

ספל התה של המנהלת רות

ד"ר קובי בן-ברק

יעוץ מדעי: ד"ר מירה עופרן, האוניברסיטה העברית
עריכה: ד"ר אבי פולג, ד"ר שרה גרופר, זאב קרקובר



מדעים – חט"ב

מהדורת תשרי תשע"ד

ספטמבר 2013

חומרי הלימוד הנם לשימוש במסגרת ההוראה בתכנית "מצוינות 2000" בלבד. אין להפיצם
ללא רשות, מראש ובכתב, מהמרכז הישראלי למצוינות בחינוך.

הקדמה

יחידת לימוד זו עוסקת בקצב מעבר חום בין גופים המצויים בטמפרטורות שונות ובהשפעת הפרש הטמפרטורות על קצב מעבר החום. הפעילות המדעית מוצגת לתלמידים על-ידי סיפור המסתיים בחידה פשוטה שפתרונה הוא אלגנטי, מחדד מוח, ובעיקר - מאפשר לתלמידים לא רק לפתור את החידה, אלא לגלות חוק מדעי חדש עבורם, וכל זאת בסדרת ניסויים קצרים ופשוטים לביצוע.

רציונאל

החידה התמימה לכאורה המוצגת לתלמידים בפעילות זו היא בעלת פוטנציאל חינוכי רב. אפשר, כמובן, לבצע רק את הניסוי הנדרש לפתרון החידה, אך מדוע להסתפק בכך? ניתן לנצל את האתגר ואת ההתלהבות שיוצרת החידה בכדי לטפח בתלמידים מיומנויות וכישורים קוגניטיביים ורגשיים בעלי אופי רחב יותר. נדגים כמה מהם:

- **פיתוח החשיבה ותחושת המסוגלות העצמית** – התלמידים נדרשים לתכנן ולבצע את הניסויים בעצמם. לא ניתנות הוראות כתובות לביצוע הניסויים. כל האחריות מוטלת עליהם. תחושת ההצלחה בסיום הפעילות היא תחושה מצמיחה ומעצימה.
- **מהות התהליך המדעי** – כפי שנראה, דוגמה בודדת זו יכולה לשמש מודל כללי יותר לאופן בו פועלים המדענים, ולאופן בו הם מנסחים את חוקי המדע.
- **ההסבר לתופעה** – על התלמידים לגלות לא רק את הפתרון לחידה. יהיה עליהם גם להסביר תופעה שתתגלה בדרך לפתרון. כדי להסביר את התופעה, יהיה עליהם לעצום את עיניהם ולראות בעיני רוחם תהליכים הנסתרים מן העין – למשל, פעולת חלקיקים זה על זה.
- **שימושים טכנולוגיים** – תיאוריה מדעית מבוססת תנוצלה, במוקדם או במאוחר, לצרכים טכנולוגיים וכלכליים, ותשמש לרווחת האדם. כפי שנראה בהמשך, החוק אותו ינסחו התלמידים משמש כיום את המהנדסים המתכננים מתקני קירור וחימום, בהם ניתן לפגוש בחיי היומיום של כל אחד מאתנו.

שיקולים דידקטיים ורגשיים

המטרה הראשונית של ניסוי זה היא להציב בפני התלמידים אתגר, להעביר אליהם את האחריות לפתרונם, ולוודא שהם יחוו חוויה של הצלחה בסימום. הידע המדעי הספציפי הנרכש בפעילות זו הוא חשוב, אך לא פחותה ממנו חשיבות הטיפוח של תחושת המסוגלות של התלמידים, אשר תלך ותעלה עם התגברות על קשיים אותם מציב ניסוי זה (וניסויים נוספים בעתיד).

תכנון הניסויים

תכנון מדוקדק של הניסויים הוא אחד הלקחים החשובים ביותר בפעילות זו. השגיו שהתלמידים מנסחים את ההוראות בפירוט ובדייקנות; שהטבלאות הוכנו עוד לפני הניסוי, כשהמשתנה המשפיע מוגדר (כולל היחידות), והעמודה של המשתנה המושפע ריקה; שהתלמידים משרטטים את צירי הגרף הריק (כולל היחידות).

מיומנויות אותן ניתן לתרגל ביחידה

- תרגול תהליך החקר, כולל תכנון וביצוע של ניסויים
- הסקת מסקנות מתוצאות
- למידת חוקי הטבע באמצעות גילוי
- חשיבה ביקורתית
- עבודת צוות



רקע מדעי

החלק הבא נועד להציג לכם, המורים, את הרקע המדעי לנושאים בהם עוסקת יחידת לימוד זו – טמפרטורה, חום והחוק הקובע את קצב מעבר החום בין שני גופים. ההחלטה באיזו מידת להעמיק עם התלמידים בנושאים אלה תלויה בגילם, בידע הקודם שלהם ובשיקולים דידקטיים נוספים. בכל מקרה, גם אם החלטתם לדון בכך עם התלמידים - עשו זאת רק לאחר ביצוע הניסויים ושלבו את התלמידים בהסקת המסקנות, כפי שמפורט בהמשך היחידה.

חוק הקירור

יחידת המנהלת רות היא הזמנה לחקירת אחת התופעות החשובות בתחום מעבר חום בין גופים – "חוק הקירור", שהתגלה במקור על-ידי ניוטון במאה ה-17.

חוק הקירור קובע שקצב מעבר החום בין שני גופים עומד ביחס ישר להפרש הטמפרטורות ביניהם. המונח "גוף" יכול להתייחס גם לסביבה בה נמצא גוף, כמו אוויר החדר. עבור גוף כמו דג, למשל, מי האוקיינוס הם הגוף האחר אליו או ממנו עובר חום.

קצב מעבר החום אינו תלוי בטמפרטורות המוחלטות של שני הגופים, אלא רק בהפרש הטמפרטורות ביניהם. למשל, קצב מעבר החום בין גוף בעל טמפרטורה של 180°C לגוף בעל טמפרטורה של 150°C יהיה זהה לקצב מעבר החום בין גוף בעל טמפרטורה של 40°C לזה בטמפרטורה של 10°C .

לחוק זה יישומים מדעיים, טכנולוגיים ופיזיולוגיים חשובים ביותר, בעיקר בתהליכי קירור של מתקנים כמו מנועים ומעגלים חשמליים, כמו גם קירור גופם של בעלי-חיים בתנאי הסביבה בה הם חיים.

ההסבר לחוק יפורט בהמשך, לאחר שהתלמידים יגלו חוק זה בעצמם וינסו להבין את מהותו.

חום וטמפרטורה

המושגים "חום" ו"טמפרטורה" קשורים זה בזה, ולכן הם נתפסים לעתים קרובות על-ידי התלמידים כזהים. משפטים בהם אנו משתמשים בחיי היומיום, כגון "הטמפרטורה של הגוף עלתה" ו"חום הגוף עלה", עלולים ליצור את הרושם כאילו מדובר באותה מהות, ואין זה כך.

בגז אידיאלי, בו אין אינטראקציה בין החלקיקים, הטמפרטורה היא מדד לאנרגיה הקינטית הממוצעת של החלקיקים. החום, לעומת זאת, הוא כמות האנרגיה הקינטית הכוללת של חלקיקים אלה. מובן שכאשר נעלה את הטמפרטורה של מִקְלֵ נתון, כלומר האנרגיה הקינטית של כל חלקיק בודד תעלה, תעלה גם כמות האנרגיה הקינטית הכוללת במִקְלֵ ("חום").

אולם, אם נתייחס לשני מְכָלֵי גז אידיאלי – האחד בנפח של ליטר והאחר בנפח של חצי ליטר, הרי הם עשויים להימצא בטמפרטורה זהה (האנרגיות הקינטיות הממוצעות של חלקיקי הגז בשני הכלים תהיינה זהות), אך כמות האנרגיה הקינטית הכוללת (כלומר, החום) תהייה גדולה יותר בכלי הגדול.

בנוזלים ובמוצקים, שם לא ניתן להזניח את האינטראקציות בין החלקיקים, היחס בין הטמפרטורה לאנרגיה הקינטית מורכב יותר (כיוון שלחלקיקים יש אנרגיה קינטית וגם אנרגיה פוטנציאלית), ולכן המונח המקובל הוא "אנרגיה פנימית". גם שם, ככל שכמות הנוזל או המוצק גדולה יותר (באותה טמפרטורה), יש להם כמות גדולה יותר של אנרגיה פנימית (חום רב יותר).

כיוון שאנו עוסקים ביחידה זו במדידת טמפרטורות של נוזלים, נסתפק בהבנה שככל שהטמפרטורה גבוהה יותר עבור אותה כמות נוזל, כך יש לנוזל אנרגיה פנימית בכמות גדולה יותר. קירור (ירידת טמפרטורה) משקף מעבר של חלק מהאנרגיה הפנימית של הנוזל אל הסביבה. אנו קוראים לתהליך זה "מעבר חום". יש לשים לב שהאנרגיה הפנימית היא העוברת בין הגופים, ולא הטמפרטורה.

יש חשיבות מדעית, אך גם דידיקטית, להבחין בין המושג טמפרטורה לחום, כיוון שבעת המדידות התלמידים נוכחים שהטמפרטורה ירדה בגוף האחד (הספל), אך לא עלתה באוויר החדר, מה שעלול לגרום לתפיסה לפיה הטמפרטורה היא גודל היכול להיעלם. יש להדגיש, אם ישאלו זאת התלמידים, כי האנרגיה הפנימית היא זו שעברה אל אוויר החדר והתפזרה בו, אך כמות האוויר היא כה גדולה, עד כי איננו חשים בעליית הטמפרטורה בחדר, ואף מד-טמפרטורה אינו רגיש מספיק בכדי למדוד עלייה כה קלה.

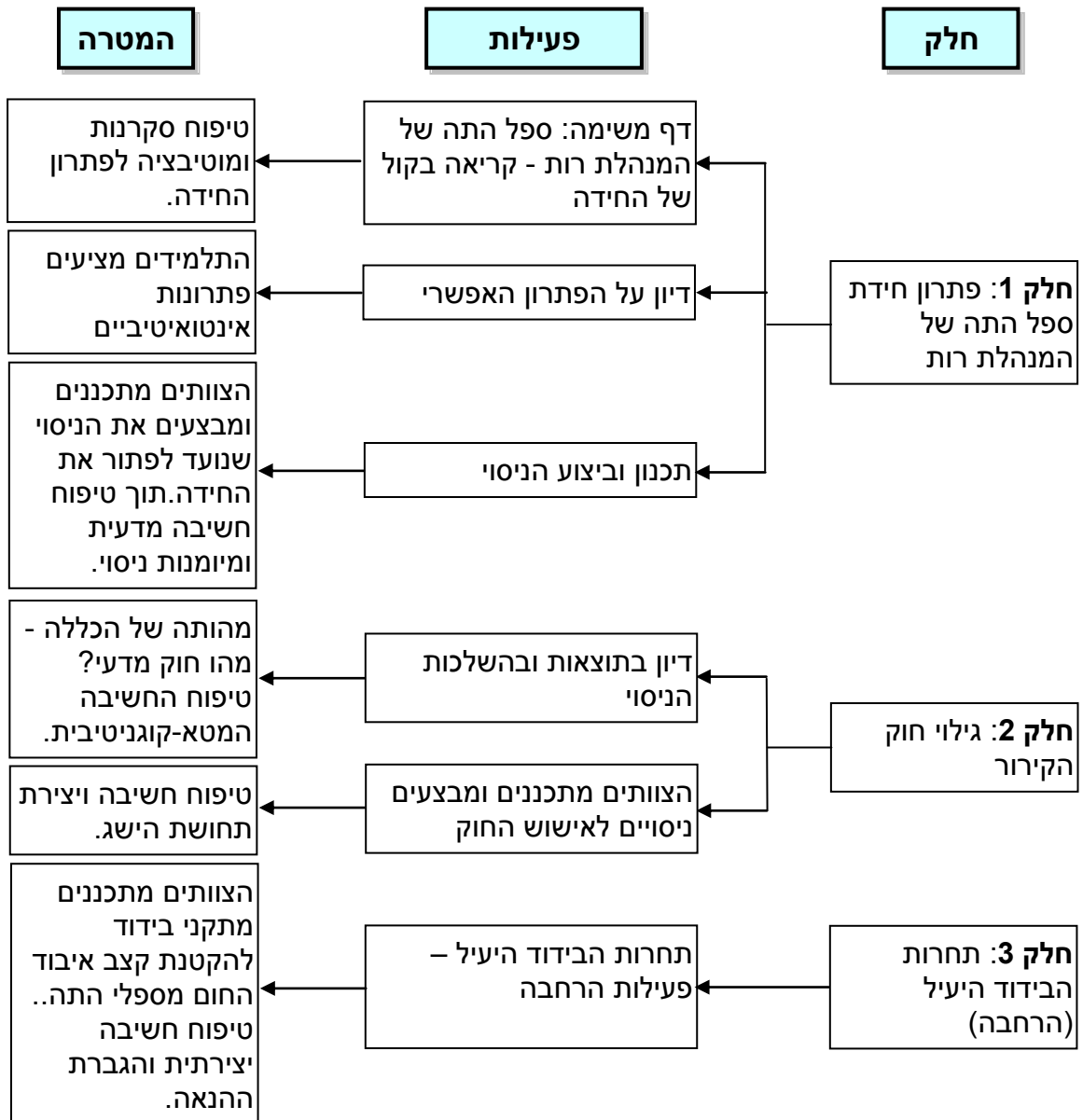
ביחידה זו נעקוב אחר תהליך הקירור באמצעות מד-טמפרטורה. התלמידים יגלו כי קצב ירידת הטמפרטורה אינו תלוי בטמפרטורה התחלתית של הנוזל, אלא בהפרש הטמפרטורות שבין הנוזל לסביבתו. ככל שההפרש גדול יותר – קצב הקירור גדל אף הוא.

ניוטון עצמו, שגילה את החוק, זיהה **יחס ישר** בין קצב ירידת הטמפרטורה להפרש הטמפרטורות בין כל שני גופים. אנו נסתפק ביחידה זו בגילוי **עצם התלות** בין קצב הקירור להפרש הטמפרטורות.

משך ההוראה

מומלץ להקדיש ליחידה זו 3-4 שיעורים בני 90 דקות.

מבנה יחידת הלימוד



פרק 1: חידת ספל התה של המנהלת רות

הפעילות מתחילה בקריאה בקול של סיפור המעשה ובו המשימה שעל התלמידים לבצע – מציאת הדרך בה על רות לפעול כדי ליהנות מספל תה חם. הדגישו בפני התלמידים את חשיבות התכנון. תלמידים צעירים נוטים למעט בחשיבה מקדימה, ולגשת למלאכה לפני שיש להם אסטרטגיית פעולה ברורה. הבקשה לתכנון מוקדם, כתיבת פרוטוקול הניסוי וקבלת אישור המורה נועדה להבטיח ששלב החשיבה יהיה עמוק ורציני.

חלקו את הכיתה לצוותים של 3-4 תלמידים וחלקו לכל צוות את דף המשימה. לאחר הקריאה ידונו הצוותים בנפרד בפתרון החידה. התכנון הוא פתוח לחלוטין, ואין להתערב בעבודת הצוותים.



ספל התה של המנהלת רות



מעשה שהיה כך היה. לא היה דבר אהוב על רות, מנהלת המחלקה במפעל, יותר מספל תה "אנגלי" חם. למרות שהייתה אדם נוח לבריות בדרך-כלל, היא גילתה קוצר-רוח בלתי גיוני ככל שהדבר נגע לספל התה של 10:00 בבוקר, והתעקשה להכין אותו בעצמה.

על ספל התה להיות מלא כדי $2/3$ במים רותחים, $1/3$ חלב קר מן המקרר, ובחוש היטב. היא אף קנתה בכספה הפרטי ספל מיוחד, וחרטה עליו בקווים את הנפחים המדויקים המסמנים את

נפח המים והחלב. איש מעובדי המחלקה לא העז לגעת בספלה של המנהלת. שני העובדים החדשים, שלא ידעו כלל על מנהגיה של רות ובתום לב הכינו לעצמם קפה בספלה הפרטי – פוטרו מהמחלקה בזעם מיד למחרת.

אך האסון לא אחר לבוא. באותו בוקר הרה גורל קרה המקרה ממנו חרדה רות יותר מכל – לאחר שמילאה את המים הרותחים בספל, עד לסימן $2/3$ הנפח, אך עוד לפני שהספיקה לשפוך את החלב, צלצל הטלפון. "למי יש חוצפה לקטוע את שתיית התה?", שאלה רות את עצמה. והנה נזכרה כי המטלפן הוא ד"ר ג'ונסון מאנגליה, שלא הכיר כלל את מנהגיה של המנהלת. השיחה הייתה חשובה, ונגעה בפטנט אותו הציע המדען הנכבד למחלקתה של רות. השיחה עתידה להיות ארוכה, כך ידעה רות, ותארך 10 דקות לפחות.

הדילמה הנוראה בפניה עמדה רות הייתה קשה מנשוא. עמדו בפניה שתי אפשרויות:

1. לשפוך את החלב במהירות, לבחוש היטב, להרים את הטלפון, לנהל את השיחה ולשתות את התה לאחר סיומה.
2. להשאיר את הספל עם המים החמים על השולחן, להחזיר את החלב למקרר, לשוחח עם ד"ר ג'ונסון, ורק בסיום השיחה להוציא את החלב מן המקרר להוסיף את החלב לספל התה ולבחוש היטב.

(האפשרות של ביצוע השיחה, ורק לאחר מכן התחלה מחדש של תהליך ההכנה של ספל התה, לא עמדה כלל על הפרק...).

בכל מקרה, כך ידעה המנהלת, התה יהיה קר יותר מאשר בימים כתיקונם, אך רכישת הפטנט מחייבת גם קרבנות כואבים!

השאלה ששאלה עצמה רות היא: באיזו מבין שתי הדרכים עליה לנקוט כך שהתה יהיה חם יותר בסיום השיחה?

- תכננו את הניסוי, כתבו את מהלך הניסוי (פרוטוקול) בפירוט רב. הקפידו לשרטט את הטבלאות ואת צירי הגרפים, כולל יחידות המידה.
- הראו למורה את פרוטוקול הניסוי וקבלו את אישורו/ה לביצוע הניסוי.
- בצעו את הניסוי. מדדו את הטמפרטורות לא רק בתחילתו ובסיומו של הניסוי, אלא גם במהלכו (כל דקה, למשל).
- מה היא הדרך בה על רות לנקוט?
- התשובה למנהלת מתייחסת רק לטמפרטורות הסופיות של שני הספלים. עם זאת, בגרף ששרטטתם מתוארים שלבי התהליך אותו מדדתם לכל אורכו. תארו את שלבי הקירור בכל אחד מהספלים, ונסחו את מרב המסקנות משלבים אלה.



המלצות לניהול השיעור

חידת המנהלת רות מובילה את התלמידים לביצוע סדרת ניסויים שמטרתם הסופית היא ניסוח חוק טבע – חוק הקירור. אפשר לבצע עם התלמידים את כל הניסויים. עם זאת, וכפי שמצוין בהמשך, אפשר גם לבצע חלק מהם כהדגמה, או להציג את התוצאות לדוגמה המוצגות בהמשך ולהסתפק בדיון במשמעותם.

תכנון הניסוי

לאחר קריאת החידה המופיעה בדף המשימה, עוררו בכיתה סיעור מוחות - מה היא הדרך בה על המנהלת רות לפעול? הניחו לתלמידים להתלבט בדילמה משך מספר דקות. קיימו דיון כיתתי קצר על הפתרון המועדף.

כיוון שהפתרון אינו מאד אינטואיטיבי, סביר שייוצרו ארבעה מחנות בקרב התלמידים; המחנה האחד יטען שיש לשפוך את החלב לפני שיחת הטלפון, המחנה השני יטען את ההיפך. המחנה השלישי יטען שאין חשיבות למועד הוספת החלב, והמחנה הרביעי יהיה מורכב מתלמידים להם לא תהייה כל דיעה מגובשת. מחנה אחרון זה יהיה מורכב, כך יש להניח, מתלמידים ביישנים החוששים להביע בקול את דעתם, כמו גם מתלמידים החושבים על הבעייה לעומקה, אך חשים שאין בידיהם את הידע המתאים לקביעת דיעה.

אל תסגירו את הפתרון בשלב זה. שמעו את דיעות התלמידים בסבלנות ובפנים חתומות; בקשו מהם לנמק את דעתם, אך הימנעו בשלב זה מהבעת דיעה או מניהול דיון כיתתי מעמיק. המקום הטבעי להסברים יגיע רק לאחר ביצוע הניסויים.

ספרו את מספר התלמידים בכל מחנה, ואמרו ש"ברוב קולות הוחלט שהמנהלת רות צריכה ל....." (אמרו בקול את דעתו של המחנה הגדול ביותר). התלמידים בוודאי יבינו בדרך זו שמדע אינו דמוקרטיה, ועלינו לשאול את הטבע מהו הפתרון הנכון. עלינו לשאול את הטבע באופן נבון – באופן שנוכל להסיק מסקנה תקפה מן התשובה. בקשו מהתלמידים לנסח שאלת חקר ולתכנן ניסוי מתאים.

הניסוי יהיה פתוח (דרגה 3). התלמידים יתכננו את שלבי הניסוי, יגדירו את הצידוד הדרוש, יערכו את הניסוי ויסיקו את המסקנות ממנו. אנו נעביר אל התלמידים את מרב האחריות ו"נעלם" לזמן מה מן הבמה.

במקרה הצורך, הדגישו בפני התלמידים כי חשוב שיבצעו מדידות כל דקה במשך כל הניסוי. זו תוספת השקעה קטנה, והיא תוסיף לנו אינפורמציה חשובה לגבי האופן בו יורדת הטמפרטורה במהלך הזמן (הקינטיקה של התהליך), אותה ננתח בהמשך.

תפקידכם בשלב זה הוא להקפיד על כתיבה מדוקדקת של הפרוטוקולים, יצירת טבלאות וגרפים ערוכים היטב עוד בטרם הניסוי. בקשו מהתלמידים לפעול לפי "כלל הזר ב-2:00 בלילה" (לתכנן את הניסוי כך שזר אשר יגיע למעבדה באמצע הלילה יוכל לבצע את הניסוי ולתעד את התוצאות). השגיו שהוראות הניסוי כתובות באופן מסודר. גם אם תבחינו בטעות בתכנון - אין לתקן אותה. הניחו לתלמידים לטעות. רק בעת ניתוח התוצאות חשבו יחד איתם על מהות השגיאה וכיצד ניתן לתקנה. התלמידים יאלצו לתקן את שגיאתם ולבצע בשנית את הניסוי. זה מחיר ראוי. התלמידים ילמדו משגיאות ביעילות רבה, ממש כמו מהצלחות. לאחר שיציגו בפניכם את פרוטוקול הניסוי ויקבלו מכם אישור, יבצעו התלמידים את הניסוי.

ביצוע הניסוי

עברו בין הצוותים בעת ביצוע הניסוי, אך הימנעו מהתערבות במהלכו. הניחו להם להתגבר על הקשיים בעצמם. העניקו להם תחושה שאתם מאמינים בהם וסומכים עליהם. אם אתם צופים בשגיאות, רשמו אותן לפניכם ודונו בהן רק בעת הדיון המסכם.

נציג כאן את תוצאותיו של ניסוי אופייני:

מים רותחים נמזגו במקביל לשני ספלים זהים, כדי $2/3$ מנפחם, והטמפרטורה נמדדה בשניהם (מומלץ להשתמש בשני מד-טמפרטורה, אך יש לוודא קודם לניסוי שקריאותיהם זהות). טמפרטורת החדר בניסוי זה הייתה 26°C .

הטמפרטורה בשני הספלים לפני הוספת החלב (זמן 0) הייתה 76°C . מיד לאחר מדידת הטמפרטורות (זמן 0.2) הוסף חלב קר לספל

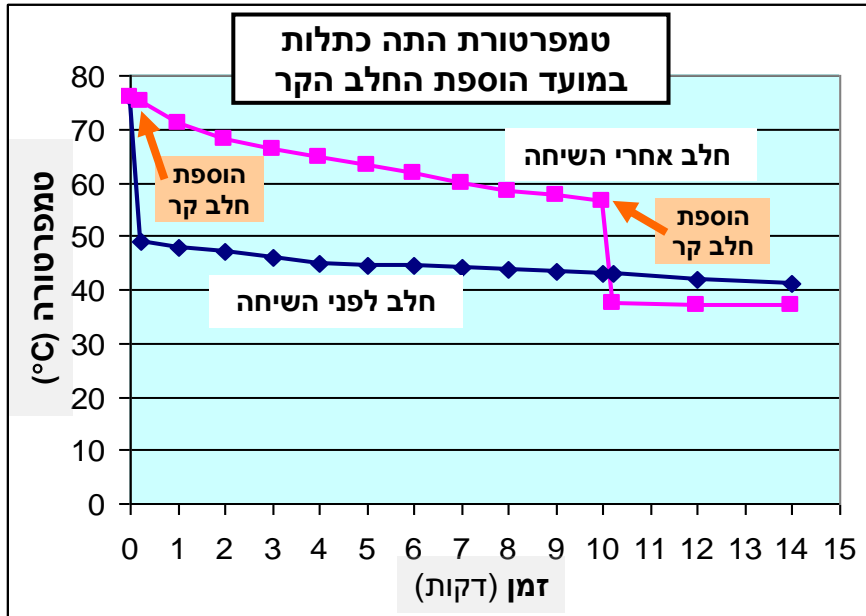
אחד, עד מלואו. הטמפרטורה בספל זה ירדה מ- 76°C ל- 49°C . הספל השני נותר מלא כדי $2/3$ מנפחו בלבד.

הטמפרטורות נמדדו בשני הספלים כל דקה. משך 14 דקות. מהרגע בו הוסף חלב קר לאחת הכוסות ועד למדידה של 10 דקות, איבד הספל החם 18.5°C , ואילו הטמפרטורה בספל הקר ירדה רק

טמפרטורת התה כתלות במועד הוספת החלב הקר		
טמפרטורת התה ($^{\circ}\text{C}$) (החלב הוסף אחרי השיחה)	טמפרטורת התה ($^{\circ}\text{C}$) (החלב הוסף לפני השיחה)	זמן (דקות)
76.0	76.0	0
75.0	כאן הוסף החלב הקר 49.0	0.2
71.0	48.0	1
68.0	47.0	2
66.0	46.0	3
64.5	45.0	4
63.0	44.6	5
61.6	44.3	6
59.7	44.0	7
58.5	43.6	8
57.5	43.3	9
56.5	43.0	10
כאן הוסף החלב הקר 37.2	43.0	10.2
37.0	42.0	12
36.9	41.2	14

ב- 6°C . לאחר 10 הדקות (עם סיום שיחת הטלפון), הוצא החלב מן המקרר והוסף גם לספל השני (זמן 10.2). הטמפרטורה ירדה בו מיד מ- 56.5°C עד ל- 37.2°C .

כפי שאנו רואים בטבלה ובגרף, הטמפרטורה בספל אליו הוסף החלב לפני השיחה גבוהה בסופו של הניסוי בכ- 5°C מהטמפרטורה בספל אליו הוסף החלב לאחריה. כיוון שהמנהלת



חפצה לשתות את ספל התה החם יותר, זה שאיבד כמות נמוכה יותר של חום, היא חייבת להוסיף את החלב הקר לפני השיחה.

דיון בעקבות הניסויים

לפני תחילת הדיון בתוצאות הניסוי, מומלץ להקדיש מספר דקות לדיון אודות התכנון והביצוע שלו. תוכלו להתחיל בניתוח נקודות מן הפרוטוקולים, בהן הבחנתם בעת שהתלמידים הציגו אותם בפניכם טרם ביצוע הניסוי. לדוגמה – האם התלמידים תכננו לבדוק את פיול התרמומטרים טרם תחילת השימוש בהם? האם כמויות הנוזלים רשומות במדויק? וכו'.

לאחר מכן, עברו לניתוח הביצוע עצמו, וגם כאן תוכלו להיעזר בתצפיות שערכתם על הקבוצות בעת שעבדו. לדוגמה – האם החלב הוחזר למקרר מיד בתום המזיגה, או שמא הושאר בחוץ? האם מדידות הזמן בוצעו כהלכה? וכו'.

זוהי הזדמנות לדון עם התלמידים בחשיבות התכנון המדויק והביצוע הקפדני. אי דיוקים עלולים לפגוע באמינות התוצאות, באופן אשר עלול לעתים לסכל את האפשרות לגזור מסקנות משמעותיות מן הניסוי.

במקרה הנוכחי, האפקט המתקבל חזק דיו במרבית המקרים; הניסוי אינו "רגיש" מאד לאי דיוקים מסוג זה, וניתן יהיה להתבסס על התוצאות לצורך ניתוחן והסקת מסקנות, כפי שנעשה כעת.

מובן שהתוצאות הכמותיות אינן זהות בין הצוותים השונים, אך סביר מאד שכל הצוותים הגיעו למסקנה ברורה. הניסויים יראו בבירור שאם המנהלת חפצה לשתות את התה חם יותר, היא חייבת לשפוך את החלב לפני שיחת הטלפון.

אם ניתן, בקשו מהצוותים השונים להציג את תוצאותיהם מול הכיתה על-ידי תכנת Excel, כך שכל התלמידים יראו את התוצאות של הצוותים השונים. דונו במקור ההבדלים הכמותיים בין הצוותים.

כיוון שבדיון המוקדם לפני ביצוע הניסוי סביר שהכיתה נחלקה לארבעה מחנות, הרי שעבור חלק מהתלמידים ממצא זה מאשר את תחזיתם, ועבור אחרים הוא מפריך אותה. דונו עם התלמידים על תחושותיהם ותסכולם. אל תשאירו תסכול זה ללא התייחסות. אמרו להם שבמקרים רבים מאד בהיסטוריה של המדע היו מחלוקות בין שני מחנות. כיוון שרק מחנה אחד יכול להיות צודק, נוצר בהכרח תסכול במחנה האחר. הדרך להתגבר על תסכול זה היא להדגיש לתלמידים כי מדענים רבים, ובתוכם גם איינשטיין, טעו לא פעם במהלך עבודתם המדעית. אין אדם או מדען החסין בפני טעויות או השערות המתבררות כשגויות, ולכן מדען הקם מול הקהילה המדעית ואומר "בתחילה שיערתי ש...", אך לאחר הניסוי נוכחתי כי השערתי הייתה שגויה", אינו מגונה על-ידי עמיתיו, אלא להיפך – הוא זוכה להוקרה ולהערכה על יושרו. זו עצמתה של השיטה המדעית, החותרת להגיע לאמת, ועושה זאת באופן אובייקטיבי וללא משוא פנים.

פרק 2: גילוי חוק הקירור

כעת נותרה השאלה – מדוע? מדוע גבוהה יותר הטמפרטורה הסופית של הספל אליו הוסף החלב לפני השיחה מאשר טמפרטורת הספל אליו הוסף החלב רק בסופה?

ניתוח העקומות

נתחו את העקומות עם התלמידים בדיון כיתתי. מהעקומות המתקבלות עבור שני הספלים ניתן לראות בבירור כי התקררותו של כל ספל מורכבת משני שלבים: שלב של התקררות חדה כתוצאה מהוספת החלב הקר (לפני או אחרי שיחת הטלפון) ושלב של התקררות איטית ומתמשכת במהלך שיחת הטלפון, כתוצאה ממעבר חום מן הספל אל הסביבה. הטמפרטורות הסופיות בכל אחד משני ספלי התה נובעות משילוב של שני שלבי קירור אלו. את התשובה לרות המנהלת כבר סיפקנו, באמצעות תוצאות הניסויים; נחזור אל החידה בהמשך הניתוח. בשלב הנוכחי, נתמקד בתהליך ההתקררות האטית במהלך השיחה.

בקשו מהתלמידים לתאר במילים, באופן איכותני, את צורתן של עקומות ההתקררות של שני הספלים במהלך 10 הדקות של השיחה. התלמידים רגילים לעקומות ישרות (לינאריות), וכעת לפנייהם עקומות בעלות שיפועים משתנים - הטמפרטורות יורדות בקצב ההולך ומתמתן עם הזמן. הדבר בולט בעיקר בעקומת הספל החם יותר, בו יורדת הטמפרטורה בקצב מהיר, בעיקר בתחילת הניסוי.

שאלו את התלמידים בכמה מעלות ירדה הטמפרטורה בספל החם בדקה הראשונה? בדקה השנייה? העשירית? התלמידים יראו שקצב ירידת הטמפרטורה משתנה עם הזמן. הוא מהיר בתחילה, והולך ומתמתן עם הזמן. ומה הייתה הטמפרטורה אם היינו ממתנים שעה, או יום שלם? הם בוודאי יבינו שהטמפרטורה בספל תגיע לאחר זמן רב לטמפרטורת החדר (אפשר, ואף מומלץ, להשאיר ספל תה בחדר משך כל השיעור, לבדוק את הטמפרטורה שלו לאחר למעלה משעה ולהדגים לתלמידים עד כמה קרובה טמפרטורת התה לאחר זמן רב לטמפרטורת החדר).

בנקודה זו מומלץ לשאול את התלמידים: האם החום שאבד מן המים נעלם או נשמר? אין צורך להעמיק בחוק שימור האנרגיה או אף במהות המושג "אנרגיה", אך מומלץ להזכיר את העובדה שחום אינו אובד או נעלם. החום שאבד לגוף, כפי שמתבטא בירידת הטמפרטורה, עבר אל חלקיקי האוויר שבחדר¹. אם כך, מדוע אין אנו חשים שהטמפרטורה בחדר עלתה?

¹ אנו מדברים על מעבר חום מהנוזל לאוויר, אך פרט לפני המים העליונים (שם יש מגע ישיר בין המים לאוויר), החום עובר מן המים אל דופן הספל וממנה אל האוויר. כיוון שחוקי מעבר החום אינם תלויים בזהות החומרים מהם עשויים

החום התפזר על נפח גדול והעלה את הטמפרטורה בחדר במידה מועטת בלבד. עליית החום היא כה קטנה, עד כי אין אנו חשים בה, ואף הייתה מתחת לסף הרגישות של מדי- הטמפרטורה שבידינו. החום לא אבד, אלא עבר מגוף אחד (המים) לגוף הבא איתו במגע (אוויר החדר).

בידוד משתנים - ניתוח ההבדלים בין הספלים

הפכו את התלמידים למדענים החוקרים את התופעה. שאלו אותם מהם ההבדלים בין שני הספלים, העשויים לגרום להבדלים בקצב איבוד החום? שאלה זו מהווה תרגול חשוב בחשיבה מדעית בכלל ובבידוד משתנים בפרט. רשמו את הצעות התלמידים על הלוח.

ארבעה משתנים עיקריים השתנו במקביל בניסוי שערכנו, ולכן לא נוכל לדעת מי מהם גרם להבדל בקצב ההתקררות. עלינו לבודד כל אחד ממשתנים אלה ולבדוק אותו בנפרד.

1. **כמות הנוזל** - כמות הנוזלים בשני הספלים לא הייתה שווה משך כל הניסוי. בספל הראשון הוסף חלב עד מלוא הספל, ואילו הספל השני היה מלא רק כדי $2/3$ מנפחו משך 10 דקות הניסוי.

2. **נוכחות החלב** - החלב היה נוכח בספל האחד משך השיחה, אך נעדר מן השני. ייתכן שחלב המעורב עם מים משך 10 דקות גורם להאטת קצב איבוד החום (יוצר שכבת בידוד, למשל).

3. **הטמפרטורות ההתחלתיות** - הטמפרטורה ההתחלתית של הספל שהכיל רק מים חמים משך 10 דקות הניסוי (אליו לא נשפך חלב) הייתה גבוהה מהטמפרטורה ההתחלתית של הספל אליו הוסף החלב לפני השיחה (כוונתנו כאן לטמפרטורה בזמן 0.2, מיד לאחר הוספת החלב לאחד הספלים).

4. **הפרש בין טמפרטורת הספל לטמפרטורת הסביבה** - משך כל זמן השיחה היה הפרש בין טמפרטורת הספל החם (זה ללא החלב) לבין טמפרטורת הסביבה גדול יותר מאשר הפרש הטמפרטורות בין הספל הקר יותר (אליו הוסף החלב) לבין הסביבה.

ייתכן כי המשתנה החשוב לענייננו (משתנה 4) לא יועלה כאפשרות על-ידי התלמידים, כיוון שטמפרטורת הסביבה אינה משתנה במהלך הניסוי. יהיה זה תפקידכם, המורים, להעלות אותו ביזמתכם על-ידי שאלה כגון: אם ספל בעל טמפרטורה גבוהה היה מוצב בחדר בקיץ או

הגופים, קיומה של הדופן אינו משנה מהותית את התנהגות המערכת (ניתן לאשש זאת אמפירית), ולכן ניתן להתייחס אל המערכת מים-דופן כמערכת אחת, ואל האוויר כאל הגוף האחר אליו עובר החום ממערכת זו.

במקרה, האם בשני המקרים הוא היה מתקרה באותו קצב? ייתכן שהתלמידים לא ידעו את התשובה (אלא רק ינחשו), אך זה יפתח פתח לניסוח האפשרות הרביעית.

בנקודת זמן זו ניתן לחקור כל אחת מן הסיבות להבדלים בקצב ההתקררות של שני הספלים. דונו עם התלמידים בשתי ההשערות הראשונות. בהחלט ייתכן שהנפחים השונים של המים בשני הספלים ו/או נוכחות החלב גרמו או תרמו להבדלי קצב ההתקררות. בקשו מהתלמידים לתכנן ניסויים שיוכיחו (או יפריכו) השערות אלה.

הערה דידקטית: כדי להימנע מביצוע ניסויים רבים בעלי אופי זהה, דבר העלול לייגע ולפגום בהתלהבות התלמידים, אנו ממליצים לאחד ניסויים אלה עם הניסויים הבאים (ראו בהמשך). לחילופין, אפשר לבקש מאחד או שניים מהצוותים להעמיד את הניסויים הבוחנים את שתי האפשרויות הראשונות רק כניסויי הדגמה, ולהמשיך במקביל בדיון על שתי האפשרויות האחרות. את תוצאות ניסויים אלה מומלץ להציג בדיון המסכם.

השפעת ההבדל בכמות הנוזל: כאשר תנתחו את תוצאות ניסוי השפעת ההבדלים בנפחי המים בספלים, בוודאי תגלו שבתנאי הניסוי, בו היה הספל האחד מלא והאחר מלא רק כדי $2/3$ מנפחו במים בטמפרטורה גבוהה וזהה, היה הפרש קטן מאד בקצב ירידת הטמפרטורה במהלך 10 דקות. משמע, תרומת הבדלי הנפחים קיימת, אך היא קטנה מאד, כפי שמודגם בהמשך. הפרש זה נובע מן היחס השונה בין שטח הפנים של הכלים לנפחם. הספל שהכיל כמות מים רבה מתקרר לאט יותר, כיוון שכמות החום בו תלויה בנפחו, אך איבוד החום תלוי בשטח המגע שלו עם הסביבה (שטח פניו). נושא זה אינו פשוט, ואין אנו ממליצים לעסוק בו בהרחבה כאן².

השפעת נוכחות החלב: בניסוי לדוגמה (התוצאות אינן מוצגות) לא נמצא כל הבדל בקצב ירידת הטמפרטורה בין ספל אליו הוסף $1/3$ נפח חלב לבין ספל אליו הוספו מים. המסקנה היא שהחלב אינו גורם להבדל. מומלץ שלא להקדיש לשאלה זו זמן רב, לערוך את הניסוי כהדגמה במערכת אחת, ולהציג את התוצאות בדיון המסכם.

השפעת הטמפרטורות ההתחלתיות או הפרש הטמפרטורות: הגענו, אם כך, לדיון בלב יחידת לימוד זו. אנו מעוניינים לנצל את חידתה של המנהלת בכדי לגלות חוק טבע – חוק הקירור של ניוטון.

אם כך, הבה נצא למסע גילוי חוק הקירור.

² ככל שנעלה את מידותיו של גוף, יגדל נפחו ביחס לשטח פניו, ולכן תגדל גם יכולת שימור החום בו. זו הסיבה העיקרית לכך שבקטבים נמצא חיות גדולות גוף ביחס לחיות באזורים חמים יותר. גם במערכת הספלים, אם הפרש הנפחים ניכר, קיים הבדל משמעותי בקצב מעבר החום, אך זה אינו המקרה כאן.

חקר השפעת הטמפרטורות

משך 10 הדקות שחלפו לאחר הוספת החלב לספל האחד ולפני הוספתו לספל האחר קיים הבדל רב בטמפרטורות של שני הספלים³. פתחו דיון רחב עם התלמידים בשאלה; כיצד היו מוכיחים את הטענה שהטמפרטורות ההתחלתיות הן שמשפיעות על קצב מעבר חום בין גופים? או אולי הפרש הטמפרטורות בין הספלים לסביבתם הוא הקובע? או אולי שתי האפשרויות בעלות השפעה?

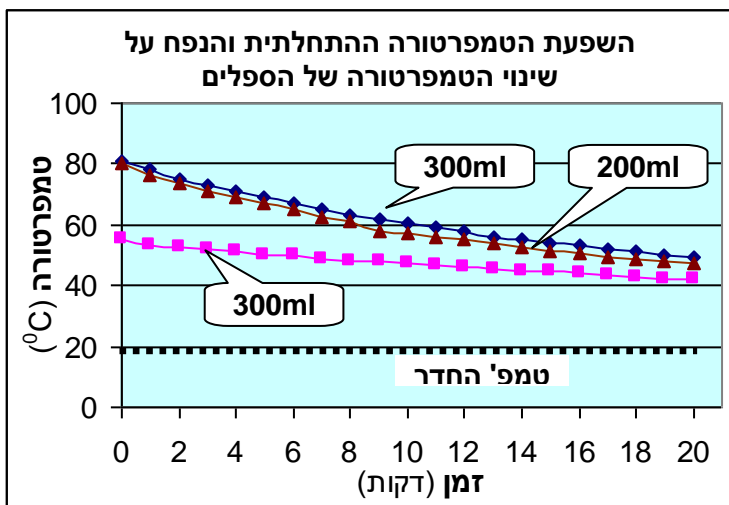
כדי לחקור שאלות אלה נבטל את שני המשתנים הראשונים שהוזכרו למעלה (הבדל הנפחים ותוספת החלב) – הנוזל בספלים יהיה אך ורק מים, ונפח המים בכל המערכות יישמר זהה. אנו נשנה אך ורק את הטמפרטורות ההתחלתיות של שני הספלים או את הפרשי הטמפרטורות בינם ובין סביבתם.

בקשו מהתלמידים לבצע את הניסוי. בגרף ניסוי לדוגמה ניתן לראות בבירור שגם כאשר הנוזל הוא מים והנפחים בספלים הם זהים, יש הבדל ברור בקצב ירידת הטמפרטורה בשני הספלים. הספל שהכיל מים חמים מאד איבד 20.5°C ב-10 דקות (31.8°C ב-20 דקות),

והספל שהכיל מים בטמפרטורה התחלתית נמוכה יותר איבד רק 7.9°C ב-10 דקות (13°C ב-20 דקות)⁴.

התופעה, אם כן, חוזרת על עצמה, אך עדיין איננו יכולים להבדיל בין שתי האפשרויות - האם קצב ירידת הטמפרטורה תלוי בטמפרטורות ההתחלתיות של המים, ו/או

בהפרש הטמפרטורות בין המים בספלים לזו של הסביבה.



³ מנגנון נוסף המשפיע על קצב מעבר החום הוא ההתאדות משני הספלים. קצב ההתאדות מהספל החם הוא אמנם מהיר יותר מזה של הספל הקר יותר, אך בניסוי נמצא שלגורם זה השפעה קטנה על ההבדלים בקצב איבוד החום והוא אינו משנה את אופי התוצאות. מומלץ שלא להתייחס אליו כאן, גם בגלל השפעתו הקטנה וגם כדי שלא להסיט את תשומת הלב מן הנושא העיקרי ביחידה. ראוי להעיר, עם זאת, שלהתאדות תהייה השפעה ניכרת יותר אם הניסויים ייערכו בכוסות שתייה חד-פעמיות (קלקר). מסיבה זו מודגש כי יש להשתמש בכוסות העשויות זכוכית, בעלות מוליכות חום גבוהה.

⁴ כפי שניתן לראות בגרף, בניסוי זה בחנו במקביל גם את השפעת הבדלי הנפחים. אנו רואים שספל המכיל 200 מ"ל מאבד חום בקצב מהיר אך במעט ביחס לזה של ספל המכיל 300 מ"ל. כך איחדנו בניסוי אחד מענה גם לאפשרות הראשונה, וזאת כדי שלא להכביד על התלמידים בביצוע ניסוי דומה באופיו מספר רב של פעמים.

כיצד נוכל, אם כך, להבדיל בין שתי האפשרויות? התשובה, כצפוי – בידוד משתנים: נוכל להבדיל ביניהן אם נשנה רק משתנה אחד (הפרש הטמפרטורות, למשל), ואת האחר (הטמפרטורה ההתחלתית) נותיר קבוע.

הבה נמדוד ספלים אשר בכל אחד מהם מים בטמפרטורה התחלתית זהה, אך הם נמצאים בהפרשי טמפרטורה שונים מסביבתם. אם ירידת הטמפרטורה תלויה בטמפרטורה ההתחלתית ואינה תלויה בהפרש הטמפרטורות, קצב הירידה יהיה אחיד בכל הספלים. אם, לעומת זאת, קצב איבוד החום תלוי בהפרש הטמפרטורות, קצב הירידה יהיה שונה כאשר הפרש הטמפרטורה יהיה גדול יותר.

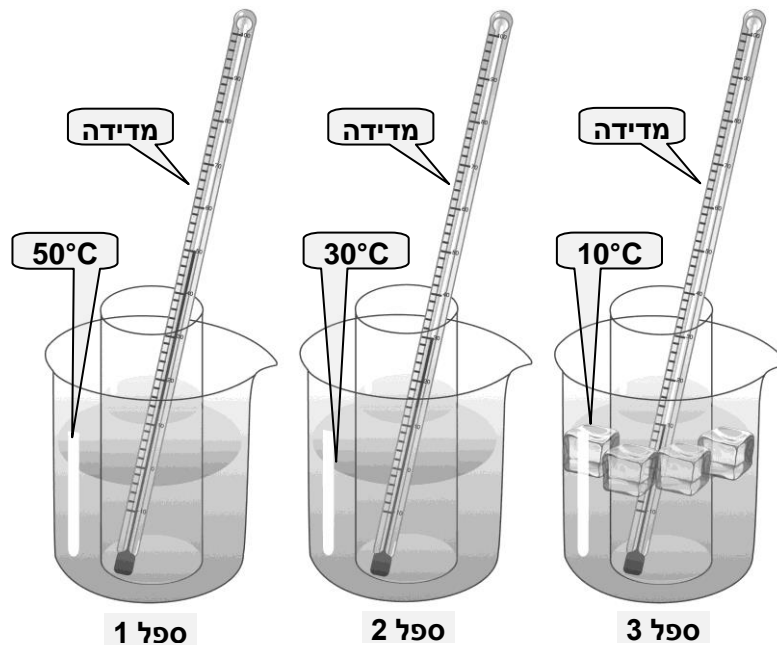
1) טמפרטורה התחלתית של המים בספל קבועה - טמפרטורות סביבה שונות

בניסוי זה העמדנו שלושה ספלים זהים - פוסות כימיות מלאות בנפח זהה של מים חמים בטמפרטורות זהות (77°C בדוגמה להלן), בתוך שלושה כלים גדולים המכילים מים בטמפרטורות שונות, כך שהפרשי הטמפרטורות בין הספלים למים המקיפים אותם יהיו שונים.

הערה דידקטית: ניסוי זה הוא מורכב מבחינה טכנית ודורש זמן רב וכלים רבים. מומלץ לבקש מהתלמידים לבצע אותו, אך יש להביא בחשבון שביצעו בפועל בכיתה עלול להיות ארוך ומייגע. ניתן, לכן, להסתפק בדיון עם התלמידים ולהציג בפניהם את תוצאות הניסוי המתואר כאן, או להעמיד מערכת הדגמה בפני הכיתה.

בניסוי זה הכלים בהם היו טבולים הספלים הכילו מים בכמות גדולה ביחס לנפח המים בספלים, כך שהמים שהקיפו את הספלים הושפעו אך במעט מהספלים החמים. טמפרטורת המים בשלושת הספלים נמדדה כל דקה, ובמקביל נוטרו טמפרטורות המים המקיפים את הספלים בשלושת הכלים בהם טבלו הספלים, כך שהן נותרו קבועות ככל הניתן במהלך הניסוי. זאת בוצע על-ידי הוספת מים קרים או קוביות קרח לכלים, על-פי הצורך. הדבר נדרש בעיקר בכלי שהכיל מים בטמפרטורה הנמוכה של 10°C ("ספל 3" באיור), שהמתחמם במהירות על-ידי החום הנפלט מן הספל החם שהונח בתוכו.

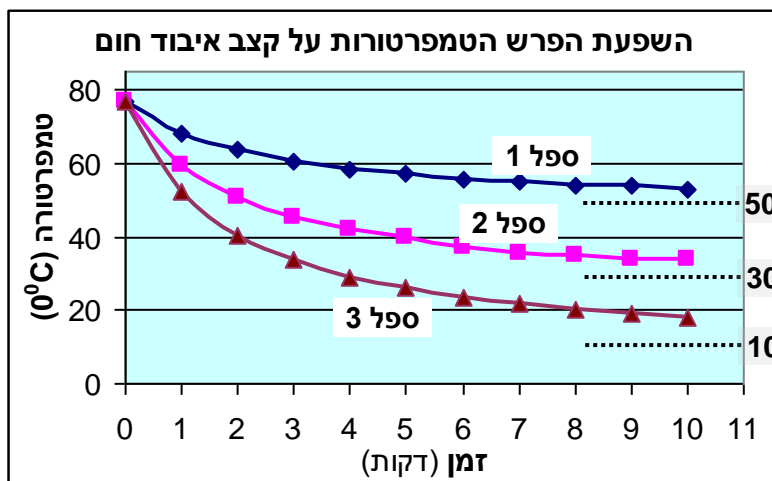
האיור הבא מדגים באופן סכמטי את אופן ביצוע ניסוי לדוגמה:



תוצאות ניסוי לדוגמה מוצגות בגרף הבא:

אנו רואים בבירור שקצב ירידת הטמפרטורה מותנה בהפרש הטמפרטורות בין הספל לבין סביבתו.

התוצאות מאשרות, אם כן, שקצב איבוד החום אינו תלוי בטמפרטורות המוחלטות של הספלים, אלא בהפרש הטמפרטורות בין הספלים לסביבתם. מן הניסויים שערכנו עדיין אין אנו יודעים אם היחס הוא ישר (פרופורציוני), אך ברור מהתוצאות עד כה שכלל שההפרש



יהיה גדול יותר – קצב איבוד החום יהיה גדול יותר.

את התוצאות ניתן להרחיב כעת ולהסיק, בזהירות כמובן (כיוון שבדקנו רק טמפרטורה התחלתית אחת), חוק הטוען כי:

קצב מעבר חום בין שני גופים אינו תלוי בטמפרטורות של כל אחד משני הגופים, אלא בהפרש הטמפרטורות ביניהם. ככל שההפרש יהיה גדול יותר – קצב מעבר החום יהיה רב יותר.

ספרו לתלמידים שהחוק שגילו התגלה לראשונה על-ידי לא אחר מאשר אייזיק ניוטון, והוא נקרא על שמו – "חוק הקירור של ניוטון". האין בכך גאווה גדולה?

כעת, שאלו את התלמידים את השאלה הבאה: "לפנינו שני ספלים דומים של מים – האחד בו המים הם בטמפרטורה של 80°C , והוא נמצא בסביבה בה הטמפרטורה היא של 40°C . המים בספל האחר נמצאים בטמפרטורה של 47°C , והספל נמצא בסביבה בה הטמפרטורה היא של 7°C . מי מהספלים יאבד חום בקצב מהיר יותר?".

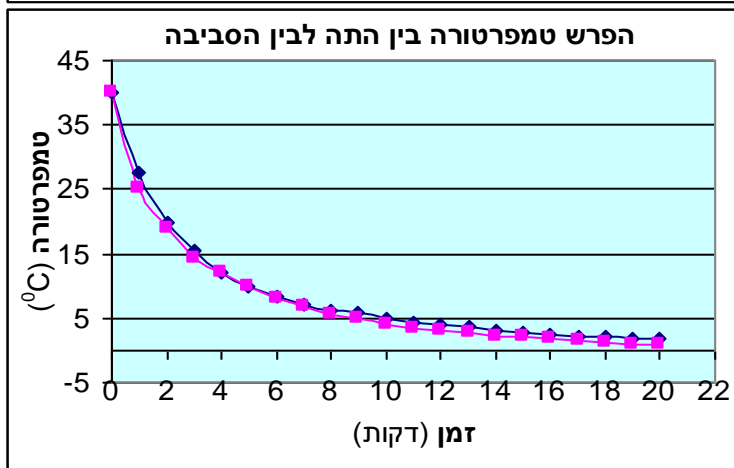
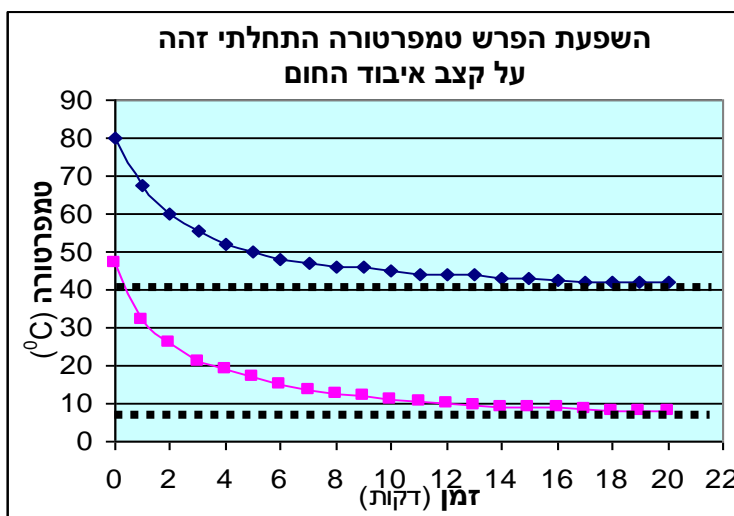
התלמידים בוודאי יבינו שלפנינו מערכת בה הפרש הטמפרטורות בין המים בכוס לבין הסביבה זהה, וההבדל הוא בטמפרטורות ההתחלתיות (ניסוי הפוך לניסוי הקודם). אם הטמפרטורה ההתחלתית היא הקובעת את קצב איבוד החום, המערכת הראשונה תאבד חום בקצב מהיר יותר. אם חוק הקירור שניסחנו קודם לכן הוא הנכון, והפרש הטמפרטורה הוא זה הקובע את קצב מעבר החום, קצב ירידת הטמפרטורות בשתי המערכות יהיה זהה, ללא תלות בטמפרטורות ההתחלתיות.

הערה דידקטית: כמו בניסוי הקודם, מומלץ לבצע ניסוי זה, אך יש לזכור שהוא מורכב מבחינה טכנית ודורש הקפדה על טמפרטורות הסביבה אף יותר מקודמו. לכן, ניתן להסתפק

בדיון עם התלמידים על הדרך בה היו בודקים אפשרות זו, ולהציג בפניהם לאחר הדיון את התוצאות המודגמות כאן.

2) טמפרטורה התחלתית של המים בספל קבועה - הפרש הטמפרטורות התחלתי זהה בין הספלים לסביבתם

בניסוי לדוגמה המתואר כאן יצרנו שתי מערכות ספלים הטבולות בסביבה הנמצאת בטמפרטורה הנמוכה מהם ב- 40°C . ספל אחד הכיל מים בטמפרטורה של 80°C והיה טבול באמבט מים (בעל וויסות חום) בטמפרטורה של 40°C . במקביל הוצב ספל בעל



טמפרטורה של 47°C בתוך אמבט מי קרח בטמפרטורה של 7°C . התוצאות הנראות בגרף מראות בבירור שהדינמיקה של ירידת הטמפרטורה בשתי המערכות הייתה דומה מאד. כאשר הוצבו שני הגרפים זה על זה, נוצרה חפיפה כמעט מושלמת ("גרפים מאוחדים").

תוצאות אלה מראות, אם כן, שקצב איבוד החום אינו תלוי בטמפרטורות המוחלטות, אלא רק בהפרש הטמפרטורות, והן מאששות בחוזקה את החוק אותו ניסחנו לאחר הניסוי הקודם.

בשני הניסויים האחרונים בודדנו את שני המשתנים ובחנו כל אחד מהם בניסוי נפרד. התוצאות של שני הניסויים תמכו בחוק בצורה ברורה. אם כך, האם ניסחנו חוק כללי התקף לכל הגופים ולכל הטמפרטורות? זו שאלה המעמידה את התלמידים במצבם של מדענים בוגרים ומנוסים הצופים בתופעה, מנסים לאשש אותה מכיוונים שונים (ואף מצליחים לעשות זאת), אך אין הם יכולים לבדוק את כל המערכות האפשריות. אם כך, התלמידים ניצבים כעת בפני שאלה מבגרת מאד, המטילה עליהם אחריות כבדה: האם הם בטוחים לצאת לעולם הרחב ולהכריז שהם גילו חוק כללי?

נקודה חשובה זו מחייבת התעמקות, ולכן נעסוק בה כעת בהרחבה:

האם החוק הוא אוניברסלי?

עד כה בדקנו את הדינמיקה של מעבר חום מנוזל מסוג אחד, מים, לסביבתו – אוויר או מים המקיפים את הספל. המקרה של המנהלת רות הוא אמנם מקרה מרתק ומסקרן, אך מרתק ומסקרן ככל שיהיה – הוא אינו אלא מקרה פרטי.

כעת נותר לשאול את התלמידים האם אפשר להסתמך על המקרה הפרטי ולהכריז שגילינו חוק חדש בטבע, או שמא התנהגות המערכות תהיה נכונה רק במקרה בו הנוזל החם הפולט חום אל סביבתו הוא מים? האם הטרחנו את עצמנו לבצע ניסוי רק כדי לעזור למנהלת לשתות תה חם? או אולי יכול המקרה הבודד של המנהלת ושיגיונותיה להצביע על חוק בעל השלכות רחבות יותר, הקל לא רק על תה המתקרר באוויר או במים, אלא על מעבר חום בין כל שני גופים?

אם כך הוא הדבר - החידה החביבה קיבלה לפתע משמעות עמוקה הרבה יותר. היא תוכל להוות דוגמה לתלמידים כיצד פועלים המדענים. המדענים מנסים להבין כיצד פועל העולם. על-פי אילו חוקים הוא פועל? הם מנסים לנסח חוקים כלליים, החלים על כל הגופים בעולמנו. הדוגמה הקלאסית היא הסיפור (המיתוסי?) של התפוח שנפל על ראשו של ניוטון. מקרה בודד זה עורר בו את המחשבה על חוק כללי יותר, החל לא רק על תפוחים, אלא גם על פלנטות ועל כל גוף אחר ביקום. כך הגיע ניוטון לניסוח "חוק הכבידה", שהוא חוק אוניברסלי.

הכללת מקרים פרטיים לניסוח חוק אחד נקראת בלשון המדענים "אינדוקציה". ככל שנבחן מקרים פרטיים רבים יותר, וכולם יתנהגו בהתאם לחוק זה - כך יגבר ביטחוננו בנכונות החוק הכללי. מובן שלא ניתן לבדוק את כל המקרים הפרטיים, ולכן יש להדגיש לתלמידים שיש לנקוט זהירות כאשר ננסה לעשות אינדוקציה ממקרים בודדים לחוק כללי. הרי ייתכן שמערכת אותה לא בדקנו תתנהג בעתיד באופן הסותר את החוק. זו המשמעות של הביטוי "סופי לעת עתה"

הבה נראה אם נוכל לפעול בדרך האינדוקציה גם הפעם, ולהפוך את המקרה הפרטי של המנהלת לחוק כללי. שאלו את התלמידים האם לאור תוצאות הניסוי של ספלי התה הם חשים בטוחים לאמר שמעבר החום בין כל שני גופים תלוי בהפרש הטמפרטורות ביניהם?

שאלו את התלמידים כיצד היו בוחנים אם התופעה בה צפו מצביעה על חוק כללי. התשובה פשוטה – יש לבצע ניסויים אלה על מספר רב של גופים העשויים חומרים שונים, בעלי מצבי צבירה שונים ובתנאים שונים של טמפרטורות. אם בכל מקרה ומקרה נקבל תצפית דומה, גדל הסיכוי שהחוק הוא כללי, וספלי התה הם מקרים פרטיים המאששים תופעת טבע רחבה.

אישוש מסוג זה הוא **אישוש אֶמְפִּירִי** (הנובע מניסוי). על מנת לבסס חוק טבע יש לאשש אותו על-ידי ניסויים רבים בתנאים שונים.

האישוש האמפירי הוא תנאי לביסוס חוק טבע, אך הוא אינו היחיד. כאשר המדענים מגלים חוק חדש, הם פועלים בשלושה שלבים:

1. הם מעמידים את החוק במבחן אֶמְפִּירִי – מבחן הניסוי.

2. הם מציעים הסבר תיאורטי.

3. לבסוף, הם מעמידים את החוק במבחן הניבוי.

הבה נעקוב אחר שלבים אלה:

1. אישוש אמפירי של החוק

כדי לאשש את החוק באופן אמפירי נבקש מהתלמידים לבצע ניסוי אחד או שניים בהם חומרים שונים ממים יתקררו או יתחממו. התלמידים יוכלו לבחון נוזלים נוספים וקלים להשגה כמו שמן או גליצרוֹל, ולבדוק האם קצב מעבר החום בינם ובין סביבתם תלוי אף הוא בהפרש הטמפרטורות בינם לבין סביבתם. אפשר לבחון גם מוצקים קלים להשגה כמו פלסטלינה או גוש ברזל, אותם יש לחמם ולהניח בחדר או במקרר ולראות האם קצב ההתקררות תלוי גם בהם בהפרש הטמפרטורה.

ועוד מילת זהירות - זכרו כי דרושים ניסויים רבים בכדי לאשש חוק טבע, אך מספיקה סתירה אחת בלבד בכדי למוטט אותו (בהנחה שווידאנו כי הסתירה אינה נובעת מטעות בניסוי...). לדוגמה: הפניצילין נחשב כאנטיביוטיקה אוניברסלית, עד שהתגלו סוגי חיידקים שהיו עמידים בפניו.

2. הסבר התופעה

מובן שלא נוכל לבחון את כל האפשרויות ולבצע ניסויים בכל התנאים. גם אם נבצע אלפי ניסויים, האם נוכל לבחון את כל הנוזלים, הגזים, המוצקים בעולם ובכל הפרש טמפרטורות? כמובן שלא נוכל. אם כך, האם נגזר על החוק להיות לעולם תלוי על בלימה, או שיש דרך נוספת בה נוכל לנקוט כדי לחזק עוד יותר את ביטחוננו בנכונותו?

נוכל לחזק משמעותית את ביטחוננו בנכונות החוק אם נוכל, בנוסף לאישוש האמפירי, לספק גם הסבר לתופעה זו, הסבר תיאורטי המתבסס על חוקי טבע ידועים ומאוששים. אם נצליח להבין מה מתרחש בתוך גוף חם (כל גוף חם) המתקרר, יגבר מאד ביטחוננו בנכונות חוק הטבע שניסחנו. מכאן חשיבותו הרבה של ההסבר התיאורטי⁵.

אנו נמצאים כעת בנקודה מאד אופיינית לתהליך המדעי, והמרתקת שבהן – תופעה מאקרוסקופית, גלויה לעין, נצפית על-ידינו, אך אין אנו מבינים מדוע היא מתרחשת (עבור חלק מאתנו, כך ראינו, היא אף מנוגדת לתחזיותינו המוקדמות). בכדי להבין תופעה זו, עלינו לחשוף את הגורמים לה. אחת הדרכים המקובלות להתמודד עם אתגר זה היא לעשות "רדוקציה" של התופעה לסיבותיה המיקרוסקופיות, אותן אין אנו רואים.

במקרה שלנו יבואו לעזרתנו החלקיקים מהם עשויים החומרים. התיאוריה החלקיקית מבוססת מאד, ולמרות שאין אנו יכולים לראות חלקיקים בעזרת אמצעים פשוטים, אנו יכולים לבנות מודלים מבוססים מאד, בהנחה שהם קיימים.

התיאוריה החלקיקית כבר עזרה למדענים להבין את מבנה החומר, את הקשרים הכימיים, את מצבי הצבירה השונים, את מבנה החלבונים והגנים בתאים חיים ועוד ועוד. האם נוכל להיעזר בה גם הפעם בכדי להסביר את חוק הקירור אותו גילינו? בקשו מהתלמידים לדמיין את המים והאוויר כעשויים חלקיקים הנעים במהירויות שונות ומתנגשים זה בזה. זוהי דרישה חשיבתית גבוהה – מעבר מן הקונקרטי אל המופשט. הבה נצא למסע.

⁵ רצוי להעיר גם כי קיומו של הסבר תיאורטי אינו תנאי לקבלת תיאוריה מדעית. למשל, חוק הכבידה של ניוטון נוסח בלי לדעת את מהותו של כוח הכובד (עד היום אין הוא מובן לחלוטין). הצורך בנטילת ידיים הוכח עוד לפני שהיה ידוע כלל על קיומם של חיידקים ונגיפים.

תהליך הקירור – רקע מיקרוסקופי

ההסבר הוא מורכב, אך ננסה בכל זאת לפתוח עתה צוהר קטן להבנת תהליך הקירור, בהסתמך על הידיעה שהחומר מורכב מחלקיקים זעירים, וכי הטמפרטורה (הנמדדת בעולם המאקרוסקופי) היא מדד לאנרגיית התנועה הממוצעת של החלקיקים הזעירים.

כאשר כדורים קשיחים כמו כדורי מתכת או כדורי ביליארד מתנגשים זה בזה בכיוונים מנוגדים על קו ישר, הם מחליפים ביניהם את המהירויות שלהם⁶. הכדור המהיר הופך אטי והאטי הופך מהיר. לדוגמה: אם כדור אחד נע במהירות של 2 מטרים לשנייה, והשני אינו נע, הרי שהראשון ייעצר, והשני ינוע במהירות של 2 מטרים לשנייה. דוגמה אחרת: אם האחד נע במהירות של 2 מטרים לשנייה, והשני נע לקראתו במהירות של 4 מטרים לשנייה, הראשון ישוב על עקבותיו במהירות של 4 מטרים לשנייה, והשני יחזור על עקבותיו במהירות של 2 מטרים לשנייה. מומלץ להביא כדורים קשיחים כמו כדורי ביליארד או כדורי מתכת זהים לכיתה ולהדגים זאת מול עיני התלמידים.

כעת נברר את הקשר בין דוגמאות מאקרוסקופיות אלה למתרחש בין חלקיקי המים והאוויר בספלי התה בהם עסקנו עד כה.

טמפרטורה גבוהה יותר מייצגת אנרגיית תנועה גבוהה יותר של החלקיקים המרכיבים את החומר. אם טמפרטורת האוויר עולה, הדבר מעיד על עלייה באנרגיית התנועה של מולקולות האוויר.

כאשר מולקולות האוויר מתנגשות בספל החם, מתרחש תהליך דומה לזה המתרחש בין כדורי הביליארד. אנרגיית התנועה של מולקולות האוויר גדלה, ואנרגיית התנועה של מולקולות הספל קטנה. הדבר מתבטא בירידת טמפרטורת הספל. ככל שההבדל בין מהירויות החלקיקים המשתתפים בהתנגשות גדול יותר, כך תעבור כמות גדולה יותר של אנרגיית תנועה מן החלקיקי המהיר לחלקיק האטי יותר, מה שמסביר את קצב הקירור המשתנה כתלות בהפרש הטמפרטורות. לדוגמה, אם כדור במהירות של 40 מטרים לשנייה מתנגש עם כדור במהירות של 2 מטרים לשנייה, הם מחליפים מהירויות זה עם זה, ולכן הכדור המהיר איבד אנרגיה קינטית רבה יותר מאשר כדור הנע במהירות של 4 מטרים לשנייה. זהו דגם פשוט לתהליך הקירור.

חשוב להבין שמדובר בדגם פשוט בלבד, וכי המערכת המציאותית מצריכה דיון מורכב בהרבה.

⁶ אנו מניחים כאן שאין איבוד אנרגיה קינטית בהתנגשויות אלה. הנחה זו אינה נכונה, אך ככל שהכדורים קשיחים יותר, איבוד האנרגיה הופך זניח יותר.

3. מבחן הניבוי

עד עתה העמדנו את חוק הקירור במבחן אמפירי, ואף הסברנו את הרקע התיאורטי העומד בבסיסו. כעת, נוכל להעמיד את החוק במבחן השלישי – **מבחן הניבוי**. אם החוק נכון, הרי הוא יכול גם לנבא התנהגות גופים אותם לא בדקנו עדיין.

נציג כאן שני סוגי ניסויים – ניסויי התקררות של גופים נוספים (פרט למים בספל התה) וניסויי התחממות. אם החוק אותו גילינו הוא נכון, נוכל לנבא שקצב ההתקררות של כל גוף יהיה מהיר יותר ככל שהפרש הטמפרטורה בינו ובין הגוף הבא אתו במגע גדול יותר, בין אם מדובר בהתחממות ובין אם בהתקררות (מה גם שהתקררותו של האחד היא התחממותו של האחר).

הערה דידיקטית: מומלץ לבצע ניסויים אלה, אך יש לזכור שמספר הניסויים שערכו התלמידים עד עתה הוא רב למדי, ולכן אפשר להסתפק בדיון כיתתי או להציב ניסוי לדוגמה מול עיני התלמידים ולדון על תוצאותיו.

1 - ניסוי התקררות

בקשו מהתלמידים לתכנן ניסוי בו הם יבדקו את קצב ההתקררות של חומר חדש עבורם. הטילו עליהם משימה: העוגה יצאה כעת מן התנור, ובני המשפחה והאורחים רעבים מאד. היכן כדאי להניח את העוגה כדי שתתקרר במהירות הגבוהה ביותר – בחדר? במקרר? במקפיא? בקשו מהתלמידים לנבא מה תהיינה התוצאות. לאחר הדיון תנו לתלמידים פרוסות עבות של עוגה שחוממה בתנור או במיקרוגל (או בצק אותו תכינו בכיתה) ואפשרו להם לבדוק - האם צדקו? ככל שירבו המקרים בהם החוק מאושש על-ידי ניבוי, כך יגבר האמון שלנו בכך שהוא מתאר את התנהגותם של כלל הגופים בעולם.

2 - ניסוי התחממות

עד כה בדקנו רק גופים המאבדים חום לסביבתם ומתקררים. האם החוק תקף גם בכיוון ההפוך? האם קצב ההתחממות של גופים תלוי אף הוא בהפרש הטמפרטורות?

ספרו לתלמידים שאָל אותה משפחה הגיעו לפתע אורחים, ויש להפשיר במהירות את העוגה שהוצאה מהמקפיא. האם להפשיר אותה במקרר? על המדף? בתנור? אפשרו לתלמידים לבדוק את הניבוי שלהם. תנו להם פרוסות עוגה קפואות (או גושי פלסטלינה מקוררים) ובקשו מהם לבדוק את קצב ההפשרה שלהן בתנאי סביבה שונים.

אמנם ניתן לטעון שקצב התחממות של גוף משמעו קצב ההתקררות של הסביבה המעבירה אליו את חומה, אך כדאי להמחיש זאת לתלמידים על-ידי מדידה ישירה של הגופים המתחממים או מתקררים.

חוק הקירור וחידתה של רות המנהלת

העמקנו בחוק הקירור, אך אסור לשכוח שהמסע לגילוי החוק יצא מהדילמה בה עמדה רות המנהלת. האם חוק הקירור הוא העומד בבסיס הפתרון לדילמה של רות?

התשובה חיובית, וקיימת לכך הוכחה מתמטית מורכבת אותה לא נפרט כאן. נוסף זווית ראייה אינטואיטיבית אשר תאיר את פתרון החידה:

אם הניסוי היה אורך זמן רב, ולא רק 10 דקות, היו הטמפרטורות של שני הספלים מתקרבות זו לזו עוד יותר, ומתכנסות שתיהן לטמפרטורת החדר. כאשר היינו מוסיפים את החלב הקר לספל השני, הוא היה מוריד את טמפרטורה המים בספל זה לטמפרטורה נמוכה, והפרש הטמפרטורה בין הספלים היה גדול עוד יותר מזה בו צפינו לאחר 10 דקות ניסוי.

עם זאת, יש להעיר שתוצאת הניסוי תלויה בטמפרטורת הנוזל אותו מוסיפים לספל. פתרון אנליטי מלא של הבעיה היה מגלה כי במקרה שהחלב המוסף למים הרותחים הוא בטמפרטורה שמעל לטמפרטורת החדר, כדאי יהיה למנהלת להוסיף את החלב דווקא אחרי שיחת הטלפון; במקרה שהנוזל הוא בטמפרטורת החדר, לא יהיה הבדל בין שני המקרים. לא נתעב על מקרים אלה, מכיוון שהחלב בניסוי זה נלקח מן המקרר, ובעיקר מכיוון שהמוקד העיקרי ביחידת לימוד זו הוא על חוק הקירור, בו דנו בפירוט.

ההשלכות המעשיות של החוק

החוק אותו גילו התלמידים הוא חוק טבע מבוסס. הוא מבוסס עד כדי כך שרבות מאד מהטכנולוגיות בהן אנו משתמשים מתבססות עליו. למען האמת, לא יכולנו לתאר את חיינו ללא הכלים והטכנולוגיות בהם חוק זה הוא חלק ממערך התכנון. האם יכולנו לתאר את חיינו

ללא מכונות? מטוסים? מקררים?
 מחשבים? תחנות כוח המספקות לנו
 חשמל? בכל אלה, וברבים אחרים,
 ישנו מנוע או מערכת הפולטים חום
 רב ולכן יש לקררם, כפי שנראה
 בדוגמאות הבאות:



צינון הגוף: כיצד יכול המאוורר לצנן את גופנו ביום קיץ חם? המאוורר מגביר את קצב איבוד החום מגופנו

על-ידי כך שהוא מסלק את מעטפת האוויר שחוממה על-ידי גופנו, ומחליף אותה באוויר הצונן

יותר של החדר. כך נוצר פער גבוה וקבוע של טמפרטורות בין גופנו לבין האוויר, מה שמגביר את יעילות מעבר החום, כפי שקובע חוק הקירור.

המחשב: שימו לב לרעש הנשמע עם הדלקת המחשב. רעש זה נובע מן המאווררים הנמצאים ליד הלוחות האלקטרוניים. מעברי הזרם במחשב יוצרים חום לא מועט. המאווררים מסלקים את האוויר שהתחמם מסביבות הלוחות האלקטרוניים, מאפשרים לאוויר קר יותר לבוא במקומו, וכך לשמור על הפרש טמפרטורות גדול בין הלוחות ובין הסביבה, דבר שמגדיל את יעילות הקירור, לפי חוק הקירור. אלמלא המאווררים, היה החום במעגלים האלקטרוניים עולה מאד והלוחות היו נשרפים.

המכונית: פתחו גם את מכסה מנוע המכונית. ברוב המכוניות המנוע ממוקם בקדמת המכונית. הדבר מאפשר לאוויר קר לזרום מסביב לחלקי המתכת ולקררם ביעילות. כאשר המכונית עומדת או כאשר טמפרטורת המנוע עולה במהירות, מופעל מאורר המבטיח הפרש טמפרטורות גדול בין המנוע לבין האוויר שסביבו.

פרק 3: תחרות הַבִּידוּד היעיל (פעילות הרחבה)

לסיכום הנושא, וכדי להגביר את ההנאה (וההנעה) בשיעור, מומלץ לסיים עם עזרה נוספת אותה יוכלו התלמידים להגיש לרות המנהלת. פרק זה יכול לשמש כהרחבה לנושא חילופי חום, ובו ניתן להראות שקצב מעבר החום בין גופים אינו תלוי רק בהפרשי הטמפרטורות ביניהם, אלא גם במוליכות חום על-ידי חומרים שונים.

כיוון שרות כל-כך חרדה לטמפרטורה של ספול התה שלה, מומלץ לעזור לה לא רק על-ידי עצה המבוססת על חוק הקירור, אלא גם על-ידי בניית מתקן בידוד לספול התה שלה, כך שגם אם מאורע בלתי צפוי כמו זה שקרה יתרחש שנית, היא תהייה מוגנת ככל הניתן מהתקררות הספול משך שיחת הטלפון.

ערכו תחרות בה הצוות המנצח יהיה זה שייצור מתקן בידוד סביב לספול התה, המאט את קצב התקררותו במידה המרבית.

על התלמידים להתחלק לקבוצות בנות 2-4 תלמידים, לתכנן את המתקן ולבקש מהמורה את הציוד הנדרש.

♦ יש למזוג מים חמים מאד (כמעט רותחים) לספול. יש להקפיד שהפרשי הטמפרטורה ההתחלתיים בין הקבוצות לא יעלו על 2-3 מעלות צלזיוס.

♦ זמן התחרות הוא 10 דקות (משך שיחת הטלפון). על המורה לעבור בין הקבוצות ולמדוד בכל קבוצה את הטמפרטורה בזמן 0 ולאחר 10 דקות. בקשו מהתלמידים להסביר מדוע יש להשתמש במד-טמפרטורה אחד לכל הקבוצות?

♦ תעדו את תוצאות כל הקבוצות על הלוח. בקשו מכל קבוצה להסביר מעט על הדגם שלה והשיקולים לבנייתו, והכריזו על המנצחים (מומלץ לתת למנצחים שוקולד או חבילת בייסקוויטים משובחים....).

יש להדגיש בפני התלמידים שהבידוד אינו סותר את חוק הקירור אותו גילינו. שני ספלים המבודדים באופן זהה יאבדו חום בקצב שונה כתלות בהפרשי הטמפרטורה, ממש כפי המתחייב מחוק הקירור.

פעילות זו מעוררת חיים ומעלה סוגיות רבות ועניין בקרב התלמידים.

סיכום

המטרות הנסתרות – החידה כפיתיון

פעילות זו נוקטת בשיטה דידיקטית מתוככמת. אורח לרגע כי היה צופה בכיתה לא היה חושד בזאת, אך אתם, המורים, והתלמידים פועלים למען מטרות שונות. התלמידים פועלים כדי לפענח חידה מסקרנת ולפתור את הדילמה של מנהלת בעלת הַרְגָּלִים משונים. לעומתם אתם, המורים, מְכוּוֹנִים גבוה הרבה יותר.

פתרון החידה אינו אלא פיתיון. יתרונה של פעילות זו הוא בכך שחידה כה פשוטה מזמנת לתלמידים הזדמנות לא רק לפתור את בעייתה של מנהלת מתוסכלת, אלא גם לגלות חוק טבע בעצמם ולחשוף את התלמידים לאופן בו מדענים מנסחים חוקים מדעיים כלליים. במקביל היא תורמת להעמקת מיומנויות מדעיות וחשיבתיות חשובות.

אם הייתם עומדים לפני הכיתה בתחילת השיעור ומצהירים כי "היום נלמד על תלות קצב מעבר חום בין גופים", סביר מאד שתלמידים רבים היו נותרים אדישים למדי לשמע הצהרה זו, כיוון שמטרה זו כפוייה עליהם ואינה עונה על צורך אמיתי הקיים בהם. הדילמה של המנהלת יוצרת בהם צורך רגשי וקוגניטיבי אמיתי, צורך הקורא למענה ומדרבן אותם לפעילות בעלת רווחים משניים רבים מאד.

המטרות הדידיקטיות הנסתרות שלכם, המורים, תיחשפנה רק בדיון המסכם לאחר הפעילות. בקשו מהתלמידים לנתח את החווייה הרגשית והקוגניטיבית שעברו.

אחת הדילמות בהן מתלבטים מורים לא פעם היא האם לדון עם התלמידים בתהליכי החשיבה שעברו בצורה מילולית ומפורשת (explicitly), או להניח לתהליכים אלה להתרחש במוחם של התלמידים גם מבלי להציפם בחלל הכיתה (implicitly). לדילמה פדגוגית חשובה זאת אין תשובה אחת.

ביחידה זו אנחנו ממליצים לדון בתהליכי החשיבה בצורה מפורשת. הדיון המילולי מערב גם את חוש השמיעה ותורם להטמעת הנושא הנדון במוח האדם. כאשר אדם מודע לתהליך החשיבה שלו עצמו, הוא יהיה מסוגל לבצע העברה (transfer) של התהליך החשיבתי גם לסוגיות מדעיות אחרות ואף לשטחים לא מדעיים, ומכאן חשיבות סוג זה של ניתוח.

מה למדו התלמידים מפעילות זו?

- ברמה הנמוכה ביותר התלמידים פתרו מקרה פרטי של ספול תה חם והאטת התקררותו. זה הישג בעל ערך כשלעצמו.

- ברמה הגבוהה יותר הם למדו את עקרון ההכללה (האינדוקציה) והאופן בו פועלים מדענים בכדי לחוקק חוקים כלליים בטבע.
 - ברמה הגבוהה עוד יותר הם יצרו במוחם תמונה מופשטת של חלקיקים, וכך הבינו שקיים הסדר מיקרוסקופי לחידה ולמצאים אותם גילו.
 - ברמה הגבוהה ביותר הם למדו לחשוב על תהליך החשיבה שהתרחש במוחם הם – מטא-קוגניציה (בתרגום חופשי - מעל המחשבה).
- אם ביקשנו מהם לעצום את עיניהם ולראות חלקיקים מרחפים בחלל ופוגעים זה בזה, נוכל לבקש מהם גם לעצום את עיניהם ולראות בדמיונם את תהליכי החשיבה שלהם עצמם. בשני המקרים תביא חשיבה זו להעצמת יכולת ההפשטה והחשיבה של התלמידים על תהליכים בטבע ועל התהליכים המתרחשים במוחם.

סיכום התהליך המדעי

ראינו בניסוי פשוט זה איך מתמודד איש מדע עם תופעה בלתי מובנת. ראינו את אחד התהליכים האופייניים במדע:

תצפית ← הצעת הסברים אפשריים (השערות) ← ניסוח שאלת מחקר ← בחינת כל הסבר על-ידי ניסוי מתאים ← שלילת חלק מן ההסברים ← קבלת ההסבר היחיד האפשרי (או ההסבר הסביר ביותר) ← ביצוע ניסוי אישוש ← קביעת חוק מדעי ← קביעת האוניברסליות של חוק זה ← ניבוי תופעות נוספות ← יישום החוק בטכנולוגיה.

מנין נובעת ה"אובססיה" של המדע לנסח חוקים כלליים? מדוע לא נוכל להסתפק בתיאור של התופעות הנצפות בטבע? מדוע מייחסים המדענים חשיבות כה רבה להבנת הגורמים לתופעות הטבע?

התשובה נמצאת ממש תחת עינינו - ברגע שחוק מדעי שניסחנו אושש, נוכל להבין לא רק את התצפית שהובילה אותנו לניסוח החוק, אלא גם להבין תופעות רבות אחרות מתחומים שונים ואף לעשות בחוק זה שימוש לתועלת האדם.

יהיה זה יומרני לצפות לכך שתלמידים צעירים יגלו חוקי מדע חדשים. אך מטרתנו, מורי המדע, היא לגרום לתלמידים לגלות חוקי טבע חדשים עבורם. הנה כך יחוו התלמידים כי חוקי הטבע נקבעים לא רק על-ידי מדענים בחלוקים לבנים הפועלים בעולם זר ומרוחק. תהליך גילוי זה יניב גמול קוגניטיבי ורגשי רב-עוצמה, וכל זה בסדרת ניסויים פשוטים וקצרים.

נספח: רשימת ציוד וחומרים

לכיתה

- חלב קר (יש להקפיד לשמור במקרר כל משך הניסוי)
- 3 קומקומים להרתחת מים
- גוש גדול של פלסטלינה (כפול מגודל כף יד)
- קוביות קרח - כמות גדולה (בחירה)
- 2 אמבטי מים, אחד מהם בעל וויסות חום (בחירה)

לכל צוות

- 4 כוסות כימיות של 200 או 400 מ"ל (יש להשתמש בכוסות עשויות זכוכית שהן בעלות מוליכות חום גבוהה. אין להשתמש בכוסות חד-פעמיות, כיוון שמוליכות החום שלהם היא נמוכה)
- 4 מדי-טמפרטורה
- 3 כלי זכוכית בעלי נפח גדול, בתוכם ניתן לטבול את ספלי התה
- 3 פרוסות עוגה (בחירה) (או קמח לעשיית בצק)
- כל פריט ציוד אותו יבקש הצוות