

טכניקות ניסוייות בעלות נמוכה בהוראת המדעים

- מדריך למורי המדעים -

פותח כחלק מפרויקט SALiS – למידה פעילה במדעים

ע"י

ניקול פופ

סילביה מרקוץ'

אינגו אילקס

© ניקול פופ, סילביה מרקיץ', אינגו אילקס
אוניברסיטת ברמן – המכון להוראת מדעי הטבע

ממומן ע"י תכנית TEMPUS של האיוד האירופי: SALiS, למידה פעילה במדעים,
##511275-TEMPUS-1-2010-1-GE-TEMPUS-JCPR (Agreement, 2010-
33821/001-001)

מבוא

משנת 2010 עד 2012 האיחוד האירופי מקדם את פרויקט SALiS, כחלק מתכנית TEMPUS, בעשר מוסדות להשכלה גבוהה משש מדינות. השותפים לפרויקט הם מגיאורגיה, גרמניה, אירלנד, בולגריה, מולדובה וישראל.

SALiS הוא ראשי תיבות באנגלית עבור "למידה פעילה של סטודנטים במדעים". כוונת הפרויקט היא לעודד את הלמידה הפעילה בנושאים מדעיים, הן מבחינה ניסויית והן מבחינת הוראה מבוססת מחקר. למטרה זאת מפותחים ומיושמים במסגרת פרויקט SALiS מודולים להוראה ולאיומן עבור מורי המדעים, האמורים לתמוך בהוראה כמתואר לעיל.

ספר זה מהווה מדריך לשימוש במבחר טכניקות להוראה ניסויית בעלות נמוכה בהוראת המדעים. בניסויים בעלי עלות נמוכה משתמשים בציוד ובכימיקלים אותם פוגשים בהקשרים יומיומיים. ניתן למצוא אותם במרכולים, בחנויות לציוד ביתי ובחנויות של ציוד רפואי ושל ואקווריומים. על כן, הם ניתנים להשגה קלה ובעלות די נמוכה. נלקחים בחשבון גם גורמים כגון זיהום אוויר נמוך ובטיחות.

הטכניקות להוראה ניסויית בעלות נמוכה בהוראת המדעים יכולה לעזור בהורדת עלויות, הפחתת סכנות והקלה בעלות של סילוק שאריות מזהמות. זה מוביל להתנסויות יותר תדירות בחדר הלימוד, ובמיוחד לגישות הוראה הממוכזות בלומד.

אנו מאחלים לכם הנאה והצלחה בשימוש בטכניקות להוראה ניסויית בעלות נמוכה בהוראה ואיומן של מורים.

מריקה קפנדזה ואינגו אילקס

(המתאמים של פרויקט SALiS)



תוכן העניינים

עמוד

1. מונחים 4
2. הפחתת עלויות והשלכות סביבתיות הודות לגישות של מיקרו-סקאלה 8
3. ניסויים עם משאבים שמקורם בחנויות רפואיות ושל אקווריומים 10
4. ניסויים בצלחות "פטרי" ובלוחות טיפין 17
5. ניסויים עם אריזות של משק הבית 21
6. ניסויים עם בקבוקי פלסטיק 24
7. החנות לציוד ביתי כמקור של ציוד ניסויי 27
8. ציוד מחנות האלקטרוניקה לביצוע ניסויים 31
9. חלופות החוסכות עלות עבור שיטות מחקר כמותניות 35
10. ניסויים עם חומרים הנמצאים במשק הבית 38
11. גישות בעלות נמוכה בניסויים בביולוגיה

ביבליוגרפיה

1. מינוח

הניסויים הם חלק מהותי בחשיבה ובעבודה המדעית (Eilks et al., 2004). לא ניתן לבצע מחקר במדעים או בהנדסה ללא ניסויים. זה נכון במידה שווה הן בתחום המדע והן ביישום המאוחר יותר בהנדסה ובתעשייה. בכל מקרה, הניסויים הם חלק מהוראת המדעים (Ferdinand, 2007).

הניסויים עוזרים לעקוב אחר המדע ולהבין אותו. הסטודנטים חווים את הצד הייחודי של המדע, זאת ומרת, הם שואלים שאלות, משערים השערות ומאפשרים לטבע לענות באמצעות ניסויים ותצפיות (Eilks et al., 2004). בכל אופן, הניסויים עוזרים גם לפיתוח מיומנויות מוטוריות, ממחישים תיאוריות מופשטות ומקדמים חשיבה לפתרון בעיות (Bradley et al., 1998). הערך האינהרנטי של הניסויים במדעים הוא בכך שהם מספקים הפסקות בפעילות הכיתתית ופועלים כגורם מוטיבציה עבור התלמידים (Kranz, 2008).

בכל אופן, הניסויים במדע הם בעלי עלות. כיתות לימוד בהן יש יותר מ-30 תלמידים יוצרות עלויות כספיות גבוהות, אם על התלמידים לבצע ניסויים בעצמם מעבר להדגמות המורה. רכישה של ציוד מעבדתי מסורתי וכלים לכיתה שלמה גוררת עלויות ניכרות. צריך להחליף ציוד שהתקלקל בצורה שוטפת. ההוצאות הכספיות הנוספות מתייחסות לא רק לציוד הנחוץ, אלא גם לכימיקלים ולציוד מתכלה. כשמבצעים ניסויים עם תלמידים, יש לספק את הכימיקלים ואת הציוד המתכלה, ולאחר מכן לדאוג לסילוק השאריות לפי קבוצות תלמידים. מובן מאליו שישנן עלויות הקשורות להליכים אלה. בנוסף לעלויות, יצירת מפגע סביבתי עלול להיות תוצר לוואי שלילי בניסויים בכימיה.

על כן, הניסויים עם הציוד המסורתי מהווים נטל כבד. הדבר נכון לא רק עבור מדינות מתפתחות, אלא גם עבור מדינות מתועשות. גם במדינות אלו התקציבים המוקדשים להוראת המדעים קטנו, וביחד עם זאת הנטל המתחייב מהכללים המרובים בנושא חומרים מסוכנים גדל. בימינו, הציוד המסורתי לניסוי מעבדה הוא פחות בר השגה. כתוצאה מכך, הוראת המדעים מתרחשת יותר ויותר בכיתת הלימוד הרגילה (Bradley et al., 1998). זה מוביל למגבלות גדולות יותר בביצוע ניסויים קלאסיים עם טכניקות ניסוי מסורתיות.

על כן, צריך להיות מודע לעובדה שכל ניסוי גורר איתו סכנות מסוימות. זה במיוחד נכון עבור הניסויים המסורתיים בכימיה בגלל הכמויות גדולות של חומרים שמשמשים בהם. בנוסף לכך, (Obendrauf, 2006) מציין את העובדה שאפילו ציוד זכוכית פשוט כגון מבחנות וכוסות זכוכית יכולים להוות סכנה כשהם שבורים. סכנות מסוג זה גדלות כשמתייחסים לשוני שבין האפיונים של כיתות הלימוד ושל המעבדה הרגילה.

בהקשר זה, הניסויים בעלי עלות נמוכה מציעים אלטרנטיבות. בניסויים בעלי עלות נמוכה, ציוד זול יותר ונגיש יותר מחליף את הציוד היקר. ציוד וכימיקלים בשימוש יומיומי מצמצמים את העלויות והם ברי השגה בכל מקום. היבט מפתח של עיקרון זה הוא הפשטות והראייה

הטובה של הכלים שבשימוש (Schwan, 2005). השימוש בציוד ניסויי אלטרנטיבי, והסוג והאיכות של הכימיקלים שמשמשים בהם, מובילים לצמצום עלויות (Bradley et al., 1998). באותו זמן ציוד וכימיקלים מסוכנים מוחלפים ע"י אלטרנטיבות בטוחות יותר. בשפה הגרמנית משתמשים במונח "ניסויים פעילים" (hands-on experiments) כשם נרדף לניסוי בעל עלות נמוכה. ניסוי פעיל מוגדר כדלהלן:

... ניסוי אותו ניתן לבצע ע"י שימוש בחפצים מחיי יומיום, או ע"י שימוש במתקנים

אותם ניתן לבנות בעצמנו בצורה פשוטה. (Eckert et al., 2000, p. 4)

הגדרות אחרות מדגישות את הניסויים יותר מאשר את הציוד:

"אפקטים מדהימים, חכמים ובלתי נשכחים המוגשים בלי הוצאה כספית גדולה ובלתי

ציוד המטיל צל על המוקד העיקרי – זהו הניסוי הפעיל האידיאלי."

(Kircher et al., 2001, p. 283)

בדרך זאת הניסויים בעלי עלות נמוכה, או ניסויים פעילים, עוסקים באסטרטגיות לגמרי שונות. טכניקה חשובה מבחינה כימית היא צמצום עד למינימום בשימוש בכימיקלים. בהתאם לגישה זאת, Bader (2003) מעביר את הרעיון של כימיה בת קיימא לביצוע ניסויים בהוראת המדעים. כאן, הקיימות מובנת בכך שהוראת המדעים אמורה לאמץ מדיניות סביבתית בנוגע לתפעול כימיקלים וסילוק השאריות שלהם. הדרך הטובה ביותר לשימור משאבים ולמניעת זיהום, וגם מניעת בעיות סילוק שאריות, היא להשתמש בפחות כמות של כימיקלים, שיהיו גם פחות מסוכנים או רעילים. בצורה כזאת, פותח כבר בשנות ה-80 הרעיון של "כימיה במיקרו-סקאלה" (Singh & Szafran, 2000):

"הכימיה במיקרו-סקאלה היא גישה מבוססת מעבדה, בטוחה סביבתית ומונעת

זיהום, המבוצעת ע"י שימוש בכלי זכוכית זעירים ובכמויות מופחתות משמעותית של

כימיקלים." (Singh et al., 1999, p. 1684)

ניסויים במיקרו-סקאלה אמורים לפזר בעיות של זיהום שאריות. בנוסף לכך, הם גם אמורים לצמצם את הסכנה שבתפעול חומרים מכיוון שמשמשים בניסויים האלה כמויות הרבה יותר קטנות של כימיקלים (Wood, 1990). הציוד והחומרים מצומצם ככל האפשר מבלי לפגוע בדיוק (Black & Lutz, 2004). על כן, גישה זו מראה מספר יתרונות (Pike, 2006):

- צמצום בעלות הכימיקלים.
- צמצום הסיבוך והעלות של סילוק השאריות.
- צמצום המגע הפוטנציאלי עם חומרים רעילים.
- פחות סכנות פוטנציאליות לתאונות.
- זמני תגובה קצרים יותר
- צמצום הזמן בתהליכי חימום וקירור

- צמצום המקום הנדרש לאחסון כימיקלים.
- שיפור איכות האוויר במעבדות.
- ...

כמות הכימיקלים בשימוש		שיטה
נוזל	מוצק	
< 5 מ"ל	< 0.1 גרם	טכניקת מאקרו
$0.5 - 5$ מ"ל	$0.01 - 0.1$ גרם	טכניקת מיקרו למחצה
$0.05 - 0.5$ מ"ל	$0.001 - 0.01$ גרם	טכניקת מיקרו
> 0.05 מ"ל	> 0.001 גרם	טכניקת אולטרה-מיקרו

טבלה 1.1: מיון של הגישות הניסוייות לפי כמות הכימיקלים (Pfeifer et al., 2002)

על כן, כמות גדולה של כימיקלים בניסויים בכימיה יכולה להצטמצם ממספר המילי ליטרים המסורתיים לכמה מיקרו ליטרים בנוזלים, וממספר גרמים לכמה מיליגרמים במוצקים (Singh & Szafran, 2000). במקרה זה מדברים על מעבר לטכנית המיקרו למחצה, או לטכניקת המיקרו או האולטרה-מיקרו (טבלה 1.1; Pfeifer et al., 2002).

טכניקת המיקרו והמיקרו למחצה מותאמות היטב להוראת המדעים בבתי ספר ובהוראת מורים. בסך הכל, כמות הכימיקלים אשר משתמשים בהם בביצוע עקבי של ניסויים מצטמצמת פי 10 בעקרון המיקרו-סקאלה המהיר, בה ניתן להגיע לצמצום של עד פי 100 (Singh & Szafran, 2000). צמצום זה מתייחס גם לכמות החומרים בשימוש, וגם לכמות החומרים אותם צריך לסלק. כפי שנדרש מלכתחילה, הניסויים במעבדות באוניברסיטה ובתעשייה הופכות לפחות מסוכנים וליותר ידידותיים לסביבה וליותר בעלי יחס עלות-תועלת.

על כן, לפי Latzel (1989) העיקרון של העלות הנמוכה מבטיחה שלא יוזנחו הניסויים בהוראת המדעים בגלל עלותם.

בלי קשר לכמות הכימיקלים, בניסוי בעל העלות הנמוכה מתרחשת החלפה של המעבדה המסורתית. משתמשים בחומרים ממשק הבית לניסויים מדעיים בבית הספר. לדוגמה, כל מיני מכלים ביתיים כגון סירים, צנצנות, קערות ובקבוקי פלסטיק ישנים. בכל אופן, משתמשים בחומרים כגון פריטים רפואיים חד פעמיים, או כאלה שמקורם מחנות לכלי בית, חנויות אקוואריומים או אלקטרוניקה. בהתאם ל- (Obendrauf 2004), מזעור הציוד ביחד עם השימוש במשאבים זולים הם בעלי פוטנציאל חסכון כפול. (Schwarz and Lutz 2004) ו- (Wood 1990) מתארים את הרווחים שבשימוש בציוד אלטרנטיבי בצורה הבאה:

- עלויות נמוכות יותר ע"י שימוש במשאבים מהרפואה, מחנויות כלי בית, מחנויות אלקטרוניקה או משימוש יומיומי.
 - זמינות המשאבים בכמויות גדולות הודות למחירם הנמוך. על כן, ניתן לבצע כמעט את כל הניסויים בקבוצות קטנות של תלמידים.
 - סכנות פחותות ביחס לכלי הזכוכית המסורתיים הודות לסכנה פחותה לשבירה.
 - פחות זמן דרוש להכנה ולסילוק שלאחרי ע"י המורים.
 - הגברת הניידות מכיוון שניתן להעביר את הציוד ולהשתמש בו ללא הגבלות; לא דרושות מעבדות בעלות ציוד מיוחד.
 - ניתן לבצע ניסויים כמטלת בית.
- בדומה להחלפה של הציוד המעבדתי המסורתי, ניתן להחליף גם את החומרים שבשימוש. ניסויים עם מזון, תכשירי ניקוי, כימיקלים ומוצקים ממשק הבית (מהמטבח או מהגראז') משלימים את הטכניקות שדובר עליהן קודם. לא רק שניתן לרכוש חומרים אלו במרכזים, חנויות לכלי בית או בתי מרקחת במחיר נמוך יחסית, גם הובלתם פחות מסורבלת. בנוסף לכך, התפעול של החומרים האלה מעורר יותר מוטיבציה מכיוון שהתלמידים עובדים עם חומרים אותם הם מכירים מחיי היומיום שלהם. בסך הכל, העקרונות המוצגים כאן הם אידיאליים לעידוד התנסויות פעילות של התלמידים ולמידה פעילה של מדע (Joling, 2006).

2. צמצום עלויות והשפעות סביבתיות הודות למערכות ניסוייות במיקרו-סקאלה

בשנות ה-80 וה-90 התחילה גישת הניסויים במיקרו-סקאלה באוניברסיטאות. הכוונה של ערכות המיקרו-סקאלה היא לסייע לקידום הניסויים המבוצעים בהתאם לעקרון המיקרו-סקאלה (du Toit & du Toit, 2006). זה הושג ע"י ייצור של מערכת שלמה של כלי זכוכית מתאימים. עם מערכות אלו ניתן לבצע תגובות בקנה מידה קטן עם תאי תגובת מתאימים. זמן קצר לאחר מכן, נוסחו גם ניסויים המתאימים לבתי הספר, כך שהותחל בייצור ערכות מיקרו-סקאלה לבתי הספר. לדוגמא, ערכת ווילימסון, ערכת ACE של כלי זכוכית במיקרו-סקאלה, מערכת Chem-pro, ערכת המיקרו זכוכית בהתאם ל-Baumbach או המיני מעבדה (Schallies, 1991).

בנקודה זאת, מוצגת המיני-מעבדה (Zinser Analytic, 2011) כדוגמא. המיני-מעבדה כוללת מגוון מבחנות גליליות עם תחתית שטוחה (איור 2.1). כלי התגובה הם בעלי נפח של 24 מ"ל. הודות לתחתית השטוחה ניתן להכניס את הכימיקלים בצורה ישירה, ללא צורך בחצובות או מעמדים תומכים. ניתן להרכיב מספר כלים באמצעות הברגה קלה לשימוש. בנוסף לכך, יש צורך בכמה גושי מתכת לחימום או תרמומטרים מתאימים (Schallies, 1991). נדגים את השימוש במיני-מעבדה. איור 2.1 (צד ימין) מראה את התקן הזיקוק המסורתי ואחד במיני מעבדה. התקן הזיקוק של המיני מעבדה כולל כלי זיקוק בעל נפח של 24 מ"ל. Schallies and Schilling (1991) מציעים לזקק נוזל בנפח של 10 מ"ל. בעזרת מדידה זו ניתן לזקק בערך 1 מ"ל של אלכוהול מ"י. עם כמויות כאלה מצמצמים סכנות פוטנציאליות וגם את העלות המשמעותית של הכימיקלים ושל סילוקם. בהתקני זיקוק מסורתיים יוצקים עד ל-200 מ"ל של נוזל בתוך בקבוק הזיקוק. הסידור הזה מצמצם פי 20 את כמות הכימיקלים שצריך להשתמש בהם וזיהום המתקבל כתוצאה מכך.



איור 2.1: התקן זיקוק במיני מעבדה ובציוד המסורתי של המעבדה

לשימוש בערכות מיקרו-סקאלה אין רק יתרונות. Thus et al. (2000) טוענים שעם הצמצומים הדרסטיים בכמויות, צריך לקחת בחשבון הפסדים הנובעים מהרטבת דפנות הכלי. מלבד

זאת, דרוש הון התחלתי כדי להמיר את המשאבים של המעבדה. לכן, עלות הרכישה של הציוד המעבדתי הנחוץ למעבדה הפועלת בהתאם לעקרון כימית המיקרו-סקאלה היא בערך 120 יורו לביצוע (Sigma-Aldrich, 2011). לטווח ארוך, ניתן לאזן עלות רכישה זו ע"י צמצום בעלות הכימיקלים, הביטוח וסילוק השאריות. לדוגמא, Singh and Szafran (2000) טוענים שניתן לאזן את עלות ההשקעה הנדרשת באוניברסיטאות בתקופה שבין 6 חודשים לשנתיים, תלוי באורך תקופת ההתמחות. בכל מקרה, עלות ההשקעה ההתחלתית אינה זניחה ויש צורך בהחלפת חלקים שניזוקים, או שהולכים לאיבוד, בצורה שוטפת.

על כן, בשנים האחרונות החל חיפוש של אלטרנטיבות זולות יותר ביחס לערכות המיקרו-סקאלה המסחריות. מדובר עכל שילוב של הגישה של ערכות המיקרו-סקאלה עם זו של ציוד מעבדתי בעלות נמוכה. במקרה זה, כלי הזכוכית של המעבדה המסורתית וכלי הזכוכית במיקרו-סקאלה מוחלפים ע"י אלטרנטיבות פחות יקרות. לעתים קרובות מדובר על כלי פלסטיק. הם זולים יותר ומצמצמים את הסכנה של שבירת הזכוכית.

דוגמא לכך היא "ערכת RADMASTE" (Bradley (2006), אותה התחילו להשתמש בדרום אפריקה. ניתן להשיג ערכה זו בגרסאות שונות, למשל "ערכת RADMASTE מיקרו-מדע יסודי", "ערכת RADMASTE מיקרו-כימיה בסיסי", "ערכת RADMASTE מיקרו-סקאלה ללומד הביולוגיה", ועוד (איור 2.2; The Radmaste-Micro-Science-System, 2010).



איור 2.2: ערכת RADMASTE למים (התמונה מ: www.radmaste.org.za)

מורים יכולים לייצר בעצמם אוספים כאלה, הדומים להצעות המסחריות. מבחנות אפנדורף, לוחות טיפין מפלסטיק, זכוכיות מכסה ועוד, משמשים כתאיי תגובה במיקרו-סקאלה. ניתן ליצור חיבורים ושינויים מורכבים יותר מציוד רפואי ומאקווריומים. דוגמאות יידונו בפרקים הבאים.

3. ניסויים עם משאבים מחנויות רפואיות ושל אקווריומים

בעיה שכיחה בניסויים בכימיה היא הזמן הדרוש להרכבת מערכות ואיכות הציוד. כלי אלה עשויים בדרך כלל מזכוכית. כלי זכוכית אלו יקרים ושברים. על כן, זה מהווה מקור פוטנציאלי לסכנה לתלמידים וצריך להחליף אותם כשהם מתקלקלים, וזה גורר עלויות גבוהות (von Borstel & Böhm, 2004).

ניתן למצוא אלטרנטיבה להתקנים המעבדתיים המסורתיים במגוון רחב של ציוד רפואי, הלקוח מהציוד הרפואי או מעסקי האקווריומים. מזרקים, צינוריות, ברזים חתוכים, צינורות



איור 3.1: מחבר Luer-Lock

ושקיות עירווי, מיוצרים בכמויות גדולות עבור מדע הרפואה. על כן, עלותם בהתאם. בכל אופן, זרנוקים, משאבות ומחלקים המשמשים באקווריומים מציעים מגוון יישומים אותם ניתן להשתמש בניסויים מדעיים טבעיים. הם בדרך כלל עשויים מפלסטיק וגומי, ועל כן הם גמישים. הם מתאימים לניסויים במיקרו-סקאלה הודות לגודל שלהם.

הכלים הרפואיים מתאימים לניסויים עם נוזלים וגזים, מכיוון שהתקנים אלה מיוצרים לחלוקת

נוזלים. על כן, קיימות מערכות אחיזה מיוחדות, במיוחד מערכת Luer או Luer-lock (איור 3.1). מערכות אלו מבוססות על צירוף מערכות של פריטים בודדים מהציוד הרפואי



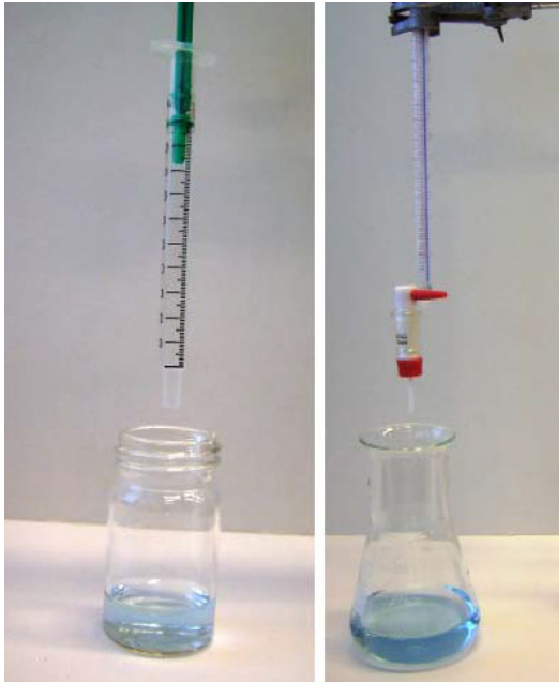
איור 3.2: מתאם – למעלה "נקבה"- "נקבה"

למטה: "זכר"- "נקבה"

שני האלמנטים של המחבר מתוארים בדרך כלל כ- "זכר"- "נקבה". בהתאם לעקרון-luer, המחברים מותקנים ביחד. עבור עקרון luer-lock, דרושה מערכת הברגה נוספת כהתקן נעילה (איור 3.1; Brand, 2010). בצורה כזאת, ניתן לבנות את המחבר בצורה קלה והוא מהודק מבלי להחליק במהלך הניסוי. מכיוון שבדרך כלל אפשר להתקין מחברים "נקבה"- "זכר", ישנם מתאמים נוספים שהם "נקבה"- "נקבה" ו"זכר"- "זכר" (איור 3.2).

המזרק החד פעמי מהווה קבוצה רב-תכליתית יותר ממשפחת הציוד הרפואי. למזרק החד פעמי יש גליל שקוף בעל סקלת מדידה נוחה לקריאה ובלתי ניתנת למחיקה.

ניתן להשיג מזרקים חד פעמיים בגדלים ובמרקמים שונים. הגדלים נעים ממזרקי אינסולין של 1 מ"ל עד לגרסאות בעלות נפח של 50 מ"ל. מעל לכל, מזרקי האינסולין נועדו למינונים בעלי כמויות קטנות. במיוחד, הטעינה והפריקה האיטיות אפשרית עם מזרקים אלה.



איור 3.3: מזרקים חד פעמיים כמחליפי מבחנות

למשל, (El-Marsafy (2004 מציע שהמזרקים החד פעמיים יחליפו פיפטות ומבחנות בטיטרציה במיקרו-סקאלה (איור 3.3). כשמתמשים במזרקים במקום מבחנות, צריך למלא את הנוזלים במזרק ללא בועות אוויר. למטרה זאת, אוספים כמות מסוימת של נוזל עם המזרק ואז מרוקנים את המזרק בצורה מהירה מאד. אם חוזרים על הפעולה הזאת מספר פעמים, ניתן למלא את המזרק ללא בועות אוויר.

בוכנת המעצור, שהיא חלק מכל המזרקים החד פעמיים, הוא יתרון גדול ביחס למזרקי הגז. בדרך זאת, מובטחת האפשרות למלא את המזרק עד לתכולתו המרבית. לאחר מכן, לאחר השימוש במזרק, נשארת בו שארית מינימאלית.

השימוש במזרקים תלוי מאד בסוג בבוכנה שלהם. לבוכנות מסוימות יש טבעות איטום ולאחרות אין. ניתן גם להבחין בין מזרקים חד פעמיים בעלי טבעת איטום בודד או כפולה (איור 3.4).

מזרקים בעלי טבעת איטום כפולה הם מאד צפופים וניתנים להתקנה בכלים בעלי לחץ גז. בכל זאת, אם משתמשים בגזים שעלולים לגרום לגומי האוטם להתנפח (למשל, כלור), יש להשתמש רק במזרקים בעלי איטום בודד. המזרקים ללא טבעת איטום מתאימים לשימוש עם נוזלים.



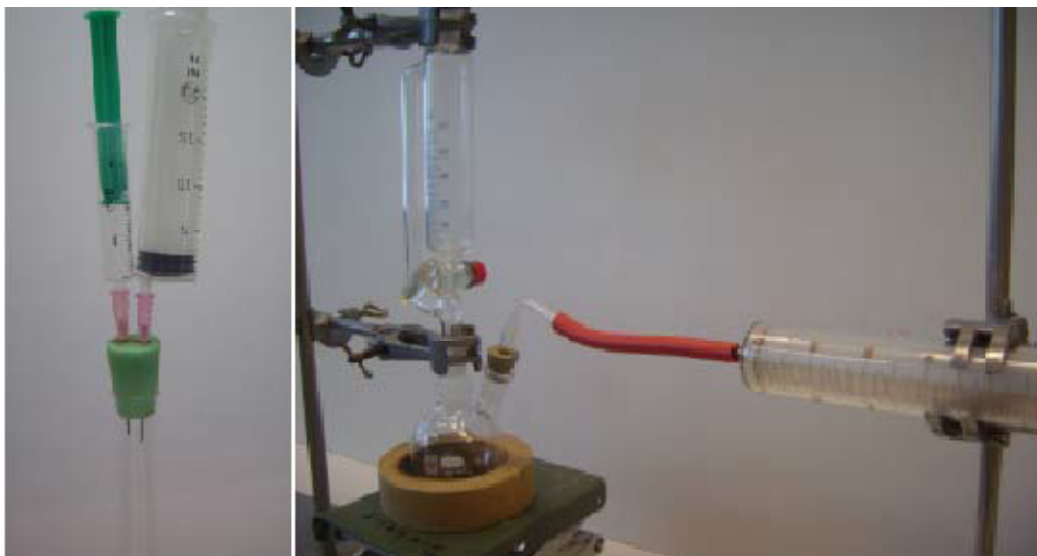
איור 3.4: מזרקים עם איטום בודד, כפול, וללא איטום

קיימות אפשרויות מגוונות לשימוש במזרקים החד פעמיים. למשל, von Borstel and Böhm (2006) מציעים לבנות את משפך הופמן ע"י שימוש במזרקים (איור 3.5). בגרסה של עלות נמוכה של הניסוי המתואר, המארזים של שני מזרקים רפואיים חד פעמיים נבנים מחדש כדי לשמש כמשפך הופמן. הצינוריות של המזרקים החד פעמיים משמשים בתור אלקטרודות. בנוסף לכך, משתמשים בשני שסתומים רפואיים ביחד עם שתי חתיכות קצרות של צינוריות (למשל, מחנות של אקווריומים) בור הגז המתאדה. צינוריות האלקטרודה מחוברות לחוטי נחושת בעזרת פסי חיבור. אלה מחוברים בצד השני עם סוללה שטוחה על מנת להתחיל את תהליך האלקטרוליזה. עלות הציוד הזה היא בערך 3 יורו בגרסה של העלות הנמוכה, בעוד המכשיר המקורי של הופמן עולה 70 יורו לפי (NeubertGlas, 2011).



איור 3.5: השוואה בין מכשיר של הופמן העשוי עם חומרים מהנדסה רפואית ואחד העשוי מזכוכית בכל אופן, גם המיזוג והספיגה של גזים ע"י (Obendrauf, 2006) מבוססים היטב (איור 3.6). העלות של מכשיר ניסוי קונבנציונאלי מזכוכית עבור מפתחי גזים היא כ- 80 יורו (Mercateo, 2011; NeubertGlas, 2011, Omikron, 2004). בגרסת הניסוי בעלות נמוכה של Obendrauf (2004; 2006) צריך רק מפתח גז זול, אותו ניתן לבנות ממבחנה, מזרק חד פעמי בנפח של 2 מ"ל בלי טבעת איטום, מספר מזרקים חד פעמיים בנפח של 20 מ"ל עם טבעת איטום כפולה, שתי צינוריות ופקק מגומי רך. את כל החומרים ניתן לקנות ב- 1.5 יורו למכשיר (Mercateo, 2011). מרכיבים את פקק הגומי, המנוקב ע"י שתי צינוריות, על מבחנה רגילה, וגם מרכיבים את המזרק בעל נפח של 2 מ"ל, ואת המזרק בעל נפח של 20 מ"ל על הצינוריות. משתמשים המזרק בעל הנפח של 2 מ"ל על מנת לאפשר לנוזל לטפטף אל תוך

המבחנה ואוספים את הגז במזרק בעל הנפח של 20 מ"ל. במפתח הגזים בעלות נמוכה ניתן למזג מספר גזים. אבלה 3.1 מראה מספר דוגמאות בנידון.



איור 3.6: מכשיר לפיתוח גזים בעלות נמוכה עם הציוד המעבדתי הקונבנציונלי

אפשר להשתמש בניסויים לא רק במזרקים החד פעמיים, אלא גם בצינוריות הקשורות אליהן. גם אותן ניתן להשיג בגדלים שונים. ההבדל ביניהן נובע מהקוטר ומהאורך של מחט המזרק. ניתן לחבר את הצינוריות למזרקים בעלי גדלים שונים באמצעות חיבור Luer. החד של המחט מהווה סכנה פוטנציאלית לפציעה של התלמידים ויש לחתוך אותו לפני הניסוי עם מגזרת תיל. כשעושים זאת, צריך לוודא שתעלת הצינורית לא נשברה.

הגז המחובר	כימיקלים במבחנה	הנוזל הנוסף	הערות
כלור	אבקת קאלי	חומצה הידרו-כלורית מרוכזת	השתמש במזרק עם טבעת איטום בודדת
אמוניה	כלוריד האמוניה, גבישי נתון הידרוכסיד, מים מזוקקים	-	צריך לחמם את המבחנה כדי להתחיל את התגובה
מימן	גרגרי אבק, נחושת גופרתית מהולה	חומצה הידרו-כלורית מרוכזת	-

טבלה 3.1: אפשרויות השימוש של מפתח הגזים בעל עלות נמוכה

לפי (Brand (2010), הצינוריות יכולות להוות מזלף יותר מדויק. לפי von Borstel and Böhm (2006), אפשר להשתמש בצינוריות כתחליף לאלקטרודות. אך הדבר החשוב ביותר הוא שניתן להחדיר את המחטים בקלות לפקקי הגומי, ואז אפשר להעביר גזים או נוזלים בתוך



איור 3.7: שקיות שתן

תא תגובות סגור. צריך לקחת בחשבון שכשמעבירים מחטים דרך פקק הגומי, הם עלולים להיסתם.

ישנם חלקים נוספים מההנדסה הרפואית אותם ניתן להשתמש לאיסוף גזים או נוזלים, המחברים בעזרת צינורות ושסתומים רב-כיווניים (איור 3.8).

גם Brand (2010) וגם von Borstel and Böhm (2006) מצביעים על הצעות לשימוש בשסתומים. כך, ניתן להשתמש בהם כתחליפים לסילוק גזים ממבחנות. בהקשר זה, ניתן להשתמש גם בשקיות וצינוריות לעירוויים. צינורות העירווי מהווים תחליף לצינורת הסיליקון הקונבנציונאליים, בעוד ששקיות עירווי ושקיות שתן (איור 3.7), משמשים בעיקר לאיסוף או אחסון גזים. בצורה כזאת, ניתן ליצור בקלות מערכות שונות לתפעול נוזלים וגזים. אפשר להחליף ציוד מעבדתי יקר באלטרנטיבות מההנדסה הרפואית.



איור 3.8: שסתום רב-כיווני מההנדסה הרפואית

מוצרים רפואיים חד פעמיים מתאימים היטב לביצוע ניסויים במיקרו-סקאלה. ניתן לראות

זאת בדוגמא לערכה שלמה במיקרו-

סקאלה, תיק ה-ChemZ המורכב כולו מחומרים אלה (איור 3.9); von Borstel,

(2009). תיק ה-ChemZ לתלמיד כולל

ברזים רבגוניים עם יציאות מרובות, מספר

מזרקים בעלי גדלים ואפיונים שונים,

שמונה שסתומים תלת-כיווניים, שתי

צינורות הארכה, שתי מבחנות למילוי

ומילוי חוזר של זורמים, עשרה פקקים

ומגוון מתאמים ומחברים מסוג נעילת

luer.



איור 3.9: תיק ChemZ לתלמיד

חומר	נפח (מ"ל)	כמות	עלות (יורו)
מזרק חד פעמי ללא טבעת איטום	2	100	2.09
	10	100	4.54
מזרק אינסולין חד פעמי	1	100	12.18
	10	100	9.86
מזרק חד פעמי עם טבעת איטום	20	100	13.64
	60	60	26.03
צינוריות	-	100	1.36
שסתומים תלת-כיווניים	-	1	0.95
צינור אינפוזיה (0.75 מ')	-	1	0.75

טבלה 3.2: העלות של ציוד רפואי חד פעמי

ניתן להשיג ציוד רפואי מגוון בבתי מרקחת ובחנויות מקוונות, כגון בית המרקחת המקוון ב-Wolfsanger (2006) או בעסקי ההובלה הימית (Mercateo (2011). טבלה 3.2 מסכמת את העלות המקורבת של הציוד הרפואי הדרוש.



איור 3.10: משאבת אקווריום

בנוסף, עסקי האקווריומים מציעים אלטרנטיבות רבות לניסויים מדעיים. המתאימות במיוחד הם משאבות, מסננים וצינורות. המשאבות (איור 3.10) חיוניות באקווריומים. ישנן משאבות מסוגים שונים, אך הן תמיד כוללות משאבה ומסנן. המשאבות דרושות באקווריומים כדי לנקות את המים מחלקיקים מלוכלכים, כגון שאריות אוכל. למטרה זו, המים נספגים ביחד עם החמצן ומוחזרים לאקווריום.

פעולה זו מתאימה לניסויים מדעיים בבית הספר. משתמשים המשאבות של אקווריומים כדי ליצור זרימה קבועה של אוויר, כמו בהתססה של אלכוהול לחומץ, או בהשוואת הייצור של דו-תחמוצת הפחמן משמרים, בתנאים אנאירוביים או אירוביים.

קיים גם מגוון של צינוריות, מלחציים ומפלגים, אשר עוזרים לתאם ולווסת זרמי גזים או נוזלים. ניתן להשתמש בצינוריות אלו (איור 3.11) כתחליף זול לצינוריות סיליקון וצינוריות וואקום במעבדה.



איור 3.11: צינורית מאקווריום

(Kappenberg 2011) מציע שימוש נרחב מאד ע"י בניה של כרומטוגרף של גז בעזרת משאבת אקווריום ביחד עם צינוריות ומחברים מתאימים. כשעושים זאת, המשאבה שואבת אוויר כגז נושא בצורה אחידה דרך עמודה הנמצאת בצינור פלסטיק חלול. ניתן להשיג את הציוד מהאקווריומים בגן החיות או בחנויות אקווריום מסוימות, וגם בחנויות מקוונות. במקרה כזה, משאבת אקווריום עולה בין 10 ל-15 יורו, וצינורית באורך של 2.5 מטר עולה בסביבות 3 יורו.

4. ניסויים בצלחות "פטרי" ולוחות טיפין

ניתן לבצע בקלות הרבה ניסויים מדעיים בצלחות "פטרי" בעלות תא אחד, שניים או שלושה (איור 4.1), או לוחות הטיפין מפלסטיק (ראה איור 4.2). לדוגמא, (Schwarz and Lutz 2004) וגם (Kohler-Krutzfeld and Gruyberg 2000) מציעים להשתמש במשטחי שקערוריות או במשטחים רבי שקערוריות כתאיי תגובה קטנים בניסויים עם נוזלים ותמיסות. אלו הם לוחות הטיפין מפלסטיק שיש בהם מספר שקערוריות בעלות תכולות שונות. משטחי השקערוריות האלה פותחו במקור עבור אבחונים רפואיים וביוכימיה. לאחר מכן, צלחות הפלסטיק שימשו לניסויים מדעיים במיקרו-סקאלה באוניברסיטת בייג'ינג. ערכת RADMASTE המתקדמת למיקרו-כימיה (ראה עמוד 9) מכילה לוח טיפין עם 60 שקערוריות.



איור 4.2: משטחים רבי שקערוריות

איור 4.1: צלחות "פטרי"

לפי (Zhou 2004) היתרון של ניסויים עם משטחים רבי שקערוריות הוא שניתן להעביר את כל הניסויים החשובים במיקרו-סקאלה. (Schwarz and Lutz 2004) ציינו יתרונות נוספים. לדעתם, ניתן לבצע מספר ניסויים במקביל ולהשוות ביניהם. זה מועיל מאד במיוחד עבור שיקוע, שינוי צבע ותגובות זירוז, או בניסויים בסדרות אלקטרו-כימיות. בנוסף, ניתן לבצע בקלות ובזול ניסויים של סיבולת מלח של צמחים.

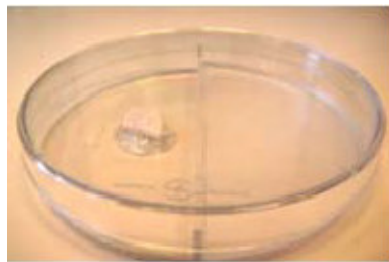
בהתאם לגודל השקערורית, ניתן לצקת בהם מ-0.5 עד 5 מ"ל. השימוש בתאיי תגובה פלסטיים במקום כלי זכוכית מצמצם את הסכנה לפציעה עקב שבירה. עלות הרכישה של משטח רב שקערוריות תלוייה בגודלם. משטחים עם 96 שקערוריות עולים 6 יורו כל אחד, בעוד שרכישה של 6 לוחות טיפין עולה פחות מ-2 יורו (Mercateo 2011). בכל אופן, צריך להיזהר עם ממיסים אורגניים שעלולים לקלקל את הפלסטיק.

בדומה ללוחות הטיפין, גם צלחות פטרי עשויות פוליסטירן יכולות להוות תא תגובה מעניין. ניתן לרכוש 500 צלחות פטרי בעלות תא אחד ב-30 יורו, בעוד שהעלות של 500 צלחות פטרי עם תאים מרובים היא 60 יורו. כלומר, העלות של צלחת פטרי אחת היא בערך בין 5 ל-12 סנט. צלחות פטרי הן זולות, קלות לאחסון, וחזקות יותר מכלי זכוכית הודות לחומר ממנו הן עשויות. דוגמאות לסוגי הניסויים אותם ניתן לבצע בצלחות פטרי בכמויות

קטנות הם חמצון, תגובות שיקוע, החלפת רדיקלים ותאים גליוניים (Full, 1996). Seilnacht (2002) מציע להשתמש בצלחות פטרי גם בניסויים תגובות ובתהליכי המסה התלויים בטמפרטורה, בעוד Choi (2002) מציע דוגמאות מיזוג של גזים.

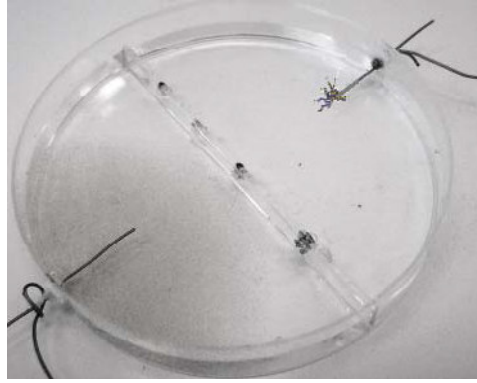
ניסויים רבים המבוצעים בצלחות פטרי, ניתן לבצע אותם גם במשטחים רבי שקערוריות. לצלחת פטרי בעלת תא אחד יש נפח של 12 מ"ל, בעוד צלחות פטרי מחולקות הן בעלות נפח קטן יותר בהתאם. ניתן למלא לוחות טיפין עד לתכולה מרבית של 5 מ"ל, בתלות בגודל השקערורית. על כן, כמות הכימיקלים שמשתמשים בהם במשטחים רבי שקערוריות קטנה יותר.

בכל אופן, צלחות פטרי פותחות אפשרויות נוספות. למשל, המכסה של צלחת פטרי יכול ליצור מרחב סגור. במקרה זה, ניתן לקיים מעבר גזים בין התאים. בכל מקרה, לא מתרחשים מעברי גזים עם הסביבה. דוגמא לכך היא המיזוג והגילוי של דו-תחמוצת הפחמן (Full, 1996). כאן, ממלאים תא אחד עם מי-סיד ואת התא השני ממלאים עם חתיכת שיש הנמצאת במגע עם חומצה הידרו-כלורית (איור 4.3).



איור 4.3: מיזוג וגילוי של דו-תחמוצת הפחמן

נוסף לכך, אפשר להכין את צלחות פטרי לתנאים של ניסויים שונים. לדוגמא, ניתן להוסיף אלקטרודות בקירות החיצוניים והחלקים, ע"י חימומן והחדרתן דרך הפלסטיק. דוגמא לכך היא האלקטרוליזה של יודיד האבץ (איור 4.4). בניסוי זה משתמשים בצלחת פטרי בת שני תאים. מחדירים גרפיט של עפרון, כתחליף לאלקטרודת פחם, דרך כל אחת מהקירות החיצוניים של שני התאים. אם האלקטרודות שבירות, אפשר לקדוח חור קטן בקיר החיצוני של הצלחת בעזרת מסמר חם, דרכו ניתן להחדיר את אלקטרודה ולהדק אותה עם דבק חם. אם רוצים לדמות את השימוש בממברנה, אפשר לקדוח באותה צורה חורי קטנים במספר מקומות בקיר המחלק את התאים. ניתן גם ליצור גשר מלח באמצע של הצלחת פטרי כשמשמשים במסנן נייר. התפעול המתואר במקרה של אלקטרוליזה של יודיד האבץ אפשרית רק עם צלחות פטרי. לא מקובל כל כך להשתמש בלוחות טיפין פלסטיים בצורה כזאת.



איור 4.4: אלקטרוליזה של יודיד האבץ

לבסוף, נראה שימוש פוטנציאלי נוסף המתפתח מהניצול של צלחות פטרי. הצמצום של השימוש בכמות של כימיקלים יוצר בעיה בביצוע הדגמות. קשה לראות כמויות קטנות ממרחק גדול. אפשר למנוע בעיה זאת ע"י הקרנה של התגובות. צלחות פטרי מתאימות במיוחד לצורך זה (Full, 1996).

צלחות פטרי מתאימות להקרנה דרך ויאוגרף הודות לשקיפות וליציבות שלהן. הויאוגרף יכול להגדיל את התגובה בצלחת פטרי בקוטר של 2 מטר. ההדגמה של ניסוי דרך הקרנה מתאימה לכל התגובות בהן יש שינוי בצבע או בבהירות של התמיסה. יתר על כן, ניתן לראות היטב בהקרנה גם התפתחות של גזים ויצירת שיקוע (Full, 1996). דוגמא לכך היא ה- שיקוע של הלידים של כסף. למרה זו, ממלאים צלחת פטרי עם מים מזוקקים, לפני שמוסיפים קורטוב של מלח מצד אחד וכמה גרגירים של חנקת כסף בצד השני של צלחת פטרי. הפעפוע מוביל ליצירת כלוריד הכסף אשר שוקע (איור 4.5).



איור 4.5: יצירת הליד הכסף

בדרך כלל, לוחות טיפין וצלחות פטרי מתאימים לתגובות כימיות רבות בהוראת מדעי הטבע. למטרה זאת, גם צלחות פטרי וגם לוחות טיפין עשויים פלסטיק, ובכך מונעים את סכנות הפגיעה משבירה של כלי זכוכית. ללוחות הטיפין יש שני יתרונות מכריעים ביחס לצלחות פטרי. מצד אחד, ניתן לבצע בהם הרבה יותר ניסויים זה לצד זה. מלבד זאת, התכולה

הקטנה שלהם הופך אותם לבחירה מתאימה. לצלחות פטרי ללא חלוקה יש נפח של 12 מ"ל. בעוד שזה נפח גדול יותר מזה של לוחות הטיפין, זה עדיין קטן יותר מנפח של כליי זכוכית רגיל. נוסף על כך, הנפח של כל אחד מהתאים בצלחת פטרי קטן יותר בהתאם. לצלחות פטרי יש יתרונות משכנעים על לוחות הטיפין הודות לרב תכליתיות שלהן והודות לאפשרות להקרנה של תהליכי תגובה.

5. ניסויים עם אריזות של משק הבית



גם אם העלויות הן סבירות, צריך לקנות את כל החומרים שהוצגו בפרקים הקודמים לביצוע ניסויים בעלות נמוכה. בכל זאת, ניתן להשתמש בחומרי אריזה ריקים המושלכים לפח האשפה בבית, כתאיי תגובה לניסויים בכימיה ובפיזיקה. למשל, אפשר להשתמש באריזות ריקות של תרופות, צנצנות, קופסאות שימורים, ספלי פלסטיק או אריזות של חומרי קוסמטיקה.

איור 5.1: אריזת תרופות ריקה

העיצוב של אריזות כדורים (איור 5.1) מאד דומה ללוחות הטיפין מפלסטיק שהוצגו קודם לכן. לאריזות אלו יש אותם יתרונות כמו המשטחים רבי השקערוריות. ברגע שמורידים את נייר הכסף מהאריזות, כל אותם ניסויים שניתן לבצע בלוחות טיפין, אפשר לבצע אותם גם באריזת תרופות ריקה. מכיוון שאריזות הכדורים נבדלים בגודל ובצורה שלהם, ניתן להשתמש בתאיי ניסוי עם נפחים וכמות שקערוריות שונים. הנפח של אריזת הכדורים מאד קטן כמו הנפח של השקערוריות הבודדות בלוחות הטיפין מפלסטיק, על כן דרושות כמויות מינימאליות של כימיקלים וחומרים.

דוגמא לכך היא הייצור של דילולים סדרתיים. למשל, (Kruse-Oczelik and Schwarz (2004)

מציעים לתת לתלמידים למדוד נפח ע"י ייצור של דילול סדרתי של חלב. ניתן להתחיל את הניסוי בשאלה הבאה: "כמה חלב יכול נוכל לדלל עם חלב לפני שהנוכלות מתגלה?". במקרה זה, מדללים 2 מ"ל חלב מהתא הראשון בפקטור 10. הנוזל הופך לשקוף יותר ויותר, עד שלבסוף מגלים צלב בתחתית התא (איור 5.2).



איור 5.2: דילול סדרתי של חלב באריזה של כדורים

אם דרושה תכולה גדולה יותר מזו המסופקת ע"י אריזה ריקה של תרופות, ניתן להשתמש בכלי זכוכית (למשל, צנצנות ריבות או דבש נקיות; איור 5.3), קופסאות שימורים (קופסאות נקיות; איור 5.4), או בגביע של נר או בספלי פלסטיק, כתאיי תגובה.

הודות לחומרים השונים מהם עשויים המיכלים, אפשר לבחור אותם בהתאם לצרכים של כל ניסוי. נוסף על כך, המיכלים קיימים בגדלים שונים וגם ביחס לזה אפשר לבחור אותם לפי הצורך.



איור 5.4: קופסאות שימורים

איור 5.3: צנצנות ריבה ריקות

תאיי התגובה עצמם יכולים להיות חלק מהניסוי. למשל, קופסת מתכת מתאימה לבניית סוללה מכיוון שניתן להשתמש בדופן הקופסה כאלקטרודה. יש להוציא את החלק העליון של הקופסה, לנקות אותה ולמלא אותה בתמיסה של כלוריד הנתרן. דופן הקופסה משמש כאלקטרודה ומחובר לצרכן או למד-מתח באמצעות תיילים. טובלים אלקטרודת גרפיט או מילוי של עפרון ע"י שימוש בצרכן או מד-מתח (Schmittinger, 2011; איור 5.5)



איור 5.5: סוללה מקופסת קולה

דוגמה אחרת מראה איך להשתמש בזכוכית לביצוע ניסוי. בעזרת נר, צנצנת ריקה או קערה, ניתן להראות שהאוויר הוא תערובת של גזים שונים (Ardley, 1997). בניסוי זה ממלאים את הקערה במים; הנר מוכנס לקערה ומודלק. לאחר מכן, מציבים בזהירות את הצנצנת הריקה מעל לנר (איור 5.6). זה מראה שפני המים עולים עד שבסוף הנר נכבה.



איור 5.6: נר בוער בתוך צנצנת ריבה

בנוסף לכך, ניתן להשתמש במיכלים של מוצרי קוסמטיקה כתאים בניסויים מדעיים. ניתן להשתמש במיכלי זכוכית ריקים של בושם בדומה ליתר כלי הזכוכית במשק הבית, בעוד שניתן להשתמש גם במיכלים ריקים של איפור לצלילית עיניים כמו בלוחות הטיפין מפלסטיק או אריזות של תרופות. מוצרי קוסמטיקה נוספים המתאימים לניסויים הם המרססים (למשל, לבושם או לטיפות אף) או שקיות ריקות של ג'ל למקלחת, אותם ניתן להשתמש לאחסון גזים.

כמעט כל המכשירים האלה מהווים פסולת במשק הבית, על כן ניתן לקבל אותם בחינם בכמויות מספיקות. בכל זאת, הכמות הדרושה לביצוע ניסויים של תלמידים אינה מיידית, כך שחייבים לאסוף אותם בצורה רציפה לאורך זמן. גם התלמידים ועמיתים אחרים יכולים להשתתף באיסוף חומרים ממשק הבית.

6. ניסויים עם בקבוקי פלסטיק



איור 6.1: בקבוק פלסטיק

בפרק הקודם נדון השימוש באריזות ממשק הבית בניסויים כימיים ופיזיקאליים. בפרק זה נראה איך בקבוקי פלסטיק (איור 6.1) מתאימים לניסויים שונים.

Wilke (1998a) טוען שהשימוש, וגם ההכנה, של בקבוקי פלסטיק היא דרך טובה לעודד את עצמאות התלמידים בניסויים. בקבוקים אלה מהווים פסולת בכל בית, ועל כן ניתן לאסוף אותם בקלות בכמויות מספיק גדולות למען ההתנסות הפעילה של התלמידים. Wilke מציין שפריטים אלה מתאימים מאד ככלי ניסוי, במיוחד בהוראת הפיזיקה, הודות למאפיינים המיוחדים שלהם. הוא מתאר את היתרונות הבאים:

- קיימים בקבוקי פלסטיק בצורות, גדלים ועיצובים שונים. עקב כך, בחירת הציוד הניסוי המתאים צריכה להיעשות ביחס לדרישות המתאימות.
- בקבוקי פלסטיק בעלי נפח גדול מבטיחות נראות טובה. במיוחד העובדה שהבקבוקים שקופים מבטיחה נראות טובה של התהליך המתרחש בתוך הבקבוק במהלך הניסוי.
- לבקבוקי הפלסטיק יש מסה נמוכה ודפנות דקות. זה מקל על התפעול שלהם.
- בקבוקי פלסטיק הם בני-קיימא ובלתי שבירים למעשה. במיוחד, הם לא מתנפצים במקרה שהניסוי נכשל. זה מאפשר לצמצם את הסכנות עבור התלמידים, ועל כן ניתן להשתמש בהם בניסויים בהם זורקים אותם או מאפשרים להם ליפול.
- בקבוקי פלסטיק מאד עמידים ללחץ. עובדה זאת מאפשרת לבצע ניסויים פנאומטיים והידראוליים. בניסויים מסוג זה, העמידות ללחץ מאפשרת יציבות גבוהה, למרות העובי הקטן של הדפנות. מצד שני, ניתן לעוות מבחוץ את בקבוקי הפלסטיק בקלות ע"י הפעלת לחץ קטן.
- קלות ההכנה והתפעול של בקבוקי הפלסטיק היא גורם קריטי בשימוש שלהם בניסויים. ניתן לנסר, לקדוח או לחתוך אותם בהתאם לדרישות של הניסוי. יתר על כן, אפשר לנקב חורים עם חפצים חמים בבקבוקי הפלסטיק, ולאטום אותם עם דבק חם.

באופן כללי, מבדילים בין בקבוקי פלסטיק בעלי דפנות עבות ודקות. ההכנה של בקבוקי פלסטיק בעלי דפנות דקות קלה הרבה יותר, וזאת הסיבה שמעדיפים בדרך כלל להימנע

משימוש מבקבוקים עם דפנות חיצוניות עבות. השימוש בבקבוקים בעלי דפנות עבות מועדף כשהמטרה היא ליצור מערכות יציבות אותן לא ניתן לעוות (Wilke 1998a).

בדרך כלל, ניתן להשתמש בבקבוקי הפלסטיק בניסויים בדרכים שונות. טבלה 6.1 מספקת סקירה כללית של הרב-צדדיות של בקבוקי הפלסטיק בניסויים בהוראת הפיזיקה (Wilke, 1998a, 1998b, 1998c)

ניסויים פיזיקאליים	חומרים דרושים
טורבינה של Segner להדגמת החוק השלישי של ניוטון	בקבוקי פלסטיק, קשיות מתקפלות, דבק, חוט דק, קערה מפלסטיק
סירה נרתעת להדגמת "פעולה" שווה ל"תגובה"	בקבוק פלסטי עם פקק מחורר, חתיכה של צינורית, שתי מבחנות זכוכית
ניסוי על ההפיכה לסירוגין של אנרגיה פוטנציאלית לקינטית, להדגמת אפקט מגנוס	בקבוק פלסטיק גדול ממולא בחול או מים, חוט ארוך עדיף (קשור לתקרה)
צוללן קרטזי להדגמת שוויון הלחץ בכל הכוונים	בקבוק פלסטי גדול ודק (ממולא במים), עם פקק מתברג, חתיכה של קלקר בצורת גליל, מברג
מודל של סירת מנוע	בקבוק פלסטי עם פקק מתברג, חוט גומי, חרוזים, מדחף קטן, מהדק
ניסוי המראה את תלות הלחץ הגרביטציוני בגובה של עמוד מים	בקבוק פלסטי, מחט, משפך
ברומטר-Goethe למדידת הלחץ האטמוספרי	בקבוק פלסטי עם פקק מתברג מנוקב, פקק שנוקב, במחנה בצורת U
טורבינת אוויר עם מוט אופקי	בקבוק פלסטי בעל דפנות עבות, דינמו של אופניים, תיילים, נורה

טבלה 6.1: ניסויים שונים עם בקבוקי פלסטיק



איור 6.2: קשיות בבקבוק פלסטי

הטבלה מייצגת רק חלק קטן מהאפשרויות הניסוייות אותם ניתן להשיג בעזרת בקבוקי פלסטיק. כדי להתרשם יותר טוב בקשר לשימוש של בקבוקי הפלסטיק בניסויים בפיזיקה, נתאר שני ניסויים בפרוטרוט: טורבינת המים של Segner ובניית סירת מנוע.

לפי Wilke (1998a) ניתן לבצע ניסוי המדגים את החוק השלישי של ניוטון כשמכנינים בקבוק פלסטיק בצורה מתאימה. כפי שכבר תואר בטבלה, דרושות מספר קשיות מתקפלות, דבק, חוט דק וקערה מפלסטיק. עבור הניסוי, מנקבים קרוב מאד מעל התחתית שלושה חורים בעלי אורך של 4 מ"מ כל אחד הניצבים במרחק של 120° .

מכניסים קשית מתקפלת בכל אחד מהחורים. אחד מהאורכים של הקשית קוצר (איור 6.2). יש להצמיד את הקשיות לבקבוק בעזרת הדבק. הקשיות צריכות להיות מכופפות ב- 90° .



יש ללחוץ את קצות הקשיות כך שיישאר סדק של בערך 2 מ"מ בקצותיהן. כדי לעשות זאת, צריך להכניס את הקצוות, קודם כל, במים רותחים. לאחר מכן, יש ללחוץ חזק את הקצוות המחוממים עם צבת עד שהקשיות יתקררו מספיק. כדי לבצע את הניסוי, תולים את הבקבוק בעזרת החוט. כדי לעשות זאת, מומלץ לנקב את התבריג בצורה אופקית. לאחר מכן, יש להעביר את החוט דרך הבקבוק (איור 6.3). לבסוף, ממלאים את הבקבוק במים ומשחררים אותו להתחלת הניסוי. הרתיעה נגרמת ע"י סילוני המים היוצאים דרך הקשיות גורמת לתנועה סיבובית של הבקבוק.

איור 6.3: תבריג הבקבוק (עם חוט מועבר)

דוגמא אחרת היא מודל סירת המנוע (Wilke (1998a). כמתואר בטבלה 6.1, לניסוי זה דרוש בקבוק פלסטיק עם פקק מתברג, חוט גומי, מספר חרוזים, מדחף קטן ומהדק. דבר ראשון, צריך לחתוך חור בקוטר של 4 מ"מ בתחתית הבקבוק, וגם חור בקוטר של 2 מ"מ בפקק. צריך לקשור חוט גומי של כ- 5 מטר אורך בקצותיו כדי לבנות את מנוע הגומי. מקפלים את הטבעת הנוצרת ללולאה שאורכה קטן במקצת מאורך הבקבוק. מעקמים את המהדק על מנת להצמיד את לולאת הגומי. בקצה של המהדק קושרים מדחף ימי העשוי מפלסטיק. כדי שהמדחף יישאר מתחת למים, ניתן להשחיל לו מספר חרוזים. לבסוף, מכניסים את המהדק בפתח הפקק המתברג ומכופפים אותו כך שניתן לקשור אליו את לולאת הגומי. מבריגים את הפקק, כפי שהוכן, לבקבוק. בעזרת מהדק שני, מעבירים את לולאת הגומי עד לתחתית הבקבוק וקושרים אותה (איור 6.4). חתיכת עץ נוספת עוזרת להוסיף משקל לסירת המנוע. כך מבטיחים שהסירה לא תסתובב סביב צירה האורכי. בסופו של דבר, המנוע יתחיל לפעול ע"י סיבוב המדחף.



איור 6.4: מודל סירת המנוע

7. החנות לציוד ביתי כמקור של ציוד ניסויי

בפרקים הקודמים הראינו את התועלת שבשימוש בפריטים ממשק הבית לניסויים מדעיים, אך ניתן גם לרכוש פריטים לא יקרים בחנויות לציוד ביתי לביצוע ניסויים.



איור 7.1: צינור מתכת

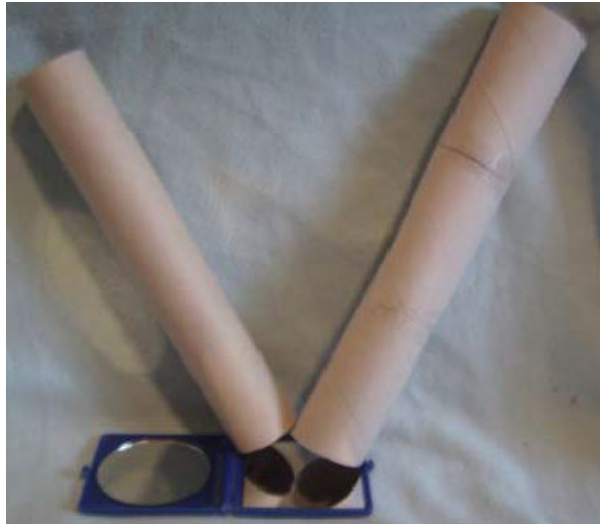
דוגמאות לפריטים אותם ניתן לרכוש בחנויות לציוד בית הן צינורות פלסטיק ומתכת (איור 7.1), סיליקון, פוליסטרן, תיילים חשמליים (איור 7.2), מסמרים, נורות (איור 7.4), משטחים מרוצפים, משטחים גדולים ושקופים, או עשויים זכוכית. חומרים אלו מאפשרים מגוון דברים בהוראת המדעים, בעיקר בהוראת מכניקה, חשמל ואלקטרוכימיה. הניסויים כוללים גופים צפים או שוקעים, לחץ, קשיות או גמישות, או חוקי מנופים, וגם אור, חשמל, מוליכות, תאים אלקטרו כימיים, ועד לבניית אלקטרומגנט ומצית פייזואלקטרי. בנוסף, כל החומר הניסויי הזה יכול לכסות נושאים נוספים. לדוגמה, ניסוי בקשר לחוק ההחזרה ובקשר להעברת אימפולסים (Menzel, 1990; Kuhn & Rech 2003; Mellert et al., 2001; Köthe, 2008).



איור 7.3: נורות

איור 7.2: תיילים חשמליים

נתאר שתי דוגמאות בפרוטרוט: ניסוי אחד בקשר לחוק ההחזרה של האור והשני בנייה של אלקטרומגנט. לפי (Kuhn and Rech (2003), דרושים לניסוי זה שני גלילים פתוחים מפלסטיק או מקרטון, ראי ופנס. מסדרים את החומרים כמראה באיור 7.4. כשמאירים עם הפנס דרך אחד הגלילים ניתן להראות את חוק ההחזרה.



איור 7.4: ניסוי חוק ההחזרה

דוגמא שנייה היא בנייה של אלקטרומגנט (Mellert et al. (2001). במקרה זה, דרוש בורג מברזל, בסביבות 2 מטר תייל של פעמון, סוללה של 1.5 וולט ומספר חתיכות קטנות ממתכת לבדיקת התכונות של האלקטרומגנט. לצורך הבנייה צריך לקלף את הבידוד בקצות התייל, כך שהוא יישאר חשוף. כורכים את התייל מסביב לבורג (ראה איור 7.5), כך שקצותיו תלויים חופשית בקצות הבורג.



איור 7.5: התייל הכרוך מסביב לבורג

חשוב לוודא שהתייל לא מכופף. במידת הצורך, יש להצמיד את התייל לבורג עם נייר דבק. לבסוף, מחברים את הקצוות החשופים של התייל להדקים של הסוללה. כשמשתמשים באלקטרומגנט, יש לוודא שהתייל לא יהיה מחובר לשני הדקי הסוללה במשך זמן רב מדי. לאחר כדקה, קצות התייל מתחממים יתר על המידה.

בניסויים בעלי עלות נמוכה, המחיר בפועל של החומרים משחק תפקיד מרכזי. טבלה 7.1 מסכמת את העלויות של חלק מהחומרים שהוזכרו קודם (Mercateo, 2011).

עלויות (ביורו)	חומרים אלטרנטיביים
0.20 או 1.10 למטר	צינורות פלסטיק או מתכת
1.50 עבור 25 מטר	תיילים
5 ל- 100 פריטים	מסמרים
0.30	נורות
1 ל- 4 פריטים	משטחים מרוצפים

טבלה 7.1: עלויות הציוד בחנויות לציוד ביתי, עבור ניסויים

בכל אופן, לא רק הציוד הנמצא בחנויות לכלי בית מתאים. גם הכימיקלים שרוכשים באותן חנויות אינם יקרים. ניתן לרכוש בהן מגוון של חומצות, סודה קאוסטית, אמוניה, סיד, אצטון, כוהל מתילי, פלסטיקים שונים או מים מזוקקים. חומרים אלה זולים יותר בחנויות לציוד בית מאשר בחנויות לכימיקלים. בנוסף לזה, הם בעלי איכות מספיק טובה לניסויים בבית הספר. טבלה 7.2 מראה באיזה כימיקלים מחנויות לציוד ביתי ניתן להשתמש. שימו רק לב שהרשימה אינה ממצה, אלא רק מהווה סקירה כללית של אפשרויות.

אלטרנטיבה	מוצר
סידן הידרוקסיד	סיד כבוי, מלט המתקשה מהר
סידן גפרתי	גבס
כלוריד	מסיר לחות
חומצה גפריתית של נתרו	pH מינוס (אביזר בריכה)
כלוריד האמוניה	מלח אמוניה
פחמן	פחם
מתוקסי, 2 – פרופאנול, מכיל בין 20 ל- 50%	חומצה לניקוי גרפיטי

טבלה 7.2: כימיקלים אלטרנטיביים המצויים בחנויות לציוד ביתי

השימוש האפשרי של חומרים אלה הוא מאד מגוון. הכוהל המתילי הוא תמיסת אתנול של 96%, אותה ניתן להשתמש כשמשמשים במבאר כוהל בעלות נמוכה. כתוצאה מכך, אין

צורך בתרכובת גז. האצטון, החומצות השונות והכימיקלים האלטרנטיביים המוזכרים ניתנים



לשימוש בצורה דומה לכימיקלים קונבנציונאליים. ניתן לעשות סינתזה של דו-תחמוצת הפחם מסיד ומחומצה. (Seilnacht, 2002). מי-הסיד עבור גילוי דו-תחמוצת הפחמן יכול להיעשות ממלט. לפי (Schwedt, 2001) ו-Köthe (2008), דרוש מלט המתקשה מהר, המכיל סידן הידרוקסי, מים ובקבוק. מוסיפים 20 גרם של מלט ל-50 מ"ל מים ולאחר מכן מנערים או בוחשים. כתוצאה מכך, המוצק הלא מומס מתייצב (איור 7.6) וניתן לשפות את הנוזל. ניתן להשתמש בתסנין לגילוי דו-תחמוצת הפחמן.

איור 7.6: מי סיד העשויים

ממלט המתקשה במהירות

השימוש בכימיקלים האלטרנטיביים מתאים לניסויים כימיים. רכישתם קלה כי היא נעשית ללא פיקוח. מעבר לכך, מוצרים אלה זולים נאד, דבר המבטיח חסכון. יתרון נוסף שבשימוש בכימיקלים האלטרנטיביים הוא שהתלמידים יכולים להבין שחומרים שמשתמשים בהם בניסויים בבית הספר, משחים תפקיד גם בחיי היומיום (Schwedt, 2001). סך הכל, ניתן להגיד שהשימוש בפריטים מחנויות לציוד ביתי מתאימים לניסויים מדעיים. הדוגמאות המוצגות במדריך זה מהוות רק סקירה כללית של חלק מהאפשרויות. אם משתמשים בחומרים המצויים בחנויות לציוד ביתי בצורה יצירתית, הם יכולים לעזור לבצע מגוון רחב של ניסויים.

8. ציוד מחנות האלקטרוניקה לביצוע ניסויים

בפרק הקודם הוצגו חומרים וכימיקלים מנויות לציוד ביתי כמתאימים לניסויים מדעיים. ניתן לרכוש חומרים המתאימים לניסויים בעלות נמוכה גם בחנויות אלקטרוניקה.

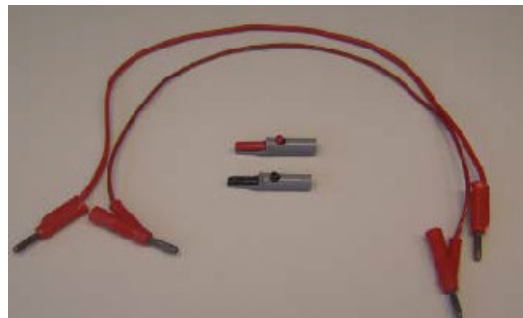


איור 8.1: מולטי-מטר פשוט

בדיוק כמו הפריטים מחנויות לציוד ביתי, גם ציוד מחנויות אלקטרוניקה הוא לא יקר וקל להשגה. הרבה מוצרים מתאימים לניסויים במדעי הטבע. לדוגמא, התקני רשת ומכשירים למתח ישר ולמתח חילופין (איור 8.1), תילי ניסוי (איור 8.2), מחברי תנין, מגנטים (איור 8.3), נורות, מצביעי לייזר, פלטות חימום קטנות, סלילים, שעוני עצר וגם מספר לוחות בקרה וכלי קיבול.



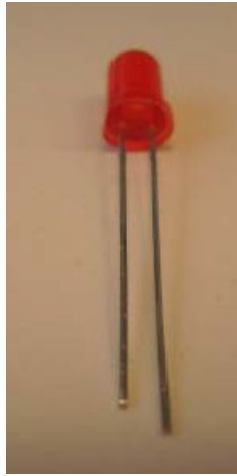
איור 8.3: מגטים



איור 8.2: תילי ניסוי ומחברי תנין

החומרים מחנויות האלקטרוניקה מאפשרים לבצע ניסויים רבים בחשמל ובאלקטרוכימיה. לדוגמא, בניית מנוע חשמלי, בניית מעגל חשמלי, בניית תאים גלווניים ותאים אלקטרוליטיים. אנו נדגיש במיוחד "לדים – דיודות פולטות אור" (LEDs) להצבעה על זרימת זרם חשמלי, ו/או מולטי-מטרים, מכיוון שהם הרבה יותר זולים מהציוד המעבדתי המיוחד (איור 8.4). למרות זאת, הם מספיק מדויקים עבור כמעט כל הניסויים הרלוונטיים בכיתות המדעים בבית הספר. בנוסף לכך, חומרים אלה עוזרים לפיתוח הניסוי של נושאים מדעיים אחרים, כגון

בניית מצפן בעזרת פקק שעם, ניסויים בתנודות או חוק ההחזרה או השבירה (Schlichting & Ucke, 2004; Mellert et al., 2001; Tillmann, 2011; Kieninger, 2008).



איור 8.4: LED – דיודה פולטת אור

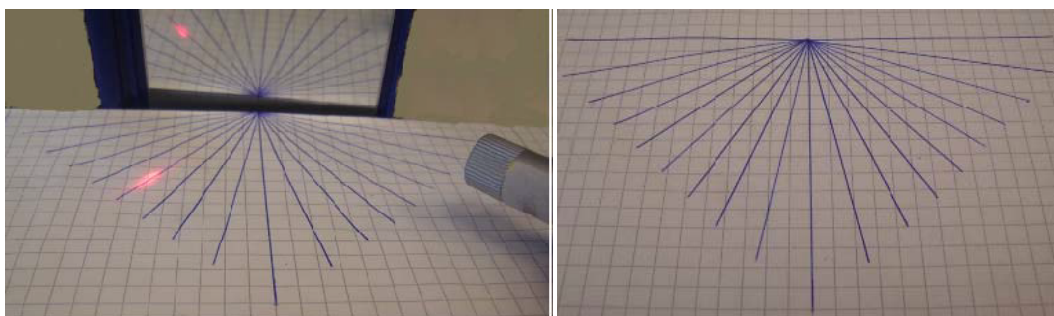


נדגים זאת בעזרת בניית מנוע חשמלי, ניסוי חוק ההחזרה ושימוש ב-LED למדידת מתח. לפי (Schlichting and Ucke, 2004), דרושה סוללה של 1.5 וולט, בורג, מוט מגנטי קטן וחתיכה של תייל לבניית מנוע חשמלי. אם מצמידים את המגנט ואת הבורג לאחד מהדקי הסוללה ומחברים אותה להדק השני בעזרת תייל (איור 8.5), המגנט והבורג מתחילים להסתובב. Schlichting and Ucke טוענים שזאת הדרך המהירה ביותר לבניית מנוע חשמלי. בדרך כלל, מנועים חשמליים נחשבים למערכות מורכבות הכוללות של סליל ומגנט. אם משתמשים בחומרים שתוארו לעיל, ניתן לבנות את המבנה הזה במעט כסף. היעילות שלו נמוכה והבנייה לא יציבה, אך הוא פועל בהתאם לעקרון הישן ביותר שנוסח ע"י פאראדי (Schlichting and Ucke, 2004).

איור 8.5: בנייה עצמית של מנוע חשמלי

הדוגמא השנייה היא ניסוי חוק ההחזרה. לניסוי זה דרוש ראי, נייר גרפים, עפרון, סרגל זווית ומצביע לייזר. מצביעי לייזר עולים 1.50 יורו (Mercateo, 2011), ניתן לרכוש משטח מרוצף בחנות לציוד ביתי בפחות מ-1 יורו. על כן, הציוד הדרוש לביצוע ניסוי חוק ההחזרה עולה בסביבות 2 יורו.

דבר ראשון, מצירים חלוקת זוויות בנייר גרפים נקי ע"י שימוש בסרגל זווית (איור 8.6). לאחר מכן, מציבים את הראי בחלוקת הזוויות כמוראה באיור 8.7.

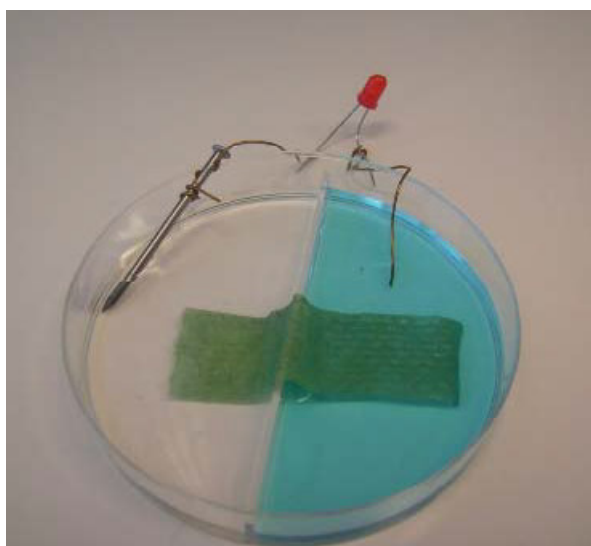


איור 8.7: ניסוי חוק ההחזרה

איור 8.6: חלוקת זוויות

יש להחשיך את החדר כשמאירים לאורך הקווים עם מצביע הלייזר. אפשר לראות את הקרן המוחזרת ולהראות את חוק ההחזרה.

לבסוף, נראה איך ניתן להשתמש ב-LED כמד זרם ומד מתח, בעזרת תא דניאל. זה דורש צלחת פטרי בעלת שני תאים, חתיכה של חוט אבץ, חתיכה של חוט נחושת, תייל, LED, תמיסת חומצה גפריתית של אבץ ושל נחושת. מציבים את החומרים כמוראה באיור 8.8.



איור 8.8: תא דניאל לאימת הספק

כשה-LED זוהר זה מצביע על קיום הפרש פוטנציאלים. היתרון של ה-LED הוא שהוא זוהר גם במתחים נמוכים מאד, וזה יוצר אפקט ויזואלי עבור התלמידים. בסוף הפרק הזה, נציג את העלויות של הציוד האלטרנטיבי שהוזכר לעיל. טבלה 8.1 מונה את החומרים העיקריים המצויים בחנות אלקטרוניקה (Mercateo, 2011; Conrad Elektronik, 2011).

עלויות (ביורו)	ציוד אלטרנטיבי
3 כל אחד	תיילי ניסוי
0.50 כל אחד	מחברי תנין
החל מ- 0.15 (תלוי במודל)	מגנטים
החל מ- 1.20	נורה קטנה
0.04	LED
1.5	מצביע לייזר
10	פלטת השמלית
2	שעון עצר

טבלה 8.1: עלויות של הציוד האלטרנטיבי בחנויות אלקטרוניקה

9. חלופות החוסכות עלות עבור שיטות מחקר כמותניות

ניתן לבצע ניסויים כמותניים בשיעורי המדעים. אלה מכסים טווח רחב, ממדידות זמן, מרחק, טמפרטורה, או מדידות זרם ומתח, ועד למדידות פוט מטריות, קביעת מטענים או אנטלפיות של תגובות כימיות. הרכישה של מכשירים אנליטיים שונים דורשת הוצאות גדולות, יקרות מאד בהקשר הבית ספרי. בכל זאת, לא הכרחי שלא יבוצעו ניסויים כמותניים פעילים בבית הספר, בגלל שניתן לרכוש מכשירים רבים במחירים נמוכים בחנויות לציוד ביתי, או בחנויות אלקטרוניקה, או שניתן לבנות אותם בנייה עצמית עם חומרים קלים להשגה. אפשר למצוא בחנויות לציוד ביתי, או בחנויות מתמחות אחרות, הרבה חלופות לא יקרות למכשירי המדידה המסורתיים. לדוגמא, מולטי-מטרים, תרמומטרים דיגיטליים, פלסים (איור 9.1), מדי מרחק בעזרת לייזר, מאזניים דיגיטליים (איור 9.2) מחנות לכלי מטבח. ניתן להשתמש ברבים מהמתקנים האלה בניסוי, בצורה דומה לציוד המעבדתי הקונבנציונאלי. הם מספיק מדויקים לשימוש לימודי וקלים לתפעול.



איור 9.2: מאזני מטבח



איור 9.1: פלס

מולטי-מטרים לא יקרים מתאימים במיוחד. ניתן לרכוש מודלים פשוטים של מולטי-מטרים למדידת זרם, מתח והתנגדות בפחות מ-10 יורו (Mercateo, 2011). בדגמים מסוימים יש תצוגה דיגיטלית והם יכולים להתחבר למחשב כדי לאסוף נתונים. לדוגמא, המולטי-מטר הדיגיטלי "Digitek DT 4000 ZC". במודל זה, שעלותו בסביבות 40 יורו, יש טווח רחב של אפשרויות מדידה: מתח ישר וחילופין, זרם ישר וחילופין, התנגדות, קיבול, תדירויות עד ל-10 מגה-הרץ וטמפרטורות עד ל- 750°C . במבט ראשון זה נראה מחיר גבוה יחסית, אך יש להתייחס לעובדה שהוא רב שימושי.

קיימים גם עזרים לניסויים כמותניים בחנויות לאקווריומים. בחנויות אלו ניתן לרכוש מולטי-מטרים המאפשרים מדידה של ערכי pH. אלה אכן יקרים יחסית, 150 יורו למודל (Schneiderbanger, 2011). ישנן גם בדיקות מהירות זולות יותר וקלות לתפעול למדידת ערכי pH או ריכוז ניטראטים בגופי מים.

ניתן להחליף יחידות נוספות בבניות עצמיות, בעזרת חלופות זולות. אחת האפשרויות היא בניית מתקן למדידת מוליכות לפי (Kappenberg, 2011), קלורמטר זול, מד אור זול לפי Just (1990), וכרומטוגרף גזים זול. את התקן האנליזה האחרון ניתן גם לרכוש או לבנות בנייה עצמית.

Kappenberg (2011) מציע מספר אפשרויות לרכישה ומספר מדריכים לבנייה עצמית. עלות הרכישה היא 350 יורו, בעוד הכרומטוגרף הקונבנציונלי עולה כמא אלפי יורו (Neubert, 2011). כלומר, ניתן לחסוך הרבה כסף ברכישת הדגם הזול. Kappenberg (2011) מציע גם מדריך לבנייה עצמית של המכשיר על מנת לחסוך כסף נוסף. בסך הכל, כרומטוגרף גזים הבנוי מחומרים מההנדסה הרפואית עולה פחות מ-50 יורו, וזה כבר מהווה חיסכון משמעותי. בנוסף, Kappenberg (1998) טוען שהכרומטוגרף גזים בבנייה עצמית מתאים מאד למדידות אנליטיות שונות. לפי Kappenberg, התקבלו תוצאות טובות בניסויי בית ספר הבאים:

- אנליזה של מצית.
- חיזור קטליתי של אלקנים ואלקנינים.
- כלורינציה פוטו-כימית של מתאן
- פירוליזה של פלסטיק

יש לציין שמרכיבים נדיפים מתנדפים במהירות ובהתאם לכך משנים את הרכב הגז ואת הכרומטוגרם. למרות החיסרון הזה, המכשיר המוצג לעיל עוזר לתלמידים לתפעל אותו ולהבין את התפקוד שלו.

בשלב זה, נתאר את השימוש במכשירים בבנייה עצמית בכיתה בעזרת דוגמאות לקביעת כמויות חום של ערבוב ושל היתוך. בדוגמאות האלה, מכניסים כוס פלסטיק לתוך כוס זכוכית מתאימה (איור 9.3). היתרון של הקלורימטר הזה הוא שהוא קל מאד. הודות לכך, אפשר לשקול את הנוזלים בצורה ישירה, מבלי להעביר אותם. בהשוואה לתאיי הייבוש היתרון הנוסף הוא שאין סכנת קריסה (Maisenbacher, 2011). כדאי לציין גם את המחיר של כמה סנטיים לכוס הפלסטיק ושל בערך 1.50 יורו ל כוס הפלסטיק (Mercateo, 2011). בהשוואה, המחיר של תאיי הייבוש הוא כמה מאות יורו. כדי לקבוע את אנטלפית התגובה, מעבר לקלורימטר הזול, דרושים רק מאזניים, שעון עצר ותרמומטר. מומלץ לבדוד את החלק החיצוני של



הקלורימטר עם קלקר. כדי לקבוע את שו-ערך המים עם המכשיר הזה, צריך לצקת 50 גרם מים לתוכו ולעקוב אחר הטמפרטורה עד שהיא מפסיקה להשתנות. לאחר מכן, יש לצקת את אותה כמות מים בטמפרטורה של 40°C לתוך קלורימטר זול אחר. צריך גם לעקוב אחר הטמפרטורה ולרשום אותה לפרקי זמן מסוימים. לאר כ- 3-4 דקות, מוסיפים את המים הקרים. יש להמשיך ולעקוב אחר הטמפרטורה ולרשום אותה לפרקי זמן מסוימים. במהלך הקביעה של שווה-ערך המים צריך לדאוג לערבוב טוב. את זה ניתן לעשות בעזרת מערבב מגנטי או מקל מעץ או מפלסטיק.

איור 9.3: קלורימטר זול

בסך הכל, צריך תמיד לזכור את הזמן שלוקחת הבנייה העצמית של המכשירים האנליטיים השונים. זמן זה נחסך בקנייה רגילה, אך העלות הגבוהה של מכשיר המדידה הקונבנציונלי עלולה למנוע את הרכישה. על כן, הגישה המוצגת לעיל יכולה להוות אלטרנטיבה טובה.

10. ניסויים עם חומרים הנמצאים במשק הבית

כבר דנו קודם בפרוטרוט בקשר לשימוש במיכלים המצויים בית לניסויים מדעיים. אך קיימים פריטים ביתיים נוספים שהם מתאימים לכך. לדוגמה משפכים מהמטבח, צינורות מהגינה, גולות, חרוזים, בלונים, נייר כסף, מסנני קפה, סמנים, צלחות זכוכית שטוחות (למשל, קדירה) ומראות. היתרון הגדול ביותר בשימוש בחפצים יומיומיים כציוד ניסויי הוא שפריטים אלה ניתנים להשגה כמעט בכל משק בית. העובדה הזאת מאפשרת לתלמידים לבצע ניסויים גם בבית. בית הספר יכול לרכוש בקלות פריטים אלה מכיוון שהם נמצאים במרכולים במחיר נמוך יחסית.

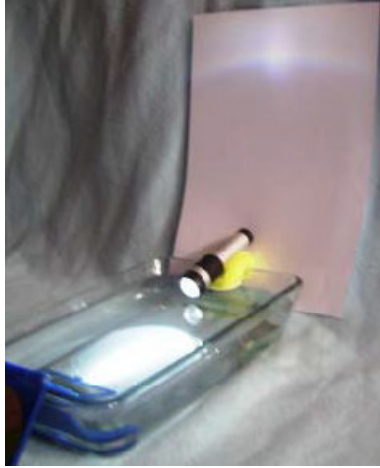
קיימים ספרים רבים הדנים בניסויים המדעיים עם פריטים ממשק הבית. לדוגמה, הספרים של (1997) Ardley, (2010) Heuer, (1995) Press, (2008) Köthe ו-(2009) Rüter. הספרים מכוונים בדרך כלל להורים כדי שהם יחקרו תופעות טבע בבית עם ילדיהם. בכל זאת, ניתן לבצע ניסויים כאלה גם בשיעורי הביולוגיה, הפיזיקה והכימיה ובכך להעשיר את ההוראה. קיימות גם הצעות לא מעטות כאלה באינטרנט. (2011) Tillmann מתאר מספר ניסויים אותם ניתן לבצע עם פריטים יומיומיים. על מנת להראות את הרב תכליתיות של חומרים שונים, נתאר בשלב זה מספר דוגמאות.



איור 10.1: בנייה של מעביר קול חלופי

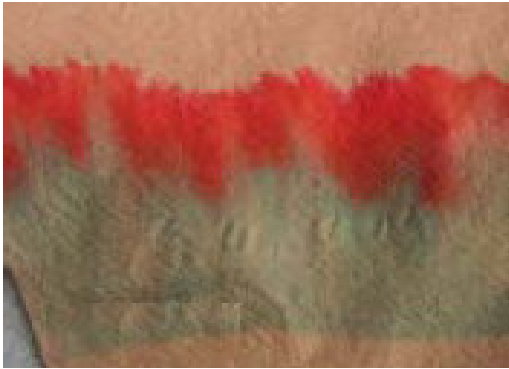
בתחום הפיזיקה נבחרו ניסויים בשמיעת קול ובאופטיקה. לביצוע הניסוי הראשון דרושים שני משפכי פלסטיק מהמטבח, נייר דבק לצינור, שני צינורות פלסטיק מהגינה ומקל עץ. משחילים צינור פלסטיק לכל אחד מהמשפכים ומצמידים אותו למקל עץ (איור 10.1). גלי הקול המגיעים מצד שמאל יכולים להיות מועברים דרך הצינור לאוזן מימין, ולהיפך.

הדוגמה השנייה בפיזיקה שייכת לתחום האופטיקה. ניתן ליצור קשת בעזרת סיר בישול, פנס, קצת פלסטלינה, קרטון לבן וראי, ע"י נפיצת האור מהפנס למרכיביו הספקטראליים (Ardley, 1997). לביצוע הניסוי, יש להחשיך את החדר ולאחר מכן להטות ראי, המחובר בעזרת הפלסטלינה לתחתיתה של קערת זכוכית המלאה במים. אז, מאירים עם הפנס על החלק התחתון של הראי המכוסה במים. ניתן לראות את הקשת כשמחזיקים את הקרטון הלבן מעל לקערה (איור 10.2).

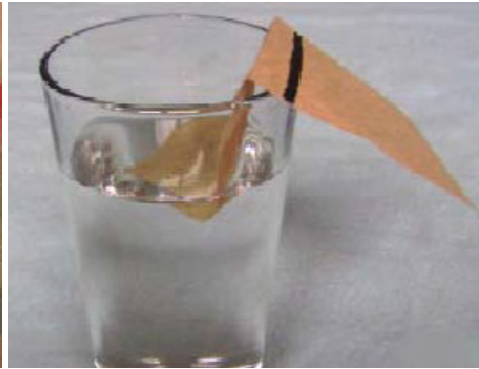


איור 10.2: יצירת קשת בענן

בתחום הכימיה נציג ניסוי בכרומטוגרפיה. ניתן לפרק את הצבע של סמנים למרכיביו, בעזרת כרומטוגרפיה. לביצוע הניסוי דרושים עט בעל חוד לבד, כוס זכוכית ומסנן קפה. קודם כל צריך לצייר קו עבה בנייר של המסנן. מקפלים את המסנן הצבוע מעל לשפה של הכוס ותולים אותו על המים כמראה באיור 10.3 (Tillmann, 2011). כשהמים מתפשטים, המרכיבים של הדיו של העט בעל חוד הלבד נישאים בשיעורים שונים, דבר היותר כרומטוגרמים שונים (איור 10.4). כשמסנן הקפה התייבש, ניתן לראות את המרכיבים של הדיו מהכרומטוגרמים האלה.



איור 10.4: כרומטוגרם של סמן חום



איור 10.3: כרומטוגרף בעלות נמוכה

גם חימום וקירור של כריות, ואפילו קפסולות מחוממות של אספרסו עשויים לעורר חקירה מעניינת. בדרך כלל ממלאים כריות מחוממות בתמיסה של נתרן אצטט הידראט (Fischer, 2011) אם מכופפים את צלחת המתכת הנמצאת בכרית, מתחילה התגבשות שמשחררת חום מסוים. לפי המחבר, עליית הטמפרטורה הודות להתגבשות יכולה להגיע עד 35°C . אם משלימים את ההתגבשות ומקררים את הכרית, ניתן להמיס את הגבישים בעזרת אספקת אנרגיה בצורת מים חמים, ואז ההתגבשות היא בלתי הפיכה. בכל זאת, לא ניתן להשתמש מספר פעמים בכריות קירור. אפשרות אחרת היא רטיות חמות-קרורות, אותן מחממים



במיקרוגל או מקוררות במקפיא, ומעבר לכך, ספלים לחימום עצמי בהם ניתן לחמם נוזלים. ניתן להשיג כריות לחימום ולקירור, רטיות וגם ספלים לחימום עצמי במחירים נמוכים (Mercateo, 2011) או בחנויות לציוד ביתי.

ניתן לחקור פריטים אלה בצורה איכותנית, ניתן לבדוק את התוצאות בצורה כמותנית או לשכפל אותן בתחרות. היישומים הם רבים. כדי לקבל מושג יותר טוב בנידון, נציג ניסוי נוסף בו משתמשים בכרית חימום כדי לחקור את ההתנהגות של גזים בזמן שינוי בטמפרטורה שלהם. דרושים לכך, בקבוק, קשית, פלסטלינה וכרית חימום. ממלאים את הבקבוק עד לאמצע במים צבעוניים ומכניסים את הקשית עד שהיא צוללת בתוך המים. לאחר מכן, אוטמים את פתח הבקבוק עם הפלסטלינה (Köthe, 2008). איור 10.5 מראה את המערכת המתוארת. ניתן לחמם את האוויר שבבקבוק בעזרת כרית החימום ע"י הצמדת הכרית לדופן החיצוני של הבקבוק. רואים את התפשטות האוויר בבקבוק ע"י שינוי מפלס המים בקשית.

איור 10.5: ניסוי התנהגות גזים עם שינוי בטמפרטורה.

לבסוף, כדאי לציין שבמשק הבית אפשר למצוא לא רק את הציוד לניסוי. כפי שצוין בפרקים אשר דנו בפריטים אותם ניתן להשיג בחנויות לציוד ביתי, גם פריטים שאפשר למצוא במשק הבית או במרכזים יכולים לשמש כתחליפים לכימיקלים. ניתן להשתמש בהרבה חלופות, שהוצגו כדוגמאות, בכימה המבוססת חומצות. אפשר לבנות מציינים מכרוב אדום, חציל, צנון, ורדים או תה. ניתן לבנות בקלות מצייין בעזרת כרוב אדום, כוהל מתילי וסיר בישול. חותכים את הכרוב לחתיכות קטנות ושמים אותו ביחד עם הכוהל בתוך סיר הבישול, בו הוא צריך לרתוח במשך כ- 5 עד 10 דקות. לאחר מכן, אפשר למלא בקבוק בתמיסה הצבעונית שנוצרה ולהשתמש בה כמצייין. בעזרת המצייין הזה מבנייה עצמית, ניתן לבדוק את ערכי ה-pH של חומרים ממשק הבית כגון סבון נוזלי, תמיסת מלח רגיל, חומץ מדולל או מנקה

מקטרת (Press, 1995; Schwedt, 2003). איור 10.6 מייצג את סקלת הצבעים שהמציין מכרוב אדום מראה בסבון נוזל, בתמיסת מלח רגיל, בכוהל מתילי, בחומץ מדולל, בסבון נוזלי, ובמנקה חלוד.

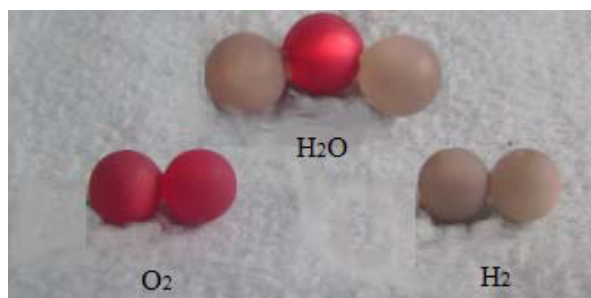
קיימים עוד הרבה יותר יישומים. Schwedt (2001; 2003) מציע למזג כלור, חנקן ומימן. מתאים גם למזג דו-תחמוצת הפחמן מסודה לשתייה ומחומץ מדולל, וגם ליצור הר געש לפי Ardley (1997) או לייצר חשמל מתפוחי אדמה (Press, 1995). החבר האחרון מציע גם להשתמש במי-סודה כדי לחקות מערה.



איור 10.6: סקאלת צבעים ממציין העשוי מכרוב אדום, במגוון תמיסות ממשק הבית

כפי שצוין קודם, רכישת הכימיקלים החלופיים קלה, כי משתמשים רק במוצרים זולים מהמרכול ללא הגבלות מסחריות. מעבר לכך, התלמידים יכולים ללמוד בדרך הזאת שהכימיה לא מתרחשת רק בשיעור הכימיה, אלא גם בחיי יומיום. בכל מקרה, צריך גם לציין את החסרונות של הגישה הזאת. התוצאות של הניסויים עם חומרים יומיומיים הן לפעמים חלשות יותר בגלל שהם פחות טהורים מהכימיקלים המעבדתיים.

בשלב זה, יש לציין שניתן להשתמש בחומרים היומיומיים לא רק בניסויים בנושאים של מדעי הטבע. ניתן לבנות איתם גם מודלים. לדוגמה, חרוזים מתאימים משרשרת או חרוזי צלולזה, מתאימים לבנות מודלים מולקולאריים (איור 10.7).



איור 10.7: מולקולות הבנויות מחרוזים

ניתן לבנות אפילו מודלים בביולוגיה בצורה הזאת, כגון מודל העין. בעזרת מודל זה, הלמיד לומד את התפקוד של העין. דרושים לכך קרטון, נייר דבק, זכוכית מגדלת, פלסטלינה, ממחטת נייר, פנס ואגרטל בצורת כדור (או קומקום תה מזכוכית) (Ardley, 1997). מדביקים את ממחטת הנייר בדופן החיצוני של האגרטל וחותכים צורה כלשהי בקרטון. לאחר מכן, מרכיבים ביחד את האגרטל, את זכוכית המגדלת ואת הקרטון ומייצבים אותם בעזרת הפלסטלינה, כמראה באיור 10.8.



איור 10.8: מודל של העין

אם מכוונים את קרן האור היוצאת מהפנס לכיוון הצורה שצוירה בקרטון, אותה צורה מופיעה בממחטה בסיבוב של 180° . הזכוכית המגדלת פועלת כעדשה על העין. ע"י הזזת הזכוכית המגדלת ניתן למקד את הדמות בממחטה (Ardley, 1997).

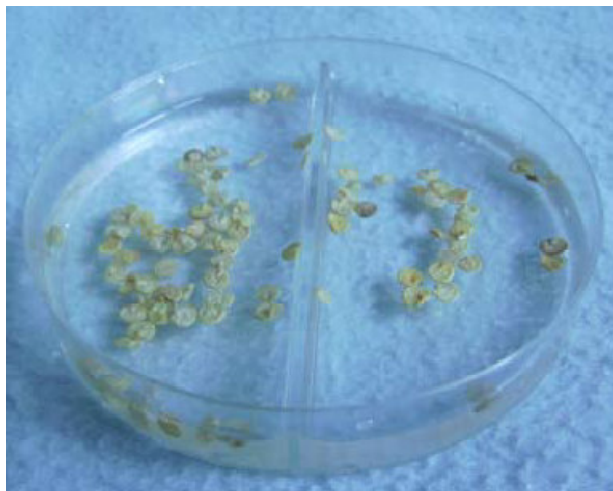
1. גישות בעלות נמוכה בניסויים בביולוגיה

בפרקים הקודמים הוצגו טכניקות רבות המאפשרות לבצע ניסויים בעלות נמוכה, בלוי דוגמאות ניסוייות. פרק זה מתכוון לכסות את תחום הביולוגיה ששיחק עד כה תפקיד משני. ניתן ליישם מספר טכניקות גם בניסויים בשיעורי ביולוגיה. ניתן להחליף הרבה מאד חומרים מעבדתיים קונבנציונאליים ע"י מתקנים בטכניקות של עלות נמוכה. לדוגמא, מודל הנשימה של Sapper and Widhalm (2001).

להבדיל מהניסויים בכימיה ובפיזיקה, ישנם ניסויים רבים בביולוגיה אותם ניתן לבצע בעזרת צמחים, עלים, גבעולים ופירות. לדוגמא, הפענוח החושי של שמן אתרי, הניסוי בקרותנואידיים בפלפל, ניסויים לחשיפת נפיחות והזעה בצמחים, כמו גם הוכחת היצירה של חמצן במהלך פוטוסינתזה לפי (Schwedt (2007), Sapper and Widhalm (2001) ו-Wild (1999).

ניתן לאסוף בקלות את חלקי הצמח הדרושים לניסויים אלה לפני השיעור, בפארקים או בחצר ביה"ס. לחלופין ניתן להציב צמחים בעצצים בכיתה, כך שאפשר להשתמש בעלים טריים. ניתן לקנות הרבה פירות וירקות במחיר סביר במרכולים.

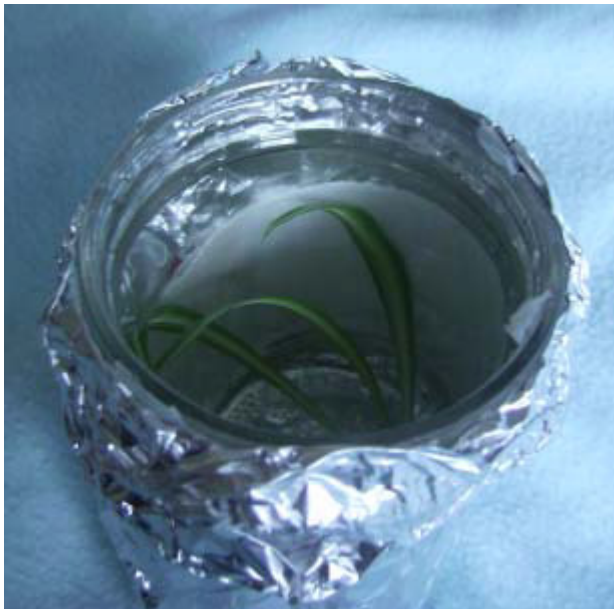
למרות זאת, במקרים רבים יש צורך שהתלמידים יתעסקו בכל תהליך הגדילה של הצמח. לפי (Keil and Kremer (2004 ניתן לגדל אותם. על מנת לעשות זאת, יש להשרות את הזרעים במשך חצי יום, או במשך הלילה, במי ברז בטמפרטורת החדר (איור 11.1). לאחר מכן מפזרים אותם בנייר סופג לח בתוך צלחת פטרי. הם אמורים לנבט בטמפרטורה של כ- 25 °C. לאחר כשעה עד שעתיים, השורשים אמורים לגדול עד לאורך של כ- 5 ס"מ. את השתיל אפשר להכניס לתמיסה מזינה. בתמיסה זו הם אמורים לגדול במשך 5 עד 8 ימים, לפני השימוש שלהם בניסוי.



איור 11.1: זרעים של פלפל בטרם נביטה

להבנה טובה יותר של הניסויים עם צמחים, או חלקים של צמחים, נתאר ניסוי של גילוי חמצן במהלך פוטוסינתזה, וניסוי אחר של סחיטת קרוטנואידים מפלפלים.

לניסוי הראשון דרוש נצר של צמח שלא נובל מהר מדי, שלוש צנצנות עם מכסה, שלוש נרות, שלושה קיסמים, קשית, נייר כסף, שעון עצר ומי ברז. בהכנה מציבים את הקיסמים בין גביע האלומיניום של הנרות והנרות עצמם (איור 11.2). זה משמש כידיות המאפשרות העברה מהירה של הנרות. בסך הכל, אורך הקיסמים (מעץ או מפלסטיק) צריך להתאים לגודל של הצנצנת הסגורה. מכסים את הצנצנות בנייר הכסף (יש לעזוב את המכסה) וממלאים אותן במי ברז. סוגרים את אחת הצנצנות המשמשת למטרת השוואה. בצנצנת השנייה מכניסים נצר של צמח (איור 11.3), ואז סוגרים. מישהו צריך לנשום דרך הקשית בצנצנת האחרונה ואז לסגור אותה גם.



איור 11.3: נצר של צמח בצנצנת מוחשכת



איור 11.2: הנר עם הקיסם

יש להציב את שלוש הצנצנות בחלון במשך כמה ימים. בשיעור שלאחר מכן ניתן להשוות את כמות החמצן בצנצנות בעזרת נרות. לפי (Schwedt 2007), לצורך סחיטת הקרוטנואידים מהפלפלים דרושים מספר פלפלים בצבעים שונים, כוהל מתילי, מבחנות אפנדורף וסכין חיתוך. חותכים את הפלפלים לחתיכות קטנות בעזרת סכין ושמים חלק מהחתיכות בתוך מבחנת אפנדורף. לאחר מכן, ממלאים את המבחנה בכוהל מתילי ומנערים אותה חזק. איור 11.4 מראה איך נראית התוצאה הצפויה של ניסוי זה. הקרוטינים מצטברים בפאזה הגזית, בעוד הפיגמנטים נשארים בפאזה הנוזלית.



איור 11.4: סחיטה של פלפל אדום (שמאל) ושל פלפל ירוק (ימין)

בכל זאת, בשיעורי הביולוגיה לא עוסקים רק בצמחים. אל גם ביצורים חיים. במיוחד, הנושא של איברי החישה של האדם מזמן הזדמנות ל"ניסויים עצמיים" לפי עקרון העלות הנמוכה. הניסויים הקשורים לתפיסה חזותית מתאימים במיוחד. נתאר זאת בדוגמא של ראייה סטראוסקופית. לפי (Sapper and Widhalm, 2001), לביצוע הניסוי דרושים טבעת של וילון, חבל ועיפרון. תולים את הטבעת בחבל, כך ש"האדם הנבדק" יוכל לראות אותה (איור 11.5). האדם הנבדק מכסה עין אחת ומנסה להשחיל את העיפרון דרך הטבעת עם היד שלו.



איור 11.5: ראייה סטראוסקופית

כדוגמאות נוספות, המחברים מציעים לבצע ניסויים בנושא התאמה, שמיעה כיוונית, קואורדינציה של תנועות וטשטוש חוש הריח של תלמיד. בסך הכל, ניתן להדגיש שהניסויים שהוצגו בפרק זה מאפשרים גישה של עלות נמוכה ללא יוצא מן הכלל. השימוש בחלקים של צמחים או בנצרים של צמחים, וכמו כן המעורבות של תלמיד, לא עולים כסף. גם הרכישה של יתר החומרים היא זולה, כפי שהוסבר בפרוטרוט בפרקים הקודמים.

לבסוף, נתייחס להיבט מרכזי בשיעור הביולוגיה. למיקרוסקופ יש תפקיד חשוב בהוראת הביולוגיה. ישנם כללי ניסוי רבים ההופכים את השימוש במיקרוסקופ לחיוני (ראה Wild, 1999, Sapper & Widhalm, 2001). רכישת הציוד הזה יקרה, מיקרוסקופ בודד עולה עד ל-200 יורו בחנויות מקצועיות (Henkel, 2003).

במקרים רבים ניתן, בכל זאת, להימנע מרכישה יקרה זו. יש אפשרות לרכוש מודלים פשוטים יותר, בעלי הגדלה קטנה יותר, במחירים יותר נמוכים. קיימים מיקרוסקופים פשוטים שעלותם כ-20 יורו, וזה חיסכון של פי 10. בכל אופן, (Henkel 2003) מראה בצורה מפורטת שמיקרוסקופים פשוטים רבים הם בעלי איכות נמוכה אשר לא מתאימה לסטנדרטים של שיעורי הביולוגיה המתקדמים. זה מתבטא בהגדלה מצומצמת, בנייה ואופטיקה לא טובים. על כן, כשהולכים לקנות מיקרוסקופ חייבים להיות מודעים לדרישות הביצוע הנחוצות. (Henkel 2003) מציע גם להחליף מיקרוסקופים בזכוכיות מגדלות בגילאים הצעירים (איור 11.6). כך ניתן להשיג הגדלה של פי 10 והעלות של זכוכית מגדלת באיכות טובה היא פחות מ-10 יורו (Henkel 2003). יתרון נוסף של הזכוכיות המגדלות, במקום המיקרוסקופים היקרים, הוא העובדה שאלה מכשירים יותר חזקים. לתלמידים הצעירים, במיוחד, אין את המיומנויות המוטוריות הדרושות כדי להבטיח שימוש מתאים של מכשור הגדלה יקר.



איור 11.6: זכוכית מגדלת

- Apotheke am Wolfsanger. (2006). *Online-Apotheke*. Accessed on 24th July 2011:
<http://www.medizinwiesel24.com/>.
- Ardley, N. (1997). *101 spannende Experimente aus Wissenschaft und Technik*.
 Bindlach: Loewe-Verlag.
- Bader, H. J. (2003). Nachhaltigkeit und nachhaltiges Arbeiten. *Praxis der
 Naturwissenschaften – Chemie*, 52 (3), 16 - 20.
- Bradley, J. D., Durbach, S., Bell, B., & Mungarulire, J. (1998). Hands-On Practical
 Chemistry for All - Why and How. *Journal of Chemical Education*, 75 (11),
 1406 - 1409.
- Bradley, J. (2006). The Microscience Project and its Impact on Pre-service and
 Inservice Teacher Education . In M. Hugerat, P. Schwarz, & P. Livneh,
Microscale Chemistry Experimentation for all Ages (S. 26 - 39). Haifa: The
 Academic Arab College for Education.
- Brand, B. H. (2010). *BRANDs CHEMIE*. Accessed on 24th July 2011:
<http://www.bhbrand.de/index.php>.
- Choi, M. M. (2002). Microscale Chemistry in a Plastic Petri Dish: Preparation and
 Chemical Properties of Chlorine Gas. *Journal of Chemical Education*, 79 (8),
 992 - 993.
- ConradElektrik. (2011). *Conrad. Voller Ideen*. Abgerufen am 27. August 2011 von
http://www.conrad.de/ce/de/?insert_kz=NA&hk=SEM&WT.srch=1&clid=CLu1jMak76oCFYIXzQodfyE7PA.
- du Toit, M., & du Toit, C. (2006). Microscale Experiments using a STUDENT LAB.
 In M. Hugerat, P. Schwarz, & M. Livneh, *Microscale Chemistry
 Experimentation for all Ages* (S. 103 - 108). Haifa: The Academic Arab
 College for Education.
- Eckert, B., Stetzenbach, W., & Jodl, H.-J. (2000). *Low Cost - hightech*.
Freihandversuche Physik. Anregungen für einen zeitgemäßen Unterricht. Köln:
 Aulis-Verlag. Eilks, I., Fischer, H., Hammann, M., Neuhaus, B., Petri, J., Ralle, B.,
 et al. (2004). Forschungsergebnisse zur Neugestaltung des Unterrichts in den

- Naturwissenschaften. In H. Bayrhuber, *Konsequenzen aus Pisa. Perspektiven der Fachdidaktiken* (S. 197 - 216). Wien: Studienverlag.
- El-Marsafy, M. K. (2004). Mikrochemische Maßanalyse. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 81, 16 - 19.
- ELV-Elektronik. (2011). *ELV - Kompetent in Elektronik*. Accessed on 28th August 2011: <http://www.elv.de/output/controller.aspx>.
- Ferdinand, P. (2007). *Selbstgesteuertes Lernen in den Naturwissenschaften. Eine Interventionsstudie zu den kognitiven und motivationalen Effekten eines Blended Learning Ansatzes*. Hamburg: Verlag Dr. Kovac.
- Fischer, O. (2011). *Wissenschaft in die Schulen*. Accessed on 24th July 2011: <http://www.wissenschaft-schulen.de/>.
- Full, R. (1996). Lichtblicke - Petrischalenexperimente in der Overhead-Projektion. *Chemie in unserer Zeit*, 30 (6), 286 - 294.
- Häusler, K., Rampf, H., & Reichelt, R. (1995). *Experimente für den Chemieunterricht - mit einer Einführung in die Labortechnik*. München, Düsseldorf und Stuttgart: Oldenbourg (2. Auflage).
- Henkel, K. (14. Juni 2003). *Die Mikrofibel*. Accessed on 28th August 2011: <http://www.mikroskopie-muenchen.de/mikrofibel.pdf>.
- Heuer, (2010). *Spectacular Experiments & Mad Science Kids Love: Science That Dazzles at Home, School or on the Go*. Bloomington: Authorhouse.
- Joling, E. (2006). Introduction of Microscale Chemistry in the Netherlands. In M. Hugerat, P. Schwarz, & M. Livneh, *Microscale Chemistry Experimentation for all Ages* (S. 183 - 197). Haifa: The Academic Arab College for Education.
- Just, N. (1990). Low-Cost-Experimente - Teil 4: Das Photometer in der Zigarrenkiste - eine Anleitung zum Selbstbau eines Photometers durch die Schüler. *Praxis der Naturwissenschaften Chemie*, 39 (1), 30 - 31.
- Kappenberg, F. (2011). *Arbeitskreis Kappenberg*. Accessed on 24th July 2011: <http://www.kappenberg.com/pages/start/start.htm>.
- Keil, M., & Kremer, B. P. (2004). *Wenn Monster munter werden – Einfache Experimente aus der Biologie*. Weinheim: Wiley.

- Kieninger, M. (2008). *Physik mit 4- bis 6-Jährigen*. Berlin: Cornelsen.
- Kircher, E., Girwidz, R., & Häußler, P. (2001). *Physikdidaktik: Eine Einführung*. Berlin: Springer.
- Köhler-Krützfeld, A., & Gruvberg, C. (2000). Microscale Chemistry: Eine europäische Idee kehrt zurück nach Europa. *Praxis der Naturwissenschaften*, 49 (5), 18 - 21.
- Köthe, R. (2008). *Was ist Was - Experimentierbuch. 175 Experimente aus Physik, Biologie und Chemie*. Nürnberg: Tessloff.
- Kranz, J. (2008). *Schulentwicklung konkret: Baustein "Schülermotivation"*. Berlin: Cornelsen Scriptor.
- Kruse-Özcelik, R., & Schwarz, P. (2004). Experimente für kleine Hände. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 81, 10 - 15.
- Kuhn, J., & Rech, A. (2003). *Freihandexperimente und Naturphänomene aus den Naturwissenschaften*. Accessed on 27th August 2011: <http://www.unilandau.de/physik/fan/index.html>.
- Latzel, G. (1989). Low-Cost-Experimente- Teil 1: Das einfache Experiment. *Praxis der Naturwissenschaften – Chemie*, 38 (6), 34 - 35.
- Maisenbacher, P. (2011). *Landesbildungsserver Baden Württemberg*. Accessed on 24th July 2011: <http://www.schule-bw.de/>.
- Maurer. (2011). *Maurer - Lehr- und Forschungsmittel*. Accessed on 28th August 2011: <http://www.mauer-gmbh.com/index2.htm>.
- Mellert, V., Grahl, S., Rehtien, P., Weusting, P., Poppinga, D., & Poppinga, T. (2001). *Physik für Kids*. Abgerufen am 27. August 2011 von <http://www.physikfuerkids.de/>.
- Menzel, P. (1990). Low-Cost-Experimente: Teil 10: Eigenbau eines piezoelektrischen Zündgerätes. *Praxis der Naturwissenschaften Chemie*, 39 (7), 34.
- Mercateo. (2011). *Die Beschaffungsplattform für Geschäftskunden*. Accessed on 24th July 2011: <http://www.mercateo.at/>.
- Neubert, M. (2011). *Dynatech - Ihr Taschenrechner Spezialist*. Accessed on 28th August 2011: <http://www.dynatech.de/index.php?prod=5379>.

- NeubertGlas. (2011). *Der Laborfachhandel*. Accessed on 24th July 2011:
<http://www.neubert-glas.de/>.
- Obendrauf, V. (2004). Toxisches Chlor vernünftig dosiert. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 81, 22 - 27.
- Obendrauf, V. (2006). Fundamental Microscale Experiments from Austria, Presented Worldwide. In M. Hugerat, P. Schwarz, & M. Livneh, *Microscale Chemistry Experimentation for all Ages* (S. 300 - 321). Haifa: The Academic Arab College for Education.
- Omikron. (2004). *Chemikalien und Laborgeräte*. Accessed on 24th July 2011:
<http://www.omikron-online.de/cyberchem/>.
- Pfeifer, P., Lutz, B., & Bader, H. J. (2002). *Konkrete Fachdidaktik Chemie*. München: Oldenbourg.
- Pike, R. M. (2006). Through the Years with Microscale Chemistry. In M. Hugerat, P. Schwarz, & M. Livneh, *Microscale Chemistry Experimentation for all Ages* (S. 13 - 25). Haifa: The Academic Arab College for Education.
- Press, H. J. (1995). *The Little Giant Book of Science Experiments*. New York: Ravensburger Buchverlag Otto Maier GmbH.
- Rüter, M. (2009). *111 spannende Experimente für Kinder. Faszinierend. Verblüffend. Völlig ungefährlich*. München: Compact.
- Sapper, N., & Widhalm, H. (2001). *Einfache biologische Experimente*. Wien: Klett.
- Schallies, M. (1991). Mikrochemische Methoden im Schulexperiment - gestern, heute und morgen. *Praxis der Naturwissenschaften – Chemie*, 40 (1), 2 - 5.
- Schlichting, H. J., & Ucke, C. (2004). Der einfachste Elektromotor der Welt. *Physik unserer Zeit*, 35 (6), 272 - 273.
- Schmittingerm, T. (2011). *Katharineum. Städtisches Gymnasium für Jungen und Mädchen mit altsprachlichem Zweig*. Accessed on 24th July 2011:
<http://kath.mrstec.de:9673/>.
- Schneiderbanger, M. (2011). *Aquaristik - Margit Schneiderbanger*. Accessed on 28th August 2011: <http://www.aquarium-laden.de/Start>.

- Schwan, T. (2005). Elektrochemie im Low-Cost Maßstab: Elektrolyse, Schmelzelektrolyse und galvanische Elemente im Kontext der Unterrichtsreihe „Atombau und chemische Bindung“. *Der Mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 58 (3), 169 - 175.
- Schwarz, P., & Lutz, B. (2004). Kreativer Chemieunterricht: Mikrochemische Experimente in der Schule. *Naturwissenschaften im Unterricht*, 81, 4 - 9.
- Schwedt, G. (2001). *Experimente mit Supermarktprodukten: eine chemische Warenkunde*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Schwedt, G. (2003). *Noch mehr Experimente mit Supermarktprodukten: das Periodensystem als Wegweiser*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Schwedt, G. (2007). *Chemie für alle Jahreszeiten - Einfache Experimente mit pflanzlichen Naturstoffen*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Seilnacht, T. (2002). *Naturwissenschaftliches Arbeiten*. Accessed on 24th July 2011: <http://www.seilnacht.com/>.
- Sigma-Aldrich, C.-O. (2011). Accessed on 24th July 2011: <http://www.sigmaaldrich.com/germany.html>.
- Singh, M. M., Szafran, Z., & Pike, R. M. (1999). Microscale Chemistry and Green Chemistry: Complementary Pedagogies. *Journal of Chemical Education* 76 (12), 1684 - 1686.
- Singh, M. M., & Szafran, Z. (2000). Chemie im Mikromaßstab: Labortechnik mit Zukunft. *Praxis der Naturwissenschaften*, 49 (5), 7 - 11.
- The-RADMASTE-microscience-System. (2010). *The UNESCO-Associated Centre for Microscience Experiments*. Accessed on 24th July 2011: <http://www.microsci.org.za/RADMASTEBrochure.pdf>.
- Tillmann, A. (2011). *Kids Science*. Accessed on 24th July 2011: <http://www.kids-and-science.de/kids-and-science/startseite.html>.
- von Borstel, A. (2009). *ChemZ. Chemieunterricht mit medizinischem Zubehör*. Accessed on 24th July 2011: <http://www.chemz.de/index.php/chemzallgemeine-infos.html>.

- von Borstel, G., & Böhm, A. (2004). ChemZ - Chemieunterricht mit medizintechnischem Zubehör. *Naturwissenschaft im Unterricht Chemie*, 81, 48 - 49.
- von Borstel, G., & Böhm, A. (2006). Ein preiswerter Hoffmann'scher Zersetzungsapparat für Schülerübungen - Medizintechnik als kostengünstiger Ersatz für Glasgeräte. *Der Mathematischen und Naturwissenschaftlichen Unterricht*, 59 (6), 262 - 264.
- Wild, A. (1999). *Pflanzenphysiologische Versuche in der Schule*. Wiebelsheim: Quelle & Meyer.
- Wilke, H.-J. (1998b). Überraschende Experimente mit Kunststoffflaschen Teil 2. *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht*, 51 (2), 106 - 109.
- Wilke, H.-J. (1998c). Überraschende Experimente mit Kunststoffflaschen Teil 5. *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht*, 51 (6), 359 - 363.
- Wilke, H.-J. (1998a). Überraschende Experimente mit Kunststoffflaschen: Eine Einführung in die Beitragsreihe. *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht*, 51 (1), 20 - 25.
- Wood, C. G. (1990). Microchemistry. *Journal of Chemical Education*, 67 (7), 596 - 597.
- Zhou, N. H. (2004). Experimente mit der wellplate 6. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 81, 21 - 22.
- Zinsser-Analytic (2011). *Zinsser Analytic*. Accessed on 24th July 2011: <http://www.zinsser-analytic.com/>.