



אנרגיה חום ועבודה

או



התחלה תהליך וסוף

ד"ר יהודה רוט

הקדמה

סדרת המאמרים נכתבה על-ידי סטודנטים הלומדים לקראת תואר שני בתכנית להוראת המדעים לבית הספר העל יסודי (M.Ed.) במסגרת הקורס "לימוד אלטרנטיבי של תורת החום". בעבודתנו המשותפת בדקנו האם לימוד נושאים בפיזיקה דרך פרספקטיבה של מושגים אוניברסליים, יכול להקל על תהליך הלמידה וההפנמה של מושגים בפיזיקה. באסופת המאמרים הנוכחית אנו מראים כיצד ניתן ליישם את המושגים 'התחלה' 'סוף' ו'תהליך' בלימוד הנושאים אנרגיות, עבודה וחום.

רציונל ומבנה אסופת המאמרים

בעבודה זו אנו משתמשים במושגים האוניברסליים 'התחלה' 'תהליך' ו'סוף'. הסבר קצר על המושגים מוצג בקצרה בסעיף זה. להמחשת מושגים אלו מחוץ לגבולות הפיזיקה, אנו מצרפים מאמר של פרופסור משה יצחקי, דיקן הפקולטה ללימודים מתקדמים, משורר ומתרגם, בו הוא מעלה ספקות לגבי מידת ההבנה של המושגים הללו בהקשרים רחבים. גם ממאמרו של פרופסור יצחקי, אנו למדים על הקושי בהבנת והפנמת המושג "תהליך" ובהקשר של המושגים בפיזיקה, אנו תוהים, אולי הקושי בהבנת מושג החום קשור למהותו כתהליך. במאמר השני נביא ציטוט של לורד אדינגטון המסביר את חשיבות התרמודינמיקה בפיזיקה. בתמצית, ניתן לקבוע במידה רבה של ודאות, שהתרמודימיקה, ובמיוחד החוק השני שלה, אינם ניתנים להפרכה.

למרות חשיבותה הרבה בלימוד מושג האנרגיה ושימורה, אנו מתעלמים מתורת החום. המושג 'נצילות', לדוגמה, לא מוזכר בלימודי האנרגיה וכך אנו מוכיחים שאם נשמור על אותה המהירות, כמות האנרגיה הנדרשת לטפס על הר תהיה זהה ללא קשר למסלול בו נעפיל לפסגה. כל מי שטיפס על הר בוודאי חש אחרת. הרבה יותר קשה לטפס על הר תלול מאשר לנוע לאורך דרך ארוכה אך מתונה. אמנם מושגים כמו 'חש' ו'קשה' אינם מושגים הלקוחים מתחום הפיזיקה, אך ללא ספק יש להם משמעות עמוקה בתפיסתנו את המציאות.

ההתעלמות מתורת החום, אולי התורה המבוססת ביותר בפיזיקה, יכולה להוליך למסקנה שלימוד האנרגיה לוקה בחסר. ולכן, בהמשכו של המאמר השני, נציג את גישת הלימון המסבירה את הכורח שבהתעלמות מתורת החום, וזאת במטרה "לזקק" את מושגי ה'עבודה' ו'האנרגיה'.

גם כאשר אנו נאלצים לשאול את המושג 'חום' לצרכי המכניקה ה"מזוקקת" כמו במצבים בהם יש חיכוך, או בהתנגשויות לא אלסטיות, לעתים אנו נכשלים בהבנת המהות האמיתית של המושגים התרמודינמיים. כמו למשל, הקביעה השגויה שחום הוא עוד סוג של אנרגיה.

במאמרים הבאים אנו מסבירים מהם 'עבודה' ו'חום' דרך המראה של המושגים 'התחלה' ו'תהליך' ו'סוף'. את משמעות המושג 'חום' אנו מסבירים דרך דוגמאות של שינוי מצבי צבירה, הולכת חום, תנועה של גוף תחת חיכוך והתנגשויות.

לסיכום אנו מציגים את נקודת מבטו של מורה לתורת המכונות אשר עליו ללמד מושגים כמו 'אנרגיה' 'עבודה' ו'חום' לתלמידים שאינם פיזיקאים. בהטמעה של המושגים 'התחלה' 'סוף' ו'תהליך', אנו מקווים לסייע בהבנה טובה יותר של המושגים.

התחלה, תהליך, סוף

'תהליך' מבטא מעבר מהתחלה לסוף. לעתים איננו יודעים מהו התהליך שגרם לשינוי ולעתים אנו מייחסים חשיבות רק למצב ההתחלתי ולמצב הסופי. לדוגמה, אם יצאנו מהבית והגענו למגרש משחקים, מובן שההתחלה הייתה בבית והסוף במגרש המשחקים. אולם, על מנת להגיע למגרש המשחקים היה עלינו לנוע בין הבית למגרש. האם המעבר היה בהליכה, האם הלכנו בדרכים שונות או אולי נסענו ברכב? כל אלו אינם משנים את מצבי הקיצון אבל הם מתארים את התהליך בו הגענו מהבית אל המגרש. בעוד הבית ומגרש המשחקים מתארים מקומות, צורת ההגעה היא תיאור של תהליך.

ייתכן והעמימות בהגדרת התהליך היא הסיבה לכך שקיים בלבול בין התהליך עצמו למצבי ההתחלה והסוף. לעתים אנו ממעיטים בערכו של התהליך ומתמקדים בהתחלה ובסוף בלבד. בלבול זה קיים באופן בולט בתחום הידע של 'עבודה', 'אנרגיה' ו'חום'. אנו מקווים שבסופו של תהליך קריאת המאמרים תקבלו נקודת ראות שונה וברורה יותר על המושגים הללו.

משל קטן ופרח לילה לבן

על הקושי בהבנת המושג והמהות "תהליך" ועל הרווח שבאי הבנתו

בבואי להתמודד עם המושג 'תהליך', מושג שהפיזיקאי, (יהודה רוט), חושד בו כקשה לתפיסה ולכן תולה בו את האשמה לבלבול שבין המושגים 'עבודה', 'חוס' ו'אנרגיה', אני תוהה ביני לביני אם המונח 'התחלה' ו'סוף' נהירים דיים.

באחד הפרדוקסים הידועים של זנון, פרדוקסים העוסקים בתנועה, בזמן ובמרחב, ובעיקר בשאלת האינסופיות שלהם, מוצג פרדוקס הדיכוטומיה או פרדוקס האצטדיון. בפרדוקס זה מוצגת בעיה שבה אדם רוצה לנוע ממקום למקום, כלומר לעבור מנקודת יציאה/התחלה לנקודת יעד, ולעולם לא יוכל להגיע למטרתו. הסיבה לכך, לטענת זנון, היא כי לפני שיגיע לנקודת היעד, הוא חייב להגיע לאמצע הדרך שבין נקודת היציאה לבין נקודת היעד. על מנת להגיע לאמצע הדרך, חייב אדם זה להגיע לאמצע הדרך שבין נקודת היציאה לאמצע הדרך וכן הלאה. מאחר ונקודת ההתחלה, כלומר נקודת האפס היא אינסופית, האדם לעולם לא יוכל לזוז ממקומו, כי כדי להגיע לנקודה הראשונה במסעו הוא חייב לעבור אינסוף נקודות. חכם זן ששמע את הפרדוקס, אמר: "תפסיקו לבלבל את המוח, פשוט תתחילו ללכת". איני נכנס כרגע לפתרון הפרדוקס, אלא ללמוד ממנו ומדברי החכם משהו על ההתרחשות הנקראת 'תהליך'.

המילה 'תהליך' קשורה לפעולת ההליכה. על-פי מילון אבן שושן משמעותה היא השתלשלות, התפתחות מדורגת, כלל הפעולות המבוצעות לפי סדר נתון, מערכת השלבים המולוכיים ממצב אחד למשנהו. מכאן אני למד שתהליך קשור בתנועה. אני לוקח לעצמי את החירות ללוש, לפרק ולהרכיב את המילה: האות ת' היא התנועה הנוצרת בהליך. מאחר ומדובר במצב שאינו סטטי הנתון לשינוי מתמיד ומאחר וכדברי הרקליטוס: "לא ניתן להיכנס לאותו נהר פעמיים", משום שהנהר נמצא כל הזמן בהשתנות, קיים קושי להגדיר ולקבע את התנועה לתוך מושג, תבנית מילולית שהיא תמיד מוגבלת ביחס למציאות, להוויה או לחוויה. קושי גדול עוד יותר הוא להבין את התהליך מתוכו. הניסיון להבין, או להמשיג את התהליך, מחייב נקודת תצפית חיצונית ופנימית מהן ניתן אולי ללמוד הלכות, חוקים, משמעויות. אם תהליך קשור להליכה, הרי שמושג נוסף הנדרש לצורך פענוחו והבנתו הוא 'דרך'.

ב"מחברות האוקטבו" כותב קפקא: "יש מטרה, אין דרך; מה שאנחנו קוראים לו דרך אינו אלא היסוס".¹ ומדוע דרך היא היסוס? בין היתר, כי אין כמעט אפשרות לצפות אותה, בגלל שכל פרט, תנועה, שינוי או מכשול משנה את הדרך, או את המתרחש בה. בשפת הספרות מצב זה נקרא 'סיבוך'. נהוג לחלק את מבנה הסיפור הקצר לשלושה או ארבעה שלבים: פתיחה – אקספוזיציה; סיבוך; שיא; התרה – סיום הסיפור. בנקודת הפתיחה ניתנים תיאורי הזמן, המקום, הדמויות ונתוני פתיחה הכרחיים להתפתחות שתבוא בהמשך. השלב הבא הוא סיבוך שיש בו קונפליקט, התנגשות, מורכבות מסוגים שונים, ולבסוף מגיעה ההתרה – הפתרון, לעתים פתרון סגור ולעתים פתוח. למעשה, מרגע הפתיחה מתרחש תהליך שיש בו סיבוך המגיע להתרתו בנקודת הסיום.

¹ פרנץ קפקא, 1998, מחברות האוקטבו. תרגם שמעון זנדבנק. תל-אביב: עם עובד. עמ' 40.

בספרות אין הכרח לרצף כרונולוגי של התהליך. נהפוך הוא, ככל שהרצף הכרונולוגי משתנה, היינו שסיפור יכול להתחיל מן הסוף וכל התהליך מתקדם לאחור, מתיר ומבהיר בסיום את נקודת ההתחלה שהיא הסוף, כך הסיפור נעשה מעניין ומאתגר. אני מעז לומר כי עיקרון זה של תהליך שבו יכולים להשתבש מרבית הקונטרות - קווי המתאר של הסיפור, הוא בין הסיבות שקשה לקבע בתוך חוק סגור, סופי ומוגמר את התהליך. במילים אחרות, נכון יהיה לומר כי קשה לקבוע אפריורית הלכה, על התהליך.

ומשפט אחד על הממד המטפיזי או המיסטי: אם נחזור לרגע לזנון ואינסופיות הזמן והמקום, ניתן לומר כי האינסוף, (אחד מכינויי האל במיסטיקה) המגולם בספרה 0 (אפס), שהיא גם נקודת ההתחלה, הסוף והאינסוף, לא יכול להתקיים בה תהליך. האלוהות, בהיותה שלמה ומושלמת אין בה תהליך, כי אין בה חסר או רצון. מכאן אפשר ללמוד שתהליך הוא התנועה הנוצרת מתוך הנטייה של הגוף החסר השואף לעבר שלמותו. סביר להניח כי תיאור זה לא יניח את דעתו של הפיזיקאי ועל כן עליי למצוא דרך אחרת להסביר את הקשה להסבר.

בפרגמנט "משל קטן" של הסופר פרנץ קפקא כתוב: "'אחה' אמר העכבר, 'מיום ליום הולך העולם וצר. תחילה היה רחב עד להפיל אימה, רצתי הלאה ומה שמחתי כשראיתי לבסוף מרחוק חומות מימין ומשמאל, אך חומות ארוכות אלו אצות כל כך להתחבר זו עם זו, עד שהנה כבר הגעתי לחדר האחרון, ושם בפניה עומדת המלכודת, ולתוכה אני רץ.' 'אינך צריך אלא לשנות את הכיוון', אמר החתול ובלעו".²

אם נתבונן היטב בפרגמנט, ניווכח כי העכבר אינו מודע לתהליך בדרך אותה הוא עובר מתוך חוסר מודעות. יותר מכך. העכבר, שיכול להיות משל למצבו של האדם המודרני, אינו מודע למשמעויות האירועים, הפעולות והדרך אותה הוא עובר כאחוז אמוק, אלא רק כאשר הוא מגיע אל נקודת הסיום של ריצתו, במקרה זה רגע לפני בליעתו על-ידי החתול. ניתן לומר כי רק מתוך פרספקטיבה ומבט לאחור, יכול היה העכבר להבין מה קרה לו, מה הניע אותו ומה השפיע עליו. למרבה הצער, רגע התודעה, או ההארה המגולם בקריאה "אחה", רגע לפני שהוא נבלע.

העכבר אינו יכול להבין את הדרך, משום שהוא נמצא בתוכה והוא כל הזמן משתנה בה. מצב שבו יש תנועה מתמדת, שחלים בו שינויים שמושפעים על-ידי גורמים שונים שאין לנו שליטה עליהם יוצרים את ההתרחשות שלעתים רבות לא ניתן לצפות כיצד תתפתח. מכאן אני מסיק כי תהליך הוא תמיד אירוע שיש בו מידה רבה של אי-ודאות ולכן גם קשה לתפיסה בחשיבה הלוגית, הקווית.

מושג נוסף שבאמצעותו ניתן להבין יותר את ההתרחשות הנקראת תהליך הוא 'הפרדוקס'. במקרה של העכבר: מרחב ללא גבולות או חופש ללא גבול מייצר תעוקה. הגבולות בדמות החומות, מייצרות באופן פרדוקסלי תחושת חופש המתבטאת בשמחה. תאוצה אינה בהכרח הימלטות אלא קירוב הקץ. אימוץ החשיבה הפרדוקסלית יכול לתת הסבר להתרחשויות בתהליך שאין להם הסבר לוגי.

בפרגמנט אחר שלו פותח קפקא במשפט: "נקלעתי לתוך סבך בלתי חדיר". זהו משפט פרדוקסלי ולא ניתן להבין אותו בחשיבה תבניתית לוגית. אולם אם נתבונן היטב נבחין כי המילה הראשונה

² פרנץ קפקא, 1974, **תיאור של מאבק**, תרגם שמעון זנדבנק, ירושלים: שוקן. עמ' 97.

במשפט היא לא "נכנסתי", שהיא פעולה אקטיבית מודעת, אלא "נקלעתי", מילה המורה על פסיביות וחוסר התכוונות או תכנון. במצב זה מתרחש תהליך בו הגוף מתגבר על הבלתי אפשרי לכאורה.

במצב בו משוחרר החומר ממגבלותיו, עשוי להתחולל תהליך המוליך אל תוצאה בלתי צפויה, אל פרדיגמה, תופעה או גילוי חדש. אלה מקשים אמנם על הסבר מניח את הדעת לשאלה מהו תהליך, אך מאידך הדבר בעצמו מוליך אותנו אל תובנות חדשות דווקא בגלל אי מוגדרותו.

אי מוגדרות או פער או הזרה - דאוטומטיזציה בספרות, יוצרים הפרעה חמורה בתהליך הקריאה. הפרעה זו מאלצת את הקורא להשלים פערים, לגשר על מה שנפער. אי אפשר להבין תוצאה או סיום בלי להבין מה אירע בתהליך, וזה מזמין את הקורא, המתבונן או החוקר לתת פתרונות או הגדרות ולו זמניים למציאות אליה נחשף.

לצורך המחשת האתגר בהבנת המושג והמהות הקרויים תהליך אציג תופעה מתחום הבוטניקה. במשך למעלה משבע שנים אני עוקב אחר פרח הנקרא בלשון עממית: "מלכת הלילה" ובלשון בוטנית *Hiluceriis Undatus*, השייך למשפחת הקקטוסים. הפרח פורח פעם אחת בשנה, בדרך כלל בחודש ספטמבר או אוקטובר, למשך לילה אחד. תחילתו בניצן קטן ההולך ומתמלא במשך כשלושה שבועות לערך עד ליל הפריחה. באותו לילה גורלי, הפרח סגור בתוך עלי כותרת בצורת גליל קוני באורך של 8-12 ס"מ ובקוטר של כ-3-5 ס"מ, נפוח להתפקע. במשך כחודש נאגרת בפרח זה אנרגיה אדירה שגורמת לו בשעה כמעט קבועה להתחיל להיפתח. פתיחתו מתחילה עם רדת החשיכה ובשעת חצות לערך, הפרח מגיע לשיא פריחתו כגודל כף יד פתוחה. צבע הפרח לבן בוהק, איברי המין הפנימיים שלו נפוחים ובולטים וריחו ריח בושם עז. סמוך לשעה שתיים אחר חצות הוא מתחיל להיסגר ובבוקר הוא שמוט ונבול.

לכאורה ניתן להצביע על נקודת ההתחלה והסיום של הפרח. ניתן להסביר באופן מניח את הדעת מה מטרת התהליך. כמו כל צומח וחי, המטרה היא רבייה, הישרדות והמשכיות. ניתן אפילו להסביר את פריחתו הלילית בניגוד ליצר הישרדותי שבו השאיפה היא להיראות, למשוך תשומת לב, לפתות. ההנחה היא כי צבעו הלבן, גודלו וניחוחו יש בהם כדי למשוך את המאביק הלילי שלו. אולם גם אחרי שנים של מעקב, תעלומת הפרח גדולה יותר מהיכולת שלי לפענח את מוזרותו. גם בוטנאים מקצוענים לא מצליחים להסביר חלק מנפלאותיו.

כל שנה אני מלווה במשך לילה שלם את התהליך, מפריחה עד נבילה, בציפייה לראות מי הוא חתנה של כלת לילה יפהפייה וטרגית זו. בכל פעם אני מתאכזב לגלות שיפהפייה לבנה וריחנית זו פורחת לשווא. בוטנאים מסבירים את התופעה בכך שצמח זה אינו מקומי, אלא מיובא. במקום מוצאו בדרום אמריקה, יש לו מאביק, אך חתן זה לא "עשה עלייה" כמו כלתו.



לאחר כל החקירות וההסברים לתופעה המרתקת, אין איש שיכול להסביר את הסיבה למה מלכת לילה זו פורחת רק לילה אחד. קשה למצוא את ההסבר לפער בין האנרגיה הנוצרת בתהליך הצמיחה לבין העובדה שאנרגיה עצומה זו מתפרקת בלילה אחד בניגוד לכל היגיון הישרדותי.

חידת הפרח ואי ההיגיון ביחס שבין התהליך לנקודת סיומו הנראית וסימני השאלה הרבים, פרי הפרדוקסליות הקיומית, האבסורדית של הפרח, הולוכה אותי לשאלות קיומיות, פילוסופיות, על אסתטיקה ויופי שאין להם תכלית הישרדותית. שאלת פשר וטעם הקיום ועוד. מכאן הדרך לכתבת שיר הייתה קצרה. תכליתו של פרח זה לא פתורה עדיין, אך הוא יצר אצל המתבונן בו תהליך של חקר, גילוי, יצירה. הנה התכלית שבשבילה החיים כדאיים.

אולי המושג 'תהליך' לא הובהר כל צרכו, אך המסע והדרך היו מרתקים ואין זה דבר של מה בכך.



הפרח הלבן

השמש זרח, גם השנה הוא לא הגיע.
זה שבשבילו נשף הלילה פריחתו הלבנה.

הפרח הלבן לא עושה מזה עניין
שליל פריחתו יהיה גם ליל מותו.
בערב כוכב, חופתו הלבנה,
בבוקר תכריכיו.

אילו ידעה שתפרח רק לילה אחד בשנה,
לא הייתה טורחת כל כך, ואולי דווקא משום כך.
הפרח הלבן לא עושה מזה עניין...
בין אם יראו אותה, ובין אם איש לא יזכה להגיע.
הלילה הזה יהיה חתנה.

לקראתו לבנה, היא נפתחת כלה.
זורחת בליל חופתה.

הפרח הלבן לא עושה מזה עניין...

<https://www.youtube.com/watch?v=POhQsBAqMnc>

מרינה זטולוקין וברכה שינדלר

אידיאליזציית הלימון בהוראת פיזיקה

"If someone points out to you that your theory of the universe is in disagreement with Maxwell's equation-then so much the worse for Maxwell's equations. But if your theory is found to be against the second law of thermodynamics I can give you no hope; there is nothing for it but to collapse in deepest humiliation!"

Sir Arthur Stanley Eddington

<http://www.azquotes.com/quote/584830>

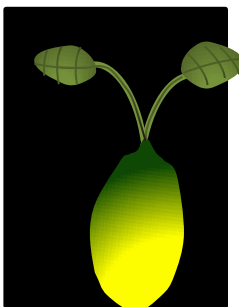
בתרגום חופשי:

והיה אם פלוני יצביע על סתירות בין תורתך החדשה למשוואות מקסוול,³ אבוי למשוואות מקסוול! אולם, והיה ונמצא ותורתך ניצבת בסתירה לחוק השני של התרמודינמיקה, בצער רב עלי לבשר לך, אין בידי לסייע בידך הפעם, דינך להידרדר לתהומות של השפלה עמוקה וכואבת.

ואמנם, מקובל לחשוב שהתרמודינמיקה עומדת כסלע איתן מול כל המהפכות המדעיות שקרו ויקרו בעתיד. הסיבה לכך נובעת מהאמונה שהתרמודינמיקה, בניגוד לתורות מופשטות אחרות, מתארת את החיים כהווייתם. אין מכוונות מושלמות, יש איבודי אנרגיה לחום ועוד.

בלימודי הפיזיקה בחטיבה העליונה דנים רבות בנושא של חוק שימור האנרגיה כאשר את הדיון באנרגיה מתחילים שנים קודם בחטיבת הביניים. לעומת זאת, לנושא חשוב כמו התרמודינמיקה אנו משקיעים שעות מועטות, אם בכלל. הכיצד? בתוך המכלול המורכב של התופעות הפיזיקליות איתן אנו נפגשים בכיתה, הזנחה או התעלמות ממושגים חשובים מאפשרת להתמקד בנושאים ורעיונות מופשטים כפי שנמחיש בגישת הלימון.

אידיאליזציית הלימון



התבוננו בלימון משמאל. מה צבעו? ובכן צבעו של הלימון צהוב אבל אפילו במבט שטחי נבחין גם בצבע ירוק ואולי גם בכמה פגמים שחורים. ובכן על מנת להגדיר את צבעו של הלימון אנו מתייחסים אליו כמושלם. המשפט, "הלימון צהוב" הוא אידיאליזציה של המציאות. אפשר ללמוד רבות על הלימון לפי צבעו. האם הוא בוסר, האם הוא רקוב? ובכן, בבואנו להציג את פרי הלימון, אנחנו מתעלמים מכל הפרטים הללו, חשובים ככל שיהיו, ומציגים לימון אידיאלי. מבחינה חשיבתית, אידיאליזציה מסייעת בידינו לפשט מושגים מורכבים או להקל את ההבנה של תהליכים מורכבים.

³ משוואות מקסוול הן סדרה של ארבע משוואות המתארות כיצד שדה מגנטי ושדה חשמלי יוצרים את הקרינה האלקטרומגנטית, דהיינו, את האור.

פיזיקאים מאמינים בקיומו של מצב אידיאלי וחושבים שנטרול יתר הגורמים המפריעים לאידיאליזציה זאת בעיה "טכנית-טכנולוגית" גרידא. גם בחשיבה העממית, לימון אידיאלי יהיה בצבע צהוב אחיד וצורה מושלמת.

בהוראת לימודי הפיזיקה, חלק מהקשיים של התלמידים שייכים להבנת תהליכים ותופעות מורכבים מבחינה פיזיקלית ומבחינה מתמטית. אחת ממטרותיו של המורה היא לפשט את המקרה המורכב כך שיהיה נגיש לתלמידים. לדוגמה, הגדרת גופים כנקודתיים, שזה אחד הכלים העיקריים שלנו בהוראת המכניקה.



לדוגמה, אנו מסבירים לתלמידים שאם נשמור על אותה המהירות, כמות האנרגיה הנדרשת לטפס על הר תהיה זהה ללא קשר למסלול בו נעפיל לפסגה.

עובדה זו מנוגדת לאינטואיציה. אנו זוכרים שקשה יותר לטפס במדרון תלול מאשר במדרון מתון. מה זה אומר וכיצד זה קשור למושג האנרגיה המכנית שנלמד בכיתה? ובכן, במדרון תלול, מרבית האנרגיה הכימית המופקת בגוף שלנו הופכת לאנרגיה מכנית בעוד במדרון מתון, אנו מפיקים כמות רבה יותר של חום.

העבודה כתהליך בין אנרגיה התחלתית לאנרגיה סופית

את מושג העבודה נציג באמצעות צריכת הדלק של רכב המטפס לפסגתו של הר. העבודה היא גודל המייצג את התהליך בו עוברים בין שתי נקודות תחת השפעת כוח. לדוגמה, רכב הנע במעלה כביש משופע.

נתבונן ברכב החונה במדרון משופע. על הרכב פועל חיכוך בין הצמיגים שלו לכביש. כוח זה מאזן את רכיב כוח הכובד המושך אותו מטה כך שהרכב נשאר במנוחה. במקרה זה אין תהליך שיביא אותו מנקודה אחת לאחרת ולכן אין צריכת דלק.



עצור! אידיאליזציה

ייתכן מצב בו הרכב אמנם במנוחה אך עם מנוע פועל. במקרה זה הרכב צורך דלק רק כתוצאה מתנועת חלקי המנוע השונים. באידיאליזציה שלנו מתעלמים מתהליך שכזה.

נניח כעת שהרכב נע במעלה המדרון. רכב אינו סתם עולה מעצמו במעלה המדרון, לשם כך יש מנוע המבצע את התהליך. יתרה מזאת. כמות הדלק הדרושה לטיפוס מספקת לנו מדד כמותי לתיאור התהליך.

במצב האידיאלי שלנו, צריכת הדלק תלויה בכך שהרכב ישנה את מקומו במעלה המדרון. ובאופן כללי, אנרגיות מוגדרות בנקודה, העבודה היא תהליך המעביר מאנרגיה אחת לשנייה. עבודה אינה התהליך היחיד המעביר בין אנרגיות, גם חום הוא תהליך המשנה אנרגיות.

החום כתהליך המגדיל את אי הסדר – שינוי מצב צבירה

במאמר זה נדגים את מהות המושגים הקשורים למושג חום דרך השינוי במצב צבירה. כמובן שנישאר במסגרת המושגים 'התחלה', 'תהליך' ו'סוף'. בהתכת חומר ממוצק לנוזל, המצב ההתחלתי הוא כמובן מוצק והמצב הסופי - נוזל. מהו התהליך? נבחן את התהליכים באופן מיקרוסקופי. בשני המצבים קיימים קשרים אנרגטיים בין המולקולות (או האטומים) ואנרגיות קינטיות המפולגות בצורה אקראית. ממוצע האנרגיות הללו מכונה אנרגיה פנימית. במוצק, הקשרים בין המולקולות (או אטומים) חזקים יותר והמהירויות הממוצעות נמוכות יותר ביחס לנוזל. כלומר, שינוי מצב הצבירה מבוטא באמצעות שינוי באנרגיה הפנימית!

בנוסף, בעוד מרבית המוצקים מתוארים כבעלי מבנה מסודר בהם המולקולות רק מתנדנדות מסביב לנקודות שיווי משקל, הרי הנוזל מתואר כמצב הרבה פחות מסודר. לכן ניתן לתאר את התופעות של 'התחלה' ו'סוף' בכמה צורות:

התחלה	סוף
מוצק	נוזל
אנרגיה פנימית נמוכה	אנרגיה פנימית גבוהה
סדר גבוה	סדר נמוך

במאמר הקודם הסברנו שהתהליך המעביר בין שני מצבי אנרגיה הוא העבודה. כאן התהליך הוא חום. אם כן, מהו ההבדל שבין תהליך העבודה לתהליך החום? כפי שרואים מהטבלה, תהליך החום לא רק משנה את המצב האנרגטי, הוא גם משנה את הסדר בתוך המערכת. תהליך החום מגדיל את אי הסדר.

וכמה הערות לסיום:

- המצב המתאר את הסדר מכונה אנטרופיה.
- בתיאור סטטיסטי, תהליך החימום משנה את פילוג האנרגיות במערכת במגמה להגדיל את חוסר הוודאות.

הולכת חום ותפיסות שגויות

הולכת חום היא דוגמה נוספת הממחישה את מושג החום כתהליך.

נתאר לנו מצב בו יש לנו מוט מתכת מבודד המחומם בקצהו האחד, בעוד קצהו השני מרוחק מהאש. בשלב מסוים מפסיקים את החימום. כעת נתבונן רק בתהליכים המתרחשים בתום החימום.

בתיאור מיקרוסקופי ניתן לתאר את הצד החם כתנודה מהירה ואקראית של המולקולות של החומר לעומת מצב מתון יותר בצדו השני החם פחות.

במילים אחרות, האנרגיה הפנימית בצדו החם של המוט רבה יותר מאשר בצד השני. ולכן ניתן לתאר את מעבר החום כתהליך הגורם למעבר נרגיה. מאנרגיה פנימית גבוהה לאנרגיה פנימית נמוכה. מכיוון שתהליך זה הוא מעבר חום ולא תהליך של עבודה, מעבר החום מגדיל את אי הסדר במוט. תהליך מהסוג שתואר מכונה דיפוזיה (פעפוע), והוא יוסבר במאמר הבא.

סוגי תנועה בפיזיקה – הרחבה לתהליך של הולכת חום

במגוון צורות ההתקדמות בפיזיקה, אנו מבחינים בשני סוגים המנוגדים במהותם:

1. תנועה של גל: תנועה זו מאופיינת כהפרעה המתקדמת בתווך ללא התקדמות של חומר. בגלים, ובמיוחד בגלים ללא נפיצה,⁴ התנועה מסודרת. לדוגמה, הגל במיתר המתואר באיור, שומר על צורתו. זאת הסיבה שניתן להעביר מידע באמצעות גלים.

2. דיפוזיה (פעפוע): דיפוזיה היא תנועה של חלקיקים מריכוז גבוה לריכוז נמוך. במעבר חום, האזור החם מאופיין באנרגיה פנימית גבוהה של חלקיקי החומר, במילים פשוטות, תנודות מהירות. לעומת זאת האזור הקר יחסית מאופיין באנרגיה פנימית קטנה יותר. בתהליך הדיפוזיה, יש זרימת אנרגיה מהאזור הגבוה מבחינה אנרגטית לאזור עם אנרגיה נמוכה עד שהאנרגיות משתוות.

בשני המקרים, בדיפוזיית חלקיקים או דיפוזיית אנרגיה, התהליך מתרחש רק עקב תנועה או תנודה אקראית של החלקיקים. בסוף התהליך, אי הסדר בכל המערכת גדל.

ואמנם, כאשר משדרים גל קול בתווך כמו האוויר, כאשר גל החום נאבד והופך לחום, מתרחש תהליך של הפיכת התנועה הגלית המסודרת לתנועה אקראית של דיפוזיה.

⁴ בגל ללא נפיצה, מהירות הגל תלויה רק בסוג התווך ולא בתכונות הגל עצמו. לדוגמה, בגל מחזורי התדירות, אורך הגל והמשרעת אינם משפיעים על המהירות. בצורה פשטנית יותר ניתן לקבוע שגל ללא דספרסיה שומר על צורתו המקורית.

עבודת כוח החיכוך

במאמר יידון נושא עבודת כוח החיכוך המתחבר לגישה של הלימון' והוא עוסק בהגדרה של מושג העבודה והחום כהליך. רוב המורים נוטים ללמד את הנושא מבלי להתייחס בצורה ברורה ומופשטת לעבודה כאל תהליך, ומבלי לתת משמעות לשינוי באנרגיה הפנימית של הגוף מההתחלה לסוף, תוך מתן שמות למושגים לא נכונים כמו 'אנרגיית חום' במקום ללמד את נושא החום כהליך ולקשר אותו לנושא של עבודה.

ההבנה של כוח החיכוך הקינטי בהקשר של עקרון שימור האנרגיה מחולל תפיסה שגויה מהותית. לדוגמה, גוף הנע על משטח סטטי עם חיכוך, מקטין את האנרגיה הקינטית שלו ומעקרון שימור האנרגיה, אובדן האנרגיה חייב לעבור המרה ולהופיע בצורת אנרגיה אחרת. חוסר הידע בתחום התרמודינמיקה מוביל לתפיסה אינטואיטיבית של המושג השגוי - אנרגיית חום.

נסתכן ונאמר, שפשוט יותר לקבל את מושגי האנרגיה כי אלה מושגים הקשורים להתחלה וסוף. אבל מושגי ה'תהליך', ובפרט המושגים 'עבודה' או 'חום', קשים יותר להבנה. זאת אולי הסיבה להפנמת המושג המוטעה 'אנרגיית חום'. בנוסף, עלייה בטמפרטורה היא משהו מורגש ומוחשי המשוך לחום, ולכן הפתרון הפשוט לשאלה למה הותמרה האנרגיה הקינטית הוא התשובה השגויה - לאנרגיה אחרת - אנרגיית החום. בעקבות הפנמת הפתרון השגוי, התלמידים מתעמקים במתמטיקה ובהצבה בנוסחאות שגויות, זאת במקום להבין לעומק את המושגים הפיזיקליים ולהפנים אותם בצורה הנכונה.

על מנת ללמד את הנושא בדרך הנכונה, עלינו לשנות את גישתנו המתבססת על התעלמות מהמושג 'אנרגיה פנימית של גוף', ולאמץ את השימוש במושגים אוניברסליים שנעשה בהם שימוש בחיי היום כמו 'התחלה', 'תהליך' ו'סוף' ולקשר בינם לבין המושגים הפיזיקליים בצורה כללית: 'אנרגיה התחלתית', 'עבודה' או 'חום', 'אנרגיה סופית'.

גישה זו מקלה מאוד על התלמידים להבין את מושג 'עבודת כוח החיכוך' כהליך המשנה את האנרגיה הפנימית של הגוף ממצב התחלתי למצב סופי, ולקשר אותו להגדרה של חום שהוא בעצם התהליך הגורם לשינוי באנרגיה הפנימית.

כאשר גוף נע על משטח מחוספס, המגע בין הגוף הנע למולקולות של פני החומר, גורם לחלקיקי החומר לנוע. תנועה זו משויכת לאנרגיה הפנימית של החומר. תנועת חלקיקי החומר הנוצרת כתוצאה מהמגע היא תנועה אקראית ולכן ניתן לקבוע שמעבר האנרגיה בין הגוף הנע למשטח המחוספס נעשה באמצעות התהליך של מעבר חום.

ראו בקישור סימולציה הממחישה את התהליך המקרוסקופי המתרחש בין הגופים המתחככים ואת השינוי באנרגיה הפנימית של הגופים כתוצאה מהחיכוך.

https://phet.colorado.edu/sims/html/friction/latest/friction_en.html

שימור ואיבוד אנרגיה מכנית בהתנגשויות

'התחלה', 'התהליך' ו'סוף' מתחברים בצורה יוצאת מן הכלל לנושא של 'תנע ומתקף' וכמובן להתנגשות בין שני מוצקים שיכולה להתרחש בטבע.

מניסיוני כמורה, אני יכול לקבוע בוודאות שהתלמידים מאוד מתחברים לתנע ההתחלתי ולסופי, אך במידה מסוימת מתקשים להבין את מושג 'המתקף' המייצג את התהליך.

בספרי לימוד רבים מושם דגש יותר על המצב הקיים לפני ההתנגשות ואחריה, מכיוון שיותר קל למדוד את המהירויות של המצבים האלה. פחות דגש מושם על מה שמתרחש תוך כדי ההתנגשות עצמה שבה שינוי המהירות הוא די גדול וקשה למדידה. עובדות אלו מחזקות את ההנחה שמושגי 'התהליך' קשים יותר להפנמה לעומת המושגים של 'התחלה' ו'סוף'.

נתחיל עם התנגשות אלסטית. מודל לסוג התנגשות כזה הוא שני גופים, שמשטחי המגע ביניהם מתנהגים כמו מתנד הרמוני (קפיץ). במהלך ההתנגשות הקפיצים מתכווצים ובתום ההתנגשות הם חוזרים למצבם הרפוי ההתחלתי. עבודת הקפיצים במהלך ההתנגשות היא התהליך הגורם לשינוי בתנע של המערכת.

בהתנגשות לא אלסטית, האינטראקציה בין שני הגופים המתנגשים מועברת לתנודות אקראיות של החלקיקים בתוך הגופים, וכתוצאה מכך האנרגיה הפנימית עולה. החום הנוצר במהלך ההתנגשות הוא הגורם לעליית האי סדר, כלומר, ייצור תנודות אקראיות בהתנגשות.

הוראת פיזיקה לתלמידי המגמה למכונות

'עבודה' ו'אנרגיה' הם מושגים פיזיקליים שקשה להמחיש לתלמידים. מושג ה'חום', לעומת זאת, עשוי להיות מובן בצורה שגויה, דווקא בגלל שהתלמידים חושבים שהם מכירים אותו. אני מורה במגמת הנדסת מכונות בבית ספר תיכון. בשנות עבודתי שמתו לב שישנם תלמידים המפחדים מהמילה פיזיקה. חלק ניכר מן התלמידים בחרו את ההתמחות שלהם במכונות כדי שלא ייאלצו להתמודד עם המושגים הפיזיקליים. זאת מבלי להיות מודעים לכך שהבנת מבנה התהליכים המכניים ותפקודם כרוך בידיעת מושגים פיזיקליים כמו 'אנרגיה', 'עבודה' ו'חום'. לדוגמה: כדי שמכונה תתחיל לעבוד, יש לספק לה אנרגיה חיצונית, כך שמשאבה בבוכנה תתחיל להניע נוזל שעובר ממקום למקום. כלומר, האנרגיה החיצונית מחוללת תהליך של עבודה שמטרתו להניע את הבוכנה ממצב התחלתי למצב סופי (מצב זה יכול להפוך למצב התחלתי לתהליך הבא וחוזר חלילה). מושגים אלו הם מושגים פיזיקליים.

פרט לכך, במגמת מכונות לומדים את המבנה המכני של מערכת והתנהגותה, כאשר תפקיד הפיזיקה הוא לתאר את תנועת המבנה מבחינה דינמית, לתאר את התנהגות המערכת מבחינת מעברי החום, ולתאר את ההתנהגות האנרגטית של המבנה כולל חישובים, הסברים והסקת מסקנות כיצד יש לבנות את המבנה המכני.

כמורה, מטרתי היא לקדם את הידע של התלמיד תוך פיתוח ראייה עמוקה של המקצוע. בנוסף, אני מעונין לשכנע אותו בחשיבות הידע הפיזיקלי בהבנת מנגנונים הקשורים למגמה. זאת ללא התעמקות מתמטית רחבה ובמסגרת שעות מצומצמת יחסית. בכוונתי לפתח תכנית לימודית בה המושגים כמו אנרגיה חום ועבודה יתקשרו למושגים בהם משתמשים בחיי יום-יום כמו המושגים, 'התחלה', 'תהליך' ו'סוף'. בכך נקרב את הפיזיקה לעולמו של התלמיד. כך הוא יתחיל להרגיש את המשמעות ואת החשיבות להקשר בין שני התחומים - פיזיקה ומכונות.