



מצוינות 2000
ע"ש קרן סיסציל

המכון למצוינות בהוראה

חידת הנר הבוער

ד"ר קובי בן-ברק

עריכה: ד"ר גיא אשכנזי, ד"ר שרה גרופר



מדעים – חט"ב

מהדורת תשע"ד

@ כל הזכויות שמורות למרכז הישראלי למצוינות בחינוך ולמשרד החינוך.

חומרי הלימוד הנם לשימוש בהוראת תכנית "מצוינות 2000" בלבד. אין להפיצם בלא רשות, מראש ובכתב.

הקדמה

המושג **חשיבה יצירתית** מוגדר (בין היתר) כחשיבה פורצת גבולות, "מחוץ לקופסה", בה נעשה שימוש ואינטגרציה של יסודות מתחומים שונים, הנראים במבט ראשון בלתי קשורים זה לזה. "ייבוא" של עקרונות מתחומים שונים והכללתם למערכת אחת יכול להניב מערכות מפתיעות, המסוגלות לבצע משימות שונות בתכלית מאלו אליהן יועדו היסודות המרכיבים אותן במקור.

לו הייתם שואלים תלמידים או אנשים מבוגרים כיצד ניתן למדוד זמן או מסה, סביר מאד שהמילה "נר" לא הייתה נכללת בתשובתם. ביחידת לימוד זו נראה כיצד, בעזרת חשיבה פתוחה ויצירתית, יכול הנר לשמש לא רק להארה, אלא גם כבסיס ליצירת מכשירי מדידה.

שני סיפורים וחיידה מוצגים בפני התלמידים ובהם משמש הנר כגיבור המרכזי. בעזרת נרות נוכל לא רק לתרגל חשיבה יצירתית ולשבור מוסכמות, אלא גם לחזור ולהסביר תופעות כמו בעירה, לשרטט גרפים מתוך נתוני טבלה, או להדגים את ההבדל בין תוצאות לבין הסקת מסקנות.

מטרות יחידת הלימוד

מטרות בתחום התוכן

- רכישת ידע בנושאים: מצבי צבירה, תופעת הבעירה ומשולש האש
- תרגול משמעות המושג "קצב"
- הכרת המושגים "אקסטרפולציה" ו"אינטרפולציה"

מטרות בתחום המיומנויות

- חשיבה יצירתית
- תכנון ניסוי
- אמנות המדידה המדויקת
- יצירת גרף מנתונים בטבלה
- תרגול האבחנה בין תוצאות למסקנות

מבנה יחידת הלימוד

היחידה בנוייה משלוש פעילויות, כולן מבוססות על תהליך הבעירה והפחתת המסה של הנר. הפעילות הראשונה נועדה להיכרות עם מערכת הניסוי, רישום תוצאות הניסוי בטבלה ושרטוט גרף. כיוון שבעירת הנר ואובדן המסה הם תהליכים לינאריים, ניתן יהיה לשרטט גרף ישר ולהסיק מהמשכו (אֶקְסֵרְפּוֹלִצְיָה) את מִשְׁךְ הזמן של בעירת הנר עד כלותו, וכך משמש הנר הבוער כמכשיר למדידת זמן.

הפעילות השנייה מבוססת על אותו עיקרון – מדידת מסת הנר הבוער כתלות בזמן, אך הפעם משמש הנר הבוער כמכשיר למדידת מסה, ולא למדידת זמן. גרף המסה כתלות בזמן הוא "גרף כִּיּוֹל", באמצעותו ניתן לחשב כל מסה בטווח הזמנים הנמדד (אינטֶרְפּוֹלִצְיָה)¹.

משך הפעילות

משך הפעילויות צפוי להיות 3 שיעורים כפולים.

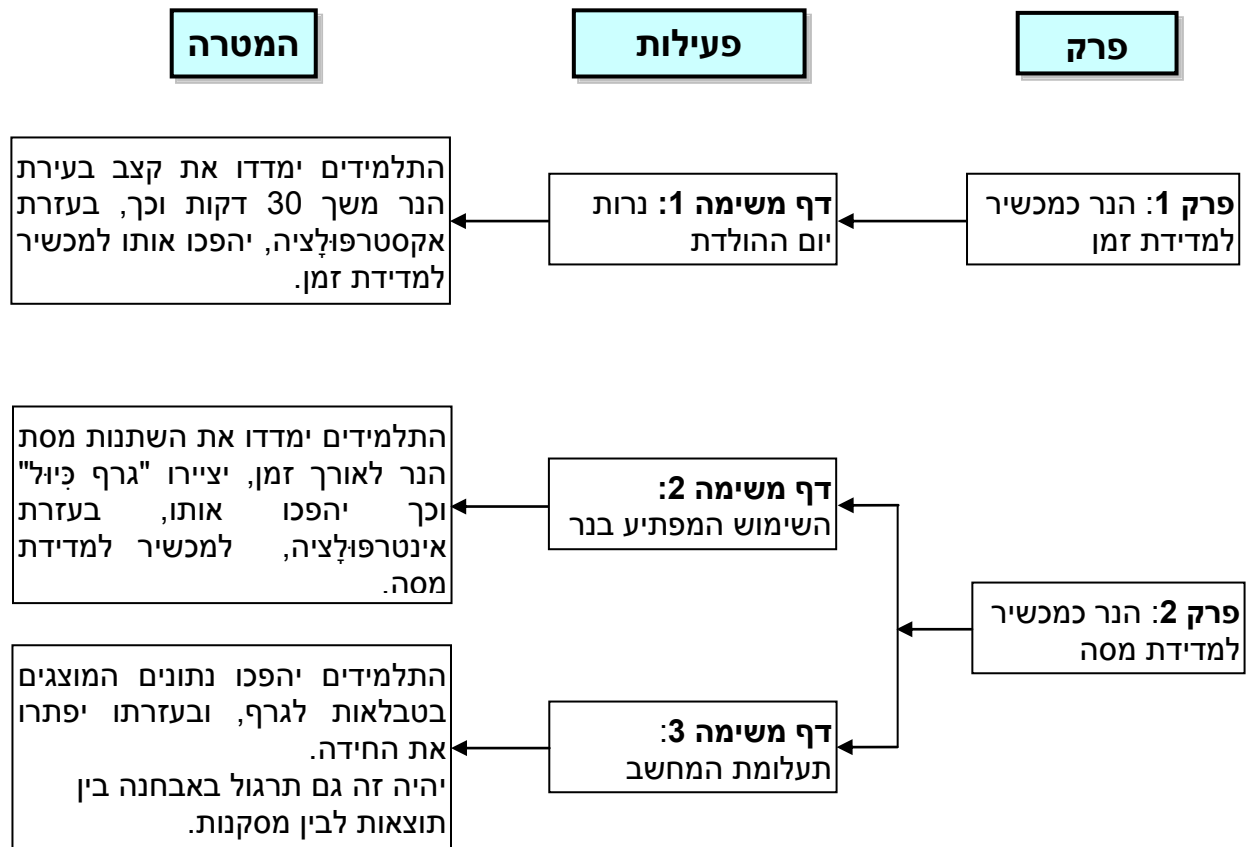
בטיחות

פעילות זו כרוכה בהבערת אש, ולכן יש לשמור בקפדנות על הוראות הבטיחות:

- (1) התלמידים לא ידליקו אש. המורה בלבד הוא/היא שידליק/תדליק אש עבור הצוות.
- (2) יש להקפיד על הימצאות מטף כיבוי אש בכיתה.
- (3) יש להזכיר לתלמידים את כללי הזהירות בעבודה עם אש גלויה.
- (4) יש להדביק את הנר בצורה יציבה על משטח יציב מחומר לא דליק (למשל מכסה של צלחת פטרי).
- (5) יש לעבוד עם שיער אסוף.
- (6) יש להרחיק מהאש ציוד וחומרים העלולים להידלק.

¹ גם בפעילות "היהלום שבכתר" נחשפים התלמידים לגרף כיוול שנוצר על-ידי התארכות קפיץ על-ידי מסות שונות. חשיפה נוספת לנושא חשוב זה תעמיק את הבנתם ותדגים לתלמידים שגרף כיוול הוא הבסיס ליצירת כל מכשירי המדידה.

מבנה יחידת הלימוד



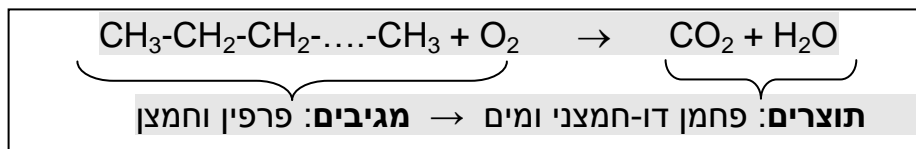
רקע מדעי

הרקע המדעי המובא כאן מיועד כהרחבה עבורכם, המורים. רקע מפורט יותר על תהליכי הבעירה תוכלו למצוא ביחידת הלימוד "הנרות הללו".

הבעירה

תופעת הבעירה היא התופעה המרכזית ביחידת לימוד זו, ולכן נעמיק בה כאן, תוך התמקדות בחומרים אורגניים, ובבעירת הנר כדוגמה אופיינית, בה נעשה שימוש מרכזי ביחידת לימוד זו.²

הנר עשוי חומר אורגני (פּרָפִין), המורכב בעיקר מפחמן ומימן. הפּרָפִין הנוזלי עולה במעלה הפתיל (לפי עיקרון הנימיות, בו לא נעמיק כעת), מתאדה, מתרכב עם חמצן האוויר והופך (בבעירה שלימה) לגזים CO₂ ואדי מים, לפי הנוסחה הכללית:



כמו כל תהליך כימי, הבעירה מורכבת משני שלבים – בשלב הראשון מתפרקים הקשרים הכימיים של מרכיבי הריאקציה - החומר האורגני ומולקולות החמצן שבאוויר, ובשלב השני אטומי החמצן³ נקשרים אל הפחמנים ונוצרת מולקולה חדשה - CO₂. במקביל נקשרים אטומי החמצן גם אל המימנים ונוצרת מולקולת מים (H₂O). הפחמנים והמימנים, שהיוו את מרבית מסת הנר, נפלטים ממנו כגזים לאוויר, וכך מאבד הנר ממסתו.⁴

כדי להתחיל את תהליך הבעירה יש לפרק תחילה את המגיבים באמצעות אנרגיה חיצונית המופקת מתנועת השרירים (למשל, יצירת ניצוץ על-ידי הקֶשֶׁת שתי אבנים זו בזו, או חיכוך ראש הגפרור בקופסה), או מניצוץ חשמלי (פִּירֵת הגז או ברק בליל חורף). אך מרגע שהחלה

² יש לזכור שלא רק חומרים אורגניים ניתנים לשריפה (אפילו מתכות מתחמצנות ונשרפות כאשר הן עשויות מחוטים דקים בעלי שטח פנים רחב), אך אנו נגביל את דיוננו לחומרים אורגניים, שהם מרבית החומרים הדליקים עמם אנו באים במגע.

³ מולקולת החמצן (O₂), מתפרקת לשני אטומי חמצן (O+O). הם אמנם יכולים להתרכב עם עצמם שוב, או עם כל אטום אחר בריאקציה, אך כאשר הם מתרכבים עם פחמן ויוצרים CO₂, או עם המימנים ויוצרים מים, הקשרים הנוצרים הם החזקים ביותר ואינם מתפרקים, ולכן מולקולות אלה הן התוצרים היציבים של ריאקציית השריפה.

⁴ ברוב התהליכים הכימיים אין הפרדה ברורה בין שלב פירוק הקשרים לבין שלב יצירת הקשרים – קשר יכול להיווצר תוך כדי פירוק של קשר אחר. לצרכי חישוב אנחנו מפרידים את התהליכים כאילו קודם כל התפרקו כל הקשרים ומתקבלים אטומים בודדים, ולאחר מכן האטומים הבודדים יוצרים מולקולות, אולם תיאור זה אינו מתיימר לתאר את המנגנון הקינטי של התהליך.

הבעירה, היא מנציחה את עצמה. כל עוד החומר האורגני והחמצן זמינים, תהליך הבעירה מייצר את האנרגיה הקינטית המספקת בכדי לפרק את הקשרים הכימיים של המגיבים.

כיצד נעשה הדבר? ברגע בו נוצרות מולקולות התוצר של תהליך הבעירה, פחמן דו-חמצני ומים, הן נעות במהירות גבוהה מאד⁵, מתנגשות במולקולות נוספות של מגיבים (החומר האורגני וחמצן האוויר) ומפרקות אותן, וכך חוזר התהליך על עצמו עד פְּלוֹת המגיבים. מהירותם של התוצרים היא כה גבוהה, עד כי הם גורמים לעירור של האלקטרונים ולעלייתם לרמת אנרגיה גבוהה. כאשר חוזרים האלקטרונים לרמת האנרגיה הבסיסית שלהם, הם פולטים קרינה אלקטרומגנטית נראית לעין (אור).

הגורמים המשפיעים על קצב הבעירה

מדוע קיים הבדל בקצב הבעירה של נרות שונים? ניתן לחשוב על מספר גורמים:

- החומר ממנו עשוי הנר – ישנם סוגי פרפין שונים, ובכל אחד מהם אחוז משתנה של חומרים המתחמצנים בבעירה.
- החומר ממנו עשוי הפתיל – הפרפין הנוזלי עולה במעלה הפתיל (עיקרון הנימיות). קצב העלייה תלוי בסוג הפתיל ובמידת המשיכה של הפרפין אליו.
- עובי הפתיל – ככל שהפתיל יהיה עבה יותר, כך תהיה כמות הפרפין העולה בו בכל יחידת זמן גדולה יותר.
- הגיאומטריה של הנר – אם הנר בנוי כחרוט, או כסליל, כמות הפרפין משתנה לכל אורכו, ולכן קצב הבעירה ישתנה במהלך הבעירה.

תוכלו לדון בשאלה זו עם התלמידים, אך יש להדגיש שהניסויים לבדיקת משתנים אלה אינם קלים, כיוון שמבנה הנר קשיח, ולכן קשה מאד לשנות משתנה אחד מרשימה זו באופן מדויק.

מצבי צבירה

הנר הבוער מאפשר לנו גם לבחון את שלושת מצבי הצבירה – מוצק, נוזל וגז. הפרפין ממנו עשוי הנר הוא חומר מוצק. מדוע? מולקולות הפרפין הן מולקולות ארוכות המפעילות זו על זו כוחות חשמליים חלשים למדי (הנקראים כוחות וָאן-דֶר-וואַלס). כל אחד מהקשרים הוא חלש, אך כאשר המולקולות ארוכות, סכום עוצמת הקשרים הוא גדול דיו בכדי להחזיק את המולקולות יחד במצב מוצק (עם זאת, הנר שביר למדי, כפי שאנו חשים). כאשר מתווספת

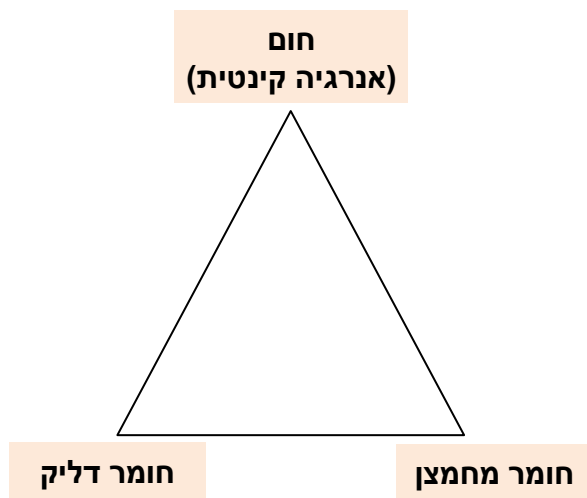
⁵ מסיבה זו נקרא תהליך זה "אקזותרמי" (פולט חום). האנרגיה הקינטית הרבה של התוצרים גורמת לעליית הטמפרטורה במד-הטמפרטורה, ובמקביל גם לתחושת חום.

אנרגיית תנועה (חום) למערכת, הפרפין המוצק מתנזל, הנוזל עולה במעלה הפתיל (עיקרון הנימיות), ובקרבת הלהבה מתאדות מולקולות הפרפין הנוזלי הנמצאות בפתיל.

הנר מדגים גם מעבר בין מצב צבירה נוזלי למוצק – הנוזל יהפוך למוצק כאשר תטפטפו על זכוכית את נוזל הפרפין הנאגר ליד הפתיל. בעת המגע עם הזכוכית, אנרגיית התנועה של מולקולות הפרפין קטנה (הן מתקררות), מולקולות הפרפין נקשרות שוב זו לזו ומתמצקות.

משולש האש

כדי שתתרחש בעירה, חייבים להתקיים במקום אחד במרחב 3 תנאים (המכונים גם "שלושת



הח'טים); חום (האנרגיה הקינטית של החלקיקים), חומר מחמצן (בדרך כלל חמצן, אך גם חומרים אחרים יכולים לחמצן) וחומר דליק (בדרך כלל חומר אורגני, אך לא בהכרח).

כאשר האנרגיה הקינטית של החלקיקים מגיעה לסף נתון, מתרחשת הריאקציה הכימית שבמהלכה מתפרקים המגיבים ונוצרים התוצרים, כפי שהסברנו למעלה.

כיבוי האש יכול להיעשות על-ידי ביטול או הקטנה של כל אחד (או יותר) משלושת קדקודי המשולש – קירור, כליית החומר המחמצן (או מניעת הגעתו למוקד הריאקציה) וכליית החומר הדליק (או מניעת הגעתו למוקד הריאקציה).

אנו נראה דוגמאות לכך בהמשך.

פרק 1: הנר כמכשיר למדידת זמן

הפרק נפתח על-ידי ניסוי מקדים שמטרתו היא להציג את המערכת וליצור את תשתית הידע והחשיבה של המושגים הבסיסיים אותם יש להכיר כדי לפתור את שתי החידות בהמשך.

הנר הופך בפעילות זו למכשיר למדידת זמן. צוותי התלמידים שוקלים את הנר מספר פעמים בהתאם לזמנים שתכננו, כשהמדידה האחרונה היא כעבור 30 דקות. נצלו את זמן ההמתנה בין המדידות לדיון בשאלות העקרוניות הנוגעות לתהליך הבעירה. רמת הדיון תהיה תלויה בגיל וידע התלמידים.

לפני ביצוע הניסוי, או בעת ההמתנה בת ה-30 דקות⁶ ומדידות המסות של הנרות על-ידי הצוותים השונים, ערכו את ההדגמה הבאה:

הדגמה

הצמידו נר לצלחת פטרי ושקלו אותו לפני הבערתו. הדליקו אותו מול עיני התלמידים ושקלו אותו שוב כעבור 2-3 דקות. קראו בקול את שתי המסות ושאלו את התלמידים:

1. מדוע הולכת ויורדת מסתו של הנר במהלך הבעירה?

2. לאן "נעלמת" המסה האובדת?

רבים מן התלמידים עונים לשאלה הראשונה בתשובה "נפלטה אנרגיה בתהליך". תלמידים רבים נוטים לחשוב שאנרגיה היא בעלת מסה. לתשובה זו הגיבו על-ידי ביצוע ההדגמה הבאה: חממו מים עד לטמפרטורה של 50-70 מעלות, והניחו בתוכם גוש של פלסטלינה (השתמשו בפלסטלינה קשה, שאינה ניתכת בטמפרטורות אלה ובדקו לפני השימוש). המתינו מספר דקות עד לעליית הטמפרטורה בתוך הגוש. הוציאו את הגוש מן המים, יבשו אותו, והניחו אותו על מאזניים אלקטרוניים כאשר מד-טמפרטורה נעוץ בו. לאחר שהטמפרטורה הנמדדת במד תתייצב, רשמו את מסת הגוש ומד-טמפרטורה בתוכו ואת הטמפרטורה בסיום השיעור רשמו שוב את המסה והטמפרטורה של הגוש. כיצד יסבירו התלמידים את העובדה שמסתו של הגוש אינה משתנה למרות שאנרגיה נפלטה ממנו, כפי שתעיד הטמפרטורה הנמוכה יותר?

⁶ אם תחליטו לערוך את ההדגמה במהלך 30 דקות המדידה, יש להביא בחשבון שהמדידות התכופות עלולות להסיח את דעתם של התלמידים מן הדיון. מומלץ שכל צוות ימנה תלמיד אחד שיעקוב אחר הזמנים וימדוד את מסת הנר, וכך יוכלו יתר חברי הצוות להקשיב ביתר ריכוז. עם זאת, האפשרות להניח להם למדוד ברווחה משך 30 דקות ולערוך את ההדגמה והדיון אחר-כך היא אפשרות סבירה בהחלט.

הדגישו את העובדה שחום הוא ביטוי למידת התנועתיות של חלקיקי החומר, ומסתם של החלקיקים אינה משתנה – בין אם הם נעים מהר ובין אם הם נעים לאט. אך כיוון שהם ראו שמסת הנר הולכת ויורדת, משמע שהנר איבד מסה, ואות הוא שחלקיקים שהיו בו נפלטו ממנו. מי הם חלקיקים אלה? לאן נפלטו?

השאירו שאלות אלה תלויות באוויר, ודונו איתם על כך לאחר סיום הניסוי.

מהלך הפעילות

חלקו לתלמידים את "דף משימה 1", והניחו להם למצוא את הפתרון בעצמם. חלקו להם נרות גדולים מסוגים שונים. מומלץ מאד לערוך ניסוי מקדים ולבחור נרות הבוערים למעלה מ-3 שעות (ואותם תבחר הילה, גיבורת הסיפור בדף המשימה) וכאלה הפלים תוך פחות ממֶשך זמן זה (ולכן הם אינם מתאימים לצרכיה של הנערה). כאשר תקרינו את התוצאות על הלוח, יהיו הגרפים של הצוותים השונים בסיס לדיון במשמעות המושג **קצב הבעירה**.

חלקו לכל צוות צלחת פטרי גדולה עשויה פלסטיק, כך שאם הפרפין יטפטף, הוא ייאגר בצלחת ומסתו לא תאבד⁷. חלקו להם גם נייר מילימטרי כדי שישרטטו את הגרף באופן ידני. בעת השרטוט הידני חובה על התלמידים לחשוב על טווחי הערכים, אופן שרטוט הגרף ושאר השיקולים הדרושים ליצירת גרף מדויק. תוכנת Excel פוטרת את התלמידים מחשיבה זו, ובכך חסרונה הגדול, בעיקר עבור תלמידים מתחילים.

מהלך הפעילות דורש המתנה בין המדידות. ניתן לנצל את תקופת המתנה לדיון במשולש האש, או בחשיפת התלמידים לפעילויות הבאות.

הקרינו את הוראות הבטיחות על הלוח, הקריאו אותן בקול, והיו אתם היחידים המציתים אש עבור הצוותים, וזאת לאחר שוידאתם שהנר צמוד בחוזקה לבסיס יציב כשאינו סביבו כל חומר דליק. מומלץ לסגור את חלונות החדר בו נערך הניסוי כדי שרוחות לא ישפיעו על קצב הבעירה.



⁷ ישנם נרות המיוצרים בתוך אריזת מתכת. האריזה שומרת את הפרפין המותר, ולכן אין צורך להצמיד נרות מסוג זה אל צלחת פטרי.

נרות יום ההולדת

חלק א': האם הנר יבער משך 3 שעות?

"עם נרות בלבד.....", מלמלה הילה, ספק לעצמה וספק לאמה.

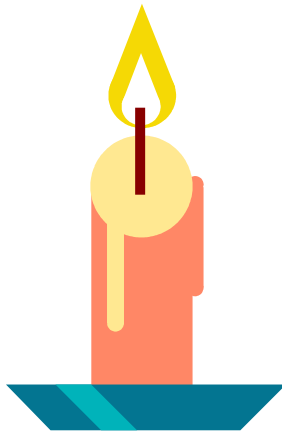
"מה זאת אומרת "עם נרות בלבד"? שאלה אמה, ששמעה את המלמול.

"לטלי יש יום הולדת. החלטנו, כל החברות הטובות שלה בכיתה, שנערוך לה מסיבת הפתעה מחר בערב אצלנו בבית, אם זה בסדר מצדך. החלטנו שלא נדליק כלל את האור, אלא נאיר את החדר עם נרות בלבד. זה יעניק אווירה מאד מיוחדת למסיבה".

"רעיון מצוין", אמרה האם. "הנרות נמצאים במגירה השנייה בארון הימיני במטבח".

הילה פתחה את המגירה, הוציאה נר מתוך הקופסה ושאלה: "אנחנו מתכננות מסיבה של 3 שעות. האם הנרות יצליחו להאיר את החדר משך כל הזמן הזה?".

"אני לא יודעת", השיבה אמה. "הבעירי נר אחד מהקופסה ובדקי".



"אבל אני ממהרת. אין לי 3 שעות לשבת ליד הנר. יש לי רק 30 דקות", אמרה הילה.

"האם את באמת צריכה להמתין עד שהנר מתפלה לחלוטין?", שאלה האם. "בוודאי יש דרך בה תוכלי לדעת גם תוך 30 דקות כמה זמן יבער הנר עד שיתכלה".

הילה שקעה בהרהורים עמוקים.....

- כיצד תוכל הילה לדעת תוך 30 דקות אם הנר יבער משך 3 שעות? חשבו על ניסוי שיאפשר לה לפתור שאלה זו.

צרו צוותים של 3-5 תלמידים וחשבו על הדרך בה תוכלו לפתור את השאלה. לפני תחילת הפעילות, שרטטו את הטבלה בה תרשמו את התוצאות. שרטטו גם את צירי הגרף (עם היחידות המתאימות). הראו למורה את תכנון הניסוי, וכן את הטבלה ואת צירי הגרף ובקשו מהמורה להדליק עבורכם את האש. וודאו שהנר צמוד בחוזקה לצלחת הפטרי ושאינ חומרים דליקים סביבו. התרחקו מן האש בעת הבעירה, ורק אחד מכם יבצע את המדידות בזמנים שנקבעו.

חלק ב': הנר כמכשיר למדידת זמן

"מתי מתחילה המסיבה שלכן?", שאלה האם את הילה.

"בשעה 21:00 בדיוק", ענתה הילה.

"בחצות אבא ואני נחזור הביתה, ואני מבקשת שהמסיבה תסתיים בשעה זו בדיוק. אני יודעת שיש לכן שעונים, אך כיוון שאנו עוסקים בנרות, האם תוכלי לחשוב על דרך בה הנרות יוכלו לשמש כמכשיר למדידה מדויקת של 3 שעות?", שאלה האם בחיור.

חשבו על דרך (או דרכים) בה/ן תוכלו להפוך את הנר לכלי למדידת זמן של 3 שעות (או כל משך זמן אחר בטווח זמן הבעירה שלו). רשמו את פרוטוקול הניסוי, קבלו את אישור המורה ובצעו אותו.

שאלות אתגר

לאחר הניסויים, ענו על שאלות אלה:

1) לאחר שעיינ בתוצאות מדידת מסת הנר משך 30 דקות, אמר יוני: "אין צורך להמתין 30 דקות בכדי לדעת אם הנר יבער משך 3 שעות. אפשר למדוד את קצב בעירת הנר גם אחרי דקה אחת". האם אתם מסכימים עם יוני?

2) כיוון שמסה של חומר אינה נוצרת או נעלמת (חוק שימור המסה), היכן היא המסה שאבדה מן הנר?

3) אדם החל ב"דיאטה" ואיבד 3 קילוגרם תוך חודשיים. היכן היא המסה שאבדה מן הגוף?

4) כולכם מכירים את נפנוף הרוח על בשר המתבשל ב"מנגל". כיצד מגביר הנפנוף את בעירת הגחלים?

5) כיצד מכבים מים את האש?

דיון בנרות יום ההולדת

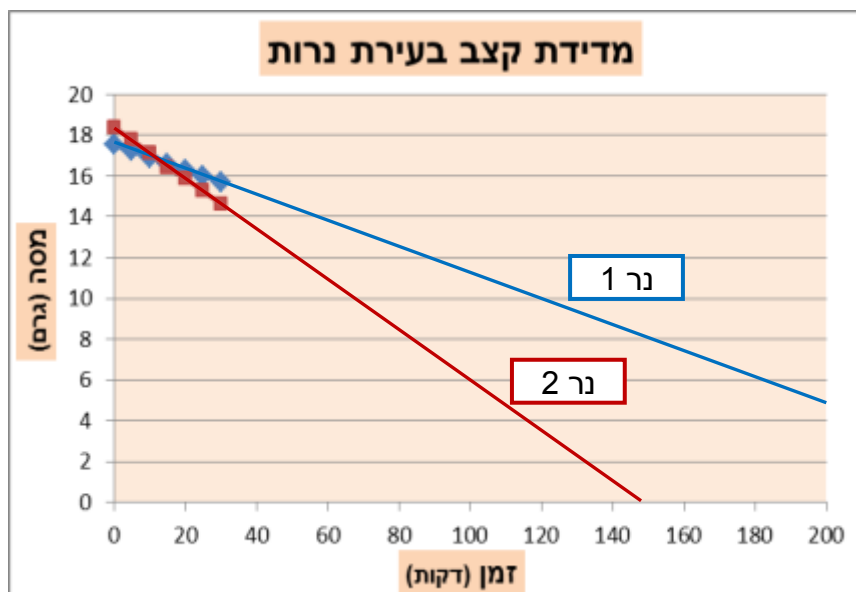
נדון בשני החלקים המפורטים בדף המשימה:

חלק א': האם הנר יבער משך 3 שעות?

הילה אינה צריכה לשבת ליד הנר שעות ולהמתין עד שיִקְלָה. היא יכולה למדוד את מסת הנר בנקודות זמן שונות, ולגזור מן הנתונים שאספה במהלך 30 דקות על התנהגות הנר לאורך זמן החורג מטווח המדידה⁸. מהלך זה נקרא **אֶקְסְטְרֵפּוֹלִיצִיָּה** – קביעת ערך נקודות הנמצאות מחוץ לטווח המדידות.

במרבית המקרים אקסטרפולציה היא מהלך מסוכן, בעיקר כאשר הגרף עולה או אינו לינארי, כיוון שאין לדעת כיצד תתנהג המערכת בערכים גבוהים. במקרה שלפנינו מתיחת הקו אל מחוץ לטווח הנמדד היא מהלך סביר. אם לא משתנים תנאי הסביבה (רוח מן החלון, למשל)

ואם הנר הוא סימטרי לכל אורכו, צפוי כי המסה תרד בקצב קבוע על פְּלוֹתוֹ. תכונה זו מאפשרת לנו לבצע אקסטרפולציה ולחזות בביטחון רב את מסת הנר בנקודות זמן החורגות מטווח המדידות. נמשיך את הקו עד לנקודת המפגש עם ציר ה- X ונגלה את הזמן בו



היה כבה הנר אם היינו ממשיכים למדוד ללא הפרעה.

בדוגמה המוצגת נמדדו שני נרות משך 30 דקות. ירידת המסה בשני הנרות הייתה לינארית, ולכן נמשיך את הקווים עד לנקודה בה הם יִקְלוּ (מסתם תהיה 0 גרם, כמו "נר 2")⁹, או עד לאחר תום 3 השעות ("נר 1"). אנו רואים שיש הבדל גדול בקצב בעירת שני הנרות. כדי

⁸ יהיו, מן הסתם, צוותים שיחליטו למדוד את השתנות אורך הנר, ולא את השתנות המסה. ספקו להם סרגל ואפשרו להם לעשות זאת, כמו כל שיטה אחרת עליה יחליטו.

⁹ אפשר (ואף מומלץ) לחשב באמצעות תוכנת ה-Excel את שיפוע הקווים, ליצור גרף מדויק ואף לקבל את הערכים המדויקים בהם הם חוצים את ציר ה- X (מסתם = 0). עם זאת, אם אינכם מעוניינים להקדיש זמן להוראת הטכניקה, וכיוון שהתשובות המתקבלות הן ברורות מאד, אפשר בהחלט לשרטט את המשך הקווים באופן ידני על-ידי סרגל.

להאיר מסיבה משך 3 שעות, הילה יכולה להשתמש ב"נר 1", אך לא ב"נר 2". כמובן שאם "נר 2" היה גבוה יותר, הוא היה בוער משך זמן ארוך מ-3 שעות, אך הילה בדקה סוג אחד של נרות. דונו עם התלמידים באפשרות זו של הארכת זמן הבעירה על-ידי שימוש בנר בעל אותן תכונות וממדים, אך שונה בגובהו מן הנרות שהילה בדקה.

קצב הבעירה

בקשו מנציגי הצוותים השונים להקליד את תוצאותיהם לתוכנת ה-Excel והקרינו את הגרפים על המסך לעיני כל. השיפועים של הנרות יהיו שונים זה מזה.

שאלו את התלמידים מה משמעות השיפוע של הגרפים? המשמעות היא **קצב הבעירה**. קצב הבעירה יוגדר כך; "מספר הגרם האובדים ממסתו של הנר בכל יחידת זמן". במקרה שלנו נוח לחשב את קצב הבעירה ביחידות של גרם בכל 10 דקות או בכל 1 דקה. כיצד נחשב אותו?

כיוון שהתגלה בניסוי שקצב הבעירה הוא לינארי, אפשר להחסיר את המסה הסופית של הנר מן המסה ההתחלתית. זו המסה האובדת משך 30 דקות. הנר הראשון איבד $17.52 - 1.80 = 15.72$ גרם ממסתו, ולכן קצב הבעירה שלו הוא 0.6 גרם ל-10 דקות (או 0.06 גרם לדקה). "נר 2" איבד $18.40 - 14.65 = 3.75$ גרם משך 30 דקות, ולכן קצב הבעירה שלו הוא 1.25 גרם ל-10 דקות (או 0.125 גרם לדקה).

האבחנה בין תוצאות למסקנות

הצגת הגרפים מזמנת לנו דיון בהבדל בין תוצאות למסקנות. התוצאות הן אלה המוצגות על המסך. אך מה המסקנות מהן? הסקת מסקנות היא אחד מהכלים של **חשיבה מסודרת גבוהה**, כיוון שהיא עוסקת ב**ניתוח** התוצאות.

הדוגמה שלפנינו היא דוגמה אופיינית. שימו לב לשלבי הניתוח אותם תבצע הילה עד להחלטתה באם הנר עליו ערכה את הניסוי מתאים לצרכיה. התוצאות הן הערכים שנמדדו עד לדקה ה-30. האבחנה של הגרף כגרף לינארי היא השלב הראשון בניתוח. ההבנה שניתן לבצע אקסטרפולציה מגרף זה היא השלב השני (ואותו ניתן לעשות גם בלי לדעת את הכינוי לצעד זה). מתוצאות הניסוי היא צריכה להגיע להחלטה באם נר זה יבער משך למעלה מ-3 שעות.

דונו עם התלמידים בהבדלים בין תוצאות למסקנות, תוך כינוי הדיון בשמו. שיום התהליך החשיבתי ייצור מודעות לתהליך והוא יכול לסייע בניתוח מקרים אחרים (**העברה**, transfer).

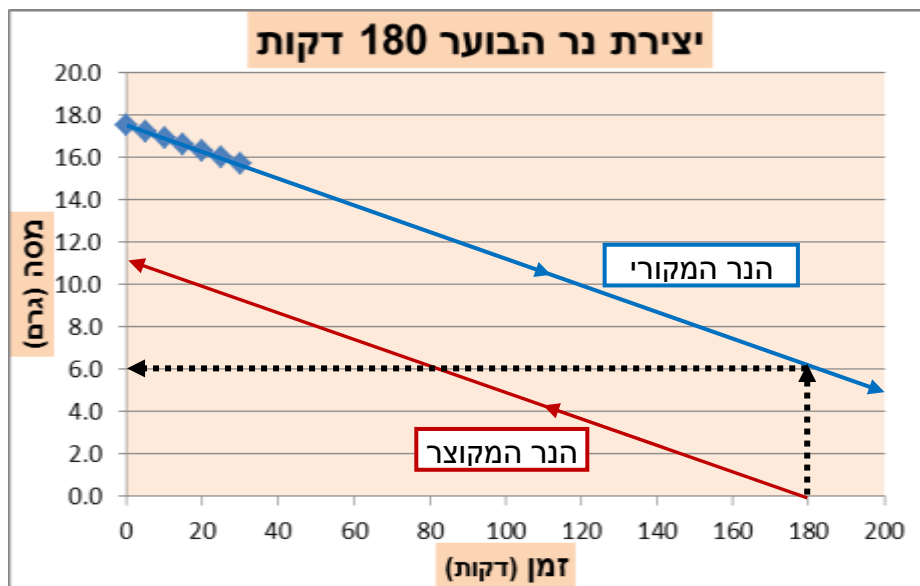
חלק ב': הנר כמכשיר למדידת זמן

שאלו את התלמידים כיצד ניתן ליצור נר שיכבה כעבור 3 שעות בדיוק. כיוון שהנר בוער ומתפלה בחלקו העליון בלבד, הרי אפשר להקטין את משך זמן בעירתו על-ידי קיצור חלקו התחתון וכך להביא להקטנת מסתו. דונו על כך עם התלמידים ובקשו מהם להגיע לפתרון.

לאחר שהגיעו התלמידים לפתרון, הציגו שוב על המסך את הגרפים שיצרו בניסוי הקודם, בחרו גרף אחד מתוכם ושאלו; כיצד היה משתנה הגרף של נר זה אם היינו חותכים את חלקו

התחתון ומקצרים

אותו?



כיוון שהבעירה מתרחשת בקצהו העליון של הנר ושם נקבע קצבה, חיתוך הקצה התחתון יקצר את משך הבעירה, אך לא ישנה את קצב ירידת המסה.

אך לאיזה גובה יש לקצר את הנר? כדי לדעת זאת, יש לפעול בכיוון ההפוך לפעולה הקודמת, בה מתחנו את הגרף כדי לראות אם הנר יכלה כעבור 3 שעות. כעת נעלה גרף מקביל שתחילתו בערך 180 דקות בציר X (ציר הזמן), עד שיחתוך את ציר Y (ציר המסה). שימו לב לכיוונים ההפוכים של שני החצים בגרף.

אמנם ניתן למתוח קו המקביל במדויק לשיפוע הנר המקורי על-ידי תוכנת ה-Excel, אך אפשר בהחלט להסתפק בהעלאת קו מקביל לפי הערכת העין. העיקרון ותהליך החשיבה הם החשובים, ולא הערך המדויק.

דרך נוספת לבצע משימה זו היא להעלות חץ אנכי מנקודת 180 דקות עד שיחתוך את גרף המסה של הנר המקורי (חץ מקווקו, ראו איור) ומנקודת החיתוך לשרטט חץ אופקי עד לנקודת החיתוך עם ציר ה-Y (6 גרם בדוגמה זו). יש לעקוב אחר המסה של הנר. המסה תהיה 6 גרם כעבור 3 שעות.

דיון בשאלות האתגר

הבה נדון כעת בשאלות האתגר המוצגות ב"דף משימה 1" לפי הסדר:

1) דיוק המדידה

הצעתו של יוני היא פתיחה לדיון בנושא החשוב של דיוק במדידות מדעיות. שגיאות מדידה יכולות להתרחש בשני הצירים; שגיאה במדידת המשתנה המשפיע - שגיאה על ציר X (זמן הבעירה במקרה שלנו) ושגיאה במדידת המשתנה המושפע - שגיאה על ציר Y (מסת הנר, במקרה שלנו). השגיאות נובעות ממגבלות המכשירים (דרגת הדיוק המוכתבת על-ידי היצרן) ומגבלות אנושיות (זמן תגובה, למשל). שגיאות אלה הן נתונות ואינן משתנות. ככל שערכי X ו- Y יהיו גדולים יותר, כך תהייה לשגיאות המדידה (הקבועות) השפעה קטנה יותר על התוצאה הסופית והתוצאה היא אחוז השגיאה נמוך יותר.

הניסוי שלנו הוא דוגמה מצוינת לכך; ככל שנמדוד משך זמן רב יותר, כך יהיה הדיוק של מדידת הזמן (ציר X) ושל מדידת המסה (ציר Y) גבוה יותר.

נביא דוגמה מספרית; הבה נניח שמשך מדידת המסה הוא 5 שניות (הנחת הנר על המאזניים, קריאת המדידה בקול). אם נמדוד משך דקה בלבד, שגיאת מדידת הזמן תהיה למעלה מ-8%. לעומת זאת, אם טווח המדידה הוא 30 דקות, משך המדידה אינו משתנה (5 שניות), אך הוא מהווה רק $5/180 = 2.7\%$ מן התוצאה.

בדומה, על ציר Y (המסה), הבה נניח שהנר הנמדד הוא בעל מסה של 100 גרם והמאזניים רגישים כדי ± 0.1 גרם. אם המסה ירדה משך דקה ב-0.5 גרם, אחוז השגיאה במדידה יכול להגיע ל-20%. אך אם המדידה ארכה 30 דקות, הנר איבד 15 גרם, אחוז השגיאה במדידה באותם מאזניים יהיה רק $\pm 1\%$.

בעיקרון, לוי היינו משתמשים במכשירי מדידה נטולי שגיאה, ניתן היה למדוד את מסת הנר רק משך דקה, וטענתו של יוני הייתה נכונה. אך במציאות אין כלי מדידה נטולי שגיאה, ולכן עלינו להגדיל את הערכים הנמדדים, וכך להקטין את אחוז השגיאה.

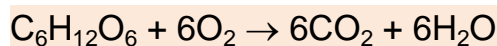
נסכם: במקרה הפרטי שלפנינו נוכל להסיק שככל שמשך המדידה ארוך יותר (וכתוצאה מכך גם הפרש המסות גדול יותר), כך גובר הדיוק במדידת שני המשתנים – זמן ומסה. המסקנה הכללית יותר היא שככל שהערכים הנמדדים גדולים יותר, כך יהיה אחוז השגיאה נמוך יותר. זו מסקנה מדעית חשובה מאין כמוה.

2) היכן היא המסה האובדת?

שאלה זו מזמנת לנו דיון בנושא הבעירה, שתואר ברקע המדעי בתחילת יחידת הלימוד. בקצרה; אובדן המסה נובע מהפיכת הפחמנים והמימנים הקשורים זה לזה במולקולת הפרפין, לגזים – הפחמן התחמצן והפך לגז (CO₂) והמימן התחמצן והפך לאדי מים (H₂O). את היווצרות פחמן דו-חמצני בתהליך הבעירה קשה להדגים, אך נוכל להדגים את היווצרות המים בתהליך השריפה על-ידי הצבת כוס כימית הפוכה מעל להבת הנר, וצפייה בהתעבות אדי המים על הזכוכית.

3) אובדן מסת גוף האדם

התלמידים נשאלים לאן נעלמה מסתו של אדם שהוריד ממסתו על-ידי דיאטה? התשובה דורשת חשיבה רב-תחומית. יש להדגיש לתלמידים כי תהליכי החמצון של חומרים אורגניים בנר ובגוף הם זהים בעיקרון. גם בגוף מתחמצנת מולקולה אורגנית (גלוקוז) וגם בריאקציה זו נוצרים התוצרים CO₂ ו-H₂O לפי הנוסחה:



רוב המסה, ממש כמו בנר, אובדת על-ידי יציאת הפחמן כגז ה-CO₂ מן הגוף. כיוון שתהליכי השריפה בתאי הגוף ובנר הם זהים בעיקרון, עולה השאלה המפתיעה מדוע אנו לא בוערים כמו הנר? זו שאלה מאד מעניינת, בה לא נוכל להעמיק כעת, אך נסתפק ונאמר שאנו "בוערים", לאמיתו של דבר, אך בניגוד לנר, הפולט קרינה באורכי גל אליהם הרשתית שלנו רגישה, הגוף שלנו פולט קרינה באורך גל ארוך ובלתי נראה לעין (אינפרא-אדום).

אתם יכולים לצפות בהרצאה משעשעת בנושא זה באתר TED בכתובת:

<http://www.youtube.com/watch?v=NGKLpYtZ19Q>

צפו בעיקר בדקות הראשונות של ההרצאה ובסרט הקצר שמקרין המרצה, וראו כמה בורים האנשים בשאלה זו בדיוק.

הסיבה העיקרית להבדל בין בעירה לנשימה תאית היא שקצב החמצון וצפיפות החומרים המשתתפים בריאקציה בתאי הגוף (במיטוכונדריה) הם נמוכים הרבה יותר מאשר בנר, ולכן החום המועט יחסית הנוצר אינו מסוגל לפרק ישירות את מולקולת הגלוקוז ואת מולקולות החמצן. תהליכים אנזימטיים הם אלה המאפשרים את פירוק המרכיבים, ולכן התהליך השריפה בגוף הוא אטי, רב-שלבי, אינו מנציח עצמו ואינו פולט אור נראה, אך החום הנפלט בעת השריפה נובע ממקור זהה גם בגוף וגם בנרות – תנועה מהירה של תוצרי ריאקציית החמצון – המים וה-CO₂.

(4) השפעת הרוח על בעירת גחלים

כפי שכולנו יודעים היטב, משב קל של רוח מגביר את עוצמת בעירת הגחלים. מדוע?
 כפי שידוע, כדי ליצור אש יש לחבר שלושה גורמים למרחב אחד בזמן אחד (משולש האש);
 חומר הבעירה, תנועת חלקיקים מהירה (חום) וחמצן. בעת הדלקת מדורה, וכאשר האוויר
 אינו בתנועה, מולקולות החמצן הנמצאות בקרבת הגחלים מתרכבות עם החומר האורגני,
 ומולקולות חמצן חדשות מגיעות בדיפוזיה אל הגחלים משכבות האוויר הרחוקות יותר.
 הדיפוזיה היא תהליך אטי, וזמינות החמצן היא הגורם המגביל את קצב הבעירה. אם נִשְׁפִּיל
 לזרז את הגעת מולקולות החמצן מן האוויר אל הגחלים על-ידי נפנוף, קצב הבעירה יגבר.
 אם כך, מדוע רוח חזקה מכבה את להבת הנר ולא מגבירה אותה? התשובה היא שרוח חזקה
 פועלת על שני קדקודים במשולש האש; היא מפזרת את אדי הפרפין, ובמקביל היא מצננת
 את המגיבים (חמצן האוויר והחומרים האורגניים), כך שתוצרי הריאקציה אינם מפרקים את
 הקשרים הכימיים בין המגיבים והתהליך פוסק.

(5) כיצד מכבים המים את האש?

המים משפיעים על 2 הקדקודים של משולש האש - המים מצננים את החומרים האורגניים
 בגחלים ואת מולקולות החמצן המגיעות אליהם (מקטינים את האנרגיה הקינטית של מרכיבי
 הריאקציה). בנוסף, עוטפים המים את הגחל בשכבה אטומה כמעט למולקולות החמצן, וכך
 חונקים את הלהבה.



פרק 2: הנר כמכשיר למדידת מסה

בפרק הקודם שימש הנר כמכשיר למדידת זמן. כעת נוכל להשתמש באותם עקרונות ממש בכדי להפוך את הנר למכשיר למדידת מסה.

הפעילות תוצג כתחרות בין הצוותים השונים, כשעל כל צוות לשקול מסה בדיוק הרב ביותר, כפי שהמשימה מוצגת ב"דף משימה 2".

מהלך הפעילות

כל צוות יקבל 2 נרות זהים לאלה בהם השתמש בפעילות הראשונה. התלמידים יוכלו להיעזר בגרף הפיזול אותו יצרו בפעילות הראשונה. הם יכולים לבצע מדידות מדויקות יותר בהם ימדדו את מסתו של נר אחד בתחילת השיעור, ידליקו אותו, וימדדו את מסתו בסיום השיעור. כך יהיה משך זמן הבעירה רב יותר, וכך יגבר גם דיוק המדידה.

בין אם יסתמכו התלמידים על הגרף הקיים ובין אם ימדדו שנית, הם יוכלו להסיק מן הגרף כמה זמן על הנר לבעור בכדי שמסתו תהיה 10 גרם. הם יעשו זאת, ובסיום המדידה יהיה לצוות נר במסה של 10 גרם.

אך הצוות נדרש להגיש למורה שמרים במסה זו, ולא נר. לשם כך על הצוות יהיה לבנות מאזני איזון. הם יהיו חייבים לבקש מכם פריטי ציוד כמו חוטים, שיפודים, פלסטלינה, מטבעות מתכת זהות ועוד. היו מוכנים עם פריטי ציוד זה, אך אל תרמזו להם. גם כאן הם צריכים להפעיל את החשיבה היצירתית ולבקש מכם את הפריטים המתאימים.

כיוון שמשך בעירת הנרות עד שמסתם תפחת עד 10 גרם עתיד להיות ארוך, התלמידים יכולים להכין את מאזני האיזון, לחשב את משך הבעירה ולערוך את כל ההכנות. הבעירה עצמה יכולה להיעשות במהלך השיעור הבא, שיכול להיות מוקדש לנושא אחר.



השימוש המפתיע בנר

כשחזרה הילה מבית-הספר הציגה את התוצאות בגאווה לאמה. "שקלתי את הנר על המאזניים במעבדה, והנה התוצאות. הנרות בהחלט יאירו משך למעלה מ-3 שעות", אמרה בשמחה.

האם התבוננה בגרף ואמרה לבתה; "יופי! גרף נפלא ומדויק. את בעיית הנרות פתרת בהצלחה מרובה, ואני מאחלת לכן מסיבה מהנה. אך כעת יש לי בקשה ממך. אני רוצה לאפות עוגה למסיבה. זו תהייה המתנה שלי ליום ההולדת של טלי. הבעיה היא שאין לי מאזניים, ובמתכון כתוב שיש צורך להוסיף לִבְצֵק 10 גרם של שמרים בדיוק. האם תוכלי לגשת למעבדה בבית-הספר ולשקול כמות זו של שמרים?"

"אמא, יש לי רעיון כיצד לשקול בדיוקנות 10 גרם שמרים, בלי לצאת מהבית ובלי להשתמש במאזניים כלל, אלא רק בנר".

"בנר?!", שאלה האם המופתעת.



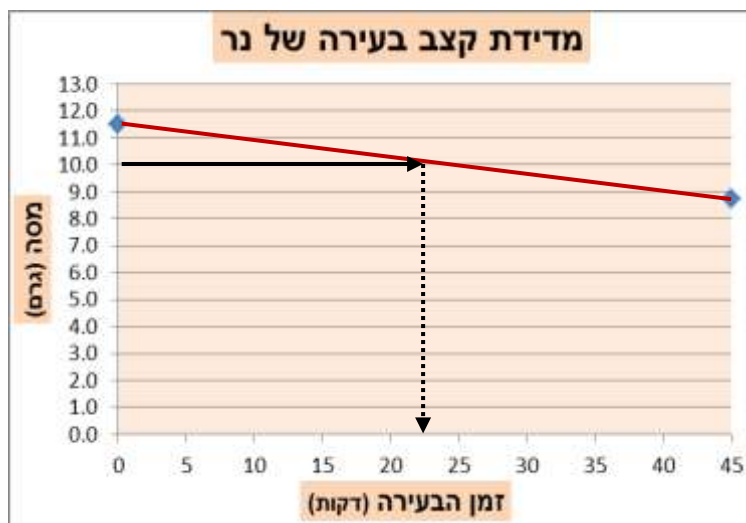
"כן", השיבה הבת. "אשתמש בנר נוסף הזהה לזה ששקלתי היום בבית-הספר. אשתמש גם בנתונים שהשגתי בניסוי, ואניח לך על השֵׁשׁ כמות מדויקת של 10 גרם שמרים".

"אני לא מבינה כצד ניתן לשקול ללא מאזניים, אבל אני סקרנית לראות כיצד את עושה זאת", אמרה האם.

- לפניכם חבילת שמרים, שתי שקיות פלסטיק קטנות, ושני נרות זהים זה לזה. האם תוכלו לשקול כמות מדויקת של 10 גרם שמרים? אם אתם זקוקים לצידוד נוסף – בקשו מן המורה.
- לאחר שתבצעו את המדידות בדיוקנות הרבה ביותר, הגישו את השקית ובתוכה 10 גרם שמרים. המורה ישקול/תשקול את השמרים מול עיניכם בעזרת מאזניים דיגיטליים וכך תוכלו לדעת כמה מדויקים היו החישובים והמדידות שלכם.

דיון בשימוש המפתיע בנר

פתרון המשימה מחולק לשלושה שלבים. בשלב הראשון יבנה צוות התלמידים **גרף כיוול** בעזרת אחד משני הנרות הזהים שקיבלו¹⁰. ספקו להם נרות זהים לאלו בהם השתמשו בניסוי הקודם, אך חתכו אותם כך שיהיו בעלי מסות זהות העולות במעט על 10 גרם. באופן זה מסתם תרד אל מתחת ל-10 גרם משך שיעור אחד של 45-50 דקות. גרף הכיוול יכתיב להם את משך הזמן בו יבער הנר עד שמסתו תקטן עד 10 גרם בדיוק. בדוגמה שלפנינו ניתנו לתלמידים 2 נרות בעלי מסות זהות של 11.5 גרם. נר אחד הודלק ומסתו נמדדה בסיום



השיעור, לאחר 45 דקות, ונמצאה 8.7 גרם. ניתן לשרטט קו לינארי בין שתי הנקודות, כיוון שאנו יודעים מניסוי קודם שזהו אופיו של גרף הבעירה. נר זה הגיע למסה של 10 גרם לאחר 22 דקות.

בשלב השני הם ידליקו את הנר השני למשך הזמן אותו קבעו

בשלב הראשון. כך יגיעו לנר בעל מסה של 10 גרם.

בשלב השלישי, וכדי להמיר את מסת הנר במסת שמרים, הם ייצרו מאזני איזון (בעזרת פריטים אותם הם יבקשו מכם), יניחו את הנר שמסתו היא 10 גרם על הכף האחת, וישקלו שמרים על הכף האחרת עד הגעה לאיזון.

אם תחפצו בכך, תוכלו להפוך את הפעילות הזאת לתחרות, בה מנצח הצוות שמדד מסה הקרובה ביותר ל-10 גרם. הדגישו בפניהם שהמנצח אינו הצוות שפעל במהירות הגבוהה ביותר, אלא הצוות שפעל בדיוקנות ובזהירות הרבים ביותר.

לאחר הדיון בתוצאות ניסוי זה, קראו עם התלמידים בקול את "דף משימה 3", וראו כיצד יכולים גרפים לספר סיפורים מרתקים, ואף לפתור חידות בלשיות.

¹⁰ כאמור, התלמידים יכולים להסתמך על המדידות שערכו ב"דף תלמיד 1" וידליקו את הנר הזהה השני אותו סיפקתם להם. לחילופין, הם יערכו את הניסוי מחדש עם זוג נרות שונה מזה שקיבלו בניסוי הראשון.

תעלומת המְחָשֵׁב הגנוב

"האם אתה בטוח שד"ר ג'ון הריסון הוא זה שגנב את המחשב מהמעבדה שלך?", שאלה מפקחת המשטרה פאולה לָנון את ד"ר ג'ורג מְקֶרְטְנִי.

כל אנשי המעבדה ידעו על הִרְיִבוּת הגדולה בין ד"ר הריסון לד"ר מקרטני, שני המדענים החוקרים את מבנה להבת הנר, שהתחרו זה בזה כל השנים.



"בוודאי שאני בטוח", השיב ד"ר מקרטני והסתכל בזעם על ד"ר הריסון, שעמד בפנית החדר ושתק.

"עבדתי במעבדה מאוחר מאד באותו לילה", המשיך ד"ר מקרטני. "בשעה 1:00 בלילה העמדתי נר על המאזניים האלקטרוניים, והצבתי את המכשירים שנועדו למחקר אור הלהבה. ב-2:30 בדיוק היה ברק, והחשמל נותק. על כל הבניין נפל לפתע "חושך מצריים", אך היה לי מזל שהנר במעבדה בער

כל הזמן. לפתע שמעתי את הדלת נפתחת, ולאור הנר ראיתי את ד"ר הריסון נכנס למעבדה שלי, ולוקח את המְחָשֵׁב איתו. הוא רצה להשמיד את התוצאות שלי או להשתמש בהן בעצמו, כאילו הוא עשה את המחקר. הוא ניצל את הפסקת החשמל כדי לגנוב את המחשב שלי". ד"ר מקרטני הסתכל בזעם בעמיתו העומד בפנית החדר.

"ואני חושבת", אמרה חוקרת המשטרה לָנון, "שאתה משקר. אתה מאשים את ד"ר הריסון לשווא. בשעה 2:40 לא יכולת לזהות איש לאור הנר".

"איך את יכולה לדעת?", שאל ד"ר מקרטני, מנסה להיראות מופתע. "זה נר גדול וחזק ומפיץ אור רב. את מוזמנת לנסות זאת. בואו נחשיך את החדר וְאֶרְאֶה לך שאפשר בקלות לזהות אנשים לאורו".

"מה שלא הבאת בחשבון הוא שהמאזניים האלקטרוניים עליהם העמדת את הנר פועלים על סוללות, והם מדדו את מסת הנר אחת ל-20 דקות ואגרו את הנתונים בזיכרון גם בעת הפסקת החשמל. החוקרת הראתה לכל אנשי המעבדה את הטבלה ובה הנתונים שנאגרו בזיכרון המאזניים.

מסת הנר כתלות בזמן	
מסת הנר (גרם)	השעה (דקות)
19.32	1:00
17.00	1:20
14.68	1:40
12.36	2:00
12.36	2:20
12.36	2:40
12.36	3:00
10.04	3:20
7.72	3:40
5.40	4:00

- שרטטו את נתוני הטבלה בגרף.
- התבוננו בגרף. מהו הסיפור המסופר בגרף זה?
- הסבירו מדוע לא יכול היה ד"ר מקרטני לזהות את ד"ר הריסון לאור הנר בשעה 2:40?
- קשמו:

התוצאות של הניסוי הן: _____

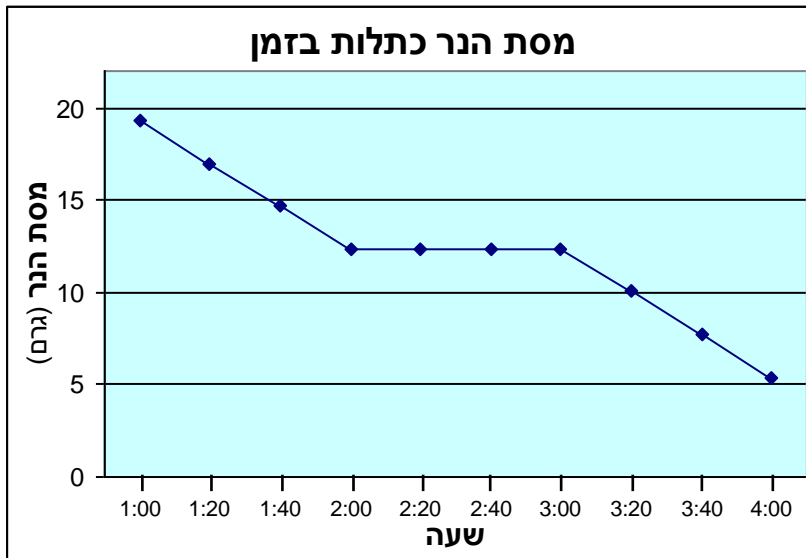
המסקנות מתוצאות אלה הן: _____

- מה ההבדל בין התוצאות לבין המסקנות? _____



דיון בתעלומת המחשב הגנוב

גרפים יודעים לספר סיפורים. אך לא רק לספר סיפורים יודעים הגרפים. הם מפיחים חיים בתוצאות היבשות, מעלים את רמת הניתוח, ומאפשרים לנו להסיק מסקנות בעלות משמעות מתוצאות אלה. במקרה זה יביא הגרף את התלמידים (כמו את החוקרת פאולה לָנון) להוכיח את אשמתו של אדם הדובר שקר.



אמת, אין בגרף אותו ישרטטו התלמידים כל מידע חדש שלא היה רשום בטבלה, וגם אסור שיהיה. הגרף אינו אלא שיקוף חזותי של התוצאות המספריות. ובכל זאת, ראו כיצד המסקנה "קופצת לעיניים" מן הגרף, בעוד שהגעה למסקנה באמצעות

ניתוח המספרים היבשים היא קשה ומאומצת הרבה יותר.

לאחר שצפו בירידת מסת הנר בעת הבעירה, התלמידים בוודאי יבינו שאם מסת הנר אינה משתנה – משמע שהוא אינו בוער. נסכם:

התוצאה: מסתו של הנר ירדה באופן ליניארי בין השעות 1:00 ל-2:00. בין השעות 2:00 ל-3:00 מסתו לא השתנתה, ומשעה זו מסתו ירדה בקצב ליניארי הזהה לקצב בו ירדה בשעה הראשונה.

המסקנה: הנר כבה (או כִּוְּבָה) בשעה 2:00 והיה כבוי משך שעה. מכאן שבשעה 2:40 שררה חשיכה במעבדה, וד"ר מקרטני לא יכול היה לזהות איש. המסקנה הנוספת מכך היא שהוא העליל על עמיתו עלילת שווא.

שוב ושוב אנו רואים כיצד המסקנות אינן תיאור מילולי של התוצאות, אלא מתעלות עליהן, ודורשות רמת ניתוח גבוהה. בנוסף, הן מעוררות שאלות נוספות; מדוע כבה הנר? מי הוא זה שהדליק אותו לאחר שעה נוספת? מדוע עשה זאת? הגרף היבש לובש לפתע אופי של סיפור בלשי נוסף בזעיר אנפין.

סיכום

בסיום הוראת יחידת לימוד זו, סכמו את הפעילויות בדיון כיתתי. דונו לא רק בהיבטים המדעיים שעלו במהלך הפעילויות, אלא גם בתהליך החשיבתי שעברו התלמידים¹¹, וכיצד הפך הנר, שנועד במקור להארה, למכשיר למדידת זמן ומסה. דונו במאפייני החשיבה היצירתית. גם היא, כמו כל מיומנות אחרת, ניתנת לתרגול ויכולה להשתפר.

¹¹ מומלץ לקרוא בקול את הגדרת החשיבה היצירתית מתוך אתר ה-Wikipedia ולדון גם בהגדרות העולות מאתר זה.

נספח ציוד וחומרים

דף משימה 1

לכיתה

- קופסאות של נרות מסוגים שונים. השגיחו לרכוש נרות גליליים כדי שמסת הפרפין תהייה זהה לכל אורך הנר. רצוי שאחד הסוגים יהיה נרות באריזת מתכת.
- קופסאות גפרורים
- 1-4 מאזניים אלקטרוניים (בדרגת דיוק של מאיות גרם). רצוי לספק מכשיר אחד לכל צוות.
- זכוכית שעון (או כוס כימית של 250 מ"ל).
- צלחות פֶּטְרִי גדולות ("שרוול" אחד או שניים – 20-40 צלחות)

לכל צוות

- צלחת פֶּטְרִי (להדבקת הנרות)
- שעון עצר (סטופר)
- סרגל
- ציוד נוסף לבקשת התלמידים

דף משימה 2

לכיתה

- מאזני משקל דיגיטליים (לשימוש המורה בלבד).
- פרס לצוות המנצח (חבילת שוקולד למשל).

לכל צוות

- 2 נרות זהים. חתכו כל אחד מהנרות כך שיהיו בעלי מסה הגדולה במעט מ-10 גרם. המסות של שני הנרות המסופקים לתלמידים חייבות להיות זהות.
- צלחות פטרי ריקות (עליהן יודבקו הנרות)
- גוש שמרים במסה העולה על 10 גרם
- פרטי ציוד ליצירת מאזני איזון עבור כל צוות - שיפודים, מטבעות, חוטים, מספריים, זוג שקיות פלסטיק, פלסטלינה
- כפית פלסטיק חד-פעמית
- נייר מילימטרי
- סרגל
- שעון עצר