסורתיים, לתחומים המשלבים כימיה וטכנולוגיות חדשות, לשיתופי פעולה בין כימאים ובעלי מקצועות רבים אחרים ולקשר הדוק בין מחקרים אקדמיים חדשניים לתעשייה.

אני מקווה שהקריאה בעיתון זה תלווה אתכם זמן רב בהנאה.

קריאה נעימה!

רותי שטנגר, עורכת העיתון

תודה לכל כותבי המאמרים ולאנשים נוספים שעזרו, בירו, קישרו והיפנו.

אם שכחתי מישהי או מישהו - עמם הסליחה.

מאלק אגבריה, דורון אברהנד, יובל אסיף, פרופ' יצחק אפלייג, עידו ארוך, אסתי בן-שוען, אולגה גרויסמן, ד"ר רעית גרליץ, ד"ר דורית טייטלבוים, משפחת טריינין, ד"ר שלי ליבנה, אורן מגדל, גלעד ממלוק, ד"ר רחל ממלוק-נעמן, ד"ר נועה סרי, ד"ר מירי קסנר, ד"ר דבורה קצביץ.

70 שנות כימיה במדינת ישראל - דבר המפמ"ר

ד"ר דורית טייטלבוים, מנהלת תחום דעת כימיה, המזכירות הפדגוגית, משרד החינוך

כימיה - מנוע צמיחה משמעותי למדינת ישראל!

מורים וקוראים יקרים,

חגגנו השנה - שנת תשע"ח, 2018 - 70 שנה למדינת ישראל. 70 שנה של התפתחות אדירה במדינת ישראל, שינויים כבירים שאין דומה להם בעולם. בגיליון זה החלטנו להתבונן לעומק על השינויים שחלו בתחום הכימיה במהלך השנים הללו.

כידוע, מקצוע הכימיה הוא מדע העוסק בחומרים מהיבטים שונים ומגוונים עוד משחר ההיסטוריה, והכול לתועלת האדם והאנושות. התעשייה הכימית הוקמה בישראל עוד טרם קום המדינה. כדוגמה ניתן לציין את מפעלי ים המלח שהוקמו בשנת 1929. במהלך 70 שנות המדינה צמחה בישראל כלכלה אדירה של מגוון תעשיות כימיות הכוללות: תעשיית כימיה כבדה, תעשיית הייטק מבוססת-כימיה, תעשיית תרופות, תעשייה המבוססת על משאבי טבע ייחודיים, הנמצאים בישראל, תעשיית מזון, תעשיית חומרים מרוכבים, תעשיית פלסטיק ועוד ועוד.

כל אלו משפיעים על כלכלת המדינה, על עוצמתה ועל חסינותה. כיום ידוע כי 20% מהתמ"ג (התוצר המקומי הגולמי) של מדינת ישראל - מקורו בתעשיות הכימיות השונות, ואחת מכל חמש משפחות במדינת ישראל מתפרנסת בזכות התעשייה הכימית על כל גווניה. נתונים אלו נמסרו על ידי הוועדה הבינלאומית להערכת איכות שהקימה המועצה להשכלה גבוהה (המל"ג), אשר בחנה את מצב הפקולטות לכימיה במוסדות האקדמיים בישראל. בדו"ח הכללי¹ שהגישה הוועדה הבינלאומית הודגשה חשיבותו של תחום הכימיה למדינת ישראל וערכו העצום לכלכלתה ולבטחונה.

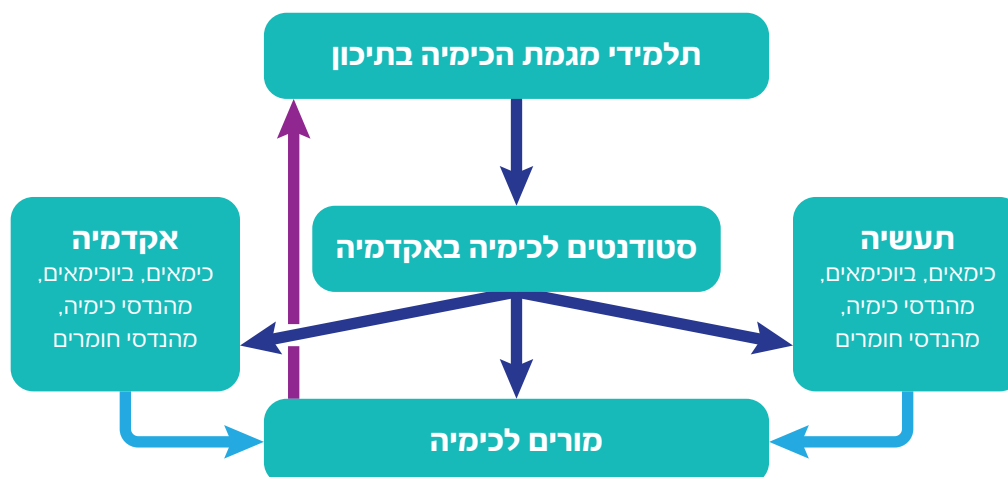
כמי שמפקדים על החינוך של ילדי ישראל, מוטל עלינו לשאול מה תפקידנו בעניין זה? כיצד עלינו לפעול כמחנכים כדי להמשיך ולשמר את מה שנעשה בתחום הכימיה בישראל? כמי שמפקדת על הוראת הכימיה בישראל, אני סבורה כי התפקיד שלנו במערכת החינוך הוא לזמן לתלמידים היכרות מעמיקה עם תחום הידע כימיה, אבל לא פחות חשוב מכך -

לחשוף את התלמידים לתעשייה הכימית ולתחום הכימיה באקדמיה, כולל תחומי ידע עתירי כימיה באקדמיה. בהכירנו בחשיבותה הגדולה, עלינו לומר בפה מלא: **כימיה היא מנוע צמיחה משמעותי למדינת ישראל.**



ידוע לכול כי לימודי הכימיה בתיכון בכלל והמורה לכימיה בפרט, משפיעים על תלמידים בבואם לבחור במסלול של לימודי כימיה באקדמיה, כולל תחומים שאינם תחומי כימיה מובהקים אלא תחומי דעת שהלימודים בהם עתירי כימיה, ובהם לומדים כימיה בעיקר בשנה הראשונה באקדמיה. אפשר למנות כדוגמה את התחומים הבאים: רפואה, פרה-רפואה, רוקחות, ביולוגיה, חקלאות, הנדסת מכונות, הנדסת ביוטכנולוגיה וכו"ב. המשמעות היא כי כל הסטודנטים הלומדים לתואר עתיר כימיה, חייבים להגיע לאקדמיה עם ידע בכימיה כדי להשלים בהצלחה את לימודיהם לתואר הנכסף. הידע הבסיסי בכימיה הנדרש לסטודנטים העתידיים נלמד בבית הספר התיכון.

לאור האמור לעיל, אפשר להתבונן על הרשת של שילוב מקצוע הכימיה במערכות שונות: כימיה באקדמיה, כימיה בתעשייה, כימיה במערכת החינוך, כימיה בכלכלה ועוד. כל המערכות הללו קשורות בקשר הדוק זו בזו. האחת מזינה את האחרת וההשפעה היא הדדית כמתואר באיור הבא:



באיור לעיל אפשר לראות כי אם נבחן את הקשר בין המערכות השונות כאשר אנו מתחילים ממערכת החינוך בבתי הספר התיכוניים, אזי תלמידי מגמת הכימיה בתיכון הם אלו שיהיו רוב הסטודנטים בתחומי הכימיה באקדמיה. עם סיום לימודיהם הסטודנטים יכולים לפנות לאפיקים שונים: לתעשייה, לאקדמיה או להוראת כימיה בבתי ספר. המורים ישפיעו על תלמידי הכימיה בתיכון בסוגיית המשך לימודיהם באקדמיה, וחוזר חלילה. לכן יש לחזק את הקשר בין המערכות השונות, לבחון אותו לעומק ולהציע רעיונות נוספים להידוק הקשרים.

לסיכום, מדינת ישראל חזקה ואיתנה חייבת לשמר את תחום הכימיה בכל המערכות הקיימות: מערכת החינוך, האקדמיה, התעשייה, הרפואה, התרופות, ההייטק, ההנדסה, המזון, הפלסטיקה ועוד ועוד. תחום הכימיה הוא מנוע צמיחה משמעותי למדינת ישראל.

1. <http://che.org.il/wp-content/uploads/2012/07/General-Report1.pdf>



תמונה: maradon 333, Shutterstock

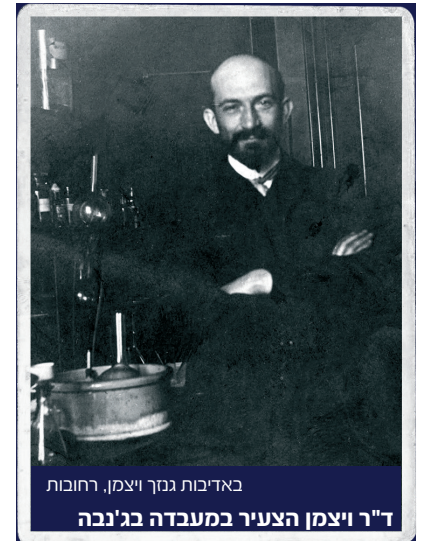
במבט היסטורי

"הכימיה היא ענייני האישי, עניין שבו אני נח מפעילותי הציבורית"¹

ליאור הכט יעקבי וד"ר נטע מעוז, גנזך ויצמן, יד חיים ויצמן, רחובות

בספרו האוטוביוגרפי "מסה ומעש" מספר ד"ר חיים ויצמן על שתי האהבות הגדולות בחייו: המדע והציונות. בנוסף להיותו נשיא המדינה הראשון ומנהיג ציוני היה ויצמן מדען בעל שם עולמי, ממציא גדול שרשם מעל 220 פטנטים בתחומים שונים ובין הביוטכנולוגים הראשונים שפעלו בעולם המדעי. בספרו מעיד ויצמן כי עבודתו במעבדה הופרדה מפעילותו הציבורית, אך ממרחק הזמן יש באפשרותנו לבחון אם שתי הדרכים שבהן התמקד נעו בקווים מקבילים או דווקא הצטלבו לעיתים קרובות והביאו להישגים מדעיים ומדיניים כאחד.

חיים ויצמן נולד למשפחה אורתודוקסית בעיירה קטנה בתחום המושב ברוסיה. הוריו, עוזר ורחל-לאה, היו אנשי תנועת ההשכלה ועודדו את ילדיהם, שניים עשר במספר, לרכוש השכלה וידע. כמו מרבית ילדי היהודים במזרח אירופה החל ויצמן בגיל חמש את לימודיו בחדר. הוא התגלה כתלמיד מצטיין ועבר לעיירה הסמוכה, פינסק, לבית ספר ריאלי, שם נחשף לראשונה למדעים המדויקים. הוא המשיך ללימודים גבוהים. באוניברסיטת פרייבורג סיים את לימודי הדוקטורט בהצטיינות יתרה בשנת 1899.² באותה שנה עבר ויצמן לאוניברסיטת ג'נבה, שם עסק במחקר ובהוראה. במועדון הסטודנטים היהודים פגש את אשתו לעתיד, ורה חאצמן, אשר למדה רפואה ולימים עבדה כרופאת ילדים ובהמשך חייה פעלה רבות במגוון ארגונים לטובת הציבור.



באדיבות גנזך ויצמן, רחובות

ד"ר ויצמן הצעיר במעבדה בג'נבה



באדיבות גנזך ויצמן, רחובות

ד"ר ויצמן ולורד בלפור בבנימין

במקביל להתקדמותו בעולם האקדמי פעל ויצמן בזירה נוספת, התנועה הציונית. בשנת 1904 קיבל משרת הוראה ומחקר באוניברסיטת מנצ'סטר באנגליה אצל פרופסור פרקין והחל לקדם את רעיונותיו המדיניים, בראש ובראשונה דרך הקמת רשת חברתית ענפה. רשת זו כללה לא רק שותפים ציונים, אלא גם עיתונאים, אנשי עסקים, תעשיינים, אינטלקטואלים ומנהיגים בריטיים.³ קשרים חברתיים ומקצועיים אלה עזרו לו ויצמן בהמשך למנף את המצאתו המדעית - הפקת אצטון בצורה יעילה ומהירה מזו הקיימת בשוק - להישג מדיני בדמות הצהרת בלפור. הצהרה זו שהיא למעשה מכתב שנשלח משר החוץ הבריטי, ארתור ג'יימס בלפור, לוולטר לוין רוטשילד ב-2 בנובמבר 1917, הייתה הכרה ראשונה של האימפריה הבריטית בזכותו של העם היהודי להקים בית לאומי בארץ ישראל.

¹ חיים ויצמן לורה חאצמן, 30.7.1902, 43-15, גנזך ויצמן, יד חיים ויצמן, רחובות.

² עבודת הדוקטורט של ויצמן עסקה בהפקת חומרי צבע למכוניות: Electrolytic Reduction of Nitroanthraquinone and the Condensation of Phenanthrene-quinone with Phenols.

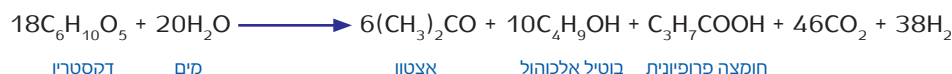
ינואר, 1899, 10A-1, גנזך ויצמן, יד חיים ויצמן, רחובות.

³ מוטי גולני, "הרשת החברתית של ויצמן", בתוך: מאיר חזן ואורי כהן (עורכים), ויצמן מנהיג הציונות, הוצאת מרכז זלמן שזר לחקר תולדות העם היהודי, תשע"ו 2016, עמ' 209.

בשנים הראשונות של המאה העשרים החלו הכימאים להתעניין בהפקת גומי מלאכותי, עקב המחסור הצפוי בגומי טבעי, כאשר המטרה הייתה למצוא מונומרים - חומרי מוצא המכילים קשר כפול, אשר יכולים להתפלמר למקרומוולקולות. עיקר העבודה התמקדה בשימוש בחיידקים כדי לייצר חומרי מוצא אלו. במכון פסטר בפריז עבדו על ריאקציות תסיסה שבהן מפעילים חיידקים על דגנים המכילים פחמימנים לקבלת אלכוהול, שממנו אפשר לייצר מונומר לפלמור. חוקרי מכון פסטר עבדו בעיקר על התססת תפוחי אדמה עם חיידק שהיה כבר ידוע באותה תקופה, שבודד מהאדמה, וקיבלו אצטון וכוהל בוטילי.

ויצמן הצליח לבודד מהאדמה חיידק שהתסיס את העמילן שבתירס והיה פעיל גם בנוכחות חמצן וגם בטמפרטורות גבוהות יחסית לעומת התהליך שהיה ידוע קודם שפותח על ידי פרופסור פרנבאך ממכון פסטר בפריז.

התהליך המלא הוא:⁴



בתהליך מתקבל כוהל בוטילי שניוני, ועל ידי הוצאת מולקולות מים מתקבלת מולקולה עם קשר כפול שניתנת לפלמור לגומי מלאכותי ואצטון. בתהליך הפקת האצטון נעשה שימוש תעשייתי, ככל הנראה לראשונה, במיקרואורגניזמים לייצור חומרים כימיים בקנה מידה רחב. במובן זה הייתה עבודתו של ויצמן חלוצית, והוא נחשב לאחד מהמדענים הראשונים של תחום הביוטכנולוגיה.⁵ החיידק שבודד ויצמן נקרא Clostridium Weizmanni Acetobutylicum ואף זכה לכינוי Weizmann organism.

האימפריה הבריטית נקלעה למשבר בייצור אצטון בתקופת מלחמת העולם הראשונה. אצטון הוסף לאבק השריפה במטרה לבטל את שובל העשן שמותיר הפגז ובכך למנוע את גילוי מקור הירי. בעתות שלום הופק האצטון מזיקוק עצים, אך בעת מלחמה היה צורך למצוא דרכים אחרות להפקת אצטון בכמויות גדולות. הדרך שנבחרה הייתה לייצר אצטון בעזרת התהליך של ויצמן. ד"ר ויצמן מונה מטעם האדמירלות הבריטית לעמוד בראש המעבדות לייצור אצטון.



באדיבות גנר ויצמן, רחובות

מעבדת אצטון בריטית

⁴ Commercial Solvent Corporation v Synthetic Products Company, Mr. Justice Romer, Reports of Patent, Design and Trade Mark Cases, Editor: F. G. Hundehay, M. A. Barrister-At-Law, Vol. XLIII No. 7.

⁵ נורית קישר ושאל קציר, "בין כימיה לפוליטיקה: פעילותו המדעית של ויצמן בשנות השלושים והארבעים", בתוך: מאיר חזן ואורי כהן (עורכים), **ויצמן מנהיג הצינונות**, הוצאת מרכז זלמן שזר לחקר תולדות העם היהודי, תשע"ו 2016, עמ' 48.

במשך שנים נהוג היה לעשות חיבור ישיר בין המצאת האצטון של ויצמן לבין הצהרת בלפור. היום ברור שהיו סיבות נוספות למתן ההצהרה, שנבעו ברובן מאינטרסים בריטיים במזרח התיכון במהלך מלחמת העולם הראשונה. עם זאת אין כל ספק שוויצמן היה גורם חשוב ומרכזי במתן הצהרת בלפור, ויתרה מכך פעילותו של ויצמן לביסוסה כמסמך בריטי מחייב עם הכנסתה לכתב המנדט הבריטי, הפכה את ויצמן לאיש מפתח בתנועה הציונית.

בשנת 1920 נבחר ויצמן לכהן כיושב ראש ההסתדרות הציונית העולמית, ולמעשה, היה המנהיג המזוהה ביותר עם התנועה הציונית בשנות העשרים והשלושים. באותן השנים החלו עסקי הכימיה שלו להכניס לו ממון רב, וכך היה באפשרותו לשלב בין עסקיו המצליחים לבין מעמדו הפוליטי, החברתי והכלכלי שרכש לעצמו בימי מלחמת העולם הראשונה.⁶ בשנת 1925 זכה ויצמן להישג נוסף וחשוב ביותר. על הר הצופים בירושלים הוקמה האוניברסיטה העברית, פרויקט שוויצמן עמל עליו שנים רבות עם קבוצת חברים נוספים מהתנועה הציונית שראו בהשכלה ערך עליון.

פעילות ויצמן בשנות השלושים

בשנת 1931 הודח ויצמן מתפקידו כראש התנועה הציונית בעקבות לחצים פנים תנועתיים. הדחתו אפשרה לו לחזור לחיי מעבדה ומחקר פעילים. בשנים אלה לא ניתן היה להפריד את מה שמתרחש במעבדה מהמציאות הציונית שמחוצה לה. הקמתו של מכון המחקר ע"ש דניאל זיו במושבה רחובות, בשנת 1934, היא דוגמה טובה לכך. הבחירה של ויצמן ברחובות איננה מקרית, כמו גם הבחירה להקים את ביתו, הפועל כיום כמוזאון, על הגבעה בסמוך למכון המחקר. באותה העת התגוררו במושבה כ-3,000 תושבים, חלקם התפרנסו מחקלאות, בעיקר מפרדסים, וחלקם ממסחר. במקום פעלה תחנת ניסיונות חקלאית שמטרתה הייתה לסייע לחקלאי ארץ ישראל בפיתוח גידוליהם. בשנים הראשונות של מכון זיו עסקו המדענים ביצירת פתרונות שנדרשו בארץ בתחומים שונים.⁷

בשנת 1935 חזר ויצמן לעמוד בראש התנועה הציונית, אך לא זנח את פעילותו המדעית במכון זיו והיה חלק פעיל ומרכזי בניהולו. ויצמן בחר את המדענים והמדעניות בעצמו, ייעץ, הדריך את מחקריהם ודאג לקבל מהם דוחות תקופתיים על עבודתם. הוא שאף לבסס את מכון זיו כמכון מחקר ברמה גבוהה ולא לעסוק בכיוונים המעשיים של המחקר, אך המציאות של מלחמת העולם השנייה יצרה נקודת מפגש נוספת בין המדע ובין הציונות.



באדיבות גנר ויצמן, רחובות

ד"ר ויצמן במעבדה במכון זיו

⁶ מוטי גולני, שם, עמ' 212.

⁷ אורי כהן, מעבדה, מכון מחקר, עיר מדע ממכון דניאל זיו למכון ויצמן למדע 1934 - 1949, מוסד ביאליק, ירושלים, 2016, עמ' 64 - 66.

מלחמת העולם השנייה

ויצמן ניסה לשחזר את ההצלחה של פטנט האצטון, שסייע לבריטים במלחמת העולם הראשונה, ויחד עם איש אמונו במכון זיו, ד"ר ארנסט דוד ברגמן, פעלו השניים לסייע לבריטים במאמץ המלחמתי בדרכים שונות. בשנת 1940 התמנה ויצמן ליועץ בנושאי כימיה למשרד האספקה הבריטי וקיבל מעבדה קטנה במערב לונדון, שם עבד עם צוות מדענים ועוזרים וגם עם בנו הבכור בנימין (בנג'י) ששוחרר מהצבא הבריטי בעקבות הלם קרב. במקביל הרחיב מכון זיו את פעילותו ובנוסף למחקר אקדמי גבוה פעל גם בתחומי מחקר יישומי בהובלתם של ויצמן וברגמן. הקמתה של חברת תרופות שפעלה במכון נועדה לענות על צורך שבעלות הברית נתקלו בו, כאשר לא ניתן היה לרכוש תרופות מגרמניה. מיזם זה אומנם לא היה מוצלח מבחינה כלכלית, אך הוא פתח צוהר למחקרים דומים במכון לאחר המלחמה.⁸ בזמן מלחמת העולם השנייה היה ביקוש גדול לדלק מטוסים בעלי מספר אוקטן גבוה מ-100, והיה קושי לייצר מספיק טטרא-אתיל - העופרת. ויצמן מצא שתוספת של פחמימנים ארומטיים כמו בנזן, טולואן וקסילן משפרים את הדלק. במיוחד היה חשוב להוסיף לדלק פחמימנים ארומטיים קטוניים. הקטוניים התקבלו מתהליכי תסיסה, מהסוג של אצטון-בוטיל אלכוהול על מולסות של חיטה, תירס, מיץ סוכר וכדומה. מערבוב של דלק רגיל (65%), קטונים (15%) וחומרים ארומטיים (19%) מקבלים דלק עם מספר אוקטן 115. ויצמן עסק גם בפיתוח מוצרים מדלק, שלא נדרש לדלק מטוסים או לשמני סיכה. מדלק כזה מייצרים טולואן (10%), אתיל-בנזן (6%), סטירן שהוא מרכיב עיקרי של גומי סינתטי. 75% מהנפטא הופכים לכימיקלים דרושים ו-25% מוחזרים כדלק.⁹



באדיבות לשכת העיתונות הממשלתית

ד"ר חיים ויצמן מושבע ע"י יו"ר הכנסת יוסף שפרינצק לנשיא הראשון של מדינת ישראל בבניין הסוכנות בירושלים | צילום: אלדן דוד, 17.2.1949

מלבד העבודה המדעית התווה ויצמן קו מרכזי ורשמי בתנועה הציונית בשנות המלחמה: מאבק מדיני בבריטים על מדיניותם בארץ ישראל תוך כדי תמיכה מלאה בפעילותם במלחמה הכוללת. משפחת ויצמן שילמה מחיר אישי כבד כאשר בנם הצעיר של ורה וחיים, מיכאל (מייקל) שהיה טייס בחיל האוויר הבריטי, נעדר לאחר שמטוסו נפל לים התיכון וגופתו מעולם לא נמצאה. כשנה לאחר המלחמה הודח ויצמן מתפקידו בהנהגה הציונית בשנית. אף על פי כן לא הפסיק את פעילותו למען הקמת מדינת ישראל.

בשנת 1949 הוסב שמו של מכון זיו למכון ויצמן בטקס רב רושם, לכבוד יום הולדתו ה-75 של נשיא המדינה, שהושבע לתפקיד בפברואר של אותה שנה. ביום זה היה ברור לנוכחים באירוע כי ויצמן הוא מדינאי ומדען בו זמנית. בחירת התאריך, שניים בנובמבר (יום הצהרת בלפור), ומיקום האירוע במכון המחקר שהקים לא היו מקריים, והם ביקשו להנציח ולהעמיד במרכז את שני עיסוקיו המרכזיים: המדע והציונות.¹⁰ השאלות הפוליטיות

⁸ אורי כהן, שם, עמ' 113.

⁹ חיים ויצמן לאנתוני דרקסל, 19.01.1942, 23-2353, גנזך ויצמן, יד חיים ויצמן, רחובות.

¹⁰ אבנר בן עמוס, "הנצחת חיים ויצמן: נשיא, מדען, פוליטיקאי", בתוך: מאיר חזן ואורי כהן (עורכים), ויצמן מנהיג הציונות, הוצאת מרכז זלמן שזר לחקר תולדות העם היהודי, תשע"ו 2016, עמ' 582.

והמדיניות שעמדו בראש מעיניו חדרו אל המעבדה, עיצבו את הנושאים שאותם חקר ואת ההחלטות שקיבל לגבי התנהלות המחקר. במובן זה ניתן לראות את ויצמן לא רק כאדם שתרם רבות להקמתה של מדינת ישראל,¹¹ אלא כמי שדאג לעיצוב פניה החברתיים, הכלכליים והמדעיים כאחד.

ביבליוגרפיה

ארכיון

גנזך ויצמן, יד חיים ויצמן, רחובות

ספרות עברית

1. אבנר בן עמוס, "הנצחת חיים ויצמן: נשיא, מדען, פוליטיקאי", בתוך: מאיר חזן ואורי כהן (עורכים), **ויצמן מנהיג הציונות**, הוצאת מרכז זלמן שזר לחקר תולדות העם היהודי, תשע"ו 2016, עמ' 575 - 612.
2. אורי כהן, **מעבדה, מכון מחקר, עיר מדע ממכון דניאל זיו למכון ויצמן למדע 1934 - 1949**, מוסד ביאליק, ירושלים, 2016.
3. חיים ויצמן, **מסה ומעש**, הוצאת שוקן, תש"י, 1949.
4. יהודה ריינהרץ, **חיים ויצמן בדרך אל המנהיגות**, הוצאת הספריה הציונית על יד ההסתדרות הציונית העולמית, ירושלים תשמ"ז.
5. מוטי גולני, "הרשת החברתית של ויצמן", בתוך: מאיר חזן ואורי כהן (עורכים), **ויצמן מנהיג הציונות**, הוצאת מרכז זלמן שזר לחקר תולדות העם היהודי, תשע"ו 2016, עמ' 209 - 226.
6. נורית קישר ושאול קציר, "בין כימיה לפוליטיקה: פעילותו המדעית של ויצמן בשנות השלושים והארבעים", בתוך: מאיר חזן ואורי כהן (עורכים), **ויצמן מנהיג הציונות**, הוצאת מרכז זלמן שזר לחקר תולדות העם היהודי, תשע"ו 2016, עמ' 413 - 440.

ספרות אנגלית

1. Commercial Solvent Corporation v Synthetic Products Company, Mr. Justice Romer, Reports of Patent, Design and Trade Mark Cases, Editor: F. G. Hundehay, M. A. Barrister-At-Law, Vol. XLIII No.7.



באדיבות גנזך ויצמן, רחובות

מעבדת אצטון בריטית

¹¹ יום לאחר הכרזת בן גוריון על הקמת מדינת ישראל, כותבים מספר נציגים של מועצת המדינה הזמנית לחיים ויצמן: "אנו מברכים אותך להקמת המדינה העברית אשר מכל האנשים החיים אתנו איש לא תרם כמון להיווצרותה." דוד בן גוריון, אליעזר קפלן, גולדה מאירסון, דוד רמז ומשה שרתוק לחיים ויצמן, 15.05.1948, 1-2830, גנזך ויצמן, יד חיים ויצמן, רחובות.

המכון לכימיה באוניברסיטה העברית בירושלים: החלוץ ואבי אבות הכימיה בישראל

פרופ' אמריטוס ששון צחייק¹, המכון לכימיה, האוניברסיטה העברית בירושלים



באדיבות האוניברסיטה העברית בירושלים

תמונה 1: המכון לכימיה, מראה משער האחוזה

הקדמה

ב-2014 בקשני ראש המכון לכימיה דאז, פרופ' סנדי רוכמן, לכתוב על ההיסטוריה של המכון כחלק מסדרת מאמרים דומים בעיתון החברה הישראלית לכימיה [1]. תגובתי האינסטינקטיבית היתה "כן" ואחריה נתקפתי בפניקה. איך כותבים היסטוריה על מקום ואנשיו שרובם כבר אינם בין החיים, באין חומר כתוב, שגם אם קיים כזה בשנתונים, הרי שמדובר בבלייל פרטים משמימים.

נקודת המפנה הייתה זיכרון עמום מספרו של עגנון, "שירה", אשר בו המחבר מתאר באופן מדויק את האוניברסיטה ומשרטט בעט מושחזת את הפרופסורים שרובם מגיעים אליה מגרמניה וממזרח אירופה, וחלקם פליטים שמגיעים לאזור בעקבות "חוקי העבודה" של המשטר הנאצי.

נזכרתי בקטע הנוגע ללב שבו הרבסט (גיבור הסיפור), פרופסור להיסטוריה באוניברסיטה העברית, מהלך ברחובות רחביה ולפתע הוא רואה לפניו את הפרופסור הנודע שהזריק לעצמו פאראזיטים כדי לחקור את השפעתם על גוף האדם. מלא יראת כבוד, הרבסט מחווה קידה ונושק לידו של אותו פרופסור. זהו שאול אדלר הפאראזיטולוג הנודע. וכך בין מכלול הדמויות הפרופסוריות שעגנון מקל בערכם, יש כאלה כמו אדלר אשר אליהם הוא חש יראת כבוד עמוקה. פתאום היה בידי רקע מעניין לסיפור של האוניברסיטה העברית.

¹ sason.shaik@gmail.com

פרופ' ששון צחייק ניהל את מרכז מינרבה לכימיה חישובית ע"ש ליזה מייטנר ואף היה אחד ממקימיו. תחומי המחקר שבהם הוא עוסק כוללים קישור כימי וריאקטיביות, ממולקולות קטנות ועד למטלו-אנזימים וקולטנים עצביים. בנוסף לקורסי הכימיה הרגילים הוא מלמד גם קורס כימיה לסטודנטים שאינם כימאים שבו הוא מרצה על היופי והרלוונטיות של הכימיה וכן נותן הרצאות על ההיסטוריה של הכימיה.

התחלתי בקריאת כמויות עצומות של חומר על הרקע ההיסטורי והתרבותי של המאה ה-19 ואילך. המשכתי בשיחות רבות עם קולגות באוניברסיטה העברית ובמוסדות אחרים, כדי לשבץ את העובדות בצורה נכונה ככל האפשר. מה שנגול לפניי בתהליך הצטייר כסיפור מופלא, סיפור שבו החזון מנצח את המציאות ואת הסיכויים הנראים כאבודים.

מאחר שאני חובב סיפורים טובים, חשתי שאני חייב לכתוב את הסיפור. בתרגום חופשי קראתי לסיפור "בין שני הרים" (כרמז על הר הצופים וגבעת רם) ופרסמתי אותו בירחון החברה הישראלית לכימיה [1]. אני מביא כאן את קיצורו של סיפור זה.

חלום האוניברסיטה היהודית

בקצרה, האוניברסיטה העברית נוסדה באופן רשמי ב-1925 באחד באפריל מעט אחרי הטכניון. אך המכון לכימיה הקדים את שניהם ונוסד במרץ 1923, כשנתיים לפני הקמת האוניברסיטה. אשר על כן, המכון לכימיה הוא בית הספר הראשון בחבל הארץ שהיה קרוי פלסטינה המנדטורית והיום מדינת ישראל.

אבל סיפורנו מתחיל בפלסטינה העותמנית. בשנת 1882 מתמטיקאי בשם הרמן שפירו כותב בעיתון "המליץ" מאמר על הצורך באוניברסיטה יהודית. הוא חוזר על הרעיון בקונגרס הציוני הראשון וזוכה לתמיכתו הנלהבת של חיים ויצמן.

ב-1902 חיים ויצמן, מרטין בובר וברטהולד פייבל כותבים עלון שכותרתו Eine Jüdische Hochschule, ומציגים את העלון בקונגרס הציוני. השלושה טוענים שאוניברסיטה יהודית תגרום לרנסנס בחיים האינטלקטואליים של היהודים. הם משתמשים במוטו של רבן יוחנן בן זכאי "תנו לי את יבנה וחכמיה", אשר אותו עתר לרומאים שזה עתה הרסו את המקדש השני והחריבו את ירושלים. ובמקום המפלט הזה הוא ברא מחדש את העם היהודי כ"עם הספר".

ויצמן ושותפיו לדרך נתמכים ע"י אחד העם והרצל. אבל ככלל, הרעיון מתקבל בגיחוך, כרעיון אוטופי ולא מציאותי עד כדי ילדותיות. אך ויצמן אינו אחד שמוותר, הוא מנצח בוויכוח, אחר כך הכול מתגלגל במהירות, והדרך להקמת האוניברסיטה (ובה בין השאר המכון לכימיה) סלולה.

השתלשלות המאורעות בקצרה

- ב-1908 משריין ויצמן תרומה מפילנתרופ רוסי בשם יצחק לייב גולדברג.
- ב-1914 נקנית פיסת קרקע על הר הצופים מהלורד גריי-היל.
- ב-24 ביולי 1918 מניח ויצמן את אבני הפינה של האוניברסיטה העברית על הר הצופים.
- ב-1 באפריל 1925 מתקיים טקס הפתיחה הרשמי של האוניברסיטה העברית בהר הצופים.
- אבל כבר ב-1923 נוסד המכון לכימיה באוניברסיטה, והוא המכון הראשון מסוגו בחבל הארץ המנדטורי. ייסוד המכון לכימיה מקדים את ייסוד המדינה ב-25 שנים.



באדיבות האוניברסיטה העברית בירושלים

תמונה 2: טקס הנחת אבני הפינה לאוניברסיטה העברית ב-24 ביולי 1918. חיים ויצמן עומד משמאל לחופה, בחליפה שחורה וכובע לבן.

- משנת 1925 ואילך נוסדים מכונים נוספים, והאוניברסיטה גדלה במהירות. וכך, בדיוק כמעשה יוחנן בן זכאי, יוצרים ויצמן ושותפיו לדרך מפלט אינטלקטואלי בלבו של חבל ארץ אשר תואר על ידי הסופר והמשורר הרמן מלוויל כ-"גיהנום אפוי ולא נושב.... במיוחד ירושלים" [1].

הנחת אבני הפינה וייסוד האוניברסיטה העברית

כדי להעריך את עוצמת החזון, כדאי להתבונן בתמונה 2 המציגה את טקס הנחת אבני הפינה ב-24 ביולי 1918. כאן נראה ויצמן עומד על קרקע עפרורית באחוזה גריי-היל, לבוש בחליפה ומעונב בקיץ הלוהב של יולי בירושלים. לשמאלו עומד, קרוב לוודאי, הגנרל אלנבי בחליפה לבנה, ומימינו המופתי כמאל אמין אל חוסייני.

ויצמן נושא נאום ואומר כי זה יכול להיראות פרדוקסלי שעל אדמה חרבה ושוממה המייחלת לדברים פשוטים כמו מחרשה, אנו מתחילים על ידי יצירת מרכז להתפתחות אינטלקטואלית ורוחנית. אבל כמו שהוא ממשיך ואומר, אין זה כלל פרדוקס עבור היהודים לבנות עתיד על יסודות אינטלקטואליים.

בהתחשב בכך שב-1918 העותמנים והאנגלים לוחמים זה בזה במלחמת העולם הראשונה, והעותמנים עדיין לא נסוגו לחלוטין, כל האירוע נראה הזוי למדי: אוניברסיטה לפני צרכים בסיסיים?! איזה חזון נועז, מופלא ובלתי יאמן!

החזון הזה מתגשם גם בתנופת עשייה שכוללת בין השאר את הקמת המכון לכימיה (1923) בראשות אנדור פודור והמחלקה למיקרוביולוגיה ופאראזיטולוגיה (1924), בראשות שאול אדלר. העשייה ממשיכה ומתעצמת עם טקס הפתיחה רב-המשתתפים שאותו מתאר ויצמן בחוש הומור מושחז [1].

ייסוד המכון לכימיה



באדיבות האוניברסיטה העברית בירושלים

תמונה 3: הצילום הראשון באוניברסיטה העברית צולם ב-1924. חברי המכון לכימיה ובראשם פודור (מימין בחליפה לבנה) והאורח ויצמן (במרכז). בניין המכון לכימיה ברקע.

כאמור, ויצמן דוחף להקמת מחלקה למדעי הטבע באוניברסיטה העברית, בניגוד לרצון הרוב שמעדיף מדעי יהדות ורוח. הוא משיג את מבוקשו. איינשטיין שהיה ב"חבר השוחרים" תומך ביוזמה של ויצמן. החלוץ הוא המכון לכימיה אשר בראשו עומד פרופסור צעיר בשם אנדור פודור המגויס על ידי ויצמן ואיינשטיין מאוניברסיטת Hale בגרמניה, שבה כיהן כמרצה וכאסיסטנט של הכימאי הנודע אבדרהלדן שעסק בכימיה של קולואידים.

פודור מגיע לירושלים במרץ 1923 ובידו 10,000 פאונד שנתרמו על ידי רוטשילד. בשטח "האוניברסיטה" אין עדיין בניינים המתאימים למכון מדעי, ופודור עושה הכול בעצמו. הוא מגייס ארכיטקטים, בנאים, טכנאים (כמו נפחי זכוכית) ואסיסטנטים. עד מהרה כספו אזל, אבל איכשהו, בניין הכימיה עומד על תלו בקיץ 1924. באותה השנה מצולמת התמונה הראשונה באוניברסיטה, אשר מצורפת כתמונה 3. שימו לב לתמונה החגיגית ולאורח הכבוד של המכון, חיים ויצמן, הנראה גאה למדי ביציר רוחו שהפך למציאות.

ב-19 בינואר 1924 שולח פודור לדפוס מאמר שכתב יחד עם האסיסטנט שלו אברהם רייפנברג (כימאי שמגיע מברלין). המאמר מתפרסם ב-1925 בעיתון בינלאומי, Biochemical Journal. המאמר הזה, שפרטיו נראים כאן בתמונה 4, הנו המאמר הראשון בכימיה שיוצא מחבל הארץ הזה.

Biochem. J. 1925, 19(2): 188-193

XXVI. STUDIES ON THE NATURE OF THE PROCESS OF GERMINATION. A NEW METHOD FOR THE DETERMINATION OF PROTEINS BY MEANS OF ADSORPTION APPLIED TO THE DECOMPOSITION OF PROTEINS IN GERMINATION PEA SEEDS.

By ANDOR FODOR and A. REINFENBERG.

From the Institute of Biological and Colloidal Chemistry Hebrew University, Jerusalem.

(Received January 19th, 1924.)

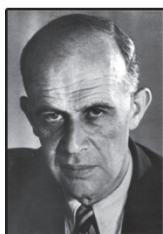
תמונה 4: פרטי המאמר שנשלח לדפוס ע"י פודור ורייפנברג ב-19 בינואר 1924.

אנא שימו לב לתאריכים: פודור מגיע במרץ 1923 לאוניברסיטה שעדיין לא קיימת וכבר ב- 19 בינואר 1924, היינו שמונה-תשעה חודשים לאחר הגיעו, הוא כבר מצליח לנהל מחקר עם אסיסטנט ולשלוח מאמר מסכם לדפוס, וכל זאת תוך כדי השקעת מאמצים להקים את בניין הכימיה ולאיץ אותו באסיסטנטים וטכנאים. בעיניי זה מדהים!

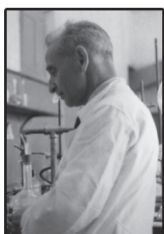
תמונה 5 מראה את פודור ועוזריו העיקריים: מקס בובטלסקי, משה ויצמן, מקס פרנקל ואברהם (אדולף) רייפנברג. מלבדם מונה המכון אסיסטנטים נוספים שלא מן המניין, ואשר אחרי 1926 כבר אינם מופיעים בשנתוני המכון. זוהי אם כן השדרה העיקרית של המכון לכימיה בשנותיו הראשונות.

Prof. Andor Fodor

1923



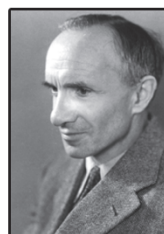
Adolf Abraham
Reifnberg
1924



Max Frankel
1923



Moshe Weizmann
1923



Max Bobtelsky
1923

באדיבות האוניברסיטה העברית בירושלים

תמונה 5: המכון לכימיה בין השנים 1923-1926. למעלה פרופסור אנדור פודור, מתחתיו מימין לשמאל האסיסטנטים: מקס בובטלסקי, משה ויצמן, מקס פרנקל, ואדולף אברהם רייפנברג.

בשנת 1926, לפי השנתון של אותה השנה, מפרסמים פודור ועוזריו 16 מאמרים בספרות בינלאומית! זהו מספר מדהים בהתחשב בנסיבות. אכן, למרות הבקורת הרווחת על איכות עבודתו המדעית של פודור, הוא ללא ספק שם את האוניברסיטה העברית על מפת הכימיה בעולם והוא עשה זאת במהירות וביעילות.

התפתחות המכון לכימיה החל משנות ה-30 של המאה ה-20

אחד המאורעות אשר השפיעו בצורה מכרעת על התפתחות המדע בארץ ככלל, ובמכון לכימיה בפרט, קשור לעליית הנאצים לשלטון ולכניסתם לתוקף של "חוקי העבודה במוסדות ציבור". החוקים הללו הביאו לפיטוריהם של מדענים יהודים רבים, אשר חלקם הגיע לפלסטינה ונקלט באוניברסיטה העברית ובמכון לכימיה. הסיפור המרתק הזה מסופר בפרוטרוט בשני המאמרים המצוטטים [1,2], ולכן אקצר את היריעה מכאן ואילך.

בין הפליטים הללו היו לדיסלאוס פרקש, האסיסטנט של פריץ האבר, ארנסט דוד ברגמן, תלמידו של שלנק, וישעיהו לייבוביץ. כולם מגיעים מגרמניה, במידה רבה בזכות עבודתו הבלתי נלאית של חיים ויצמן לקלוט את פליטי אירופה.

פרקש מגויס על ידי ויצמן על מנת לייסד את המחלקה לכימיה פיזיקלית. הוא מתחיל במפעלו ב-1935 ועד יום מותו ב-1948, עקב תאונת מטוס לוטה במסתורין, הוא מייסד מחלקה מודרנית לכימיה פיזיקלית ומגדל דור תלמידים, שמהם ייצאו מנהיגי העתיד של הכימיה הפיזיקלית בארץ [3]. לפרקש ולתלמידיו הרבים תפקיד מכריע בפיתוח התעשייה הכימית בארץ ישראל [2]. אגן כימיקלים, מפעלי הברום בים המלח, פריקלס ופניציה הנם רק אחדות מיזמותיו של פרקש.

ברגמן אף הוא מגויס על ידי ויצמן לשמש כרקטור של מכון זיו שהוקם על ידי ויצמן. ויצמן כיהן אז כדיקן מדעי הטבע באוניברסיטה העברית, ומכון זיו היווה עבורו שלוחה שבה בוצע מחקר ביוכימי אשר נחשב מאוד בעיניו. תוך כדי שירותו של ברגמן במכון זיו, יוזם ויצמן את הקמת מכון ויצמן למדע ב-1946, וברגמן משמש כמנהל המכון. תוך כדי עבודתו במכון זיו ובמכון ויצמן, גולשת פעילותו של ברגמן לארגון חיל המדע (חמ"ד) ולרתימת המדע בשירות המדינה שבדרך. הוא גם מתקרב לבן-גוריון. כל הפעילות הזאת יוצרת קרע בין ברגמן לויצמן, וברגמן נאלץ לעזוב את מכון ויצמן.

ב-1952 מצטרף ברגמן למכון לכימיה באוניברסיטה העברית כפרופסור לכימיה אורגנית. עם הצטרפותו מתפצלת המחלקה לכימיה אורגנית לשלוש תת-מחלקות. ברגמן עומד בראש כימיה אורגנית ב', ואילו פרנקל ולייבוזיץ עומדים בראש תתי-המחלקות האחרות. לייבוזיץ מנהל את המחלקה לאחר פרישתו של משה ויצמן.

באוניברסיטה העברית מקים ברגמן את האסכולה לכימיה אורגנית פיזיקלית ומושך אליו תלמידים רבים [1], אשר מהם ייצאו מנהיגי העתיד של השטח. תרומתו של ברגמן לעוצמת המדינה שבדרך עדיין לוטה בסוד.

מקס פרנקל מפתח כימיה של פולימרים ושל פפטידים וסוכרים מלאכותיים. הוא מחנך דור של תלמידים שמהם ייצאו מנהיגי העתיד בשטח המקורמולקולות והחלבונים (ביניהם נשיא המדינה לשעבר אפרים קציר).

ללייבוזיץ אין תלמידים רבים. המפורסם ביניהם הוא שלמה הסטרין שעסק במחקר של סוכרים והפך לביוכימאי מוביל באוניברסיטה העברית [2].

בין שני הרים

לפני הסיכום אני רוצה לחזור אחורה בזמן לשנת 1948. בשנה זאת פורצת מלחמת העצמאות. הקמפוס בהר הצופים במצור, והמכון לכימיה מתפורר לרסיסים המתפזרים בכל רחבי ירושלים המערבית. כדי לעשות את עבודתו, צריך החוקר לרוץ מטרה סנקטה לשנלר, לרטיסבון ולממילה, וחוזר חלילה. כך מספר שלום שראל, מי שהיה אסיסטנט במחלקה לכימיה אורגנית ב', ולימים הנשיא הראשון של החברה הישראלית לכימיה והעורך הראשון של הירחון הישראלי לכימיה.

הנדודים הללו מסתיימים ב-1959 כאשר נבנה הקמפוס בגבעת רם, שבו המכון לכימיה שוכן עד היום הזה.

סיכום

כאן מסתיים סיפורי על המכון לכימיה "בין שני הרים", וזה הזמן להיזכר בפלא הגדול: מוסד שנבנה על הר טרשים במדבר, קלט פליטים ממלחמת העולם השנייה, עבר רעידת אדמה, נגרס עקב מלחמת העצמאות לחלקיקים שפוזרו בכל העיר ואחר כך התמקם בגבעת רם. והתוצאה לא רעה בכלל... היכן שתשימו אצבע - תהיה זאת אוניברסיטה, מכון מחקר, או תעשייה כימית - שם תמצאו את טביעת האצבעות של המכון לכימיה באוניברסיטה העברית.

ביבליוגרפיה

1. S. Shaik, *Isr. J. Chem.* 2015, 55, 781-825.
2. U. Deichmann and A.S. Travis, *Isr. Studies* 2004, 9, 34-70.
3. Y. Chayut, *Stud. Phys. Biol.* 1994, 24, 237-263.

בתי הנחושת בחיפה

רותי שטנגר



By Libi Fishman [CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], from Wikimedia Commons

בית הנחושת ברחוב החורשה 9, חיפה

חברת "הירש מפעלי נחושת ופליז", אחת מחברות המתכת המובילות בגרמניה בבעלות אהרון הירש ובנו זיגמונד, ייצרה תחמושת, לוחות, צינורות, מכלים וחוטמים מנחושת ומפליז (סגסוגת של נחושת ואבץ). בשנות ה-20 של המאה הקודמת ידעה גרמניה שבין שתי מלחמות העולם שפל כלכלי כבד והחברה חיפשה רעיונות למוצרים חדשים מנחושת. מכיוון שתקופה זו אופיינה גם במשבר דיור חמור, החליטה החברה לייצר בתים טרומיים עשויים מנחושת. לבתים אלה היה שלד עץ, חיפוי חיצוני וגג מלוחות נחושת מרוקעים העמידים בפני פגעי מזג אוויר, ובידוד העשוי מרדיד אלומיניום ואזבסט. הקירות הפנימיים היו מחופים בפח מרוקע צבוע בלבן¹. על פי ההוראות שצורפו אפשר היה להרכיב את הבית בתוך 24 שעות. החברה ייצרה מספר מודלים של בתים טרומיים, ובשנת 1931 נשכר האדריכל וולטר גרופיוס כדי לשפר את תכנון המודלים השונים.

בשנת 1933 פשטה החברה הוותיקה את הרגל, אך חתנו של הירש, רנה שוורץ, הקים את „החברה הגרמנית לבתי נחושת בע"מ" והחל לשווק את הבתים ליהודים שעזבו את גרמניה לפלשתינה. עם עליית הנאצים לשלטון לא יכלו היהודים שעזבו את גרמניה לקחת עמם את כל חסכוניהם, אך יכלו לקחת אתם רכוש לישראל המנדטורית. מודעות שפורסמו בעיתון Jüdische Rundschau בשנת 1933 הציעו ליהודים לקחת איתם בית נחושת להרכבה בפלשתינה. שמות דגמי הבתים הוחלפו, ובמקום "טירת הנחושת" ו"חלום אביבי" הם נקראו "שרון", "תל אביב" וכו'. המפעל אף הקים סניף בארץ כדי לפקח על הרכבת הבתים.

¹ סרטון על בתי הנחושת: <https://www.youtube.com/watch?v=YTRI88yqgUg>



**KAUFT
KUPFERHÄUSER
FÜR
PALÄSTINA**
Hochwertigste Isolierung
Hygienisches Wohnen
BESTE KAPITALANLAGE
Verlangen Sie uns. Palästina-Prospekt

GENERALVERTRETER FRITZ NEUMANN, HAIFA, House Teltsch
DEUTSCHE KUPFERHAUS-GESELLSCHAFT
M. B. H. **Berlin NW7, Unter den Linden 65**

Universitätsbibliothek Frankfurt am Main/Digitale
Sammlungen Judaica²
פרסומת לרכישת בית נחושת לפלשתינה בעיתון
Jüdische Rundschau, 29 בדצמבר 1933

תרגום הפרסומת:

קנו בתי נחושת לפלשתינה

בידוד איכותי

מגורים היגייניים

השקעה מיטבית

דרשו את פרספקט פלשתינה שלנו

סוכן כללי פריץ נוימן, חיפה, בית טייטש

החברה הגרמנית לבתי נחושת, חברה בע"מ

(כתובת: Berlin NW7, Unter den Linden 65)

תרגום הפרסומת באדיבות דורון אברהנד



ארבעה עשר בתי נחושת הובאו בארגזים לנמל חיפה, אך מעטים שרדו. שלושה מהם נמצאים בחיפה: ברחוב החורשה 9, ברחוב לאונרדו דה וינצ'י 5 וברחוב תל מאנה 20. בית נוסף שרד בהר כנען בצפת. חלק מהבתים פורקו, חלקם נשרפו, והבית האחרון שהובל לישראל הותך מיד עם הגעתו, שכן עם התחמשות הצבא הגרמני לקראת מלחמת העולם השנייה האמירו מחירי הנחושת בעולם, ומחיר הנחושת שממנו היה עשוי הבית היה גבוה בהרבה ממחיר הבית. מסיבה זו גם לא היה אפשר לייצר עוד בתי נחושת בגרמניה.

ב-1942 אספו שלטונות גרמניה את כל חלקי הנחושת מבתי בגרמניה כדי להשתמש בנחושת בתעשיית הנשק, וכך נעלמו חלק מבתי הנחושת בגרמניה. אחדים מהבעלים של בתי הנחושת שרצו להגן על בתיהם, צבעו אותם בלבן³ כדי להסוות את ציפוי הנחושת.

ביבליוגרפיה

1. Barry Bergdoll, Peter Christensen, Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling, The Museum of Modern Art New York, 2008, pp.62-68.
2. Friedrich von Borries and Jens-Uwe Fischer, Copper Houses - A German-Israeli Architectural History, JMB - Jewish Museum Berlin Journal, 14, Architecture, 2016, pp. 49-54.
3. <https://www.archinform.net/projekte/22444.htm> רשימת בתי הנחושת בישראל ובגרמניה:

² <http://sammlungen.ub.uni-frankfurt.de/cm/periodical/zoom/2687583>

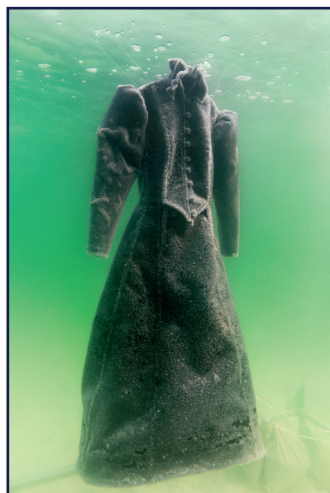
³ https://www.google.co.il/maps/@52.4655461,13.3039313,3a,30y,147.84h,92.58t/data=!3m6!1e1!3m4!1s1kTL_eQlh4O7PHuzjYgAcg!2e0!7i13312!8i6656 התמונה צולמה ל- Google Maps ב-2008

סיגלית לנדאו ויותם פרום, כלת מלח

2014, הדפסי צבע, 106X163 ס"מ

בשנת 2014 יצרו סיגלית לנדאו ובן זוגה הצלם יותם פרום את סדרת התצלומים "כלת המלח". סיגלית לנדאו שיקעה העתק של שמלת הכלה החסידית מההצגה 'הדיבוק' של ש. אנסקי במי ים המלח. עם הזמן התגבשו מלחים על השמלה ושינו את צבעה השחור ללבן. התהליך תועד בסדרת תצלומים תת-ימיים על ידי יותם פרום.

השמלה היא העתק בשחור של השמלה הלבנה שאותה לבשה חנה רובינא ששיחקה את תפקיד לאה בהצגה "הדיבוק" ב"הבימה". התצלומים - מתוך סדרה הכוללת שמונה תצלומים של השמלה בגודל טבעי - שהוצגו בגלריה מרלבורו בלונדון ב- 2016¹, הועברו באדיבות סיגלית לנדאו ויותם פרום.



כלת מלח III



כלת מלח II



כלת מלח VII



כלת מלח IV

¹ <http://www.thisiscolossal.com/2016/08/salt-bride-sigalit-landau/>



תמונה: Shutterstock, Matej Kastelic

תרופת הקופקסון - ריאיון עם פרופסור מיכאל סלע¹

ראיינה וערכה: ד"ר רחל ממלוק-נעמן, קבוצת הכימיה, המחלקה להוראת המדעים



באדיבות מכון ויצמן למדע

פרופ' מיכאל סלע

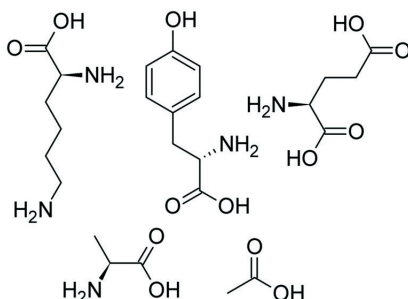
פרופסור מיכאל סלע, ביוכימאי ופרופסור לאימונולוגיה, היה הנשיא השישי של מכון ויצמן למדע. הוא נולד בטומאשוב מאזובייצקי (Tomaszów Mazowiecki) שבפולין, עבר ב-1935 עם משפחתו לבוקרשט שבברומניה, עלה לישראל ב-1941, והופנה יחד עם משפחתו למעברה בעתלית. בריאיון אתו סיפר פרופסור סלע על התהליך של פיתוח תרופת הקופקסון לטיפול בטרשת נפוצה, יחד עם פרופסור רות ארנון וד"ר דבורה טייטלבוים. כבר ב-1959 בהיותו בן 35 זכה פרופסור סלע בפרס ישראל למדעי החיים על התגלית של אנטיגנים סינתטיים. על פיתוח תרופת הקופקסון החל לעבוד 10 שנים מאוחר יותר.

האם תוכל להסביר בקצרה מהי טרשת נפוצה?

טרשת נפוצה (Multiple Sclerosis (MS היא מחלה כרונית של מערכת העצבים - מחלה נירואימונולוגית הפוגעת בתפקודם התקין של תאי העצב במערכת העצבים המרכזית על ידי פגיעה במיאלין, חומר שומני המבודד את סיבי העצבים (אקסונים). הצלקות אשר נוצרות בעקבות פגיעה זו נקראות: "טרשות" ולעיתים גם "לזיות", "נגעים" או "פלקים". פיזורן האקראי במקומות שונים במערכת העצבים המרכזית נותן לטרשת הנפוצה את שמה. המשמעות המילולית של טרשת נפוצה הנה: "צלקות רבות". כיום ההנחה היא שהפגיעה במערכת העצבים המרכזית בטרשת נפוצה נגרמת במנגנון אוטו-אימוני, באופן שהמערכת החיסונית תוקפת בטעות רקמות עצמוניות. הפגיעה של מחלת הטרשת נפוצה היא במעטפות המיאלין המבודד את סיבי העצבים.

מהי תרופת הקופקסון?

זוהי תרופה לטרשת נפוצה המוחדרת לגוף על ידי הזרקה תת-עורית. התרופה היא פולימר - גלטיקֶרֶר אצטט, $C_{25}H_{45}N_5O_{13}$, והשם הגנרי הוא קופולימר 1. הזכויות לשיווק הקופקסון נמצאות בידי חברת "טבע". חשוב לציין, שהתרופה מתאימה רק לשלב הראשון של המחלה. היא אינה מרפאת אותה, אלא גורמת לירידה בתדירות ההתקפים.



By Shoy [Public domain], from Wikimedia Commons

גלטיקֶרֶר אצטט

איך גיליתם/פיתחתם את התרופה?

בסוף שנות השישים אחד החוקרים במכון ויצמן הזריק לחיות חלבון, הגורם להפחתת המיאלין במערכת העצבים שלהם, כדי לבדוק את התוצאות. התוצאות הראו שהחלבון אכן הזיק למערכת העצבים. בעקבות זאת החלטנו, פרופסור רות ארנון, ד"ר דבורה טייטלבוים ואני, לסנתז פולימר דומה לחלבון זה. הזרקנו פולימר זה לחיות, ואף חיה לא חלתה. אז הבנו שמה שהזרקנו מרפא טרשת נפוצה, שהיא מחלה מתחום הנירולוגיה והאימונולוגיה. השם קופקסון Copaxone נובע משני שמות: Axone-I Copolymer.

מה היו הבעיות שבהן נתקלתם במהלך הניסוי?

אחת הבעיות המרכזיות הייתה מציאת החיות אשר יתאימו לניסוי. החיות אשר התאימו היו ארנבות וחזירי ים. עבדנו בבניין זיסקינד שבו אפשרו לנו לקבל כמה כלובים על הגג. במהלך הניסויים קרו תקריות משעשעות. על גג זה נעשו ניסויים בצמחים רדיואקטיביים, וקרה לא פעם שהארנבות יצאו מהכלובים ואכלו את הצמחים.

כיצד שכנעתם את הקהילה המדעית ביעילות התרופה?

יצרנו קשר עם ד"ר מורי ברנשטיין מהישיבה יוניברסיטי, והוא ביצע את הניסוי הקליני הטוב ביותר, בהסכמת שלושתנו. הפטנט על התרופה נרשם על שמות שלושתנו, שווה בשווה. המשכנו בניסויים עוד מספר שנים, כתבנו מאמר לעיתון New England Journal, וכשהיה ברור לנו שהמחקר אכן מצביע על ההאטה במחלת הטרשת הנפוצה, פניתי לאלי הורוביץ מחברת "טבע" והראיתי לו את התוצאות. הוא התלהב והסכים להמשיך בניסויים ולפתח את התרופה בחברת "טבע". חברת "טבע" החלה לבדוק את התרופה בעזרת ניסויים. תחילה בוצעו ניסויים בבעלי חיים ואחר כך בבני אדם. לאחר שגם ניסויים אלו התבררו כמוצלחים, אישר מנהל המזון והתרופות האמריקני את השימוש בתרופה בשנת 1996, ומאז מייצרים את התרופה בחברת "טבע".

האם לתרופת הקופקסון יש תופעות לוואי?

לתרופת הקופקסון אין תופעות לוואי, ומומלץ לקחת אותה בשלבים הראשונים של המחלה. יש אף מחקרים שונים שעשוים להצביע על כך שהתרופה יעילה לטיפול בסוגי חידקים שונים. זאת על סמך העובדה שחולי טרשת נפוצה המקבלים תרופה זו לא חלו כאשר נחשפו לחידקים מסוג מסוים, בעוד שהאחרים כן חלו. אולם הנושא עדיין בחיתוליו.

על מה לדעתך צריך יהיה לשים את הדגש בתחום מחקר הפולימרים בשנים הבאות?

לדעתי, בעוד כ-20 שנה האנטיביוטיקה לא תוכל להשפיע יותר, ואין לי ספק שניתן יהיה למצוא עשרות פולימרים עם חומצות אמיניות שיילחמו בבקטריות.

מה עוד תוכל לספר על חייר?

אני עובד ומפרסם עבודות. בהכשרתי אני איש פרטאינים, אך את ההערכה למחקר בפולימרים רכשתי כעוזר מחקר של פרופסור אפרים קציר. רעייתי, ילדי ונכדי מסבים לי עונג רב, ואתם גם יצאתי לפני כמה שנים לשני מסעות שורשים: לפולין ולרומניה, הארצות שבהן חייתי ב-17 שנותי הראשונות.

לסיכום הריאיון המעניין: פגשתי אדם משכמו ומעלה - אדם צנוע, המוכן לחלוק את חוויותיו האישיות והמדעיות בדרך בלתי אמצעית ולתרום למערכת החינוך. מלבד פרס ישראל, זכה פרופסור סלע בפרסים רבים נוספים, וביניהם - בפרס רוטשילד לכימיה ב-1968 ובפרס וולף לרפואה ב-1998 (פרס שאותו קיבלה באותה שנה גם פרופסור רות ארנון) על גילויים משמעותיים בתחום האימונולוגיה. במהלך השנים פרסם למעלה מ-700 מאמרים בתחומי האימונולוגיה, הביוכימיה והביולוגיה המולקולרית. בנוסף לכך ב-1971 נבחר פרופסור מיכאל סלע כחבר זר של האקדמיה האמריקנית לאמנויות ולמדעים, והוא חבר כבוד בארגונים שונים בתחומי המדע, בישראל ובעולם.

לא נותר אלא לאחל לפרופסור מיכאל סלע עוד הרבה שנים טובות ופוריות בעבודה ועם המשפחה.

מה חשוב יותר במדע - ההצלחה או הכישלון?

פרופ' עווד שוסיוב, מכון רוברט סמית למדעי הצמח והגנטיקה, הפקולטה לחקלאות, מדעי המזון והסביבה רחובות; והמרכז לננומדע וננוטכנולוגיה, גבעת רם, האוניברסיטה העברית בירושלים

לעולם לא אשכח את הבעת הפנים של אחד מתלמידי המחקר במעבדה שלי לפני זמן לא רב כשאמרתי לו שאני לא ממש מתעניין בתוצאות של ניסוי שהצליח. הוא היה מופתע ובוכך. הסברתי לו שבעיניי ניסוי שהצליח הוא לא באמת מעניין. כאשר אנחנו מתכננים ניסוי, יש לנו איזו שהיא הנחה (היפותזה) המספקת הסבר אפשרי כלשהו לתופעה בטבע שאין לה הוכחה מספקת. ניסוי "מוצלח" הוא כזה שמוכיח שההנחה היתה נכונה. אם כן, מה רע בכך? ובכן ניסוי "מוצלח" אינו מקדם באמת את ההבנה של תופעות ומנגנונים שחורגים מהבנתנו, שהרי בדרך כלל מתווה הניסוי וההשערה על תוצאה מוצלחת מבוססת על ידע קודם. אני מתעניין הרבה יותר בניסויים "שנכשלו". ניסויים כאלו מחייבים אותנו להשקיע זמן רב יותר במחשבה מעמיקה, ולעיתים תוצאה לא צפויה עשויה להוות פריצת דרך בהבנה של מנגנונים חדשים.

בתחילת שנות ה-90 הייתי חוקר צעיר בפקולטה לחקלאות באוניברסיטה העברית. חזרתי מפוסט דוקטורט בארה"ב והתקבלתי כאיש סגל אקדמי במחלקה למטעים וצמחי נוי. באותם ימים התמקד המחקר שלי בחלבון קושר תאית (צלולוז), Cellulose Binding Domain-CBD אשר במשך השנים התברר כחלבון בעל מגוון תפקידים בטבע וכבעל פוטנציאל יישומי בתחומי חיים נרחבים, החל מיישומים בתעשייה, ברפואה ובחקלאות.

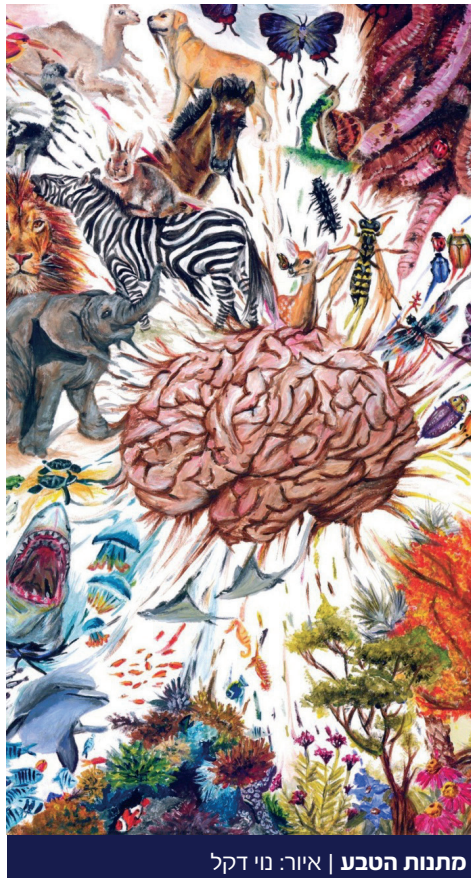
כחוקר צעיר במסלול האקדמי נדרשתי בין יתר הדברים לפרסם בכתבי עת מדעיים ולבסס את מעמדי כחוקר בחקלאות. מכיוון שבעת ההיא המחקר שלי היה בעיקרו מולקולרי ללא כיוון חקלאי ברור, תפס אותי יום אחד לשיחה במסדרון המחלקה פרופ' רפי גורן שהיה באותה העת ראש המחלקה. פרופ' גורן הרגיש מחויבות לסייע לי למקד את המחקר שלי בתחום החקלאי על מנת שבבוא היום, כשוועדת המינויים תדון בתיק האישי שלי, לא תעלה הטענה שאינני ממלא את חובתי כחוקר בפקולטה לחקלאות. טענה כזו עלולה היתה לגרום לכך שלא אקבל קביעות ואפוסטר מהאוניברסיטה. מובן שהקשבתי קשב רב ואף שאלתי אותו אם יש לו איזה רעיון למחקר שמעניין את חקלאי ישראל. רפי לא היסס והציג בפניי בעיה קשה - ריכוזי חרצנים בפירות הדר. לדבריו של פרופ' גורן, המתחרים בעולם הצליחו לפתח זנים של פירות הדר חסרי חרצנים אשר דוחקים את התוצרת הישראלית מהשווקים באירופה. הוא גם הציע לי לכתוב תוכנית מחקר למועצת פרי הדר ולקבל תקציב לנושא. כך אכן עשיתי וגם זכיתי בתקציב. הרעיון שאותו הצעתי נראה לי אז - וגם היום - מעט הזוי. 'יצירת החרצן' (זרע) בפרי תלויה ביכולתו של גרגר אבקה שנחת בראש עמוד העלי המצוי במרכזו של הפרח, לפתח תא הקרוי נחשון. הנחשון מתארך וחודר דרך רקמת עמוד העלי עד אשר הוא מגיע לשחלה ומפרה את הביצית. מניעת התארכות הנחשון מונעת את 'יצירת החרצן'. הרעיון שלי היה ליישם את החלבון CBD על פרחי ההדר. ההנחה בבסיס המחקר היא היתה ש-CBD ייקשר לנחשון האבקה, ימנע את גדילתו ובאופן כזה ימנע את 'יצירת החרצנים'. כניסוי מקדים התבקש תלמיד מחקר שלי, לימים דר' איתי שפיגל, לבחון את יכולת החלבון CBD לעכב את התארכות תאי נחשון אבקה במבחנה. איתי הגיע אליי בוקר אחד עם שתי מבחנות וחיוך רחב על פניו. "הניסוי הצליח! הכריז איתי. יש רק בעיה אחת, התבלבלתי ברישום על המבחנות". מה זאת אומרת? שאלתי. "פשוט על המבחנה שכתוב CBD התאים ארוכים יותר ממבחנת הביקורת ללא CBD, וזה כמובן לא הגיוני כי CBD אמור לגרום להם להיות קצרים יותר". "טוב", אמרתי לאיתי, "בוא נחזור על הניסוי". בבוקר חזר איתי עם פנים מודאגות. "הניסוי נכשל". "תפרט", ביקשתי. "במבחנה עם CBD התאים ארוכים יותר..."



ברגע זה התגלה לנו קצה חוט למנגנון חדש הגורם בטבע להתארכות תאי צמח. במהלך השנים, כתוצאה מאותו ניסוי "שנכשל", פיתחנו טכנולוגיה להאצה של קצב גידול צמחים. חברת פוטורג'ן אשר הוקמה על בסיס הטכנולוגיה החדשה, הצליחה לפתח עצי יער מהונדסים גנטית הגדלים בקצב מהיר יותר מעצים רגילים ובכך להקטין את הצורך בכריתת יערות גשם בעולם, ולשפר את רווחיות היער התעשייתי המיועד לייצור סיבים לתעשיית הנייר. החברה נמכרה בכ-100 מיליון דולר לאחת מחברות היער והנייר הגדולות בעולם, ועצי היער שפותחו בחברה היו לעצים המהונדסים גנטית הראשונים שאושרו לשימוש מסחרי. מרכז הפיתוח של החברה נשאר בפרק המדע ברחובות, ועל כך גאוותנו. במבט לאחור נכשלו בניסיון להקטין את מספר החרצנים בפירות הדר. הסיפור לא תם, ה-CBD ממשיך לספק לנו תגליות.

לפני כ-10 שנים קיבלנו פנייה ממספר חוקרים באיטליה, שוודיה ופינלנד להצטרף לתאגיד מחקר שתכליתו היתה לפתח שיטת ייצור של סיבים ננומטריים בשם Nano Crystals CNC-Cellulose המהווים את השלד שממנו בנויים צמחים. הסיב הננומטרי הזה התגלה כבר בשנות החמישים, אולם רק עם התפתחות עולם הננוטכנולוגיה שפיתחה אמצעי אפיון משוכללים, נתגלה לעולם סיב שמידותיו הן כ-100 ננומטר אורך ו-5 ננומטרים עובי. סיב אשר ביחס למשקלו חזק פי כמה מפלדה! התכונות המכניות המרשימות הללו מדהימות במיוחד בהתחשב בעובדה שהסיב בנוי מסוכר...

אנליסטים בכל העולם סבורים ש-CNC יהיה החומר הננומטרי החשוב ביותר לכל התעשייה. החל מתעשיית הרכב, החלל, הבנייה, הרפואה, הספורט והמזון - כל זאת בשל מספר תכונות מדהימות ש-CNC מקנה לחומרים אחרים שאליהם הוא מוסף. אני ממליץ להתבונן בסרטון הבא: <https://www.youtube.com/watch?v=R3HH4iN8aDM>



מתנות הטבע | איור: נוי דקל

החוקרים האירופיים פנו אלינו משום שסברו ש-CBD עשוי לסייע בהפקת CNC. בתום מחקר של חמש שנים הסתבר ש-CBD אינו מסייע בהפקת CNC, אולם החשיפה שלנו במעבדות האוניברסיטה העברית לאתגר החשוב הזה הובילה אותנו בסופו של דבר לפיתוח טכנולוגיה חדשנית להפקת CNC בשיטה יעילה מבוצת הפסולת של תעשיית הנייר הממוחזר.

בבסיס הטכנולוגיה הבוצה עוברת טיפול בחומצה חלשה שמסייעת בהרחקת תוספים שבדרך כלל מצויים בבוצת נייר כגון גיר. בהמשך סיבי הצלולוז מטופלים בריאקטור בחומצה מרוכזת בתנאים שבהם האזורים האמורפיים בסיב עוברים עיכול ומשתחרר גלוקוז. זאת בעוד שהאזורים הקריסטליניים מופרדים מהחומצה. לאחר מספר שטיפות במים ה-CNC מורחף במים ומתקבל תרחיף שקוף. אחד היתרונות של הטכנולוגיה החדשה הוא שאיננו צריכים לכרות עצים כדי להפיק CNC. כמות הבוצה שמצטברת בעולם מתעשיית הנייר הממוחזר היא עצומה. אירופה לבדה מייצרת 11 מיליון טון בוצה ביום. זו כמות מספקת לבנייה של הר בגובה 3 ק"מ שבסיסו מגרש כדורגל....

זוהי בעיה גדולה לאיכות הסביבה. אך עבורנו זהו חומר גלם נפלא לייצור CNC. הטכנולוגיה בשלה, והאוניברסיטה העברית רשמה פטנטים שעל בסיסם הוקמה חברת מלודאה (<http://www.melodea.eu/>). והיום החברה מפיקה CNC בהיקף תעשייתי בארץ ובשוודיה.

מגוון השימושים ב-CNC הוא עצום. החל מאריזות חכמות למזון, חיזוק חוטי טקסטיל לביגוד ומיגון, תוסף לצבעים לשיפור עמידותם, ציפוי נורות LED, חיזוק פולימרים בתחום הפלסטיקה, חומרי בנייה, דיו למדפסות תלת-ממד, שתלים רפואיים ועוד.

מומלץ להתבונן בסרטון שהוצג בביאנאלה לארכיטקטורה בוונציה שבה הדגמנו כיצד ניתן להדפיס מחסה במדבר שעשוי מ-CNC וממרכיבים נוספים המאפשרים יצירת מחסה בעל יכולות קליטת מים מלחות הבוקר, הפקת אנרגיה מהשמש ושימוש באנרגיה לצינון המים ורצפת המחסה, וכל זאת בחומרים בני קיימא שמקורם בטבע (<https://www.youtube.com/watch?v=jbtGTJXC9n0>).

עבודתי כחוקר באוניברסיטה הביאה אותי במהלך השנים להכרה שמקור ההשראה הטוב ביותר עבורי כמדען הוא הטבע. במהלך מליארדי שנים של אבולוציה יצר הטבע חומרים מופלאים שהלוואי שהיינו יכולים ליהנות ולו מקצת מהם. חומרים כמו CNC, חלבון הרזילין המיוצר על ידי פרעושים ומאפשר להם לקפוץ פי 100-200 מגובהם, סיבי קולגן מאדם המאפשרים היום פיתוח שתלים לשחזור רקמות ואף הדפסת אברים בתלת-ממד. כל אלו הם רק קצה קרחון עצום של חומרי טבע שממתינים לנו לגלותם ולהפיק מהם תועלת לאדם ולסביבה. אני ממליץ גם להתבונן בהרצאת TED שנתתי בפריז ובה אני מתאר את ההזדמנות המופלאה שהטבע מספק לנו:

https://www.ted.com/talks/oded_shoseyov_how_we_re_harnessing_nature_s_hidden_superpowers/transcript

בסיומה אני מצטט את פבלוב שאמר: "אם אתה מחפש רעיון חדש, פתח ספר ישן". והתוספת שלי היא שלמעשה, הספר כבר נכתב. אין שום צורך להמציא את הגלגל מחדש. הוא נכתב על פני מליארדי שנים של אבולוציה, והטקסט הוא ה-DNA של היצורים החיים בטבע. כל שעלינו לעשות זה לקרוא את הטקסט הזה, לפענח את הקוד ולהתחיל את הקדמה שלנו מאותה נקודה.

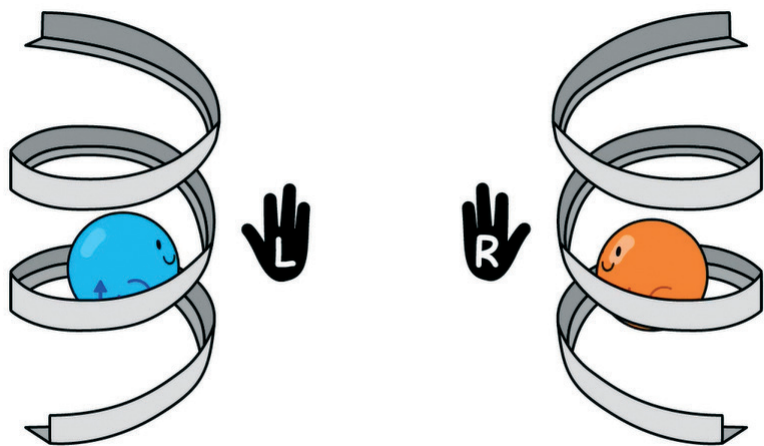
איך מכניקת הקוונטים יכולה להשפיע על ניקיון הקרקע?

פרופ' רון נעמן, המחלקה לפיזיקה כימית, מכון ויצמן למדע, רחובות

תורת הקוונטים נוצרה בגלל הצורך להסביר תופעות שהתגלו בעקבות ההתפתחות הטכנולוגית והמדעית בסוף המאה ה-19 ותחילת המאה ה-20. בתקופה זו כבר היו האלקטרונים תופעה מוכרת, ואפילו החלו לעשות בהם שימוש. מודל האטום לפי בוהר שפותח ב-1913 אפשר להבין את הטבלה המחזורית. אולם כבר אז היה ברור שישנן בעיות במודל האטום, למשל, בשאלה כיצד שני אלקטרונים יכולים להיות באותו מסלול. הרי צפוי שהם ידחו זה את זה בגלל מטענם החשמלי הזהה, ולכן לא ייתכן שכל אחד מהם ינוע במסלול כאילו האלקטרון השני אינו קיים. למרבה הפלא עבר יותר מעשור עד שנמצא פתרון לבעיה, וגם פתרון זה לא נמצא בלי ויכוחים. רמז ראשון לפתרון נמצא למעשה על ידי שני מדענים צעירים מליידן בהולנד. המדענים הם סמואל גודסמיט (Samuel Goudsmit) וג'ורג' הולנברג (George Uhlenbeck) שעבדו כסטודנטים תחת הדרכתו של הרנספסט (Paul Ehrenfest). הם הבינו שלאלקטרון חייב להיות תנע זוויתי-ספין, וזאת על מנת להסביר את ספקטרום הבליעה של אטום המימן. זה קרה ב-1925. התנע הזוויתי יכול להיות בעל סימן חיובי או שלילי. התנע הזוויתי מלווה בשדה מגנטי שפונה לכיוון אחד או לכיוון הפוך לפי כיוון הספין. ב-1928 הבין דירק (Dirac) שהספין הוא דרגת חופש נוספת של האלקטרון שנובעת ממשוואה המשלבת בין תורת הקוונטים ובין תורת היחסות. משוואת דירק שילבה סופית את ה"ספין" בתורת הקוונטים.

למרות "כניסתו" המאוחרת של הספין לזירה הקוונטית, התרומה שלו מכרעת להבנת עולמנו. מבנה האטומים, הקשר הכימי ומגנטיות - כולם מבוססים על קיום הספין. שני אלקטרונים יכולים לאכלס אותו מצב קוונטי רק בגלל שיש להם ספינים הפוכים (עיקרון פאולי). מעניין שפאולי לא אהב כלל את רעיון הספין בתחילת דרכו... לצורך ענייננו חשוב להדגיש את חשיבותו הרבה של עיקרון פאולי. כדי שיווצר קשר כימי, שני האלקטרונים המעורבים בקשר חייבים להיות עם ספינים הפוכים. כיוון שהספין של האלקטרון גורם לו להיות בעל תכונות מגנטיות, הרי חומר שבו אלקטרונים רבים מסודרים כך שהספינים שלהם פונים לאותו כיוון, הוא חומר מגנטי.

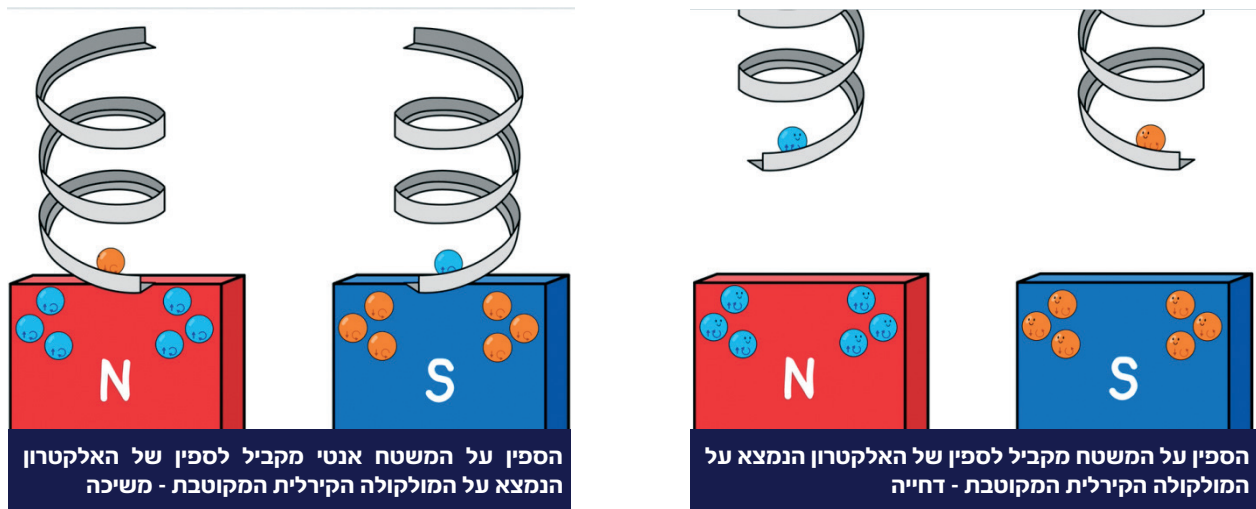
לפני כשני עשורים גילינו תופעה לא צפויה. ראינו שהמעבר של אלקטרון דרך מולקולה קירלית תלוי בספין של האלקטרון. מולקולות קירליות הן מולקולות ללא סימטריה של ראי. בדומה לסימטריה של יד או בדומה לסליל שיכול להיות סליל ימני או שמאלי. כך גם מולקולות קירליות קיימות או עם סימטריה של יד ימין או של יד שמאל. תכונה זו חשובה כיוון שהתברר שבטבע מולקולות חשובות כמו DNA וחלבונים מופיעות תמיד עם סימטריה קירלית אחת. כיוון שבטבע מולקולות הן בעלות סימטריה מסוימת, חשוב שלתרופות תהיה אותה סימטריה על מנת שהתרופה תגיב נכון עם החומרים שבגוף. הבעיה היא שבייצור תרופות נוצרות מולקולות עם שתי תכונות הסימטריה, ולכן יש צורך להפרידן. כך גם כשמדובר בחומרי הדברה. החומר בעל הקירליות הלא נכונה אינו נספג בצמח ולכן נשאר בקרקע ומזהם אותה. התברר לנו שכאשר האלקטרון נע דרך מולקולה קירלית, הוא מרגיש כאילו פועל עליו מגנט, וכתוצאה מכך כיוון של ספין אחד עדיף על הכיוון השני. איזה כיוון עדיף תלוי בקירליות (שמאלית או ימנית) ובכיוון מעבר האלקטרון. החלטנו להשתמש בתכונה זו על מנת להפריד תערובת של מולקולות קירליות ועל מנת לקבל מולקולה קירלית מסוג אחד.



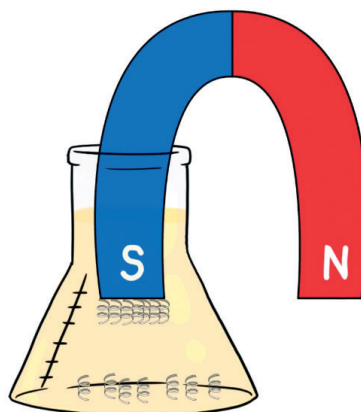
כאשר אלקטרון עובר במולקולה קירלית, קיימת העדפה לאלקטרון בעל ספין מסוים על פני אלקטרון בעל ספין הפוך

כאשר מולקולה מתקרבת למשטח, האלקטרונים בתוכה מתארגנים מחדש כך שנוצר דיפול חשמלי. נוכחנו שכאשר המולקולה היא קירלית, הדיפול החשמלי מלווה בכך שבכל אחד מקטביו יש אלקטרון עם ספין לכיוון מסוים, כך שלכל קוטב יש ספין אחר. איזה ספין נמצא ליד כל קוטב תלוי בקירליות של המולקולה, כלומר, אם היא דומה לסליל ימני או לסליל שמאלי. אם המשטח שאליו מתקרבת המולקולה הוא מגנטי, כך שהאלקטרונים בו מכוונים כולם לכיוון אחד, אזי תיתכנה שתי אפשרויות: הספין של האלקטרון הנמצא על המולקולה וקרוב לשטח הוא מקביל לספינים של המשטח, או שהספין הוא אנטי מקביל. במקרה הראשון האינטראקציה עם המשטח תהיה חלשה יותר מאשר במקרה השני.

* הסרטון והתמונות באדיבות פרופ' רון נעמן



כיוון שכיוון הספין נקבע על ידי הקירליות של המולקולה, הרי ניתן להפריד בין מולקולות עם קירליות ימנית או שמאלית בעזרת משטח מגנטי. כך ניתן לייצר תרופות וחומרי הדברה עם קירליות שממאיימה למערכות ביולוגיות.



אם תמיסה מכילה שני אננטיומרים של חומר קירלי מסוים, אפשר להפרידם בעזרת משטח מגנטי שמושך רק את אחד האננטיומרים

החשיבות של תרופות בעלות קירליות מוגדרת היא בכך שהקירליות ההפוכה עשויה לגרום לתופעות לוואי, חלקן קשות ביותר. גם ניקיון קירלי של חומרי הדברה הוא בעל חשיבות כיוון שחומרים בעלי קירליות אחת נספגים על ידי הצמח בעוד שחומרים עם הקירליות ההפוכה נשארים בקרקע ומזהמים אותה.

כך ניתן לראות איך שימוש במכניקת הקוונטים יכול לשפר תרופות ולסייע בשמירה על הסביבה.

תוכלו לראות את ההסבר על מחקר זה גם [בסרטון האנימציה](https://www.youtube.com/watch?v=1105189-createing-pure-medicines-with-fewer-side-effects)¹ שממנו נלקחו האיורים למאמר זה. כדי לראות את הסרטון יש להקליד את הסיסמה CISS.

ביבליוגרפיה

1. <http://science.sciencemag.org/content/early/2018/05/09/science.aar4265>
2. <https://www.hayadan.org.il/1105189-createing-pure-medicines-with-fewer-side-effects>
3. <https://cen.acs.org/analytical-chemistry/separations/Magnetic-fields-fish-enantiomers/96/i20>

¹ <https://vimeo.com/257954972>

זיהוי מחלות בעזרת נשיפה באמצעות מערך חיישנים ננומטריים

ד"ר יואב ברוזה ופרופ' חוסאם חאיק, הפקולטה להנדסה כימית ומכון ראסל ברי לננוטכנולוגיה, הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל, חיפה 3200003, ישראל

שימוש בריח גוף, בכלל, ובארומת הנשיפה של אדם, בפרט, ככלי אבחון רפואי אינו חדש. אחד התייעודים הראשונים לכך נמצא לפני יותר מאלפיים שנה בכתביו של היפוקרטס בסביבות 400 לפנה"ס. היפוקרטס, שהיה רופא (על שמו שבועת היפוקרטס שכל רופא היום מתחייב לקיימה), מציין כי ניתן להשתמש בריח הנשיפה של חולה כמבחן רפואי דיאגנוסטי, כשהוא מתייחס למחלות כגון הליטוסיס (Halitosis). מאז ועד היום חלה התפתחות אדירה בטכנולוגיה, ובסביבות שנות ה-70 של המאה הקודמת שבו חוקרים לבחון דוגמאות נשיפה במסגרת מחקר מדעי ללא כיוון קליני מוצהר. לפני כ-20 שנה החלו להופיע עבודות בספרות המדעית, שבהן החלו חוקרים לבחון דוגמאות נשיפה לשימושים קליניים. במקביל התפרסמו באותה תקופה עבודות שבהן נעשה שימוש בחוש הריח של כלבים לזיהוי של מחלות שונות כגון סרטן.

וכך נולד לו רעיון...

רצה הגורל וחבר קרוב של אחד המחברים, פרופ' חאיק, שהיה מדען צעיר באותה התקופה, חלה במחלת הסרטן. העובדה כי אדם שמספר שבועות קודם לכן נראה בריא לחלוטין, הופך בן רגע לחולה במחלה קשה ללא אזהרה מוקדמת השפיעה עליו רבות, והוא החל לחשוב כיצד ניתן לעזור לחבר. פרופ' חאיק נתקל באותן עבודות אשר הראו כי כלבים מסוגלים לזהות מחלות לפי ריח, וחשב כי ניתן ליישם רעיון זה באופן מלאכותי, וכך נולד הרעיון של אף אלקטרוני לזיהוי מחלות.

חוש הריח של כלבים מפותח ביותר. בחלל האף יש לכלבים מעל 1000 סוגים שונים של קולטנים, וכל סוג יכול להופיע במספר רב של עותקים, אשר מסתכם במיליונים של קולטנים בשכבת ההרחה במוחם של הכלבים. עובדה זו נותנת לכלבים יכולות הרחה מעולות עם רגישויות שהן פי 3-4 יותר מאלה של בני-אדם. כאשר מולקולות ריח מגיעות אל האף, הן נקלטות ע"י אותם קולטנים שמעבירים אל המוח סיגנל חשמלי המתפרש כריח. בעלי כלבים בעולם דיווחו כי כלביהם נהגו לרחרח אזורים בגופם שלאחר מכן הסתבר שהיו בהם גידולים סרטניים. דיווחים מדעיים שונים ברחבי העולם הראו כי ניתן לאמן את הכלבים לזהות ריחות ייחודיים אלו, ובבדיקות מבוקרות הצליחו כלבים לזהות כלים שבהם נמצאה דגימת רקמה סרטנית לעומת כלים שהכילו דגימה בריאה. שימוש בכלבים הוא טוב אבל גורר עמו קשיים רבים שאינם מתאימים לדיאגנוסטיקה הרפואית בעולמנו, ולכן עלה הרעיון שלפיו אם נוכל לפתח באופן טכנולוגי מערך של חיישנים שידמה את האף של הכלב, ייתכן שנוכל לזהות תבניות ריח ייחודיות המאפיינות מחלה מסוימת, בדיוק באותו האופן שהחוקרים ראו בשימוש עם כלבים שונים.

מרעיון למציאות...

כאמור, בשלב זה כבר היה תיעוד ראשוני בספרות המקצועית על חומרים כימיים הנפלטים בנשיפה, דהיינו, מולקולות אורגניות נדיפות: Volatile Organic Compounds (VOCs). בנוסף לחמצן, מים ופחמן דו-חמצני שמהווים את עיקר המולקולות הנפלטות בנשיפה, מצאו החוקרים כי ישנם חומרים שונים בריכוזים של חלק אחד למיליון (ppm), למשל, אצטון ופחמן חד-חמצני, וחומרים הנפלטים גם בריכוזים של חלק אחד לביליון (ppb), כגון איזופרן, אצטאלדהיד, פנטאן, אתאנול ועוד. חלק ממולקולות אלו נוצר ע"י הגוף עצמו בתהליכים מטבוליים מגוונים באיברי הגוף השונים באופן נורמאלי אך גם במצבים אנורמליים (כגון מחלה) (איור 1), וחלק מהמולקולות הוא תוצאה של חשיפה לחומרים שונים החודרים לגוף בדרכים שונות, למשל, דרך המזון שאנו צורכים, האוויר שאנו נושמים או התרופות שאנו לוקחים. [1, 2]

¹ דוא"ל: hhossam@technion.ac.il

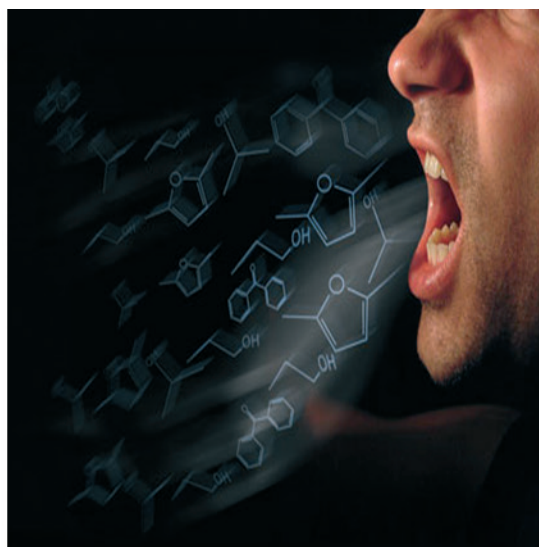
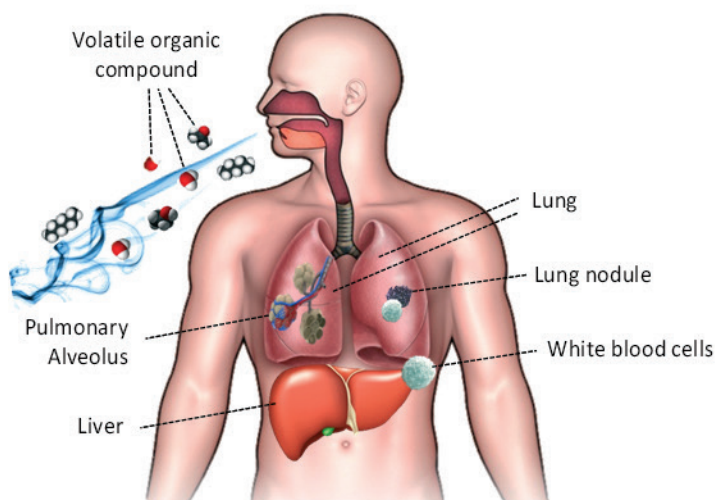
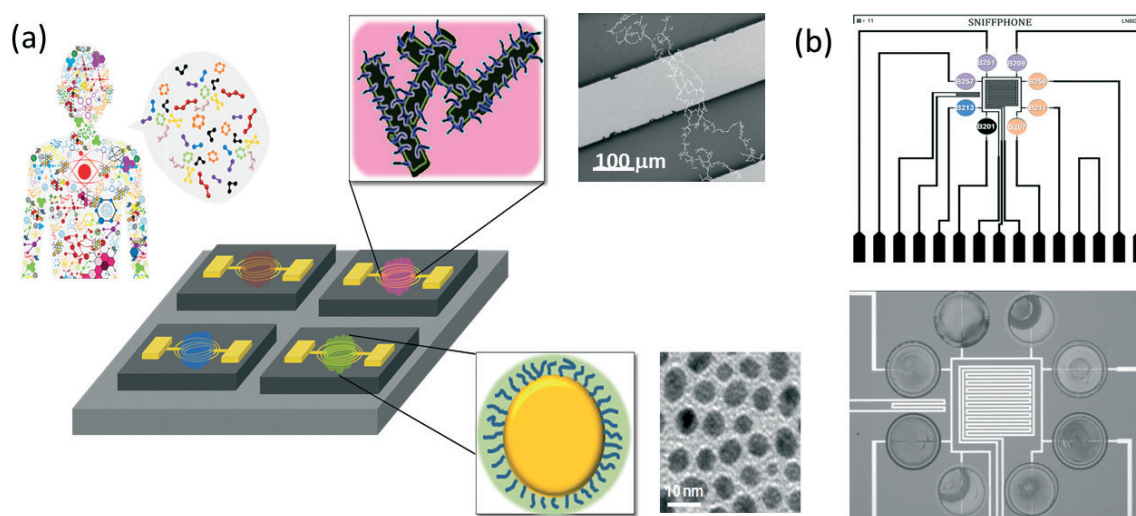


Figure was adapted from Ref. [3] with permission, Copyright (2012) American Chemical Society

איור 1 - אנליזת נשימה לאפיון מחלות מבוססת על זיהוי חומרים נדיפים הנפלטים בנשיפה. כימיקלים אלו נוצרים בתהליכים מטבוליים שונים בתוך הגוף במצב נורמלי - בכבד, למשל, - אך גם כתוצאה ממחלות שונות כדוגמת סרטן ריאה בסכמה המצורפת.

לכן שתי המטרות היו (לא בהכרח בסדר זה): (1) למצוא מהם אותם חומרי ריח שבעזרתם ניתן לזהות מחלה מסוימת (2) כיצד ניתן לבנות מערכת חישה מלאכותית שתזהה את אותן מולקולות. במעבדה לחקר התקנים מבוססי ננו-חלקיקים (Laboratory for nanomaterial based devices - LNBD) בטכניון עובדים וחוקרים תהליכים ומערכות בתחום ההנדסה, אלקטרוניקה, חומרים, כימיה, ביולוגיה ורפואה. אחד מעמודי התווך במעבדה הנו המחקר והפיתוח של חיישנים לזיהוי של מולקולות אורגניות נדיפות. החיישנים מורכבים באופן כללי משני חלקים עיקריים: קולטן (receptor) ומתמר (transducer). תפקיד הקולטן לקלוט את המולקולה הכימית מהסביבה וליצור קשר עם החומר הנבדק. המתמר הופך את האות (סיגנל) הכימי שנקלט בקולטן לאות חשמלי שניתן למדוד במערכות מדידה חשמליות. שינוי באות החשמלי נמדד לרוב ע"י שינוי בהתנגדות החשמלית, בזרם או בכל ערך חשמלי מדיד אחר. לכן באופן מעשי ניתן ליצור שילובים שונים של קולטנים ומתמרים ליצירת חיישנים שונים. בחיישנים המפותחים במעבדה נעשה שימוש בשכבות קולטן שונות, שכבות אלו מבוססות על חלקיקים ננומטריים (10^{-9} מטר או מיליונית המילימטר) כמו חלקיקי זהב ננומטריים, חוטי סיליקון ננומטריים או צינוריות פחמן ננומטריות (איור 2). [5, 4]. לצורך ההמחשה, חלקיק כזה של



איור 2 - שימוש בחומרים בסקלה הננומטרית מאפשר לקבל תכונות ייחודיות ועדיפות של חישה. ישנם סוגים שונים של חומרים ננומטריים אשר משמשים לבניית חיישנים ומערכות האף האלקטרוני כגון: חלקיקי זהב ננומטריים, חוטי סיליקון ננומטריים או צינוריות פחמן ננומטריות. (a) מערך חיישנים יכול להיות מורכב מסוגים שונים של חיישנים כמתואר באיור. כל חיישן מורכב מאלקטרודת זהב הצמודה למשטח סיליקון, ועליה מונחים הננו-חלקיקים המשמשים כשכבת הקולטן. figure adapted from Ref. [6] with permission (b) השימוש בחומרים ננומטריים מאפשר ליצור ציפים הניתנים לשילוב במכשירים ניידים כגון טלפונים סלולריים. למשל, בתמונה ציף בגודל 1.5 cm^2 המכיל שמונה חיישנים שונים.

חומר הוא בגודל של אחת חלקי מאה-אלף מעובי של שערה אנושית. לכל אחד מחומרים אלו ניתן לקשור מולקולות כימיות שונות כדי ליצור שונות בשכבת הקולטן המתאפיינת בסלקטיביות שונה ובזיקה (affinity) שונה לכל חיישן וחיישן כלפי מולקולות המטרה. חומרים אלה נקראים: "ליגנדות" (Liagands).

את טכנולוגיית החיישנים ניתן ליישם בשתי גישות מרכזיות: האחת, גישה סלקטיבית המתאפיינת בחיישן אחד שהוא ייחודי למולקולת מטרה אחת. לדוגמה, מכשיר הינשוף המשטרתי יודע לזהות אלכוהול בנשיפה, והוא רגיש רק לאלכוהול. הגישה השנייה היא 'שילוב תגובות' (cross reactive). בגישה זו, בדומה לאף של הכלב (או של בעלי חיים בכלל), כל חיישן (קולטן) יכול להגיב למספר מולקולות, וכל מולקולה יכולה להגיב עם מספר חיישנים. בצורה זו אנחנו יכולים לקבל מספר רב של אותות (כמספר החיישנים) אשר מהם ניתן ליצור תבנית ריח אופיינית או "טביעת אצבע של ריח". בגישה זו אנו נדרשים לאמן את המערכת לזהות תבנית ריח ייחודית, בדומה לאימון של כלב, אשר ניתן ללמד אותו לזהות ריח של חומרי נפץ או ריח של סמים או אנשים נעדרים. לכן גישה זו נקראת אף אלקטרוני, כי היא מחקה את אופי הפעולה של האף של החיה (איור 3).

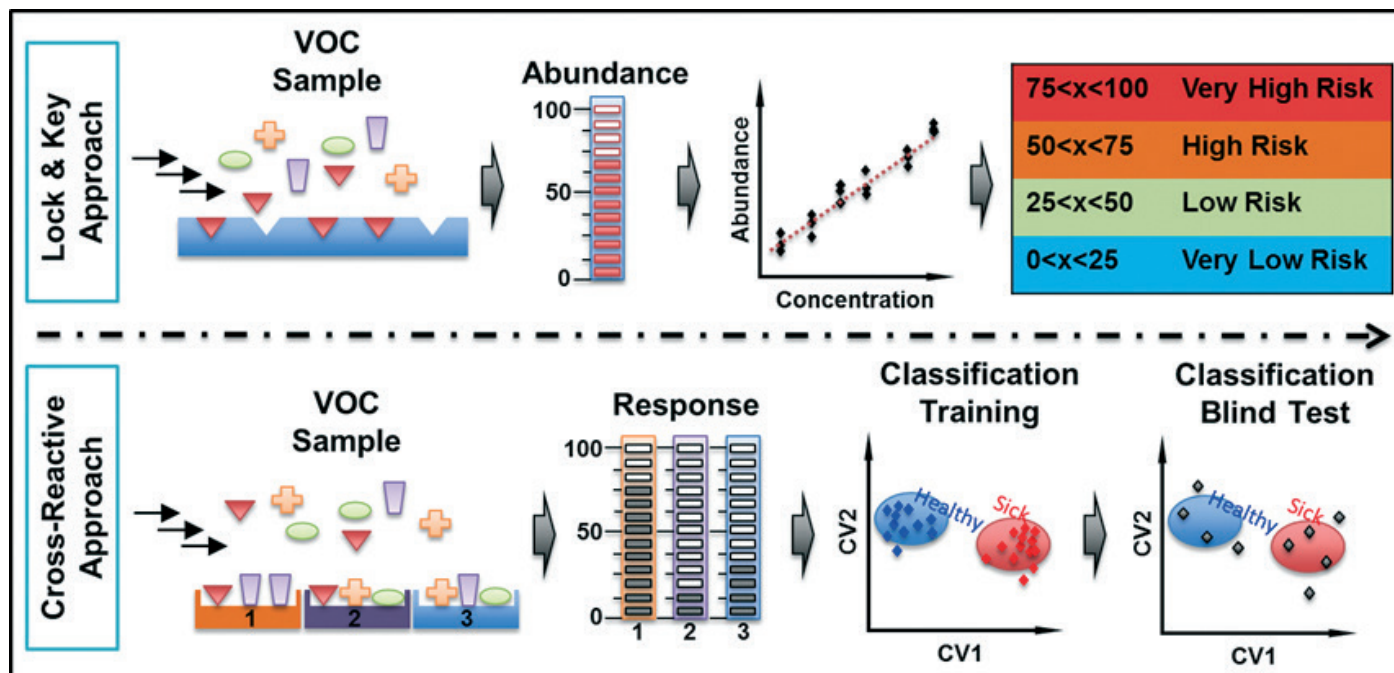


Figure reproduced from Ref. [7] with permission from The Royal Society of Chemistry

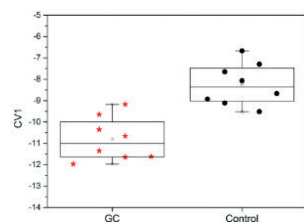
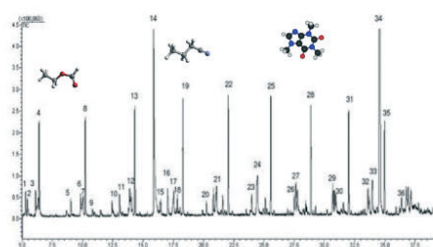
איור 3 - שתי גישות חישה המשמשות כבסיס טכנולוגי למערכות אף אלקטרוני. הגישה הסלקטיבית (גישת מפתח ומנעול) המאפשרת זיהוי של סמן ידוע באופן כמותי וקביעת ספי ריכוז. הגישה של 'שילוב תגובות' (cross reactive) שאותן ניתן לשייך למחלה. הגישה מדמה את האף של היונק ועושה שימוש במגוון חיישנים המגיבים למגוון חומרים ויוצרים תבנית ריח ייחודית.

כאמור, האף האלקטרוני בנוי בבסיסו מאותם חיישנים שהוזכרו למעלה, אך במקרה זה מדובר במערך של חיישנים ננומטריים שונים שכל אחד מהם מושפע במקצת משכבת הקולטן הייחודית שבה הוא מצופה, כדוגמת חלקיקי זהב ננומטריים עטופים בזרועות (ליגנדות) של מולקולות כימיות שונות, לכן שימוש בליגנדה שונה תיצור חיישן שונה. מערך חיישנים זה הוא לב המערכת, ושם מתבצע הזיהוי של מולקולות הריח, שהן המולקולות הנדיפות מהנשיפה. מערך החיישנים נתון בתוך תא סגור שאליו מוזרמת הדוגמה (בדומה לחלל האף של הכלב). לאחר התגובה של החיישן עם מולקולות הריח נוצר שינוי בתכונה החשמלית של החיישן, כגון שינוי בהתנגדות החשמלית אשר נמדד בעזרת מכשיר מדידה מתאים. מידע זה נאסף ע"י מחשב בעזרת תוכנה ייעודית. את הנתונים מעבדים בעזרת תוכנה נוספת אשר בונה אלגוריתמים ייחודיים ומסוגלת לנתח מידע רב-ממדי או רב-משתנים ולזהות תבנית אופיינית לריח, או לדגימת הנשיפה, בדיוק כפי שהמוח של הכלב יודע לזהות את תבנית הריח שאותה אימנו אותו להריח.

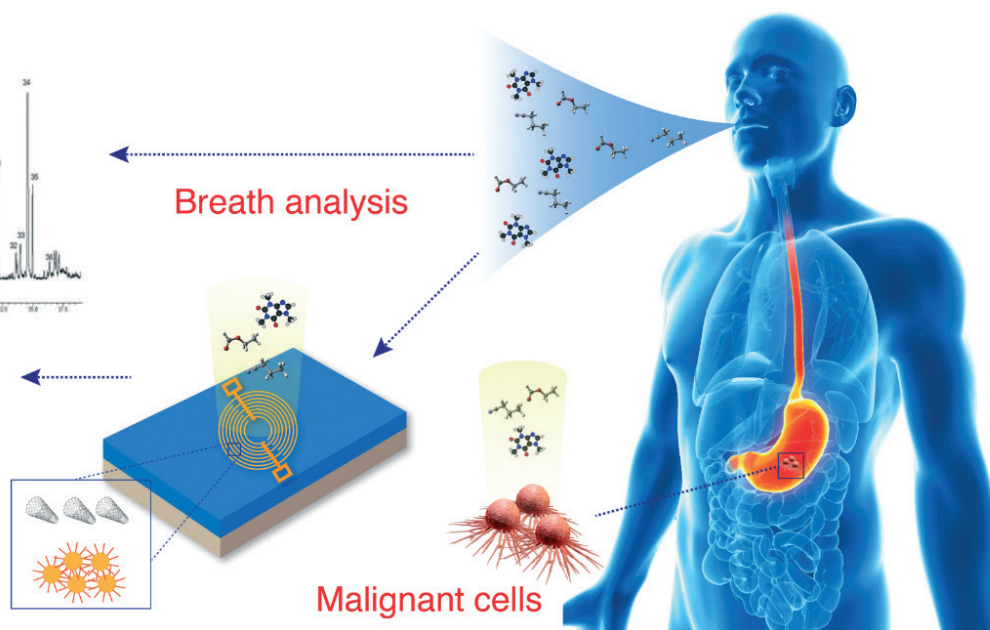
תהליך פיתוח החיישנים לזיהוי המחלה הוא מורכב ומתבסס קודם כל על בנייה של מערך חיישנים. בשלב הבא נלקח מערך זה ונבדקת יכולתו לזהות ריכוזים שונים של מולקולות כימיות ידועות. את לימוד המערכת עושים בתחילה ע"י שימוש בסטנדרטים קנויים של מולקולות שעל פי הדיווחים בספרות יכולות לאפיין מחלה מסוימת. בשלב הבא מתחילים לקחת דוגמאות אמיתיות של אנשים חולים ובריאים במסגרת ניסויים קליניים בבתי החולים בארץ ובעולם. דגימות אלו משמשות לבחינה של שתי המטרות שצוינו מעלה. חלק מהדוגמאות נלקחות לאנליזה במכשירים אנליטיים מעבדתיים גדולים כגון כרומטוגרפיה גזית מחוברת לאנליזת מסות (GCMS, Gas Chromatography Mass Spectrometry). שלב זה מאפשר לבחון ולזהות מולקולות ספציפיות שיכולות לאפיין מחלה ולהוות סמן ביולוגי (Biomarker) למחלה. זיהוי של מולקולות אלו גם יכול לשמש

בסיס לאימון החיישנים בשלב הפיתוח וסימולציה לזיהוי מחלה במעבדה. בנוסף נערך מחקר על אותן מולקולות ספציפיות בהקשרים מטבוליים בגוף בניסיון להתחקות אחר מקורן ואחר הקשר שלהן למחלה מסוימת. ההנחה היא שכאשר ניתן יהיה לקשר מולקולה ספציפית לתהליך פיזיולוגי בגוף, ניתן יהיה להבין טוב יותר את המחלה, לפתח דרכים מהירות יותר לזיהוי מוקדם ואף להציע פתרונות ריפוי מותאמים אישית. בשלב הבא שאר הדוגמאות שנאספו משמשות כדוגמאות לבחינה של מערך החיישנים שאושר בשלב המעבדה. דוגמאות הנשיפה שנאספו בכלים ובמבחנות מתאימות, משוחררות לתוך התא המכיל את מערך החיישנים; המולקולות הנדיפות מגיבות עם החיישנים, והסיגנל החשמלי נמדד ונרשם במחשב. עם המידע שנאסף ניתן לבנות אלגוריתם סיווג, שיאפשר אבחנה בין דוגמאות של חולים לדוגמאות של בריאים. לאחר פיתוח אלגוריתם הסיווג, בוחנים שוב את המערכת ע"י דוגמאות לא ידועות במבחן "עיוור". הצלחה במבחן העיוור מהווה שלב חשוב בפיתוח המערכת. אם שלב זה נותן תוצאות חלשות, מתחילים את השלבים מחדש, בוחנים שילוב חדש של חיישנים ובונים אלגוריתם חדש. בשיטה זו ניתן לבנות מערכת של אף אלקטרוני שאותה אנו מכנים נאנוז (Nanose). המערכת תשמש רופאים ברחבי העולם לזיהוי מוקדם של מחלות שונות (איור 4). עד היום נעשה מספר רב של ניסויים קליניים במחלות מתחומים שונים. במחלות ממאירות כגון: סרטן ריאות, סרטן קיבה; במחלות נירולוגיות כגון: טרשת נפוצה, פרקינסון ואלצהיימר; במחלות זיהומיות כגון: שחפת; ובמגוון מחלות מטבוליות. הצלחה יפה נרשמה בכושרה של המערכת לזהות את כל המחלות הללו דרך הנשיפה. [7-12] כחלק מהתקדמות הפרויקט נמצא כי בנוסף לדוגמאות הנשיפה, ניתן לדגום את אותם סמנים נדיפים מאברי הגוף ומנוזלי גוף שונים ובכך ליצור פרופיל מפורט על כל ייצור חי. מכלול הסמנים הנדיפים מהגוף נקרא Volatolome, והוא מורכב מנתונים שנאספים מדוגמאות נשיפה, עור, שתן, דם, צואה, תאים ועוד. פרופיל זה יכול לשמש כמפה לזיהוי סמנים נדיפים למחלות, אך גם לאפיון סטטוס מטבולי של אוכלוסיות שונות לטובת רפואה מותאמת אישית. [2, 13] במקביל לניסויים אלו נעשית התקדמות גם במזעור המערכות, וכיום נבנות מערכות המאפשרות נשיפה ישירה לתוכן, מערכות ניידות ומערכות שניתן לממשק לטלפון סלולארי. כל זאת במטרה לפשט את הדיגום ולאפשר טיפול מוקדם ליד מיטת החולה או במרפאה השכונתית. טכנולוגיה זו אינה עוצרת כאן, והיא גם משמשת ונבחנת בכיוונים לא רפואיים, החל מזיהוי זיהומים סביבתיים, דרך בחינת פוריות של חיות משק ועד זיהוי סמים וחומרי נפץ בביטחון פנים.

(a) Chemical analysis



(b) Sensors analysis



איור 4 - סכמת תהליך הדיגום והאנליזה. הנבדק נושף לתוך המערכת (או כלי איסוף). הדוגמאות ניתנות לזיהוי כימי בעזרת מערכות אנליטיות (a) או לזיהוי תבנית נשיפה ייחודית למחלה בעזרת מערך חיישנים (b). הדוגמה המוצגת מייצגת מערכת שנבנתה לזיהוי סרטן קיבה. Figure reproduced from Ref. [8] with permission

מה עוד צופן העתיד...

נוסף על השימוש בזיהוי חומרים נדיפים, נמצא כי אותם ננו-חלקיקים מציגים תכונות נוספות שגם אותן ניתן לנצל. נמצא כי החיישנים רגישים ללחץ כיפוף ומגע אשר יכול להוביל לתפיסה חדשה בעולם האלקטרוניקה (יכול לאפשר בעתיד הלא רחוק לקפל ולגלגל את הטלפון החכם למשל). גילוי זה קרה במקרה במהלך מחקר, אך הביא עמו כיוון ופיתוח חדש הנקרא **עור אלקטרוני** המאפשר שילוב של חיישנים אלו במצעים גמישים. [14] חיישנים על מצע גמיש יוכלו לשלב מספר פונקציות המקבילות לעור אנושי וליצור עור מלאכותי שיוכל להרגיש לחיצות או מגע, לחוש בלחות וטמפרטורה, להבחין בחומרים רעילים ועוד. יישום זה יכול להוות פריצת דרך עבור קטועי גפיים המשתמשים כיום בפרוטזות. בנוסף, העור המלאכותי עשוי גם לתפקד כמדבקות לניטור המצב הבריאותי (לדוגמה, פרויקט ביל גייטס שהמעבדה זכתה בו לזיהוי שחפת) או לשמש כ"חיישן

מצוקה" נייד לאוכלוסיות בסיכון, שיכול להזעיק צוות רפואי במקרה סכנה. גם במקרה של העור המלאכותי ניתן ליישם את הטכנולוגיה בתחומים שאינם רפואיים, למשל בתחום התעופה: אפשר יהיה למנוע מראש סדקים זעירים בגוף המטוס שעשויים לגרום לתאונות, אם נעטוף את המטוס בשכבה דקה של עור מלאכותי שיעקוב באופן תמידי אחר המבנה החיצוני. אפשר יהיה לשלב עור מלאכותי גם בפיתוחים של מוטוריקה עדינה ברובוטים או בבקרים בתהליכים הנדסיים.

ביבליוגרפיה

1. Amann, A. and D. Smith, *Breath analysis for clinical diagnosis and therapeutic monitoring*, ed. A. Amann and D. Smith. 2005. 305-316.
2. Broza, Y.Y., et al., *Hybrid volatilomics and disease detection*. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2015. **54**(38): p. 11036-11048.
3. Hakim, M., et al., *Volatile organic compounds of lung cancer and possible biochemical pathways*. *Chem. Rev.*, 2012. **112**: p. 5949-5966.
4. Broza, Y.Y. and H. Haick, *Nanomaterial-based sensors for detection of disease by volatile organic compounds*. *Nanomedicine*, 2013. **8**(5): p. 785-806.
5. Haick, H., *Chemical sensors based on molecularly modified metallic nanoparticles*. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007. **40**(23): p. 7173-7186.
6. Vishinkin, R. and H. Haick, *Nanoscale sensor technologies for disease detection via volatilomics*. *Small*, 2015. **11**(46): p. 6142-6164.
7. Haick, H., et al., *Assessment, origin, and implementation of breath volatile cancer markers*. *Chem. Soc. Rev.*, 2014. **43**(5): p. 1423-1449.
8. Amal, H., et al., *Detection of precancerous gastric lesions and gastric cancer through exhaled breath*. *Gut*, 2016. **65**(3): p. 400-407.
9. Broza, Y.Y., et al., *A nanomaterial-based breath test for short-term follow-up after lung tumor resection*. *Nanomedicine: NBM*, 2013. **33**: p. 92-92.
10. Nakhleh, M.K., et al., *Diagnosis and classification of 17 diseases from 1404 subjects via pattern analysis of exhaled molecules*. *ACS Nano*, 2017. **11**: p. 112-125.
11. Peng, G., et al., *Diagnosing lung cancer in exhaled breath using gold nanoparticles*. *Nat. Nanotechnol.*, 2009. **4**(10): p. 669-673.
12. Broza, Y.Y., et al., *Exhaled breath markers for nonimaging and noninvasive measures for detection of multiple sclerosis*. *ACS Chem. Neurosci.*, 2017. **8**(11): p. 2402-2413.
13. Broza, Y.Y., L. Zuri, and H. Haick, *Combined volatilomics for monitoring of human body chemistry*. *Sci. Rep.*, 2014. **4**: p. 1-6.
14. Segev-Bar, M., et al., *Tunable touch sensor and combined sensing platform: toward nanoparticle-based electronic skin*. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2013. **5**(12): p. 5531-5541.

פרופ' אבנר טריינין ז"ל, מלח

אבנר טריינין (1928-2011), פרופ' לכימיה פיזיקלית באוניברסיטה העברית ומשורר ששילב בשיריו את הספרות עם המדע. פרסם שנים עשר ספרי שירה. כתב היד של השיר "מלח" עם הערותיו של פרופ' טריינין הועבר באדיבות משפחת טריינין. המקור נמצא בארכיון האישי של אבנר טריינין שנתרם על ידי המשפחה לספרייה הלאומית בירושלים.¹

[illegible]

זֶהוּ מֶלֶךְ הַשְּׁלָחַן.
טְהוֹר לֵבָן כְּמוֹ סֵפֶר.

מֶלֶךְ וְלֶחֶם זֶה שְׁלוֹם.

מִן הָעֵין זֶה דְּמַעוֹת.

מֶלֶךְ עַל הַפְּצָעִים

— זאת לא מליצה, —

זֶה אֲבִי בָּיִם הַמֶּלֶךְ.

חֲשַׁמֶּל וּמַלְחָה זֶהוּ פָּלֹדֶר

שֶׁפֶךְ הַפִּקְתִּי לְרֵאשׁוֹנָה

בביתנו במטבח.

כָּלֹר מִמֶּלֶח זֶה רְאוּת

בַּחֲפִירוֹת הַטֶּבַח מִגְזוֹת

באיפר, אפריל, 1915

(הוּ אַנטוואַן !)

בלי מלח ⁷ זה נרקב.

✱ איגוד ייטס סטפן: "על הנפש למען אגד עצמו, למענה אגד עצמה"
 ודגן: אלה האיש נרקב ואלו... ^{הנאמרים} לבוש האיש בציורה, ואגד בלבוש של חיות.
 אמר לו רוממלוג שבול סוד: רשעו, סטו, אטו, אגד, אמר למלך
 הדגן של סטו סטו. דגן על מקומו ואיש דגן א ה"אגד."

¹ http://primo.nli.org.il/primo_library/libweb/action/dlDisplay.do?vid=NLI&docId=NNL_ARCHIVE_AL003455865&_qa=2.235686465.1764261000.1525425838-1206504785.1516725741

פיתוחים וחומרים חדשים בהדפסות תלת-ממד

ד"ר מיכאל לאיאני ופרופ' שלמה מגדסי, המכון לכימיה, האוניברסיטה העברית בירושלים

מבוא

טכנולוגיות הדפסה תלת-ממדית קיימות כבר מעל לכמה עשורים, אך בשנים האחרונות אנו נחשפים לאין ספור חידושים בתחום טכנולוגיות ההדפסה וחומרים חדשים ליצירת מבנים תלת-ממדיים, המתאימים לתהליכי ייצור תעשייתיים. מקובל להציג תחום זה כמהפכה התעשייתית השלישית,¹ היות שהוא מאפשר תהליכי ייצור מתקדמים ויכולות שאינם קיימים בתהליכי ייצור קונוונציונליים. מבין החידושים שהוצגו בשנים האחרונות, ניתן למנות מהירויות הדפסה גבוהות, חומרים חדשים כגון חומרים קרמיים, מוליכים חשמליים, הידורג'לים, מתכות וסגסוגות וחומרים בעלי זיכרון צורה. יתרה מזאת, לפני עשור הייתה מדפסת תלת-ממד מכשיר יקר ערך ולא נגיש לציבור. כיום פותחו שיטות הדפסה פשוטות אשר הוזילו משמעותית את עלויות הייצור, וניתן למצוא מדפסת תלת-ממד כמעט בכל בית-ספר יסודי ותיכון, כך שהטכנולוגיה הפכה נגישה לכל דורש.

הדפסה תלת-ממדית, או בשמה המקובל - Additive Manufacturing, היא תהליך דיגיטלי, שבו חומר מודפס כהדפס דו-ממדי שכבה על גבי שכבה. העצם המבוקש מתוכנן במחשב, אשר מייצר חתכים דו-ממדיים המרכיבים את הדגם. כתהליך תוספתי, (Additive) היתרון המשמעותי ביותר של הדפסה הוא בזה שהמבנה התלת-ממדי שנוצר מורכב מהחומר המודפס בלבד, לעומת שיטות חיסוריות (Subtractive) המקובלות עד כה בתעשייה, כגון רובוט חריטה (CNC), שבהן מיעוט החומר משמש למבנה, והשאר מוסר ולרוב נרק. על מנת לבצע הדפסה של חומר בצורות מוגדרות, יש להשתמש בחומרים אשר יאפשרו מצד אחד שינוע והנחת החומר במקומו המיועד בצורה מדויקת, ומצד שני יאפשרו קיבוע מהיר של החומר לאחר שהונח במקומו. מאמר זה יעסוק בהצגת חומרים חדשים להדפסות תלת-ממד מקבוצות מחקר בעולם בכלל ובישראל בפרט.

החומרים הנפוצים ביותר הנם פולימרים תרמוסטטיים ותרמופלסטיים אשר משמשים בשיטת הדפסת חוטים (Fused Deposition Modeling). בשיטה זו הנחשבת הזולה והפשוטה ביותר, החוטים (Filaments) מועברים דרך ראש מחומם (לרוב בין 150-300 מעלות צלזיוס) ומותכים, בדומה למוצר לנו בשימוש ביתי ב"אקדח דבק חם". היתר הפולימר מונח במקומות מוגדרים על פי קובץ התלת-ממד שכבה על גבי שכבה. לאחרונה פורסמו מספר חידושים בשיטה זו כמו הדפסה של היתר זכוכית שבה ראש ההדפסה מחמם מעל ל-1000 מעלות צלזיוס את הזכוכית² וכן חוטים (פילמנטים) חדשים המכילים חומרים מוליכים חשמליים³, חומרים פלורנסטיים וחומרים בעלי עמידות מבנית וטמפרטורה גבוהה (ULTEM). במקרה של חומרים מוליכים חשמלית, התוצר המתקבל הנו בעל הולכה נמוכה היות שהחומר המוליך מפוזר בתוך פולימר לא-מוליך.

משפחה שנייה של חומרים אשר משמשים להדפסה תלת-ממדית, היא האבקות. כאשר משתמשים באבקה להדפסה תלת-ממדית, השלב הראשון יהיה לייצר שכבה דקה של האבקה. בשלב הבא מבוצע חיבור חלקיקי האבקה באזורים מוגדרים מראש לפי קובץ התלת-ממד, ומיד לאחר מכן מונחת עוד שכבה דקה של אבקה, והתהליך חוזר על עצמו שכבה על גבי שכבה. חיבור חלקיקי האבקה יכול להתבצע באחת משתי צורות כתלות בסוג החומר של האבקה: 1. הדפסה במדפסת הזרקת דיו (Inkjet) של דבק (Binder), ועל כן שמה הנפוץ של השיטה הנו Binder jetting. בשיטה זו האבקה הנפוצה ביותר היא גבס, והדבק המודפס הוא למעשה מים הגורמים לתהליך הגיבוס. ניתן למצוא מדפסות גבס שבהן הדבק המודפס הנו שקוף ואף מדפסות גבס בצבע, שבהן מספר ראשי דיו מתיזים את צבעי היסוד (ירוק-אדום-כחול) ליצירה של כל גווני הספקטרום. בנוסף ניתן אף למצוא מדפסות מסוג זה המתמקדות בתכונות המכניות של החומר הקרמי ומאפשרות קבלה של מבנים גדולים וחזקים, כפי שניתן למצוא בחברת Voxeljet הגרמנית. 2. התכה או סינטור בלייזר של חלקיקי האבקה. במקרה של סינטור חלקיקי האבקה (SLS - Selective laser sintering) החומרים הנפוצים הם ניילון ו-ABS (Acrylonitrile butadiene styrene). לעומת זאת במקרה של התכה בלייזר (selective laser melting), ניתן להשתמש באבקות מתכות כמו טיטאניום וטונגסטן וכן סגסוגות של מתכות. שיטה זו יישומית מאוד לתחומים אשר דורשים חוזק מבני גבוה כגון שתלים רפואיים ותעשיית התעופה. ברוב המטוסים שיוצרו בשנים האחרונות ניתן למצוא חלקים שהודפסו בשיטה זו. הסיבה לכך היא שניתן לקבל חוזק מבני גבוה וקבלה של צורות גיאומטריות מורכבות (שלא ניתן לקבל בשיטות ייצור כמו CNC) ובכך להפחית את משקל המטוס - דבר המסייע לחיסכון כלכלי.

משפחה שלישית של חומרים מבוססת על פוטופולימרים. חומרים אלו הנם לרוב נוזלים, אשר בחשיפה לאור אולטרה-סגול (UV), עוברים תהליך פלמור והופכים מנוזל למוצק. הדפסה תלת-ממדית מבוססת פוטופולימרים נחשבת לשיטה המאפשרת מבנים בעלי הרזולוציה הגבוהה ביותר. ניתן להדפיס את הפוטופולימרים במדפסות הזרקות דיו ומיד לאחר התזת הטיפות לחשוף אותם לאור UV, כך שבדרך זו ניתן אפילו להדפיס מספר

¹ Berman, B., 2012. 3-D printing: The new industrial revolution. *Business horizons*, 55(2), pp.155-162.

² Klein, J., Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Inamura, C., Dave, S., Weaver, J.C., Houk, P., Colombo, P., Yang, M. and Oxman, N., 2015. Additive manufacturing of optically transparent glass. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2(3), pp.92-105.

³ Postiglione, G., Natale, G., Griffini, G., Levi, M. and Turri, S., 2015. Conductive 3D microstructures by direct 3D printing of polymer/carbon nanotube nanocomposites via liquid deposition modeling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 76, pp.110-114.

חומרים שונים בתכונותיהם. שיטה נוספת היא פלמור בתוך אמבט המכיל את הפוטופולימר. בשיטה זו SLA, stereolithography printing or UV יכול לנבוע מנורת LED של מקרן המקרין שכבה שלמה בו זמנית (תמונה דו-ממדית) או מלייזר הגורם לפלמור מהיר בכל נקודה ונקודה (פיקסל). בשיטת הדפסה מבוססת פוטופולימרים, ה"אויב" הגדול ביותר לתהליך הפלמור הנו חמצן אשר מתחרה עם הפוטואיניציאטור על הרדיקלים הנוצרים. אחד החידושים הגדולים בשנתיים האחרונות בתחום ההדפסות בכלל, ובתחום זה בפרט, הנו מדפסת אשר מאפשרת שליטה בכמות החמצן בתחתית השכבה המפלמרת ובכך מאפשרת תהליך הדפסה רציף ומהיר⁴ בהרבה מתהליכי ההדפסה המקובלים עד כה.

חומרים חדשים להדפסות תלת-ממד

בשנים האחרונות מרבית הפרסומים והחדשנות בתחום הדפסות תלת-ממד מתרכזים בשיטות המבוססות על חומרים חדשים ככלל, ועל חומרים פוטופולימריים בפרט. יש לציין כי מקובל לחלק את החידושים לתחום החומרים ולתחום שיטות הדפסה חדשות. אף על פי כן, גם בפיתוחים של שיטות הדפסה חדשות, תמיד יש צורך בהתאמת החומרים לשיטה החדשה. לפיכך צוואר הבקבוק המשמעותי בתחום הנו פיתוח חומרים חדשים, דבר הדורש מומחיות בעיקר בתחום הכימיה ומדע החומרים. ניתן לצפות כי לאור הופעתם של חומרים חדשים בשנים האחרונות, התחום הופך להיות אכן המהפכה התעשייתית השלישית. להלן נציג חלק מהחומרים אשר אנו חוקרים במעבדתנו באוניברסיטה העברית.

חומרים קרמיים Ceramic Materials

מרבית הפולימרים המשמשים להדפסות תלת-ממד, הם בעלי Tg (טמפרטורת מעבר זכוכית) או Tm (טמפרטורת התכה) נמוכים. משמעות הדבר היא שמבנים תלת-ממדים המורכבים מפולימרים אלו, יתעוותו בטמפרטורות גבוהות ולא ישמרו על צורתם. לכן ישנו צורך גובר לפתח חומרים המאפשרים מצד אחד הדפסה ברזולוציה גבוהה, כמו זו המתקבלת בשיטות מבוססות פוטופולימרים, אך בד בבד מאפשרים שימוש בחומרים העמידים לטמפרטורות גבוהות.

כאמור לעיל, הדפסות תלת-ממד אשר מבוססות על פלמור מונומרים, מבוססות על העיקרון שלפיו חומרים פוטו-פולימריים עוברים פלמור והקשחה שכבה על גבי שכבה. על מנת להוסיף חומרים קרמיים למבנה התלת-ממדי ניתן להשתמש באחד משני סוגי פוטופולימרים. בתוך הדיו הפוטו-פולימרי מהסוג הראשון מפזרים חלקיקים קרמיים כמו סיליקה או אלומינה, כך שהמבנה התלת-ממדי מורכב ממטריצה אורגנית, ובתוכה מפוזרים חלקיקים אי-אורגניים.⁵ בסוג השני הפולימר הופך לחומר קרמי באמצעות טיפול טרמי לאחר ההדפסה.⁶

בסוג הראשון של הדיו הקרמי, המבנה התלת-ממדי מונח בתנור בטמפרטורה של מעל ל-1200 מעלות צלזיוס על מנת לשרוף את החומר האורגני ולהישאר עם מבנה תלת-ממדי קרמי. בשיטה זו השתמשו חוקרים, ואף חברת Lithoz אשר פיתחה מדפסת מסחרית להדפסות תלת-ממד של מבנים קרמיים למבנים רפואיים ולשימושים בתעשיית התעופה. החסרונות בשיטה זו הם הצורך ביצירה של דיו יציב שהחלקיקים המפוזרים בו אינם שוקעים כעבור זמן, ופיזור האור האולטרה סגול על ידי החלקיקים המפוזרים אשר פוגע בתהליך הפלמור. יתרה מזאת, מערכות ההדפסה המצויות כיום מתאימות לרמת צמיגות מסוימת, דבר המגביל את ריכוז החלקיקים בדיו, היות וצמיגותו עולה עם הגדלת ריכוז החלקיקים.

לעומת דיו זה, בדיו מהסוג השני המטריצה הפוטו-פולימרית עצמה מכילה שיירים ושרשראות פולימר פרה-קרמי מסוגים שונים. באמצעות תהליך כימי וטרמי, הפולימר הופך לחומר קרמי כמו סיליקה. היתרון בשיטה זו הוא שהדיו הנו למעשה תמיסה ללא חלקיקים, ולכן ניתן להתאים את התכונות האופטיות של המבנה התלת-ממדי הסופי. דוגמה לתכונה אופטית חשובה היא אינדקס רפרקציה, וכך, באמצעות חומרים מסוג זה ניתן להדפיס בתלת-ממד מוליכים אופטיים (waveguide).

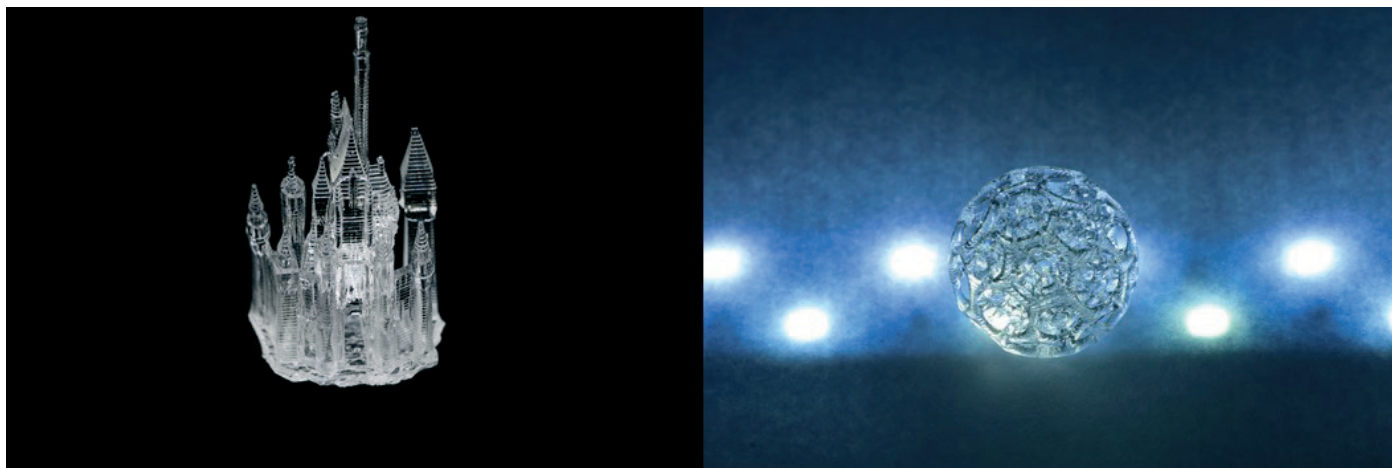
שני סוגי החומרים הוצגו לאחרונה על מנת לקבל מבני תלת-ממד היברידיים או מבנים מזכוכית שקופה. ליכולת להדפיס מבנים תלת-ממדיים זכוכיתיים יש יישומים רבים הן בתחום האופטיקה והן בתחום האופטואלקטרוניקה. בקבוצת המחקר שלנו באוני' העברית פותחו שני סוגי דיו מבוססי מטריצה פוטופולימרית המכילה שיירים קרמיים. הדיו הראשון הנו דיו היברידי⁷ המכיל שיירים אורגניים וסיליקאטים המאפשרים קבלה של מבנה שקוף העמיד לטמפרטורה של עד 400 מעלות (תמונה 1). הדיו מבוסס תהליך סול-ג'ל בשילוב עם פלמור חורים אקריליים העוברים תהליך פלמור רדיקלי. הדיו השני הנו דיו זכוכיתי שאמנם מכיל שיירים אורגניים לאחר הפלמור ותהליך הסול-ג'ל, אבל לאחר שריפתו מתקבל מבנה תלת-ממדי זכוכיתי מלא.

⁴ Tumbleston, J.R., Shirvanyants, D., Ermoshkin, N., Janusiewicz, R., Johnson, A.R., Kelly, D., Chen, K., Pinschmidt, R., Rolland, J.P., Ermoshkin, A. and Samulski, E.T., 2015. Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science*, 347(6228), pp.1349–1352.

⁵ Eckel, Z.C., Zhou, C., Martin, J.H., Jacobsen, A.J., Carter, W.B. and Schaedler, T.A., 2016. Additive manufacturing of polymer-derived ceramics. *Science*, 351(6268), pp.58–62.

⁶ Kotz, F., Arnold, K., Bauer, W., Schild, D., Keller, N., Sachsenheimer, K., Nargang, T.M., Richter, C., Helmer, D. and Rapp, B.E., 2017. Three-dimensional printing of transparent fused silica glass. *Nature*, 544(7650), p.337.

⁷ E. Shukrun, I. Cooperstien, S. Magdassi. *Advanced Science*, 2018.



תמונה 1: שני גופים מודפסים במדפסת DLP בעלי שקיפות גבוהה ועמידות לטמפ' גבוהות, המורכבים מדיו היברידי (אורגני-סילקאטי).

חומרים מגיבים ובעלי זיכרון צורה

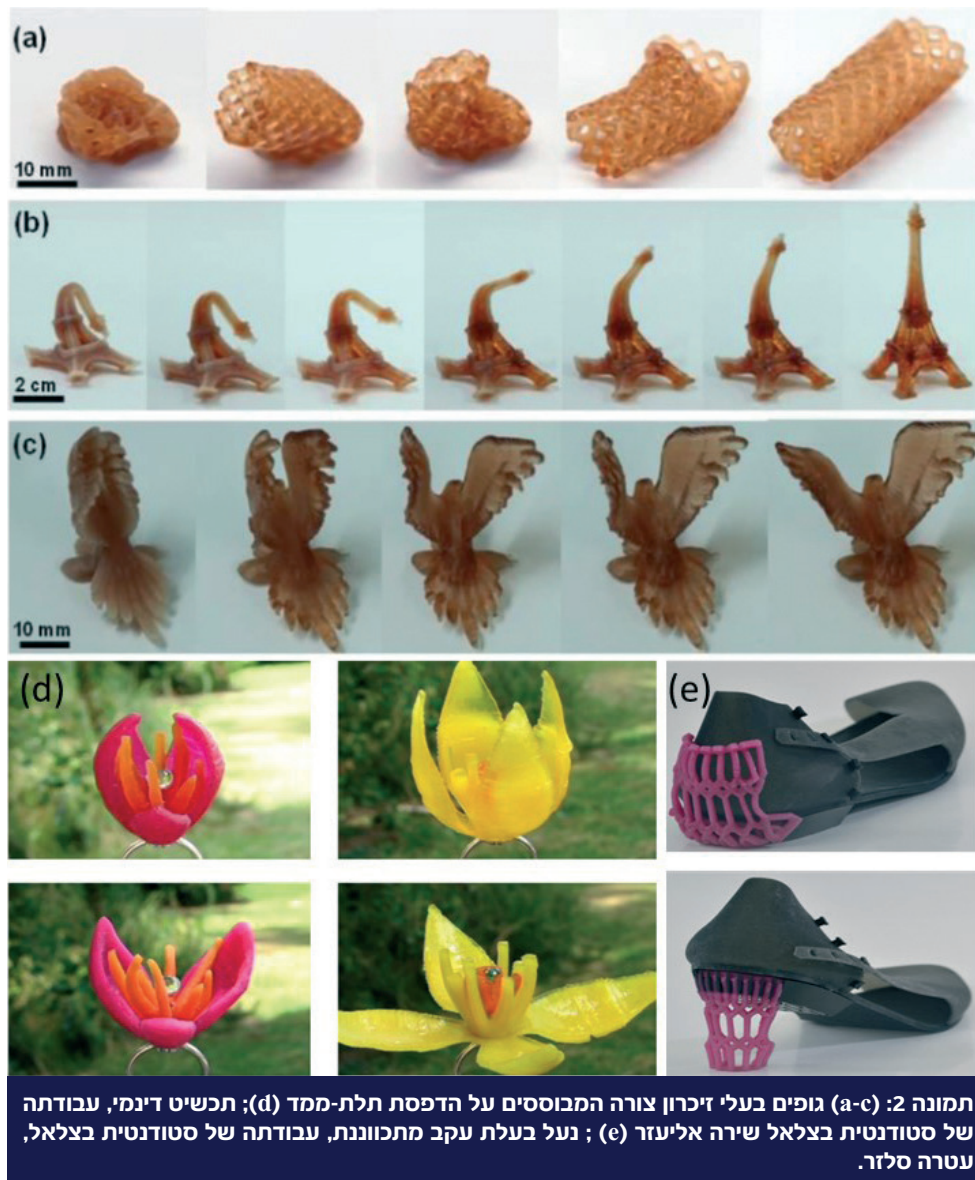
תחום זה של חומרים להדפסת תלת-ממד התפתח רבות בשנים האחרונות ואף קיבל את הכינוי "הדפסת ארבע ממדים" (4D printing), כאשר הממד הרביעי הוא הזמן.⁸ בהינתן מנגנון אתחול מסוים (חום, חשיפה לאור, שדה מגנטי, אות חשמלי וכו'), יבצעו מבנים תלת-ממדים הבנויים מחומרים אלו, תנועה הגורמת לכך שהמבנה משנה את צורתו. בתחום זה אנו חוקרים הדפסת חומרים בעלי זיכרון צורה, וחומרים המשמשים לתחום הרובוטיקה הרכה והרפואה. חומרים בעלי זיכרון צורה הם אלו אשר יש להם יכולת שחזור עצמי של צורה שנקבעה מראש, גם לאחר שבוצעו שינויים בצורה באמצעים שונים. קיימות מספר קבוצות חומרים בעלות זיכרון צורה כגון מתכות, אך הנפוצים ביותר בהדפסות תלת-ממד הם פולימרים זוכרי צורה. הסיבה לזיכרון צורה נובעת מההרכב המולקולרי הייחודי של הפולימר, אשר מכיל גם אזורים גבישיים וגם אזורים אמורפיים (לא מסודרים). האזורים האמורפיים הם אלו המאפשרים למבנה את תנועתו החופשית בעת חימום מעל לטמפרטורת ההפעלה, ולעומתם האזורים הגבישיים "זוכרים" את סדר שרשראות הפולימר בעת הפלמור ומקבעים את המבנה. בשל מנגנון זה אופן הפעולה של מבנים תלת-ממדים המורכבים מחומרים זוכרי צורה יהיה באופן הבא: המבנה מודפס בצורה שאותה הפולימר "זוכר" ואליה תמיד ישוב מצורות זמניות אחרות. בעת חימום המבנה מעל לטמפרטורת הפעולה, המבנה יעבור ממצב קשיח לרך ויאפשר מעוותים במבנה. בעת קירור המבנה תוך כדי הפעלת המעוות, יתקבע המבנה לצורתו הזמנית החדשה. בעת חימום נוסף של המבנה לטמפרטורת הפעולה, ישוב המבנה לצורתו הקבועה בצורה עצמאית.

אפשר למצוא חומרים בעלי זיכרון צורה בשיטות הדפסה פשוטות (כמו polylactic acid) המשמש בשיטת הדפסת FDM, אך בשנים האחרונות ניתן למצוא פרסומים על חומרים פוטופולימריים המאפשרים הדפסה ברזולוציה גבוהה, מחד גיסא, וזיכרון צורה, מאידך גיסא. שימושים יישומיים לחומרים מסוג זה ניתן למצוא בהתקנים רפואיים וכן ברובוטיקה רכה (תחום אשר צובר תאוצה רבה בשנים האחרונות). בקבוצת המחקר שלנו בשת"פ עם פרופ' כהן באוניברסיטה העברית, פותח דיו פוטופילמרי המבוסס על polycaprolacton המכיל קבוצות אקרילאט.⁹ הדיו מאפשר הדפסה בשיטת DLP ברזולוציה גבוהה וביכולת מעוות גבוהה בהרבה מאשר חומרי SMP-ה אשר דווחו עד כה בשיטת הדפסת FDM. לאחרונה הצגנו מספר יישומים אפשריים לדיו החל מהדפסה של סטנטים רפואיים, ביגוד חכם ואביזרי אופנה,¹⁰ כמוצג בציור הבא:

⁸ Campbell, T.A., Tibbits, S. and Garrett, B., 2014. The programmable world. *Scientific American*, 311(5), pp.60-65.

⁹ Zarek, M., Layani, M., Cooperstein, I., Sachyani, E., Cohn, D. and Magdassi, S., 2016. 3D printing of shape memory polymers for flexible electronic devices. *Advanced Materials*, 28(22), pp. 4449-4454.

¹⁰ Zarek, M., Layani, M., Eliazar, S., Mansour, N., Cooperstein, I., Shukrun, E., Szlar, A., Cohn, D. and Magdassi, S., 2016. 4D printing shape memory polymers for dynamic jewellery and fashionwear. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(4), pp.263-270.



הידרוג'לים

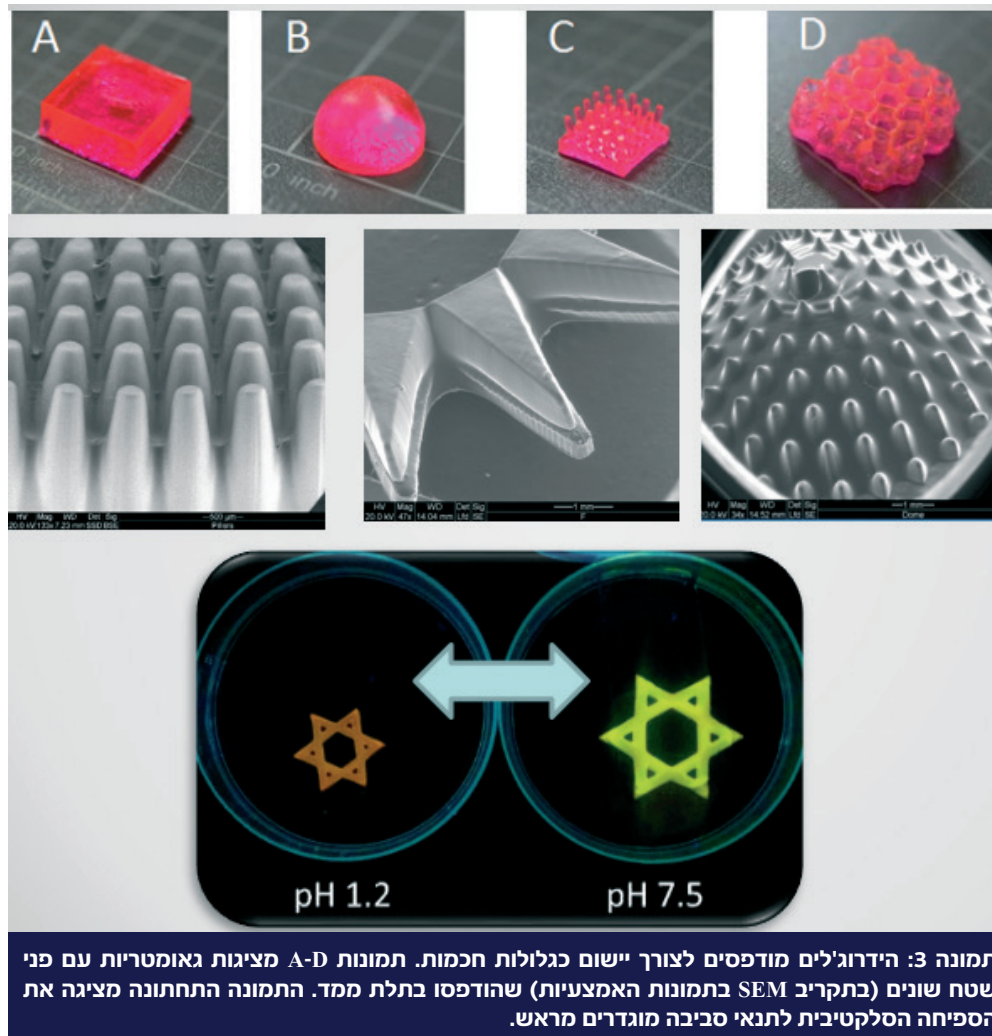
חומר נוסף בעולם התלת-ממד אשר לפי כמות הפרסומים בשנים האחרונות, השימוש בו הולך וגובר, הנו הידרוג'לים. חומרים אלו מוגדרים כפולימרים או רשתות מצולבות המפוזרות בתוך מים, וכאשר הם מודפסים שכבה על גבי שכבה, הם יוצרים ג'לים מימיים בעלי צורה תלת-ממדית מוגדרת. יכולתם של פולימרים אלו להיות מודפסים במים, מאפשרת יישומים רבים, בעיקר בתחום הרפואה והנדסת רקמות. הידרוג'לים מודפסים מאפשרים הטמעה של התאים בתוך המטריצה ובכך את גידול התאים בצורה מבנית מוגדרת, המאפשרת בעצם הדפסה של איברים מלאכותיים.

בשנים האחרונות יש פרסומים אודות הדפסות תלת-ממד של הידרוג'לים בכל שיטות ההדפסה הקיימות. החיסרון בשיטה זו הוא שהשכבות המודפסות צריכות להחזיק את עצמן כך שהנוזל לא יזרום על פני המשטח, עובדה המצריכה פיתוח שיטות קיבוע לדיו המודפס. לדוגמה, קיימות הדפסות הידרוג'לים בשיטות מבוססות מזרק, כאשר בזמן ההזרקה החומר נחשף לאור UV ומתמצק.¹¹

דרך נוספת להדפסת הידרוג'לים מבוססת על טכנולוגיות כמו DLP ו-SLA, שבהן אמבט ההדפסה מלא בדיו ותהליך הכתיבה מתבצע בתוך האמבט, כך שאין צורך בהתאמת הצמיגות. היתרון בשיטה זו הוא היכולת לקבל מבנים ברזולוציה גבוהה יותר. תכונה נוספת אשר ייחודית להידרוג'לים היא יכולת ספיגת המים שלהם, אשר יכולה להגדיל את המבנה המודפס עד פי 7 מגודלו המקורי במצבו היבש. בקבוצת המחקר באוני' העברית,

¹¹ Pawar, A.A., Saada, G., Cooperstein, I., Larush, L., Jackman, J.A., Tabaei, S.R., Cho, N.J. and Magdassi, S., 2016. High-performance 3D printing of hydrogels by water-dispersible photoinitiator nanoparticles. *Science advances*, 2(4), p.e1501381.

הראינו כי כאשר מכוונים את הכימיה של ההידרוג'ל עם קבוצות מסוימות, ניתן לשלוט בספיחת המים כך שתתרחש רק בתנאים מסוימים כמו pH מוגדר.¹² לפיכך ניתן להדפיס התקנים המסוגלים לספוח מים ולשחרר חומרים רק בתנאי סביבה מוגדרים מראש. יכולת שינוי בתנאי pH מוגדרים מאפשרת יישומים בתחום הרפואה. לאחרונה דיווחנו על גלולות מודפסות אשר יכולות לשלוט בקצב השחרור של תרופות בהתאם לצורת הגלולה ובהתאם לרמת החומציות. לדוגמה, הדגמנו גלולות שבהן התרופה הכלואה אינה משתחררת בקיבה בתנאים החומציים, אך השחרור מתחיל במעיין שבהם יש pH גבוה יותר. על ידי הדפסה של גלולות אלה המגיבות ב-pH מסויים ועל ידי יכולות השליטה בשטח הפנים והמורפולוגיה של הגלולה, אפשר לשנות את קצב שחרור התרופות בהתאם לצורך. התמונה הבאה מדגימה צורות עתידיות של תרופות, ושינוי גודל בהתאם לרמת החומציות של הסביבה שבה נמצאת הגלולה המודפסת.



סיכום

תחום הדפסת התלת-ממד צומח במהירות רבה ומאפשר יישומים חדשים ותהליכי ייצור שהם בעלי יתרונות בהשוואה לתהליכי הייצור הקונוונציונליים. בישראל יש מספר חברות מובילות בתחום, כמו Stratasys, Xjet3D, Nanodimensions, Massivit, Nano-Fabrica ועוד. מרבית השיטות מבוססות על פיתוח חומרים חדשים, כך שיש מקום נרחב לפעילות מחקרית בתחום הכימיה ומדע החומרים.

¹² Larush, L., Kaner, I., Fluksman, A., Tamsut, A., Pawar, A.A., Lesnovski, P., Benny, O. and Magdassi, S., 2017. 3D printing of responsive hydrogels for drug-delivery systems. *Journal of 3D printing in medicine*, 1(4), pp.219-229.

מרכז בלוטניק לפיתוח תרופות

כותבים: ד"ר חמוטל (טלי) אנגל, ד"ר אדי פיצ'נוק וד"ר אבי רוה

מרכז בלוטניק לפיתוח תרופות (BLAVATNIK CENTER for Drug Discovery (BCDD) הוא מכון מחקר על-אוניברסיטאי, שהוקם בחודש מאי 2016 באוניברסיטת תל אביב על בסיס תרומתו הנדיבה של מר לן בלוטניק. מטרת המרכז החדשני היא לקדם מחקר מדעי בסיסי בתחום פיתוח התרופות (Early Stage Drug Discovery) ולהפכן לאטרקטיביות יותר למסחר. לשם כך יש צורך בטכנולוגיה, ידע וכלים מדעיים המשלימים את אלה שקיימים במעבדות המחקר. מרכז בלוטניק לפיתוח תרופות משלב פעילות של ארבע הפקולטות הרלוונטיות לגילויים חדשים בתחום: הפקולטה למדעי החיים, הפקולטה למדעים מדויקים, הפקולטה לרפואה והפקולטה להנדסה. מרכז בלוטניק לפיתוח תרופות עובד בשיתוף פעולה עם בתי החולים המסונפים לאוניברסיטת ת"א כדוגמת שיבא-תל השומר ואיכילוב על מנת להשתמש בידע הקליני הנצבר בבתי החולים ובדוגמאות שמקורן בחולים לפיתוח תרופות עתידיות.

מרכז בלוטניק לפיתוח תרופות מציע לחוקרים מגוון עשיר ורב-תחומי של ידע, תשתיות, מעבדות וטכנולוגיות - הכול תחת קורת גג אחת. המרכז החדש מתפרס על פני שטח של 300 מ"ר וכולל שלוש יחידות מדעיות, שפועלות יחדיו ומשלימות זו את זו: יחידה לפיתוח תרופות בעזרת מחשב בראשות ד"ר חמוטל (טלי) אנגל, יחידה למחקר וסריקות ביולוגיות בתפוקה גבוהה בראשות ד"ר אדי פיצ'נוק ויחידה לכימיה תרופתית בראשות ד"ר אבי רוה. שלוש היחידות עובדות בשיתוף פעולה מלא ומאפשרות להאיץ את המחקר הבסיסי בפיתוח התרופות ולגשר על הפער הקיים בין מחקר אקדמי לבין דרישות תעשיית התרופות.



צילום: יונתן בלום עבור מרכז בלוטניק לפיתוח תרופות

פרופ' אהוד גזית מהמחלקה למיקרוביולוגיה ומחלקת מולקולרית וביוטכנולוגיה ומהמחלקה למדע והנדסה של חומרים באוניברסיטת תל אביב, אשר יזם את הקמת המרכז ומכהן כמנהלו האקדמי, מסביר כי "פיתוחה של תרופה חדשה הוא תהליך ארוך ומורכב, הכרוך בעלויות גבוהות. תגליות חשובות רבות, שמקורן במעבדות מצוינות ברחבי הקמפוס שלנו ובמוסדות מחקר אחרים ברחבי הארץ, עשויות להוות בסיס לפיתוח תרופות חדשניות למחלות שונות. אך מרבית התגליות הללו נותרות בחוגי האקדמיה ואינן מצליחות לפרוץ החוצה אל עולם המחקר היישומי. לחוקרים של האוניברסיטה אין יכולת, בהיבטים של מימון, ציוד, לוגיסטיקה ושיתופי פעולה מדעיים, לקחת אותן צעד אחד קדימה. זוהי בדיוק משימתו של מרכז בלוטניק לפיתוח תרופות. עבורי ועבור רבים מעמיתיי, זהו המנוע אשר לו חיכינו שנים רבות. ממש חלום שמתגשם".

"פיתוח תרופות הוא ערך מוסף משמעותי ביותר שהאקדמיה יכולה לתת לחברה", אומרת מנהלת המרכז, ד"ר לודמילה בוז'אנסקי. "אנחנו מקווים מאוד שעבודתנו תעשיר את הבנק הגלובלי של תרופות פוטנציאליות. כמעט לכל חוקר שאני מכירה יש 'רעיון מגירה' כלשהו, שהוא חולם לפתח ולהפוך לתרופה. רעיונות חדשניים מסוג זה מגיעים מכל התחומים הרלוונטיים - מדעי החיים, המדעים המדויקים, הנדסה ורפואה. חלקם ממש מבריקים, ובכל זאת עד היום הם נשארו במגירה."

היחידה לפיתוח תרופות בעזרת מחשב (Computer Aided Drug Design Unit)

היחידה לפיתוח תרופות בעזרת מחשב (CADD) עוסקת בהיבטים החישוביים של תהליך גילוי התרופות. ביחידה מתבצעים חישובים ואנליזות מגוונים בעיקר בתחומי הכימיה החישובית וביאוינפורמטיקה מבנית, בפרט מידול מבנה תלת-ממדי של חלבונים, סריקות וירטואליות מבוססות מבנה, סריקות וירטואליות מבוססות ליגנד\תרופה, סימולציות מולקולאריות לתנועה של חלבונים וכימואינפורמטיקה.

למטרות אלה היחידה החישובית נעזרת באלגוריתמים שפותחו באוניברסיטת תל אביב, בתוכנות אקדמיות בעלות גישה חופשית ובכלים חישוביים מסחריים כדוגמת תוכנת שרדינגר לכימיה חישובית. מבחינת חומרה בבעלות המרכז שרתים ייעודיים לחישובים ואחסון מידע של היחידה החישובית וכן גישה למשאבים החישוביים הרבים של ביה"ס למדעי המחשב ע"ש בלווטניק באוניברסיטת תל-אביב.

היחידה לפיתוח תרופות בעזרת מחשב עובדת בשיתוף פעולה עם היחידות הניסיוניות במרכז (היחידה לסריקות ביולוגיות בתפוקה גבוהה והיחידה לכימיה תרופתית) במהלך השלבים השונים של פיתוח התרופות: בשלב ההתחלתי הכלים החישוביים משמשים לצמצום ספריות הכוללות מספר גדול של מולקולות, כך שרק מולקולות בעלות סיכוי מרבי להיות פעילות יבדקו בפועל במעבדה. בשלבים מתקדמים יותר מתבססים על ההבנה של המערכת הביוכימית ברמה המולקולרית עבור שיפור (אופטימיזציה) של המולקולות מבחינת אפיניות וסלקטיביות הקישור שלהן לחלבון המטרה. כך שהחישובים תורמים לתהליך גילוי התרופות בשני מישורים מרכזיים: העמקת ההבנה של ההיבטים המבניים והביוכימיים והאצה משמעותית של תהליך גילוי התרופות.

"בעידן המודרני השימוש במדעי המחשב הוא הכרחי בתהליך של פיתוח תרופות", אומר פרופ' חיים וולפסון מבית הספר למדעי המחשב על שם בלווטניק באוניברסיטת תל אביב, המכהן כמנהל האקדמי של היחידה לפיתוח תרופות בעזרת מחשב. "אנחנו מפתחים אלגוריתמים ובונים מודלים ממוחשבים של תרופות חדשות. בדרך זו אנחנו מסוגלים לבדוק את יעילותן של אינספור מולקולות וגם לגלות פתרונות חדשים. תהליכי הבדיקה שאנחנו מבצעים במחשב מחליפים ניסוי מעבדה בהיקף בלתי נתפס. לאחר שאנו מצמצמים את מספר האפשרויות ממיליארדים למספר קטן בהרבה, יכולים עמיתינו במעבדה לכימיה תרופתית לסנתז את המולקולות, ועמיתינו במעבדה הביולוגית יכולים לבחון את המולקולות שסנתזו בעזרת המכשור והשיטות המתקדמות שלהם."

היחידה לסריקות ביולוגיות בתפוקה גבוהה

ליחידה לסריקות ביולוגיות ישנם שלושה תפקידים עיקריים בתהליך הגילוי והפיתוח הראשוני של תרופות חדשות: ראשית, יצירת מודל מאופיין היטב אשר ישמש לביצוע הסריקות: כל החוקרים אשר מגיעים למרכז מציגים את שאלת המחקר וכן את הממצאים העיקריים של מעבדתם. כעת על חוקרי היחידה לקחת את "סל המידע" שמספקים החוקרים ולהפוך אותו למודל ניסויי אשר יענה היטב על שאלת המחקר ובנוסף לתכנת פרוטוקול אוטומטיזציה אשר יאפשר את ביצוע הניסויים במהירות האפשרית ללא מגע יד אדם. לצורך כך צוידה היחידה במכשור רובוטי מהמתקדמים והחדשים בעולם אשר מופעל ע"י שורת חוקרים צעירים המתמחים במשימה הנ"ל.

שנית, לאחר העמדת המודל ובניית פרוטוקול האוטומטיזציה, היחידה מבצעת סריקות של אלפי מולקולות. ליחידה מגוון ספריות של מולקולות קטנות אשר גודלן יכול לנוע בין מאות בודדות ועד עשרות אלפי מולקולות. הספריות מגוונות מאוד ויכולות להכיל מולקולות המאוסרות ע"י ה-FDA לצד חומרי טבע וכן גם מולקולות חדשות. על צוות החוקרים ביחידה להתאים לכל פרויקט את הספרייה הרלוונטית, לבצע את הסריקה ולנתח את תוצאות הסריקה. עם סיום כל התהליך, מוצגת לחוקר רשימה של מספר מולקולות שהיו הפעילות ביותר. מולקולות אלו יעברו כעת ליחידות האחרות לצורך אפיון ושיפור (אופטימיזציה), כלומר, שיפור הפעילות הביולוגית, הורדת רעילות אפשרית ושיפור מאפיינים פרמקולוגיים כדוגמת ספיגה במעי, יכולת מעבר ממברנות וכד'. לבסוף, לאחר ששופרו יעברו מולקולות נבחרות מספר שלבי תיקוף (ולידציה) מתקדמים ביחידה על בסיס מודלים נוספים אשר יותאמו לצורך כך וכמו כן בדיקות רעילות במודלים של כליה, כבד דם ועור.

מוסיף המנהל האקדמי של היחידה הביולוגית, פרופ' מיגל וייל, מהמחלקה לחקר התא ואימונולוגיה באוניברסיטת תל אביב: "אנחנו מייצרים מערכות תאים שמדמות מחלה, בוחנים את התנהגות התאים והגנים, ואחר כך בודקים את יעילותם של טיפולים פוטנציאליים. במרכז החדש אנחנו משתמשים בטכנולוגיית סריקה בתפוקה גבוהה: (High Throughput Screening) רובוטים שסורקים באופן אוטומטי אלפי תרופות פוטנציאליות מדי יום. המחקר שלנו מתמקד במחלות גנטיות, ביניהן 'מחלות יתומות', ובמחלות ניווניות של מערכת העצבים ומחלת הסרטן."

היחידה לכימיה תרופתית מצוידת בכלים המתקדמים ביותר לביצוע אנליזה, סינתזה ואופטימיזציה של מולקולות. ביחידה ציוד מגוון לסינתזה יעילה של פפטידים על מצע מוצק במערכת אוטומטית לחלוטין, השימוש במערכת מקצר את זמן הסינתזה של פפטידים מורכבים (ארוכים מ-20 חומצות אמינו, מעגליים ומסועפים) ממספר ימים למספר שעות, והתוצר מתקבל בניצולת ובדרגת ניקיון גבוהה מהשיטות המקובלות בתחום. חלק גדול מהמחקר ביחידה עוסק בשיפור הפעילות הביולוגית ובהורדת הרעילות של המולקולות הפעילות שהתגלו בתהליך הסריקה הביולוגית ביחידה המקבילה. בתהליך זה יש צורך לסנתז מספר גדול של גזרות של החומר הפעיל ולאפיין את הפעילות הביולוגית בסריקה חוזרת. על מנת לייעל את התהליך הזה, ביחידה לכימיה תרופתית משתמשים במערכת לסינתזה מקבילה המאפשרת הכנה בו זמנית של גזרות שונות של החומר הפעיל הראשוני על מנת להאיץ את תהליך הפיתוח ולקצר בצורה משמעותית את פרקי הזמן הדרושים לאופטימיזציה של המולקולות הפעילות. על מנת להשתמש בתוצרי הסינתזה במודלים הביולוגיים השונים יש צורך בחומרים בדרגת ניקיון גבוהה, ולכן יש להפריד את התוצרים



צילום: יונתן בלום עבור מרכז בלווטניק לפיתוח תרופות

הרצויים. על מנת לייעל את התהליך נרכשה מערכת הפרדה אוטומטית שבה תהליך ההפרדה מתבצע על סמך המשקל המולקולרי של התוצר. המערכת יכולה לעבוד 24/7 כדי למצוא את תנאי ההפרדה האידיאליים, להפריד את המולקולה הרצויה ולבדוק את ניקיון התוצר ללא צורך בהשגחת מפעיל.

ד"ר רועי אמיר מבית הספר לכימיה המשמש כמנהל האקדמי של היחידה, מציין: "המרכז בכלל והיחידה לכימיה תרופתית בפרט, פותחים מגוון חדש של אפשרויות של הכנה ושיפור מולקולות בעלות פעילות ביולוגית עבור חוקרים מתחומי מדעי החיים והרפואה שאין להם הידע והכלים לתכנן ולהכין מולקולות אשר יוכלו להפוך בעתיד לחומר הפעיל בתרופות. כמו כן המרכז מאפשר אף לכימאים גישה למכשור מתקדם אשר אינו זמין עבורם במעבדת המחקר שלהם, וכך המרכז תורם גם להכשרתם המקצועית של תלמידי התארים המתקדמים אשר יכולים להתנסות בהפעלת המכשור המתקדם במרכז."

לסיכום, מטרת היחידה היא להכין מולקולות חדשות על סמך תוצאות המודלים החישוביים ותוצאות הסריקה הביולוגית וכן לזרז ולשפר בצורה משמעותית את תהליך האופטימיזציה של חומר פעיל, להפכו ליעיל יותר בפרק הזמן הקצר ביותר על ידי שימוש במערכות סינתזה והפרדה מתקדמות.



צילום: יונתן בלום עבור מרכז בלווטניק לפיתוח תרופות

מרכז בלווטניק לפיתוח תרופות חרט על דגלו לתמוך במחקרים במחלות נדירות. כ-7000 מחלות מוגדרות כיום כמחלות נדירות, כלומר, פחות מאחוז אחד מהאוכלוסייה חולה בהן. ההערכה כיום היא שכ-300 מיליון אנשים ברחבי העולם חולים במחלה המוגדרת מחלה נדירה (30% מהילדים החולים במחלה שכזו ימותו לפני גיל 5). בגלל מיעוט החולים בכל אחת מהמחלות הללו, לחברות התרופות לא תמיד משתלם להשקיע משאבים לחיפוש תרופה חדשה, ולכן עיקר המחקר בתחום מבוסס על מחקרים אקדמיים. מרכז בלווטניק לפיתוח תרופות חבר למרכז לרפואה מותאמת אישית בראשות פרופ' מיגל וייל ומסייע בקידום גילויים חדשים בתחום פיתוח התרופות למחלות נדירות. המרכז מפתח מודלים ביולוגיים וחשוביים למקור המחלה ומחפש תרופות מאושרות לטיפול בהתוויה שונה על ידי ה-FDA, כדי לאפשר טיפול מידי בחולים ללא צורך בתהליך אישורים ארוך.

בנוסף לפעילות המחקרית הענפה, מרכז בלווטניק לפיתוח תרופות מעביר הרצאות, סדנאות וסיורים לבני נוער בגיל התיכון. בין היתר המרכז לוקח חלק בתוכניות של

נוער שוחר מדע באוניברסיטת תל אביב וכן בפרויקט "נפלאות הכימיה" שבמסגרתו מבקרים תלמידי תיכון ממגמות מדעיות לסיור במעבדה. הביקור במרכז כולל הרצאה והדגמות ביחידות השונות, והמטרה היא לעודד את התלמידים לבחור בעוד כמה שנים בלימודים גבוהים בתחום.

הקמת מרכז מחקר שכזה באוניברסיטת תל אביב מהווה קפיצת מדרגה ביכולות האוניברסיטה לקדם מחקר בסיסי בתחום פיתוח התרופות ולאפשר מסחר עתידי של טכנולוגיות ייחודיות. במהלך השנה הראשונה להיווסדו תמך מרכז בלווטניק בפיתוח תרופות ב-26 מחקרים שמקורם בפקולטות השונות, ובפתח השנה השנייה יתווספו למרכז כ-15 פרויקטים נוספים. בנוסף לשינופי פעולה אקדמיים המרכז מספק שירותי תעשייה למגוון חברות ביוטכנולוגיה בכל הנוגע ליכולות האוטומציה, הכרומטוגרפיה והסינתזה המתקדמות שקיימות במרכז.

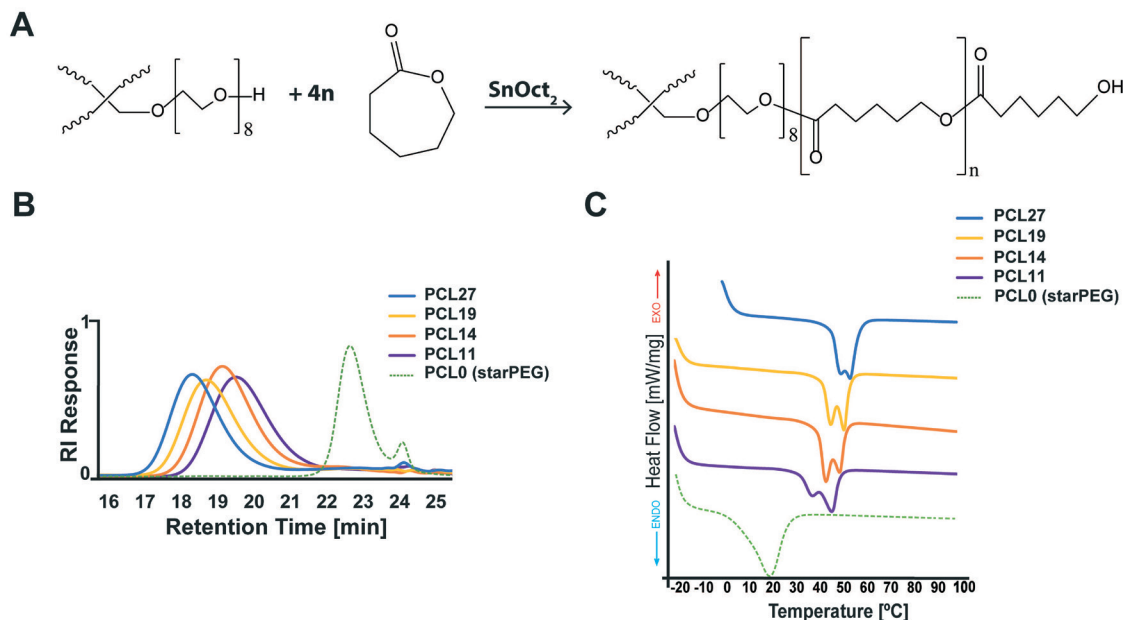
חומרים מגיבים לאור בשירות הרפואה

אלונה שגן ופרופ' בעז מזרחי, הפקולטה להנדסת ביוטכנולוגיה ומזון, הטכניון¹

חומרים המגיבים לסביבתם, הנקראים גם "חכמים", לוקחים חלק חשוב ביישומים ביו-רפואיים רבים לרבות מתן והכוונת תרופות, כמלאנים וכחומרי דבק ביולוגי, כציפויים של משטחים רפואיים כגון קטטרים ועוד. חומרים אלו מסוגלים לחוש שינויים קלים בסביבה הקרובה שלהם ולהגיב על ידי שינוי פני השטח או המבנה שלהם. חומרים חכמים יכולים להגיב למגוון רחב של גירויים - כמו אור, רמת החומציות, טמפרטורה, עוצמה וכיוון של שדה מגנטי - ואף למולקולות ביולוגיות כגון אנזימים והורמונים. מבין כלל הגירויים, האור מעורר עניין רב בשל העובדה שניתן בקלות יחסית לשלוט בעוצמתו, במרחק שממנו מאירים ובאורך הגל. בשנים האחרונות חלה התקדמות רבה בחקר האור, ופותחו יכולות להאיר את החלקים הפנימיים של הגוף בעזרת לייזרים ממוקדים וקטטרים המסוגלים לחדור לגוף בצורה יעילה, ממוקדת ובטוחה או באמצעות הקרנה על ידי מקור אור חיצוני לגוף.

למרות הפיתוחים האופטיים והשיפור ביכולת להקרין איברים פנימיים, מערכות המבוססות על אור טרם הבשילו לכדי מוצר רפואי מאושר לשימוש. הסיבה העיקרית לחוסר ההתקדמות נעוצה ברעילות של החומרים שבהם נעשה שימוש. לעיתים קרובות רעיונות שמצליחים במחקר במעבדה ומתפרסמים בעיתונות המדעית, אינם מספקים את מנהל התרופות והמזון האמריקני (FDA), ולכן אינם מתורגמים למוצר.

במעבדה שלנו נעשים ניסיונות רבים לגשר על הפער שבין היעילות לרעילות של מערכות רגישות לאור, ולאחרונה אף נרשמה פריצת דרך.² המודל שלנו מבוסס על שילוב של שלושה גורמים, שכל אחד מהם בנפרד בטוח לשימוש ומאפשר על ידי ה-FDA. החלטנו להשתמש בלייזר רפואי כמקור אור, המקרין אלומת אור בתחום ה-NIR (near-infrared) באורך גל 808nm. הלייזר מצויד בחיישן המאפשר לווסת את עוצמת הקרינה ולכוון את האלומה לאיזור מוגדר, כך שהשימוש בו בטוח לחלוטין. זאת בלי להתפשר על חדירות אלומת האור לתוך ובתוך הגוף, שכן בניגוד לאורכי הגל הקצרים, אור בתחום ה-NIR חודר ביעילות אל הרקמות. הרכיב השני במערכת, חומר הציפוי, תוכנן וסונזת במעבדתנו. בחרנו להשתמש בליבה המורכבת מהפולימר star-poly (ethylene glycol) (star-PEG), כאשר על גבי קבוצות הקצה שלו פילמרנו יחידות חוזרות של polycaprolactone (PCL), בעלות מסה מולרית משתנה (איור 1). בכך השגנו שתי תכונות חשובות: (1) שליטה ובקרה על טמפרטורת ההיתוך של הפולימר: טמפרטורת ההיתוך של הפולימר עולה ככל שאורך שרשרות הקפולקטון גדל (איור 1B ו-1C) (2) הפולימר בעל יכולת התכלות, כיוון



איור 1: סינתזה ואפיון של ספריית החומרים בעלי נקודות התכה נשלטות.
(A) polycaprolactone (PCL) פולימר על גבי קבוצות הקצה ההידרוקסיליות של poly (ethylene glycol) (PEG).
(B) אורך השרשראות אופיין על ידי Chromatograph Permeation yGel. ניתן לראות שהוכנה סדרה של חומרים. הארוכים יותר משתים פחות זמן בקולונה ולכן יוצאים מוקדם יותר.
(C) נקודת ההיתוך של החומרים נקבעה על ידי Differential scanning calorimetry (DSC).

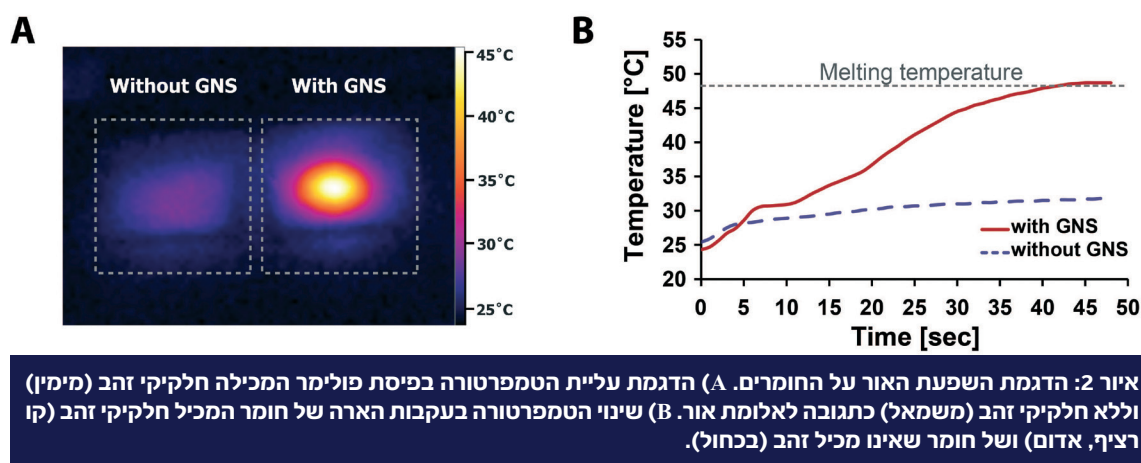
¹ <https://boazmizrahi.technion.ac.il>

² Shagan, A., Croitoru-Sadger, T., Corem-Salkmon, E. and Mizrahi, B., 2018. Near-Infrared Light Induced Phase Transition of Biodegradable Composites for On-Demand Healing and Drug Release. ACS applied materials & interfaces, 10(4), pp.4131-4139.

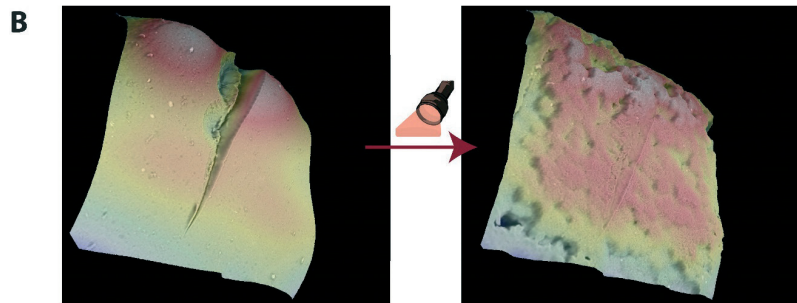
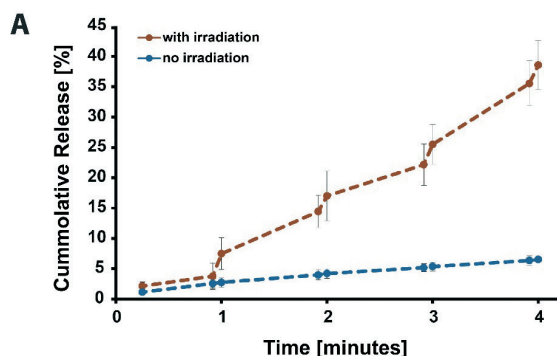
PCL - הוא פוליאסטר העובר פירוק אנזימטי בנוזלי הגוף. השליטה בטמפרטורת ההיתוך של חומרים אלו מאפשרת לבנות ספרייה של חומרים בעלי טמפרטורות היתוך משתנות. החומר הקצר ביותר (זה ללא הקפרולקטון) מותך ולמעשה לא ישנה את תכונותיו בתגובה לחימום נוסף (איור 1C, בירוק). שאר החומרים ידרשו טמפרטורה הגבוהה במעט מזו של הגוף כדי להתנזל ובכך יימנע חימום יתר העלול להזיק לרקמות הסמוכות. בעתיד נוכל לבחור בפולימר המתאים ביותר לשימוש, כלומר, כזה שיישאר מוצק בטמפרטורת הגוף, אך על מנת להתנזל "ידרוש" חימום מזערי מעל טמפרטורת הגוף ולא יגרם לכוויות. ראוי לציין ששני הפולימרים המרכיבים את השלד, PCL ו-PEG, כבר מאושרים לשימוש פנימי, והחידוש שאנחנו הכנסנו כולל רק את הגיאומטריה: פולימר בצורת כוכב בעל 4 זרועות לעומת מבנה "רגיל", ישר.

הרכיב השלישי של המערכת מהווה את "גוף החימום", זה אשר מתרגם את קרן האור לחום. בחרנו לעבוד עם חלקיקי זהב ננומטריים (gold nanoshells, GNS) הידועים ביכולתם לספוג קרינת אור באורכי גל גבוהים ולפלוט בתגובה חום לסביבתם. הננו-חלקיקים מיוצרים על ידי ציפוי חלקיקים ננומטריים של קובלט בזהב והמסת הקובלט, כך שנוצרים "צדפי" זהב בגודל ננומטרי. צדפים אלו מתפנים בקלות ובמהירות מהגוף בשל גודלם הזעיר שמאפשר פינוי מהיר דרך הכליות, ומאחר שהם עשויים מזהב טהור שהוא אינרטי למערכת החיסונית.

כעת, כאשר שלושת השלבים מוכנים, כל שנותר הוא לפזר את חלקיקי הזהב בתוך הפולימר ולקוות שקרינת האור תביא לחימום ולהתכת הפולימר. כמו כן נצפה שמיד עם הפסקת ההקרנה, חלקיקי הזהב יפסיקו להמיר אור בחום, והפולימר יחזור למצבו הקודם, המוצק. בדיקה פשוטה הדגימה את תגובת החומר החדש לפנס לייזר רפואי (איור 2): הקרנו פיסת פולימר ובעזרת מצלמה תרמית תיעדנו עלייה בחום של החומר. פולימר זה, אך ללא חלקיקי הזהב, בקושי הגיב ללייזר והראה עלייה קלה בטמפרטורה, המיוחסת לחום הנפלט מהפנס (כמו שנותר ליבון רגילה מתחממת ומחממת את סביבתה). עליית הטמפרטורה כתגובה לאור הודגמה גם בניסוי מדיד (איור 2B). ניתן לראות כי בתוך 40 שניות התחממה המערכת המכילה זהב עד לטמפרטורה שמאפשרת התכה. לעומתה, החומר ללא חלקיקי הזהב מתחמם רק מעט ונותר במצבו המוצק.



בהמשך בדקנו שימושים אפשריים לחומר כזה, העובר התכה בתגובה לאור. התחלנו בפיוזר תרופה אנטי סרטנית (כימותרפית), קמפטוטצין, במטריקס הפולימרי והקרנו את הדוגמה פעם בשעה למשך 5 דקות, כשהיא טבולה במדיום פיזיולוגי (איור 3A). ניתן לראות שבכל מחזור של הקרנה שוחררה תרופה לסביבה, ושבאופן כללי ההקרנה מביאה להאצת השחרור בהשוואה למערכת זהה שלא הוקרנה. לאחר 4 שעות, למשל, השתחררו מהדוגמה שהוקרנה 40% מכמות התרופה, לעומת פחות מ-5% בדוגמה המקבילה. תוצאות השחרור מעודדות מאוד ומאפשרות למעשה את ההיפוטזה שלנו שמערכת כזו תוכל לשמש בעתיד לשחרור של תרופות ברקמה המוקרנת. מערכת כזו תהיה שימושית מאוד בטיפול בסרטן, משום שהתרופות השונות גורמות לפגיעה גם ברקמות בריאות. חולים המטופלים בכימותרפיה סובלים מנשירת שיער ומבחילות קשות, מכיוון שתאי זקיף השיער ומערכת העיכול מאופיינים בתחלופת תאים מהירה. לכן תרופות כימותרפיות המונעות שגשוג וחלוקת התאים פוגעות גם בהם. בעתיד ננסה לייצר ננו-חלקיקים ומיקרו-חלקיקים שיכילו זהב ותרופות, ונזריק אותן למחזור הדם. הרעיון יהיה להקרין את האיבר החולה מבחוץ כך שכאשר החלקיקים יגיעו עם מחזור הדם לאיבר, יתיך האור את המבנה הפולימרי, והתרופה תשתחרר רק באיבר החולה.



איור 3: הדגמת השימוש בטכנולוגיה. (A) שחרור של התרופה הכימותרפית קמפטוטצין. כאשר הוקרן החומר (באדום), הוא השחרור באופן משמעותי. (B) תיקון של שריטה: פילם דק שעבר שריטה לפני ואחרי התיקון. ניתן לראות שהשריטה "נעלמה".

אנו מעריכים שהטכנולוגיה שפיתחנו תוכל לשמש גם למטרות אחרות, למשל, כדבק רקמות זמני, לקיבוע זמני של רקמות בזמן ניתוח או לפרקי זמן קצרים וכפיגום מתכלה לגידול רקמות המיועדות להשתלה (tissue engineering). כדי להדגים את הפוטנציאל של המערכת, הכנו פילם דק ושרטנו אותו בעזרת סכין מנתחים (איור 3B). איזור השריטה הוקרן במשך דקה, הותר והתמצק, ולמעשה "ריפא" את עצמו. בצורה דומה חתכנו את הפילם לשתי פיסות נפרדות והקרנו את איזור התפר עד לאיחוי. בבדיקה שערכנו התברר כי השחזור היה מלא והכוחות המכאניים של הדוגמה שוחזרו. ניסויים אלו רומזים שהחומר יוכל לשמש בהצלחה כמלאן ויאפשר תיקון רקמה לאחר ניתוח פלסטי כושל, למשל.

לסיכום, פותחה טכנולוגיה חדשה המאפשרת התכה של חומר פולימרי בעזרת פנס רפואי, בהליך שאינו פולשני. הטכנולוגיה תוכל לשמש להכוונת תרופות לאיברים פגועים, כפיגום בהנדסת רקמות או כדבק רפואי. החומרים כולם מתכלים ואינרטיים לגוף, והאור הנדרש אינו מזיק לרקמות, כך שלא צפויות בעיות באישור של הטכנולוגיה מול רשויות הבריאות.

* כל התמונות באדיבות המעבדה של פרופ' בועז מזרחי

מה הקשר בין כימיה לפטיש?

פרופ' צ'רלס דינדרוק ואור גלנט, הפקולטה לכימיה ע"ש שולך, הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל

כימיה היא המדע המרכזי בחקר הסביבה, החיים ואפילו היקום. מדענים ומהנדסים חייבים לחשוב ממה וכיצד הדברים עשויים/בנויים, מה הם היסודות המרכיבים את החומרים, ומהי האינטראקציה בינם לבין מקורות אנרגיה שונים. כימיה מהווה מרכיב חיוני בענפים רבים מתחומי המדעים המדויקים כגון ביולוגיה, רפואה, מדע והנדסה של חומרים, הנדסה אזרחית וסביבה ואף הנדסת חשמל, שבה הכימיה נדרשת בפיתוח רכיבים חשמליים של טלויזיות ומחשבים.

עם זאת, ישנם תחומים אחרים שהקשר בינם לכימיה מצטייר כרופף. אחד מהם הוא המכניקה. מכניקה היא ענף המשתיך לעולם הפיזיקה אשר רוב מושגי היסוד הנמנים בו מטשטשים כאשר צוללים אל הרמה האטומית והמולקולרית. המכניקה של קורות ומשטחים בהנדסת מכונות מהווה חלק אינטגרלי מתוכנית הלימודים שבה מתייחסים אל החומר בדרך כלל כאל גוף שלם, או כאל גוף שמורכב מתת-יחידות הגדולות בכמה סדרי גודל מאלו של אטומים ומולקולות. כך מזניחים, למעשה, את ההתייחסות אל הכימיה שבבסיס המערכת. סטודנטים שלומדים מכניקה אינם נדרשים להבין או לחשוב על המבנה הכימי ועל התנהגותו של החומר בעת שפועלים עליו כוחות מכניים או שהכוחות המופעלים עליו מועברים דרך קשרים כימיים, קוולנטיים ולא קוולנטיים. גם כימאים רבים אינם מביאים בחשבון את התהליכים הכימיים המתרחשים כאשר פלסטיק נמתח או כאשר מסך של טלפון סלולרי נשבר. התייחסות ל"קורה" או ל"משטח" מסייעת לפתור בעיה הנדסית ומתמודדת עם ההשפעה הפיזיקלית בלבד, ללא התייחסות מספקת לתהליכים הכימיים אשר עשויים להוות גורם מכריע בעת בחינה מעמיקה של הבעיה. גם התעמקות נוספת במושגים מתקדמים מעט יותר, כמו דפורמציה פלסטית ואלסטית, מתייחסת באופן בסיסי לתהליכים המתרחשים ברמה האטומית, בלי להיכנס להבדלים הנובעים מהכימיה של המערכת שמצדה מושפעת במידה רבה מאותם כוחות מכניים המופעלים על המערכת.

במהלך מאות השנים שחלפו היסטוריונים וארכאולוגים אפיינו תקופות שונות בהיסטוריה דרך שימושם על ידי חומרים שהיו דומיננטיים בהשפעתם על האנושות כולה לאורך תקופה מסוימת. בעבר אלו היו תקופות האבן, הברונזה והברזל, ואילו כיום אנחנו חיים בעידן הפלסטיקה. פולימרים טבעיים וסינתטיים מרכיבים את רוב החומרים אשר בסביבתנו: בגדים, אריזות מזון, שולחנות, כיסאות, דלתות, משחקים ועוד. כמו כן ישנם חומרים הנמצאים בשימוש יומיומי אשר לא בהכרח נוטים לקשרם לתחום הפלסטיקה: שמפו, צבע, תוספי שמנים של מכונות ועוד. כ-300 מיליון טון של פולימרים סינתטיים מיוצרים מדי שנה ומיליוני טונות של פולימרים טבעיים (נייר, גומי ועוד) נאספים. החומרים שאפיינו את העידנים הקודמים הם חומרים אי-אורגניים בעלי מבנה מסודר יחסית (גבישי) במצב המוצק; לעומתם חומרים פולימריים הם בעלי מבנה שונה, התנהגות אחרת, והם ניתנים למודיפיקציות על פי צורך, ומכאן יתרונותיהם הרבים. פולימרים בנויים ממולקולות ארוכות מאוד, בדרך כלל אורגניות, מתאפיינים בדיפוזיה איטית ומסוגלים להתקפל ולהיפתח. במצב המוצק רוב המולקולות אינן מסודרות (מצב אמורפי). בחלק מהפולימרים ישנם אזורים בעלי סדר מבני, אך הסדר הוא ברמה האזורית בלבד (אזור גבישי). בגבישים של מולקולות קטנות אפשר לייחס כל אטום למולקולה ספציפית, אך האזורים הגבישיים של הפולימרים עשויים להכיל חלקים משרשרות שונות. התנהגות הפולימרים מהווה אתגר עוד לפני שנוגעים בשאלת הכוחות המכניים המופעלים עליהם. לאחרונה החלו מהנדסי מכונות רבים להבין שהתכונות המכניות והדפורמציות שמתרחשות תחת מאמץ (תחת הפעלת עומס מכני) תלויות במבנה המולקולרי של החומר. אי לכך הם נדרשים לחזור אל הכימיה הבסיסית, האורגנית והתאורטית כדי לנסות ולמדל את האינטראקציות הכימיות בין האטומים ובין המולקולות. תאורטיקנים מצליחים לספק באופן מקורב הבנה די טובה בשאלה מדוע גומי הוא אלסטי וקבלר הוא קשיח, ומצליחים להבדיל בין התכונות המכניות של שלושת הסוגים של הפוליאתילן. כיאה לתאורטיקנים טובים, הם מתכננים ניסויים אשר תומכים בהיפותזות שלהם או שוללים אותן באמצעות שימוש בצידוד קלאסי לבדיקות מכניות. לאחרונה ניכרת התעמקות נוספת מצדם בתחום הכימיה הפיזיקלית ומדעי החומרים, כמו הרצת ניסויים על מולקולות בודדות ע"י מיקרוסקופ כוח אטומי (AFM).

למרות זאת, אנו הכימאים איננו מבחינים בהזדמנות המדהימה שניתנה לנו להשפיע על ההיבט הפיזיקלי בעולם הפולימרים, באותו סדר הגודל שבו השפענו על עולם הביולוגיה והרפואה. חשיבתנו, ידיעותינו ויכולותינו הן מהותיות להבנה ולפיתוח של תחום זה. מהנדסי מכונות מציעים ניסויים חדשים המבוססים על מבנים מולקולריים ברמה התאורטית, אך אינם מסוגלים לייצר חומרים אלו. בנוסף קיימות הרבה מאוד שאלות שהתאוריה העכשווית אינה מסוגלת עדיין לענות עליהן, ויש צורך בניסויים 'רטובים' על מנת לתת מענה טוב יותר. צורך מהותי הקיים בתחום זה הוא בחינת ההבדלים בין פולימרים טבעיים לסינתטיים וצמצום הפערים הקיימים ביניהם. הבנת ההבדלים עשויה לקדם אותנו לעבר דור חדש של חומרים ידידותיים יותר לסביבה ובעלי תכונות מכניות נעלות. כאשר יש צורך בפלסטיק עם תכונה מכנית (או אופטית או אחרת) ספציפית, הכימיה של הפלסטיק תיגזר לפי התכונה הרצויה. לדוגמה, לייצור צינורות מים נדרש פולימר עמיד מבחינה כימית וחזק מכנית, ולכן נעשה שימוש ב-PVC. עבור משחקים הבחירה היא בפולימר זול ובעל אלסטיות כמו הפוליאתילן. כלומר, המונומר נבחר ומסונתז על פי התכונה הרצויה. נכון להיום התעשייה יודעת לספק מענה לצרכים הנדרשים, והטכנולוגיה המשתנה כל הזמן מביאה לפיתוח של פולימרים חדשים באופן תמידי באקדמיה ובתעשייה.

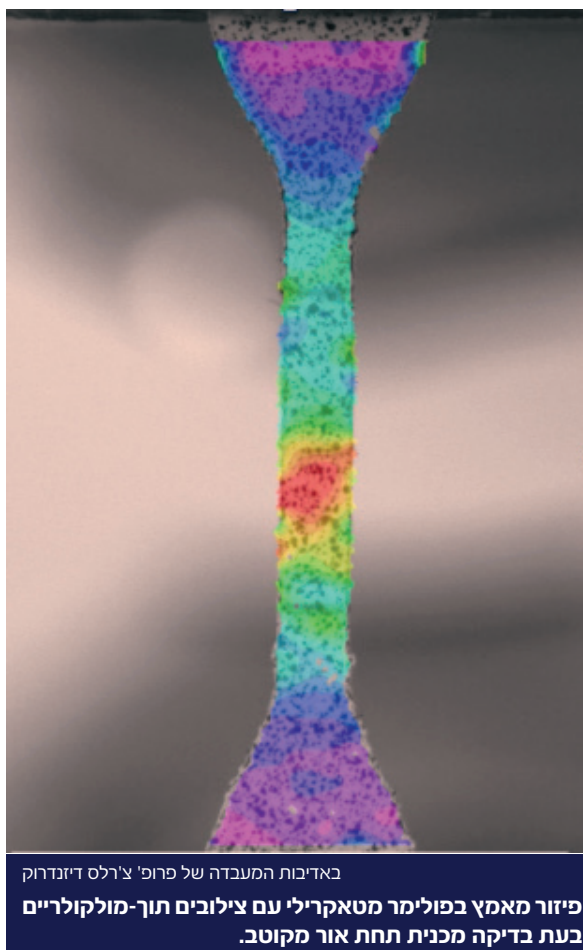
בטבע הדברים שונים. למערכות ביולוגיות קשה יותר לשנות את הכימיה הבסיסית, ולכן הן מוגבלות במונומרים שעומדים לרשותן. בטבע השימוש הוא בעיקר בחומצות אמינו, סוכרים, ולעיתים בחומרים אי-אורגניים כמו סידן. אם נגביל את עצמנו לחומרים העשויים מחומצות אמינו בלבד, נראה כי קיימים חומרים עם מגוון תכונות: מגלים רכים מאוד וחומרים אלסטיים מאוד ועד חומרים קשיחים מאוד - כל אלו מאותם אבני בניין. הטבע

משחק בכוחות תוך-מולקולריים ובין-מולקולריים כדי לשנות את תכונות החומר ללא הצורך לשנות את המונומר המרכיב אותו. לדוגמה, החומר המסוגל לספוג את מירב האנרגיה המכנית לפני שבירה, אינו פלדה או קבלר, אלא חומר המגיע מן הטבע (פולימר) והעשוי ברובו משלוש חומצות אמינו. זהו קור של עכביש אפריקני בעל קשיחות ואלסטיות גבוהה, שילוב של תכונות שאנחנו עדיין לא מסוגלים לקבל מפולימרים סינתטיים במעבדה. בדרך כלל כשהחומר קשיח - הוא שביר; ואם הוא אלסטי - אז הוא חלש. לרוב פולימר סינתטי אינו בעל תכונות של קשיחות ואלסטיות בו-זמנית, אלא רק בעל תכונה אחת מהשתיים, לעומת קור העכביש האפריקני, פולימר טבעי שהינו קשיח ואלסטי בו-זמנית.

אז מה חלקנו בזה? ככימאים סינתטיים בקבוצה שלנו בטכניון, אנו מנסים לתכנן, להכין ולאפיין מולקולות פולימריות לשם הבנת התכונות המכניות של חומרים בטבע שהם בעלי מבנה דומה, ובכך לפתח חומרים סינתטיים טובים יותר. בפרויקטים שונים, שהמשותף להם הוא הקשר בין הכימיה למכניקה, אנחנו מנסים לענות על כמה משאלות אלו:

1. מהם השינויים הכימיים שמתרחשים בפולימרים תחת מאמץ מכני?
2. איך אפשר לכוון את הכוחות המכניים בתוך מולקולות לקשרים כימיים ספציפיים?
3. כיצד סידור שרשרות הפולימר משפיע על תכונות מכניות של חומר פלסטיק?

כלל הפרויקטים מתחילים ברמה הכימית. אנחנו מדמיינים את השרשרות הפולימריות כחוטים או כחיבור של חוטים, שאפשר לעשותם חזקים יותר (קשרים קוולנטיים חזקים) או חלשים יותר (קשרים לא קוולנטיים), או לעשותם ארוכים או קצרים. מבחינתנו, החומרים הם אגרגטים של חוטים אשר "נדבקים" בקשרי ואן-דר ואלס או בקשרי מימן. כאשר עולה שאלת מחקר ספציפית, הסטודנטים מתכננים סדרה של "חוטים" או קבוצות של חוטים אשר יעזרו להם לענות על שאלותיהם. השלב הבא הוא הסינתזה. אנחנו מפרקים את החוטים לחלקים ומבצעים רטרו-סינטזה בדיוק כמו כל הכימאים הסינתטיים. אנחנו מכינים את המרכיבים השונים ובדרך כלל גם מבצעים פילמור לגדלים מוגדרים לפי הצורך. כאשר שרשרות הפולימר מוכנות, אפשר להרכיב לחומר פלסטיק מוצק או לבדוק את היציבות שלהן תחת כוחות מכניים בתמיסה. אנחנו מסוגלים לעקוב אחר שינויים המתרחשים בשרשרות הפולימר: כיצד המשקל המולקולרי המדויק שלו משתנה, גודל החלקיקים, הצמיגות ועוד. במצב המוצק אנחנו מבצעים בדיקות מכניות בדיוק כמו מהנדסי מכונות, כאשר החומרים שלנו תוכננו על ידינו ברמה המולקולרית ואיננו מוגבלים לבחירת חומרים שאפשר לקנות בתעשייה. השוואת קבוצה של חומרים כאשר אנו משנים רק פרמטר אחד - כמו אורך קשר, אנרגיית קשר, משקל מולקולרי, רמת קיפול, גבישיות וכו' - מאפשרת לנו להבין מדוע לחומרים פלסטיים סינתטיים וטבעיים יש תכונות ספציפיות אשר נובעות מהמבנה ומהסידור המולקולרי.



בהמשך לדימוי הפולימרים כחומרים, אם נמתח חוט חזק מדי – הוא ייקרע. כמו כן אם על שרשרת פולימרית יופעל כוח מכני – היא תיקרע בסופו של דבר לשתי שרשרות קצרות. ידוע כי ככל ששרשרת הפולימר ארוכה יותר, תהליך השבירה הזה מהיר יותר. באמצעות יכולתנו אנו שואפים לשלוט בדיוק רב במבנה ובארכיטקטורה של שרשרות הפולימר, ליצור חומרים חזקים יותר, וההשראה מגיעה מן הטבע.

גם גוף האדם מורכב מפולימרים טבעיים, למשל, מחלבונים. החלבון הגדול ביותר בגוף האדם הוא הטיטין, והוא זה שמאפשר את גמישות השרירים. לכן כיצד ייתכן שחלבון כה גדול שנמצא תחת כוח מכני (תנועת השריר) אינו נקרע והשריר אינו נהרס? הדבר מתאפשר מכיוון שהחלבון הענק מצולב (מקושר) דרך שני אתרים שונים שנמצאים על אותה שרשרת פולימר, עובדה הגורמת לחלבון להתקפל. צילוב כזה נקרא צילוב תוך-מולקולרי. בחלבון הטיטין הצילוב הזה הוא הפיך, ותחת כוח מכני הצילובים נקרעים, החלבון "נפרם" אך השרשרת עצמה אינה נקרעת לשניים. כשהכוח מוסר, הצילובים נוצרים מחדש, והחלבון מתקפל שוב. אנו הוספנו צילובים תוך-מולקולריים לפולימרים סינתטיים במטרה לבדוק אם גם הם יראו עמידות גבוהה יותר לכוח מכני בתמיסה – סביבה הדומה לפעילות החלבון טיטין. תוצאות הניסוי הראו בבירור שכבר עם הוספה של כמות מועטה של צילובים תוך-מולקולריים, הפולימר עמיד יותר משמעותית בפני הפעלת כוח מכני לעומת פולימר ללא צילובים. הוספת כמות גדולה של צילובים גרמה לפולימר להיות עמיד כמעט לחלוטין. אם משווים את העמידות של פולימר עם צילובים תוך-מולקולריים לזו של פולימר באורך זהה אך ללא צילובים, מגלים שככל שיש יותר צילובים, יש יותר אפשרויות שהכוח המופעל יקרע את הצילובים בלי לשבור את השרשרת הראשית. הבחנו גם שמצלבים ארוכים יותר מעניקים עמידות גבוהה יותר לפולימרים בעת הפעלת כוח מכני עליהם.

הבנת התהליכים המתרחשים בשרשרות הפולימר תחת מאמץ מכני חיצוני, היא בעלת חשיבות רבה גם בחיי היומיום. לדוגמה – בשמני סיכה של מכונות. שמני סיכה הם קריטיים בהפחתת שחיקה, קורוזיה והפסדי אנרגיה במערכות הכוללות משטחים נעים (למשל, מנועים). שתי דרישות בסיסיות משמנים כאלו: צמיגות ואופן השתנות הצמיגות עם שינוי הטמפרטורה, מושגות על ידי הוספת פולימרים הידועים כמייצבי צמיגות (Viscosity Modifiers) לפורמולציות של השמנים. במהלך העבודה צמיגותו של חומר הסיכה יורדת, ושיעור ירידת הצמיגות עם עליית הטמפרטורה עולה, עקב שבירה מכנית של הפולימרים לנוכח כוחות גזירה¹. האסטרטגיה העיקרית כיום למזעור שינויים אלה היא להגדיל את הנפח של הפולימר בשמן בלי להגדיל את אורך השרשרת הראשית, וזאת על ידי ארכיטקטורות לא ליניאריות כגון שרשרות מסועפות או כוכב. עם זאת פולימרים אלו עדיין אינם חסינים לחלוטין בפני שבירה מכנית. מצאנו כי קיפול מולקולת פולימר ליניארי לננו-חלקיק באמצעות קשרי צילוב תוך-מולקולריים, מעכב באופן דרמטי את שבירת שרשרת הפולימר, וכתוצאה מכך את איבוד תכונות הסיכה של השמן. יתרה מכך, תחת השפעת כוחות גזירה הפולימר המקופל נפתח ונפרש אט אט עקב שבירה בלתי הפיכה של הקשרים הקוולנטיים בתוכו, ותמיסות של פולימרים כאלה בשמן מראות עלייה קבועה בצמיגות עקב השפעת כוחות גזירה. בהתחשב בהיקף הייצור העצום של תעשיית מוצרי הסיכה, משפחה חדשה זו של משני צמיגות עשויה להוביל ליתרונות כלכליים וסביבתיים ניכרים. בעבודת המשך אנו בודקים אסטרטגיות שונות ליצירת קשרי צילוב תוך-מולקולריים. שימוש בקשרי צילוב הפיכים (למשל, קשרי מימן או קשרים קווארדינטיביים), שיכולים להיווצר מחדש לאחר שבירתם, עשוי ליצור מייצב צמיגות בעל תכונות ריפוי עצמי שיציג חסינות גבוהה אף יותר לכוחות גזירה.

כאשר ברצוננו לחקור פולימרים מוצקים ולא בתמיסה, התמונה קצת שונה. פולימרים במצב מוצק מתחלקים לשתי קבוצות עיקריות: תרמופלסטיים ותרמוסטטיים, השונים זה מזה בהתנהגות התרמית שלהם. חומרים תרמופלסטיים מורכבים משרשרות שאינן מחוברות זו לזו בקשרים קוולנטיים, ולכן יכולות לנוע באופן עצמאי, ללא תלות הדדית, עם מתן האנרגיה הדרושה. כתוצאה מכך חומרים אלו ניתנים לעיבוד והתכה בצורה הפיכה בתנאי שלא מתרחש שינוי כימי. לעומת זאת, בחומרים תרמוסטטיים השרשרות מחוברות זו לזו בקשרים קוולנטיים, ולכן אי אפשר להתיך או להמיס את החומר. משמעות הדבר היא שאי אפשר לעבד חומרים אלה לאחר הכנתם. לחומרים תרמוסטטיים יתרון שכן מצד אחד הם עמידים יותר תחת מאמצים, כלומר, התכונות המכניות שלהם משופרות, אך מצד שני לא ניתן למחזר אותם. כדי לשלוט היום על התכונות המכניות של חומר תרמופלסטי, נהוג להחזיר תוספים תוך כדי עיבודו. תוספים אלו משפיעים על האינטרקציות בין השרשרות ללא קישור קלווני. החיסרון בשיטה זו הוא שבתנאים קיצוניים, ולאורך זמן, תוספים אלו דולפים החוצה. במחקר שלנו אנו בוחנים כיצד קיפול שרשרת פולימר לינארית לננו-חלקיק משפיע על התכונות המכניות והתרמיות של החומר. מאחר שהחומר מורכב משרשרות בעלות צילוב תוך-מולקולרי בלבד, הוא נותר תרמופלסטי. אך מכיוון שהארכיטקטורה של השרשרת שונה מזו של שרשרת לינארית, החומר מתאפיין בתכונות מכניות שונות. ממצאי המחקר הראו כי ככל שהשרשרת מקופלת יותר, החומר נהיה שביר יותר, אך החוזק האלסטי אינו מושפע באופן משמעותי מהקיפול. ההסבר לכך הוא שכתוצאה מהקיפול העצמי, מנענו מהשרשרות 'להסתבך' זו בזו, ולכן כאשר מופעל כוח מכני, הן מתנתקות ביתר קלות. בנוסף מצאנו כי העמידות של החומר הפולימרי להתרככות כתוצאה מחימום עולה ככל שהשרשרות מקופלות יותר, וזאת עקב 'ההתערבות' שלנו במבנה השרשרת אשר מגביל את תנועתה בעת השקעת אנרגיה תרמית. חומרים ביולוגיים שעשויים מחלבונים, כמו קור העכביש האפריקני שהוזכר קודם, הם בעלי תכונות מכניות טובות יותר מפולימרים סינתטיים, על אף שאינם יוצרים הסתבכויות בין השרשרות. ההבדל בין מבנים ביולוגיים אלו לבין הפולימרים שאנו מכינים במעבדה, הוא בין השאר בזה שקיימות אינטרקציות חזקות בין החלבונים המקנות תכונות מכניות טובות יותר. ברצוננו לחקור מבנה זה, ולכן אנחנו לומדים את ההשפעות של הקיפול העצמי על התכונות המכניות של החומר. בהמשך למחקר זה אנחנו מעוניינים לבחון אילו מודיפיקציות עליו לבצע בשרשרות הפולימר כדי לשפר את האינטרקציות בין השרשרות ולכוון לתכונות מכניות רצויות.

לסיכום, הכימיה שעליה אנחנו מבססים את המחקרים המבוצעים במעבדתנו היא בבסיסה דומה, אך כל שינוי קטן מוביל למחקרים שונים ומגוונים אשר יסייעו לקדם ולשפר תחום שהולך ומתפתח – פולימרים ומכניקה.

¹ כוחות גזירה הם כוחות לא מישוריים הדוחפים חלק מהגוף לכיוון אחד וחלק אחר של הגוף לכיוון הנגדי.

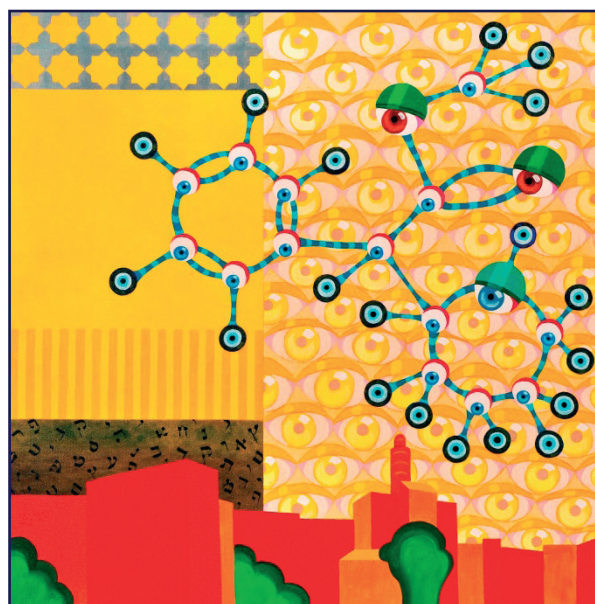
אליהו אריק בוקובזה, כמיקל ג'רוזלם

2010-2012, 4 חלקים, אקריליק על בד, 90X90 ס"מ כל אחד, אוסף פרטי.

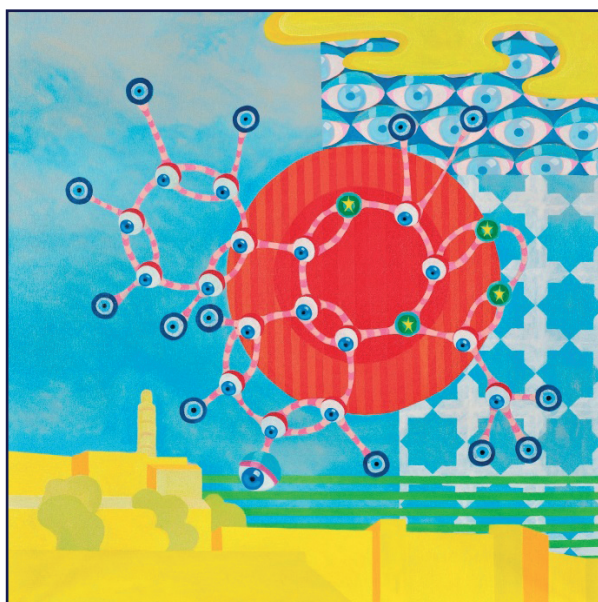
אליהו אריק בוקובזה הפך לצייר לאחר שלמד רוקחות ואף היה בעל בית מרקחת. סדרת הציורים Chemical Jerusalem עוסקת בחרדה הקיומית של הישראלים, והצייר רוקח תרופה למכה. העיניים המשגיחות מעל מסודרות כמודלים של תרופות: אלפרזולם לטיפול בחרדות, סם ההזיה מסקלין, ריטלין להפרעות קשב וויאגרה לזקפה¹. התמונות הועברו באדיבות הצייר אליהו אריק בוקובזה.



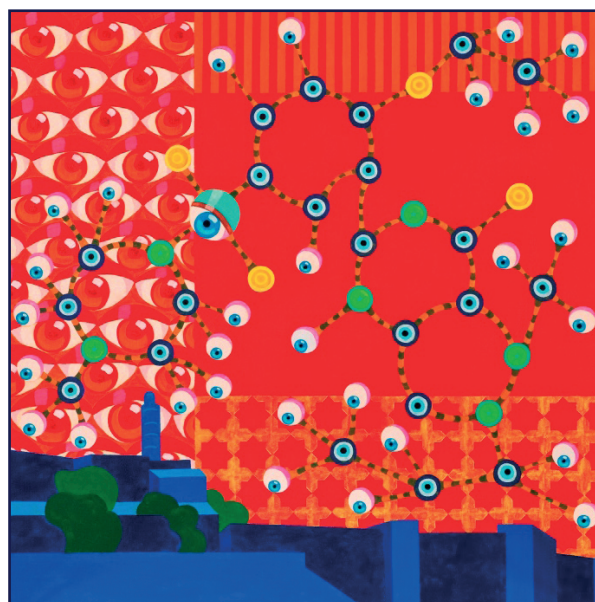
מסקלין



ריטלין



אלפרזולם



ויאגרה

¹ <https://www.erev-rav.com/archives/23717>

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 המשכה 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.



תמונה: Shutterstock, Dimitriy Razinkov and Vadim Almiey

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 בחזיון 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.

ההשפעה 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. זאת 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)¹.

התפתחויות טכנולוגיות - מובילות לחדשנות במדעי הכימיה

ההתפתחות המואצת של הטכנולוגיה תשפיע על הכימיה כפי שאנו מכירים אותה היום. המחקר הכימי שהיום מזהה ברובו עם עבודת מעבדה, יעבור בעיקרו אל מחקר הנעשה באמצעים טכנולוגיים ממחשבים. 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 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 ליצול 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

¹ http://chemcenter.weizmann.ac.il/_Uploads/dbsAttachedFiles.30-48/pdf?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 2016².

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: אסטרונמיה ירוקה, או אלגברה ירוקה.

הקמד 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 שימשך 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.

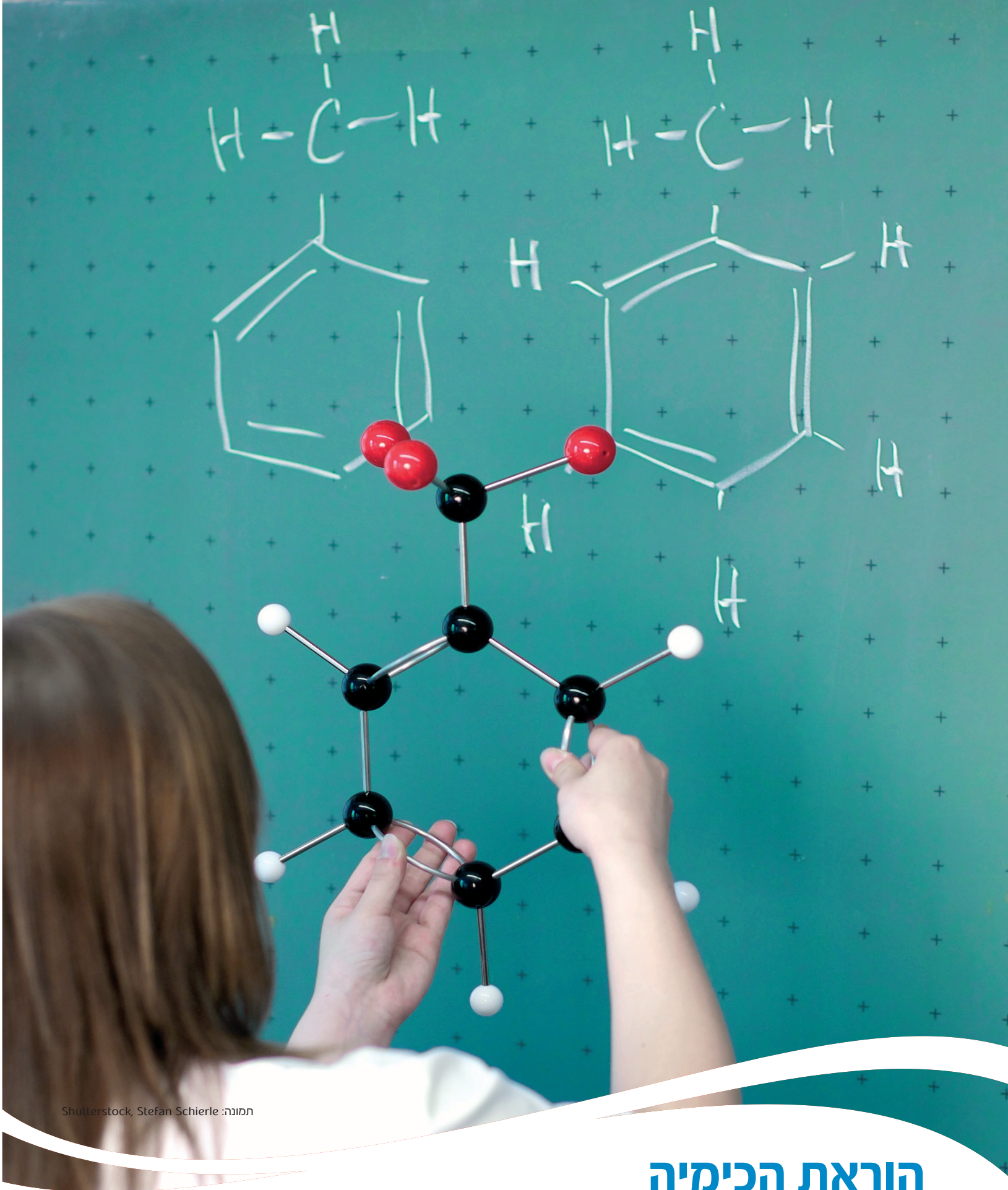
לאחרונה התגלה כי חלב אם מכיל אוליגו-סוכרים (סוכרים הבנויים משרשרת של מספר חד-סוכרים, אך קצרים מרב-סוכר, מורכבים מכ-4-10 יחידות של חד-סוכר). התגלית הזו היא תגלית ברמת המיקרו. נעשתה אנליזה של מרכיבי חלב האם והיא הובילה לתגלית, שאותה תיארו במאמרים באמצעות שרטוט המבנים של האוליגו-סוכרים שנמצאו. ברמת התופעה, 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. ולכן 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 שבחרות 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.

² <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).
- Bertozi, 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. 3<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



תמונה: Shutterstock, Stefan Schierle

הוראת הכימיה

התפתחויות בהוראת המדעים ובהוראת הכימיה בישראל

ד"ר דורית טייטלבוים, מפמ"ר כימיה, המזכירות הפדגוגית משרד החינוך, ו**ד"ר רחל ממלוק-נעמן**, קבוצת הכימיה, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

מתחילת המאה העשרים ועד תחילת שנות השישים של המאה הקודמת לימדו כימיה כאוסף של חוקים ועובדות, בהתאם לספרים שרובם חוברו באוניברסיטאות. המעבדות היו מבוססות ברובן על ניסויים מאשרים, והספרים כללו כימיה תיאורית. בעקבות משבר הספוטניק' השתנו תוכניות הלימודים בארצות-הברית בשנות ה-60 וה-70, והושם דגש על מבנה הדעת ועל הוראת מדע דרך החקר. בעקבות השינויים בתוכניות הלימודים בארה"ב חלו שינויים גם בישראל. שינויים שחלו בעולם הובילו בהמשך למסקנות שונות בתחומי הוראת המדעים בכלל והוראת הכימיה בפרט, וכתוצאה מכך חלו שינויים בתוכניות הלימודים.

מה אנחנו מצפים מהוראת הכימיה?

1. על הוראת הכימיה להציג לפני התלמידים תמונה מלאה של תחום הדעת אשר תכלול את התאוריות והמודלים, כולל הצגה של שיטות המחקר, של התהליכים של בניית הידע המדעי ומגבלותיהם.
2. על הוראת הכימיה להציג בפני התלמידים תמונה מלאה על אישיותם של המדענים, צורת החשיבה שלהם ודרך עבודתם.
3. על הוראת הכימיה להניע את התלמידים לחוות את המשמעות של חוסר היכולת להסביר תופעות מדעיות מסוימות ולגרום לכך שיכירו את התפתחות הכימיה לאורך השנים.
4. על הוראת הכימיה להיות משמעותית לתלמידים ולגרום להם להתעניין בתחום מדעי זה.

היבטים שונים שהשפיעו על התפתחות תוכניות הלימוד בכימיה ועל מטרות הוראה ולמידה

בין המשפיעים על תוכניות לימודים במדעים ניתן למצוא קשת רחבה של גורמים, וביניהם גורמים מדיניים, פוליטיים, תרבותיים, כלכליים, חברתיים, תאוריות בפסיכולוגיה ותאוריות בתורת הלמידה וההוראה. בהסתכלות על תוכניות הלימוד שנכתבו, ניתן לראות את הגורמים הנ"ל עוברים מאחורי הקלעים כחוט השני ומתווים את המטרות של תוכניות הלימודים.

היבטים מדיניים, תרבותיים, כלכליים וחברתיים

עד לשנות ה-60 של המאה הקודמת היו התוכניות ללימודי המדע וללימודי הטבע מונופול של האוניברסיטאות, ועיקרן היה הקניית אוסף חוקים ועובדות בתחומי המדעים. במקביל לשינויים המשמעותיים בעולם בתחומי המדע והטכנולוגיה, עם התעוררות האמונה ביתרונות המדע והטכנולוגיה לתועלת החברה, בעקבות תוכנית המירוץ לחלל, המלחמה הקרה ומשבר הספוטניק, הובן בארה"ב שיש צורך בשינוי דרמטי בתוכנית הלימודים במדעים. מטרת התוכנית החדשה בארה"ב הייתה להכשיר דור חדש של מדענים שיוכלו לתת מענה לאתגרים הלאומיים. התוכנית כוונה לתלמידים בעלי גישה מדעית ויכולות למידה גבוהות כך שהתאימה לחלק מצומצם מכלל התלמידים שעתיד להפוך לדור המדענים הבא של ארה"ב. תקציב כלכלי יוחד למשימה, והייתה עלייה משמעותית במשאבים שהופנו למדע. בעקבות משבר הספוטניק בתחילת שנות השישים, הסיקו אנשי מדע אמריקנים שתפקידה של הוראת המדעים היא הקניית מושגי מפתח ועקרונות מאחדים במדע. כל התוכניות שפותחו הדגישו את שיטת החקר.



¹ משבר הספוטניק היה נקודת מפנה במלחמה הקרה, כאשר בריה"מ שיגרה ב-1957 את הלוויין ספוטניק 1 לחלל והפגיעה בכך את ארה"ב שהאמינה כי היא המובילה בכל נושא טכנולוגיית החלל. משבר זה גרם להאצת תכנית החלל האמריקאית ולהקמת נאס"א.

התוכניות התמקדו בנקודות כגון אלה:

- מהו מדע ?
 - כיצד מצטבר ידע מדעי?
 - מהי דרך עבודתם של מדענים?
 - מהם המודלים והתאוריות שלפיהם נבנית תורת המדענים?
- בשנות ה-70 הוכרזו המדע והטכנולוגיה כבלתי מועילים לחברה ואף מזיקים לה, כדוגמה ניתנה מלחמת וייטנאם שגרמה בהמשך לבעיות אקולוגיות, למשבר כלכלי ולמשבר אנרגיה. עקב כך פותחו תוכניות לימודים חדשות שלא עסקו בשיטת החקר[1].
- בשנות ה-80 הייתה התאוששות כלכלית בארה"ב, וחודשה ההכרה בהוראת המדעים כבעלת תרומה מרכזית לחינוך. בהתאם הייתה עלייה בתקציבי החינוך המדעי. אנשי החינוך הבינו שתוכנית הלימודים הקיימת אינה מתאימה לכלל התלמידים, וכי יש להתאימה לקהל תלמידים הטרוגני יותר ולשים דגש על גישה בינתחומית בלימוד המדעים.
- בנוסף חלה לאורך השנים גם התפתחות משמעותית בתאוריות על תהליך הלמידה. חוקרי למידה, הוראה וקוגניציה כמו פיאז'ה, אוסובל, שוואב השפיעו והנחו את כותבי תוכניות הלימוד החדשות.

היבטים פסיכולוגיים

- **התאוריה של פיאז'ה - שלבי ההתפתחות האינטלקטואלית.**
התלמידים יגיעו לשלב הפורמאלי בערך בגיל 12 וישלימו את ההתפתחות האינטלקטואלית בגיל 15. מחקרים שנעשו על התיאוריה של פיאז'ה הובילו לכיוונים אחרים שלפיהם הלומדים בונים את תמונת העולם שלהם בהתבסס על תצפיות, התנסויות והזדמנויות שאפשרו להם לרכוש ולאגור ידע חדש [2].
- **התאוריה של אוסובל - מודל ההטמעה.**
אוסובל שם את הדגש על הידע המוקדם של התלמידים והתעלם מהשלבים בהתפתחותם האינטלקטואלית לאורך השנים. המודל של אוסובל בלמידה הוא מודל ההטמעה שלפיו בשעה שמתרחשת למידה משמעותית, כל הלומדים מעבדים אותה לפי מבנה מושגי הקיים כבר בהכרתם, וכל אחד מטמיע אותה בדרכו המיוחדת[3].
- **התאוריה של גניה - שיטת הלימוד ההיררכית.**
גניה דן בהיררכיות בלמידה ועסק בהרכבת "מבני למידה". הוא מבחין בין למידה של "ידע לימודי" המתאים לתוכנית הלימודים לבין "מיומנויות" הקשורות לתהליכים. לדעתו, מודל הלמידה ההיררכי מתאים ביותר לרכישת כשרים אינטלקטואליים החשובים לתלמידים יותר מידע של המדע [4].

היבטים פילוסופיים - הגישה הקונסטרוקטיביסטית

- מהם עקרונות הגישה הקונסטרוקטיביסטית [5]?
1. הידע המדעי אינו מתגלה אלא נבנה אצל התלמידים.
 2. המדע אינו כולל אוסף של עובדות, אלא מורכב מהשערות, תאוריות ומודלים שמדענים מפתחים כדי להסביר תופעות שונות.
 3. הלמידה היא תהליך של ארגון הידע ובניית תבניות חשיבה ע"י הלומדים עצמם, על סמך התנסויותיהם ותוך כדי הבחנה במה שמתרחש סביבו.
 4. הלמידה היא תהליך שבו מתקיימת בניית ידע אצל התלמידים.

המטרות שהוגדרו בהוראת המדעים

- ניתן לסווג את המטרות שהוגדרו בהוראת המדעים בארץ ובעולם עפ"י שלבי ההתפתחות השונים של התוכניות השונות במדעים.
- א. עד שנות השישים התרכזו המטרות בהקניית חוקים ובהוראת עובדות בכל אחד מתחומי המדעים - כימיה, פיזיקה וביולוגיה.
 - ב. החל משנות השישים כוונת התוכניות והופעלו כדי להכין דור חדש של חוקרים שילמדו ואחר כך יעבדו בדרכי חשיבה חדשניות.

תוכניות הלימודים בארצות הברית ובישראל

השנים שבין 1955-1974 הוגדרו בארה"ב כ"תור הזהב בחינוך", והושקעו מיליוני דולרים בפיתוח רפורמות חדשותלשתי המטרות האלה:

1. להעשיר את תוכנית הלימודים הקיימת בידע עכשווי.
2. להדגיש את התהליך של המחקר המדעי באמצעות התנסות במעבדה.

מושגי המפתח של תוכניות הלימודים [6]:

1. עליהן לייצג את הרעיונות הבסיסיים של מבנה הדעת.
2. עליהן להסביר את התופעות המדעיות.
3. עליהן ליצור הכללה של תופעות מדעיות.
4. עליהן לפתח כישורים קוגניטיביים אצל הלומדים.
5. עליהן להדגיש את תפקיד המדע בהתייחס להישגים השונים של האדם.

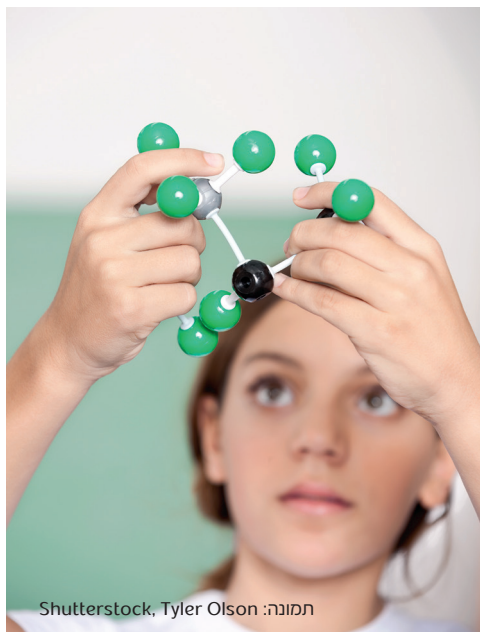
המהפכה החינוכית בישראל

המהפכה החינוכית בישראל כללה את הצעדים האלה:

- א. הפיכת המעבדה החוקרת לבסיס ההוראה.
 - ב. השקעה רבה בתרגום ספרי לימוד מאנגלית. הודות למאמץ משותף של משרד החינוך ומורים למדעי הטבע, תורגמו לעברית רוב ספרי הלימוד ורוב תוכניות הלימודים שנלמדו בארה"ב ובאנגליה.
 - ג. ארגון השתלמויות מורים כדי להכשיר מורים להתמודדות עם שיטות הוראה לא פרונטאליות.
- תוכניות הלימודים שנכתבו בישראל עקבו אחר ההתפתחויות בתחום שחלו בעולם ובעיקר בארה"ב והתבססו על תוכניות להוראת המדעים שפותחו שם. בסוף שנות ה-60 הופעלה התוכנית "כימיה לבית ספר תיכון" שהייתה ברובה תרגום של "Study Chem" האמריקנית. הייתה זו תוכנית שמבוססת על למידה מניסויים, והיא התאימה לתלמידים ספציפיים בעלי יכולת הסקת מסקנות מצפייה בניסוי. בתחילת שנות ה-70 פותחה תוכנית שהתבססה על תוכנית החקר האנגלית "Nuffield". מחקרים בעולם שליוו את הפעלת התוכניות הללו הצביעו על-כך שהתוכנית אינה מתאימה לקבוצה הטרוגנית של תלמידים אלא רק לבעלי יכולות גבוהות עם מכוונות אקדמית. בנוסף לא היו בה הקשרים להיבטים חברתיים וטכנולוגיים. גם בישראל התברר ששישום התוכניות הללו לא הגדיל את מספר התלמידים שפנו ללימודי מדע בבתי הספר העל-יסודיים.

ביקורת על תוכניות הלימודים של שנות ה-60 וה-70 [1]

1. למרות שהתוכניות העמידו את התלמידים במרכז כ"חוקרים מדעיים", הן לא בדקו את הידע המוקדם שלהם, את יכולתם ואת מידת התעניינותם במדע.
2. התוכניות נכתבו לפלח מצומצם של תלמידים בעלי יכולת גבוהה ולא לאוכלוסייה הטרוגנית.
3. בתוכניות לא שולבו בעיות חשובות המטרידות את האזרחים בחיי היום יום כמו הנדסה גנטית, רדיואקטיביות, תזונה וכיו"ב.



תמונה: Shutterstock, Tyler Olson

תכניות הלימודים של שנות ה-80

הביקורת שהופנתה כלפי תוכניות הלימודים של שנות ה-60 וה-70 שימשה בסיס להכנת תוכניות הלימוד בשנות ה-80. בהתאם לכך ננקטו הצעדים האלה:

1. פותחו תוכניות לימוד חדשות שהותאמו לכיתות הטרוגניות.
2. שולבו בעיות חברתיות וסביבתיות.
3. התוכניות כללו השלכות טכנולוגיות הקשורות לתעשייה הכימית.
4. הורחב המערך של השתלמויות המורים.
5. המעבדה עמדה במרכז התוכניות אך ללא קשר לסוגיות של חברה וטכנולוגיה.

בשנות ה-80 וה-90 פעלה בישראל תוכנית בשם "כימיה אתגר" [7] שהייתה מיועדת לקבוצת תלמידים הטרוגנית יותר בחטיבה העליונה. בתוכנית הוצג הקשר ההדדי בין העובדות המדעיות לבין ההסבר של העובדות, המשתנה ומתעדכן כאשר עובדות חדשות מתגלות. בתוכניות אלו שולבו בעיות חברתיות וסביבתיות, והן כללו השפעות טכנולוגיות הקשורות לתעשייה הכימית.

בתחילת שנות ה-90 ולפי דו"ח ועדת הררי שפורסם בשנת 1992 [8] פותחו:

- א. מטרות בתחום התוכן המדעי - הבנת יחסי הגומלין בין מדע, טכנולוגיה וחברה.
 - ב. מטרות בתחום הקוגניטיבי - פיתוח לומדים עצמאיים על ידי ביצוע פרויקטים עצמאיים.
 - ג. מטרות בתחום האפקטיבי - פיתוח מודעות לחשיבה ביקורתית ולקבלת החלטות שדרוש לגביהן ידע טכנולוגי מדעי.
- בעבר קיבלו התלמידים חינוך כימי. כיום לפי קמפה [9] יש לתת לתלמידים חינוך דרך הכימיה. מה ההבדל בין שתי הגישות, ובאילו ממדים מתוך ששת הממדים להוראת הכימיה מתמקדת כל גישה?

ששת הממדים להוראת הכימיה לפי קמפה:

1. המבנה המושגי של הכימיה.
2. התהליך החשיבתי בכימיה.
3. הביטוי הטכנולוגי של הכימיה.
4. הכימיה כנושא רלוונטי לתלמידים.
5. ההיבטים התרבותיים של הכימיה.
6. היישום של הכימיה בבעיות חברתיות וסביבתיות.

בסוף שנות ה-90 ותחילת שנות ה-2000 נכתבו תוכניות לימוד חדשות, רלוונטיות יותר לתקופה, בדגש על קישור לעולם היישומים הטכנולוגיים-מדעיים שמסביב. בהתאם לכך התגבשה התוכנה שלפיה כימיה מהווה חלק אינטגרלי מתחומי הדעת, חלק מהתרבות הטכנולוגית המתפשטת, וכי אוריינות מדעית צריכה להיות מרכיב בהכשרתם של כל האזרחים כדי לתפקד נכון בחיי היום-יום. בתוכניות אלו הושם דגש על למידה בדרך החקר על ידי ביצוע ניסויים במעבדה. בנוסף התחדדה האבחנה בין שלוש רמות הבנה אצל התלמידים: הרמה המאקרוסקופית - הכוללת תופעות שנתפשות בחושים; הרמה המיקרוסקופית - שמתארת את עולם החומר והכימיה ברמה המולקולרית תוך כדי התייחסות למבנה, קשרים כימיים ואנרגיה; רמת הסמל - המייצגת את השפה הכימית, את התיאור של חלקיקים בציוור, באנימציה, בתמונה וכיו"ב. בנוסף שולבו בהוראת הכימיה אסטרטגיות חשיבה ברמה גבוהה.

בעקבות דו"ח הררי "מחר 98" הוקמו 11 מרכזי המורים הארציים בתחומי המדעים והמתמטיקה, וביניהם המרכז הארצי למורי הכימיה, והורחבו השתלמויות מורים בעיקר בנושא שילוב המחשוב במעבדה.

פעולות מרכזי המורים: קורסים, קהילות מורים, כנסים וימי עיון, אתר אינטרנט ובו חומרי ההוראה והלמידה וכתב עת על הוראת הכימיה.



תמונה: Shutterstock, sirtravelalot

בעשור השני של שנות ה-2000 עודכנה תוכנית הלימודים ונכתבה תוכנית הלימודים 30-70 ללמידה משמעותית. בתוכנית זו הודגש מעמדה של הכימיה כ"צומת" של המדעים - המדע המרכזי. במסגרת זו נבחרו תכנים בסיסיים ועקרונות יסוד, היוצרים מחד בסיס מוצק להבנה מעמיקה בכימיה, הנחוצה להבנת העולם הסובב אותנו; ומאידך, מאפשרים הבנת תכנים חדשים בכימיה שיילמדו בעתיד. בנוסף שולבו בהוראת הכימיה מרכיבים של ערך, מעורבות ורלוונטיות - עמ"ר. דרכי ההערכה הן מגוונות יותר וכוללות הערכה חלופית גם בהקשר של ידע תוכן בכימיה וגם בהקשר של מעבדת החקר.

התכנים ששולבו בפועל בהוראת הכימיה בבתי הספר

- הוראת חקר במעבדה: נכתבה והחלה לפעול בבתי הספר תוכנית הכוללת ניסויי חקר במעבדת החקר
 - הצגת האופי הניסויי של הכימיה, הכימיה כתחום רלוונטי לתלמידים בחיי היומיום, הקשר בין עובדות מחיי היומיום להסבר המדעי לקיומן.
- בעשור הראשון של שנות ה-2000 נכתבה והופעלה תוכנית לימודים חדשה בכימיה. המטרות המרכזיות של תוכנית לימודים זו היו: הקניית מיומנויות חקר באופן כללי ובמעבדה בפרט, הבניית אסטרטגיות חשיבה, פיתוח אוריינות כימית, פיתוח סקרנות מדעית-כימית.

פירוט המאפיינים של הוראת הכימיה החל משנת 2000

- ביצוע מעבדת החקר ופרויקטים בשילוב הערכה חלופית.
- חידוד האבחנה בין שלוש רמות הבנה אצל התלמידים: הרמה המאקרוסקופית - הכוללת תופעות שנתפשות בחושים; הרמה המיקרוסקופית - שמתארת את עולם החומר והכימיה ברמה המולקולרית אגב התייחסות למבנה החומר, קשרים ואנרגיה; רמת הסמל - המייצגת את השפה הכימית, את התיאור של חלקיקים בציור, באנימציה, בתמונה וכיו"ב.
- שילוב אסטרטגיות חשיבה ברמה גבוהה בהוראת הכימיה.
- הכרת הכימיה בחיי בהקשרים חברתיים, סביבתיים ותעשייתיים.
- הכנת התלמידים ללימודים אקדמיים בתחומי הכימיה והמדעים הקרובים: ביולוגיה, ביוטכנולוגיה, רפואה, הנדסה, מדעי הסביבה, חקלאות ועוד.
- הכרת הכימיה כמקצוע משיק למקצועות מדעיים נוספים: פיזיקה, ביולוגיה, רפואה, הנדסה, מדעי הסביבה, מדעי כדור הארץ, חקלאות.

משנת 2013 הועמקו והתבססו ההיבטים הבאים:

- הכימיה "צומת" של המדעים - המדע המרכזי.
- מיומנויות חקר במעבדת חקר תוך כדי ביצוע ניסויי חקר.
- קריאה ביקורתית של מאמרים מדעיים מעובדים.
- עמ"ר - ערך, מעורבות, רלוונטיות לתלמידים.
- ביצוע פרויקטים.
- שימוש במחשב וברשת האינטרנט לקידום ידע והבנה אגב שימוש באנימציות, סרטונים וסימולציות.

הפיתוח המקצועי נפרש לכיוונים חדשניים נוספים, והפיתוח המקצועי הקלאסי שודרג בהיבטים האלה:

קהילות מורים - לימוד ידע תוכני-פדגוגי בהוראת הכימיה ושימוש בעדויות לראייה חקרנית על מעשה ההוראה.

קורס מורים חונכים - הקמת מאגר חונכים, שהם מורים ותיקים, שיתמוך במורים חדשים.

קורס רכזי מקצוע - עוסק בתפקיד הרכזים בבית הספר.

קורס פדגוגיה דיגיטלית - לקידום מיומנויות דיגיטליות בהוראה.

השתלמויות במחוזות - עוסקות בנושאים מקצועיים הנחוצים להתפתחות מקצועית של מורי כימיה ולהטמעת שינויים במקצוע.

השתלמויות ארציות - בנושאים עיוניים, במעבדת החקר ובהכשרת המורים החדשים לכימיה.

- פיתוח והרחבה של קהילות המורים בכימיה כך שיגיעו גם לפריפריה הקרובה והרחוקה.
- פיתוח כלים חדשניים ובעיקר ממוחשבים לשימוש התלמידים והמורים לצורך הבנת הכימיה ברמה המיקרוסקופית, המולקולרית והנומטרית
- פיתוח מקצועי של מורי כימיה שיתקיים גם בתוך הפקולטות לכימיה שבאקדמיה, תוך התנסות מחקרית-אקדמית ביחד עם דוקטורנטים וחוקרים.
- פיתוח מעבדות מרכזיות שבהן יופעל ציוד מתקדם ומיוחד שלא קיים בבתי הספר כדי שמורים ותלמידים יוכלו להגיע ולהתנסות בו.
- תקצוב ההצטיידות והבינוי למעבדות הכימיה.
- פיתוח חומרי הוראה חדשניים ועדכניים.

אתגרים

- הבנת התרומה של מקצוע הכימיה למדינת ישראל וחשיבותו כמנוע צמיחה לפיתוח הכלכלה והאיתנות. המדינית. כיום, מהווה הכימיה 20% מהתמ"ג בישראל [10].
- צמצום מספר התלמידים הנכשלים בבחינת הבגרות בכימיה.
- פיתוח מקצועי של מורי כימיה בפקולטות לכימיה באקדמיה, על ידי התנסות מחקרית-אקדמית בהנחיית דוקטורנטים וחוקרים.
- השקעה בפריפריה - פיתוח ובינוי מעבדות מרכזיות מתקדמות ומצוידות, שבהן פועל צוות אקדמי מקצועי ואליו מגיעים התלמידים בליווי מורים לביצוע ניסויים שלא ניתן לקיים במסגרת בית הספר ולהרצאות מדעיות.
- שדרוג מעבדות הכימיה בבתי הספר, השקעה בבינוי, במכשור מתקדם ובמחשוב, לביצוע ניסויים חדשניים ברמה גבוהה.
- שמירה על דינמיות במקצוע כך שימשיך להיות רלוונטי לתלמידים לאורך שנים.

ביבליוגרפיה

1. Chen, D., and Novic, R. (1986). Israeli Science Technological Center, School of Education, Tel-Aviv University.
2. Herron, D. (1975). *Journal of Chemical Education*, 52, 146-150.
3. Nussbaum, J. (1989). *International Journal of Science Education*, 11, 530-540.
4. Shulman, L. D., and Tamir P. (1973). Research on Teaching in the Natural Sciences In: R.M.W. Travers (Ed) *Second Handbook of Research on Teaching*. Chicago.
5. Nussbaum, J. (1998). In: J. J. Mintzes, J. H. Wandersee, and J. D. Novak (Eds). *Teaching Science for Understanding* (pp. 165-194). Academic press.
6. Hurd, D. H. P. (1970). In: S. Hills (ED.). *Proceedings of the Second International Conference on history and Philosophy of Science and Science Teaching*, 467-471/
7. Ben-Zvi, R., Eylon, B. S., and Silberstein, J. (1986). *Studies in Educational Evaluation*, 12, 213-223.
8. Tomorrow 98: Report of the superior committee on science mathematics and technology in Israel (1992). Jerusalem: Ministry of Education and Culture (English Edition: 1994).
9. Kempa R. F. (1983). *Proceedings of the 7th International Conference in Chemistry, Education, and Society, Montpellier, France*, pp. 34-42.

10. הדוח - ועדת איכות ראשונה, פרק 4, עמודים 5-6:

<http://che.org.il/wp-content/uploads/2012/07/General-Report1.pdf>

אגודה להשתלמות במדע

חיפה (בית כבזר) רח' כבזר 54

במוצאי שבת, 15 בינואר 1944, ב-6

חוג למוסיקה: הסימפוניה האו לבטהובן (Beethoven)

ביום ראשון, 16 בינואר

ב-6 ד"ר ח. צויגל: בעיות לימוד החשבון בבית הספר העממי

ב-6⁴⁵-7⁴⁵ בשיתוף עם האוניברסיטה —

ד"ר י. ליבוביץ: החומר החי ותחילת החמרים. מושג ההתפתחות

ב-8⁴⁵ חוג למוסיקה: באך - קונצרט ברנדנבורגי מס' 2; מוצרט - נגינת כילה ועירה; בראהמס - הסימפוניה מס' 4 Bach; Mozart; Brahms

ביום שני, 17 בינואר

ב-7 ד"ר י. ליבוביץ: מכניזם וויטליזם

ב-8³⁰ בשיתוף עם שוחרי האוניברסיטה —

ד"ר ד. אשבל:

ההבדל ההידרולוגי בין שני טברי הורדו

ביום שלישי, 18 בינואר

ב-6.30 הסמינר לתורת המוסיקה (מר יונל פמח)

ב-7 ד"ר ב. מורצויל: כתבי הסופר י. בורלא (בסמינר לספרות)

ב-8³⁰ מר צבי זילברשטיין:

כיצד נחשב את המבע על הנוער? (הרצאה להורים)

ביום רביעי, 19 בינואר

ב-7 ד"ר נ. רובינזון: הסגולות הכימיות של האמום (לוח מנדלייב)

ביום חמישי, 20 בינואר

ב-7 מר ש. אפפלבוים: מתמטיקה לכל

(סקירה על ספרו של הפרופ' א"ה פרנקל)

ההרשמה בקורס לפירוסופיה

של ד"ר נ. רוטנשטיין (אוניברסיטה) מסתיימת ב-17 לינואר



אגודה להשתלמות במדע, 1944

"מסע בזמן", אוסף האפמרה - הספרייה הלאומית.



תמונה: Shutterstock, Paramonov Alexander

ארבע שאלות לארבעה חתני פרס נובל לכימיה

שאלה וערכה: רותי שטנגר

ארבעה חתני פרס נובל לכימיה שמחו לענות לארבע שאלות שנשלחו אליהם:

פרופ' אברהם הרשקו ופרופ' אהרן צ'חנובר מהפקולטה לרפואה בטכניון זכו בפרס נובל לכימיה בשנת 2004 יחד עם פרופ' אירווין רוס מאוניברסיטת קליפורניה. הפרס ניתן להם על חקר מערכת היוביקוויטין, האחראית לפירוק חלבונים בתוך התא.¹

פרופ' עדה יונת ממכון ויצמן זכתה בפרס נובל לכימיה בשנת 2009 יחד עם תומאס סטייץ מאוניברסיטת ייל וונקטרמן רמאקרישן מאוניברסיטת קיימברידג'. הפרס ניתן להם על מחקריהם להבנת המבנה והתפקיד של הריבזום.²

פרופ' אריה ורשל מאוניברסיטת דרום קליפורניה זכה בפרס נובל לכימיה בשנת 2013 יחד עם מרטין קרפלוס מאוניברסיטת הרווארד ומיכאל לויט מאוניברסיטת סטנפורד. הפרס ניתן להם על פיתוח מודלים ממוחשבים להבנת מערכות כימיות מורכבות.³ פרופ' ורשל למד לתואר ראשון בטכניון ולתואר שני ולדוקטורט במכון ויצמן.

תשובותיהם מובאות על פי הסדר האלפביתי של שמותיהם.

1. מדוע החלטתם ללמוד באוניברסיטה את המקצוע שבו בחרתם?

פרופ' אברהם הרשקו

למדתי רפואה, ומתוך כך התחלתי להתעניין בביוכימיה, שהוא אחד ממקצועות הבסיס במדעי הרפואה. אני ביוכימאי ולא כימאי.

פרופ' אריה ורשל

אין סיבה מיוחדת. למעשה, חבר אמר לי שעליי ללמוד כימיה כי יש לי ראייה טובה.

פרופ' עדה יונת

עקב סקרנותי.

פרופ' אהרן צ'חנובר

האמת שלא החלטתי ללמוד כימיה ומעולם לא למדתי כימיה. ב-1965 התחלתי בלימודי הרפואה במסגרת העתודה האקדמית בבית הספר לרפואה של "הדסה" והאוניברסיטה העברית. בבית הספר התיכון למדתי במגמה הביולוגית והיו לי מורים מצוינים לכימיה ולביולוגיה (נעמה גרינשפין ונעמי נוף ז"ל), אך רכשנו מעט ידע במדע ניסיוני-מעבדתי ולא ידעתי מה המשמעות של שאילת שאלה מדעית, ובמיוחד כיצד ניגשים לפתרה במעבדה. לכן החלטתי ללמוד מקצוע, שגם עליו לא ידעתי רבות (אבי המנוח היה עורך דין, ואחי שייבדל לחיים לשנים ארוכות - גם הוא עורך דין. אמי המנוחה הייתה מורה לאנגלית), אך הילכה סביבו הילה רבה. תוך כדי לימודי הרפואה התחלתי להתעניין במדע, לא דווקא מתוך הסקרנות להבין כיצד מרפאים מחלה, אלא בעיקר כיצד מחלות נגרמות מלכתחילה ומה המנגנון העומד בבסיסן. בחרתי בכימיה - אך בכימיה של החיים - בביוכימיה. לקחתי שנת חופשה מלימודי הרפואה ועשיתי תואר שני בביוכימיה בפקולטה לרפואה בהנחייתם של שני מדענים מצוינים - פרופ' בנימין שפירא המנוח ופרופ' יעקב בר-תנא שייבדל לחיים ארוכים. חקרתי מנגנונים הגורמים להשמנת כבד והתאהבתי בביוכימיה. ידעתי שאחזור יום אחד. סיימתי את לימודי הרפואה, סיימתי את שירותי הצבאי כרופא קרבי ולאחר מכן ביחידת המחקר והפיתוח של חיל הרפואה. לאחר רומן קצר עם כירורגיה חזרתי לאהבתי הישנה - הביוכימיה, ועשיתי את הדוקטורט שלי במקצוע זה בהנחייתו של הפרופ' אברהם הרשקו, גם הוא ביוכימאי מן השורה הראשונה. במהלך השנים בהנחייתו גילינו - ביחד עם שותפנו בפילדלפיה, הפרופ' ארווין רוז המנוח - את מערכת היוביקוויטין לפירוק חלבונים. הביוכימיה הפכה באמת לאהבת חיי מאז ועד עצם היום הזה.

¹ https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2004/press-he.pdf

² https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2009/press_hebrew.pdf

³ https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2013/popular-chemistryprize2013.pdf



2. כיצד אפשר למשוך יותר צעירים ללמוד כימיה ומקצועות מדעיים קשורי-כימיה?

פרופ' אברהם הרשקו

אם המורים יתלהבו מהוראת המדעים, "ידיביק" הדבר את התלמידים ויעורר את סקרנותם.

פרופ' אריה ורשל

עלינו להבהיר כי הכימיה היא הגשר לכל הבנה מולקולרית של העולם סביבנו. כך שאם הם רוצים להתקדם בהבנה של תהליכי החיים, המפתח הוא קודם כול לימוד כימיה. בצורה דומה אם הם רוצים לעזור בבעיות אנרגיה - נקודת ההתחלה היא הכימיה.

פרופ' עדה יונת

לפתח את סקרנותם באמצעים לא קונוונציונליים.

פרופ' אהרון צ'חנובר

אני חושב שתפיסת הכימיה בעיני הצעירים היום - וזאת בשל הסברה לא נאותה מצד הממונים על המקצוע בכל הדרגים - היא של מקצוע מסובך, שעוסק בכלי זכוכית שמהם עולים אדים מהבילים ובעלי ריח לא נעים שגם עלולים להתרסק בכל רגע ולגרור נזק גופני לעוסקים בהם, ולא כך הוא. הכימיה היא כל העולם כולו הסובב אותנו. הבגדים שאנו לובשים עשויים לרוב מפולימרים סינטטיים, אך גם סיבי הכותנה הבאה מן הצומח או הצמר הבא מן החי הם תרכובות כימיות בעלות מבנה מרתק. התרופות שאנו נוטלים הן תרכובות כימיות. אלפי החלבונים והמולקולות הקטנות שמהם עשוי גופנו - המנועים הקטנים המניעים אותו - מן השרירים ועד משאבות היונים - כולם, אבל כולם, הם תרכובות כימיות בעלות מורכבות זו או אחרת. מנגנוני העברת האותות בגוף - הראייה, השמיעה, הפעולות של כל האברים - מן המוח ועד הכליה - מתווכות כולן על ידי מבנים מורכבים, העשויים כולם מאבני יסוד של הכימיה. כל האמצעים המשוכללים שסביבנו, החומרים השונים שמהם עשוי הרכב שאנו נוהגים בו, הטלפון החכם שבידינו, מכשיר הטלוויזיה שממנו אנחנו כה נהנים, כולם עשויים תרכובות כימיות. הכימיה היא ים אינסופי אשר משום מה השכילו הכימאים והאחרים למקצוע לטעת בבני הנוער תדמית צרה שלו. עתה, אם אנחנו רוצים למשוך דור חדש למקצוע - יש להרחיב את תמונת המקצוע, לתארה בצבעים הנכונים, ובמיוחד לתת לה את החשיבות המתאימה בחיי כלנו. הדבר ידרוש גם שינויים מרחיקי לכת במבנה הפקולטות לכימיה באוניברסיטאות, במערכי הכשרת המורים וביצירת משולש של שיתוף פעולה הדוק בינתחומי בין הכימיה, מדעי החומר, הביולוגיה והרפואה.

⁴ By Tomasz A. Wesolowski (...) [CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>) or GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>)], via Wikimedia Commons

3. מהם, לדעתכם, האתגרים של הכימיה בעתיד?

פרופ' אברהם הרשקו

אני יכול לענות לגבי ביוכימיה: בין האתגרים הגדולים נמנים הבנת התהליכים הביוכימיים והמולקולריים הגורמים למחלות כגון סרטן וניוון מוחי.

פרופ' אריה ורשל

אולי הבנת אופן פעולתו של המוח.

פרופ' עדה יונת

הבנת תהליכי מפתח לצד סינתזה של חומרים בעלי חשיבות מדעית או אינטלקטואלית או שניהם.

פרופ' אהרן צ'חנובר

האתגרים הגדולים של הכימיה נמצאים לדעתי בממשקים שבינה לבין שטחי מחקר אחרים - במיוחד הביו-רפואה והביולוגיה המבנית (כימיה חישובית וכימיה סינתטית אורגנית לפיתוח מולקולות קטנות המתאימות לאתרי קשירה של חלבונים, הן כמעכבים אך בעיקר כזרזים; במדע הרפואה חסרות מאוד מולקולות המזרזות פעילויות שאבדו בשל מחלות), הביוטכנולוגיה (פיתוח תהליכים תעשייתיים וביולוגיים - הנדסת שמרים, למשל - לא רק לייצור של חלבונים אלא גם לייצור מולקולות קטנות כתרופות כימותרפיות או תרופות נגד מלריה כמו למשל - artemisinin), וכמובן גם הפיזיקה ומדע והנדסת החומרים.

4. מהו החומר האהוב עליכם ומדוע?

פרופ' אברהם הרשקו

החלבונים מעניינים אותי במיוחד בגלל התפקידים החשובים והמגוונים שהם ממלאים בתאי הגוף.

פרופ' אריה ורשל

אני חושב ש-ATPase היא המולקולה המועדפת עליי, לאור היופי של פעולתה בהפיכת תגובות כימיות לעבודה במנועים מולקולריים ביולוגיים שונים.

פרופ' עדה יונת

אין לי אהבה מיוחדת לאיזו שהיא מולקולה - אוהבת את כולן ומעריצה את הטבע שיצר אותן ומשתמש בהן בחכמה וכך מאפשר את קיום העולם ואת קיומנו בתוכו.

פרופ' אהרן צ'חנובר

מבחינת חומר כימי, החומר האהוב עליי ביותר הוא החלבון, כל חלבון שהוא; אותו אוסף של חומצות אמיניות המחוברות זו לזו כשרשרת, שסדר אבני הבניין שלה נקבע והשתפר במשך מיליוני שנה בתהליך דינמי, האבולוציה, כדי למלא את אינ-סוף התפקידים הדרושים לגוף החי - ממבנה (עצם) ועד תפקיד (שריר, אנזים). זאת תוך כדי שמירה קפדנית על שני ממדי החיים: האנכי - העזרה ל-DNA ולשאר מרכיבי ומנגנוני ההורשה להעביר את התכונות מדור לדור ולשפרן; והאופקי - ההליכים הרבים המאפשרים את החיים בתפקוד מלא של כל המערכות. מבחינת שטח מחקר הכימיה של החיים - הביוכימיה - נשארה השטח האהוב עליי ביותר, אותו שטח החוקר בין השאר כיצד עשרות אלפי מולקולות - קטנות (יונים) כגדולות (מכלולי אנזימים) - חוברות יחדיו ובונות תזמורת רבת-נגנים אשר ללא מנצח מנגנת את המורכבת והארוכה ביותר בסימפוניה, זו היפה מכול - סימפונית החיים.

ננו-חלקיקים ברשת

שמי אמילי אלחכם. לאחרונה סיימתי תואר שני בכימיה באוניברסיטת תל אביב, אך המסע שלי בעולם הכימיה החל כבר לפני למעלה מעשור, בגיל 15.

ניצוץ הסקרנות

אני זוכרת את הפעם הראשונה שראיתי אותם, את ננו חלקיקי הזהב האדומים. הייתי בת 15 והבטתי בתמונה דרך צג המחשב, לאחר שיטוט שגרתי באינטרנט. בהיתי בשקיקה בתמיסה האדומה מספר דקות. תהיתי כיצד אותו הזהב שאנו מכירים מחיי היום-יום - צבעו אדום בסקלת הננו? כיצד הדבר ייתכן? השאלה הזו ריתקה אותי, והתחלתי לקרוא ולהעמיק בתחום. כך נפתח בפניי עולם הננוטכנולוגיה, עולם חדש של חומרים בעלי תכונות חדשות, שרק מחכה לנו להתחיל לגלות ולחקור אותו. סקרנותי הובילה אותי אל פרופ' גיל מרקוביץ מאוניברסיטת תל אביב, חוקר בעל שם בתחום הננוטכנולוגיה. הוא שמח מאוד לפנייתי והזמין אותי לסיור במעבדתו.

צעדים ראשונים

זו הייתה הפעם הראשונה שלי במעבדת מחקר אמיתית. פרופ' מרקוביץ בעצמו ערך לי סיור באגפים השונים במעבדה, התרגשתי והתלהבתי מאוד. כך למעשה התחלתי לעבוד על פרויקט אישי במעבדה בהדרכתו הישירה של פרופ' מרקוביץ. איזה כיף!

הפרויקט עסק בפיתוח של חיישנים כימיים המבוססים על רשתות של ננו-חלקיקים מתכתיים לניטור זיהומים אורגניים במים בזמן אמת. כשרשתות אלו באות במגע עם זיהום, תכונותיהן הפיזיקליות משתנות, ובכך מתאפשר איתור הזיהום. בעיית זיהום המים היא בעיה ממשית בישראל ובעולם, ופרויקט מסוג זה מהווה חלק מהפתרון הכולל בהתמודדות עם בעיה זו.

ההתחלה לא הייתה פשוטה, הרי לא היה לי כל ידע כימי או פיזיקלי. התחלתי ללמוד מספרי לימוד ואף לקרוא מאמרים אקדמיים בהמלצת פרופ' מרקוביץ. את המאמר האקדמי הראשון לא ידעתי בדיוק איך לקרוא, לא הכרתי את המונחים ולא ידעתי מהן הנקודות החשובות, אך לא הרמתי ידיים ולאט לאט נכנסתי לעניינים. ככל שעבר הזמן במעבדה, למדתי לשאול שאלות מדעיות, לנתח תוצאות ולערוך ניסויים בכוחות עצמי.

אני, אמילי הקטנה, מסנתזת ננו חלקיקים! עושה מדע אמיתי בידיים שלי!

החיים במעבדה

העבודה במעבדה הלכה והתמשכה, ובמהלכה התמקצעתי ביכולות ובשיטות. הגעתי למצב שבו השתמשתי בכל מכשירי המעבדה, ממיקרוסקופ אטומי סורק ועד לפעמון הוואקום הישן. ימים רבים נשאיתי במעבדה עד שעות הלילה וביצעתי מדידות.

לצד זאת היו תסכולים במהלך הדרך, ולאכזבתי הרבה בכל פעם שבה בדקתי את יכולות החיישן לחוש בזיהום - זה פשוט לא עבד. גיליתי שבמדע אכן לא הכול תמיד עובד. בעוד שרבים מהסובבים אותי תוהים למה אני ממשיכה בפרויקט, עמוק בפנים האמנתי שהעבודה הקשה תשתלם.

בסופו של דבר נדרשה למעלה משנה וחצי של עבודה מאומצת כדי לייצר חיישן שיכול לחוש בזיהום. לאחר מכן המשכתי לעבוד למעלה משנתיים נוספות, על מנת להמשיך ולשפר את יכולותיו של החיישן. הרגשתי שאני גדלה ומתבגרת עם הפרויקט, שהחל כפרויקט פשוט ולאט לאט הפך לפרויקט מתקדם עם שיטות מחקר חדשניות.

חוויית וחיות אחרות

בסוף כיתה י"ב הייתה הפעם הראשונה שבה הצגתי את הפרויקט מחוץ לכותלי האוניברסיטה. הכנתי פוסטר מדעי ומצגת ויצאתי לרחבי הארץ להשתתף בתחרויות לפרויקטים מדעיים של תלמידי תיכון.

שמחתי לראות שאינני התלמידה היחידה שעשתה פרויקט מדעי בתיכון, וכי ישנם עוד תלמידים רבים מכל הארץ שהשתלבו בקבוצות מחקר באקדמיה ובתעשייה, דרך תוכנית עבודות הגמר של משרד החינוך. נהנתי לדבר איתם, לשתף חוויות ולשמוע על עבודותיהם המעניינות. עם חלקם נשאיתי בקשרים טובים לאורך השנים, ורבים מהם ממשיכים היום בלימודים לתארים מתקדמים.

בהמשך נפלה בחלקי הזכות להציג את הפרויקט על במה בינלאומית ולייצג את ישראל בתחרויות בחו"ל. זו הייתה חוויה מדהימה שבה פגשתי צעירים מכל רחבי העולם, ואף זכיתי בפרסים. למשל, בתחרות פרס המים של שטוקהולם. בשיחות על הפרויקטים השונים למדתי רבות על תרבויות אחרות ושמעתי על מקומות שונים ומרתקים. הרגשתי שגרירה של המדינה, שכן עבור רבים זו הייתה הפעם הראשונה שפגשו ישראלית. ראינו שרב הדמיון על השוני, ופרט למדע כולנו אוהבים גם את אותה המוזיקה ואוהדים את אותן קבוצות הספורט.

זכיתי בפרסים בארץ ובחו"ל, אך החלק המשמעותי יותר בעיניי היה פגישה עם צעירים ומבוגרים החולקים את האהבה למדע וחינוך ורוצים לפעול לקידום התחומים הללו. עמם פיתחתי לאורך השנים שיתופי פעולה מדעיים וחינוכיים, ואחדים אף מלווים אותי באופן רציף מתקופת התיכון.

לתת חזרה

במהלך הדרך הרבה גורמים האמינו בי ותמכו בי, החל מראש המעבדה שקיבל אותי בזרועות פתוחות, הדריך ותמך, חבריי למעבדה שהתייחסו אליי כאל אחת מהם ותמיד היו שם למעני; דרך בית הספר שהאמין בי ואפשר לי להיעדר מהלימודים ולצאת לאוניברסיטה; וכלה בתחרויות שהיוו פלטפורמה להתפתחות ולבניית מערך קשרים. היה לי חשוב לתת חזרה לקהילה שנתנה לי כ"כ הרבה ואפשרה לי לצמוח. ספק לו היה הדבר מתאפשר במדינה אחרת.

היה לי חשוב לחשוף תלמידים נוספים לקסמו של המדע בכלל ושל הננוטכנולוגיה בפרט. לנסות ולעורר בהם את אותו הזיק והלהבה בעיניים.

היה לי חשוב שידעו שגם הם, עוד כתלמידי תיכון, יכולים להשתלב בקבוצת מחקר ולהיחשף לעולמות חדשים.

כך עשיתי ועדיין עושה.

דיברתי בפני בני נוער רבים במסגרות שונות, הצטרפתי ויזמתי תוכניות לעידוד לימודי המדעים בישראל, בשיתוף מוסדות אקדמיים וחברות טכנולוגיה. כך למשל, חברתי לראש עיריית ראש עיריית רמת גן דאז, מר צבי בר, ויחד איתו הייתי שותפה בתכנון ובניית תוכנית ללימודי ננוטכנולוגיה בתיכונים ברמת גן, בשיתוף עם אוניברסיטת בר אילן. התוכנית רצה עד היום, כבר קרוב לעשור.

תוכנית נוספת שבה אני פעילה עד היום היא "יש לנו כימיה" של המחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע יחד עם כ"ל ובשיתוף משרד החינוך, המיועדת לעידוד לימוד הכימיה בקרב תלמידי תיכון. השתלבותי בתוכנית החלה במפגש עם ד"ר מירי קסנר בחלוקת פרסי האגודה הישראלית לכימיה. שם הזמינה אותי להשתתף בפאנל כחלק מכנס הסיכום של התוכנית. לאחריו, הפכתי לחברה בצוות ההיגוי של התוכנית וכך הכנסנו תכנים ואמצעים חדשים, כמו חידון אינטראקטיבי בנושא כימיה בחי' היום-יום.

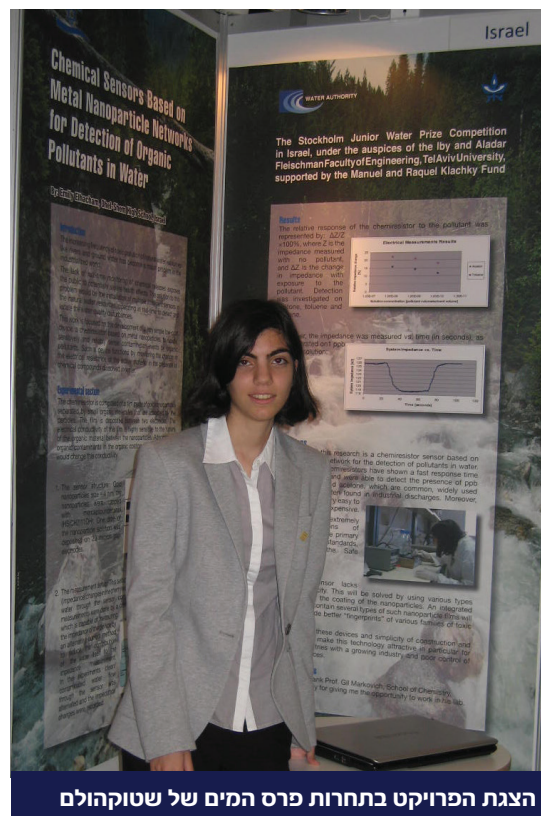
נושא נוסף שליווה אותי בכל הדרך היה צורך אמיתי לשלב בנות בתחומי המדע והטכנולוגיה, ובמסגרת זו חברתי לתוכניות חינוכיות שונות ועזרתי בהנגשת התכנים לבני הנוער בכלל, ולבנות בפרט. אני גאה לציין שזה שנים רבות אני פעילה בעשייה חינוכית, שאליה נחשפו מאות תלמידים.

אפילוג

בתום שירותי הצבאי התחלתי ללמוד באוניברסיטת תל אביב, בתוכנית הבינתחומית לתלמידים מצטיינים ע"ש לאוטמן. במהלך הלימודים, השתלבותי במספר פרויקטי מחקר במעבדות שונות. לבסוף המשכתי ללימודי התואר השני בכימיה שבמסגרתם ערכתי מחקר בתחום ננוטכנולוגיית DNA בהנחיית פרופ' יובל אבנשטיין.

היה לי חשוב להביא כאן את הסיפור שלי, תלמידת כיתה ט' בבית הספר "אהל שם" בר"ג, עם נקודת התחלה בסיסית מאוד בתחום, אבל עם שפע סקרנות, התמדה, כוח רצון והרבה הרבה עזרה, פרגון ואמון מהמערכת. במבט לאחור אני מבינה עד כמה לא היה זה מובן מאליו שקיבלתי מפרופ' מרקוביץ הזדמנות כ"כ מיוחדת להשתלב בקבוצת המחקר שלו, וזאת בלי שהכיר אותי קודם לכן ולמרות שלא היה לי כל ידע מדעי. זכיתי ממנו לתמיכה ועידוד לאורך כל הדרך, וגם היום הוא ממשיך ליעץ וללוות אותי.

אני ממשיכה במסעי, עד לאן שהמדע יוביל אותי...



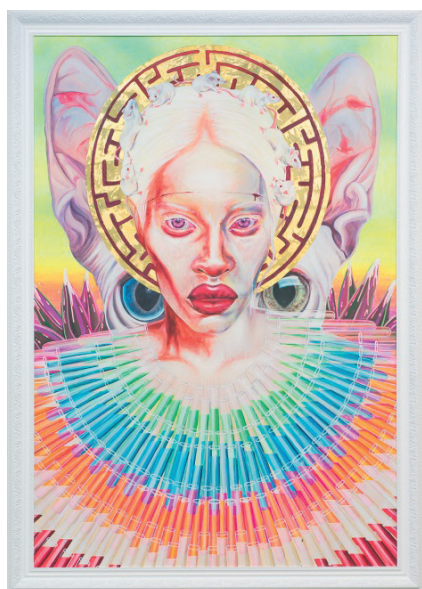
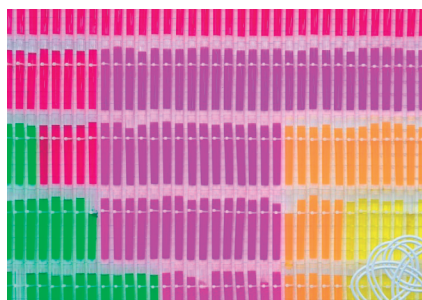
* התמונות באדיבות אמילי אלחכם.

אביב גרינברג, מאיוט קפסיה וחסר פיגמנט

אביב גרינברג הוא אמן צעיר, בוגר מחזור 2017 של בית הספר לאמנות רב-תחומית בשנקר. הצבעוניות הרבה ביצירותיו מתייחסת להיבט הסוציולוגי של הצבע כגורם לפילוג החברה, ליצירת מעמדות על פי צבע העור ולגזענות. חומרי הניקוי הצבעוניים הממלאים את המבחנות האמיתיות בעבודת הפיסול **מאיוט קפסיה** והמצוירות ב**חסר פיגמנט**, מבטאים את התשוקה ללבן כצבע נקי וטהור. Mayotte Capécia הייתה אישה ממרטיניק שפרסמה ב-1948 ספר המגולל את סיפור אהבתה לקצין לבן שלבסוף נטש אותה ואת בנם. הטווס הזכרי הלבן ביצירה, העשוי משלד מתכת וחובטי שטיחים, הוא מעין פורטרט מופשט של **מאיוט קפסיה** בתור האדון הלבן, שמבחינתה הוא המפתח לעולם מועדף. הדמות הלבקנית האפריקנית בציור **חסר פיגמנט** מוצגת כאיקונה קדושה או כגיבורת על בעלת כוחות על טבעיים. דמות זו אינה שחורה, אך גם אינה באמת לבנה, ואמונות מוטעות הפכו את הלבקנים באפריקה לנרדפים ונתונים לאפליה.

התמונות וחומר הרקע הועברו באדיבות אביב גרינברג.

פרט מקיר המבחנות בעבודה
מאיוט קפסיה



חסר פיגמנט, 2017
אקריליק ועלי זהב על קנוס
(190x140 ס"מ)



מאיוט קפסיה, 2017
שלד ברזל, חובטי שטיחים,
מבחנות מלאות נוזלי ניקוי
(210x240 ס"מ)



תמונה: Shutterstock, Mikko Lemola

סקירות רחב

פרס ישראל בכימיה

ד"ר מירה קיפניס



באדיבות משרד החינוך

אות פרס ישראל הניתן לזוכים

החל משנת 1953 ניתן פרס ישראל ניתן כל שנה לאזרחי ישראל על הצטיינות מיוחדת או פריצת דרך בתחומם. התחומים הראשיים שבהם ניתן הפרס הם קבועים: מדעי היהדות, הרוח והחברה, מדעי החיים ומדעים מדויקים, תרבות ואמנות, מפעל חיים (תרומה מיוחדת לחברה ולמדינה), ובתוכם קיים "סבב" של תחומי משנה. הפרס נחשב לפרס המכובד ביותר הניתן למדענים במדינת ישראל. רשימת הזוכים המצומצמת מוכיחה שכדי לזכות בפרס יש לגלות הצטיינות יתרה בתחום המחקר שבו ניתן הפרס, לעניינו בכימיה.

פרס ישראל הוא באחריות גף מיוחד במשרד החינוך. מדי שנה נקבעים ומפורסמים התחומים שבהם יינתן הפרס. הציבור מוזמן להגיש את מועמדיו לקבלת הפרס. במקביל נבחרים יושבי הראש לוועדות הדנות בפרסים השונים. בוועדות הפרס בתחומי המדע יושבי הראש הם מדענים ידועים ומוערכים בתחומם, ובמקרים רבים בעבר קיבל היו"ר את פרס ישראל. יו"ר הוועדה מזמין את שאר השופטים. השופטים מקבלים את שמות המועמדים לקבלת הפרס, ללא שמות הממליצים. ההחלטה מי יקבל את הפרס צריכה להתקבל פה אחד, ולכן ייתכנו דיונים ממושכים עד פרסום ההחלטה הסופית.

בשנים הראשונות להענקת הפרס (עד שנת 1981) ניתנו פרסי ישראל ב"מדעי החיים" או ב"מדעים מדויקים" ללא ציון התחום הספציפי. בשנים אלו קיבלו את הפרסים מספר כימאים וביוכימאים:

בשנת תשי"ז (1957) זכו הביוכימאים שלמה הסטרין, דוד פיינגולד וגד אביגד בפרס ישראל על הישגיהם במחקר של סינתזה אנזימטית של חומרים אנלוגיים לסוכרוז. בשנת תש"ך (1960), קיבל את הפרס פרנץ זונדהיימר, על מחקרו שעסק בהפיכת פחמימנים לבנזן. בשנת תשכ"ח (1968) קיבל את פרס ישראל למדעים מדויקים הכימאי עמנואל גולדברג, שהגה המצאות רבות בתחום הפוטוכימיה וטכנולוגית המידע. לעומת



באדיבות לשכת העיתונות הממשלתית

תום טקס הענקת פרס ישראל ביום העצמאות תשס"ו בתיאטרון ירושלים. צילום: MARK NEYMAN, 3 במאי 2006.
בטקס זה קיבל פרופ' צבי רפפורט (שני מימין בשורה השנייה) מהאוניברסיטה העברית את פרס ישראל בכימיה.

רוב מקבלי הפרס במדעים, הוא לא היה איש אקדמיה אלא עסק במחקר יישומי במסגרת חברות שפתחו טכנולוגיות בתחום הצילום והעברת מידע. באותה שנה קיבל את פרס ישראל למדעי החיים ארנסט דוד ברגמן, שהיה פרופסור לכימיה אורגנית, ובהיותו מדען רב-תחומי היה ממקימי התשתית המדעית-בטחונית של ישראל. בשנת תשכ"ט (1969) הוענק פרס ישראל למדעי החיים לשניאור ליפסון, שאמנם היה פיזיקאי בהכשרתו הראשונה, אבל במחקריו החשובים עסק בתחום הכימיה הפיזיקלית של פולימרים. בשנת תשל"ב (1972) קיבל את פרס ישראל למדעים מדויקים דוד גינבורג, כימאי אורגני, שזכיתו להיות תלמידתו במספר קורסים בטכניון (הוא היה מרצה מחונן). חתן פרס ישראל למדעים מדויקים בשנת תשל"ד (1974) היה רפאל לוין, כימאי שמחקרו עוסק בדינמיקה מולקולרית.

החל בשנות השמונים ועד שנת 2010 שם הפרס הוא: "פרס ישראל בכימיה". בפרס זה זכה בשנת תשמ"ב (1982) יהושע יורטנר, שהוא תיאורטיקן בפיזיקה כימית. בשנת תשנ"ה (1995) ניתן "פרס ישראל למדעים מדויקים" לישראל דוסטובסקי, שהיה כימאי. יתכן ובגלל שהיה אדם רב פעלים שעסק בנוסף לכימיה פיזיקלית גם בנושא הגרעין והיה נשיא מכון ויצמן, לא רצו לתחום את הפרס לכימיה בלבד. בשנת תש"ס (2000) היה חתן הפרס רפאל משולם, חוקר תרופות וחומרי טבע, שגילה את החומר הפעיל בקנבים. בשנת 2002 קיבלו את הפרס שני כימאים: איתמר וילנר, שהוא אחד המדענים המובילים בעולם בננוטכנולוגיה ובביוטכנולוגיה, ועדה יונת (האישה היחידה שקיבלה עד כה פרס ישראל בכימיה), שגילתה את מבנה הריבוזום. בשנת 2006 קיבל צבי רפפורט, שהוא מחלוצי תחום הכימיה האורגנית-פיזיקלית בישראל, את פרס ישראל בכימיה. בשנת 2010 קיבל את הפרס אברהם ניצן, אחד המדענים המובילים והבולטים בעולם בתחום הכימיה הפיזיקלית העיונית.

בשנים הבאות ניתן פרס ישראל בכימיה במסגרת "פרס ישראל לחקר הכימיה וחקר הפיזיקה".

לוועדת הפרס מוגשים שמות המועמדים העוסקים בשני התחומים הללו. לפי דבריו של פרופסור איתמר וילנר, שנוסף להיותו חתן הפרס לשנת 2002 היה פעמיים חבר בוועדת הפרס, חברי הוועדה מתחשבים בתחום המחקר של הזוכה בפרס בפעם הקודמת כאשר הם בוחרים את הזוכה "שלהם", כך שבסופו של דבר "הצדק נראה" ואת הפרס מקבלים גם כימאים וגם פיזיקאים.

ואכן, בשנת תשע"ב (2012) קיבל את הפרס דוד מילשטיין שמחקרו העיקרי הוא בתחום הכימיה האורגנו-מתכתית והקטליזה. בשנת תשע"ד (2014) קיבל את הפרס פיזיקאי (מרדכי שגב). בשנת תשע"ו (2016) קיבלו את הפרס לסלי ליזרוביץ ומאיר להב על מחקרם שתרם להבנת תהליכים בסיסיים בתחום הסטריאוכימיה באמצעות קריסטלוגרפיה. השנה יינתן הפרס בחקר הכימיה והפיזיקה לפיסיקאי פרופ' שלמה הבלין מאוניברסיטת בר-אילן. יש להניח שבפעם הבאה שיינתן הפרס (אולי בשנת 2020?) יקבל אותו כימאי.

מהתבוננות ברשימת מקבלי הפרסים רואים שכולם (חוץ מיוצא דופן אחד) הם אנשי אקדמיה. המוסד המוביל במספר הפרסים שקיבלו אנשיו הוא מכון ויצמן (8 מקבלי פרס - 45%), ואחריו האוניברסיטה העברית (7 מקבלי פרס - 39%). הרחק מאחוריהם נמצאים אוניברסיטת תל אביב (2 מקבלי פרס - 11%) והטכניון (פרס אחד - 5%).

ארבעת חתני פרס נובל בכימיה הם גם חתני פרס ישראל (והם קיבלו פרס זה לפני שקיבלו את פרס נובל), אך רק עדה יונת היא כלת פרס ישראל בכימיה. אברהם הרשקו הוא חתן פרס ישראל בחקר הביוכימיה, אהרון צ'חנובר הוא חתן פרס ישראל בחקר הביולוגיה ודן שכטמן הוא חתן פרס ישראל בפיזיקה.



באדיבות לשכת העיתונות הממשלתית

טקס הענקת פרס ישראל ביום העצמאות תש"ע בבנייני האומה בירושלים. צילום: משה מילנר, 20 באפריל 2010.
בטקס זה קיבל פרופ' אברהם ניצן (שלישי מימין, עומד מאחור) מאוניברסיטת תל אביב את פרס ישראל בכימיה.

רשימת מקבלי פרס ישראל בכימיה

השנה	שם הפרס	הזוכים	מוסד אקדמי	תחום המחקר
תשי"ז 1957	פרס ישראל למדעים מדויקים	שלמה הסטרין, דוד פיינגולד, גד אביגד	האוניברסיטה העברית	מחקר בסנתזה אנזימטית של חומרים אנלוגיים לסוכרוז
תש"ך 1960	פרס ישראל למדעים מדויקים	פרנץ זונדהיימר	מכון ויצמן	הפיכת פחמימנים לבנזן
תשכ"ח 1968	פרס ישראל למדעים מדויקים	עמנואל גולדברג		פוטוכימיה וטכנולוגית מידע
	פרס ישראל למדעי החיים	ארנסט דוד ברגמן	מכון ויצמן	כימיה אורגנית
תשכ"ט 1969	פרס ישראל למדעי החיים	שניאור ליפסון	מכון ויצמן	פיזיקאי, עסק גם בכימיה פיסיקלית
תשל"ב 1972	פרס ישראל למדעים מדויקים	דוד גינזבורג	הטכניון	כימיה אורגנית
תשל"ד 1974	פרס ישראל למדעים מדויקים	רפאל לוין	האוניברסיטה העברית	דינמיקה מולקולרית
תשמ"ב 1982	פרס ישראל בכימיה	יהושע יורטנר	אוניברסיטת תל אביב	חקר מולקולות בודדות מעוררות, אשכולות מולקולריים ומערכות ביופיזיקליות
תשנ"ה 1995	פרס ישראל למדעים מדויקים	ישראל דוסטובסקי	מכון ויצמן	
תש"ס 2000	פרס ישראל בחקר הכימיה	רפאל משולם	האוניברסיטה העברית	כימאי וחוקר תרופות וחומרי טבע
תשס"ב 2002	פרס ישראל בחקר הכימיה	איתמר וילנר	האוניברסיטה העברית	אלקטרוניקה מולקולרית וביואלקטרוניקה
	פרס ישראל בחקר הכימיה	עדה יונת	מכון ויצמן	מבנה הריבזום
תשס"ו 2006	פרס ישראל בכימיה	צבי רפפורט	האוניברסיטה העברית	כימיה אורגנית מנגנונית
תש"ע 2010	פרס ישראל בכימיה	אברהם ניצן	אוניברסיטת תל אביב	כימיה פיזיקלית עיונית - אלקטרוניקה מולקולרית
תשע"ב 2012	פרס ישראל בחקר הכימיה וחקר הפיזיקה	דוד מילשטיין	מכון ויצמן	כימיה אורגנית מתכתית וקטליזה
תשע"ו 2016	פרס ישראל בחקר הכימיה והפיזיקה	לסלי ליזרוביץ ומאיר להב	מכון ויצמן	הבנת תהליכים בסיסיים בתחום הסטראוכימיה באמצעות קריסטלוגרפיה

ביבליוגרפיה

1. שיחה טלפונית עם פרופסור איתמר וילנר, 25.2.2018
2. אתר "פרסי ישראל" - <http://cms.education.gov.il/EducationCMS/UNITS/Praslsrael>
3. ערכי ויקיפדיה (לגבי חלק ממקבלי הפרס)

שבעים השנים הראשונות של התעשייה הכימית הישראלית

ד"ר גלעד פורטונה, ראש המרכז למצוינות תעשייתית, מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית, הטכניון, חיפה¹

לתעשייה הכימית בישראל תרומה ייחודית לכלכלת המדינה. למרות שזו תעשייה ש"מטילה ביצי זהב", אין היא מוערכת מספיק והיא אינה מקבלת את העידוד הציבורי הראוי.

ננסה לסקור את המאפיינים העיקריים של תעשייה זו, ללמוד על התפתחותה בשבעים שנות המדינה, לזהות את המגמות המתהוות בתעשייה זו בישראל ובעולם ולהראות את חשיבותה לקידומה הכלכלי של מדינת ישראל בשבעים שנות המדינה. ננסה להציג את הדרכים והמדיניות הנדרשים כדי לחזק את התעשייה הפורחת היום וכדי לכוונה להתמודד עם האתגרים וההזדמנויות של השנים הבאות.

התעשייה הכימית בעולם נמצאת בגידול מתמיד מול צרכים גלובליים גדלים. כ-15 השנים האחרונות גדל ייצורה העולמי פי 8 והגיע לייצור גלובלי של 5,120 מיליארדי דולרים. הייצור בתעשייה הכימית הישראלית מהווה היום כ-0.8% מערך גלובלי זה.

התעשייה הכימית מהווה כשליש מכלל התעשייה היצרנית הישראלית ובה מאות חברות בוגרות וחברות חדשות רבות. ביניהן כ-170 חברות מובילות אשר מייצרות חומרים, דלקים לצורכי המשק, כימיקלים מגוונים, מגוון דשנים לחקלאות, תרופות, חומרי ניקוי וקוסמטיקה, ציוד רפואי ועוד.

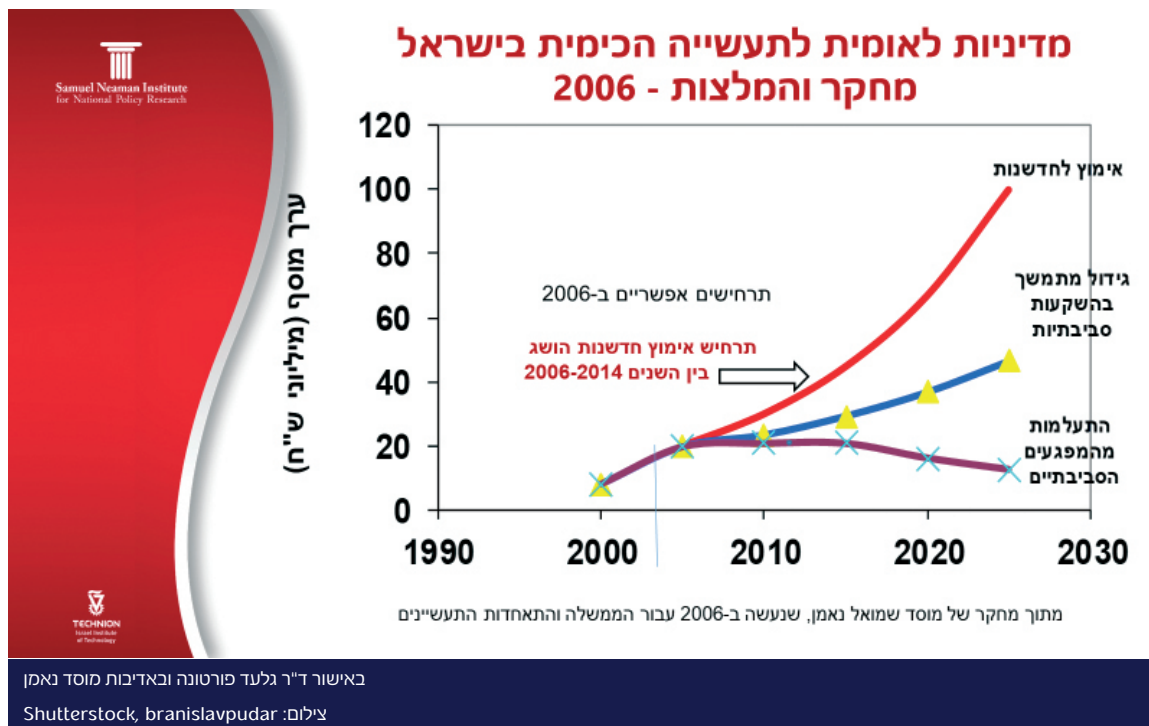
עיקר המאפיינים הייחודיים של מירב התעשייה הכימית בהשוואה לתעשיות אחרות:

1. זו תעשייה עם השקעת הון גדולה. במרבית התעשייה הציוד הוא חלק יקר, ולכן החינוך, האיכות והניסיון של העובדים הם קריטיים, מכיוון שיש צורך בשימוש נכון ומדויק בציוד היקר.
2. התעשייה היא מחזורית. המחירים בעולם משתנים במחזוריות גבוהה. לדוגמה - מחיר דשן האשלג, שארבעה מיליוני טון ממנו מיוצרים בישראל בשנה, היה בשנות התשעים כ-100 דולר לטון. בתחילת שנות האלפיים המחיר קפץ ל-700-800 דולר לטון, ואחרי כשנתיים ירד לכ-500 דולר לטון. בשנים האחרונות המשיכה ירידה הדרגתית עד ל-300 דולר לטון. ישנן תקופות שהחברות היצרניות מרוויחות בצורה חדה, וישנן תקופות שהן אף מפסידות. ההבדלים נובעים משינויים גדולים בביקוש ובהיצע, ומצב זה מחייב סבלנות ויכולת גמישות בניהול המשאבים והכספים.
3. זו תעשייה שצורכת אנרגיה רבה. מרכיב האנרגיה בהוצאות הוא לעיתים קרובות גבוה מהמרכיב של שכר העבודה. לכן מציאת הגז בישראל בעשור האחרון וזמינותו במחירים נמוכים מהווים הזדמנות לחיזוק תעשייה זו.
4. יש תלות מורכבת בין השווקים השונים של מוצרי התהליך. בהרבה מקרים מתקבלים מספר מוצרים מאותו תהליך כאשר מחיריהם ושימושיהם שונים. לעיתים מפסידים על מוצר אחד ומרוויחים על אחר. מאפיין זה משליך גם על כיווני המחקר התהליכי ועלול לשנות מיקוד בהתאם לחוסר הגלובלי המשתנה במוצרים. לדוגמה, במפעלי ים המלח מייצרים מתכת מגנזיום ע"י אלקטרוליזה של מגנזיום כלוריד מים המלח, ומוצר הלוואי הוא כלור. כלור זה משמש לייצור הברום ממלחי הברום בים המלח ויכול לשמש גם לתוצרים רבים אחרים, אך השווקים של הברום ושל הכלור "מתנהגים" באופן שונה, והקישור ביניהם מהווה יתרון ולעיתים מגבלה בהתאמת המכירות לשווקים.
5. כיוון שהתעשייה הזו מייצרת כימיקלים רבים בכמויות מסחריות גדולות מאוד, מערכת זרימת החומרים משלב חומר הגלם למוצר המוגמר, ארוכה ומורכבת, והיצרנים תלויים בספקים רחוקים ובהובלה למרחקים ארוכים. זה מקטין את יכולת הגמישות להגיב במהירות לשינויים גלובליים ומקומיים. לאחרונה חווינו את ההתלבטות של תעשיית הדשנים הגדולה בישראל בשאלת התלות בחומר הגלם גז האמוניה, תלות שהפכה להיות דומיננטית ובעייתית. ייצורו של חומר זה בישראל בעזרת מצאי הגז החדש היה יכול לפתור את הבעיה, אך מאחר שהשקעה זו לא בוצעה בזמן, נוצר חסם לחלק לא קטן מהתעשייה הכימית המקומית. בחלק מהתעשייה בישראל, כמו בתעשייה הדשנים, יתרוננו בכך שחלק גדול מחומרי הגלם נמצא במחצבים בישראל.
6. מאפיין נוסף של התעשייה הוא הסיכון התהליכי ופוטנציאל הפגיעה באיכות הסביבה. בתהליכי הייצור משולבים חומרים מסוכנים היכולים להידלק או אפילו להתפוצץ בטיפול שגוי, ובתהליכים אלה עלולים להיפלט חומרים המזהמים את הסביבה. לכן יש לטפל באספקט תהליכי זה בעדיפות ובמקצוענות, כדי שהתעשייה לא תהווה איום לציבור וכדי שנוכל ליהנות מתרומתה לאיכות החיים ולכלכלת המשק. בעשורים הראשונים למדינה לא יוחסה לנושא זה חשיבות מספקת. בשלושת העשורים האחרונים הושקעו על ידי התעשייה סכומים גבוהים מאוד לשיפור בטיחות התהליכים ולהקטנה מהותית מאוד של ההשפעה על איכות הסביבה. תהליך זה חייב להתבצע במקצוענות ובהתמדה וללא פשרות, כחלק חיוני מניהול תעשייה זו.
7. חסמי הכניסה לתעשייה זו גבוהים יחסית לתעשיות ייצור אחרות, כלומר, מתחרים חדשים חייבים להשקיע וללמוד הרבה עד שיוכלו להפוך למתחרים משמעותיים.

¹ בעבר מנכ"ל תמ"י ודשנים, סמנכ"ל טכני של כיל וסמנכ"ל טבע.

בשנת 2006 גובשה על ידי המוסד שמואל נאמן בשיתוף התעשייה, האקדמיה והממשלה מדיניות לאומית שכללה מחויבות של התעשייה לטפל בבטחון הסביבה, ולהגדיל את תרומתה לתוצר הלאומי הגולמי, על ידי שילוב חדשנות ויישום כיוונים חדשים של פיתוח וייצור. בתום התהליך הוצגו שלושה תרחישים: התרחיש הפסימי - אם לא תושקענה ההשקעות במניעת זיהום הסביבה; תרחיש רצף הגידול - אם תושקענה ההשקעות וימשך הפיתוח הנוכחי של 2006, והתרחיש האופטימי ביותר - שיושג אם תמומשנה הדרישות להגנת הסביבה והפיתוח, ובנוסף תהיינה השקעות בכיוונים חדשניים ופורצי דרך.

לשמחתנו, מירב ההמלצות אומצו ומאז 2006 ממומש התרחיש האופטימי ביותר משלושת התרחישים בגרף המצורף:



עד שנת 2014 ניכר גידול רציף ומתמיד בתרומת התעשייה הכימית בישראל למשק הלאומי, בדומה לתכנון התרחיש האופטימי שהוצג ב-2006. בשנתיים האחרונות ישנה ירידה במכירות בדולרים הנובעת בעיקר מירידה במחירי החומרים העולמיים, בעיקר בזכות הירידה במחירי האנרגיה העולמיים.

בשש השנים האחרונות 2011-2016 עמד ממוצע הייצור והמכירות השנתי על כ-32.7 מיליארד דולר, מהם 17.4 מיליארד לייצוא, שהם כ-53% מסך המכירות ושליש מסך הייצוא של כלל התעשייה בישראל בשנים אלה!

הערך המוסף למשק, שהוא הערך שנוסף למדינה ולאזרחיה מתהליכי הייצור, בכל התקופה היה כ-30% מסך המכירות, או 9.8 מיליארדי דולרים בשנה, ערך הנחשב גבוה מאוד!

בשנת 2017 העסיקה התעשייה הכימית כ-40,400 עובדים ישירים במפעליה ועשרות אלפים רבים בשירותים הניתנים לה, במכפיל תעסוקה משוער של מעל 2.5².

בשנים האחרונות היו מרכיבי הייצוא העיקריים כ-40% בתחום התרופות וכ-30% בתחום הדשנים וחומרי העזר לחקלאות.

אלה עיקר **מנועי הצמיחה** של התעשייה הכימית בישראל:

- 1. אוצרות טבע** - מאגר ים המלח, שדות הפוספטים ולאחרונה הגז טבעי. תעשיית הכימיה שפותחה ונבנתה סביב משאבים אלה השכילה לנצל ולמנף את אוצרות הטבע ביעילות מצוינת ולפתח תעשיית מוצרי המשך בתחרותיות גלובלית.
- 2. הון אנושי** באקדמיה - טכניון, אוניברסיטאות, מכוני מחקר ומכללות בנושאי כימיה, חומרים והנדסה. רוח החדשנות של המחקר והרצון לנהל את הדברים בצורה אגרסיבית מאוד היא חלק נכבד מההצלחה של התעשייה הזו.
- 3. מדיניות הממשלה** - בעשורים הראשונים לאחר הקמת המדינה נתנה הממשלה דחיפה גדולה לייצור תעשייתי של חומרי הגלם בישראל בהשקעות בהרחבת המפעלים, התשתיות והמחקר באקדמיה. 70% מההשקעות הגיע מהממשלה, כפי שיפורט להלן.

² מכפיל תעסוקה הוא היחס בין מספר העובדים במפעל לבין מספר כל העובדים במשק המועסקים כתוצאה מהעסקת העובדים במפעל.

4. **גלובליזציה** - ישראלים יודעים לחיות בעולם גלובלי, מתוך הבנה שאין לישראל יכולות למכור בכמויות גדולות בשוק המקומי, אך למדינה קטנה עם יכולות ייצור מוגבלות כמונו, השוק העולמי בתחום הכימיקלים הוא ענק ובלתי מוגבל.
5. **מדיניות סביבתית** - מינוף להקמת תעשייה שעוזרת לתעשייה שלנו לפתור את בעיות הסביבה וגם הפכה בעצמה לתעשיית ייצוא. הצורך להשיג פתרונות המונעים זיהומי סביבה במפעלים אפשרו למכור פתרונות סביבה כתעשיית ייצוא נוספת.
- בשנים האחרונות הקטינו מפעלי הכימיה בצורה דרסטית את ההשפעה על הסביבה על ידי השקעות במחקר, במתקנים סביבתיים ובפיתוח תהליכי ייצור חדשים.
- מפעלי התעשייה הכימית הוותיקים נמצאים צפונית לחיפה, דרומית לתל אביב ודרומית לבאר שבע.
- עיקר הגידול בעשורים האחרונים הוא דרומית לבאר שבע בשלושה אזורי תעשייה שיועדו לתעשייה זו:
1. פארק תעשייתי ייעודי נאות חובב, שאליו הוזזו כל המפעלים מבאר שבע. הפארק מתפקד כעירייה עצמאית, אגב שמירה קפדנית על איכות הסביבה והבטיחות באזורו. בפארק זה יש תעשיות רבות שעיקר עיסוקן בתרופות, תרכובות ברום וחומרי הדברה.
2. מישור רותם - שם מתקיימת תעשיית המשך למכרות הפוספטים, למלחי המגנזיום ולייצור דשנים מודרניים, ורוב התהליכים הם מקוריים ישראליים.
3. באזור ים המלח - מפעלי האשלג, הברום והמגנזיום, המפיקים את כל מוצריהם ממיצוי הכימיקלים בים המלח, רובם בתהליכים ישראליים מקוריים.
- מרכזי המחקר העיקריים מרכזים יכולות מחקר בפיתוח חומרים ותהליכים חדשים, כמפורט כאן:
- באזור חיפה - תמ"י - מכון למחקר ופיתוח, המשלב מחקר בכימיה אורגנית ואנאורגנית.
- טבע - בחטיבת הכימיה של טבע במרכז הארץ, מאות חוקרים לתהליכים חדשניים לייצור תרופות גנריות ומרכז מו"פ לפיתוח תרופות מקור חדשות בשילוב מכוני המחקר האקדמיים.
- מרכזי המחקר של תעשיות הברום והאגרוכימיה בחברות כי"ל ואדמה באזור העיר באר שבע.
- מרכזי המחקר של תעשיית הדשנים הם במישור רותם, הנמצא מעל מפעלי ים המלח.
- מרכזי מחקר ומעבדות פרטיים רבים המשרתים בנאמנה תעשייה זו במקצוענות רבה.
- המחקר הבסיסי באקדמיה מתרכז בעיקר בטכניון, באוניברסיטה העברית, במכון ויצמן ובאוניברסיטת בן-גוריון כאשר גם כל יתר האוניברסיטאות והמכללות תורמות לפיתוחים החדשים.
- שתי חברות גדולות בולטות כתורמות ראשיות לתעשייה זו.
- כימיקלים לישראל** - בעלת הזיכיון לניצול המחצבים המרכזיים של ישראל. ב-2016 מכרה 5.6 מיליארדי דולר. היא מהווה כ-20% מכלל התעשייה הכימית בישראל. החברה מחולקת לשלוש קבוצות המוכרות בהתאם דשנים, כימיקלים ופתרונות משולבים. מערך החברה רחב מאוד, פרוס בכל העולם. הצלחתה גדלה אחרי החיבור של החברות הממשלתיות בתחום הכימיה לחברה אחת העושה אופטימיזציה ושילוב של יכולות של מחקר, פיתוח וייצור וסינרגיה בין דיסציפלינות שונות.
- טבע** - חברה למחקר, פיתוח וייצור תרופות. ב-2016 מכרה 21 מיליארד דולר ברווח נטו של 20% מהמכירות. הייצור מורכב מתעשייה גנרית (55%), מוצר הדגל של תרופת מקור לטרשת נפוצה (19%), מוצרים שנמכרים להמון יישומים (20%) ואחרים (6%). החברה במשבר שעדיין לא משפיע על הייצור, אך צפוי להביא להקטנת תרומתה למשק הישראלי.
- החברות הגדולות טבע וכימיקלים לישראל משלימות זו את זו במאפייניהן הייחודיים:
- כימיקלים לישראל עתירת תשתיות הון, בעוד שטבע עתירת מו"פ וזכויות פטנטים - IP.
- כימיקלים לישראל בנויה על אוצרות טבע בעוד שלטבע אין כלל נגישות לחומרי גלם ואוצרות טבע.
- המחקר בכימיקלים לישראל שם דגש על פיתוח פנימי של מוצרי המשך, בעוד שבטבע המחקר לתרופות חדשות מבוסס על נגישות למידע אקדמי ומינופו לעסקים ועל פיתוח תהליכים כימיים לייצור במערכות החברה הפנימיות. המחקר לפיתוח תהליכים לייצור גנרי עדיין נעשה ברובו בתוך החברה.
- המחקר באקדמיה מחייב פיתוח ואימות לפני יכולת לתיעוש. החברות הגדולות מסייעות בחציית "עמק המוות" של הרעיונות והמחקרים לתרופות חדשות או למוצרים חדשים במסדות המחקר ומאפשרות מסחור עסקי של הידע האקדמי.
- דוגמה מצוינת לפיתוח אקדמי שיושם בהצלחה עסקית גדולה בשוק התרופות בתעשייה הישראלית היא ה"קומפקסון", לטיפול בחולי טרשת נפוצה, שפיתוחו החל במכון ויצמן, וה"אזילאק", לטיפול במחלת הפרקינסון, שפיתוחו החל בטכניון. ההצלחה תרמה משמעותית לחברת טבע שזכתה להגדלת רווחים מאד מרשימה וגם תרמה למכון ויצמן ולטכניון שנהנו מהתמלוגים לאורך שנים רבות ואפשרו מחקרים רבים בזכות.

התהליכים שהביאו לגידול התעשייה הכימית בשבעים שנות המדינה

המעשים שהביאו לגידול המרשים והחשוב של התעשייה הכימית בשבעים השנים הראשונות של המדינה משלבים מחד גיסא פיתוח אוצרות טבע במשאבים לאומיים, ומאידך גיסא יזמות של תעשיינים מובילים, שחיברו ידע ויזמות לתעשייה כימית רווחית, תחרותית התורמת משמעותית למדינה.

1. פיתוח אוצרות הטבע של המדינה במימון הממשלה

בשלושים השנה הראשונות להקמתה הקצתה המדינה משאבים גדולים מאוד למינוף אוצרות הטבע שלה ע"י בניית תשתית מחקר, פיתוח וייצור בקנה מידה עולמי.

בשנות השישים נבנו בטכנולוגיה חדשנית בריכות שיקוע וסכרים בדרום ים המלח, שהגדילו את מערך הייצור של האשלג. החימום בבריכות תוכנן ללא השקעת אנרגיה ואפשר את ריכוז הקרנליט ע"י ניצול חום השמש הקופחת באזור ים המלח. ההשקעה הגדולה בסכרים ובמפעלים עמדה על כ-600 מיליון דולר.

בשנות ה-70 הושקעו מעל מיליארד דולר בחברה בינלאומית מפורסמת להקמת מפעל הייצור של דשנים מהפוספטים. המפעל נכשל ולא עבד. התברר שהחברה הקימה בישראל תהליך חדשני שלא נוסה בקנה מידה כזה. אכזבה זו כמעט חיסלה את עתיד גידול התעשייה הכימית בישראל.

מי שהצילו את המצב היו מנהלי המו"פ והתעשיינים הישראליים באותה עת, שהצליחו לשכנע את קברניטי המדינה להאמין בפיתוח המדע הישראלי ולאמץ תהליכים שפותחו באקדמיה ובמכוני המחקר בישראל. התעשייה שנבנתה על בסיס פיתוחים מקומיים אלה הצליחה במקום שבו נכשלה החברה הבינלאומית, והיא הבסיס שעליו ניצבת התעשייה של היום. מאז אותה התנסות המדינה מאמינה במחקר הישראלי, והתעשייה הישראלית פורחת ומשגשגת על בסיס ידע מדעי ותהליכים יצירתיים ישראליים.

סלע הפוספט בישראל היה נחות באיכותו בהשוואה לסלע הפוספט הירדני והמרוקאי. הוחלט לפתח שיטות לשיפור אחוז הפוספט בסלע מ-מ-27%-28% ל-34%-33%. חלק משמעותי מהמחקר בתעשייה הכימית של שנות השבעים כוון להשגת יעד זה. היעד הושג בהצלחה ומיושם עד היום.

מכון המחקר תמ"י חבר לכימיקלים לישראל ב-1973, וזה הביא מהפך. עם האיחוד פותחו תהליכים חדשים עבור כל התעשייה הכימית הישראלית המבוססת על אוצרות הטבע. ובשנות ה-90 אף הורחב הפיתוח עבור חברת התרופות "טבע" וחברת ההדברה "מכתשים". תמ"י הפכה להיות ספק חיוני של פיתוח להרבה תעשיות כימיה גדולות בישראל.

תמ"י פיתחה מחומרי הגלם המקומיים תהליך חדשני לייצור דשן אשלגן חנקתי, שרבים הטילו ספק בכדאיותו המסחרית. תהליך זה הפך להיות הבסיס לחברת "חיפה כימיקלים" שהוקמה בשנת 1976, חברה שבזכות הידע ויישומו ההנדסי המצוין, הפכה למובילה עולמית בשוק דשן חיוני זה.

אחרי שחברת "רותם" פיתחה סלע פוספט מועשר, התברר שעדיף למכור מוצרי המשך עם ערך מוסף נוסף על פני מכירת סלע הפוספט, כמו דשנים מועשרים בפוספט וחומצה זרחתית באיכות מזון, כמו החומצה שנמצאת גם במשקאות קלים. תהליכים אלה פותחו על ידי החברות ומכון המחקר תמ"י יחדיו.

כימיקלים לישראל הופרטו בתחילת שנות התשעים לאחר ההשקעות המוצלחות של המדינה, ומינוף ההשקעות של המדינה אכן נותן פירותיו מאז.

2. יזמות פרטית וציבורית לפיתוח תעשייה כימית מבוססת-ידע

להלן דוגמאות של תעשיות כימיות בולטות שקמו בזכות פיתוח ידע ישראלי וללא הישענות על אוצרות הטבע:

א. טבע - תעשיית תרופות גנריות ותרופות מקור שהפכה לחברה גלובלית ענקית מבוססת ידע ויכולות ניהול. החברה התחילה כחברת סחר לפני יותר ממאה שנים וגדלה לאט. המשיכה לגדול באינטגרציה עם חברות ישראליות דומות ובהמשך עם חברות גלובליות.

ב. אדמה (לשעבר מכתשים אגן) - תעשיית חומרי הדברה גנרית בעיקרה, שהפכה להיות חברה גלובלית בין המובילות בעולם. לאחרונה נרכשה על ידי חברת כמצי"נה הסינית ומאז שילשה את מכירותיה ואת הערך המוסף שלה למשק, בזכות הרחבת המכירות בסין וביצוע השקעות נוספות, בעזרת המשאבים של הבעלים הסיניים.

ג. אגיס - תעשיית תרופות גנריות שלאחרונה נקנתה בחלקים, ועיקרה נמכר לחברת התרופות הגלובלית פריגו.

ד. דקסון - תעשייה גלובלית לתרופות גנריות שקמה וגדלה בהובלת יזם עסקי עם סבלנות ונחישות.

ה. אנזימוטק - חברה המבוססת על ידע חדשני לקיבוע אנזימים והכשרתם לעבודה בסביבה אורגנית. החברה פיתחה פלטפורמה חדשה לייצור ליפידים בסביבה אורגנית, שאפשרה לייצר את מרכיבי התחליפים לחלב אם ולמוספי מזון בריאות.

ו. נובוטייד - חברה לפיתוח וייצור פפטידים לשימושים רפואיים. הידע נוצר במכון המחקר תמ"י ויושם על ידי קבוצה שהוקמה על ידי יוצאי תמ"י בשיתוף עסקי בין תמ"י וחברת טבע.

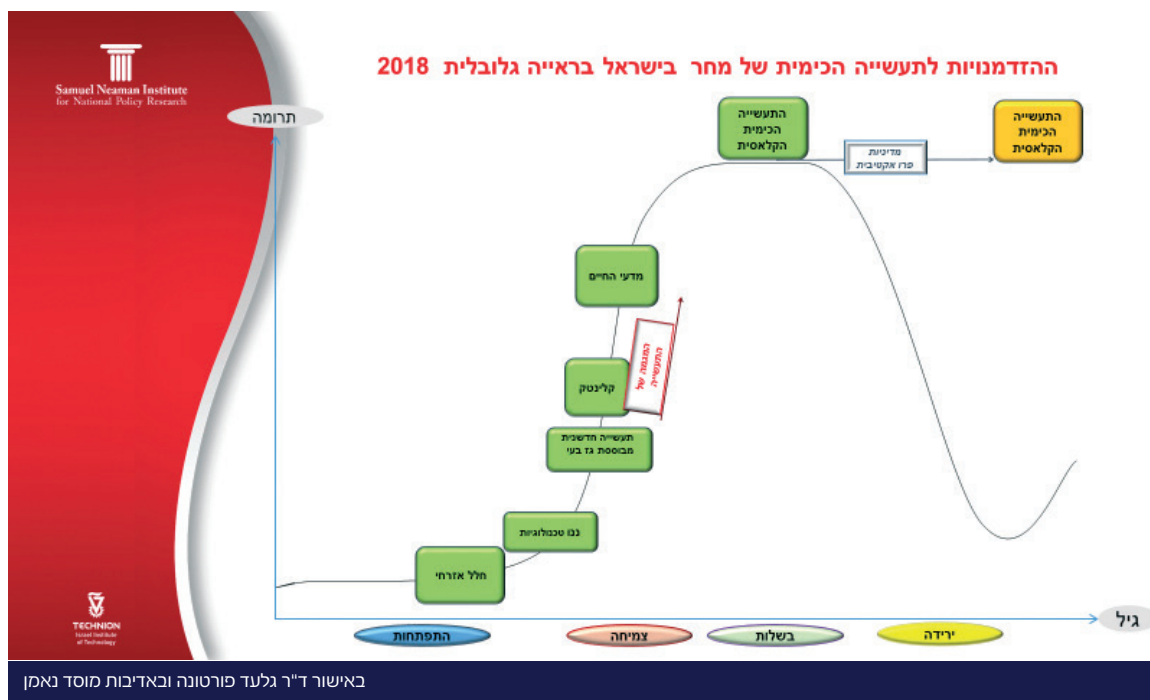
גידולן של תעשיות כאלה ורבות אחרות נעשה לאורך עשרות שנים בזכות שילוב של ידע חדשני בכימיה, הבנה עסקית ויזמות של אנשים עם חזון ומחויבות לתרומה לאומית ארוכת טווח.

לסיכום, אלה הם כיווני ההתפתחות של תהליכי המו"פ והייצור המסורתיים בשבעים השנים הראשונות:

1. **פיתוח תהליכים** להכנת מוצרים חדשים, שיפור יעילות, הקטנת החתימה הסביבתית, הגנה פטנטית.
2. **פיתוח איכות משופרת למוצרים קיימים.**
3. **פיתוח מוצרים חדשים.**
4. **יישום מוצרים קיימים ליישומים חדשים והוכחת היעילות.**
5. **מחקר ופיתוח של חומרים חדשים להגדלת יעילותם של הפתרונות.**

מהם אתגרי המחר של תעשייה הכימית?

בגרף המצורף יש ניסיון למקם סכמתית את ההתפתחויות הטכנולוגיות והצרכים הרלוונטיים לתעשייה גלובלית זו על פני מפת מחזור החיים של הטכנולוגיות המשלבות כימיה והנדסה ומדעים משלימים בשנים הקרובות.



התעשייה הכימית שעסקנו בה עד כה נמצאת היום בשיא התפתחותה אבל אם לא נדע לשמר אותה כהלכה, היקפי הייצור בישראל עלולים להיפגע. מחד, אין מודעת ציבורית לגודל תרומתה למשק הלאומי, ומאידך, יש נטייה להעדיף תעשיית תקשורת ומחשבים ומחקר ופיתוח ללא פוטנציאל זיהום או סיכון. בימים אלה אנו מקיימים דיאלוג המיועד לחזק את המחויבות של התעשייה הכימית לשמר את סביבתה באפקטיביות בעזרת הטכנולוגיות הקיימות ומקווים שהמודעות הציבורית לחיוניותה הכלכלית ולעניין המדעי הגלום בה תגדל ותאפשר מימוש היתרונות הרבים ארוכי הטווח.

מצאי הגז הטבעי בישראל אפשרו משאב טבע מקומי חדש, והוא כבר מנוצל לייצור חשמל בעלויות מופחתות ובהורדה דרסטית של זיהום הסביבה. בישראל יש לנו הזדמנות למנף את מצאי הגז הטבעי לפיתוח וייצור שרשרת של מוצרי המשך, שבעבר לא יכולנו לייצר בישראל. בפני המדינה עומד האתגר של ויתור על חלק מתמלוגי הגז לטווח הקצר, לטובת תעשיית מוצרי המשך שתאפשר מינוף כלכלי גדול נוסף למשק. הנושא שנוי במחלוקת וקשור גם בעקיפין לתדמית התעשייה הישראלית בציבור.

בימים אלה מנסה עולם הייצור והפיתוח הגלובלי לשלב את הייצור המתקדם במסגרת יישום המהפכה התעשייתית הרביעית, המכונה גם industry 4.0. התעשייה הכימית היא מהמתקדמות ביישום מערכות בקרה ושליטה ומערכות (IOT) (internet of things), המשלבות גלאים חכמים במפעלי הייצור המחוברים למערכות הבקרה. לכן לתעשייה ישראלית זו יש הזדמנות ליזום חדשנות ביישום האופציות לייצור כלכלי יותר, בשילוב תעשיית האינפורמציה והמחשוב הישראלית המתקדמת. הזדמנות זו תאפשר שימור חיוניותה של תעשייה זו למדינה.

מירב אתגרי המאה ה-21 שלפנינו מחייבים העמקה של היכולות הכימיות והיכולות הרב-תחומיות המשלבות כימיה עם המדעים האחרים כמו ביולוגיה, פיזיקה, חומרים, בשילוב הטכנולוגיות החדשות המתעוררות כפי שניתן לראות בגרף מחזור החיים. כיניהן מדעי החיים שלאחר גילוי ומיפוי

הגנום, והיכולות לרדת לרמת המבנה הכימי של הננוטכנולוגיה. לצדם עומד הקלינטק המשלב אנרגיה נקייה עם טיפול חדשני במים, בסביבה ובשמירת היקום, וגם ממנף את טכנולוגיות שימור הסביבה בתעשייה לטכנולוגיות ירוקות ביישומים אחרים.

נמנה כאן מספר אתגרים שהכימיה חיונית בהתמודדות איתם:

1. **שימור הסביבה** - פיתוח פתרונות ומניעת יצירת מפגעים סביבתיים הנובעים מאורח החיים המודרני.
 2. **חוסר שטחי חקלאות** לייצור מזון - התייעלות ופיתוח אלטרנטיבות להתמודדות עם גידול האוכלוסייה.
 3. **מחסור במשאבים** וחומרים מהטבע - מִחְזָזר ואלטרנטיבות לדלק הפוסילי, למגבלות המים והמחצבים.
 4. **אריכות ימים** - הגדלת הדרישות לבריאות ואיכות חיים - שילוב הטכנולוגיות והידע החדש שנוצר.
 5. **שילוב החלל** לפריצות דרך בתהליכים ובמוצרים.
 6. **רגולציה** ותקינה בינלאומית המיועדות להגן עלינו ובה בעת יוצרת חסמים.
 7. התאמת המוצרים **לשינויים דמוגרפיים**, אפיוני הצריכה הגלובליים וזיהוי אלטרנטיבות חדשניות.
 8. פיתוח תעשייה חדשנית המאפשרת **דו קיום עם אורבניזציה**.
- דרושה גישה רב תחומית המשלבת את הכימיה עם יתר המדעים באפקטיביות לפתרון הבעיות והאתגרים שהוצגו ולניצול ההזדמנויות שהן גם לטובת הכלכלה הלאומית. הגרף מספק מיפוי סכמטי של האתגרים והאפשרויות.



בפני לומדי הכימיה היום ניצבים אתגרים חדשים שמתווספים לאתגרים הקיימים. כשמתמודדים עם אתגרים אלה יש להבחין בין אתגרים שטרם נמצא להם פתרון בר קיימא, שדורשים העמקה של המחקר הבסיסי בכימיה ולשילוב הכימיה עם תחומי המדע האחרים, לבין אתגרים שלגביהם יש הוכחת היתכנות, ושבהתמודדות עמם יש לשאוף לפתרונות הנדסיים, הממנפים את הידע תוך כדי שמירה על התחרותיות הבינלאומית.

לסיכום

- יש לנו תעשייה כימית מפוארת שתורמת למשק ומתמודדת בהצלחה עם אתגרים כולל אתגרים סביבתיים.
- בתעשייה ובאקדמיה יש לנו סגל מעולה של מדענים ומנהלים, והממשלה תמכה בהם לאורך השנים.
- העולם המדעי והטכנולוגי משתנה. מדעני העתיד מתמודדים עם עולם מורכב יותר, ויש לנו כלים, ידע ונגישות גלובלית מצוינת להתמודדות עמו.
- החדשנות מחייבת שינויים, והיזמות מחויבת לתרגם את החדשנות לתעשייה מפוארת.
- חשוב לשכנע את הציבור הרחב ששימור התעשייה המפוארת חיוני ואפשרי.
- מו"פ וחדשנות חייבים להיות חלק מאקו סיסטם. צריכים לעבוד בתוך מערך שמקיים חברות ויוצר תזרים מזמונים יציב למדינה. לאורך זמן לא יציב להחזיק רק תשתיות מו"פ.

שבעים השנים הראשונות היו טובות, ונקווה שנשכיל להמשיך בבנייה ומינוף של המדע והטכנולוגיה לחיזוק תעשייה זו.

ההתפלה בישראל

ד"ר שרית בסון, יחידת התפלה ופרויקטים מיוחדים, חברת "מקורות"

רקע

כ-80% מאספקת המים למגזר הביתי בישראל היום מקורה במים מותפלים. המים המותפלים הם מקור מהימן למים שפירים שיכולים להבטיח אספקת מים רציפה ונאותה לתושבי המדינה גם בשנים שחונות של בצורת. באמצעות התפלת מים אפשר לתת מענה לגירעון המים המצטבר הנובע מעלייה בצריכת המים בעקבות התרבות האוכלוסייה והעלייה ברמת החיים.

התפלת מים היא תהליך הפרדה בין המים למלחים והמינרלים המומסים בהם, במטרה להפיק מים מופחתי מלחים הראויים לשתייה או לחקלאות. מי ההזנה בתהליך מכילים ריכוזים גבוהים יחסית של מלחים ומוגדרים כמים מליחים (קידוחים) או מלוחים (מי-ים). ריכוז כלל המלחים במים המליחים בדרך כלל אינו עולה על 5,000 מג"ל (מ"ג לליטר), לעומת מי-ים שבהם הריכוז מגיע לכ-40,000 מג"ל ואף יותר. דחיית המלחים בתהליך ההתפלה גבוהה מאוד, ולכן ריכוז כלל המלחים במים המותפלים יכול להיות קטן מ-300 מג"ל.

בתהליך ההתפלה ישנו זרם הזנה של מים מליחים/מלוחים ושני זרמי יציאה: של המוצר (המים המותפלים) ושל התמלחת (רכז התפלה). התמלחת היא התמיסה הנותרת בסוף התהליך, המרכזת את המלחים שנותרו בתהליך.

שיטות התפלה

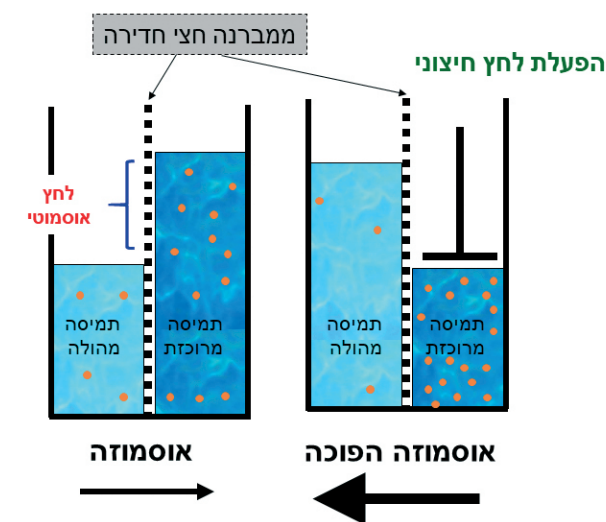
רוב מתקני ההתפלה הקיימים כיום פועלים בשתי טכנולוגיות עיקריות: הפרדה באמצעות ממברנות (אוסמוזה הפוכה) וזיקוק באמצעות אדים.

התפלה בשיטת זיקוק באמצעות אדים

מבחינה היסטורית טכנולוגיית הזיקוק פותחה מוקדם יותר, ומתקנים מסוג זה נפוצים במיוחד בארצות המפרץ הפרסי (בעיקר בערב הסעודית), מכיוון שצריכת האנרגיה בתהליך זה גבוהה. קיימות שלוש שיטות בתהליך התפלה של **זיקוק באמצעות אדים** (פריצה רב-דרגית, זיקוק רב-שלבי, זיקוק דחיסת אדים), והמשותף לכולן הוא חימום המים המלוחים ולאחר מכן עיבוי אדי המים שנוצרים. החום המשתחרר בעת העיבוי מושב ומנוצל לחלק הראשון של התהליך, כלומר, לחימום מים מלוחים נוספים (יעילות אנרגטית).

התפלה בשיטת האוסמוזה ההפוכה

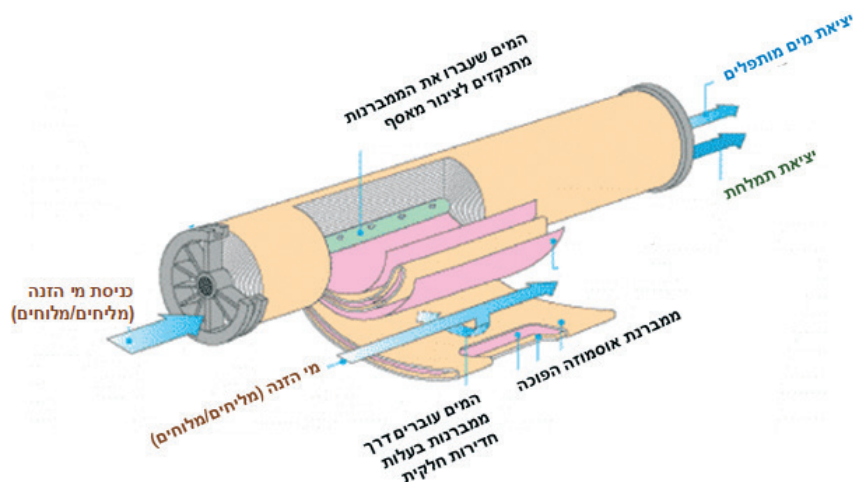
מאוחר יותר פותחה טכנולוגיית **האוסמוזה ההפוכה**, שכיום היא שיטת ההתפלה הנפוצה ביותר בשל צריכת אנרגיה נמוכה יותר, ולכן מצויה בעיקר בארצות הברית ובמדינות הים התיכון. בשיטה זו משתמשים בממברנות לצורך הפרדת המלחים, בהתאם לסכמה שבאיור 1. למעשה, בטכנולוגיה זו משתמשים בתהליך הפוך לאוסמוזה הקיימת בטבע בתאי בעלי-חיים וצמחים. בתהליך האוסמוטי קיים מעבר של מים מכיוון התמיסה המהולה (ריכוז מלחים נמוך) לכיוון התמיסה המרוכזת (מלוחה), על מנת לבצע מיהול והשוואת ריכוזים. המים עוברים דרך ממברנה חצי חדירה, המאפשרת מעבר מים בלבד ומונעת מעבר מלחים. באוסמוזה הפוכה כיוון מעבר המים הפוך מהכיוון בתהליך הטבעי של האוסמוזה (ולכן נקרא אוסמוזה הפוכה). המים עוברים מהתמיסה המרוכזת לתמיסה המהולה (מים מותפלים), אולם כדי שמעבר המים אכן יתרחש, נדרשת הפעלת לחץ חיצוני גבוה (גבוה מהלחץ האוסמוטי של המלחים בתמיסה), כ-20 ו-60 בר עבור התפלת מים מליחים ומי-ים, בהתאמה. בשל הפעלת הלחץ הגבוה הנדרש בתהליך זה, נחשבים מתקני ההתפלה לצרכני אנרגיה גדולים. קצב מעבר המים דרך הממברנה תלוי בלחץ המופעל, בריכוז המלחים, בטמפרטורה ובחדירות הממברנה. חדירות הממברנה מושפעת מסוג הממברנה, מחומר המבנה ומהתכונות הכימיות והפיזיקליות שלה.



איור 1 - סכמת תהליך האוסמוזה והאוסמוזה ההפוכה

* כל האיורים, מלבד איור 2, באדיבות מקורות.

בתהליך האוסמוזה ההפוכה הממברנה היא סינתטית ומאפשרת מעבר חומרים עפ"י קריטריונים שנקבעו מראש (גודל, צורה, אופי). הממברנה נדרשת לספק שטף מים מותפלים גבוה (נפח מים ליחידת שטח וזמן) והתנגדות גבוהה למעבר מלחים דרכה (כושר דחיית מלחים גבוה, מעל ל-99%).



COPYRIGHT: 2018 TORAY INDUSTRIES, INC

איור 2 - מבנה ממברנת אוסמוזה הפוכה ותיאור זרימת המים דרכה

רוב ממברנות האוסמוזה ההפוכה המיוצרות היום מורכבות משלוש שכבות: השכבה הפעילה היא פוליאימיד, ושתי השכבות התומכות עשויות מפוליסולפון ופוליאסטר. באיור 2 ניתן לראות סכמה של ממברנת אוסמוזה הפוכה ואת אופן הזרימה דרכה: זרם כניסה של מי הזנה (מלחים) ושני זרמי יציאה של מים מותפלים ותמלחת התפלה (רכז). התמלחת מכילה ריכוז גבוה של מלחים וכימיקלים שונים ששימשו בתהליך, כגון אַנְטִי־סְקַלֶנְטִים למניעת שיקוע מלחים ועוד. לכן יש לפנות את הרכז באופן מוסדר בהתאם לדרישות הרשויות, ובישראל - בתיאום עם המשרד לאיכות הסביבה (אגף ים וחופים). כיום ישנן מספר שיטות לטיפול ברכז. לרוב תיבחר שיטת הטיפול בהתאם לסוג מתקן ההתפלה ולמיקומו הגאוגרפי, כגון פינוי לים, בריכות אידוי, מיהול במי השקיה ועוד.

ההתקדמות הטכנולוגית הגדולה שחלה בשנים האחרונות הביאה לירידה משמעותית בעלויות ההתפלה בשיטת האוסמוזה ההפוכה, ועיקר החידושים נוגעים לשיפור ביצועי הממברנות (דחיית מלחים גבוהה וחידרות גבוהה) ולשיטות השבת האנרגיה מהרכז שמטרתן ניצול האנרגיה האגורה ברכז (לחץ וספיקה) והעברתה לזרם המזין את הממברנות (מים מלחים/מלוחים) לצורך חיסכון אנרגטי.

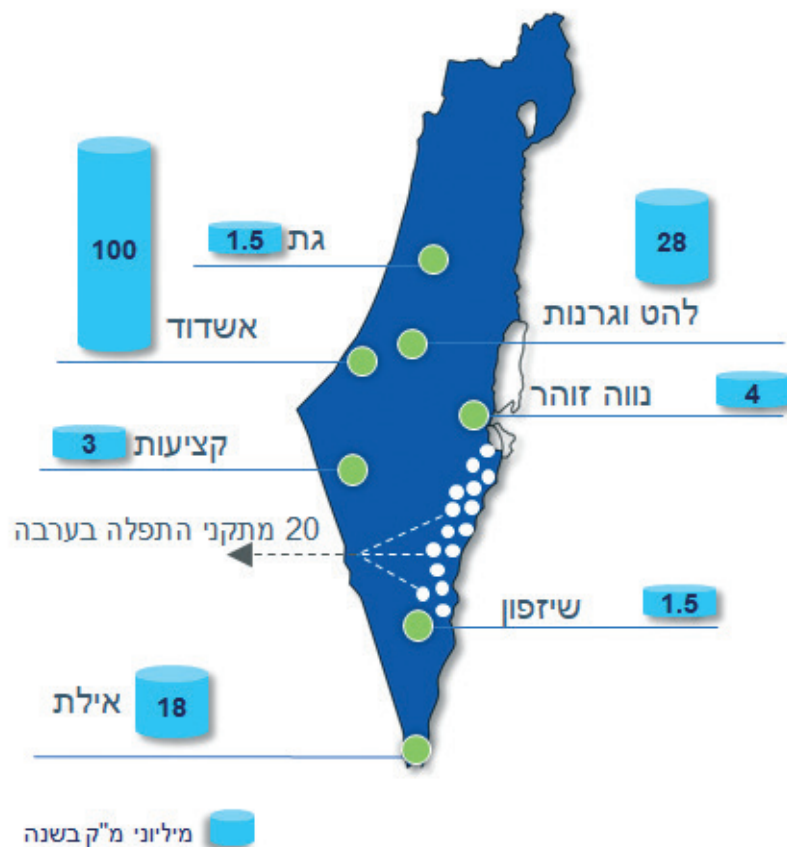
ישראל היא בין המדינות החלוצות שהתפילו מים לשתייה, וגדולי המתקנים בעולם להתפלת מים לאוסמוזה הפוכה ממוקמים היום לאורך מישור החוף הישראלי. מאז שנת 2005 מספקים מתקנים אלה מים מותפלים בכמויות גדולות הנמדדות במאות מלמ"ש (מיליון מטרים מעוקבים בשנה). נכון לשנת 2018 קיימים בישראל חמישה מתקנים להתפלת מי הים התיכון בתפוקה כוללת של כ-590 מלמ"ש: באשקלון, באשדוד, בפלמחים, בשורק ובחדרה. בנוסף קיים תכנון למתקן התפלה שישו בצפון הארץ (בסמוך לקיבוץ שמרת). המים המותפלים משולבים במערכת האספקה הארצית. בשנת 2011 החלה חברת מקורות בבניית המוביל הארצי החדש כדי לקלוט את המים המותפלים ממתקני התפלה גדולים אלו שהוקמו לאורך חוף הים התיכון.

בנוסף להתפלת מי ים, ישנם כ-80 מלמ"ש ממתקנים נוספים להתפלת מים מליחים, וכ-60 מלמ"ש מתוכם הם מ-36 מתקני התפלה בשיטת האוסמוזה ההפוכה המפעילה כיום חברת המים הלאומית "מקורות", בספיקה כוללת של 180,000 מ"ק ליממה. איור 3 מתאר את פריסת מתקני מקורות בישראל.

אספקת המים לעיר אילת

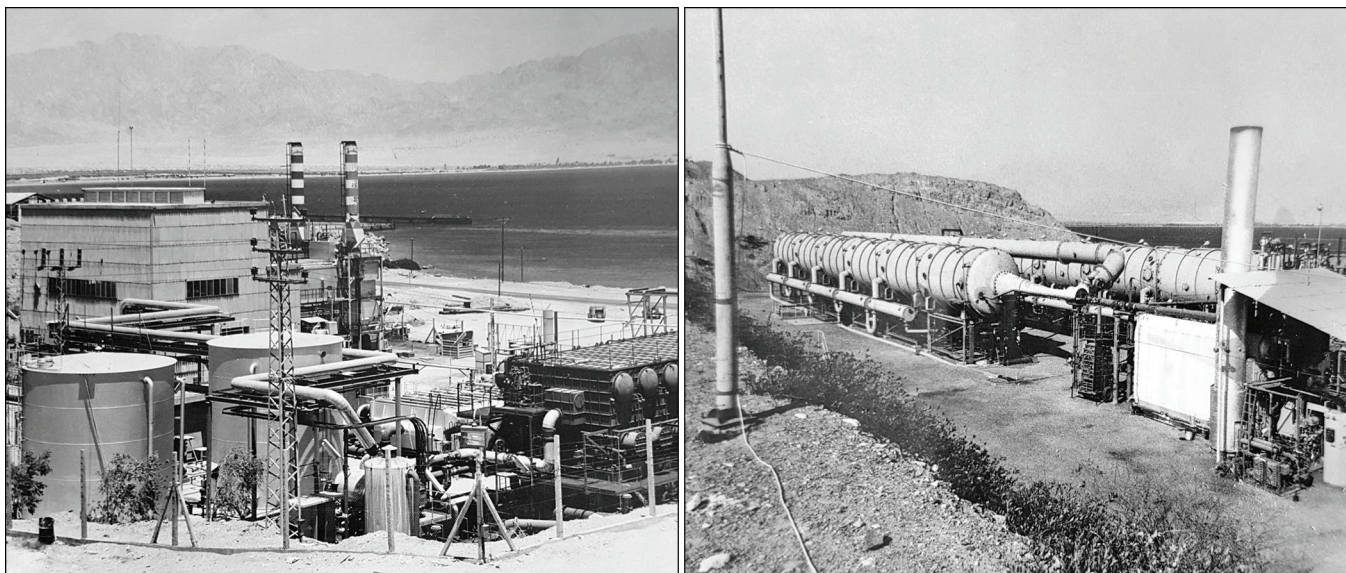
כידוע, כל מי השתייה המסופקים בעיר אילת הם מים מותפלים. תהליך זה החל בתחילת שנות ה-60, כאשר מקורות התגייסה לפתרון מצוקת המים של העיר. זוהי ראשית ההתפלה בישראל. המתקנים הראשונים בעיר היו בשיטת זיקוק אדים (איור 4). בשנת 1965 הוקם בעיר המתקן הראשון להתפלת מי ים, ולאחר הרחבתו בשנת 1969 גדלה התפוקה לכ-7,000 מ"ק/יממה. מתקן זה הוקם על-ידי חברת "מקורות" וחברת החשמל בצמוד לתחנת הכוח המקומית שממנה סופק הקיטור. בשנת 1973 הוקם מתקן ההתפלה השני בעיר אילת עם כושר ייצור של כ-4,000 מ"ק/יממה.

בשנות ה-70 החל יישום תהליך האוסמוזה ההפוכה באילת, כאשר בשנת 1977 הופעל על-ידי "מקורות" מתקן להתפלת מים מליחים - סבחה א' שהחליף בהדרגה את מתקני ההתפלה בשיטת זיקוק האדים שעלות הפעלתם הייתה יקרה יותר. עם גידול הביקוש למים בעיר אילת נבנה בשנת



איור 3 - תפרוסת מתקני התפלת מים בשיטת האוסמוזה ההפוכה של חברת "מקורות"

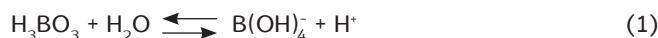
1992 מתקן התפלת מים מליחים נוסף בשיטת האוסמוזה ההפוכה - סבחה ב'. כושר הייצור כיום של שני מתקני התפלת מים מליחים אלו בעיר אילת שבבעלות מקורות גדל למעל ל-50,000 מ"ק ביום.



לקוח מארכיון מקורות

איור 4 - שני מתקני איוד באילת: מתקן התפלה בשיטת פריצה רב דרגית שהופעל בין השנים 1965-1969 עם תפוקה יומית של 7,000 מ"ק/יום (שמאל) ואב טיפוס ראשון של מתקן זיקוק רב שלבי בשנת 1973 עם תפוקה יומית של 4,000 מ"ק/יום (ימין).

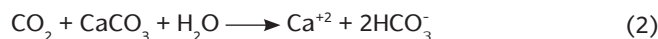
בשנת 1997 הוקם באילת על-ידי מקורות מתקן ההתפלה הראשון בישראל להתפלת מי ים (ים סוף) - מתקן סבחה ג'. מתקן זה הוא ייחודי מסוגו בעולם המתפיל תמהיל של מי ים ורכז התפלה של מי ים מליחים (ממתקני סבחה א' וסבחה ב'). כושר הייצור של סבחה ג' כיום הוא כ-10,000 מ"ק/יממה. תמלחת ההתפלה של המתקן מועברת לחברת המלח לייצור מלח. חברת מקורות הייתה חלוצה כשתכננה ויישמה בשנת 2005 טכנולוגיה להפחתת הבורון ממז המוצר המותפלים במתקן התפלה סבחה ג'. גידולים מסוימים רגישים לריכוזי בורון גבוהים (פרות הדר, אבוקדו). ריכוז הבורון במי ים הוא גבוה (כ-5 מג"ל), וכדי להורידו לריכוז הנמוך הנדרש להשקיה חקלאית (0.4 < מג"ל) ישנו שלב התפלה נוסף של המוצר ב- $\text{pH} > 10$. ב- pH זה מתרחשת התגובה בניסוח 1, שבה נוצר יון הבוראט מהחומצה הבורית:



של ממברנת האוסמוזה ההפוכה גבוה יותר ליון הבוראט מאשר לחומצה הבורית (גודל, מטען). הפחתת ריכוז הבורון במים המותפלים מאפשרת לחקלאי הערבה הדרומית השקיה בלתי מוגבלת בקולחי העיר אילת.

נושא פינוי תמלחת ההתפלה לים הוא אחד הנושאים המטרידים את שומרי הסביבה. חשוב לציין שהפעלת מתקני התפלה בהיקף נרחב שכזה נחשבת לתופעה חדשה יחסית שטרם נחקרה לעומקה כדי לאמוד את השפעתה על הסביבה הימית. עם זאת, ישנם מחקרים בנושא, וביניהם המחקרים של חברת "מקורות", שמטרתם למזער את ההשפעה הסביבתית של הרכז על האזור הימי, כדוגמת בחינת השימוש בכימיקלים ידידותיים יותר לסביבה בד בבד עם הורדת צריכת הכימיקלים לשימוש מינימלי. כמו כן ישנם מחקרים לצמצום תמלחת ההתפלה באמצעות טכנולוגיות חדשות להגדלת יעילות התהליך ולצמצום זרם הרכז.

בתהליך ההתפלה מורחקים רוב המליחים, בין היתר מלחי סידן ומגנזיום. כיום מבוצעת השבת סידן למים המותפלים על-ידי מיהול עם קידוחים נוספים או בתהליכי ייצוב לערכים בהתאם לתוספת השישית לתקנות בריאות העם למי שתייה מ-2013. תוספת הסידן מבוצעת באמצעות אבני גיר, בהתאם לניסוח 2:



יש לציין שהשבת המגנזיום למים המותפלים עדיין נבחנת, ולכן טרם התגבשה החלטה רגולטורית בנושא.

לסיום, חשוב לציין שמלבד העובדה שהמים המותפלים מהווים מקור מים מהימן המאופייני באיכות גבוהה, הרי בנוסף אפשר באמצעותם גם לשקם את מאגרי המים הטבעיים (כנרת, אקוויפרים) שמצבם הוחמר לאחרונה בשל שנות הבצורת הרצופות. תוספת המים בהתפלה תאפשר שיקום מאגרי המים הטבעיים הן מבחינה כמותית והן מבחינה איכותית.



איור 5 - מתקן ההתפלה אשדוד שבבעלות חברת "מקורות" פועל בשיטת האוסמוזה ההפוכה. המתקן החל לפעול בשנת 2015 וכיום מספק מים מותפלים בתפוקה של 100 מל"מ"ש. | צילום: חברת אלברוס.

הכימיה בשירות מדעי כדור הארץ - גיאוכימיה

ד"ר יהודית הרלבן, המכון הגיאולוגי

המכון הגיאולוגי לישראל הוא מכון מחקר ממשלתי, יחידת סמך עצמאית במשרד האנרגיה, בירושלים. יעודי המכון הם:
א. להוות מרכז ידע מדעי-יישומי ממוקד ומותאם לצרכים הלאומיים של ישראל בתחום מדעי האדמה והתשתית הטבעית וזאת בראייה ממלכתית, להבטחת האינטרס של המדינה ולרווחת תושביה.

ב. להוות גורם משמעותי בתכנון ארוך-טווח של פיתוח בר-קיימא לניצול מושכל של משאבי הטבע; להשתלב בגיבוש מדיניות לאומית בנושאי התשתית הטבעית, בתכנון ופיתוח ראויים של התשתית ובהיערכות נכונה בפני סיכונים טבעיים ומעשי ידי אדם.

גיאוכימיה (גיאואדמה ביוונית) היא תת-תחום במדעי כדור הארץ שעוסק בתחומים שבהם עקרונות הכימיה משמשים להבנת תהליכים ופענוח ההיסטוריה של כדור הארץ. מאמר זה יתמקד בעיקר בכימיה האי-אורגנית, תחום רחב מאוד שבו לכל אחד מיסודות הטבלה המחזורית, כולל היסודות הנדירים ביותר, יש שימוש בהבנת תהליכים כאלה. מחקרים בגיאוכימיה אינם אקדמיים בלבד אלא בעלי השלכה משמעותית על תחומים רבים בחיי האנושות על הכוכב שלנו, כגון שימוש וניצול משאבים, סיכונים, זיהומים מחומרים שונים, התחממות גלובלית ועוד.

עוד באמצע המאה הרביעית לפני הספירה כתב תיאופרסטוס (Theophrastus) את הספר "On Stones" שבו הוא ממיין את המינרלים, המשאבים והסלעים הידועים לו עפ"י התכונות הפיזיקליות הידועות באותה תקופה: חום וקשיות. אז כמו היום נבע העניין בהכרת תכונות חומרים מהרצון להשתמש בהם כמשאב. אך כיום הגיאוכימאים מבצעים כמובן מיונים מורכבים הרבה יותר.

אחד הגילויים המסעירים, עם תחילת הסקירה הגיאוכימית של חומרי כדור הארץ, היה שריכוזו של יסוד בכדור הארץ (נפיצות) יורד עם העלייה במשקלו האטומי. לדוגמה, נפיצות היסוד סיליקון בקרום כדור הארץ (28%) גבוהה בהרבה מזו של זהב (4 ppb). בנוסף עלה הצורך לקבץ את היסודות השונים מעט אחרת מהאופן שבו הם מקובצים בטבלה המחזורית, וב-1919 חילק הגיאוכימאי ויקטור גולדשמידט (Goldschmidt) את היסודות בטבלה המחזורית לקבוצות על פי נפיצותם בקרום כדור הארץ באופן הבא:

הקבוצה	קשר כימי עיקרי עם:	היסודות השולטים	היכן בכדור הארץ?
Lithophiles ליתופילים	חמצן	Na, K, Si, Al, Ti Mg, Ca	קרום
Siderophiles סידרופילים	ברזל	Fe, Co, Ni, Pt, Re, O	גלעין
Chalcophile כלכופילים	גופרית	Cu, Ag, Zn, Pb, S	סביבות ייחודיות
atmophile אטמופילים		O, N, H, C וגזים אצילים	אטמוספירה

גיאוכימיה איזוטופית

הגיאוכימיה האיזוטופית מנצלת את הנפיצות הטבעית של איזוטופים של יסוד לחקר תחומים רבים: גיל הסלע ואופן היווצרותו, ההיסטוריה האקלימית של העבר, זיהוי מקורות זיהום ועוד. כמעט לכל יסוד יש יותר מאיזוטופ אחד, והגיאוכימיה האיזוטופית נשענת על שתי תופעות חשובות:

- ההבדל במסה בין איזוטופים של אותו יסוד גורם לשינוי בתכונותיהם הקינטיות: איזוטופ כבד יותר נוטה להגיב לאט יותר. הבדל הזה בא לידי ביטוי בעיקר ביסודות הקלים כגון מימן, חמצן, פחמן, חנקן, גופרית וכלור, שבהם הבדלי מסה משמעותיים בין האיזוטופים השונים.
- ההתפרקות הטבעית של איזוטופ לא יציב (רדיואקטיבי) ליסוד אחר, כגון אורניום לעופרת ($^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$), רובידיום לסטרונציום ($^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$), אשלגן לארגון ($^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$), היא הבסיס לתארוך נומרי של סלעים, מינרלים, חומרים אורגניים (^{14}C), ומים (^3H , ^81Kr).

המכשור המתקדם למדידת ההרכבים הכימיים והאיזוטופים של יסודות קלים וכבדים הקיים במכון הגיאולוגי, מאפשר מחקרים בתחומים רבים מאוד, ונסקור כמה דוגמאות למחקרים המסייעים בהבנת תהליכים בגיאולוגיה של ישראל ואת ההשפעה של תוצאות המחקרים על מקבלי ההחלטות במדינת ישראל.

* כל התמונות באדיבות המכון הגיאולוגי לישראל.

ניטור זהו שם המשחק

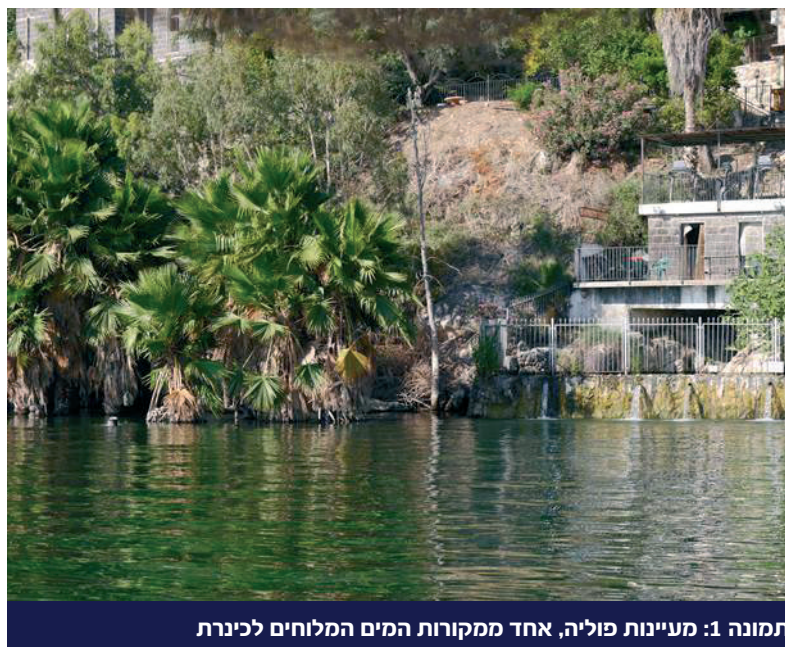
המכון הגיאולוגי שותף בניטור כימי של מים למיניהם, קרקעות ומחצבים, כדי להכיר את ערכי הרקע ולאפשר זיהוי שינויים שמקורם בתעשייה, בחקלאות או בכל גורם אנושי, וכן כדי לאפשר הערכה של היקף המחצבים השונים בארץ.

הוי כנרת שלי

זה שני עשורים נערך ניטור בכנרת המובל על ידי ד"ר לודוויג הליץ וד"ר גלית שרעבי בשיתוף פעולה עם רשות המים והמעבדה לחקר הכנרת (חיא"ל). למתכות הנבדקות זיקה ביולוגית או גיאוכימית, וחלקן בעלות פוטנציאל רעילות (Pb, Hg). מטרת העבודה הן יצירת מאגר מידע בסיסי למתכות קורט באגם, וניצול המידע המתקבל לצורך הבנת תהליכים באגם. במסגרת ניטור מתכות בכנרת נמדדים כ-24 יסודות, החל במוליבדן (Mo) שריכוזו כ-1ppb וכלה בבור (B) שריכוזו כ-100ppb. דיגום המתכות נעשה במרכז האגם, במי שפך הירדן ובנחל משושים בעזרת מכשיר ICP-MS המאפשר קביעת ריכוז המתכות ברגישות ודיוק גבוהים מאוד. מעקב אחר שינויים בריכוז המתכות בכנרת, לדוגמה, בריכוזי העופרת או הכספית, מאפשר זיהוי אירוע חריג. חשוב לציין שמתחילת הניטור, דהיינו, משנת 2000 עד היום, נותר ריכוז המתכות בכנרת ללא שינוי ולא נמצאו חריגות, וכן שלמרות שמי הכנרת אינם מי שתייה אלא מי גלם לשתייה, ריכוז המתכות בכנרת נמוך בסדרי גודל מן המותר עפ"י תקנות בריאות העם 2013.

באגם הכנרת יש מחזור אחד בשנה של ערבוב ושיכוך¹. בחודשי החורף האגם מעורבב, ולגובה כל עמודת המים יש טמפרטורה קבועה (כ-16°C), ריכוז חמצן מומס קבוע וגבוה (כ-250 mmol·L⁻¹) וגם ריכוז המתכות בתקופה זו אחיד. עם תחילת האביב השכבה העליונה מתחממת ומתעשרת בחמצן שמיצור בה או נקלט בה מן האטמוספירה, בעוד שהשכבה התחתונה נותרת קרה וחסרת חמצן. בשכבה התחתונה החמצן המומס שנכלא בעת הערבוב בעונה הקודמת, נצרך בתהליכים שונים כגון נשימה ופירוק בקטריאלי של חומרים. בקיץ האגם משוכב: השכבה העליונה מחומצנת וחמה, השכבה התחתונה מחוזרת וקרה, ובשכבת הביניים מפלי חמצן וטמפרטורה גדולים, ושם גם יש שינויים בנפיצות מתכות העוברות תהליכי חמצון-חיזור כגון מנגן, ברזל, אורניום וונדיום (Mn, Fe, U, V). מקור היסוד רדיום בכנרת הוא במעיינות המלוחים בשולי האגם הקובעים את מליחות הכנרת. על ידי שימוש באיזוטופים של רדיום, נעשה ניסיון לכמת את תרומת המעיינות המלוחים, אך הדרך במחקר זה עדיין ארוכה.

במסגרת מחקר וניטור של מערכת החנקן בכנרת נעזרו ד"ר איתי גבריאלי והדוקטורנטית תמי זילברמן באיזוטופים של חנקן כדי לעקוב אחר שינויים במערכת החמצון (חמצון-חיזור) באגם. פותחה שיטת מדידה ייחודית לקביעת הרכבים איזוטופיים של צורני החנקן השונים במים גם בריכוזים נמוכים כדי לאפשר הבנה מעמיקה יותר של תהליכי החמצון באגם ושל מאזן המסה של החנקן בכנרת.



באופן דומה המכון הגיאולוגי שותף לסקר ניטור של מתכות כבדות לאורך חופי הים התיכון והים עצמו לצורך זיהוי אירועי זיהום וכן להערכת ערכי רקע, שלהם השלכה חוקית לכל פעילות סביבתית וכלכלית המתבצעות בים התיכון.

¹ שיכוך = חלוקת עמודת המים באגם לשכבות בעלות מאפיינים כימיים ופיזיקליים שונים בד"כ מליחות, טמפרטורה וריכוז החמצן.

קרקעות ומחצבים - רווח והפסד

ניטור קרקעות ומחצבים חשוב הן לחיפוש מחצבים מתכתיים והן לזיהוי סכנים לזיהום סביבתי/אנתרופוגני (מעשה ידי אדם), ולכן להסברת תחלואה בבני אדם, בחי ובצומח. המכון הגיאולוגי ערך סקרים כאלה במשך כשני עשורים (1987-2006) בהובלתם של ד"ר משה שירב, ד"ר לודוויג הליץ וד"ר שמעון אילני. באזורי הסקר נכללים מוקדים אורבניים ותעשייתיים גדולים (חיפה, ירושלים, אזור הקריות, מורדות השומרון המערביים, נצרת, אגן הקישון). באמצעות ניתוח התוצאות אפשר להבחין באופן ברור בין תרומת יסודות קורט מתכתיים שמקורם במסלע הטבעי לבין תרומה אנתרופוגנית שמקורה במוקדי זיהום מקומיים (תעשייה או סילוק פסולת) או רחוקים יותר - כמו חלקיקי אבק הנישאים מאזורי תעשייה (לדוגמה: הזיהום המגיע לאזור טבעון ממפרץ חיפה).

בסקרים התגלו כמה ממצאים חשובים: כמעט בכל אחד מן האזורים האורבניים-תעשייתיים קיימת בקרקע העשרה משמעותית ביסודות רעילים כגון קדמיום, עופרת, אבץ, אנטימון ובדיל. בנוסף בוצת נחל הקישון, אשר הוצאה מאפיקו בשנים עברו וגם לאחרונה, מכילה ריכוזים גבוהים מאוד של אורניום שמקורו בסילוק רב-שנים של שפכי תעשיית הדשנים אל הקישון. כמו כן בקרקעות שעליהן הוטלו מעכבי בעירה בעת דליקה ביערות, התגלו ריכוזים חריגים של קדמיום ומתכות אחרות שמקורם בחומרי הגלם המשמשים לייצור מעכבי הבעירה (תרכובות פוספט). ולבסוף, המיפוי של תפוצת היסודות הרעילים בקרקע תואם את נתוני תפוצת חלקיקי האבק הנשימים (10PM) והעדינים (2.5PM), ולכן נתוני הסקרים הגיאוכימיים משמשים גם במחקרים אפידמיולוגיים.

מים מתחת לרגלינו

ד"ר אביו בורג מוביל מחקרים שבהם נעשה שימוש בהרכבים כימיים ואיזוטופיים של מי תהום, מי קידוחים ומי מעיינות. במחקרי האקוויפרים² בארץ עוקבים אחר תהליכי זיהום והמלחה, זיהוי תהליכי ערבוב בין גופי מים, הערכת קצבי תנועה של מים בתת-הקרקע ואפילו שחזור תנאים גיאואידרולוגיים בתקופות עבר אקלימיות. לדוגמה, כאשר אקוויפר חבורת יהודה בצפון מזרח הנגב כולל מוצאו בעין בוקק, זוהם על ידי מי שפכים תעשייתיים, זוהם מקור הזיהום ע"י השוואת הרכבים ויחסים כימיים במי המעיין ובשפכים התעשייתיים. בעקבות זיהום זה נמצאה ירידה דרמטית ביחס Na/Cl , עלייה בריכוז הכלורידים וכן במספר יסודות קורט, כגון אבץ ובריום, והסביבה האקולוגית הייחודית נפגעה. דוגמה אחרת לזיהום היא חלחול מים מבריכות דגים (לדוגמה, בריכות חוף כרמל) לאקוויפר החוף. במקרה זה זוהם הזיהום באמצעות מדידת ההרכב הכימי והאיזוטופי של המים. ניהול מושכל של משאבי המים בישראל תלוי מאוד בניטור ובהבנת התהליכים בגופי המים השונים.

בין ים למי תהום

זה עשרות שנים ידוע שישנה המלחה של מי תהום בצפון מערב אקוויפר ההר. מקור ההמלחה של מי תהום אלה לא היה ידוע: האם אלו מי ים צעירים החודרים אל האקוויפר או אולי מים מלוחים עתיקים? אם אלו מים עתיקים, הרי אפשר לשאוב אותם ולמנוע את המלחת המאגר, אך אם מקור המים במי ים עכשוויים, תגביר השאיבה את ההמלחה. ד"ר יוסי יחיאלי מוביל מחקרים העוסקים בקשר ההידרולוגי בין מי הים לאקוויפר ובקביעת קצב חדירת מי הים לאקוויפר. החדירה היא תהליך טבעי שהחל מאז סיומה של תקופת הקרח האחרונה לפני כ-18,000 שנה. מאז החלו פני הים לעלות והביאו לעליית הלחץ ההידרולוגי (עומס המים) ולחדירה של מי הים אל האקוויפר. בתהליך טבעי זה מי הים יכולים לחדור מערבה כ-1-3 מטר בשנה, ולכן במרחק כ-10 ק"מ מהחוף, לדוגמה, יהיו המים בני כ-10,000 שנה. החוקרים מדדו את גיל המים המלוחים בשימוש בשני איזוטופים ^{14}C ו- ^{81}K , וכך נקבע שהמים צעירים, חלקם פחות מ-12,000 שנה, ושאיבתם יכולה לגרום להמלחה של האקוויפר. גם באקוויפר החוף ישנה חדירה של מי ים הנגרמת גם עקב שאיבת מים בקידוחים שונים, וכיום השאיבה באקוויפר זה מנוהלת כך שלא תביא לחדירת מי ים מלוחים מזרחה.

ים המלח שאין שני לו

ים המלח נוצר מחדירת מי הים התיכון דרך עמק יזרעאל ובקעת הירדן אל אגן ים המלח לפני כ-4-5 מיליון שנה. תמלחת ים המלח מאופיינת בהרכב כימי ייחודי שבו ישנה העשרה ביונים של סידן ביחס ליוני הסולפט והביקרבונט ($Ca^{+2}/SO_4^{-2} + HCO_3^- > 1$) ושל כלור לעומת נתון ($Na^+/Cl^- < 1$), תכונות המעידות על כך שמי הים המקוריים עברו שינויים כימיים ואינם מי ים שפשוט עברו אידוי.

ד"ר איתי גבריאלי מוביל מחקרים שעיקרם מעקב והבנת השינויים וההתפתחות הגיאוכימית העכשווית של תמלחת ים המלח, וההשלכות העתידיות של הזרמת מי ים או מי רכז מהתפלה (הנותרים לאחר הפקת מי השתייה) אל ים המלח. לדוגמה, בין ישראל לירדן מקודם היום פרויקט מובל השלום שבמסגרתו מתוכננת התפלה של מי ים בעקבה והובלת מי הרכז ממתקן ההתפלה, יחד עם תוספת של מי ים סוף לים המלח, כדי להאט את ירידת המפלס ולהימנע מפגיעה באקולוגיה של מפרץ אילת בגלל הזרמת מי הרכז של ההתפלה. מחקרים על מנגנוני שקיעת מלחים מורים שערבוב מי ים סוף עם מי ים



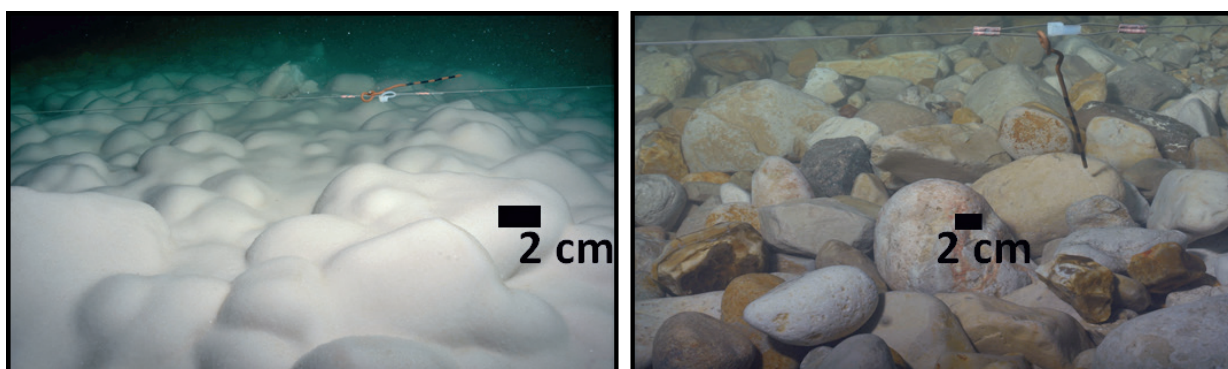
תמונה 2: ניסוי המדמה ערבוב בין מי ים סוף ומי ים המלח. אפשר לראות פריחה של הארכיאה, הצובעת את המים באדום.

² אקוויפר הוא יחידת סלע בתת-הקרקע הרוויה במים. יש לה מוליכות הידראולית גבוהה (תנועת המים יעילה ומהירה), וניתן לקדוח ולהפיק ממנה כמויות גדולות של מים.

המלח יגרום לגיבוש של הגבס באגם בגלל תוספת של סולפט למערכת. אם הגבס יתגבש כגבישים קטנים, הם עלולים להישאר כתרחיף על פני השטח של ים המלח (תופעת "הלבנה"). מלבד התופעה הלא אסתטית של הים, תופעת ההלבנה יכולה להשפיע גם על מאזן האנרגיה בגלל שינוי האלבדו (מידת ההחזרה של קרינת השמש). כמו כן במחקר בשיתוף מפעלי ים המלח ואוניברסיטת ת"א התגלה כי מיהול מי ים המלח כתוצאה מהזרמת מי ההתפלה או מי ים סוף, עלול להביא לפריחה של אצות ייחודיות לים המלח ואף לפריחה של ארכיאה. מסיבה זו וסיבות נוספות, ההמלצות שניתנו ע"י חוקרי המכון הגיאולוגי היו שהזרמת מים מים-סוף לא תעלה על 400 מיליון קוב לשנה.

מה בין מלח וקציר

קבוצת מחקר בהובלתו של ד"ר נדב לנסקי עוסקת בחקר התכונות הכימופיזיקליות של גוף מי ים המלח וכן באידי ושיקוע של מלח באגם. שקיעת מלח (NaCl) נגרמת כאשר המלח נמצא בעל-רוויה במי הים, והיא תלויה בטמפרטורה ובמליחות. אחת השאלות החשובות היא באיזו עונה של השנה שוקע המלח ומאיזה עומק. החוקרים מדדו את צפיפות התמיסה בשיטה חדשנית בעלת דיוק גבוה במיוחד, והתברר באופן מפתיע שגיבוש המלח קורה דווקא בחורף, ולא בקיץ כאשר האידי בשיאו. בקיץ, כאשר טמפרטורת המים גבוהה יותר, מי הים נמצאים בתת-רוויה למרות שמליחותם גבוהה יותר, ולכן לא שוקע מלח. לממצא זה משמעות גדולה מבחינה תפעולית: השטת ספינת המחקר בים המלח קשה יותר בחורף, שאז מצטבר מלח על מדחף הספינה. כמו כן בחודשי הקיץ צינורות השאיבה של מי ים המלח במפעלי ים המלח נקיים ממלח, ואילו בחורף צינורות השאיבה נסתמים עקב שקיעת המלח בתוכם, ויש להמס אותו במים רגילים. מחקרים אלה חשובים כדי למצוא פתרונות תפעוליים תוך כדי התמודדות עם הגיבוש האינטנסיבי של המלח.



תמונה 3: קרקעית ים המלח בעומק 10 מ'. מימין - בתקופת הקיץ (34°C) החלוקים שהגיעו עם הנחלים חשופים; משמאל - בחורף (24°C), אותם חלוקים "מצופים" בגבישי מלח (Sirota et al., 2017, GSA Bulletin)

שכבות דקיקות כארכיב לאקלים העבר

ישנם מספר ארכיבים גיאולוגיים טבעיים לפענוח אקלים עבר, החל מגלעיני קרח בקטבים וכלה במשקעי אבק, קרקעות, אגמים ומערות. בסקירה זו נציג שני ארכיבים אשר נחקרו לפענוח חקר אקלים העבר באזורנו: משקעי אגם ים המלח ומערות נטיפים. לתוצאות מחקרים אלה יש השלכות להבנת אקלים עבר לא רק בישראל אלא בכל אגן ים התיכון.

אגם הלשון

קבוצת המחקר בהובלת פרופ' מוטי שטיין חוקרת את ההיסטוריה האקלימית-הידרולוגית של אגן הניקוז של ים המלח על ידי בחינת תכונות כימיות ואיזוטופיות שונות של הסדימנטים ששקעו באגמים הקדומים (לדוגמה, ליד מצדה ונחל פרצים). החוקרים השתמשו באיזוטופ הקוסמוגני ברליום ^{10}Be , הנוצר באטמוספירה כתוצאה מפגיעה של קרינה קוסמית, לתארוך המלח הבונה את הר סדום, ונקבע שגילו הוא בין 4-6 מיליוני שנים. גוף המים שהתקיים בבקע ים המלח נקרא בתקופה מסוימת אגם הלשון, ומשקעיו נקראים תצורת ליסן. תצורת ליסן בנויה משכבות דקיקות המכונות "למינות" של ארגוניט שצבעו לבן (החומר הלבן שנקרה בתקופה מסוימת במערת הקמח) ושל חומר חום שמקורו בסחף נחלים דק (דטריטוס) המגיע מאגן הניקוז. מסתבר שזוג למינות כאלה משקף שנה אחת בדרך כלל (תמונה 4). ההרכבים הכימיים של הלמינות השונות משקפים את תרומת המים משני מקורות עיקריים: תמלחת סידן כלורידית הנתרמת משולי האגם וקרקעיתו, ומים מתוקים מאגן הניקוז. התרומה היחסית של שני מקורות המים משקפת את ההיסטוריה ההידרולוגית של אגן הניקוז, וזו משקפת את האקלים האזורי והעולמי. בעזרת מדידה של יחסי איזוטופים שונים אפשר לחשב, למשל, את כמויות המים המתוקים שהגיעו לאגם הלשון. ארכיב הלמינות מתעד את השינויים בהרכב מי האגם בכ-70 אלף השנים האחרונות, והוא הושווה לארכיבים גיאולוגיים עולמיים כגון גלעיני הקרח בגרינלנד. מחקרי ההידרולוגיה ואקלימי העבר באזור אגן הניקוז של ים המלח הם בעלי חשיבות רבה למחקר שינויי האקלים בהווה ובעתיד, להבנת שינויי האקלים באגן ים המלח נודעת חשיבות מכרעת, והיא מעוררת עניין רב, גם בגלל מיקומו בשולי רצועת המדבר וגם משום שבאזור זה חיים מאות מיליוני אנשים, ועל פי המודלים של ההתחממות הגלובלית, יש לצפות שיהיה נתון להתייבשות קיצונית.



תמונה 4: מימין - תצורת ליסן, מצדה. משמאל - חילופי השכבות הדקיקות בין הקיץ לחורף. כל זוג שכבות (בהירה + כהה) מייצג שנה.

בקיבוץ מדעי שנעשה בשנת 2010 בקרקעית ים המלח גילתה קבוצת המחקר עדויות לירידת מפלס ים המלח עד למצב של כמעט התייבשות בתנאי בצורת חמורה במיוחד אשר התרחשה באזור לפני עשרת אלפים שנה וכן לפני יותר ממאה אלף שנים. החוקרים מעריכים שניתן לראות בבצורות אלו תמרוז אזהרה למה שיתרחש באזור אם יתממשו התחזיות של שינויי אקלים.

מערת שורק, מעבר ליופי

להתחממות הגלובלית הנמדדת זה עשורים יש מרכיב טבעי ומרכיב אנושי, וחשוב מאוד להבדיל ביניהם על מנת לקבל החלטות מושכלות לעתיד. ד"ר מירה בר-מטוס וד"ר אבנר אילון חוקרים את התנאים המובילים ליצירת משקעי מערות (נטיפים וזקיפים) ומשקעים קלציטים אחרים, לדוגמה, קלציט³ השוקע על פריטים ארכיאולוגיים כמו אבני יד פרהיסטוריות. החוקרים משתמשים באיזוטופים רדיואקטיביים לתארוך המשקעים ובאיזוטופים יציבים לשחזור תנאי האקלים והסביבה בעבר. אפשר להתייחס למשקעי מערות שעמם נמנים נטיפים וזקיפים כאל ארכיב אקלימי. למשקעים מבנה פנימי הדומה לטבעות גידול בעצים, וכל טבעת משקפת את תנאי הסביבה שבהם היא נוצרה לרבות הטמפרטורה, הרכב, כמות המשקעים וסוג הצמחייה (עשבונית, מדברית או עזית). טבעות הגידול מורכבות לרוב מהמינרל קלציט. כדי לקבוע את הגיל של כל טבעת גידול,



תמונה 5: פרופ' מוטי שטיין ומאחוריו אסדת הקידוח המדעי העמוק בים המלח. הקידוח שהתבצע במסגרת ארגון הגיע לעומק של 455 מטר מתחת לקרקעית האגם, בעומק מים של 300 מטר. מהקידוח הוצאו סדימנטים ששקעו באגמי ים המלח במשך 220 אלפי השנים האחרונות.

נבדקו יחסי האיזוטופים של אורניום (^{234}U) ולתוריום (^{230}Th) החיוניים לחישוב הגיל (בשיטה זו משתמשים גם לתארוך הלמינות הארגוניטיות בתצורת הליסן). מדידת האיזוטופים היציבים של פחמן ושל חמצן מאפשרת ללמוד על סוג הצמחייה בקרקע שדרכה חלחלה טיפת המים, טמפרטורת המערה, מקורות הגשם וכמותם. לדוגמה, לפי ההרכב האיזוטופי של פחמן וחמצן בטבעות גידול שגילן 120 אלף שנה בנטיפים ממערת שורק, התגלה כי באזורנו, כולל הנגב, הייתה כמות המשקעים המשוערת אז כפולה מכמות המשקעים השנתית הממוצעת היום. מצב דומה היה לפני 54 אלף שנה. בתקופות אלו תועדה נדידת האדם מאפריקה, והממצאים תואמים גם את ממצאי האדם הקדמון במערות בכרמל ובגליל. השינויים האיזוטופיים שתועדו במשקעי המערות מאפשרים לעקוב גם אחר אירועים בהיסטוריה האנושית ברמת דיוק של מספר עשרות שנים. דוגמה יפה לכך היא השינוי האקלימי שהתרחש לפני כ-4200 שנה, כאשר ההרכב האיזוטופי בנטיפים מתקופה זו מצביע על מגמה ברורה של התייבשות. שינוי זה מקביל להתמוטטות האימפריה האכדית והממלכה המצרית.

כיום מתבצעים במכון הגיאולוגי מחקרים הבודקים כיצד השינויים בכמויות המשקעים בשנים האחרונות מתבטאים במשקעי מערות הנוצרים כיום. תוצאות ראשוניות מצביעות על כך שקיימת מחזוריות של תקופות לחות ויבשות באזורנו

CaCO_3 ³

החל משנות החמישים, ועל פי מחזוריות זו יתכן והתקופה השחונה הנוכחית תתחלף בתקופה רטובה יותר בעשור הבא. יש לציין כי חיזוי זה נסמך רק על המחזוריות הטבעית בלי להביא בחשבון את השפעת האדם.

להבחין בין זיוף לאמת

לחקר תהליכים טבעיים של שקיעת קלציט יש גם תרומה חשובה לזיהוי זיוף עתיקות. לפני למעלה מעשור התפרסמו מספר פריטים ארכיאולוגיים שהיו חשודים כמזויפים: ארון קבורה שיוחס לאחיו של ישו, לוח יואש שסיפר על בדק הבית של בית המקדש הראשון ועוד. חדשות אלה הסעירו את העולם הארכיאולוגי בארץ ובחו"ל. ד"ר אבנר אילון וד"ר מירה בר-מטיוס מדדו את הרכבו האיזוטופי של החמצן בקרום (הפטינה) המצפה את הפריטים האלו והשוו אותו להרכב האיזוטופי של פטינה שנוצרה בתנאים טבעיים (טמפרטורה והרכב הגשמים) בהרי יהודה במהלך 3000 השנים האחרונות. נמצא שהרכב הפטינה בפריטים הארכיאולוגיים חריג מההרכב הצפוי, ולכן קבעו החוקרים חד-משמעית שהפטינה לא נוצרה בתנאים טבעיים אלא בטמפרטורה גבוהה בהרבה (לפחות ב-40 עד 50°C), עובדה המטילה ספק כבד במקורותם של פריטים אלה.

זיהוי ומעקב אחר זיהומים תעשייתיים

זיהום הקרקעות והאקוויפרים החל עוד בראשית המפעל הציוני בארץ, ולצערנו, הוא נמשך עד היום. ההתיישבות הציונית לוותה בייבוש ביצות השרון והחולה ובהפיכתן לשדות חקלאיים, בהקמת מפעלים תעשייתיים ומפעלי נשק, כרייה ועוד. בחלק זה נתוודע לאופן המעקב אחר המזהמים השונים וכן נציג דרכים אפשריות לטיפול בבעיה.

דלק ותעשייה

ד"ר פאינה גלמן מובילה תחום שבו נעזרים באיזוטופים יציבים להבנת תהליכי פירוק של מזהמים אורגניים במי התהום. במסגרת המחקרים האלו פותחו במכון הגיאולוגי שיטות לשימוש באיזוטופים של הלוגנים, כמו ברום וכלור, למעקב אחרי תהליכי פירוק בקטריאלי. עם פיתוח התעשייה בארץ, זוהמו קרקעות רבות בריכוזים גבוהים של מזהמים אורגניים המוצאים את דרכם לתת-הקרקע ומשם עלולים להגיע למי השתייה. כדי לטפל במזהמים השונים, צריך להבין בין היתר את דרך פירוקם בתת-הקרקע. אחד המזהמים הנפוצים ביותר הוא דלק שדלף ממכלים בתחנות הדלק אל מי התהום באתרי תחנות הדלק, ומתפשט משם הלאה. שני מרכיבים בדלק: מתיל-טרך-בוטיל-אתר ובנזן נחשבים מסוכנים ביותר ומוגדרים כמסרטנים פוטנציאליים. החוקרים בדקו את קצב הפירוק של חומרים אלה בעזרת איזוטופים של פחמן, שכן קצב הפירוק קובע את זמן השהות של המזהם בתת-הקרקע ואת פוטנציאל הסיכון שלו. התברר כי בתנאים ארוביים הפירוק הבקטריאלי מהיר יותר מאשר בתנאים אנארוביים, ומכאן שאפשר לטפל בזיהום על ידי החדרת חמצן. תוצאות דומות התקבלו לגבי פירוק של תרכובות ברום-אורגניות המצויות בשימוש נרחב בתעשייה כחומרים מעכבי בעירה, והנמצאות בריכוזים גבוהים במי התהום ברמת חובב: ניסוי מעבדה הראו שקיים פוטנציאל פירוק בקטריאלי בתנאים ארוביים, ולכן ייתכן שדרך הטיפול היא בהחדרת חמצן למי התהום באתר.

נסיעה לא פשוטה

עד המהפכה התעשייתית שבה החלו בשריפת פחם, לא הייתה עופרת באטמוספירה אלא כחלק מאבק טבעי. אולם עד לאחרונה (2005) השתמשו בעופרת כתוסף לדלק, ובמשך שנים רבות השתחררה כמות עצומה של עופרת לאטמוספירה ששקעה מיד כאבק ו"ציפתה" את פני כדור הארץ. למרות שהשימוש בעופרת כתוסף פסק, הרי שהאבק סביבנו ובעולם כולו מהווה היום מקור זיהום משני לעופרת, וניתן למצוא אותה באבק דרכים, בסחף בשולי דרכים, בקרקעית הים, באבק הביתי ועוד. ניטור העופרת חשוב לקביעת מנגנוני הסעה והערכת פוטנציאל הזיהום שלה. החוקרות ד"ר יהודית הרלבן וד"ר נדיה טייטש עקבו אחר נוכחות העופרת באבק בערים (חיפה וירושלים) באמצעות איזוטופים של עופרת. נמצא כי העופרת מצויה ברחובות הערים בריכוזים גבוהים כמו לפני כ-20 שנה, ומקורה בפני קרקע מזהמים המורחפים עם הרוח.

בדוגמה אחרת עקבו החוקרות ד"ר יהודית הרלבן וד"ר אהובה אלמוגי-לבין אחר בוצת השפועל של בריכות השפד"ן בים התיכון. השפד"ן מטפל בביוב של כמיליון וחצי תושבי גוש דן רבתי, ובמהלך הטיפול בשפכים נוצרת גם בוצה שעד לאחרונה פונתה בצינור שאורכו כ-5 ק"מ אל הים. ניטור מקיף של המכון לחקר ימים ואגמים שבחיפה בודק את הזיהום הפוטנציאלי של קרקעית הים התיכון במתכות שמקורן בבוצה. המכון הגיאולוגי ביצע מעקב אחר הבוצה באמצעות איזוטופים של עופרת ומצא כי העופרת מורחפת מיד על ידי הגלים ומוסעת צפונה עם הזרמים. עוד התברר שלמרות שריכוז המתכות אבץ, עופרת ונחושת גבוה פי 25 מזה הנמצא באופן טבעי בקרקעית הים, משטר הסופות המרחיף את הבוצה גורם לריכוזי המתכות, ובכללן העופרת, להיות נמוכים מהתקן.

תם אך לא נשלם, המחקרים הגיאוכימיים במכון מתבצעים במסגרת פרויקטים נושאים, קצרים וארוכי טווח, בהתאם לצרכים הממלכתיים והציבוריים. מומלץ לגשת ולהתעדכן באתר המכון הגיאולוגי www.gsi.gov.il.

מדע והנדסת קורוזיה בישראל

ד"ר אליק גרויסמן¹

קורוזיה היא קשר הדדי בין מתכת לסביבה שבה היא נמצאת, קשר הגורם להתדרדרות בתכונות הפונקציונליות של ציוד העשוי ממתכת. נזקי הקורוזיה עולים כסף רב - כ-3.5% מהתמ"ג וקשורים לכל תחום בחיינו: כל תעשייה, ארגון, מוסד ובית משתמשים בציוד ובמבנים מתכתיים נתקלים בבעיות קורוזיה.

התעשייה הכימית סובלת במיוחד מקורוזיה בגלל תהליכים כימיים ופיזיקליים המתרחשים במגע עם ציוד מתכתי ובנוכחות והשתתפות של תרכובות אגרסיביות שונות, בתנאים קשים מאוד של טמפרטורות ולחצים גבוהים, במהירויות זרימה גבוהות וברתיחה ועיבוי של מים ושל ממסים אחרים. לכן התפתחות של תעשיות, של טכנולוגיות ושימוש בחומרים חדשים אינם יכולים להתרחש ללא טיפוח של מדע והנדסת קורוזיה.

הקורוזיה מתרחשת באופן ספונטני על פי החוק השני של התרמודינמיקה. לשמחתנו, מנגנוני הקורוזיה ידועים, ואנו מסוגלים לשלוט בהם, לבצע בקרה ובהרבה מן המקרים אף למנוע את הקורוזיה. היום אנו עדים ל**ניהול קורוזיה** (corrosion management) אשר כולל מגוון פעולות לתכנון, מניעה, בקרה, מעקב וניטור של קורוזיה בציוד ובמבנים תעשייתיים, וכן לשינוי במודעות לנושא.

דוגמה לשינוי במודעות לנושא הקורוזיה היא סיפורו של פרופ' יוסף יהלום אשר סיים בשנות השישים דוקטורט בנושא קורוזיה באוניברסיטת קמברידג' באנגליה, חזר לטכניון וביקש ללמד קורס בנושא "קורוזיה". "בשעה הראשונה אתה תספר על קורוזיה. מה תעשה בשעה השנייה?" נשאל פרופ' יהלום. מאז, כמובן, המודעות לנושא השתנתה. יוסף יהלום ביצע מחקרים בתחומים מגוונים של מדע והנדסת קורוזיה [1-5] והעמיד דור חדש של מדענים ומהנדסים בתחום כמו יוסי זהבי [6], לאה גל-אור [7-9] ומיכאל שור [10-12].

השיטות העיקריות לשליטה, בקרה ומניעה של קורוזיה הן תכנון הנדסי יעיל, שימוש בחומרים עמידים או תואמים לסביבה קורוזיבית, שימוש בציפויים, שיטות אלקטרוכימיות, שינוי תנאי הסביבה ושיטות טכנולוגיות שונות.

מחקרים בנושא קורוזיה קשורים לתחומים רבים, כמו מעקב אחר הקורוזיה, הגנה על שתלים דנטליים והתקנים רפואיים אחרים המוכנסים לגוף, תעשיית החלל, הגנה על ציוד בסביבה ימית, הגנה על צנרת מים, נפט ודלק, ועוד.

נושא הקורוזיה בישראל תופס מקום חשוב בתעשייה ובמחקר האקדמי, והמאמץ המחקרי בנושא החל עוד לפני קום המדינה. הרשימה הביבליוגרפית המצומצמת, אך הארוכה, המצורפת למאמר זה היא עדות לכך.

מחקרים רבים בארץ בנושא הקורוזיה קשורים לתעשייה בארץ. נביא כאן מספר קטן של דוגמאות למחקרים כאלה וכן למוצרים שפותחו בתעשייה ונועדו להגן בפני קורוזיה.

- מכון המתכות הישראלי בטכניון שנוסד ב-1963 חקר וקבע את מנגנוני הקורוזיה של מתכות בברום נוזלי עבור מפעלי הברום בים המלח. משנת 2001 התפתחו מחקרים במדע הקורוזיה בטכניון בזכותו של פרופ' יאיר עין-אלי.
- אדוארד קוגן ממעבדת הקורוזיה בתמ"י (תעשיות מחצבי ישראל) של חברת כימיקליים לישראל בע"מ, פיתח פלדה בלתי מחלידה ייחודית, המשמשת לבניית משאבות לתהליך הייצור של חומצה זרחית. כמו כן מחקרים על קורוזיה במי ים המלח ועל שיטות לקביעת קצב קורוזיה נעשו בתמ"י ע"י אריקה ויינטראוב, מיכאל שור [13] וד"ר יוסף ריסקין [14].
- פרופ' אליעזר גלעד מאוניברסיטת תל אביב ביצע עבודות בתחום האלקטרוכימיה שנתנו בסיס להנדסת קורוזיה וליישום שיטות מדידות של קצבי קורוזיה והגנה בפני קורוזיה [15-25]. הוא פיתח בין השאר אמבטים לציפוי פלדות, מסגים של טונגסטן (W) ושל רניום (Re) עם יסודות מתכתיים אחרים כגון ניקל (Ni) וקובלט (Co). ציפויים אלה עשויים לאפשר פריצות דרך טכנולוגיות בתעשיית התעופה והחלל (לדוגמה, העלאת טמפרטורת העבודה של מנועי סילון), וכן בתעשיית המיקרואלקטרוניקה (לדוגמה, שכבות דקות חוסמות בין מצע הסיליקון לשכבת הנחושת).
- פרופ' נעם אליעז, אף הוא מאוניברסיטת תל אביב, ייסד בשנת 2001 את המעבדה לקורוזיה וביו-חומרים [26]. מחקריו הם בשימוש מערכת הביטחון ויצרניות השתלים. בין השאר פיתח שיטה לניטור המצב וחקר הכשל במנועי F-16 במטוסים וציפויים של שתלים דנטליים.
- המהנדס גרגורי ניזבסטני, מנהל מחלקת הנדסת קורוזיה וחומרים בחברת מקורות מאז 2002, הכניס לשימוש תערובות מלט המיועדות להשלמת טיח באזורי ריתוך ובהסתעפויות T של צנרת פלדה למניעת קורוזיה באזורים אלה, וכן הנהיג בדיקות איכות המאפשרות לאתר פגמים בעטיפה חיצונית של צינורות הפלדה התת-קרקעיים.

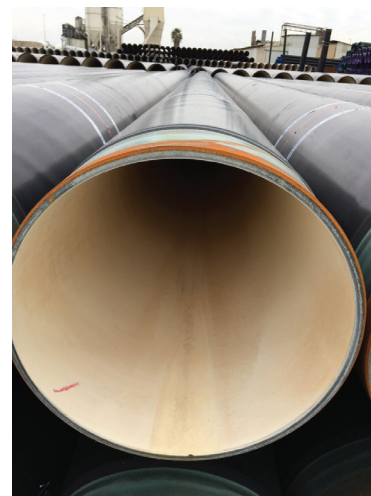
¹ alecgroysman@gmail.com
Website: www.alecgroysman.com

- בקבוצתו של פרופ' דני מנדלר באוניברסיטה העברית נחקרו תהליכי קורוזיה ומניעתם בעזרת הגנה על ידי שכבות סול-ג'ל [27-30]. אלה הם ציפויים דקים שעוביים מעשרות ננומטרים ועד מיקרונים המשמשים כציפויי הגנה לעדשות, מסכי טלוויזיה, סיבים אופטיים, להגנה בפני שיתוך של מתכות ועוד. ב-2017 החלה המעבדה לעסוק במניעת שיתוך על פני מעגלים מודפסים של נחושת [31]. השימוש באלקטרוניקה מודפסת (printed electronics) הולך וגדל בהדפסות על פלסטיק כמו כרטיסי אשראי, אנטנות וכד'. המוליכים עשויים בדרך כלל מנחושת שנוטה להתחמצן, ובמעבדה הוכח שניתן למנוע את השיתוך של פסי הנחושת בעזרת ציפוי בשכבה הידרופובית של סול-ג'ל.
- בתעשיית עיבוד הנפט חומצות נפתניות המצויות בנפט גולמי, גורמות לקורוזיה חמורה של ציוד מפלדה רכה בטמפרטורות מעל 200°C . במו"פ של בתי זיקוק חיפה הפרידו חומצות נפתניות שנמצאות בנפט גולמי לפרקציות, ואז התברר שחומצות נפתניות עם מסה מולקולרית גבוהה מגינות על פלדה רכה מקורוזיה על ידי חומצות נפתניות עם מסה מולקולרית נמוכה. מחקר זה מופיע בפטנט ובפרסומים [32-34].
- רוב שיטות ההגנה בפני קורוזיה מבוססות על ציפויים שונים. חברת "טמבור" פיתחה במהלך השנים צבעים רבים לשימושים שונים: צביעה של אניות בצי הסוחר, הגנת מתכות בפני חומצות ובסיסים, הגנה על צינורות תת-קרקעיים והגנה של ציוד בטחוני ממתכת.
- שתי חברות ליצירת צינורות, "צינורות המזרח התיכון" ו"אברות תעשיות" החלו בשנת 1996 לייצר צינורות המיועדים להובלת מי שתייה, מי שופכין, מי ים, דלקים, גז טבעי וכימיקלים שונים עם עטיפה תלת-שכבתית המגינה עליהם מפני קורוזיה. הצינורות מיועדים לשימוש תת-קרקעי ותת-ימי, והציפוי המגן עליהם עשוי מאפוקסי, דבק ושכבת פוליאיתילן או פוליפרופילן [35].



באדיבות ד"ר אליק גרויסמן

מכל עילי לאחסון דלקים. מערכת הצבעים העמידה בפני אטמוספירה תעשייתית היא של חברת "טמבור"



באדיבות חברת אברות

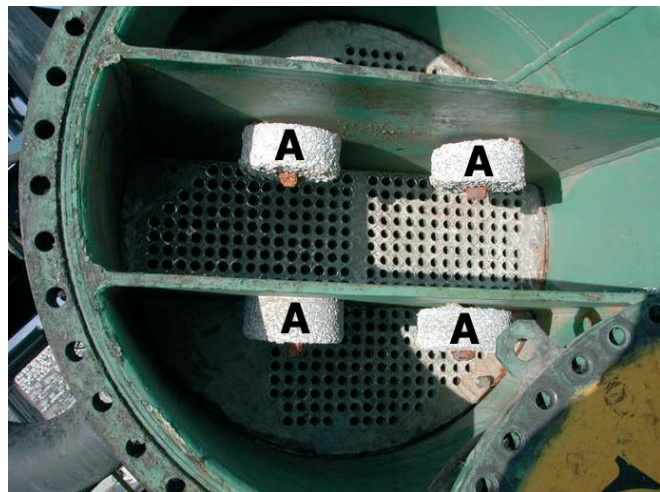
עטיפה תלת-שכבתית על צינורות תת-קרקעיים

קורוזיה קשורה גם לבטיחות ולאיכות הסביבה. קורוזיה גורמת לאסונות לא צפויים כמו פיצוצים, שריפות, דליפות של חומרים רעילים, נזקים כבדים לסביבה, ואף מוות של בני אדם. לכן חשוב לדעת בזמן אמת מה מצבו של ציוד מתכתי מבחינת ההתפתחות של קורוזיה, האגרסיביות של הסביבה שבה נמצא הציוד, ויעילות השיטות שנגקטו למניעת קורוזיה והגנה מפניה.

מחקרים בנושא הקורוזיה אף עוזרים לשמירה על איכות הסביבה, והנה שתי דוגמאות:

- בחברת החשמל משתמשים במים לייצור קיטור. מים אלה צריכים להיות טהורים כדי למנוע יצירת תוצרי שיתוך שעלולים לגרום נזק לטורבינה מכיוון שקצב השיתוך בדוד הקיטור מושפע רבות הן מה-pH והן מנוכחות חמצן מומס במים, מקובל להוסיף למים הידרזין, N_2H_4 , שתפקידו ללכוד את החמצן המומס על פי הניסוח: $\text{N}_2\text{H}_{4(aq)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow \text{N}_{2(g)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(l)}$. מכיוון שהידרזין הוא חומר רעיל, החלה חברת החשמל להשתמש בשיטה מהפכנית להגנה על הדוודים והצינורות שפותחה ברוסיה ובגרמניה. השיטה מבוססת על הזרקת חמצן אל המים המוזנים לדוודים, כדי לייצר שכבה פסיבית של תחמוצות ברזל על פני השטח הפנימיים של הצינורות והדוודים. שיטה "ירוקה" זו מונעת את הצורך בהוספת הידרזין למים.
- למי הקירור בתעשייה מוסיפים מעכבי שיתוך (אינהיביטורים). בשנות ה-80 הוחלפו יוני הכרומט הרעילים, CrO_4^{2-} , ששימשו כמעכבי שיתוך במערכות של מי הקירור, במעכבי שיתוך ידידותיים יותר לאדם ולסביבה [36].

רוב אנשים רואים בקורוזיה תופעה מזיקה - תהליך דגדגציה של חומרים שאינו נעים לעין. לא נעים להסתכל על מבנים חלודים, עם סדקים וחורים, לסבול מהפסקת מים עקב חורים בצנרת מי השתייה או לראות כלים, מכשירים ותכשיטי כסף שהשחירו. אך יש לזכור כי קיימים הרבה תהליכי קורוזיה (כעשרים במספר) שמביאים תועלת [37]. אתן מספר דוגמאות:



באדיבות ד"ר אליק גרויסמן

אנודות מקרבות מאלומיניום (מסומנות באות A) המורכבות בתוך מחליף חום המצופה מבפנים בצבע אפוקסי ירוק. במחליף החום עוברים מי קירור.

- קשה לתאר את העולם שלנו ללא שעונים, רכבים וציוד חשמלי אחר. מכשירים אלה פועלים בעזרת סוללות ומצברים, שבתוכם מתרחשים תהליכי קורוזיה של מתכת אחת שנמצאת באלקטרוליט. התהליך המתרחש בסוללות הוא למעשה קורוזיה גלוואנית מועילה שמביאה להיווצרות זרם חשמלי.

- דוגמה אחרת של קורוזיה גלוואנית מועילה היא הגנה קתודית שפועלת בזכותה של הקורוזיה - מחברים למתכת שעליה רוצים להגן מתכת אחרת שהיא מחזרת טובה יותר, ולכן עוברת קורוזיה במקום המתכת שעליה רוצים להגן. המתכת שעוברת קורוזיה נקראת "אנודה מקרבה".

- קורוזיה בקנה מידה קטן של כלים מכסף במים גורמת להופעת קטיוני כסף אשר מחטאים את המים מחיידקים. קורוזיה של נחושת גורמת אף היא לחיטוי מים. אנשים השתמשו בתופעת קורוזיה מועילה זו במשך כ-2,000 שנה ללא ידיע של עקרונות הקורוזיה.

- פסיבציה היא תהליך שבו הופכים את החומר לפחות פעיל, פחות מושפע מהסביבה ופחות מועד לתהליך של קורוזיה. פסיבציה מכוונת של אלומיניום, טיטניום, פלדה בלתי מחלידה ועוד מתכות, יוצרת בתהליך קורוזיה תחמוצות המכסות את פני השטח ומגנות על המתכת.

ארגונים, כנסים, ספרים ופרסומים של ישראלים בתחום הקורוזיה

במהלך 30 השנה האחרונות נעשו פעולות רבות על מנת להגביר את המודעות של אנשי המקצוע העוסקים בתחום הקורוזיה ומניעתה, בתעשייה, באקדמיה וגם בקרב הקהל הרחב.

הפעולות נעשו במסגרת הפורום לקורוזיה הפועל בלשכת המהנדסים על ידי ארגון כנסים וקורסים, ובמסגרת פרטית על ידי העברת הרצאות מוזמנות בתחום הקורוזיה למהנדסים ולמהנדסות העובדים בתעשייה הכימית.

מיכאל שור ערך כתב העת הבינלאומי Corrosion Reviews מ-1985 עד ל-2004, ופרופ' נעם אליעז היה העורך של כתב עת זה עד 2017.

האגודה הישראלית לציפוי מתכות החלה לפעול מאמצע שנות ה-60, ומתחילת המאה ה-21 החלה לפעול גם העמותה לטכנולוגיות ציפוי וגימור. המהנדס נחום נוה ארגן הרצאות, פרסם ספרים, חוברת בשם "קורוזיה ושימור חומרים" ומאמרים רבים בנושאי קורוזיה לקהל רחב של מהנדסים וטכנאים בתעשייה [38].

המהנדס רפאל סרוסי ארגן ב-1992 את הפורום הישראלי לקורוזיה באגודת מהנדסי הכימיה והכימאים בלשכת המהנדסים. הפורום מאגד מהנדסים, מדענים, טכנאים ויועצים פרטיים הפעילים בתחום הקורוזיה ומארגן כל שנתיים כנס ברמה בינלאומית בנושא הקורוזיה. הכנס הבא, ה-13 במספר, יתקיים בשמונה בנובמבר 2018 בכפר המכבייה ברמת גן [39].

ספרים בנושא הקורוזיה שקיבלו הכרה בינלאומית ויצאו בהוצאות לאור יוקרתיות נכתבו (באנגלית) על ידי מומחים ישראלים כמו יוסף ריסקין [40], נעם אליעז ואליעזר גלעדי [41, 42], עמנואל גוטמן [43, 44], דוד יצחקי [45] ואליק גרויסמן [37, 46, 47].

במכון הישראלי לאנרגיה ולסביבה יצאו לאור שני ספרים בעברית שבתוכם פרקים על קורוזיה במערכות גז, מערכות נפט ועיבוד נפט [48, 49]. מכון התקנים הישראלי פועל להכנת תקנים בתחום קורוזיה וציפויים בישראל [50].

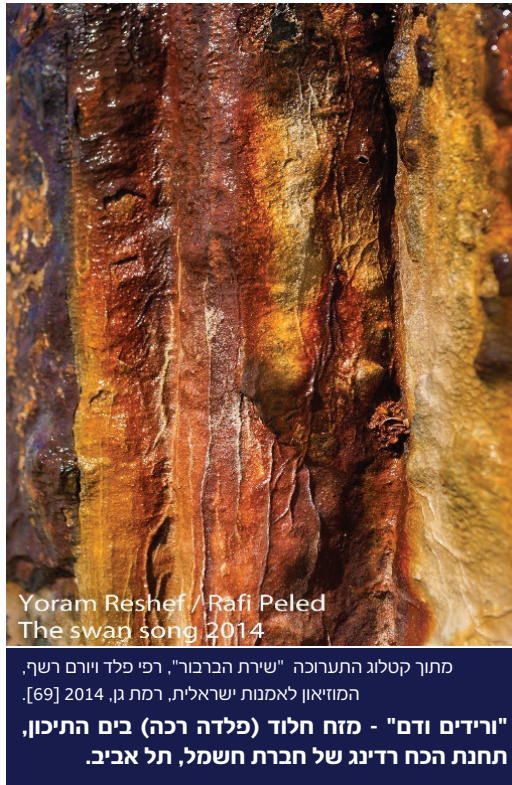
אפשר לומר בחיך שהקורוזיה מעניקה תעסוקה ומזון לאנשים רבים שעוסקים במחקרים בנושא הקורוזיה, מייצרים ציוד ומבנים מתכתיים חדשים להחלפת אלה שעברו שיתוך ומייצרים צבעים וציפויים או אמצעי הגנה אחרים מפני קורוזיה.

בהמשך מאמר זה אספר בקצרה על תחום מחקר מעניין בתחום הקורוזיה מתוך מגוון רב של מחקרים שנעשו ונעשים בנושא בארץ, הלא הוא קורוזיה על ידי חיידקים (קורוזיה מיקרוביאלית), ועל שני מדענים: ד"ר דוד סטרוסבצקי וד"ר ז'אנה סטרוסבצקי שעוסקים במחקר בתחום זה.

בעלייה הגדולה מברה"מ בשנות התשעים של המאה ה-20 הגיעו לארץ מומחים רבים בתחום קורוזיה. מהנדסים ישראלים ארגנו באפריל 1991 כנס בחיפה, וכל אחד מהעולים החדשים שרק הגיע ארצה סיפר על המומחיות שלו בתחום הקורוזיה. ד"ר ז'אנה סטרוסבצקי סיפרה על קורוזיה מיקרוביאלית - או ביוקורוזיה - התחום שבו עסקה במוסקבה. מהנדס ישראלי ותיק בתחום הקורוזיה ניגש אליה בהפסקה ואמר לה: "אני מצטער שבילך. אין חיידקים גורמי קורוזיה בארץ".

ביוקורוזיה היא ענף חדש יחסית בחקר הקורוזיה, החוקר תהליכי קורוזיה שנגרמים בהשפעת מיקרואורגניזמים. חיידיקים כאלה נמצאים בתמיסות שונות בתעשייה הכימית, בתעשיית נפט והפטרוכימית, בתחנות כוח, במערכות להובלת ואחסון נפט, דלקים ומים. דוגמה לחיידיקים כאלה הם חיידיקים מחזורי סולפט, הצורכים נפט ותוצריו כמקור לפחמן וסולפט, ומייצרים חומצה גופרית, H_2S , שגורמת נזקים כבדים לציוד ומבנים מתכתיים. דוגמה נוספת היא חיידיקים מחזורי ברזל או מחמצני ברזל. חיידיקים אלה מנצלים אנרגיה המופקת מחמצון או מחיזור יוני ברזל וגורמים לקורוזיה של הברזל.

מובן שכשד"ר ז'אנה סטרוסבצקי התחילה לעבוד בטכניון ב-1992, התברר שיש הרבה בעיות קורוזיה כאלה "בזכותה" [51-54]. באחד ממחקריה הוכח שאפשר להשתמש בחיידיקים מחזורי ברזל להמסה והסרת חלודה משטח של פלדה רכה [55], ובכך נפתחה דרך חדשה לטיפול בשטחים חלודים של מבני פלדה רכה.



ד"ר דוד סטרוסבצקי שהתחיל אף הוא לעבוד בטכניון ב-1992, עסק בחקר מנגנוני הקורוזיה בסביבת חיידיקים מחזורי סולפט [56-58] וחיידיקי ברזל [51, 52, 58-62]. לדוגמה, הוא חקר את מנגנון השיתוך של סגסוגות מגנזיום [63] וסגסוגות טיטניום (Ti-Ni, Ti-Al-V, וכו') עבור יישומים רפואיים כמו כלי ניתוח ושתיים: צנתרים לקיבה, תוקפנים (stents) לעורקים ועוד [64-68].

ולסיום: קורוזיה באמנות. אמנים רבים מסתכלים על תהליך הקורוזיה כעל מאבק בין המתכת לסביבה - מאבק שיוצר הרס ויפוי בו-זמנית. כאשר מביטים על צבעי החלודה העזים והמורפולוגיה שלה, אפשר לומר כי הברזל סיים בעצם את תפקידו הפונקציונלי והפך לאובייקט אסתטי [37, 69], ומוזאון רמת גן לאמנות ישראלית אף הציג בשנת 2014 תערוכה שלמה של רפי פלד ויורם רשף - "שירת הברבור" - שעוסקת בקורוזיה.

אני מודה לעמיתים ולחברים שתרמו מידע על ההיסטוריה ועל ההתפתחות של נושא הקורוזיה בישראל: שוש תמיר, לאה גל-אור, דוד סטרוסבצקי, פטר לטאי, משה זמיר, מיכאל שור, גרגורי ניזבסטי, משה גרף, נעם אליעז, נחום לזר, קונסטנטין בורודיונסקי, אריה פיסטינר, ענבר דג, אהוד סוצקובר, ויקטור מרקו, אלי אלגרסי, יוסי וויל, אפרת ברייר, ז'אנה סטרוסבצקי ועוד רבים.

לצערי קצרה היריעה במאמר זה מלהזכיר את כל המדענים והמהנדסים הישראלים שפרסמו מאמרים בנושא זה במשך 70 שנה.

אני מודה לרותי שטנגר על עריכת המאמר.

ביבליוגרפיה

1. <https://materials.technion.ac.il/members/joseph-yahalom/>
2. https://www.researchgate.net/scientific-contributions/2060729904_J_Yahalom
3. T.P. Hoar and J. Yahalom, The Initiation of Pores in Anodic Oxide Films Formed on Aluminum in Acid Solutions, J. Electrochem. Soc., 1963, 110 (6), 14.
4. J. Yahalom, L. K. Ives, Electron-microscopical studies of passive films on stainless steels, Proc. USA-Japan seminar on passivity and its breakdown on iron and iron base alloys, Honolulu, March 10-12 1975, pp. 69-71.
5. L. Zanker, J. Yahalom, Galvanic Behaviour of the Fe-Cd couple, Corrosion Science, 1969, 9, p. 157.
6. https://www.researchgate.net/scientific-contributions/76334963_J_Zahavi
7. <https://prabook.com/web/leah.gal-or-schulwolf/555052>
8. L. Gal-Or, J. Yahalom, The Corrosion Mechanism in Low Conductivity Media with Water Traces: Studies in Wet Bromine, Corrosion, 1974;30(11):399-407.
9. C. Feigenbaum, L. Gal-Or, J. Yahalom, Scale Protection Criteria in Natural Waters, Corrosion, 1978, 34(4):133-137.
10. A. Alon, M. Schorr, and A. Vromen, Corrosion resistance of tantalum to mixture of phosphoric acid and potassium chloride at 120oC, Corrosion, 1966, 22(1): 1-6.
11. M. Schorr, Acid penetration into plastics, Materials Protection, 1967, 6(6): 44-45.

12. M. Schorr and J. Yahalom, The significance of the energy of activation for the dissolution reaction of metals in acids, *Corrosion Science*, 1972, Vol. 12, p. 817.
13. J. Charrach, M. Schorr, and E. Weintraub, Corrosion and Scaling Behaviour in Dead Sea Basin Saline Waters, *Corrosion Reviews*, 1990, 9(3-4): 293-352.
14. J. Riskin, G. Genkin, An Empirical Method for the Rapid Estimation of Corrosion Rates, *Chemistry and Chemical Engineering*, Dec. 1993, Tel Aviv, Israel, No 16, pp. 37-39.
15. E. Gileadi, E. Kirowa-Eisner and J. Penciner, *Interfacial Electrochemistry - An Experimental Approach*, Addison-Wesley, MA, 1975, 525 p.
16. E. Gileadi, *Electrode Kinetics - For Chemists, Chemical Engineers and Materials Scientists*, VCH Publishers, Germany (1993) 598 p.
17. E. Gileadi, *Physical Electrochemistry: Fundamentals, Techniques and Applications*, Wiley-VCH, Weinheim (2011) 374 p.
18. E. Gileadi, Radiotracer Studies of Electrosorption of Neutral Molecules. *Proc. 2nd European Corrosion Inhibitors Symposium*, 1966, 543.
19. G.E. Stoner, S. Senti and E. Gileadi, The Effect of NaF and SnF_2 on the Rate of Corrosion of Dental Amalgams. *J. Den. Res.*, 1971, 50, 1647.
20. J. R. Scully, P. J. Moran and E. Gileadi, Electrochemical Measurement of Corrosion Rates in Media of Low Conductivity, *J. Electrochem. Soc.*, 1986, 133, 579.
21. J. N. Murray, P. J. Moran and E. Gileadi, Pseudocapacitance of Corroding Steel Surfaces. *Corrosion Science* 1988, 44, 533.
22. R. Taylor and E. Gileadi, The Physical Interpretation of the Warburg Impedance. *Corrosion*, 1995, 51, 664.
23. C.S. Brossia, E. Gileadi and R. G. Kelly, The Electrochemistry of Fe in Methanolic Solutions and its Relation to the Corrosion Phenomenology. *Corrosion Science*, 1995, 37, 1455.
24. E. Gileadi and E. Kirowa-Eisner, Some Observations Concerning the Tafel Equation and its Relevance to Charge Transfer in Corrosion. *Corr. Sci.*, 2005, 47, 3068.
25. E. Gileadi and N. Eliaz, *Physical Electrochemistry and its Applications*, Wiley-VCH, 2nd Edition, 2018.
26. <http://www.eng.tau.ac.il/~neliaz/>
27. M. Sheffer, A. Groysman, and D. Mandler, Electrodeposition of sol-gel films on Al for corrosion protection. *Corrosion Science*, 2003, 45, 2893-2904.
28. M. Sheffer, A. Groysman, D. Starosvetsky, N. Savchenko, and D. Mandler, Anion embedded sol-gel films on Al for corrosion protection. *Corrosion Science*, 2004, 46, 2975-2985.
29. Y. Tama, and D. Mandler, Corrosion inhibition of magnesium by combined zirconia silica sol-gel films. *Electrochimica Acta*, 2008, 53, 5118-5127.
30. L. Liu and D. Mandler, Electro-assist deposition of binary sol-gel films with graded structure. *Electrochimica Acta*, 2013, 102, 212-218.
31. O. Geuli and D. Mandler, The Synergistic Effect of Benzotriazole and Trimethylsiloxysilicate towards Corrosion Protection of Printed Cu-Based Electronics. Submitted.
32. A. Groysman and J. Penner, Process for Inhibiting Naphthenic Acid Corrosion, WO/2009/053971, 22.10.2007, USA.
33. A. Groysman et al., Low Temperature Naphthenic Acid Corrosion Study, Paper 07569, CORROSION 2007, Nashville, USA, 11-15 March 2007, p. 20.
34. A. Groysman et al., Study of Corrosiveness of Acidic Crude Oil and its Fractions, Paper 05568, CORROSION 2005, Houston, Texas, USA, 2- 7 April 2005, p.13.
35. www.avrot.co.il; www.paladex.com
36. A. Groysman and I. Shvarts, Study of Efficiency of Industrial Corrosion Inhibitors for Cooling Water Systems at Oil Refining Industry, Paper 06097, CORROSION 2006, San Diego, California, USA, 12-16 March 2006, p.10.
37. Alec Groysman, *Corrosion for Everybody*, Springer, Dordrecht, 2010, p. 368.
38. נחום נוה, הגנה בפני קורוזיה, בליה ואש במבנים, הנדסת קורוזיה, חומרים וצינורות בע"מ, 1998.
39. <https://www.aeai.org.il/activity/corrosion-conference/>
40. Joseph Riskin, *Electrocorrosion and Protection of Metals*, Elsevier Science, 2009, p. 264.
41. E. Gileadi and N. Eliaz, *Physical Electrochemistry and its Applications*, Wiley-VCH, 2nd Edition, 2018.

42. Degradation of Implant Materials, Ed. Noam Eliaz, 2012, Springer-Verlag, New York, p. 516.
43. E. M. Gutman, Mechanochemistry of Solid Surfaces. World Scientific, New Jersey, 1994, p. 332.
44. E. M. Gutman, Mechanochemistry of Materials. Cambridge Interscience, Cambridge, 1998, p. 205.
45. David Itzhak, Corrosion and Risk Assessment. From Theory to Practice, 2013.
46. Alec Groysman, Corrosion in Systems for Transportation and Storage of Petroleum Products and Biofuels, Springer, Dordrecht, 2014, p. 297.
47. Alec Groysman, Corrosion Problems and Solutions in Oil Refining and Petrochemical Industry, Springer, Dordrecht, 2017, p. 356.
48. גז טבעי, עורכים משה רבייב וקרן גול, המכון הישראלי לאנרגיה ולסביבה, 2017, עמ' 367-427. אליק גרויסמן, קורוזיה במערכות גז טבעי.
49. נפט ומוצרים, עורך משה רבייב, המכון הישראלי לאנרגיה ולסביבה, 2012, עמ' 247-295. אליק גרויסמן, קורוזיה, במערכות מוצרי נפט.
50. <https://portal.sii.org.il/heb/standardization/tekensearchex.aspx?ft%3D%D7%A7%D7%95%D7%A8%D7%95%D7%96%D7%99%D7%94>
51. J. Starosvetsky, R. Armon, A. Groysman, and D. Starosvetsky, MIC of Storage Tank Aluminum Floating Roofs During Hydrotest, Materials Performance, 2002, 41(4): 50-54.
52. Jeana Starosvetsky, Robert Armon, Alec Groysman, and David Starosvetsky, Fouling of Carbon Steel Heat Exchanger Caused by Iron Bacteria, Materials Performance, 1999, 38(1): 55-61.
53. J. Starosvetsky, D. Starosvetsky, R. Armon, Identification of microbiologically influenced corrosion (MIC) in industrial equipment failures. Israel Engineering Failure Analysis, 2007, 14(8): 1500-1511.
54. J. Starosvetsky, R. Armon, M. Ratzker, S. Levitsky, and E. Tuval, Failure Analysis: Investigation of Severe Corrosion of Aluminum Parts in Stored Diesel Engine Cooling Systems, Materials Performance, 2005, 44(8): 56-65.
55. J. Starosvetsky, R. Kamari, Y. Farber, D. Bilanović, R. Armon, Rust dissolution and removal by iron-reducing bacteria: A potential rehabilitation of rusted equipment, Corrosion Science, 2016, 102, 446-454.
56. D. Starosvetsky, O. Khaselev, J. Starosvetsky, R. Armon, and J. Yahalom. Effect of iron exposure in SRB media on pitting initiation, Corrosion Science, 2000, 42, 345-359.
57. D. Starosvetsky, J. Starosvetsky, R. Armon, and Y. Ein-Eli, A Peculiar Cathodic Process during Iron and Steel Corrosion in Sulfate Reducing Bacteria (SRB) Media, Corrosion Science, 2010, 52, 1536-1540.
58. D. Starosvetsky, O. Khaselev, J. Starosvetsky, J. Yahalom, and R. Armon, The Role of Sulphides in Iron Activation in Chloride Containing Solutions, Electrochemical and Solid State Letters, 1999, 2(6): 265-266.
59. D. Starosvetsky, J. Starosvetsky, R. Armon, and J. Yahalom. Pitting corrosion of carbon steel by iron bacteria. International Biodeterioration and Biodegradation, 2001, 47(4): 79-91.
60. J. Starosvetsky, D. Starosvetsky, M. Danciger, and R. Armon. Adsorption of Flavobacterium and P. fluorescens P17 on different metals. Electrochemical polarization effect. Biofouling, 2001, 17(4): 289-301.
61. J. Starosvetsky, R. Armon, A. Groysman, and D. Starosvetsky, MIC of Storage Tank Aluminum Floating Roofs During Hydrotest, Materials Performance, 2002, 41(4): 50-54.
62. I. Popov, D. Starosvetsky, D. Shechtman, Initial stages of corrosion within Mg-Zn-Y-Zr alloy in 1 g/l NaCl. Journal of Materials Science, 2000, 35, 1-8.
63. D. Starosvetsky, O. Khaselev, and J. Yahalom. Corrosion Behavior of Heat-Treated Intermetallic TiNi in HCl Solutions. Corrosion, 1998, 54(7): 525-530.
64. D. Starosvetsky, A. Shenhar, and I. Gotman, Corrosion Behavior of PIRAC nitrided Ti-6Al-4V surgical alloy. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2001, 12, 1-6.
65. D. Starosvetsky and I. Gotman, Corrosion Behavior of PIRAC nitrided NiTi shape memory surgical alloy. Biomaterials, 2001, 22(13): 1853-1859.
66. D. Starosvetsky and I. Gotman, TiN coating improves the corrosion behavior of a superelastic NiTi surgical alloy. Surface and Coatings Technology, 2001, Vol. 148, Issues 2-3: 268-276.
67. R. Rosenberg, D. Starosvetsky, I. Gotman, Surface modification of a low modulus Ti-Nb alloy for use in medical implants. Journal of Materials Science Letters, 2003, 22(1): 29-32.
68. Reut Godley, David Starosvetsky, Irena Gotman, Bonelike apatite formation on niobium metal treated in aqueous NaOH, Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2004, 15(10): 1073-1077.
69. רפי פלד, יורם רשף, שירת הברבור, המוזאון לאמנות ישראלית, רמת גן, ישראל, 2014.



מַעֲבָדוֹ

פְּרוֹטֵיט

תמונה: Shutterstock, Corepics VOF

קצת אחרת

על חמצן ומעבדן, על חיזור ועל פלמור - כימיה בעברית

רונית גדיש, המזכירה המדעית של האקדמיה ללשון העברית

תחיית העברית בסוף המאה התשע עשרה ובתחילת המאה העשרים נועדה ראש לכול להפוך את העברית - שהייתה עד אז לשון קודש והחלה לשמש לשון ספרות - ללשון חיה אופפת כול, וגם ללשון הלימוד בבתי הספר. אבל מה באשר למקצועות המדעיים? על השאלה אם העברית יכולה לשמש גם ללימודים הגבוהים בתחומי המדע השונים התחולל המאבק שזכה לשם "מלחמת השפות". החלטת "הקורטיוס של הטכניקום" (הוא הטכניון) שעמד לקום בחיפה, החלטה שהתקבלה ב־26 באוקטובר 1913, קבעה עמדה ברורה בשאלה זו: "מדעי הטבע יהיו נלמדים בשפה הגרמנית, כדי ששפה זו, שהיא תרבותית ביותר, תשמש גשר להתפתחות המדע של העת החדשה". ולא זו בלבד, אלא שגם בבית הספר הריאלי - בית ספר תיכון ולא בית ספר גבוה - שחברת "העזרה" התעתדה להקים לצד הטכניון, התכוונו ללמד בגרמנית. החלטה זו היא שהציתה את מלחמת השפות. תלמידים מחו ועזבו את מוסדות "העזרה", מורים התפטרו והקימו בתי ספר עבריים חדשים, והורים העבירו את ילדיהם לבתי ספר אלו. הטענה העיקרית של המוחים הייתה שהשפה המשותפת לכל תלמידי הארץ היא עברית, ועל כן היא השפה שבה "יוכלו להבין הבנה נכונה את אשר יורום" (תזכיר המורים הצעירים לחברי ועד חברת העזרה). ב־22 בפברואר 1914 הפך הקורטיוס את החלטתו, וקבע שלשון ההוראה של לימודי הפיזיקה והמתמטיקה בטכניקום תהיה עברית מן היום הראשון, וכל המורים והפרופסורים שאינם יודעים עברית יהיו מחויבים ללמוד אותה ולהשתלם בה. העברית ניצחה!

ואולם הניצחון במאבק לא היה סוף הדרך, והמלאכה הייתה רבה: למצוא מונחים עבריים מתאימים לתחומי המדע השונים. רבים היו השותפים למלאכה הזאת - מורים, חוקרים, תלמידים, אנשי מעשה, וכמובן ועד הלשון העברית. רשימות של מונחי חשבון ומתמטיקה, פיזיקה וכימיה, גאוגרפיה, רפואה ופסיכולוגיה נדונו ואושרו בוועד הלשון לצד מונחים בתחומי המעשה כמו חשמל וטכניקה, נגרות ובנאות, צילום ודפוס, מטבח והלבשה, בנקאות ומשרד ועוד.

במונחים שנתקבלו באותן הרשימות אפשר להזכיר את סִפְרָה, חֲדִיר, מְקָרָר, מְשָׁקֶע, מוֹלִיכוֹת, וְסֵת, חֶלְקִיק, תְּאֻצָּה, תְּגֻבָּה, חֶמְצָן, תְּרִחִיף ועוד רבים.

לכאורה, פעילות נמרצת זו בתחום המינוח יכולה להיפסק כאשר נעשתה העברית לשון חיה לכל דבר ועניין - עם קום המדינה ובמהלך העשורים הראשונים לקיומה. ואולם הצורך ביצירת מונחים עבריים לא זו בלבד שלא תם אלא הוא הולך וגדל. הסיבה היא הקצב המואץ של ההתפתחות הטכנולוגית הכרוכה גם במילים ובמונחים המגיעים אלינו בשטף בלתי פוסק מן העולם הגדול. וגם במה שנוגע ללשון ההוראה במוסדות להשכלה גבוהה הדברים כיום אינם ברורים וחד־משמעיים. וכמו בראשית המאה העשרים גם כיום נשמעים קולות הקוראים לייסד את הלימוד הגבוה על לשון זרה, הפעם האנגלית, שהפכה בדורותינו לשפה בין־לאומית. לא כאן המקום להתמודד עם סוגיה זו, אך היא קשורה קשר הדוק גם לשאלת המינוח העברי.

בשורות הבאות נספר מעט על המונחים שנקבעו במקצוע הכימיה במהלך השנים.

כימיה, כימיה או כימיה

רשימת המונחים הראשונה שקבע ועד הלשון בתחום הכימיה התפרסמה בשנת תרפ"ח, 1928. אלא שהוכתרת שלה לא הייתה **כימיה** כי אם **כימיה**. קובעי המונחים של אותו הזמן הגו את העיצור הראשון של המילה הלועזית הזאת כמו "כ"ף רפה - על פי ההגייה ברוסית למשל. לפי כללי העברית בראש המילה הכ"ף אמורה להיות דגושה, ולכן כתבו את המילה בחי"ת.

לימים הוחלט שמילים לועזיות שמקורן במילים יווניות בעלות האות היוונית χ (חי) ייכתבו באות כ"ף, כגון פֶּלֶסְטֶרֶל, אֶרְכֵּאוֹלוֹגְיָה. ועד הלשון חזר בו אפוא מן הכתיב 'כימיה', וברשימה הבאה של מונחים בתחום שפורסמה בשנת תרצ"ט, 1939, מתנוססת בכותרת המילה כימיה.

ומה דינה של הכ"ף הזאת? בלשונות אירופה יש ההוגים אותה כמו "כ"ף רפה ויש ההוגים אותה כמו "כ"ף דגושה (באנגלית למשל). לכן מי שרוצה יכול להגות אותה לפי כללי העברית: כימיה, הכימיה, אבל בכימיה. ומי שרוצה יכול להגות אותה תמיד ככ"ף רפה.

בהערת אגב נזכיר כאן כי המילה הבין־לאומית כימיה מקורה בלשון אחות של העברית - הערבית, ולא כאן המקום לספר על גלגוליה.

שמות היסודות

שורה נכבדת של שמות היסודות זכתה בחלופות עבריות - רובן בסיומת 'ן. מי הוא זה שקשר בין היסודות הכימיים ובין הסיומת הזאת? מקובל לייחס זאת לאחד מראשוני ועד הלשון העברית, הרב יחיאל מיכל פינס (תר"ד-תרע"ג, 1843-1913), מאנשי העלייה הראשונה. פינס תרגם ספרי מדע וספרי לימוד, ובהם "ספר הכוח" ללימוד מדעי הטבע לילדים, שיצא לראשונה בשנת תרנ"ד (1894). בספר זה שיקע כמה מחידושויו, ובהם גם את שמות היסודות **פחמן ומימן**. הינה רשימת שמות היסודות שפורסמה ב"מְנַחֵם הַחִימָה" של ועד הלשון (תיתן הדעת שכנגד השמות העבריים באים שמות היסודות בגרמנית):

54 זכרונות ועד הלשון	
ב. יסודות.	
Margan מַגְנָן	Wasserstoff מִימָן
Antimon אַנְטִימֹן	Sauerstoff חֲסֵקֶן
Quecksilber כַּסְפִּית	Stickstoff חֲסֵקֶן
Zink אֶזֶן	Kohlenstoff פַּחֲמָן
Zinn כְּדִיל	Silicium צוֹרֶן
Blei עוֹפֶרֶת	Phosphor וֹרְחָן
Jod יוֹד	Aluminium אַלֻמִּינִיּוּם
Fluor פְּלואוֹר	Arsen אַרְסֵן
Brom בְּרוֹם	Natrium נַטְרִיּוֹן
Chlor כְּלוֹר	Kalium אֶשְׁלָן
Eisen כְּרוֹמ	Calcium סִידָן
	Magnesium מַגְנִיּוֹן

באדיבות האקדמיה ללשון העברית

שמות היסודות מזכרונות ועד הלשון העברית, מחברת ו, תרפ"ח (1928), עמ' 54

XVII		שער המבוא.	
Cadmium קַדְמִית	111 70	Calcium סִידָן	39 91
Indium אִינְדִּיּוֹם	113 40	Scandium סְקַנְדִּיּוֹם	43 97
Zinn כְּדִיל	117 35	Titan טִיטָן	50 25
Antimon אַנְטִימֹן	119 60	Vanadin וָנָד	51 10
Jod יוֹד	126 54	Chrom כְּרוֹם	52 45
Tellur טֵלּוּר	127 70	Mangan מַגְנָן	54 80
Caesium צֵזִיּוּם	132 70	Eisen כְּרוֹמ	55 88
Baryum בָּרִיּוּם	136 86	Kobalt קוֹבַלְט	58 65
Lanthan לַנְתָן	138 50	Nickel נִיקֵל	58 68
Cer צֶר	141 20	Kupfer כֹּפֶר	63 18
Didym דִּידִיּוֹם	145	Zink אֶזֶן	64 88
Erbium אֶרְבִּיּוֹם	166	Galium גָּלִיּוּם	69 90
Ytterbium אֵיטֶרְבִּיּוֹם	172 60	Germanium גֶּרְמָנִיּוֹם	72 32
Tantal טַנְטָל	182	Arsen אַרְסֵן	74 90
Wolfram וּלְפֶרָם	183 60	Selen סֵלֵן	78 87
Iridium אִירִידִיּוֹם	192 50	Brom בְּרוֹם	79 76
Platin פְּלַטִּינָה	194 30	Rubidium רֻבִּידִיּוֹם	85 20
Osmium אֹסְמִיּוֹם	195	Strontium סְטְרוֹנְטִיּוֹם	87 30
Gold גוֹלְד	196 20	Yttrium יִטְרִיּוֹם	89 60
Quecksilber כַּסְפִּית	199 80	Zirkonium צִירְקוֹנִיּוֹם	90 40
Thallium טֵלִיּוּם	203 70	Niob נִיּוֹב	93 70
Blei עוֹפֶרֶת	206 39	Molybden מוֹלִיבְדֵן	95 90
Wismuth בִּסְמוּת	207 50	Ruthenium רוּטֶנִּיּוֹם	103 50
Thorium תוֹרִיּוֹם	231 96	Rhodium רוֹדִיּוֹם	104 10
Uran אורָן	239 80	Palladium פָּלָדִיּוֹם	106 20
		Silber כֶּסֶף	107 66

באדיבות הספרייה הלאומית, ירושלים

שמות היסודות מ'ספר הכח' של יחיאל מיכל פינס, מהדורת תרנ"ז (1897)

כלי המעבדה

קובעי המונחים עשו כל מאמץ למצוא חלופות עבריות קיימות למונחי הכימיה השונים. כך למשל כלי המדידה **משורה** מקורו בתנ"ך: "לא תעשו עֹל בַּמִּשְׁפָּט בַּמִּדָּה בַּמִּשְׁקָל וּבַמִּשְׁרָה" (ויקרא יט, לה). גם הצמד **עלי ומכתש** מקורו בתנ"ך - בספר משלי: "אם תכתוש את האויל בַּמִּכְתֵּשׁ בְּתוֹךְ הָרִיפּוֹת [גרעיני חיטה] בַּעֲלִי, לא תסור מֵעָלְיוֹ אֶלְתָּו" (כז, כב). לעומתם **המשכך** מקורו בספרות חז"ל, והוא נזכר בין היתר במימרה יפה במשנה אבות: "ארבע מידות ביושבים לפני חכמים: ספוג משכך ומשמרת ונפה. ספוג - שהוא סופג את הכל; משכך - שהוא מכניס בזו ומוציא בזו; משמרת - שהיא מוציאה את היין וקולטת את השמרים; נפה - שהיא מוציאה את הקמח וקולטת את הסולת" (ה, טו).

המושג **כיל** מסתמך על פועל מקראי ועל בעל מקצוע מימי התלמוד. בספר ישעיהו אנו קוראים: "מִי מִדֵּד בְּשֹׁעָלוֹ מִיָּם וְשִׁמְיָם בְּצֶרֶת תִּכֵּן וְכָל בְּשָׁלֹשׁ עֶפֶר הָאָרֶץ וְשָׁקֶל בְּפֶלֶס הָרִים וְגִבְעוֹת בְּמֶאֱזָנִים" (מ, יב). הפועל כָּל (בקמץ גדול, כמו קם, שם) - משמעו 'מדד' כמו שעולה מהשוואה לפעלים האחרים בפסוק: מִדֵּד, תִּכֵּן וְשָׁקֶל. שְׁלִישׁ הוא מידת נפח קדומה. בספרות חז"ל נזכר בעל המקצוע **כיל** - כנראה מודד קרקעות. בעקבות אלו נקבע ברשימת מונחי הכימיה משנת תרפ"ח הפועל כִּיל (ייתכן שהבחירה בו קשורה גם לקרבת הצליל לפועל הלועזי calibrate).

לעומת המילים הוותיקות האלה יש כמובן גם חידושים. כך היא המילה **מבחינה** שחודשה במשקל מפעלה המציין מכשירים (כמו במילים הוותיקות מְזַמְּרָה, מְחַרְשָׁה, מְגַרְפָּה, והמילים המחודשות מְצַלֶּמָה, מְטַטֶּרָה, מְסַרְגָּה, מְקַדְחָה). כמוה גם המילה **מנפק** (dispenser, התקן להספקת חומר בכמויות קבועות) במשקל מפעל, שהוא המשקל הפורה ביותר לציון מכשירים (החל במילים מקראיות כמו מְכַתֵּשׁ, מְעַדֵּר וּמְרַצֵּעַ, דרך מילים מלשון חז"ל כמו מְסַרְק, מְקַדֵּחַ וּמְשַׁפֵּה, וכלה בשפע מילים חדשות ומתחדשות כמו מְבַרְג, מְטַעֵן, מְסַכֵּת וּמְצַנֵּם). חידוש מתוחכם של יצחק אבינרי הוא **סרפזות** לצנטריפוגה. המילה בנויה מהלחם של שני רכיבים: **סר** (מהמ) **רכז**, ועם השנים הוא תופס אחיזה בלשוננו, וכיום יש גם שם הפעולה סרפזו והפועל סרפז. בדרך ההלחם נוצרה המילה **חמזור** - חֲמָצוֹן + חֲזָר - כבבואה למונח redox באנגלית, שהוא הלחם של המילים reduction-oxidation.

חומרים

המילים **תרכובת** ו**תחמוצת** נתחדשו ככל הנראה גם הן ברשימת המונחים משנת 1928. המשותף להן הוא משקל תפעלית (המוכר לנו ממילים דוגמת תערכת, תקרבת הוותיקות, תנגדת, תסמנת החדשות).

משקל אחר המתחיל בתי"ו נפוץ ביותר בתחום החומרים. זהו משקל תפעיל. סביר שלא הייתה זו בחירה מודעת. מילה הביאה מילה בשיטת "חבר מביא חבר" וכך הצטרפו חברות רבות עד שנוצר מועדון. אולי הייתה המילה הראשונה **תכשיר**, חידוש של אליעזר בן-יהודה. במילוני ועד הלשון המילה תכשיר מתועדת במונחי כימיה משנת תש"א, 1941. הינה כמה מחברות המועדון המוכרות לפי סדר הצטרפותן:

- תחליב (emulsion) - 1928
- תסנין (filtrate) - 1928
- תזקי (distillate) - 1939
- תרחיף (suspension) - 1940
- תצמיד (complex) - 1941
- תרסיס (spray) - 1985

מילים נוספות, מוכרות פחות או יותר, הן תפליט (exudate), תרחיץ (lotion), תמהיל (dilution), תפיזר (dispersion), תשטיף (leachate).

התחיליות בשמות החומרים

אתגר של ממש שהעמיד מקצוע הכימיה לפני קובעי המונחים הוא רכיבים לועזיים דוגמת hypo- per כימיות. לרכיבים אלו, הקרויים בלשון הבלשנים 'תחיליות', לא היו כלל וכלל מקבילות עבריות. הצורך הוליד פתרון בדמות התחיליות **על** ו**תת** שאין לדמיין את העברית בלעדיהן בתחום הכימיה בפרט ובשאר ההקשרים בכלל.

דוגמאות:

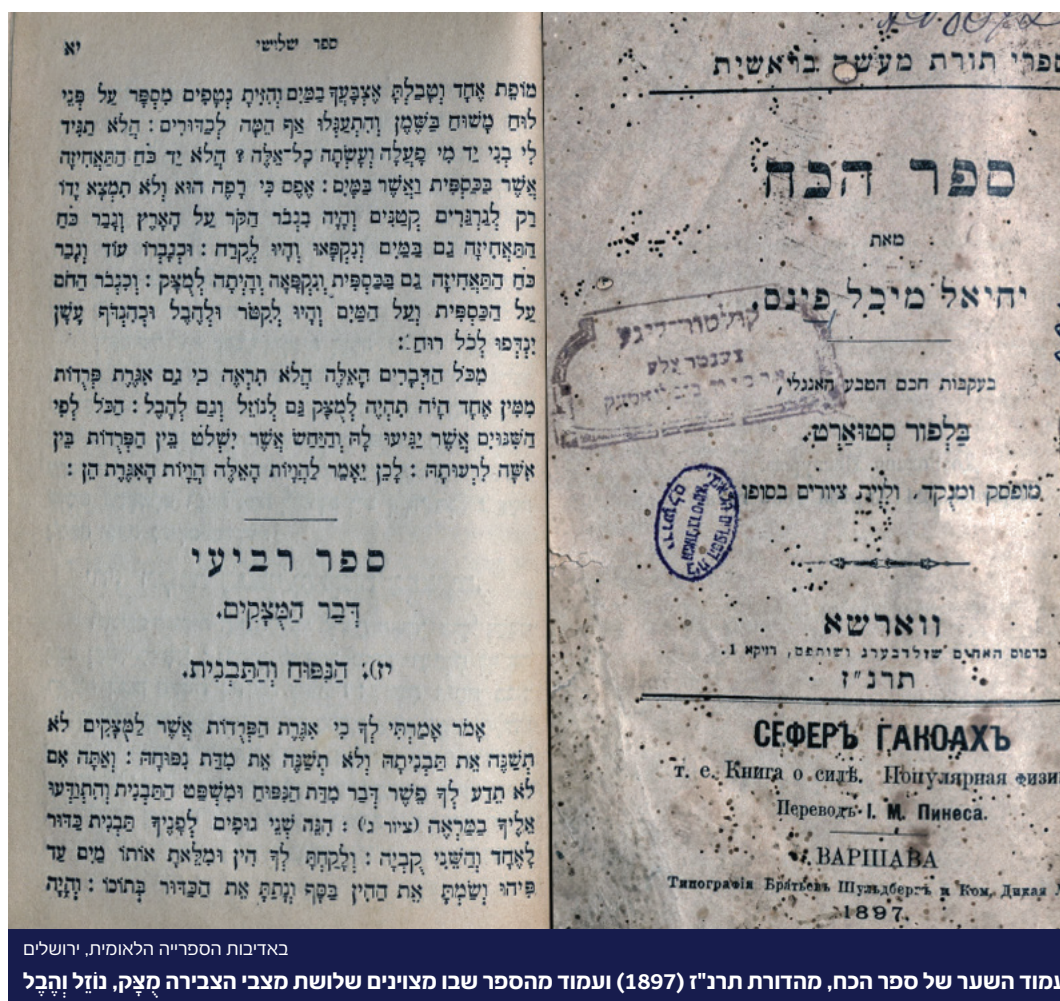
שם החומר בעברית	שם החומר בלועזית	נוסחה
נתרן תת-כלורי	sodium hypochlorite	NaClO
מימן על-חמצני	hydrogen peroxide	H ₂ O ₂

צירוף כמו 'תת-כלורי' או 'עלי-חמצני', שנראה לנו היום פשוט ומובן מאליו, הוא מבנה חדש לחלוטין בעברית. וכך מוסבר העניין ברשימת המונחים משנת 1928:

[...] שמות יתר החמצות נוצרים ע"י הוספת שמות התארים "תחתית" (hypo, sub) ו"עלֵאית" (super, per), ממש כברומית ושאר השפות האירופיות. במקום "תחתית" ו"עלֵאית" אפשר להשתמש בקצור גם ב"תת" וב"על".

מצבי צבירה והמעברים ביניהם

המילים **מוצק** ו**נוזל** הן צורות בינוני: מוצק (כמו מובן, מוכן) מבניין הופעל; נוזל (כמו שומר, זוחל) מבניין קל. כמובן הן אינן חידוש כשהן לעצמן. ככל הנראה הראשון שהשתמש בהן לציון מצבי צבירה הוא י"מ פינס, שכבר הוזכר, ב"ספר הכח". בהמשך אימץ ועד הלשון את המונחים האלה במילוניו. אשר למצב הצבירה השלישי - פינס השתמש במילה העברית העתיקה **הֶבֶל**, ואולם ועד הלשון אימץ את המילה הלועזית 'גז', וייתכן שהקל על קבלת המילה דמיון הצליל והמשמעות לפעלים גז, נגזז.



באדיבות הספרייה הלאומית, ירושלים

עמוד השער של ספר הכח, מהדורת תרנ"ז (1897) ועמוד מהספר שבו מציגים שלושת מצבי הצבירה מָצָק, נוזל וְהֶבֶל

התכה והמסה: השימוש בשני המונחים האלה בעברית הכללית מרגיז לרוב את המורים לכימיה. בלשון המקצועית מבחינים בין שני תהליכים: melting, המתורגם להֶתְקָה, מציין מעבר ממוצק לנוזל באמצעות חימום; dissolving, המתורגם להֶמְסָה, מציין פיזור אחיד של חלקיקים בתוך נוזל. כפי שהסברנו בתשובה בעניין זה באתר האקדמיה, בלשון המקורות השימוש בפעלים הקשורים לפעולות האלה קצת שונה: הִתִּיךְ משמש בעיקר בהקשר של מתכת ודומיה (הפועל הִתִּיךְ והמילה מִתְקַת חולקים את השורש נת"ך), ומציין פעולה יזומה. הפועל קָמַס פירושו המקורי 'נהפך ממוצק לנוזל'. בלשון הכללית בת ימינו נאמר שהקרח נמס, ואילו אנשי מקצוע יקפידו לומר שהקרח ניתך או הותר.

קיפאון: המילה קיפאון מוכרת מן המקרא מפסוק סתום ושם היא רק בגרסת הקרי: "וְהָיָה בַיּוֹם הַהוּא לֹא יִהְיֶה אוֹר יְקָרוֹת יִקְפְּאוּן [קרי: וְקָפְאוּן]" (זכריה יד, ו). ואולם הפועל מוכר למשל מן הפסוק "הָלַל כְּחֶלֶב תְּתִיכֶנִי וְכִגְבָּנָה תִּקְפִּיאֵנִי" (איוב י, י). אם כן ממש כבפסוק באיוב משמעות הפועל היא הפיכה למוצק, ההפך מן התכה. ומכאן קיפאון וקפיאה (freezing) בלשון המקצועית.

המראה (sublimation): הפיכה ממוצק לגז ללא שלב מעבר של נוזל. השימוש במילה המראה הוא תרגום מילולי של המילה הלועזית סובלימציה - העלאה, התעלות, התרוממות.

אידי (vaporization): מן המילה אִיד נוצרו שני פעלים: אִידָה (מן השורש אד"י) ואִיד (מן השורש או"ד/א"י"ד), ובהתאמה שמות פעולה: אִידוּ וְהִתְאִידוּת, אִידוּ וְהִתְאִידוּת. הצורות מן השורש אד"י הן המוכרות יותר, והן מציינות לא רק את המעבר מנוזל לגז, אלא גם בישול ירקות באדים וריסוס באמצעות אדים או גז. מעניין לציין שבמונחי ועד הלשון מתועדים מונחים רק מן השורש אד"י. ואולם בשנת תרצ"ה (1935) הביעה הוועדה לתקנת הלשון של ועד הלשון הסתייגות מן הצורות האלה. לדעת הוועדה מן המילה 'אד' השייכת לגזרת ע"ו צריך לגזור מילים מן השורש או"ד - אִיד כמו קִיָּים מן קו"ם, בִּישׁ מן בו"ש. כך או כך לפני שנים אחדות החליטה האקדמיה לייחד את הפועל אִיד ואת שם הפעולה אידוד לתחום ההדברה במשמעות נידוף של אדים או גז.

עיבוי (condensation): המונח עיבוי, המציין מעבר של גז לנוזל, מתקשר למילה המקראית עָב, שמשמעה ענן, למשל בפסוק "עָב קִטְפָה כְּכַף אִישׁ עֹלָה מִיָּם" (מלכים א יח, מד).

במונחי האקדמיה אפשר למצוא גם את המונחים האלה: **גִּיזוּ** (הפיכה לגז; gasification; **מצוק** (הפיכה למוצק; solidification); **נָזַל** (הפיכה לנוזל; liquefaction).

איך מתרגמים את התחילית de?

רכיב השלילה de נפוץ מאוד במינוח הלועזי בכלל, ובתחום הכימיה בפרט. לעברית לא נמצאה מקבילה אוטומטית לתחילית זו. על כן אפשר למצוא דרכים מגוונות למדי לתרגום מונחים בעלי הרכיב הזה. ברובן משמש צירוף שהמילה הראשונה שבו היא שם פעולה המביע שלילה ואילו מצטרפת מילת התוכן. במקרים רבים נבחר שם הפעולה 'נטילה' להבעת השלילה: 'נטילת סידן' (decalcification), 'נטילת יציבות' (destabilization), 'נטילת פלמור' (depolymerization) ועוד. במקרים אחרים נבחרה מילת השלילה ביתר התאמה לפעולה או לעצם הנשלל: 'ביטול פעילות' (deactivation), 'הפחתת ריכוז' (deconcentration), 'שבירת קצף' (defoaming), 'התפרדות לשכבות' (delamination), 'הסרת אבנית' (descaling), 'שחרור חמצן' (deoxidation). ויש שנמצאה מילה עברית אחת תמורת המונח הלועזי המורכב: 'הגרעה' (degradation), 'פירוק' (decomposition), 'התפלה' (demineralization), 'הִצְחָתָה' (dehydration).

שְׁפֻעוֹל (activation)

המילה שפעול מצטרפת לקבוצה גדולה של מילים שחודשו בעברית בת ימינו בהוספת ש"ן לשורש. מניין הש"ן הזאת? העברית שאלה את התבנית בעלת הש"ן מן הארמית, וזו שאלה אותה מן האכדית. באכדית הבניין הגורם (המקביל ל'הפעיל' שלנו) פותח באות ש"ן. כך נוצרו הפעלים העבריים הקדומים שעבד (העביד) ושחרר (גרם לחירות). בעברית החדשה קיבלה התבנית הזאת חיים חדשים, תחילה לציון סוג של גרימה. במשמעות זו חודשה המילה שפעול (סוג של הִפְעָלָה) וכן שינוע (סוג של הנעה: העברת מטען ממקום למקום), שְׁפִירוֹט (סוג של פירוט; elaboration). עם זאת רבים קושרים את הש"ן הזאת לרכיב הלועזי re. קשר זה נוצר דרך חידושים כגון שעתוק, שחזור, שכפול - שבהם משמעות החזרה על הפעולה נובעת מן השורש המקורי: עתק, חזר, כפל. משנוצר הקשר בין שפעל ל-re נפתחה הדרך לחידושים דוגמת שְׁרָתוֹחַ (reboiling), שְׁתָּחֹל (restart).

צורנים

כלי מרכזי ביצירת מונחים עבריים הוא הצורן הסופי - סיומת הנוספת למילה קיימת ויוצרת מילה חדשה. לעברית אוצר צורנים סופיים מצומצם למדי, מקצתם בעלי משמעות מובהקת ומקצתם רבי משמעויות.

צורן סופי שכבר נזכר לעיל הוא ךְ. המשמעות המוכרת שלו היא ציון בעל מקצוע. באמצעותו יצרו את **מַעֲבָדָן** (לבורנט, מן המילה מַעֲבָדָה), כמו מילים רבות אחרות בתחומים מגוונים דוגמת תעשיין, מדען, מסעדן.

צורן סופי אחר הוא יִת. תפקיד אחד שלו הוא נטיית הנקבה: מעבדנית, לבורנטית, כימאית, מדענית, שיננית ועוד. אך הוא משמש גם לגזירת מילים נפרדות. אחת המשמעויות הרגילות שלו היא הקטנה. וכך לצד המילה העתיקה פֶּר נתחדשה המילה **פִּירִית** (crucible), מן המילה 'טיפה' נתחדשה **טיפית** (droplet), מן 'בקבוק' נולדה **בקבוקית** (אמפולה), ומן 'צינור' **צינורית** (tubule).

מילים שנותרו בלועזיות

לצד החלופות העבריות, נותרו מילים רבות בלועזיות, ולעיתים אף לא נעשה כל ניסיון לעברת אותן. נזכיר כאן את המילה כימיה עצמה, וכן אנרגייה, אורגני, אטום, מיקרוסקופ, פולימר, אלקטרוליזה, וכמובן שמות של חומרים רבים, תרכובות וכדומה. חלופות עבריות רבות שנקבעו עדיין מחכות לאנשי המקצוע שיאמצו אותן וישתמשו בהן. כך הן למשל המילים תרופות (אֶרְלֶנְמַאִיר) וקֶרָטב (מן המילה קורטוב, aliquot).

לסיום הינה קטע מתוך תקציר לקראת כנס של האגודה הישראלית להנדסה כימית בשנת 2004, ובו שפע של מונחים לועזיים:

ההרצאה תעסוק בשיטה חדשה ופשוטה לקבלת **חלקיקים מרוכבים** מסוג **פולימר/סיליקה**. השיטה מתבססת על גישת ה**אמולסיה** ובה ה**פאזה** המפוזרת מכילה **פולימר ליניארי הידרופובי**, **מונומר (אלקוקסיסילאן)** ו**ממס הידרופובי**. ה**פאזה** המפוזרת מכילה כהל ובסיס. לאחר יצירת **אמולסיה** יציבה מתחיל ה**מונומר הסילאני להתפלמר בתגובת סול-ג'ל** הופך ל**סיליקה** ולכוד את **שרשרות הפולימר**. **תוצרי התגובה הם חלקיקים מרוכבים** בתחום גדלים **תת-מיקרוני**. (http://www.iiche.org.il/PDF_files/AbstractBook_40.pdf עמ' 3-2)

משלל המילים הלועזיות בקטע הזה יש כמה שנקבעה להן חלופה עברית במונחי האקדמיה לצד אחרות שנותרו בלועזיות:

נשארו בלועזית: **פולימר**; **מונומר**; **הידרופובי**; **סילאן**; **סיליקה** (אבל גם: **תחמצת צפן** או **צורן דו-חמצני**)

מונחים שנקבעו להם חלופות עבריות: **אמולסיה** < **תחליב**; **פאזה** < **מופָּע**; **ליניארי** < **קוֹי**

שימוש במונחים עבריים: **חלקיק** = **particle**; **ממס** = **solvent**; **תגובה** = **reaction**; **שרשרת** = **chain**; **מרכב** = **composite**

בין לועזית לעברית: **התפלמר** = **polymerize** (גזירת שורש ממילה לועזית פולימר, המוכר בעיקר משם הפעולה פִּלְמָר - polymerization).

כל המונחים שנקבעו בוועד הלשון ובאקדמיה מוצגים לרשות אנשי המקצוע והציבור הרחב באתר מונחי האקדמיה (<https://terms.hebrew-academy.org.il>).

שיחה עם פרופ' צבי רפופורט¹ על כימיה בבולים ישראלים

רותי שטנגר

"את הבול הראשון הביאה לי שכנה כשהייתי בן שמונה בערך", מספר פרופ' צבי רפופורט מהאוניברסיטה העברית, חתן פרס ישראל לכימיה לשנת 2006. "זה היה בול גרמני עם חותמת מזמן הטורקים. למרות שלא ידעתי אנגלית, ובבית הספר שבו למדתי הייתי התלמיד הגרוע ביותר לאנגלית שלמד בו אי פעם, הצלחתי לשמחתי לזהות את המילה "Jaffa" בחותמת שעל הבול. בתקופה העותמנית פעלו בארץ במקביל מספר סוכנויות דואר: צרפתית, אוסטרית, גרמנית, איטלקית, רוסית ותורכית, ולכן הבול הגרמני הזה היה בשימוש בארץ. זו הייתה התחלת האוסף שלי, ושנים לאחר מכן אף כתבתי מאמר ל-*Accounts of Chemical Research* בנושא כימיה על בולים".

במאמר זה טבע פרופ' רפופורט מונח חדש: *chemophilately*², לעיסוק בבולים הקשורים בדרך זו או אחרת לכימיה.³

"עם הזמן התחלתי לאסוף בולים על פי נושאים: בולים הקשורים להיסטוריה המשפחתית שלי, בולי הפלמ"ח וכמובן, בולים מכל העולם שעוסקים בכימיה: כימאים שונים, ההיסטוריה של הכימיה, גבישים, חתני פרס נובל לכימיה ועוד. אני מזהה כימאים על פי דמויותיהם על בולים".

בחיפוש בולים הקשורים לכימיה שהונפקו במהלך שבעים שנות המדינה, הדוגמה הראשונה היא הקשר בין עבודתו המדעית של ד"ר חיים ויצמן להצהרת בלפור, קשר המופיע על מספר בולים.



על שני הבולים שהונפקו לציון יובל להצהרת בלפור ב-1967, מופיעים דיוקנאותיהם של ד"ר חיים ויצמן ולורד בלפור. דיוקנאות אלה מופיעים גם בשול הבול שיצא לציון 100 שנה להצהרת בלפור, כשעל הבול עצמו משולבים משפטי מהצהרת בלפור ומשפט ממגילת העצמאות. שני המשפטים רשומים על סמל האינסוף שמבטא את החיבור בין שני המסמכים.⁴

ב-1958 הוקם כור המחקר הגרעיני בנחל שורק, והאירוע מצוין על בול משנת 1960. במאמר, שנכתב בשירות הבולאי עם הוצאת הבול, מצוין כי הקמת הכור פותחת פרק חדש במדע הישראלי וכי הכור ייצר איזוטופים רדיואקטיביים לצרכים רפואיים ותעשייתיים וישמש למטרות מחקר בסיסי ושימושי בכל השטחים של מדעי הטבע.⁵

¹ פרופסור אמריטוס צבי רפופורט מהמכון לכימיה באוניברסיטה העברית בירושלים, מחלוצי תחום הכימיה האורגנית-פיזיקלית בישראל, חתן פרס ישראל לכימיה לשנת 2006 על תרומתו לחקר מנגנונים בכימיה אורגנית. שותף לכתיבתם של כ-55 ספרים ופרסם כ-300 מאמרים.

² Philately = בולאות, איסוף ולימוד בולים.

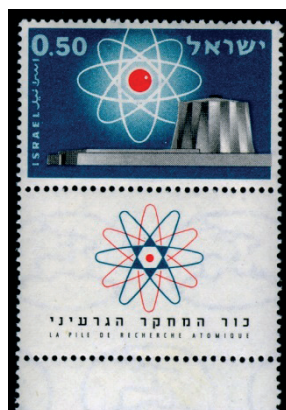
³ Zvi Rappoport, *Chemistry on stamps (chemophilately)*, *Accounts of Chemical Research*, 1992, 25 (1), 24-31.

⁴ [השירות הבולאי: 100 שנה להצהרת בלפור 12 בספטמבר 2017](#).

⁵ [השירות הבולאי: כור האטום](#)



באדיבות השירות הבולאי - דואר ישראל
מפעלי ים המלח, 1965
עיצוב: צבי נרקיס



באדיבות השירות הבולאי - דואר ישראל
הכור הגרעיני, 1960
עיצוב: פאול קור

מפעלי ים המלח הוקמו ב-1929, נהרסו במלחמת העצמאות והוקמו מחדש ב-1952. הבעלות על החברה הועברה אז ממייסדה, משה נובומייסקי, למדינת ישראל, וכדי להגדיל את תפוקת המפעל הוקמו בשנות ה-60 באגן הדרומי של ים המלח בריכות אידיי ענקיות.⁶ סדרת בולים שהונפקה ב-1965 מציגה את בריכות האידיי ואת מתקני המפעל. בבריכות אלה השמש מאדה חלק ממי הים, מלחים שוקעים על קרקעית הבריכות ומועברים למתקני הייצור.

בשנת 1968 הונפקה סדרת בולים שנושאה "דואר אוויר ייצוא". בסדרה עשרה בולים המציגים את ענפי הייצוא דרך האוויר של ישראל דאז: יהלומים מלוטשים, מוצרי טקסטיל, בולי ישראל הנקנים על ידי אספנים ברחבי העולם, חפצי חן, תוצרת חקלאית: אפרוחים, פירות ופרחים, מוצרי אלקטרוניקה, איזוטופים ואופנה. פרופ' ישראל דוסטובסקי, הנשיא החמישי של מכון ויצמן ואחד ממייסדיו, עסק במחקר בסיסי בתחום האיזוטופים. הוא פיתח שיטה להפרדת איזוטופים כבדים של חמצן, הקים במכון ויצמן מתקן להפרדת איזוטופים אלה, וישראל הפכה להיות ספק עולמי של האיזוטופים בשנות השישים. זה היה הייצוא המדעי הראשון של מדינת ישראל.⁷

מספר מדענים מופיעים על בולים ישראלים, וביניהם פרופ' אהרון קציר-קצ'לסקי (1913-1972), אחיו של אפרים קציר, נשיא המדינה הרביעי ובעצמו ביופיזיקאי במכון ויצמן. פרופ' קציר-קצ'לסקי קיבל את הדוקטורט שלו בכימיה באוניברסיטה העברית ושם החל את דרכו האקדמית. ב-1948 הצטרף למכון ויצמן והקים את המחלקה לפולימרים. במחקריו עסק בחקר פולימרים, בתרמודינמיקה ובחקר פעולת השריר והקרומים בגוף החי. הוא תרם רבות להנגשת המדע במתן הרצאות לקהל הרחב ובהרצאות ברדיו. הוא נהרג בפעולת טרור בשדה התעופה בן גוריון.⁸

סדרת הבולים "הישגים טכנולוגיים בישראל" מ-1979 מתייחסת עדיין לתעשייה הכימית הקלאסית - ייצור דשנים, אך גם לנושא התפלת המים בישראל.⁹ התפלת המים מופיעה גם מאוחר יותר על בול משנת 2013 שהאיור בו מבוסס על כרזת יום העצמאות ה-64: בשנה זו כבר הותפלו בארץ 40% מהמים



באדיבות השירות הבולאי - דואר ישראל

דואר אוויר, ייצוא, 1968, יהלומים ואיזוטופים
עיצוב: אדלר א

שסופקו לבתים. בשובל הבול תרשים סכימטי של מערכת אוסמוזה הפוכה שבה משתמשים להתפלת מים בארץ.¹⁰ בשנת 2010 הביתן הישראלי בתערוכת אקספו בסין הציג את ישראל כמרכז עולמי של יזמות וטכנולוגיה. שניים משלושת הבולים שהונפקו לרגל התערוכה קשורים לכימיה: השקיה בטפטוף וכן שבבים ומעבדים אלקטרוניים.

הטפטפות, המיוצרות במפעל "נטפים", פותחו בשנות ה-60 על ידי המהנדס שמחה בלאס, והן אחת מההמצאות הישראליות החשובות שהביאו לשינוי מהותי בחקלאות העולמית. צינורות הפלסטיק המחוררים מאפשרים השקיה ודישון מדודים ישירות לשורשי הצמח ואגב כך חוסכים במים ומצמצמים את אידיי המים.

⁶ <http://www.dswblog.co.il/?p=293>

⁷ יובל נאמן, ישראל בעידן הנשק הגרעיני - איום והרתעה מעבר ל-1995: הערות והארות לרקע ההיסטורי ולתפוצת הנשק הגרעיני, 1945-1990, נתיב 5,8 (תשנ"ה), עמ' 35-42.

פרופ' ישראל דוסטובסקי 1918-2010, מסע הקסם המדעי - חדשות המדע, תגליות מדעיות חדשות ומידע לציבור מבית מכון ויצמן למדע, 23.01.2011.

⁸ השירות הבולאי: אהרון קציר - קצ'לסקי

⁹ השירות הבולאי: הישגים טכנולוגיים בישראל, ד"ר א. ברק, ב. רוטנברג

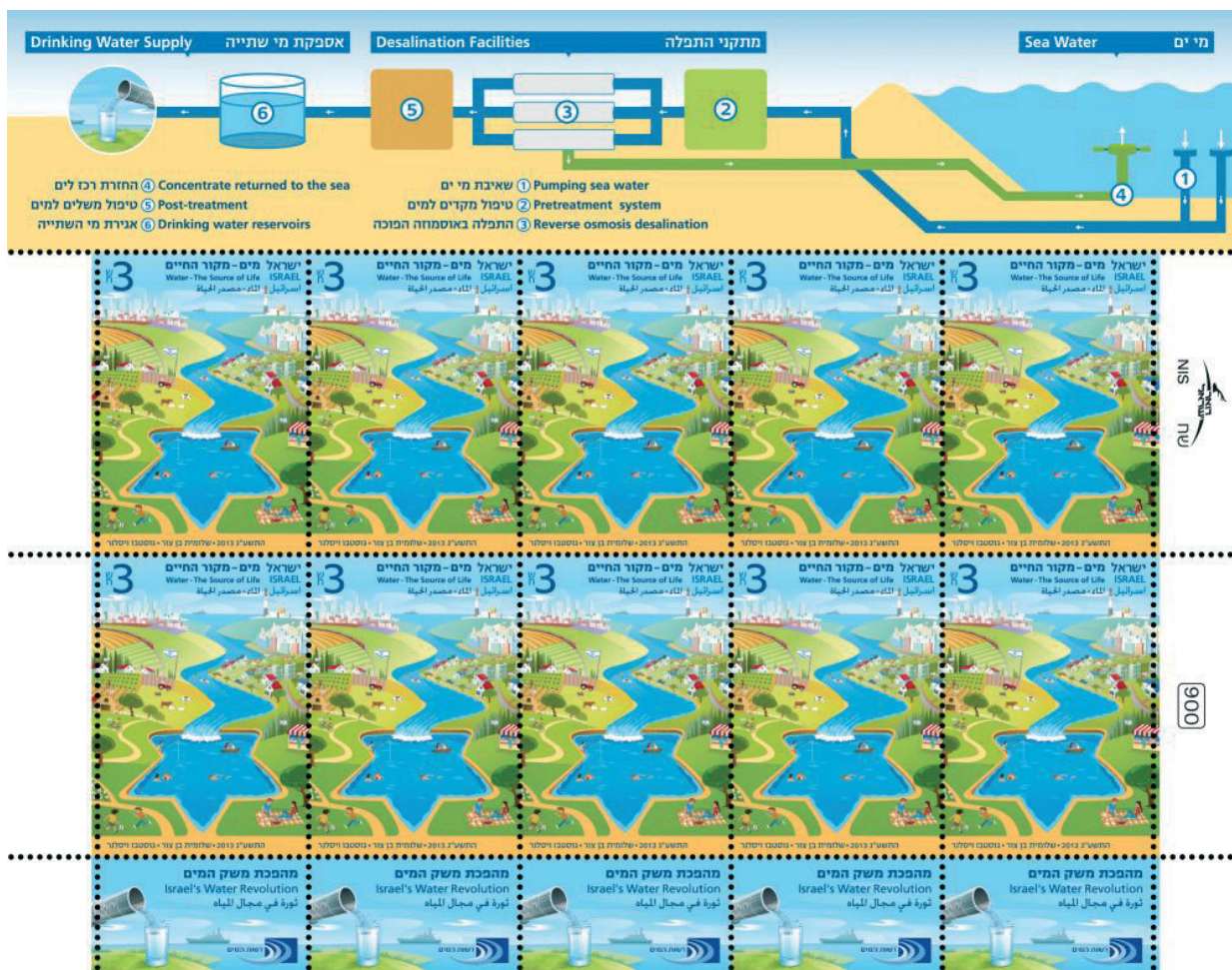
¹⁰ השירות הבולאי: מים מקור החיים, מהפכת משק המים, אורי שור



באדיבות השירות הבולאי - דואר ישראל
הישגים טכנולוגיים בישראל, 1979, דשנים כימיים והתפלת מי ים | עיצוב: אריה הכט



באדיבות השירות הבולאי - דואר ישראל
אהרון קציר-קצילסקי, 1993 עיצוב: סלבה דזוז'ק



באדיבות השירות הבולאי - דואר ישראל

מים - מקור חיים, 2013
 עיצוב: שלומית בן צור וגוסטבו ויסלנר

פיתוח שבבים ומעבדים בארץ החל עם הקמת מרכז פיתוח של "אינטל" בחיפה ב-1974. כיום יש בארץ כמה מרכזי פיתוח של "אינטל" ומפעל ייצור בקריית גת.¹¹



הבול שיצא ב-2012 לכבוד מאה שנים לטכניון מציג אף הוא התפתחויות טכנולוגיות וכן שיתוף פעולה בין מדענים מדיסציפלינות שונות.



בשלב הבול מופיעה ההזמנה לטקס הנחת אבן הפינה לטכניון וברקע הבול מופיע בניין הטכניון הראשון בהדר הכרמל שתוכנן על ידי אלכסנדר ברוולד. בחזית הבול אבטיפוס של נגו-מצנח, שמבנהו ותנועתו מחקים את מבנה זרע הסביון ותנועתו באוויר. הנגו-מצנח עשוי מגו-סיבים, והוא גלאי המשמש לאיתור חומרים רעילים באוויר. כאשר מפזרים נגו-מצנחים כאלה באוויר, הם משנים את צבעם בנוכחות חומרים רעילים, וכך אפשר לקבוע את סוג החומרים הרעילים באוויר.¹²

בול זה מתייחס אם כך גם לנושא איכות הסביבה, נושא שלו הוקדשו בולים רבים.

¹¹ השירות הבולאי: חידושים ישראליים ששינו את העולם, תערוכת אקספו 2010, שנגחאי, סין

¹² השירות הבולאי: 100 שנה לייסוד הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל, פרופ' פרץ לביא



דוגמה לכך היא בול איכות הסביבה משנת 1993 שבו מופיע איור המתאר אדמה, אוויר ומים נקיים. ד"ר ישראל פלג, מנכ"ל המשרד לאיכות הסביבה דאז, כותב במאמר המלווה את הבול כי מצב הסביבה בישראל של שנות ה-90 בכי רע: האוויר מזוהם, המים עכורים, ובאדמה מצטברים רעלים. הוא מדגיש את חשיבות ההתגייסות למניעת זיהום אוויר מתחנות כוח, מפעלי תעשייה ומכוניות, את חשיבות הפיקוח על שימוש בחומרים מסוכנים וסילוקם, על מניעת זיהום מקורות מים ועוד.¹³

סדרת בולים מ-2009 מתייחסת גם לנושא התחממות כדור הארץ, ואחד הבולים מוקדש לאנרגיה ירוקה: בית "ירוק" הפועל על אנרגיה סולרית, ובשולב הבול איורים של תאים סולריים.¹⁴



"גם בול זה קשור לכימיה", אומר פרופ' רפופרט ומצביע על בול שעליו ציור של חלת דבש, אחד מסדרה של שלושה בולים בנושא הדבש שיצאו לקראת ראש השנה תש"ע.

- "מה הקשר בין בול שעוסק בדבש לכימיה?"

- "הזוג בשולב הבול הוא הסבא והסבתא רבא של פרופ' פצ'ורניק".

הצילום בשולב הבול הוא של משה ופרל לרר, זוג כוורנים ממייסדי נס ציונה, שבשנת 1886 החלו לעסוק בגידול דבורים לראשונה ביישוב העברי. הידע המשפחתי בנושא הדבש סייע גם לינים של בני הזוג, אברהם פצ'ורניק, לימים פרופסור לכימיה במכון ויצמן.

אברהם פצ'ורניק סיים את עבודת המאסטר שלו ורצה להתחיל את עבודת הדוקטורט אצל פרופסור אפרים קציר. הוא הצטרף כטרמפיסט לנסיעה של פרופסור קציר וסטודנטית שלו מרחובות לירושלים, ובמהלך הנסיעה שמע אותם מדברים על התנהגות של חומרים בתמיסות מרוכזות. אברהם פצ'ורניק התערב בשיחה, הציע להם להמיס את החומרים בתמיסה מרוכזת שהכיר היטב - דבש, ופירט את תכונות הדבש. בעקבות שיחה זו הסכים פרופ' קציר לקבל אותו כסטודנט לדוקטורט.¹⁵

בולים של חתני פרס נובל נפוצים מאוד בעולם, ואפילו מדינות שמדעניהן לא זכו מעולם בפרס זה מוציאות בולים שעליהם דיוקנאות של חתני פרס נובל. לדוגמה, דמותו של דונלד קראם, חתן פרס נובל לכימיה ב-1987,¹⁶ מעטרת בול של טוגו באפריקה המערבית. "כתבתי לקראם ושאלתי אותו אם ביקשו את הסכמתו להדפסת הבול הזה, אך כמובן שהוא לא ידע כלל על קיומו של הבול".

¹³ השירות הבולאי: איכות הסביבה, ד"ר ישראל פלג

¹⁴ השירות הבולאי: איכות הסביבה - התחממות כדור הארץ

¹⁵ האיש שרצה להפוך זהב לכספית, המכון: חדשות מדע בשפה ידידותית, 16 (ספטמבר 1999); השירות הבולאי: מועדים התש"ע, דבש בישראל

¹⁶ https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1987

שלושה בולים ישראליים עוסקים בפרסי נובל לכימיה שהוענקו לחוקרים ישראליים. אין זה מקובל להדפיס על בולים ישראליים דיוקנאות של אנשים חיים, ולכן על הבולים בישראל מופיעים איורים הקשורים למחקרים של המדענים. שני הבולים הראשונים יצאו בשנת 2011, שהוכרזה כשנת הכימיה הבינלאומית. בול אחד, ובו מודל של יוביקוויטין, מציין את פרס נובל לכימיה שניתן בשנת 2004 לפרופ' אברהם הרשקו ולפרופ' אהרן צ'חנובר מהטכניון; והבול השני, ובו מודל של ריבוזום, מציין את פרס נובל לכימיה שקיבלה פרופ' עדה יונת ממכון ויצמן בשנת 2009.¹⁷ על הבול השלישי שיצא בשנת 2014, שהוכרזה כשנת הקריסטלוגרפיה הבינלאומית, איור של גבישים קוויזי מחזוריים של סגסוגת אלומיניום-מגנן, ותמונת עקיפה של קרני רנטגן לאחר שפגעו בגביש קוויזי מחזורי. בול זה מציין את פרס נובל לכימיה שקיבל פרופ' דן שכתמן מהטכניון בשנת 2011.¹⁸



פרופ' צבי רפופרט ליד חלק מן הספרים בכימיה שערך

- "האם ישנם בולים שיש להם קשר אישי מיוחד אליהם?"

- "כמובן, הבול הראשון שנתנה לי השכנה. מאז כבר מצאתי עוד כמה כמותו", אומר פרופ' רפופרט, "ומהבולים הכימיים הבחירה פשוטה מאוד - הבול עם מודל הריבוזום שיצא לכבוד זכייתה של פרופ' עדה יונת בפרס נובל. היא הייתה הסטודנטית שלי! באוסף שלי בולים רבים נוספים מארצות אחרות שיצאו לרגל זכייתה."

על דלת הארון בחדרו של פרופ' רפופרט באוניברסיטה מודבק מכתב הקבלה שלו לאוניברסיטה העברית. המכתב מאשר את קבלתו ללימודים כתלמיד שלא מן המניין (צילום בעמוד הבא).

- "למה תלמיד שלא מן המניין?"

- "בגלל האנגלית, כמובן."

"בכל פעם שהגיעו אליי סטודנטים שאמרו כי אינם יודעים אנגלית ושהם מפחדים שלא יסתדרו בלימודים, שלחתי אותם לחדר שלי, לראות את טופס הקבלה שלי לאוניברסיטה מצד אחד, ואת כל המדפים המלאים בספרי הכימיה שערכתי - באנגלית כמובן - מצד שני. אם אני יכולתי גם הם יוכלו!"

¹⁷ [השירות הבולאי: שנת הכימיה הבינלאומית 2011](#), אהוד קינן

¹⁸ [השירות הבולאי: שנת הקריסטלוגרפיה הבינלאומית 2014](#), אהוד קינן

האוניברסיטה העברית בירושלים

הפקולטה 4945-4946

ירושלים 26.10.53

לכבוד

דברי דפוס

מר רפאל צבי
מזכיר הפקולטה
חברה, ירושלים

א.נ.ג. / ג.נ.

1. הננו להודיעך בזה, כי נתקבלת כתלמידה (בן-חמנין / שלא מן המניין בפקולטה 4945-4946) מגמת ספרות עברית לשנת הלימודים תשי"ד. קבלתך לאוניברסיטה לשנת תשי"ד מותנית בסידור עניני הצבא (עין סעיף 4).

הערה לתלמידים שלא-מן-המניין: הנך מתקבלת (לשנה אחת בלבד, ותוכלי) להמשיך את לימודיך בשנה השניה רק בתנאי שתעבורי לסוג תלמידים-מן-המניין. העברתך זו תלויה בגיוס-מלגה (באמצעות משרד החינוך).

2. עליך לפנות עם קבלת הודעה זו אל המזכירות הכספית (רח' ממילא פינת רח' יוליאן) לשם סידור תשלומי שכר הלימוד (לפי ההוראות הר"ס). עד 6/11/53. בזמן התשלום עליך להביא אתך מכתב זה.

הערה: סידור התשלומים משמש הוכחה שיש בדעתך ללמוד בשנת תשי"ד. אם עד התאריך הנקוב לא תכניסי את שכר-הלימוד לקופה, נבין שאין ברצונך ללמוד בשנה זו, וגמחוק אותך מרשימת התלמידים לתשי"ד.

3. הנך מתבקשת (לצורך לחומר שלך עוד

4. בהתאם לדרישת משרד-הביטחון על כל תלמיד באוניברסיטה להוכיח (ע"ס מסמך רשמי מטעם שלטונות הגיוס), שלא ייקרא לשירות צבאי סדיר במשך כל שנת-הלימודים תשי"ד. ע"כ יוכלו להתקבל כתלמידים בשנת תשי"ד רק:

(א) מי שכבר שירת שירות-חובה בצה"ל;

(ב) מי ששטור בכלל משירות חובה בצה"ל;

(ג) מי שיוכל לקבל דחיית-גיוס עד סוף שנת-הלימודים (תמוז תשי"ד);

(ד) מי שמשתייך לעתודה האקדמאית או ליחידת הסטודנטים.

5. פתיחת שנת-הלימודים תשי"ד תתקיים ביום ראשון, א' בכסלו תשי"ד (8.11.53). ואילו הלימודים יתחילו למחרת אותו היום - ביום שני, ב' בכסלו (9.11.53).

מנקסי-הלימודים וכרטיסי-התלמיד יחולקי ע"י מזכירות הפקולטה רק לאחר התחלת שנת-הלימודים (לפי הודעה שתפורסם על לוח המודעות).

דגלית, למעלה המאות תלויה עם הדפיקה ופואת-סטטוס א' האדוקה 'אסנו' ק"ו

בכבוד רב

מזכירות הפקולטה
האוניברסיטה העברית
הפקולטה למדעי הטבע
ירושלים

- ג.ב. (1) תלמידים שהגישו בקשה להקלה בשכר-לימוד (או השתתפו בבחינות-פרס) יקבלו תשובה נפרדת מועד-ההקלות (או מועד-הפרסים).
(2) תלמידי הפקולטה למדעי-הרוח יקבלו הודעה נוספת על מועדי הייעוץ וקביעת תכנית הלימודים.



תמונה: Shutterstock, Looker_Studio

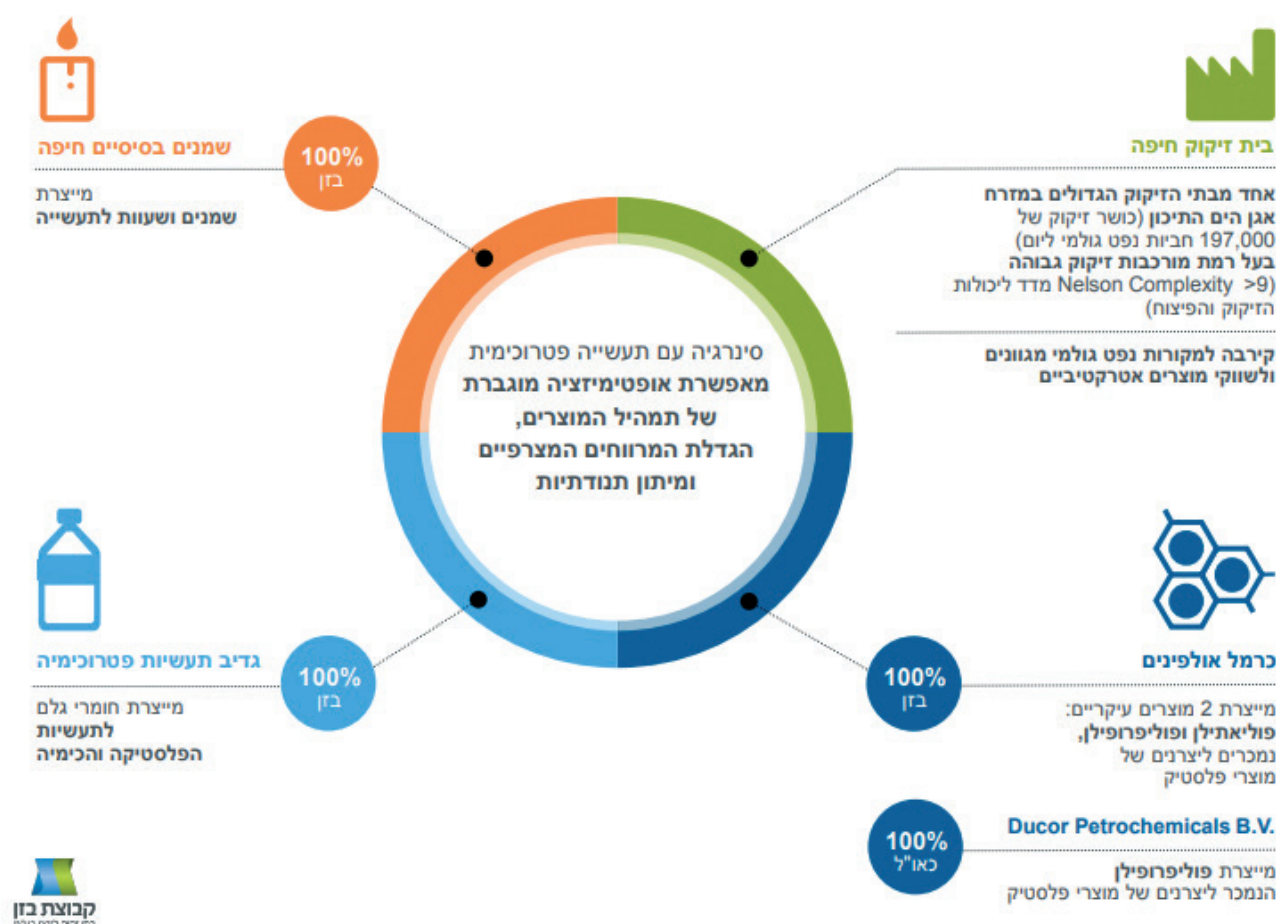
הכימיה מאחורי החברות

80 שנות זיקוק, 70 שנות עצמאות

קבוצת האנרגיה בתי זיקוק לנפט בע"מ (בזן) הממוקמת במפרץ חיפה, היא אחת מקבוצות האנרגיה הגדולות והמורכבות בארץ ומפעילה בית זיקוק ותשלובת פטרוכימית. מתקנים מודרניים מאפשרים לבזן לייצר מגוון רחב של מוצרי זיקוק נפט לתעשייה, לתחבורה, לחקלאות, לתשתיות ולצריכה ביתית. לבזן יכולת ייצור מרבית של כ-26,600 טונות נפט ליום (197,000 חביות). למעלה מ-70% ממוצרי החברה מופצים בשוק המקומי, והשאר מיוצאים בעיקר לארצות מזרח הים התיכון.

קבוצת בזן מורכבת מארבע חברות תעשייתיות הפועלות בישראל והעוסקות בעיקר בייצור מוצרי נפט, פולימרים המשמשים חומר גלם לתעשיית הפלסטיקה, חומרים ארומטיים לתעשיית הכימיה והפטרוכימיה, שמנים בסיסיים ושעוות המשמשים חומרי גלם בייצור מוצרים שונים.

מפעלי הקבוצה פועלים בסניגריה, ומפעלי חברות הבנות מהווים המשך למתקני בזן. שילוב זה מאפשר לבזן אופטימיזציה בתפוקתם של מתקני הזיקוק, תוך כדי ייצור נפט במקביל לייצור מוצרים שונים ומוצרי פטרוכימיה. הניהול המשולב של המתקנים מוביל להגדלת נתח הרווחים וליצירת יעילות תפעולית (cost efficiency). החברה גם מספקת שירותי כוח ללקוחות תעשייתיים במפרץ חיפה, כמו גם שירותי תשתיות (אחסון ושינוע מוצרי דלק).



בתי הזיקוק הממוקמים במיקום אסטרטגי נבנו בשנת 1938 על ידי החברה הבריטית C.R.L Consolidated Refineries LTD (מפעלי זיקוק מאוחדים בע"מ) כחלק מהמאמץ המלחמתי של הבריטים, עברו לידי הממשלה רק בשנת 1959, ובשנת 2007 הושלם תהליך ההפרטה של החברה. כיום החברה נשלטת על ידי החברה לישראל (33.1%) ועל ידי מפעלים פטרוכימיים בישראל (15.5%).

קבוצת בזן הובילה במהלך השנים מספר שינויי עומק בתחומי זיקוק הנפט ואיכות הסביבה, היא מתאימה את עצמה להתפתחויות הטכנולוגיות במגוון תחומים ומתמודדת בשנים האחרונות ביתר שאת עם רגולציה הולכת ומחמירה בתחום איכות הסביבה. מאמר זה ינסה להציג את הפרינקטים המרכזיים שאותם קדמה הקבוצה, ואת המשמעויות שלהם לקבוצה ולמשק בכללותו.

בין הפרויקטים המרכזיים של בתי הזיקוק מאז הקמתם ניתן למנות מספר תחנות מרכזיות: הקמת מתקנים בשנות ה-60 שהיוו את הבסיס לייצור חומרי דלק תקינים בישראל, הקמת פצחן קטליטי בסוף שנות ה-70 שאפשר ייצור בנזין גבה אוקטן וגפ"מ לאספקת צורכי המשק, הקמת מתקן ה-CCR בשנת 1996 שאפשר ייצור בנזין נטול עופרת.

החל מחודש אפריל 2013 צורכת החברה את מלוא כמות הגז הטבעי הנדרשת לה בתהליך הייצור של מוצריה. שימוש בגז טבעי במתקני החברה חוסך בהוצאות אנרגיה, מביא ליעילות תפעולית מוגברת ולהפחתה משמעותית של פליטות מזהמים ביחס לדלקים אחרים שבהם השתמשו מפעלי הקבוצה בעבר.

בזן מתאימה את עצמה לעתיד



באדיבות בזן

הקמת בתי הזיקוק בחיפה - פועלים משחקים בהפסקה בעת עבודות הבנייה

קיימת מגמה עולמית ארוכת טווח אשר התמתנה בשנים האחרונות, של גידול בביקוש למוצרי דלק לתחבורה כגון בנזין, סולר ודלק סילוני, ובמקביל - קיטון בביקוש למוצרים כבדים יותר, כגון מזוט וסולר להסקה. המעבר נובע ממגבלות הנקבעות ע"י רשויות ההגנה על הסביבה ושימוש בגז הטבעי כתחליף למזוט, לסולר ולהסקה במקומות רבים. בישראל הופך הגז הטבעי למקור אנרגיה משמעותי אשר החליף בשנים האחרונות את מרבית השימוש במזוט וצפוי להחליף בשנים הבאות גם את מרבית השימוש בסולר הסקה וגפ"מ תעשיית.

מגמה עולמית נוספת היא שיפור מתמיד בתכונות מוצרי הדלק (כגון: קיטון ברמות גופרית ושיפור תכונות שריפה כדי להקטין את רמות הפליטה של מזהמים הנוצרים בתהליך הבעירה של חומרי הדלק).

עוד מגמה עולמית היא ייצור מרכיבי דלקים לתחבורה ממקורות מתחדשים (צמחיים) כגון אתנול וביו-דיזל כדי להקטין את התלות בנפט ולצמצם את פליטת גזי החממה. כלי רכב המונעים באמצעות גז טבעי, חשמל או מימן עשויים אף הם להקטין את צריכת הנפט ומוצרים.

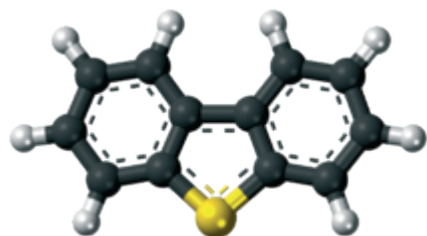
נכון להיום המעבר לשימוש בכלי רכב המונעים באנרגיות חלופיות אלה הוא קטן יחסית, אך מגמה זו עשויה להתגבר עם פיתוח וייצור דגמי רכבים חסכוניים וזולים יותר.

לקבוצת בזן יכולת טכנולוגית עדכנית ויכולות תפעוליות ברמה גבוהה, המאפשרות שימוש במגוון רחב של סוגי נפט גולמי (החברה יכולה לעשות שימוש ביותר מעשרה סוגים שונים של נפט גולמי), ייצור מוצרי נפט בזמינות וביעילות גבוהות, בתמהילים שונים של מוצרי נפט וכן בהתאמה לדרשות איכות מחמירות. שמירה על גמישות מסחרית מרבית ברכישת חומרי גלם תאפשר לנצל את היכולת הטכנולוגית והזדמנויות עסקיות, על פי שינויים המתרחשים בשווקים השונים.

שנות ה-60: טכנולוגיות מתקדמות - מתקן הדחת גופרית

בכל מקטעי הנפט הגולמי קיימת גופרית בריכוזים העולים על התכולה המותרת על פי תקני מוצרי הדלק הסופיים. למשל, הסולר המזוקק מן הנפט הגולמי עשוי להכיל בין 0.2% ל-1.4% גופרית (2,000-14,000 חלקים למיליון), בעוד שהתקן לסולר תחבורה מגביל את תכולת הגופרית למקסימום של 10 חלקים למיליון (חל"מ) בלבד. המתקן הראשון להדחת גופרית הוקם ב-1962.

ייצור הסולר התקני מתאפשר ע"י העברת הסולר הגולמי במתקן להדחת גופרית, בתהליך הנקרא Hydro-De-Sulfurization או בקיצור HDS. התהליך מבוסס על תגובה בין פחמימנים המכילים גופרית לבין מימן, בטמפרטורות בטווח 300-370 מעלות צלזיוס, בלחצים של 60-90 באר ובנוכחות זרז הטרונגי המכיל סולפידים של קובלט, ניקל ומוליבדן. הגופרית המשתחררת ממולקולות הפחמימנים נקשרת למימן לייצור הגז מימן גופרי (H_2S), אשר מופרד מתערובת המגיבים ע"י ספיגה בתמיסת די-אתנול אמין, ובהמשך מועבר למתקן להשבת גופרית ההופך את המימן הגופרי לגופרית אלמנטרית, $S_{8(s)}$, הנמכרת לתעשיית הדשנים.



מודל של מולקולת DBT¹

כדי שתהליך ה-HDS יצליח להגיע לרמות ניקיון הנדרשות לפי תקן EURO-V (פחות מ-10 חל"מ), נדרשו פיתוחים של זרזים בעיקר בשני התחומים הבאים:

1. הרחקת גופרית הקשורה למולקולות מורכבות כגון Di-Benzo-Thiophene (DBT). המבנה המרחבי של מולקולות אלה מונע מהן להיקשר לאתרים הפעילים על גבי הזרז, ולכן פותח זרז ייחודי המאפשר הדחת גופרית גם ממולקולות מעוכבות מרחבית כמו DBT.

¹ By Jynto [CCO], from Wikimedia Commons

2. חלק גדול ממרכיבי הבניין הוא תוצרים של פיצוח קטליטי ולכן מכיל אולפִינים (אֶלְקָנִים) אשר מקנים לו את מספר האוקטן הגבוה. הבניין מפיצוח קטליטי מהווה מרכיב עיקרי במבבל הבניין המשווק מבית הזיקוק, ורמת הגופרית שלו במקור נעה בין 100-500 חל"מ. העברת הבניין במתקן HDS קונווציונאלי תגרום לתגובה מהירה של הרוויית הקשרים הכפולים באמצעות המימן הזמין במתקן, ולכן להורדה משמעותית של רמת האוקטן ולבזבז רב של מימן. לכן נדרש פיתוח של מערכת זרזים ייחודית אשר תביא להדחת גופרית עם מינום של הרוויית אולפִינים.

תחילת שנות ה-2000: האט, כאן סוללים - בזן התאימה את האספלט למזג האוויר בישראל



באדיבות לשכת העיתונות הממשלתית

ראש הממשלה דוד בן גוריון בשיט במפרץ חיפה.
ברקע בתי הזיקוק | צילום: COHEN FRITZ, 26.5.1962

ביטומן לסלילת כבישים (מוכר כזפת) הוא אחד מתוצרי תהליך הזיקוק, והוא משמש כחומר מקשר (דבק) בתערובות אספלט המהוות את השכבות העליונות בכבישים. הכביש מורכב על פי רוב מ-5% ביטומן ו-95% אבני חצץ, ולתכונות ההנדסיות של הביטומן יש השפעה ניכרת על אורך החיים של האספלט. נכון להיום קבוצת בזן היא ספקית הביטומן היחידה בישראל.

עד שנת 1999 נעשה שימוש בלעדי בביטומן מסוג AC-20, אך דוח שפרסמה מע"צ (ששינתה מאז את שמה ל"נתיבי ישראל") בשנת 2000, קבע כי תערובת אספלט זו נשארה רכה למשך מספר ימים עד מספר חודשים מתום הביצוע, ובמהלך תקופה זו אפילו רכב פרטי קל השאיר סימני קריעה בפני המשטח - בעיקר בקיץ. בזן בשיתוף פעולה עם מע"צ פתחה והוציאה לשוק את המוצר AC-30 שהתאים יותר לתנאי השטח והאקלים החם בישראל, שכן תערובת זו מתקשה במהירות.

שנת 2012: המידן - דלקים נקיים במקום מזוט וסולר הכבד

בשנת 2012 סיימה קבוצת בזן את הקמת הפצחן המימי (המידן), שמעבר למורכבותו ההנדסית משלב בתוכו טכנולוגיה מתוחכמת ופורצת דרך. המתקן מעבד כ-30 אלף חביות ליום. לאחר הקמת המידן אפשר להפיק מאותה כמות של נפט גולמי כמות גדולה יותר של תזקינים ובדרגת ניקיון גבוהה יותר. איך זה עובד?

המתקן מוזן בסולר הכבד אשר מפורק בנוכחות מימן וזרז זאוליטי בטמפרטורה של 400 מעלות ולחץ גבוה (כ-150 באר). בתנאים אלה המולקולות הגדולות והמסועפות של הסולר עוברות "פיצוח" ונשברות למולקולות קטנות ופשטות יותר. תוצרי התגובה מועברים לגזרת זיקוק המפרידה בין המוצרים השונים: 30 דלק סילוני (דס"ל), 22% נפטא, 6% גז פחמימי מעובה (גפ"מ, גז בישול), ו-39% סולר. מוצרי המתקן אינם מכילים כמעט בכלל תרכובות גופרית, מעט מאוד תרכובות חנקן ומעט חלקיקים, וזו התרומה להפחתת זיהום האוויר שנגרם מתחבורה בכבישים כשהסולר נשרף במנוע דיזל.

השקעות סביבתיות: משנת 2007 (המעבר לידיים פרטיות) ועד היום

השמירה וההגנה על הסביבה מהווים יעדים אסטרטגיים מרכזיים של קבוצת בזן. מאז שנת 2007 ועד היום השקיעה הקבוצה למעלה מ-1.3 מיליארד שקל בתחומי איכות סביבה ובטיחות, זאת במסגרת ביצוע תוכנית אסטרטגית שאושרה בסמוך להפרטת הקבוצה.

השקעות הקבוצה בתחום זה כוללות בין היתר תשתית והכנות לקליטת גז טבעי, מערכת להקטנת פליטת חלקיקים, מערכת להקטנת פליטות תחמוצות חנקן, מערכות לטיפול בריחות ופינוי עשירות אלפי טונות של שאריות בוצה שנאגרו בתקופה הממשלתית. בין הפרויקטים הנוספים שיצאו לפועל בשנים האחרונות:

- בזן הקימה מערך לטיפול במי קולחין ולהשבת מי קולחין מטופלים לצורכי תעשייה. במסגרת הפרויקט הופחתה הזרמת הקולחין לנחל במהלך 2017 בלמעלה מ-75%. בכך הפכה בזן את שפכי התעשייה למשאב והפחיתה משמעותית את ההשפעה הסביבתית שלה על הים והנחל.
- הקמת מתקן לחמצון קטליטי לטיפול בפליטות בנזן ממכלים לאחסון בנזן. מתקן זה מחמצן את הבנזן וממיר אותו למים ולפחמן דו-חמצני ובכך מפחית את הפליטה של בנזן מהמכלים.
- הקמת שני מחמצנים תרמיים לטיפול בפליטות פחמימינים ולהפחתת הריחות ממערך הטיפול בשפכי המפעל. מתקנים אלו, בדומה למחמצן הקטליטי, מחמצנים את הפחמימינים וממירים אותם למים ולפחמן דו-חמצני.

כחלק מתוכנית רב שנתית צפויה בזן להשקיע כ-250 מיליון שקל נוספים בתחום, זאת לאחר שבמהלך שנת 2017 השקיעה למעלה מ-70 מיליון שקל.

לקראת 2020: העתיד בחשמל - בזן מתכננת להקים תחנת קוגנרציה

בסוף שנת 2017 קיבלה קבוצת בזן רישיון לייצור חשמל אשר יאפשר לה, בכפוף לקבלת היתרי בנייה, להקים תחנת כח חדשה שתאפשר לה לייצר 135 מגוואט חשמל לצורך צריכה עצמית. בזן מבקשת בעתיד להשלים את התחנה ולהגדיל את היקף ייצור החשמל בה ל-340 מגוואט. מדובר בתחנת קוגנרציה שתונע בגז טבעי לייצור קיטור וחשמל, ואשר תפחית את רמת הפליטות לסביבה ותגביר את היעילות האנרגטית באופן משמעותי. התחנה תחליף תחנת כוח קיימת במתחם אשר פועלת מאז 1984.

תחום האולפינים - חלק מ-HORIZON 2020

חברת כרמל אולפינים מקבוצת בזן, שהוקמה בשנת 1964, מתמחה בייצור פוליפרופילן ופוליאטילן עבור שוק הפלסטיק המקומי והעולמי.

החדשות האחרונות: פוליפרופילן קופולימר שקוף

לכרמל אולפינים מעבדת מחקר ופיתוח פעילה, המפתחת מדי שנה מוצרים חדשניים לטובת לקוחותיה. המכנה המשותף העיקרי לכל מגוון חומרי הפלסטיק הוא היכולת לשלוט בהם ולבצע מניפולציה לתכונות החומר על פי הצורך. כיום חולשים הפולפרופילן (PP) והפוליאטילן (PE) על רובו המכריע של שוק הפלסטיק העולמי.

לפוליפרופילן יתרון גדול בשוק לעומת אחיו הפוליאטילן, זאת בזכות שילוב תכונותיו כגון צפיפות נמוכה יותר, קשיחות, עמידות הולם (impact), עמידות תרמית, עמידות כימית, תכונות אופטיות ושילוב מנצח של מחיר מול איכות.

לאחרונה הצליחו בכרמל אולפינים לפתח משפחה חדשה של פוליפרופילן - הקופולימר השקוף - המשלב שקיפות עם עליונות מכנית, כלומר, עמידות הולם גבוהה.

משפחת הקופולימר השקוף החדשה מונה כבר תשעה מוצרים שונים המיועדים לטווח רחב של שימושים כמו אריזות מזון (יריעות, גביעים, מגשיות, קופסאות גלידה שקופות), מוצרי צריכה ביתיים (ארגזי אחסון שקופים, כלי בית), צעצועים לילדים, ארגזי כלים ומוצרים לתעשיית הרכב.

הארכת חיי מדף למזון

בשנים האחרונות החליט האיחוד האירופי להשקיע 7.7 מיליון יורו בפרויקט שנולד בשיתוף פעולה בין כרמל אולפינים והטכניון. החידוש הוא פיתוח של ננו-קפסולות המכילות שמנים אתריים מעובדים המשולבים ביריעות פלסטיק לעטיפת מוצרי מזון שונים.

לשמנים אתריים פעילות אנטי-מיקרוביאלית נגד טווח גדול של חיידקים ופטריות, אך אינם עמידים בטמפרטורות גבוהות. במחקר זה הצליחו להגן על השמנים האתריים במהלך תהליכי הייצור והעיבוד של הפלסטיק בתוך ננו-צינוריות אנאורגניות. השמן האתרי משולב בתוך אריזת הפלסטיק, משתחרר באופן מבוקר בתוך אריזת המזון ומסוגל להגן גם על המזון הארוז וגם על הסביבה שבתוך האריזה מפני התפתחות של מיקרואורגניזם. היריעות נבדקו נגד חיידקי אי קולי, ליסטריה ופטריות שונות. המטרה כרגע היא לעבור מהשלב של המוצר הגנרי לפיילוטס, לעבוד מול תעשיית המזון באירופה ולהתאים את הפיתוח לצרכיה של כל תעשייה.

עולם ללא תפוחת חיתולים

במסגרת אישור של הרשות לחדשנות נוצר המיזם 'פיתוח פלטפורמה טכנולוגית גנרית לייצור בדים לא-ארוגים מסתגלים'. הוקם מאגד SNOW שבו חברה קבוצת בזן לחברות ישראליות מובילות בעלות נוכחות עולמית בתחום הבדים הלא-ארוגים כמו אבגול ועלבד, וכן לחוקרים מהטכניון, מהאוניברסיטה העברית, מאוניברסיטת תל-אביב, מאוניברסיטת בן גוריון בנגב, מהמרכז הוולקני וממכללת שנקר.

מטרת המאגד היא לייצר "בדים חכמים" המגיבים לשינויים בסביבה: בדים המגיבים לשינוי בטמפרטורה, בדים בעלי יכולת ניקוי עצמי (לתחבושות ולחיתולים), בדים רפואיים בעלי תכונות אנטי-מיקרוביאליות ובדים הרגישים לרמת החומציות. בהקשר לחיתולים, מגע ממושך של העור עם השתן החומצי גורם לבעיות קשות לעור ומטרת המיזם היא ליצור בד חכם שינטרל את תוצרי השתן המזיקים.

חברת ההזנק¹ Bactusense²

ריאיון עם אייל יוסקוביץ, מנכ"ל החברה

ראיינה וערכה: רותי שטנגר

מהו המוצר שאתם מפתחים?

המוצר שאנו מפתחים בחברת ההזנק שלנו הוא טכנולוגיה שתאפשר זיהוי מהיר של חיידקים במוצרי מזון שונים.

כל שנה נגרם נזק רפואי וכלכלי גדול בגלל נוכחות של חיידקים במזון. אנשים נפגעים ממחלות בגלל חיידקים במזון, ובעולם יש מאות אלפים של מקרי מוות בשנה שמקורם בהרעלות מזון ומים. מעבר לכך יש גם נזק כלכלי עצום: עלות הטיפול הרפואיים והנזקים ליצרני המזון. יצרן מזון שמתגלים חיידקים במוצרים, שלו חייב לבצע קריאה להחזרת המוצרים (recall) ולאסוף את המוצרים הנגועים מהצרכנים ומהחנויות. החזרת המוצרים עולה כסף רב, אך הבעיה העיקרית אינה העלויות הישירות של החזרת המוצרים אלא העלויות הלא ישירות: פגיעה בשמו של היצרן, ירידה בהיקף מכירות, צמצום פעילות ואף פיטורי עובדים. עלות החזרת מוצרים יכולה להגיע ל-10 מיליון דולר, אך העלות הלא ישירה יכולה להיות פי עשרה יותר, והנזק הוא כה גדול עד שחלק מיצרני המזון אינם יכולים לעמוד בו.

אם כך ליצרני המזון יש אינטרס לזהות חיידקים במוצר לפני שהוא משוחרר לשוק. זה נקרא שחרור חיוכי - מוצר לא ישוחרר עד שבמפעל לא בדקו שהוא נקי מחיידקים.

מחן השיטות שקיימות כרגע בשוק לזיהוי חיידקים במזון?

השיטה הנפוצה ביותר היא שימוש בצלחות פטרי: זריעה של דוגמה, אינקובציה של 48 שעות בממוצע וספירת מושבות החיידקים. מבחינת יצרן המזון אלה שלושה ימים של המתנה שבהם הוא צריך לשמור את המוצרים באזורי אחסון יקרים. אחסון של מוצרים שזקוקים לקירור מצריך מקרר ענק. בגלל אחסון זה חיי המדף של המוצר מתקצרים: חיי המדף של מוצרי חלב מתקצרים ב-20%, וחיי המדף של מוצרי בשר מתקצרים ב-50%.

שיטה זו אורכת זמן רב מדי, ולכן קיים צורך בשיטות לגילוי מהיר של חיידקים במזון. קיימים היום בשוק מכשירים לבדיקות מהירות יותר, אך עדיין מדובר ב-24 שעות לפחות, ועלות המכשירים האלה והבדיקות שנעשות בעזרתם יקרים. השוק משווע לשיטת בדיקה מהירה וזולה הרבה יותר, שתחסוך כסף רב לכל יצרני המזון, ושגם יצרן קטן יוכל להרשות לעצמו לרכוש אותה.

מהי הטכנולוגיה של המוצר שלכם, ומה יתרונותיה מול המוצרים הקיימים בשוק?

הטכנולוגיה שלנו פותחה בשיתוף פעולה בין פרופ' אמיר סער מהמחלקה לפיזיקה באוניברסיטה העברית בירושלים, לבין פרופ' אסתי סגל מהפקולטה להנדסת ביוטכנולוגיה ומזון בטכניון.

הטכנולוגיה כוללת שני מרכיבים:

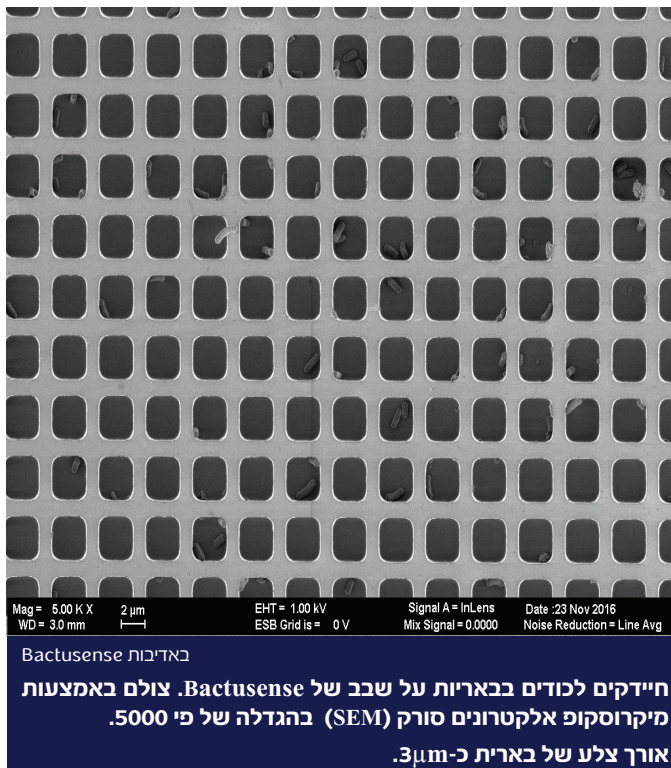
שבב סיליקון שמשמש מלכודת לחיידקים ומכשיר מדידה שהוא חיישן אופטי המחובר למחשב, שיועד לזהות שינוי באות האופטי כאשר חיידקים נלכדים בשבב.

על השבב יש מספר גדול של בְּאֵרִיּוֹת מיקרומטריות שמשמשות מלכודת לחיידקים. טיפול מתאים של פני השטח של הבאריות עוזר ללכוד את החיידקים בבאריות. החיישן האופטי מבוסס על חישה היפר-ספקטרלית, כלומר, קורא אוסף של אורכי גל רבים בתחום הנראה והתת-אדום, בין 400-1000 ננומטר.

אנו בודקים את האור החוזר מהשבב. כשהבאריות ריקות, יש להן חתימה ספקטרלית מסוימת. כשחיידקים נלכדים ומתרבים בבאריות, חל שינוי באור שחוזר מהשבב, והמחשב מזהה שינוי שנגרם בגלל חיידקים.

¹ חברת ההזנק = start up company

² www.bactusense.com



קיימות שתי משפחות של בדיקות בקטריאליות:

- בדיקות כלליות: ספירה כללית, שבה אין מזהים חיידק ספציפי אלא בסה"כ את כל החיידקים.
- בדיקות ספציפיות:
 - לחיידק מסוים כמו סלמונלה, ליסטריה ו-E.coli שהם הפתוגנים העיקריים.
 - לקבוצה מסוימת של חיידקים, כמו קוליפורמים.

אם רוצים לבצע בדיקה כללית, קושרים לפני השטח של הבאריות חומרים מתאימים שייקשרו לכל סוגי החיידקים.

לביצוע בדיקה ספציפית יכולים לקשור לפני השטח של הבאריות נוגדנים ספציפיים או מולקולות ביולוגיות אחרות שייקשרו לחיידקים מסוימים או לקבוצת חיידקים מסוימת.

הטכנולוגיה כוללת ערכת בדיקה ומכשיר מדידה. בערכת הבדיקה קיים תא זרימה שאליו מזריקים את הדוגמה שרוצים לבדוק. הכנת הדוגמה בטכנולוגיה שלנו מתבצעת באופן שבו התעשייה מורגלת להכין דוגמאות לבדיקות שהיא מבצעת כרגע, וזאת כדי שהתעשייה לא תתקשה להטמיע את הטכנולוגיה החדשה. מכניסים את הערכה למכשיר, ולאחר פרק זמן שבין שעתיים עד ארבע שעות הבדיקה מסתיימת, וליצור יש תוצאות.

הבדיקה מהירה, ועלות הבדיקה זולה ודומה לעלות של הבדיקה שנערכת היום בצלחות פטרי.

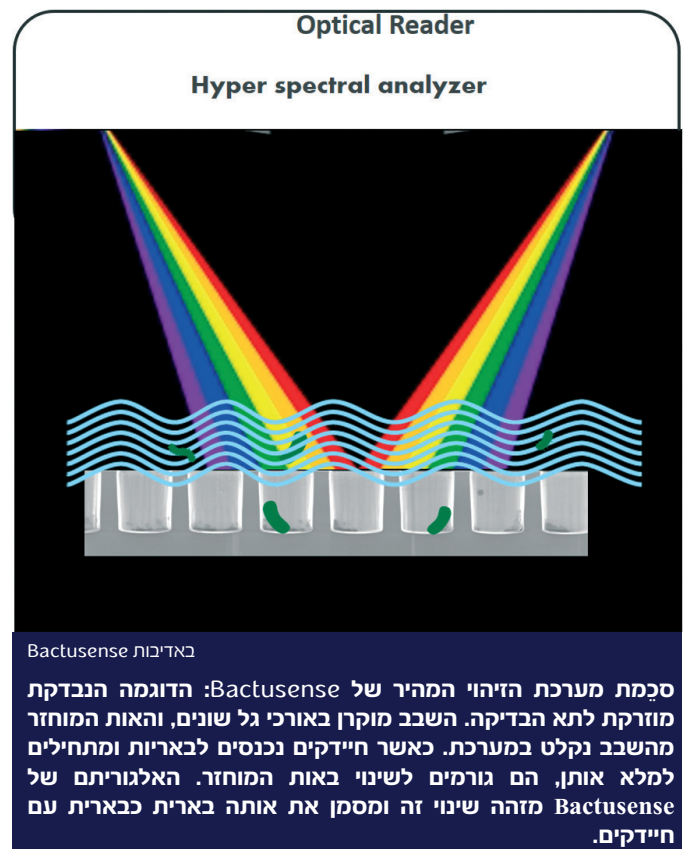
הבדיקות יכולות להיערך לא רק למוצרי מזון אלא גם במפעל עצמו: משטחי העבודה, קו הייצור ואף כפות הידיים של העובדים יכולים להיבדק. מעבירים ספוגית על כפות הידיים, והספוגית מוכנסת לבופר שממנו נלקחת הדגימה.

בדיקות אלה רלוונטיות לא רק ליצרני המזון אלא גם לסופרמרקטים, למסעדות ובתי קפה ולכל ספקי המזון. מלבד שוק המזון, בדיקות כאלה רלוונטיות גם לשוק הרפואי, למוצרים קוסמטיים ולבדיקות סביבתיות כמו בדיקת מקורות מים, נחלים, אדמה ועוד. שווי השוק המוערך לבדיקות אלה בעולם הוא כתשעה מיליארד דולר, והוא צפוי לגדול לעשרים מיליארד דולר בתוך שמונה שנים. פלח שוק המזון והמשקאות מהווה 55% משוק זה; השוק הרפואי מהווה כ-25%, והשוק הקוסמטי כ-17%. מבחינה גיאוגרפית כשליש מהבדיקות ייצרכו בשוק האמריקני, כרבע באירופה וכרבע בדרום מזרח אסיה.

אתה כימאי-פיזיקלי. איך משתלב כימאי בפיתוח מוצר כזה? מה תפקידך בחברה?

אני מנהל החברה. החברה הוקמה כחברת חממה בחממה טכנולוגית שעיסוקה העיקרי הוא טכנולוגיית מזון - Food Tech. את החממה, The Kitchen Hub, הקימה חברת שטראוס יחד עם הרשות לחדשנות (המדען הראשי לשעבר).

הגעתי לנהל את החברה בגלל הרקע המדעי שלי באופטיקה. הדוקטורט שלי, אצל פרופ' אורי בן מהאוניברסיטה העברית בירושלים, עסק בתכונות אופטיות של ננו-חלקיקים. זהו תחום חופף לכימיה ולפיזיקה, ומחקר כזה יכול להתבצע במחלקה לכימיה פיזיקלית או במחלקה לפיזיקה יישומית. בנוסף היה לי רקע בניהול פרויקטים ובניהול עסקי.



איך הופכים רעיון מדעי-טכנולוגי לחברת הזנק?

כדי להקים חברת הזנק יש צורך קודם כול ברעיון ובמחקר ראשוני, ואחר כך ביזמות. זכור, הרעיון והמחקר הראשוני פותחו בשיתוף פעולה בין פרופ' עמיר סער מהמחלקה לפיזיקה באוניברסיטה העברית בירושלים, לבין פרופ' אסתי סגל מהפקולטה להנדסת ביוטכנולוגיה ומזון בטכניון. היום, עופר דינור, הוא זה שדחף להוביל את הרעיון לכיוון מסחרי בשיתוף פעולה עם האוניברסיטאות.

כשרוצים לפנות לכיוון המסחרי, צריך למצוא את המסגרת למימוש הרעיון ולמימון: זו יכולה להיות חברה פרטית, חברת חממה הקשורה למדען הראשי או חברה הממומנת מקרנות הון סיכון. אנחנו השתלבנו בחממה ³The Kitchen Hub שנמצאת באשדוד.

בהתחלה היינו רק היזם ואני, כשאנחנו עוסקים בכול: פיתוח המוצר, פיתוח עסקי, גיוס הון. אחר כך גייסנו עוד שני אנשים: מתחום האופטיקה ומתחום הביוטכנולוגיה.



באדיבות Bactusense

מעבדת החברה - שולחן העבודה לכימיה ולמיקרוביולוגיה

הפיתוח בחברת הזנק בתחומים מדעיים כאלה, כמו מיקרוביולוגיה, לוקח יותר זמן מאשר פיתוח בחברת הזנק בתחום התוכנה. תכנית החממה היא לשנתיים בדרך כלל, ובמהלך זמן זה מפתחים את דגם האב ועוסקים בהוכחת היתכנות. הוכחת היתכנות היא פרויקט ראשוני המוגבל בזמן ובתקציב והמדגים את היכולות של המוצר המוגמר כדי לגייס כספים להמשך הדרך.

החממה מלווה את החברות בצורה קרובה וצמודה, עוזרת ותומכת בפיתוח עסקי, בפיתוח תוכניות אסטרטגיות ובגיוס כספים. ישנן חברות הזנק שהמעבדה שלהם נמצאת בחממה. אנחנו הקמנו את המעבדה שלנו בנשר, קרוב לטכניון, בגלל הקשר הנחוץ עם המעבדה של פרופ' סגל בטכניון.

באיזה שלב אתם נמצאים כרגע?

יש לנו אב טיפוס מעבדתי, והתכנון בשנה הקרובה הוא לצאת עם אב הטיפוס לבדיקות בשטח. אנחנו מתכננים לערוך בדיקות במפעלים ולהשוות את התוצאות לתוצאות הבדיקות הרגילות שהם עושים. במקביל נפתח בשנה הקרובה את הנדסת המוצר מאב טיפוס מעבדתי למוצר תעשייתי.

אתם משלבים הייטק בתעשיית המזון, תחום שנקרא פוד-טק (food-tech). מה מקומה של ישראל בתחום זה?

פוד-טק הוא תחום שמתפתח במהירות בשנים האחרונות בכל העולם, אבל ישראל הופכת להיות מרכז עולמי משמעותי בגלל השילוב של יזמות, רעיונות יצירתיים באוניברסיטאות ובמגזר הפרטי והיכולת לחבר ולהוציא רעיונות אל הפועל. היצירתיות בארץ היא גם בתחום המזון עצמו וגם בתחומים הקשורים למזון, כמו הטכנולוגיה שאנו מפתחים.

החממה שבה אנו נמצאים פעילה מאוד בתחום הפוד-טק ומהווה מרכז עולמי מבחינת חדשנות, פעילות, הבאת משקיעים וחשיפה של חברות ההזנק לחברות ומשקיעים מחו"ל. בחממה זו מפתחת חברת הזנק אחרת, Yofix, יוגורט שעשוי לא מחלב ולא מסויה אלא משיבולת שועל- גם כאן יש שילוב של טכנולוגיה מתקדמת.

ישנן טכנולוגיות רבות אחרות, למשל, רובוטיקה לאריזות מזון. אריזה היא תחום שקשה מאוד לאוטומציה כי המכונות צריכות להיות ערוכות לארוז היום מזון מסוג אחד, ומחר מזון מסוג אחר. בחברת ההזנק DLR מפתחים רובוט שלומד מהעובדים בקו הייצור מה שיטת העבודה הנכונה לאריזת מוצר כלשהו, ובתוך חצי שעה כבר יודע לבצע זאת בעצמו ללא צורך בתכנות מחדש של כל המערכת.

באוקטובר שעבר ביקרתי בכנס הפוד-טק בלונדון, שבו נשאלו משקיעים בפאנל מהם השווקים המעניינים בעולם. ברור שהשוק האמריקני גדול ומעניין, אך השם שהוזכר שם הכי הרבה היה ישראל.

חברת ההזנק¹ Inspecto

ריאיון עם אבנר אבידן, מנכ"ל החברה

ראייה וערכה: רותי שטנגר

מהי הטכנולוגיה שפיתחתם, ובמה היא שונה או טובה יותר מהקיים כרגע בשוק?

הטכנולוגיה שפיתחנו מאפשרת גילוי של רעלנים ספציפיים בתעשיית המזון. המוצר שאנו מפתחים הוא "B to B" (Business to Business) ולא "B to C" (Business to Consumer), כלומר, המוצר מיועד לתעשיית המזון ולא לצרכנים בבית.

תעשיית המזון מסתמכת היום על אנליזה בעזרת HPLC כדי לגלות רעלנים במזון. זו שיטה יקרה והמכשור גדול ונייח. יש צורך באנשי מקצוע מיומנים להכנת הדגימה, להפעלת המכשור וכן לניתוח הגרפים ולהכנת הדו"ח. תעשיית המזון זקוקה היום לבדיקות שתאפשרנה סריקה של כמות גדולה של מצרכים בתנאי שטח, בעלות נמוכה ובהפעלה של אנשים מהשטח שאינם טכנאי מעבדה. לדוגמה, כאשר מעמיסים במפעל מוצרים למשלוח, הבודקים בשטח צריכים לבצע את בדיקת המוצרים ולהחליט בו ברגע אם לאשר את העלאתם לקונטיינר.

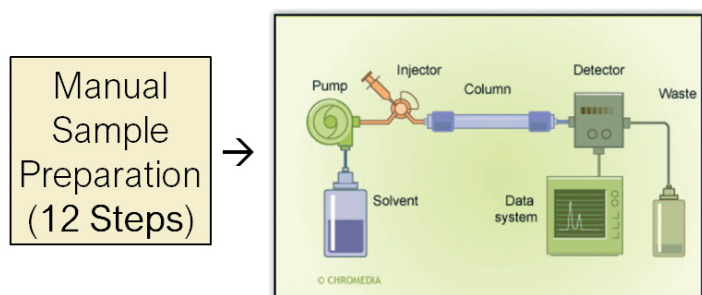
המכשיר הראשון שאנו מפתחים מיועד ליצרני הקפה. זהו מכשיר נייד שמיועד לזהות ספציפית את הרעלן אקירילמיד. אקירילמיד הוא רעלן שנוצר בתהליך הקלייה של הקפה.²

למכשיר שתי פונקציות עיקריות: החלק הראשון של המכשיר נועד להכנת הדגימה. במכשיר לייצרני הקפה יוכנסו פולי קפה למכשיר. המכשיר מעבד את הפולים, ולאחר מיצוי מקבלים דגימה המתאימה לבדיקה.

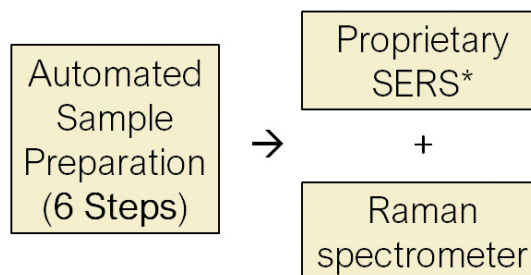
בחלק השני של המכשיר מתבצעת האנליזה של הדגימה בעזרת ספקטרומטר בשילוב עם פיתוח ייחודי של אינספקטו המאפשר את הזיהוי של הרעלן.

הבעיה העיקרית היא שריכוז הרעלנים במוצרי מזון הוא נמוך מאוד. לגבי אקירילמיד מדובר בריכוז הנמוך מ-400 ppb. לכן אנו משתמשים בטכנולוגיה שנקראת SERS - Surface Enhancement Raman Spectroscopy. זו טכנולוגיה מוכרת המבוססת על כך שהאות המתקבל בספקטרוסקופיית ראמאן ממולקולות הספוחות על משטחים מסוימים, גבוה במספר סדרי גודל מהאות המתקבל מאותן מולקולות כשהן אינן ספוחות על המשטח. משתמשים בשיטה זו, למשל, כשבודקים עקבות של חומרי נפץ על מזוודות בשדות תעופה. אנחנו אימצנו את השיטה

HPLC – Today's Method



Inspecto's Method



באדיבות Inspecto

השוואת הטכנולוגיה הקיימת היום לטכנולוגיה שפיתחה Inspecto.

¹ <https://inspecto.io/>

² http://chemcenter.weizmann.ac.il/_Uploads/dbsArticles/709.pdf תוכלו לקרוא על אקירילמיד במזון בכתבה:

לתעשיית המזון. אנו משתמשים בנייר ייחודי שאנו מפתחים הנושא חלקיקים ננומטריים המתאימים ספציפית לסיפוח מולקולות של אקרילאמיד. זהו לב המכשיר שפיתחנו.

המכשירים שלנו בנויים לצרכן ספציפי. לדוגמה, אם משווק של אגוזים קלויים ירצה לרכוש את המכשיר כדי לבדוק אקרילאמיד, יהיה החלק הראשון של המכשיר שונה מהחלק הראשון של המכשיר שבדק אקרילאמיד בקפה, שכן הכנת דגימה מאגוזים שונה מהכנת דגימה מפולי קפה. החלק השני של המכשיר שבו מתבצעת האנליזה, יהיה זהה.

לעומת זאת, אם יצרני קפה ירצו לבדוק רעלנים אחרים בקפה, החלק השני במכשיר יהיה שונה ויותאם לבדיקה של הרעלן הרצוי. היכולת שאנו שואפים אליה היא בדיקה של שני רעלנים בדגימה במכשיר אחד.

כיצד הבשיל הרעיון, ואיך הפכתם את הרעיון לחברת הזנק (start up)?



באדיבות Inspecto

מייסדי Inspecto: יאיר מונטה מנהל הפיתוח העסקי (מימין) ואבנר אבידן המנכ"ל

הרעיון הבשיל כשצפינו בכתבת תחקיר בטלוויזיה, כתבה שכמוה אנו רואים פעמים רבות: הכתבת קונה רכיבים לסלט ולוקחת אותם למעבדה לאנליזה של מרכיבים בלתי רצויים. בבדיקות מוצאים חומרי הדברה בריכוז גבוה, חומרי הדברה אסורים בשימוש וכו'. בגלל אכיפה בלתי מספקת של החוק, אנו הצרכנים אוכלים רעלים. לפעמים, כמו במקרה של האקרילאמיד, החומר אינו מוסף למזון אלא נוצר בעת ההכנה, אך בהחלט רצוי להימנע ממנו. לאחר הכתבה ניסינו למצוא פתרונות קיימים ולא מצאנו, ואז החלטנו לפתח פתרון כזה.

כשהתחלנו לפתח את הרעיון, היינו שותפים באקסלרטור לחברת הזנק בשם Mass Challenge³. אקסלרטור הוא תוכנית הנותנת ייעוץ, קישור לחברות רלוונטיות וכו', ועוזרת לחברת הזנק להתחיל לצבור תאוצה. לאחר ארבעה חודשים עברנו לאקסלרטור נוסף שהוא התוכנית החברתית של עמותת בוגרי 8200⁴. אקסלרטור זה עוסק בפרויקטים בעלי השפעה חברתית. גם למוצר שלנו השפעה כזאת: הורדת התחלואה כתוצאה מירידה בצריכה של רעלנים במזון על בסיס יום יומי.

לאחר גיבוש הרעיון באקסלרטור הגענו לחממה שעוסקת ב-food tech. זוהי החממה The Kitchen Hub, שהקימה חברת שטראוס יחד עם הרשות לחדשנות⁵. החממה היא הגוף שהוביל להשקעה כספית ראשונית בחברה. להשקעה הצטרפה גם חברת המזון הסינית "שינהו".

באיזה שלב של הפיתוח אתם נמצאים?

היום אחרי השקעה ראשונית והוכחת היתכנות, אנחנו עוסקים בפיתוח המוצר הראשון לתעשיית הקפה עבור חברות קפה מובילות בעולם. כרגע אנו מפתחים מכשיר לבדיקת אקרילאמיד ואחר כך נפתח גם בדיקה לאוקרטוקסין (Ochratoxin).

מה עם צרכן כמוני? האם בעתיד תפתחו מכשיר שיאפשר לי לבדוק בסופרמרקט שאין חומרי הדברה בתו? שאני קונה?

היום אין טכנולוגיה שמאפשרת זיהוי של מגוון החומרים הרעילים במוצרי מזון בסופרמרקט, בעזרת מכשיר אחד שהוא מספיק קטן ומספיק זול. אבל המכשיר שלנו משרת את לקוחות הקצה, הצרכנים, בדרך אחרת. אם נעבוד, לדוגמה, עם הרבה יצרני קפה בעולם, יוכלו צרכנים לראות באינטרנט את תוצאות הבדיקות של סוגי הקפה השונים. לחברות יש אינטרס להראות שהמוצרים שלהם נקיים מרעלנים ושבריאיות הצרכנים חשובה להם.

אילו אנשי מקצוע עובדים היום בחברה?

בחברה היום חמישה עובדים - שניים בעלי רקע עסקי ושלושה בעלי רקע טכנולוגי: פיזיקאי שעוסק בספקטרוסקופיית ראמאן ובנושא הננו, ושני כימאים אנליטיים שעוסקים בכל הנושאים הקשורים ל-HPLC, מיצוי הדגימות והכרת התכונות של רעלנים ספציפיים כדי שאפשר יהיה לאפיין אותם לשימוש בטכנולוגיה.

³ <http://israel.masschallenge.org/>

⁴ <https://www.thesocialprogram.co.il/>

⁵ www.thekitchenhub.com

חברת סול-ג'ל¹

ריאיון עם עופר טולדנו, סמנכ"ל המו"פ של החברה

ריאינה וערכה: רותי שטנגר

מהי הטכנולוגיה שפיתחתם?

הטכנולוגיה שלנו מאפשרת כליאה של חומרים פעילים (תרופות) במטריצות אנאורגניות. פרופ' דוד אבנר מהאוניברסיטה העברית פיתח את הטכנולוגיה בשנות התשעים, וחברת "סול ג'ל" הוקמה בסוף שנות התשעים על ידי מנכ"ל החברה אלון סרי לוי שהיה סטודנט של פרופ' אבנר. הטכנולוגיה היא כימוס (אנקפסולציה) בתוך סליקה (זכוכית): החומר הפעיל נמצא בליבה, וסביבו דופן סליקה. זוהי מערכת חדשנית ויעילה להולכת תרופות. אפשר לשלוט בתכונות הדופן ולשלוט, למשל, בקצב השחרור של החומר הפעיל. הסליקה היא כחומר ביד היוצר: אפשר לייצר אותה בדרגות פורזיביות שונות ובעוביים שונים. הסליקה גם מאפשרת בעולם לתרופות אורליות ולתרופות לטיפול מקומי, ועובדה זו מקלה על קבלת אישורים לפיתוחים של החברה. טבליות רבות בשוק מכילות סליקה כמלאן (filler), כי זה חומר אינרטי. זהו יתרון אחד של הסליקה על פני פולימר אורגני. כמו כן הציפוי בסליקה מאפשר פרופיל שחרור צר ומדויק מאוד של החומר הכלוא. כאן אין מדובר בפילמור של שרשראות כמו בפולימר אורגני, ולכן הרבה יותר קל לשלוט על מבנה הדופן ועל קצב השחרור.

אילו מוצרים פיתחתם?

המוצר הראשון שפותח בתחילת שנות ה-2000 הוא כימוס של מסנני קרינה. למסנני קרינה שטח מגע גדול עם העור וריכוזם במוצרים למניעת שיזוף גדולה. לכן שימוש במוצרים שהיו בשוק הביא לכך שמצאו ריכוז גבוה של מסנני קרינה בדם. מסנני הקרינה חייבים להיות על העור, אך היה רצוי שלא יהיו במגע איתו, ולכן כלאנו אותם בתוך סליקה. הסליקה שקופה, ולכן השמש חודרת דרך המעטפת השקופה. החלקיקים נמצאים על העור, אך גדולים מכדי לחדור דרך העור.

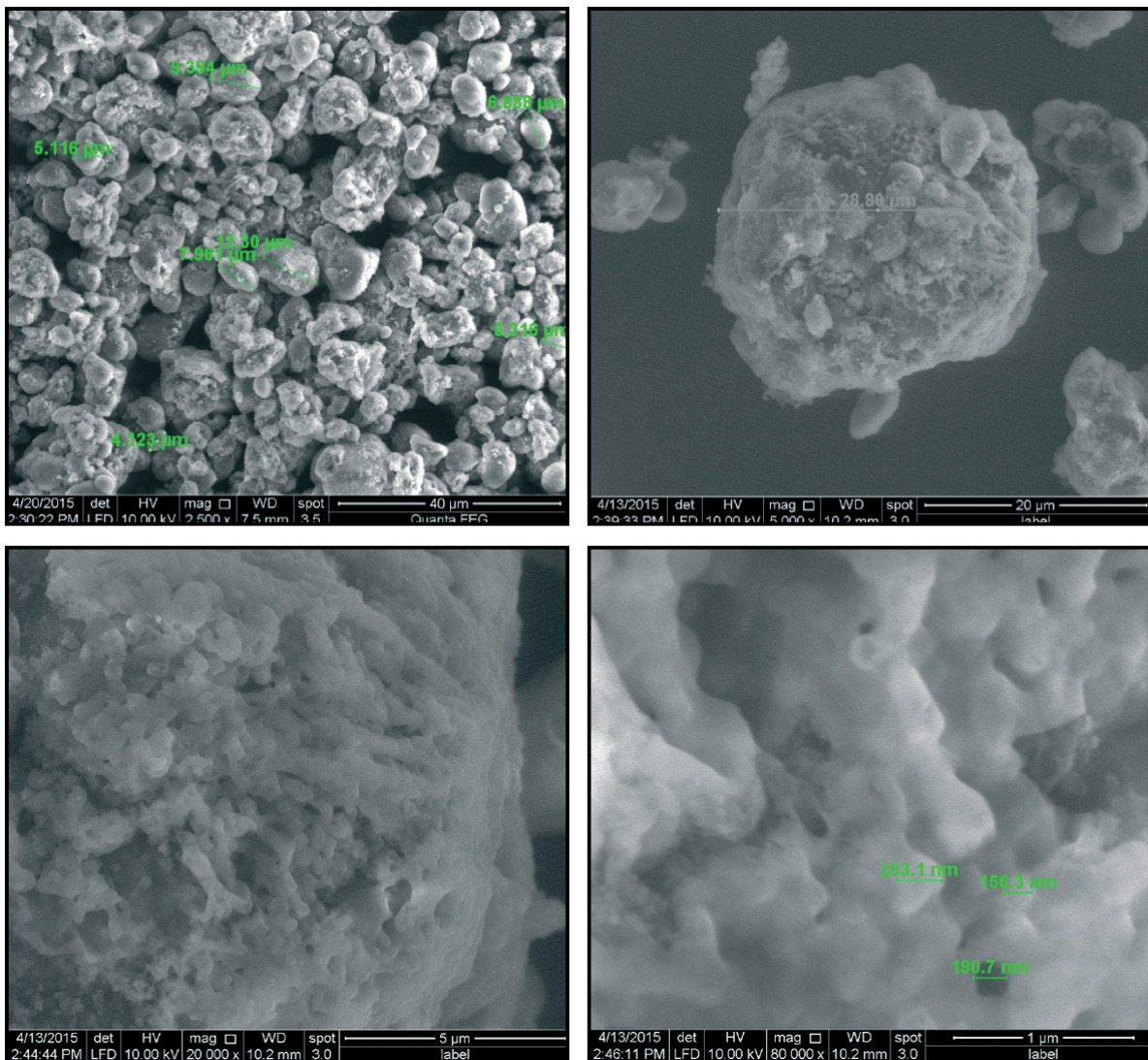
אנחנו ייצרנו את המוצרים הסופיים, והם נמכרו דרך חברת Merck. בסופו של דבר נמכר העסק הזה ל-Merck. ישנם מספר רב של קרמים עם מסנני קרינה של חברות כמו אסתי לאודר ועוד, המכילים מסנני קרינה שיוצרו בטכנולוגיה שלנו. מאות טונות של מסנני קרינה בכימוס יוצרו ב-15 השנים האחרונות.

ב-2007 עברנו לתחום התרופות, לאפליקציות לטיפול מקומי דרמלי: תרופות למחלות עור. התחלנו עם בנזואל פראוקסיד, תרופה ידועה לאקנה (פצע בגרות). זהו מוצר זול ללא מרשם, אך הטכנולוגיה שלנו משפרת את סבילות העור למוצר ומפחיתה את הגירוי שיוצר הבנזואל פראוקסיד. חומר זה פעיל גם כנגד מחלת הרוזציה (Rosacea). זהו מעין אקנה של אנשים מבוגרים המתבטא באדמומיות ופצעונים קטנים בפנים. לאנשים מבוגרים שהם בעלי עור דק ורגיש, יש רגישות גבוהה לבנזואל פראוקסיד. הניסוי הקליני של בנזואל פראוקסיד הכלוא בתוך הסליקה הראה כי סבילות החולים לחומר גברה, והם כמעט ולא סבלו מתופעות לוואי. אנחנו בשלבי פיתוח מתקדמים לניסויים קליניים סופיים.

תרופה נוספת שנמצאת בפיתוח מבוססת על שני חומרים, שכל אחד כלוא בכמוסה נפרדת.

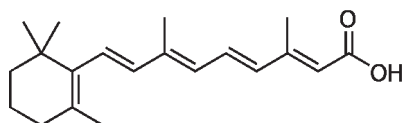
טרטינואין (Tretinoin = all-trans retinoic acid), נגזרת של ויטמין A, הוא תרופה נוספת הנפוצה בשימוש לפצעי בגרות. השילוב של בנזואל פראוקסיד וטרטינואין הוא מצוין, שכן כל אחד מהם עובד במנגנון שונה לטיפול באקנה. אקנה נגרם על ידי חיידק אנארובי שנמצא תמיד על העור. בגיל ההתבגרות נוצר חלב רב, והבלוטות בעור נסתמות. נוצרת סביבה שומנית ללא חמצן, ואז החיידק מתרבה היטב וגורם לפצעים. טרטינואין יודע לפתוח את זקיקי השערה ובנזואל פראוקסיד קוטל את החיידק. זהו שילוב סינרגטי. כאשר שני החומרים מעורבבים, בנזואל פראוקסיד, שהוא מחמצן חזק, מפרק את הטרטינואין, ולכן אי אפשר היה לשלב ביניהם. הפתרון המקובל היה להפריד בין שתי התרופות: באחת להשתמש בבוקר ובשנייה - בערב. אנחנו הפרדנו את שתי התרופות לכמוסות נפרדות. זהו השילוב לטיפול מקומי הכי טוב שקיים בשוק.

¹ <http://www.sol-gel.com/>

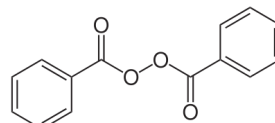


באדיבות חברת סול-גיל

כמוסות של בנזואיל פראוקסיד עטוף בסיליקה. התמונות צולמו בעזרת מיקרוסקופ אלקטרוני סורק (SEM).
למעלה משמאל: הגדלה פי 2500; מימין: הגדלה פי 5000; למטה משמאל: הגדלה פי 20,000; מימין: הגדלה פי 50,000.



טרטיונאין³



בנזואיל פראוקסיד²

שני המוצרים נכנסים לפזה השלישית של פיתוח תרופה, ואז יוגשו לאישור FDA. יש לשער שבתוך שנתיים-שלוש הם יימכרו בשוק.

² By User: Bryan Derksen [Public domain], from Wikimedia Commons

³ By Edgar 181 [Public domain], from Wikimedia Commons

תוכל להסביר מהי טכנולוגיית סול-ג'ל?

סול-ג'ל הוא התהליך שבו אנו משתמשים ליצירת הסיליקה על פני השטח של חלקיקי התרופה הנמצאים במים. הטכניקה מאפשרת ליצור את המעטפת בטמפרטורת החדר בניגוד להתכה של סיליקה המתרחשת בטמפרטורה גבוהה ופוגעת בחומר הפעיל שהוא חומר אורגני.

בשלב הראשון יוצרים סיליקה מהמונומרים. נוצרים חלקיקים ננומטריים של סיליקה בתמיסה קולואידית שנקראת סול. החלקיקים הננומטריים הם פולימר עם קצוות סילנול Si-OH . בשלב השני חלקיקי הסיליקה עוטפים את חלקיקי החומר הפעיל (התרופה). כיצד? ב-pH ניטרלי הסיליקה טעונה מטען חשמלי שלילי. טוענים את החלקיקים של התרופה במטען חיובי בעזרת חומרים פעילי שטח קטיוניים. חלקיקי הסיליקה נמשכים לחלקיקי התרופה הטעונים, נספחים עליהם, ואז נוצרים קשרים בין חלקיקי הסיליקה, ונוצרת מעטפת סביב חלקיקי התרופה - זהו הג'ל. הקשרים הנוצרים הם קשרים קוולנטיים (קשרי דחיסה) בין קבוצות ה-OH- שעל חלקיקים ננומטריים סמוכים. הסיליקה היא הידרופילית, והדופן העוטפת את החומר הפעיל ספוגה במים לכל אורך חיי המוצר.

כיצד התחיל הרעיון, וכיצד הפכתם את הרעיון לסטרט אפ?

מייסד החברה הוא אלון סרי לוי שעשה דוקטורט אצל פרופ' אבנר. לאחר הפוסט דוקטורט הוא ביקש רישיון מהאוניברסיטה העברית להקים חברה על בסיס הרעיון של פרופ' אבנר.

סול-ג'ל החלה כחברת הזנק (סטארט-אפ) שמומנה מקרנות הון סיכון. גיוס הכסף נערך בשלושה סבבים. עם הכסף שהתקבל מחברת Merck עברנו לנס ציונה וב-2007 חתמנו על הסכם עם חברת תרופות אמריקנית לפיתוח תרופות נגד אקנה - Medicis. ב-2013 נרכשה החברה, הפרויקט נסגר והוחזר לסול-ג'ל. לחברה לא היו משאבים להמשיך את הפיתוח, ומורי ארקין זיהה את הפוטנציאל וקנה את החברה, הזרים עשרות מיליוני דולרים לפיתוח, והחברה הונפקה בנסד"ק. כבר שלוש-ארבע שנים שהחברה אינה חברת הזנק, אלא חברת תרופות לכל דבר.

אתה כימאי - מה תפקידך בחברה?

אני סמנכ"ל המחקר והפיתוח. עשיתי דוקטורט אצל פרופ' שלמה מגדסי מהאוניברסיטה העברית בתחום של כימית פני שטח. סיימתי את הדוקטורט בשנת 2008. לאחר מכן עבדתי בחברת מכתשים והייתי אחראי על הפורמולציות.

מה מעמדה של ישראל בעולם בשילוב טכנולוגיות חדשות בתרופות?

היום קיימים שני כיוונים בפיתוח תרופות: כיוון אחד הוא פיתוח תרופות שהחומר הפעיל בהן חדשני לחלוטין. זה יכול להיות חומר כימי או חומר ביולוגי, והיום זו מסת הפיתוח בביוטכנולוגיה הישראלית.

הכיוון השני - תחום קטן יותר - הוא פיתוח מערכות הובלה של תרופות. תחום זה מפותח פחות בישראל. יש כמה חברות שעוסקות בכך, אך הן עוסקות בעיקר בתרופות אוראליות או בתרופות תוך-ורידיות. סול-ג'ל נכנסה לנישה ריקה של תרופות לטיפול מקומי. הייתה חברה אחת נוספת שעסקה בתחום זה ופיתחה טכנולוגיית מיקרו-ספונג'. אלה הם חלקיקי ספוג שלתוכם מספיגים חומר פעיל. מגבלותיה של מערכת זו הן גדולות בהשוואה למערכת שלנו שנתפרת ספציפית בהתאמה מדויקת לכל מטר.

איננו מכירים טכנולוגיות מתחרות, ולכן יש פה משהו ייחודי לתעשייה הישראלית - כניסה לשטח תרופות העור. החברות הגדולות בעולם אינן אוהבות תחום זה, כי הוא קטן יחסית וכחות רווחי, ואינו עומד בסדר הגודל של תרופות למחלות לב, קרוהן וכו'. נכנסנו לשדה בלתי חרוש ואנו שולטים בו.

חברת Watergen

איריס טולידנו, מנהלת השיווק

אחת הבעיות הקריטיות של העולם המודרני היא מחסור במי שתייה, מחסור שהולך ומחריף ככל שתנאי האקלים הופכים לקיצוניים יותר ומקורות המים מזדהמים. על פי נתונים שפרסם האו"ם, 1.7 מיליון ילדים מתחת לגיל חמש מתים בכל שנה כתוצאה ממחלות הנגרמות ממחסור במים הראויים לשתיה, וכ-2 מיליארדי אנשים ברחבי העולם נאלצים לשתות מים ממקורות מזוהמים המכילים חיידקים מסכני חיים. על פי תחזיות עדכניות, בשנת 2025 כמחצית מאוכלוסיות העולם תסבול ממחסור במי שתייה.

חברת Watergen המפתחת מכונות לייצור מים מהאוויר, מחזיקה בפתרון לבעיה חמורה זו. החברה שנוסדה בשנת 2009 יכולה לייצר כמויות גדולות של מים בלי צורך בתשתיות מלבד חשמל. בתחילת דרכה כחברת הזנק ההתמקדה Watergen בפיתוח פתרונות לייצור מים לחיילים בחזית הצבאית.

ד"ר מיכאל מירילשווילי, בעל חברת 'באר יצחק אנרגיה', הבין את הפוטנציאל הגלום בחברה ובשנת 2014 השקיע בה והעניק לה את המשאבים הדרושים להבשלת הטכנולוגיה ולפריצה מסחרית גלובלית הפונה לשוק הממשלתי והאזרחי. חזון החברה הוא אספקה בלתי מוגבלת של מי שתייה באיכות גבוהה לכל מקום בעולם, ללא כל תלות במשאבי טבע מלבד האוויר ומתוך אמונה כי לכל אדם צריכה להיות גישה למים ראויים לשתיה, ללא תלות במוצא, לאום, צבע או דת.

הפתרון של חברת Watergen פשוט אך חדשני. היא מייצרת כמות עצומה של מי שתייה צלולים מהאוויר, משאב טבע גלובלי שלעולם אינו מתייבש, ומנצלת את האנרגיה בצורה היעילה והזולה ביותר - עד ארבעה ליטרים מים לכל קילוואט-שעה של חשמל. מכונה אחת של Watergen מסוגלת לייצר מי שתייה בכמות המספיקה לבית ספר, לבית חולים או למרכז קהילתי גדול, וכמה מכונות יכולות לייצר כמות מים המספיקה לכפר שלם ואפילו לעיר. בשנת 2017 סיפקה Watergen מים לאלפים שנפגעו מסופות ההוריקן ביוסטון, טקסס ובמיאמי, פלורידה, ונתרו ללא מי שתייה.



מכונות של Watergen מספקות מים לאיזור מוכה אסון בארה"ב

הטכנולוגיה

בבסיס הטכנולוגיה של Watergen עומד עיקרון פשוט של ניצול הלחות הקיימת באוויר על מנת לייצר מי שתייה. המכונות שמייצרת Watergen שואבות את האוויר, מקררות אותו עד שהוא מגיע לטמפרטורת "נקודת הטל"¹ (Dew point) ויוצרות מאגר של מים מזוקקים.

מובן שהתהליך אינו פשוט כפי שהוא נשמע. על מנת לייצר מים ראויים לשתיה, האוויר עובר מספר תהליכים:

- בשלב הראשון נשאב האוויר אל תוך המכונה ועובר דרך מערכת טיהור אוויר המסננת חלקיקים גדולים יותר הקיימים באוויר. לדוגמה: חול, אבק, זיהום אוויר וכו'.

¹ טמפרטורת הטל היא הטמפרטורה של האטמוספירה שמתחתיה טיפות מים מתחילות להתעבות ונוצר טל. טמפרטורה זו משתנה בהתאם ללחות האוויר וללחץ האטמוספרי.

- האוויר הנקי נכנס למערכת ייצור המים, שם הוא עובר תהליך של קירור עד שהוא מגיע לנקודת הטל, שבה האוויר רווי באדי מים. קירור נוסף של האוויר הרווי גורם למים להתעבות ומאפשר לאסוף את המים. מערכת "הפרדת הלחות מהאוויר" היא הלב הייחודי של המכונה, וחברת Watergen מחזיקה בשורה של פטנטים המאפשרים את הטכנולוגיה הזו.
- המים המיוצרים על ידי המכונה עוברים תהליך של טיהור על מנת לשלול קיום של חיידקים ווירוסים הנמצאים באוויר. כמו כן מוסיפים למים מינרלים על מנת להפוך אותם למים טובים יותר לשתייה.
- המים שיוצרו יכולים להיאגר בתוך ככלים או להתחבר לצנרת הקיימת במבנה, על פי הצורך. אם המים נאגרים במכלים, בתוך או מחוץ למכונות, דואגים שימשיכו לעבור תהליכי סחרור וטיהור, על מנת לשמור על איכות המים לאורך זמן.

הטכנולוגיה שפיתחה החברה היא מערכת ה-GENius הנמצאת בליבת המערכות של Watergen. המערכת מורכבת מ"עלים" דקים של פלסטיק (חומר בעל מוליכות חום נמוכה) ומאייד פנימי. היעילות האנרגטית הגבוהה המייחדת את הטכנולוגיה של Watergen מתאפשרת בזכות מחזור האוויר חזרה אל תוך התהליך ובזכות השימוש בפלסטיק, המאפשר קירור וחימום הדרגתי של זרמי האוויר, בעוד שתהליך עיבוי המים מוגבל לאזור ייעודי קטן. בחברה עובדים מספר כימאים, כולל סמנכ"ל איכות המים המגבש את מפרט הדרישות מביצועי המערכת ומעבירן לפיתוח בשלב הגדרת המוצר. הכימאים עובדים הן במרכז הפיתוח והן במעבדות שבהן מתבצעות הבדיקות השוטפות ובקרת האיכות של המים כדי להבטיח שהמערכת מייצרת מים שעומדים בתקני איכות המים הגבוהים הנדרשים. החברה אף עובדת בשיתוף פעולה עם חוקרים באוניברסיטת תל אביב.

מוצרים

כיום Watergen מייצרת שני סוגים של מכונות המיועדות לשוק הממשלתי/המוסדי והפרטי:

- GEN-350 - מכונה המייצרת עד 600 ליטרים של מי שתייה ביום ומתאימה למוסדות ציבוריים, כמו בתי ספר, בתי חולים, מבני תעשייה ומגורים. המים שהמכונה מייצרת עוברים תהליכים של טיהור משקעים, הוספת מינרלים וסינון באמצעות פחם פעיל. כמו כן המים עוברים טיהור מיקרוביולוגי באמצעות מנורת UV. מכונה זו כוללת מיכל אגירה פנימי בגודל 200 ליטר ומספקת מים קרים ופושרים. המכונה ניתנת לשינוע בקלות יחסית, מה שהופך אותה לפתרון אידיאלי לאספקת מים במצבי חירום או למקומות מבודדים שקשה להוביל אליהם מים.
- Large Scale - מכונה תעשייתית המייצרת עד 5,000 ליטרים ביום. מכונה אחת או מספר מכונות כאלה יכולות לייצר מים עבור כפר, קהילה, יישוב או עיר. מספר המכונות נקבע לפי כמות המים הדרושה. במכונה זו המים עוברים טיפול זהה לטיפול שהם עוברים ב-GEN-350, להבטחת מים ראויים לשתייה. מכונות ה-Large scale אינן כוללות מכל מובנה, ולכן יש צורך במכל אגירה חיצוני הכולל טיפול למים העומדים.
- החברה מפתחת גם מכונה קטנה יותר שתוכל לייצר כ-25 ליטרים מים ביום ותתאים למשרדים או לשימוש ביתי. אנו צופים כי מכונה זו תושק לקראת הרבעון השלישי בשנת 2018.

Watergen נמצאת בשלבים מתקדמים של מעבר מפיתוח לייצור המוני: החברה עובדת היום עם שלושה מפעלי ייצור בארץ ומפעל בארצות הברית, ובימים אלו מתחילה לספק את המכונות שהוזמנו ממנה ברחבי העולם.



אספקת מים בפילוט בהודו, ספטמבר 2017

* התמונות באדיבות חברת Watergen

בית-ספר טכני גבוה
„מונטפיורי“
 נוסד בשנת 1925
 תל-אביב, רח' מונטפיורי מס' 7

אינסטיטוט לכימיה
 אינדוסטריאלית
Institute of Industrial Chemistry
 לפי תכנית אוניברסיטאות צרפתיות.

שנה ראשונה		שנה שנייה	
(1) פיזיקה נסיונית	(1) כימיה פיזיקלית	(5) טכנולוגיה כימית I	(2) כימיה אורגנית I
(2) כימיה אורגנית II	(4) אנליזה מסמטית נבונה	(2) כימיה אורגנית II	(6) כימיה אורגנית II
(3) כימיה אנאורגנית I	(5) שריון טכני	(3) כימיה אנאורגנית II	(7) מעבדה כימית: (א) אנליזה כמותית I (ב) אנליזה איכותית II
(6) מעבדה כימית: (א) אנליזה כמותית I (ב) אנליזה איכותית II			

לשנה ראשונה מתקבלים מתלמידים בעלי השכלה תיכונית או גומרי קורס מכין בביה"ס „מונטפיורי“.

גומרי שני קורסים מקבלים תאר של **כימאי**.

מתלמידי האינסטוט הכימי של בית-הספר הטכני הגבוה „מונטפיורי“ מתקבלים לקורס המתאים של אוניברסיטאות ממשלתיות אירופיות.

מנהל האינסטוט לכימיה אינדוסטריאלית ד"ר ריגאי (מהאוניברסיטה בפלורנציה)	מנהל המעבדה הכימית מנהל בית-הספר הטכני הגבוה „מונטפיורי“ ד"ר חזוני (אסיסטנט האוניברסיטה בקניגסברג)	מנהל בית-הספר הטכני הגבוה „מונטפיורי“ י. גלזמן
---	---	---

רשם נגישות - ת"מ רחוב הרצל 44

V1975/80/3

אינסטיטוט לכימיה אינדוסטריאלית, 1931
 "מסע בזמן", אוסף האפמרה - הספרייה הלאומית.

**Polytechnical School
MONTEFIORE**

TEL-AVIV.

Higher Technical Institute

Montefiore str. 7



**בית ספר טכני גבוה
מונטיפיורי**

תל אביב

נוסד ע"י המהנדס הראשי י. גלזמן

מי שחזר פוזנא דענא בנתי הספר הנבחר בנחמיה וברחמים

רחוב מונטיפיורי 7

ביהם הטכני הגבוה "מונטיפיורי" נוסד בשנת 1925 הגו ב"ס גבוה בדוגמת הפוליטכניון הגרמני העירוני.

ליד ביהם קימות המחלקות:

- א. בנין מכונות
- ב. אלקטרוטכניקה
- ג. תורת הבנין
- ד. חימיה

ליד ביהם קימות מעבדות עשירות משיכלות ומסודרות באופן מודרני למקצועות:

חימיה, פיסיקה, אלקטרוטכניקה ומיכניקה.



המעבדות



לסימסטר הראשון מתקבלים מתלמידים בעלי תעודת גמר ב"ס תיכוני.

מי שאין לא תעודת בגרות מתקבל למורס המכין

משך זמן הלמודים - שלש שנים - 6 סימסטרים

העומדים את חק למודים מקבלים תעודת מתאימה עם תאר מהנדס.

מתלמידי ביהם הטכני הגבוה "מונטיפיורי" מתקבלים עד סוף תעודת ביהם
למורס המתאים כבר בתי הספר הנבחרים שבארופה ובאמריקה.
למקלות מי 100 איש מתלמידי בית ספרו משתלבים בבתי הספר הנבחרים בחו"ל.
לביהם ישנן סמינריות בשביל המתלמידים שאין
ידם משנת לשרם את שבר למורס.
למתלמידים המפגשים בודיעותיהם נגזת קורת מיוחדת.

תערוכה תמידית שר עבודות המתלמידים ומעבדה.

קבלת מתלמידים יום יום | תכנית הלמודים חנם | שבר הלמודים נוח

כמו כן קימים סורסים קצרוזמניים בשביל חשמלאים, שרברכנים ומשרטטים.

על הפרטים להודע במשרדנו: **ר' מונטיפיורי No. 7** מי 8 - לפהצ ומי 9 - 5 אתהצ.

ההנהלה.

משך זמן הלמודים - קבלת מתלמידים יום יום, 1929
"מסע בזמן", אוסף האפמרה - הספרייה הלאומית.

אגודה להשתלמות במדע, חיפה
(בית שמואל פבונר ז"ל)

במוצ"ש 10 בפברואר 1934 תתקיים בבית האגודה

ישיבה חגיגית
ליום-הולדת המאה של
ד.א. מנדל'ייב

1. פתיחה
 2. חיי מנדל'ייב וערכו בפסיקה החדשה
 3. ערכו של מנדל'ייב בחימיה השמושית
 4. תולדות המערכה המחזורית
- א. אליוף
א. צ'רניבסקי
ז. חפץ
י. קלוגאי

ההתחלה בשעה 8³⁰

מחיר הכרטיסים 20 מא"י, לחברי האגודה, פועלים ותלמידים 10 מא"י.

סם קרן קימת שילוק

ספרית האגודה פתוחה בכל יום מ"4-9. (חוץ מיום ששי). נמצאים בה ספרי מדע בכל השפות. נתנים ספרים גם הביתה.

ישיבה חגיגית, 1934

"מסע בזמן", אוסף האפמרה - הספרייה הלאומית