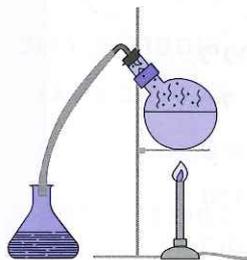


# פרויקט מזעור המעבדות לכימיה בחטיבה העליונה ובחט"ב



זהבה ליבנה, ד"ר מרדכי ליבנה וד"ר פרסקי רחל  
המחלקה לכימיה והמרכז להוראת המדעים, אוניברסיטת בר-אילן,

**ה** חל מהמאה ה-19, התבססו מעבדות ההוראה המסורתיות בכימיה (בעיקר בכימיה אורגנית) על עבודה עם כימיקלים בכמויות של מולטי גרמים. בתחילת שנות ה-80 של המאה ה-20, פותחה לראשונה גישה חדשנית להוראה במעבדה, כשהרעיון העומד מאחוריה הוא "מזעור". המעבדה הממוזערת נחשבת על ידי רבים מאנשי המקצוע כ"החידוש הגדול" ביותר בתחום הוראת המעבדות בכימיה מאז ומעולם. במעבדה הממוזערת עובדים עם כמויות חומרים הקטנות פי 100 - 1000 בהשוואה לכמויות שבהן השתמשו ועדיין משתמשים במעבדה המסורתית. מדובר בעשרות עד מאות מיליגרמים במעבדה הממוזערת בהשוואה לגרמים בודדים ועד עשרות גרמים במעבדה המסורתית. לצורך ביצוע ניסויים בכמויות כה זעירות, פותחו במקביל לניסויים גם מערכות כלים מתאימות. באוניברסיטאות ובמכללות רבות בעולם מתקבלת גישה זו בהתלהבות.

## רקע: מעבדות ההוראה בכימיה

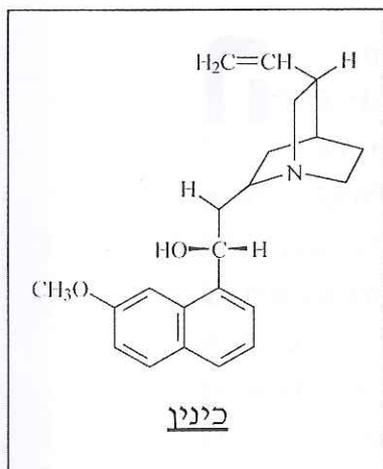
העבודה המעשית במעבדה מהווה מרכיב מרכזי בתכנית הלימודים האקדמית לסטודנטים לכימיה. המעבדה היא למעשה "סטאז'" של הסטודנט, שבו הוא רוכש מיומנות בטכניקות ושיטות עבודה. כמו כן, מומחשים במעבדה באמצעות הניסוי, עקרונות וחוקים שנלמדים בקורסים התיאורטיים הניתנים במקביל.

בטבלה הבאה מובאות הכמויות של חומרי המוצא לשתי תגובות קלאסיות בכימיה אורגנית, כפי שנכתב בספרי מעבדה פופולריים משנים שונות.

השנה	הכנת אצטאניליד מאנילין (כמות חומר מוצא (גרם))	חימצון בנזאלדהיד (כמות חומר מוצא (גרם))
1902	46.2	50.0
1915	25.0	25.0
1933	25.0	10.0
1941	20.0	16.0
1980	10.0	10.0

ניכרת אמנם ירידה בכמות חומרי המוצא במהלך השנים, אך עדיין הכמויות הן בסדר גודל של עשרות גרמים. הסיבה העיקרית לעבודה בכמויות כאלה נבעה מאופי העבודה. בעבר, שיטות הזיהוי של חומרים אורגניים התבססו, בשלב ראשון, על פרוק כימי של מולקולות לפרגמנטים, מולקולות קטנות יותר, או על יצירת נגזרות כימיות של החומר. בשלב שני, הושו התכונות הפיזיקליות של הפרגמנטים או של הנגזרות שהתקבלו, עם תכונות פיזיקליות של חומרים ידועים. אחר כך, כמו ב"פזל", נקבעה נוסחת המבנה של החומר המבוקש. כך,

במשך עשרות שנים, נדרשו בדרך כלל לקביעת נוסחה של חומר כמויות עצומות של חומרים. הסיפור הבא ממחיש זאת היטב.



בשנת 1630 גילו הספרדים שהגיעו לדרום אמריקה, שתמצית עלים של עץ הצינקונה, הגדל בהרי האנדים בפרו, עוזרת לרפא חולים ממחלת המלריה. רק בשנת 1820 בודד החומר הפעיל בתמצית, שנקרא בשם כינין. השלב הבא במחקר היה לקבוע את נוסחת המבנה של כינין, ולמשימה זו נרתמו טובי הכימאים בעולם (בעיקר גרמנים). למעלה משני דורות עברו ונדרשו כמויות עצומות של כינין עד שפוענח המבנה בשנת 1908. בהמשך, ניסו הכימאים להכין

כינין סינתטי במעבדה, ובשנת 1944 הצליחו בכך האמריקאים וודוורד (חתן פרס נובל) ופון-דרינג.

בשנות הששים של המאה ה-20 התפתח מאד השימוש בספקטרוסקופיה ונבנו מכשירי זיהוי בעלי עוצמה אדירה (בעיקר בתחום התהודה המגנטית הגרעינית, NMR). כתוצאה מכך, שיטות הזיהוי נעשו מהירות הרבה יותר ונדרשו לשם כך כמויות קטנות בהרבה של חומרים. בימינו, דרושים לכימאי אורגני רק מיליגרמים בודדים של חומר וכמה שעות של עבודה לכל היותר, כדי לקבוע את נוסחת המבנה של חומר בלתי ידוע בדרגת מורכבות הדומה לזו של הכינין.

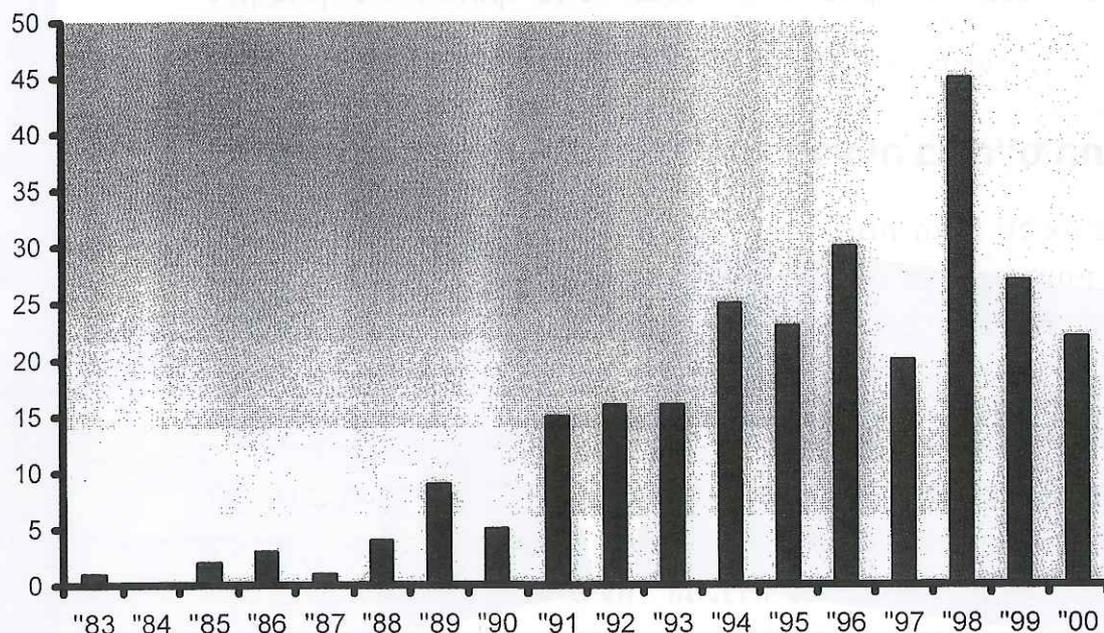
פיתוח מכשור אנליטי והשימוש במאזנים אנליטיים דיגיטליים, הביאו כמה מן העוסקים בהוראת הכימיה (במעבדה) להרהר מחדש בנושא הניסויים. כתוצאה מכך פותחה שיטת המזעור.

גישה זו פותחה במקביל במקומות שונים בעולם ולא במקרה החלו בניסויים דווקא בכימיה אורגנית. נכתבו ספרי מעבדה חדשים ופותחו מערכות כלים ממוזערות המתאימות לניסויים. במשך 10 השנים האחרונות, מתנהלות באופן שוטף במכללת Merrimack, (המכון הלאומי האמריקאי למזעור מעבדות), סדנאות למעבדה ממוזערות, בהן משתתפים כימאים ומורים לכימיה מארה"ב ומחוצה לה.

גישת המזעור מתפתחת היטב גם בסין, הולנד, שבדיה, אוסטריה, מכסיקו, אוסטרליה, דרום-אפריקה, מצרים, בריטניה ועוד. בסוף שנת 2001 יתקיים בהונג-קונג הכנס הבינלאומי הראשון שיוקדש כולו לנושא המעבדה הממוזערת.

בישראל מתקיימים, בשלב זה (למיטב ידיעתנו), קורסים העושים שימוש במעבדה ממוזערת רק באוניברסיטת בר-אילן. הקורסים ניתנים כרגע בכימיה אורגנית בלבד, אך בכוונתנו למזער בשנים הקרובות גם קורסי מעבדה נוספים בכימיה כללית ואנאורגנית ובביוכימיה.

על הפופולריות של המעבדה הממוזערת תעיד גם העובדה, שבירחון החשוב להוראת הכימיה, *Journal of chemical education*, מוקדשת בקביעות פינה מיוחדת למעבדה הממוזערת. כמות הפרסומים בנושא גדלה בהדרגה החל משנות השמונים, וכיום היא התייצבה על כמה עשרות מאמרים בשנה, כמתואר בתרשים הבא.



מספר המאמרים ב- *J. Chem. Ed.* העוסקים במעבדה הממוזערת בשנים 1983-2000

את הסיבות לפופולריות הרבה שבה זוכה המעבדה הממוזערת ניתן להבין היטב לאור היתרונות הרבים שהיא מציעה.

### יתרונות העיקריים של המעבדה הממוזערת:

1. **רמת בטיחות גבוהה:** בשל הכמויות הקטנות של הכימיקלים בהם משתמשים, מצטמצם מאד הסיכון לשריפות, פיצוצים, ומגע עם כימיקלים רעילים.
2. **חיסכון רב בעלות הכימיקלים, עלות הציוד ועלות אנרגיה:** על פי חישוב שעשה משרד האנרגיה האמריקני, ההשקעה הראשונית במעבדה הממוזערת מחזירה כבר בשנה הראשונה 86 סנט לכל דולר מושקע.

3. **קיצור משמעותי של זמן הניסוי:** במעבדה הממוזערת מתקצרים זמני הניסוי בפקטור של 1.5-10. עובדה זאת מאפשרת למורה ה"קצר בזמן", לשבץ ניסויים רבים יותר במהלך ההוראה שלו.
4. **ניצול יעיל יותר של כיתות המעבדה, וחדרי (ארוכות) האחסון של הכימיקלים והציוד.**
5. **ירידה דרסטית בכמות הפסולת המצטברת ובשברי כלים.**
6. **חינוך לעבודה מדויקת, חינוך לחיסכון, לבטיחות ולמודעות גדולה לנושאים של איכות סביבה.**

מבחינה דידיקטית הוכח, (בעולם וגם באוניברסיטת בר-אילן), שהעבודה במעבדה הממוזערת אינה פוגעת במטרות החינוכיות ובהישגי התלמיד. ההפך הוא הנכון. במעבדת הממוזערת ניתן בדרך כלל להתמקד בניסוי עצמו וללא התעסקות יתר בבניית מערכות גדולות, דבר התורם לשיפור ההישגים הדידיקטים ולהפנמת החומר.

## **שילוב המעבדה הממוזערת בלימודי הכימיה בביה"ס התיכון ובחט"ב.**

חלק ממטרות המעבדות בביה"ס התיכון העיוני, שונות מאלה של אוניברסיטאות ומכללות. רוב תלמידי התיכון אינם מיעדים לעצמם את הכימיה כמקצוע לעתיד, ולפיכך ברור שאין לביצוע המעבדות שום תפקיד ספציפי של הכשרה טכנית. מטרת המעבדה בביה"ס היא לאפשר לתלמיד התנסות אישית בנושאים התיאורטיים שלמד בכיתה ועל ידי כך להמחיש, להבין ולהפנים את החומר המופשט טוב יותר.

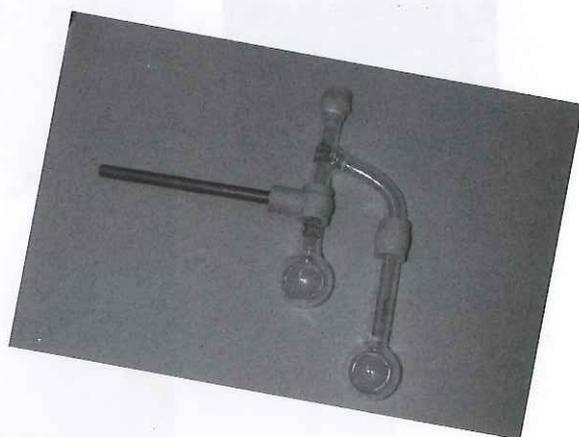
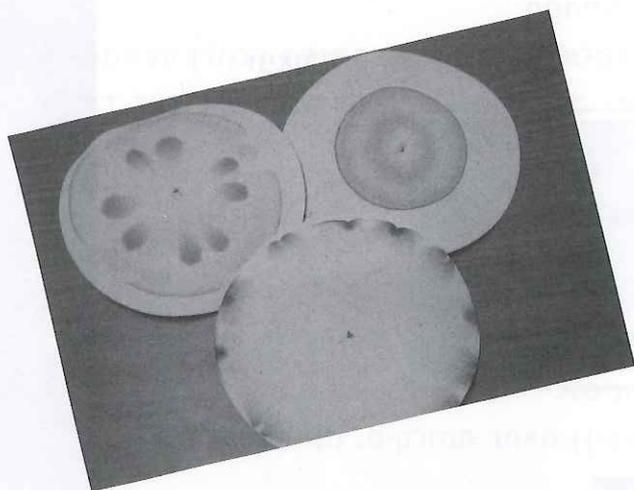
לפי תוכנית הלימודים בכימיה לחטיבה העליונה (תשמ"ז), שהוכנה ע"י ועדת המקצוע לכימיה, קיימת המלצה ששליש מסה"כ השעות המוקצבות ללימודי הכימיה יתקיים במעבדה. בדרך כלל אין זה כך ומצב שיעורי המעבדה בבתי הספר התיכוניים כיום אינו טוב. קיום שיעורי מעבדה נתון למעשה לרצונו הטוב של המורה, ומכיוון שאין בחינה במעבדה, מורים רבים ממעטים לקיים אותה. כמו כן, קשה למורים לקיים שיעורי מעבדה באופן סדיר בגלל חוסר זמן, בעיות מיקום, עלות כימיקלים וציוד, בעיות בטיחות ורשימות הולכות ותופחות של חומרים אסורים בשימוש. אמנם יש "תחליפי מעבדה" כגון סרטים, הדגמות ושימושי מחשב, אבל עם כל נחיצותם של אלה לגיוון ההוראה, נדרשת גם ההתנסות האישית עצמה, שאין לה תחליף. בפיקוח על הוראת הכימיה מבינים זאת היטב, ובחזונה של המפמ"רית ד"ר ניצה ברנע, יוצעו בעתיד (תשס"ג?) לבתי הספר שלוש "תוכניות מעבדה" כדלקמן:

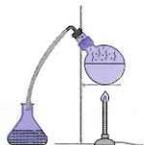
1. ניסויים ממוחשבים (יפותחו בטכניון).
2. ניסויי חקר (פותחו במכון וייצמן למדע).
3. ניסויים ממוזערים (יפותחו בבר-אילן).

עד סוף שנת 2002 אנו מתכוננים (במימון המל"מ) להפיק חוברת מעבדה (ומדריך מפורט למורה), בהם ירוכזו כמה עשרות ניסויים ממוזערים, המשתלבים בתוכניות הלימוד החדשות, שנכתבות בימים אלה על ידי צוותים ממכון ויצמן למדע והאוניברסיטה העברית בירושלים. במקביל לניסויים עצמם תפורסמה המלצות למערכות כלים מתאימות, תוך שימת דגש על עלויות נמוכות.

כדי להציג ביתר פרוט את גישת המעבדה הממוזערת בפני מורי הכימיה בישראל, התחלנו, במקביל לפיתוח הניסויים, להעביר הרצאות וסדנאות בנושא בכל הארץ. עד כה כבר הספקנו להיות בירושלים, בבאר שבע ובחיפה, והרושם שקבלנו מתגובות המורים למעבדה הממוזערת, הוא בדרך כלל חיובי מאד.

להלן מהלך העבודה של שני ניסויים ממוזערים (בעלות נמוכה) שניתן ליישם בקלות בבתי הספר:





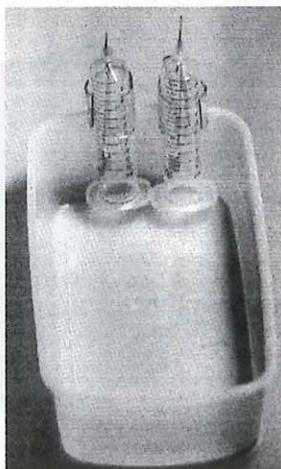
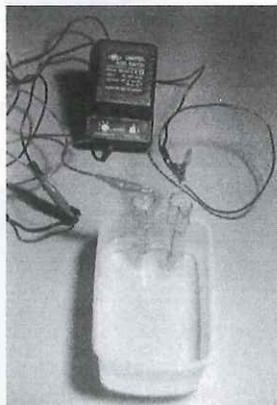
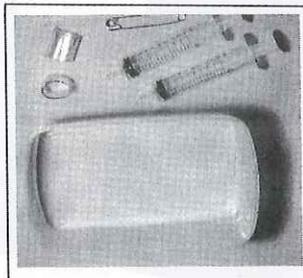
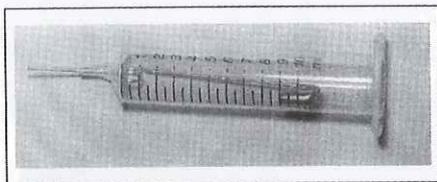
# ניסוי מספר 1 - אלקטרוליזה של מים

**שאלת התמקדות:** מהם התוצרים המתקבלים באלקטרוליזה של מים?

**ציוד וחומרים:** (ראו תמונה)

- אמבט פלסטיק (בנפח של כ-300 מ"ל)
- 2 אלקטרודות שהוכנו ממזרקי פלסטיק (10 מ"ל) וסיכות בטחון.
- 2 מהדקים גדולים (paper clips)
- 2 צינוריות פלסטיק (המשמשות לניקוז מזגנים) חתוכות לאורכן (באורך של כ-2 ס"מ)
- ספק מתח (המספק מתח של 12 V)
- זוג תנינים
- מצית (סיגריות)
- כ-250 מ"ל תמיסת נתרן פחמתי (קרבונט) ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 5-10 %)

תיאור מערכת הניסוי:



## הכנת שתי האלקטרודות:

- לוקחים סיכת ביטחון, פותחים ומיישרים אותה.  
- מוציאים את הבוכנה מהמזרק. מכניסים את סיכת הביטחון למזרק כך שחוד הסיכה יוצא מפתחו הצר (שם "מולבשת", בדרך כלל, המחט).

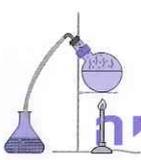
- דוחפים את סיכת הביטחון ככל האפשר לפתח המזרק, ומחזיקים אותה באצבע כך שלא תזוז. מחממים בזהירות עם המצית את קצה המזרק, עד שהפלסטיק ניתן מעט ומולחם סביב סיכת הביטחון. יש להקפיד להמשיך ולאחוז בסיכה עוד כ- 2 דקות, עד שהמזרק מתקרר.

- בעזרת קוטם (cutter), קוטמים את חוד הסיכה (משאירים כ- 2 ס"מ).  
- מכינים אלקטרודה נוספת באותה השיטה.

## מהלך העבודה:

1. מצמידים את צינוריות הפלסטיק לדופן האמבט מפנים, בעזרת המהדקים.
2. מכניסים לתוך האמבט את תמיסת הנתרן הפחמתי.
3. טובלים את "מזרק-אלקטרודה" בתמיסה וממלאים אותו כולו בתמיסת הנתרן הפחמתי. מכניסים את המזרק המלא, כשהפתח כלפי מטה, לתוך צינורית הפלסטיק שעל דופן האמבט (כמתואר בתמונה).  
חוזרים על התהליך עם האלקטרודה השנייה.
4. מחברים תנין אחד היוצא מן הספק לאלקטרודה האחת, ואת התנין השני לאלקטרודה השנייה.
5. מחברים את המערכת לספק המתח (9V-12), ומתחילים באלקטרוליזה. רושמים את התצפיות (לפחות שתי תצפיות) במהלך הניסוי.
6. כאשר הנוזל נדחה לחלוטין (או כמעט לחלוטין) מאחד המזרקים, מנתקים את המזרק מן התנינים.
7. מוציאים את המזרק המכיל מימן מהאמבט מבלי להפוך אותו.
8. מקרבים מצית דולק למזרק שבו המימן. נשמע פיצוץ קל (לא מסוכן).
9. מוציאים את המזרק שבו החמצן ומכניסים קיסם עומם. רושמים תצפיות.

הערות: ניתן לקשור את הניסוי לנושאים נוספים כגון: חמצן-חיזור, תאים אלקטרוכימיים, תאי דלק, התנהגות גזים וכו'.



# ניסוי 2 - פעפוע (דיפוזיה) של הגזים כלור ואמוניה

## ציוד וחומרים:

- צלוחית פלסטיק שבה 96 באריות טיפין קטנות (well plates) + מכסה
- $KClO_3$  מוצק - כמה מיליגרמים
- $NH_4Cl$  מוצק - כמה מיליגרמים
- תמיסות  $NaOH$  16M ו- $HCl$  - כמה טיפות
- תמיסת אינדיקטור (פנולפתלאין/ $AI$ /עמילן); אופן ההכנה: מוסיפים 62 מ"ג עמילן ל-10 מ"ל מים חמים. מרתיחים ומעבירים לבקבוק מדידה של 25 מ"ל. לבקבוק המדידה מוסיפים 42 מ"ג  $AI$  ו-2-3 טיפות של תמיסת פנולפתלאין מרוכזת. משלימים עם מים לנפח כולל של 25 מ"ל.
- 2 טפי זכוכית

## מהלך העבודה:

1. בעזרת החלק הרחב של טפי זכוכית, מוסיפים כמה גרגרי  $KClO_3$  מוצק לבארית שבקצה האחד (שמאלי תחתון) של התבנית, וכמה גרגרי  $NH_4Cl$  מוצק לתבנית שבקצה הנגדי (ימני עליון).

אחרי 2 דקות

אחרי 1 דקה



2. מוסיפים טיפת תמיסת אינדיקטור לבאריות המסומנת ב-X בתרשים הנתון (אפשר לסדר את ההוספה בצורה אחרת). הערה: האינדיקטור מכיל פנול-פתלאין, ההופך אדום בבואו במגע עם אמוניה, ותמיסת יוד/עמילן, ההופכת כחולה במגע עם כלור.

אחרי 5 דקות

אחרי 4 דקות



3. מוסיפים (בו זמנית, ככל האפשר) טיפת  $HCl$  לבארית שבה ה- $KClO_3$ , וטיפת תמיסת  $NaOH$  לבארית שבה האמוניום כלוריד. סוגרים את המכסה. מודדים זמן.

4. מתבוננים בהתפתחות הצבעים בבאריות עם האינדיקטור במשך כ-10 דקות.

תוצאות: להלן 4 תמונות המתארות את התפתחות הצבעים בבאריות שבהן נמצא האינדיקטור. התמונות צולמו על פני כ-5 דקות, והן מוכיחות את תהליך הפעפוע.

הערות: ניסוי זה קשור בעקיפין גם לנושאים כמו חומצה-בסיס וחמצון-חיזור. כמו כן, כדאי לשים לב לתלות עוצמת הצבע במרחק ממקור היווצרות הגז, ולעובדה שגז האמוניה מהיר יותר בתנועתו (מסה מולרית קטנה יותר).