

תוכן העניינים

הקדמה זורמים, גלים ותרמודינמיקה

פרק 15 זורמים 453

- 15-1 חומרים זורמים והעולם סביבנו 454
- 15-2 מהו חומר זורם? 454
- 15-3 לחץ וצפיפות 454
- 15-4 זורמים במנוחה בנוכחות כוחות כבידה 459
- 15-5 מדידת לחץ 462
- 15-6 העקרון של פסקל 465
- 15-7 העקרון של ארכימדס 467
- 15-8 זורמים אידאליים בתנועה 472
- 15-9 משוואת הרציפות 473
- 15-10 שטף נפחי 475
- 15-11 משוואת ברנולי 478

פרק 17 גלים מכניים רוחביים 527

- 17-1 גלים וחלקיקים 528
- 17-2 סוגי גלים 528
- 17-3 פולסים וגלים 529
- 17-4 הביטוי המתמטי של גל סינוסואידי 533
- 17-5 מהירות הגל 538
- 17-6 מהירות הגל במיתר מתוח 541
- 17-7 העברת אנרגיה והספק על ידי גל במיתר 543
- 17-8 עקרון הסופרפוזיציה בגלים 545
- 17-9 התאבכות גלים 547
- 17-10 גלים חוזרים וגלים עומדים 550
- 17-11 גלים עומדים ותהודה 553
- 17-12 פאזורים 555

פרק 18 גלי-קול 565

- 18-1 גלי-קול 566
- 18-2 מהירות הקול 568
- 18-3 התאבכות 572
- 18-4 עוצמת קול ורמת קול 574
- 18-5 מקורות של קולות מוזיקליים 578
- 18-6 פעימות 582
- 18-7 אפקט דופלר 584
- 18-8 מהירויות על-קוליות; גלי הלם 588

פרק 16 תנודות 491

- 16-1 תנועה מחזורית: סקירה כללית 492
- 16-2 המתמטיקה של תנודות סינוסואידיות 493
- 16-3 תנועה הרמונית פשוטה: מערכת מסה-קפיץ 497
- 16-4 מהירות ותאוצה של תנועה הרמונית פשוטה 502
- 16-5 מטוטלות מתמטית 504
- 16-6 גלגולי האנרגיה בתנועה הרמונית פשוטה 508
- 16-8 תנודות מאולצות ותהודה 515

21-6	גבול הנצילות של מנועים אמיתיים	691
21-7	נקודת מבט סטטיסטית על האנטרופיה	693

נספחים 705

נספח א'	ערכים של קבועים פיזיקליים	705
נספח ב'	ערכים אסטרונומיים	706
נספח ג'	נוסחאות מתמטיות	707
נספח ד'	התכונות של היסודות הכימיים	710
נספח ה'	הטבלה המחזורית	713

תשובות לתרגילי קריאה ובעיות בלתי זוגיות 715

זכויות לתמונות 721

מפתח העניינים 723

הסדרה המדעית 727

פרק 19 החוק הראשון של התרמודינמיקה 597

19-1	תרמודינמיקה	598
19-2	מדי-חום וסולמות טמפרטורה	598
19-3	פעולות גומלין תרמיות	602
19-4	התחממות, התקררות וטמפרטורה	603
19-5	העברת אנרגיה תרמית למוצקים ונוזלים	606
19-6	אנרגיה תרמית ועבודה	612
19-7	החוק הראשון של התרמודינמיקה	614
19-8	מקרים מיוחדים של החוק הראשון של התרמודינמיקה	616
19-9	עוד על מדידת טמפרטורה	618
19-10	התפשטות תרמית	623
19-11	עוד על מנגוני העברת אנרגיה תרמית	626

פרק 20 התורה הקינטית של הגזים 639

20-1	מולקולות והתנהגות גזים בטמפרטורה	640
20-2	התנהגות מקרוסקופית של גזים	640
20-3	העבודה הנעשית על ידי גזים אידאליים	644
20-4	לחץ, טמפרטורה ואנרגיה קינטית מולקולרית	646
20-5	מהלך חופשי ממוצע	650
20-6	התפלגות המהירויות של מולקולות הגז	652
20-7	החום הסגולי המולרי של גז אידאלי	654
20-8	דרגות חופש וחום סגולי מולרי	659
20-9	רמז לתיאוריה הקוונטית	662
20-10	התפשטות אדיאבטית של גז אידאלי	663

פרק 21 אנטרופיה והחוק השני של התרמודינמיקה 675

21-1	מספר תהליכים חד-כיווניים	676
21-2	השינוי באנטרופיה	677
21-3	החוק השני של התרמודינמיקה	682
21-4	אנטרופיה בעולם האמיתי: מנועים	683
21-5	אנטרופיה בעולם האמיתי: מקררים	689

הקדמות לספר

זורמים, גלים ותרמודינמיקה

בסדרת "מבינים פיזיקה"

כמה מילים חמות על תורת החום

התרמודינמיקה הינה החלק היפה, החשוב, המעניין והשימושי שמייצג את הפיזיקה כולה. היא אחת ממעט התיאוריות הבסיסיות המספקות לנו תמונת עולם ייחודית שנוצרה על ידי האדם במטרה להבין את טבעו. בשל כך שמחתי כשנוכחתי לדעת שהפרויקט המבורך של הקורס יסודות הפיזיקה מאת האלידיי, רזניק וווקר [Halliday, Resnick and Walker] חי ובוטט ואף ממשיך עם כרך חדש. בכרך זה נפרסת התיאוריה של החום – תורת התרמודינמיקה. זהו ספר שנחשב לאחד מהאיכותיים ביותר מבין ספרי הלימוד בפיזיקה כללית והוא נלמד בקורסים הניתנים לסטודנטים במדעים ובהנדסה באוניברסיטאות ובמכללות בארה"ב ובעולם כולו. הספר מתאפיין בבהירותו וברמתו הגבוהה וככזה הוא מקובל ואהוב על המרצים והסטודנטים כאחד.

לפרסום בשפה העברית של ספר בתרמודינמיקה ברמה כזו יש חשיבות רבה. אמנה שתי סיבות:

א. נושא התרמודינמיקה, שהוא סבוך ומורכב, אינו נלמד במסגרת הפיזיקה התיכונית ולכן הסטודנטים באקדמיה המתמודדים איתו לראשונה, ועוד בשפה האנגלית ונתקלים בקושי לא מבוטל. התרגום ברמה האקדמית של הספר לשפה העברית מציג את המונחים המרכזיים של תרמודינמיקה בשתי השפות וכך מציב הספר לסטודנט גשר לעולם האקדמי הדובר אנגלית, גשר שמקל את הכניסה וההתמצאות בנושא.

ב. לתורת החום יש מעמד ייחודי כי היא משלבת באופן אלגנטי ומפתיע בין רמת המיקרו לרמת המיקרו.

תורת התרמודינמיקה התפתחה כתיאוריית מקרו עצמאית וללא תלות במודל המיקרו ודווקא בשל כך היא זכתה להערכה מיוחדת מאלברט איינשטיין. לימים קיבלה התרמודינמיקה אישוש וחיוק בזכות הסבריה המתבססים על מודלים ברמת המיקרו. כך נבנתה לראשונה התיאוריה המולקולרית והקינטית של הגזים. ייצוג זה של תרמודינמיקה נקרא פיזיקה סטטיסטית. תורה חדשה זו בנוסף להיותה מבהירה, מקשרת ומסבירה, יצרה גם פרק חדש ושונה בפיזיקה. אך פרק זה הינו תלוי מודל, והוא ישתנה אם נשנה את המודל הבסיסי. למשל, אם נמיר את המודל בו האטומים מיוצגים ע"י חלקיקים נקודתיים במודל של כדורים בעלי נפח סופי או אם נשלב בו חלקיקים בתיאור הקוונטי. הפיזיקה הסטטיסטית כאמור תשתנה, בעוד שהתרמודינמיקה בגישת המקרו שלה תישאר בעינה וללא שינוי. תרמודינמיקה זו הוצגה בחלקו הראשון של הספר. ובחלק השני של הספר מוצגת תיאוריה סטטיסטית שמתארת את התרמודינמיקה בעזרת הכלים של הפיזיקה הסטטיסטית למקרה הפשוט של גז אידאלי.

החלק השלישי דן במושג המרכזי של תיאוריית החום שמבדיל באופן מהותי את תרמודינמיקה מן המכניקה הקלאסית – מושג האנטרופיה ששובר את הסימטריה בזמן ומציב כיוונית מובנית של חץ הזמן שהוגדר באופן אופרציונאלי ככיוון הגידול של האנטרופיה בתהליכים ספונטניים. בפרק זה מתאחדות שתי הגישות – המיקרו והמקרו ומשתלבות לתמונה קוהרנטית אחת.

כבר במבוא לתרגום של הכרכים הקודמים בסדרה ציינתי את חשיבות התרגום במדינה קטנה שבה קהל לומדי הפיזיקה קטן ומצומצם. יש להודות לתרגום כי בזכותו אנו נהנים מתוצר מושקע ומעולה.

זהו ספר מאוד פדגוגי ועשיר במגוון נושאי התוכן. התיאוריה מוצגת באופן בהיר ומוסברת היטב, הדוגמאות מעניינות ופתורות בשלמות. לאורך כל פרק ובסיומו יש תחנות עם סיכומי ביניים וסיכומים סופיים. בסוף כל פרק תמצאו אוסף מרשים של בעיות ושאלות, והכול בטעם טוב ובלוויו מאיר עיניים של תמונות, גרפים, דיאגרמות, טבלאות, וסרטוטים. אציון שבנוסף לדוגמאות

הסטנדרטיות המופיעות גם בספרים אחרים, מתייחד הספר בשלל דוגמאות מקוריות מהעולם שסביבנו המעוררות השראה והתפעלות. כל זאת על פי מיטב המסורת של מחברי הסדרה. אין ספק שניסיונם בן עשרות השנים סייע בגיבוש ובליטוש הסופי של הספר.

הספר מהנה כבר בקריאה מקדימה וזאת עוד בטרם נלמד הנושא לעומק במהלך הלימוד המסודר. בכך הספר יכול לשמש כמארגן ידע מקדים. את הלימוד המסודר הספר יחזק בהבהרות נוספות של הנלמד בהרצאות, בשאלות ותרגילים. ובסיום הלימוד, הספר יעזור בסידור וארגון של הידע תוך השלמתו וחזוקו. מעטים הם ספרי הלימוד שניחנים בסגולות הללו ולכן מחמם את הלב להיווכח שגם בעידן זה, של חומרנות ותועלתנות, עדיין ניתן למצוא ספרים עם נשמה יתירה.

אציין לשבח את המאמץ שהושקע ע"י המתרגמים והעורכים. הדבר משתקף בפרטים רבים בספר. התרגום הרהוט, הקולח והעכשווי מתאים הן לתלמיד והן למורה.

אני מאחל לימוד מהנה והצלחה רבה ללומדים.

פרופ' יגאל גלילי

מנהל המרכז להוראת המדעים ע"ש עמוס דה שליט

באוניברסיטה העברית בירושלים

05 יוני 2014

הקדמת עורך המהדורה בעברית

לפי איינשטיין "מטרת החינוך צריכה להיות: אנשים המצטיינים בעצמאות, במחשבה ובמעשה - ועם זאת רואים בשירות למען הכלל את משימת חייהם העיקרית." הפיזיקה המונחת ביסוד החשיבה והמעשה המדעי אינה נגישה לסטודנטים רבים, יכולתם להעמיק בה נחסמת גם בשל קשיי שפה. במטרה לסייע לסטודנטים במדעים והנדסה השקענו מאמצים רבים במהלך ארבע השנים האחרונות בהנגשת הפיזיקה, כך שהם יוכלו ליהנות מספרי לימוד עדכניים בשפתם. הספר שאתם מעיינים בו הוא הרביעי בסדרה **מבנים פיזיקה** וקדמו לו ספרים במכניקה, חשמל מגנטיות ואופטיקה ופיזיקה מודרנית, שזכו לתגובות חמות של סטודנטים ומרצים.

סטודנטים רבים חשים שהידע הנלמד בקורסי היסוד בפיזיקה אינו זמין לאחר סיום הקורסים. הם סובלים מתופעת "ידע שביר", ידע המסייע להם לעיתים לעבור את הקורס, אך נעלם זמן קצר לאחר סיומו וחסר להם בהמשך לימודיהם. אחת הסיבות לכך היא הנטייה של סטודנטים רבים להתמקד בפתרון תרגילים, מבלי להעמיק בהבנת הנושאים הנדונים ותוך המנעות מקריאת ספרי לימוד. הסיבות לנטייה זו רבות, אחת הבולטות שבהן הוא השילוב בין אוסף קשיים אותם פוגש הסטודנט בתחילת לימודיו. הקושי בכניסה לעול הלימודים האקדמיים, התמודדות עם עומס לימודים גבוה בסביבה לא מוכרת ובנוסף לכך הדרישה לקרוא ספרות מקצועית באנגלית. הסטודנטים טענו כי "לו היה ספר מתאים בעברית הייתי לומד בעזרתו פיזיקה". לראיה רבים מהם מעדיפים לקרוא ספרי לימוד ברמה תיכונית בעברית בקורסי היסוד בפיזיקה הנלמדים באקדמיה. במשך כשלושים השנים שחלפו מאז ראה אור בעברית ספר לימוד אקדמי במכניקה, חלו התפתחויות רבות בשיטות ההוראה, בידע הפיזיקאלי ובשילובו בטכנולוגיה העוטפת את האדם המודרני. שולבו מעבדות ממוחשבות, הופיעו אתרי אינטרנט, נוצרו הדמויות, הופיעו מצגות ועוד. לכל אלה אין הד בספרים קודמים.

לאור צרכי הסטודנטים והרצון לעדכן את הוראת הפיזיקה החליטה המכללה האקדמית להנדסה אורט בראודה לפתח סביבת לימוד בהוראת פיזיקה, שתועמד לרשות כל המוסדות להשכלה גבוהה בארץ. סביבה זו מבוססת על שני מרכיבים עיקריים סדרת הספרים מבנים פיזיקה ושאלות המופיעות בבודק המטלות ברשת - WebAssign. במערכת זו, שפותחה לפני למעלה מעשור בארה"ב, מופיעות שאלות מהספר (ומעוד מאות ספרי לימוד נוספים בפיזיקה) שניתן להציגם לסטודנטים באמצעות הרשת. המערכת עובדת בהצלחה, בגרסתה העברית, מזה כחמש עשרה שנים במכללתנו ובמכללות נוספות, ומסייעת לסטודנטים ולמרצים. כתובת האתר של בודק המטלות היא www.wa2u.net.

מבצע פיתוח סביבת למידה חדשה ותרגום ספר הינו מורכב ודורש שיתוף פעולה נרחב ועזרה של אנשים רבים. זוהי הזדמנות נעימה להודות לחלק מהם. ראשונה חביבה ברצוני להודות למיכל ברוק העורכת הגרפית של הספר שעמלה בכישרון ימים ולילות על הכנתו תוך התאמתו לכל הדרישות המדעיות והאסטטיות. דוד אגמון העורך המדעי של הספר, איש אשכולות המפליא בידעיותו הרחבות, בנוסף להיותו מורה מוכשר לפיזיקה, הקפיד על קלה כבחמורה; לדר' אהרון גרו מהטכניון, אשר סייע בליטוש התרגום והקפדה על הדיוק המדעי; למר אביחי בלמס - בונה האתר של הספר. הספר תורגם ע"י שמחה גלעם שייצר טקסט בהיר, מדויק ונוח לקריאה. תודתנו נתונה להוצאת Wiley על שנאותה להעניק לנו את זכויות התרגום, ולהוצאת מאגנס ומנהלה מר חי צבר שעבדו עמנו בשיתוף פעולה פורה בהפקה ושיווק. לעונג היה לי לבלות עם עמיתי פרופ' אריה מהרשק בדיונים על שיפור ההוראה ופיתוח סביבות למידה שתרומתם ניכרת בספר זה. עזרה חיונית הגישו לנו אנשי המנהלה במכללה: שמעון הקר - מנהל המכללה, צביקה קרני - מנהל הכספים, ונתן שטיינפלד - החשב שדאג להיבטים חשובים בלעדיהם הספר לא היה רואה אור. אחרונים יבואו על הברכה מובילי החזון ואמונה בחשיבות פיתוח אמצעי לימוד והוראה נשיא הקודמים של המכללה האקדמית להנדסה אורט בראודה דר' שמריהו רוזנר, ופרופ' יוחנן ארזי ז"ל. עתה מוביל את החזון הנשיא הנוכחי של המכללה פרופ' אריה מהרשק.

דר' דוד פונדק

ראש היחידה לתקשוב בהוראה

המכללה האקדמית להנדסה אורט בראודה.

הלחץ שמפעילים המים על גופו של צוללן הנע כלפי מטה גָדֵל במידה ניכרת, גם כשמדובר בצלילה לתחתית בריכת רדודה יחסית. עם זאת, בשנת 1975, תוך שימוש בציוד צלילה הנישא על גופו ותערובת גזים מיוחדת לנשימה, וויליאם רודס יצא מתוך תא צלילה בעומק 300 מטרים במפרץ מכסיקו, וצלל לעומק שיא של 350 מטרים. זה יישמע מוזר, אבל צוללן מתחיל המצוייד בבלוני חמצן ומתאמן בבריכת שחייה עלול להסתכן מלחץ המופעל עליו על ידי המים, יותר משהסתכן רודס. מדי פעם מתים צוללנים מתחילים משום שהתעלמו מסכנה זו.

מה מקור סכנת-המוות הזו?

התשובה תינתן בפרק זה

כָּל הַנְּחָלִים הַלְּכִים אֶל הַיָּם וְהַיָּם אֵינָנוּ מְלֵא. אֶל מְקוֹם שֶׁהַנְּחָלִים הַלְּכִים שָׁם הֵם שְׁבִים לְלֶכֶת. (קהלת א' 7).



15-1 חומרים זורמים והעולם סביבנו

לחומרים זורמים - הכוללים הן נוזלים והן גזים - יש תפקיד חשוב בחיי היומיום שלנו. אנו נושמים אותם ושותים אותם, וחומר זורם, חיוני ביותר, סובב במערכת העורקים האנושית. האוקיינוסים והאטמוספירה מורכבים מחומרים זורמים.

מכוניות ומטוסי סילון זקוקים לחומרים זורמים רבים ושונים לצורך פעולתם, כולל חומרים הזורמים בצמיגיהם, במכלי הדלק שלהם, ובתאי השריפה של מנועיהם. הם גם זקוקים לזורמים למערכות מיזוג האוויר, הסיכה, ולמערכות ההידראוליות שלהם. טורבינות רוח ממירות את האנרגיה הקינטית של האוויר לאנרגיה חשמלית, ותחנות הידרואלקטריות ממירות את אנרגיית הכובד הפוטנציאלית של המים לאנרגיה חשמלית. על-פני משכי-זמן ארוכים, האוויר והמים מגלפים ומעצבים מחדש את נוף כדור הארץ.

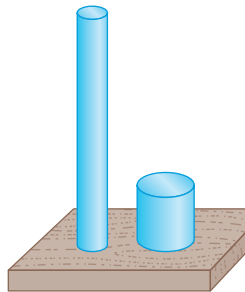
בלימודינו על הזורמים, נתחיל בבחינת מצבים פיזיקליים פשוטים שאנו פוגשים ביומיום. ראשית, נבחן את הכוחות הפועלים על זורמים הנמצאים במצב שיווי-משקל סטטי, ונתייחס לכוחות הפועלים על עצמים הנמצאים בתוך חומרים זורמים. לאחר מכן נבדוק כיצד אפשר להשתמש במערכת הידראולית כמנוף. בהמשך הפרק נלמד על תנועה של חומרים זורמים כאשר הם זורמים בצינורות וסביב עצמים.

15-2 מהו חומר זורם?

כדי להבין למה הכוונה במונח "חומר זורם", נשווה בין מוצקים, נוזלים וגזים. עמוד אנכי מוצק המונח על לוח יכול לשמור על צורתו ללא תמיכה חיצונית. מכיוון שכוח הכבידה פועל על כל אחד מהעמודים המתוארים באיור 15-1, כל אחד מהם מפעיל על הלוח כוח ניצב ללוח כלפי מטה, השווה בגודלו למשקלו. מה יקרה אם ננסה ליצור עמוד נוזלי? ללא תמיכה חיצונית, כוחות הכבידה הפועלים על הנוזל יגרמו לו לקרוס וליצור שלולית. (במונחים פורמליים יותר שהוצגו בסעיף 5-13, נוזלים אינם יכולים לעמוד במאמצי גזירה.)

עם זאת, אנו יכולים ליצור ולשמר עמוד אנכי של נוזל אם נספק לו דפנות מוצקות. במקרה כזה, הנוזל לוחץ לצדדים כנגד הדפנות והדפנות לוחצות בתגובה כנגד הנוזל. כך, העמודים האנכיים של הנוזל והמוצק שונים בזה שעמוד הנוזל זקוק לכוחות חיצוניים שיתמכו בו כדי לשמור על צורתו בעוד שעמוד המוצק אינו זקוק לכך. עם זאת, הן עמוד מוצק והן מכל המלא בנוזל יפעילו כוחות ניצבים על הלוח.

כאשר קיימים כוחות חיצוניים, **חומר זורם**, שלא כמו מוצק, יכול לזרום עד אשר הוא מקבל את צורת המכל המכיל אותו. ברור שגזים, כגון האוויר סביבנו, הם זורמים, מכיוון שהם מקבלים את צורתו של מכל במהירות רבה. חומרים צמיגיים מסויימים, כגון סירופ ופלסטלינה, דורשים זמן רב יותר כדי לקבל את צורת המכל. אבל מכיוון שבסופו של דבר הם עושים זאת, אנחנו מסווגים גם אותם כחומרים זורמים.



15-1 ■ לשני עמודים הניצבים על גבי לוח יש זהה זהה, כך שכל אחד מהם מפעיל אותו כוח אנכי הלוח כלפי מטה.

זורם - Fluid

15-3 לחץ וצפיפות

הגדרת לחץ עבור כוחות אחידים

נתייחס עתה לתכונות של שני עמודי המוצק המתוארים באיור 15-1. מכיוון שלשניהם משקל זהה, הם מפעילים על הלוח אותו כוח כלפי מטה. אבל אם תניחו את כף-ידכם תחת כל אחד



**מדוע גרמו הגלים הסיסמיים
לנזק כה רב במקסיקו-סיטי
אך לנזק קטן יחסית באתרים
אחרים בדרך אליה?**

התשובה תינתן בפרק זה

ב-19 בספטמבר 1985 גרמו גלים סיסמיים לנזק נרחב במקסיקו-סיטי. מקורם היה ברעידת אדמה בחוף המערבי של מקסיקו, מרחק של כ-400 km ממקסיקו-סיטי.

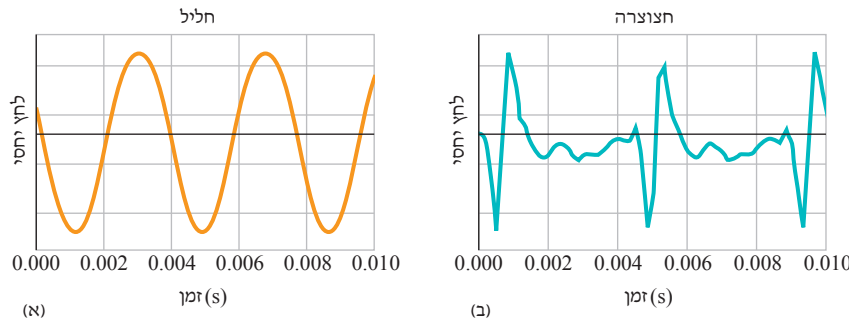
שמעו עמים ירגזון - חיל אחז יושבי פלשת. אז נבהלו אלופי אדום - אילי מואב יאחזמו רעד - נמוגו כל יושבי כנען. (שמות, ט"ו 14-15).

16-1 תנועה מחזורית: סקירה כללית

התנהגות של כל גודל מדיד שחוזרת על עצמה בפרקי זמן קבועים מוגדרת כהתנהגות **מחזורית**.
 אנו מוקפים מערכות שהגדלים שלהם משתנים באופן מחזורי. המערכות המוכרות לנו ביותר מתנהגות בצורה מחזורית, יש להן תנודות או תנועות מכניות ברורות. מדובר בנברשות מתנדדות, בספינות עוגנות שעולות ויורדות ובבוכנות מנועים העולות ויורדות.

התנועות הקשורות לכמה מההתנהגויות המחזוריות אינן מובנות מאליהן. כך למשל, איננו יכולים לראות את התנודות של מולקולות האוויר המעבירות תחושה של קול, את תנודותיהם של האטומים במוצק המעבירות תחושה של טמפרטורה ואת התנודות של האלקטרונים באנטנות של משדרי רדיו וטלוויזיה המעבירות מידע. דוגמאות אחדות לשינויים תנדודיים מוצגות באיורים 16-1 ו-16-2, ובהן האותות החשמליים הקשורים לפעילות הלב האנושי ושינויי לחץ אוויר בעת נגינה בכלים מוזיקליים.

ברור מאיורים 16-1 ו-16-2 שהווריאציות של אותות חשמליים מהלב ושל לחץ הקול מהחצוצרה מחזוריות שתיהן אך מורכבות למדי. לעומת זאת, התנודה של לחץ האוויר הנוצרת בנגינת החליל פשוטה בהרבה. למעשה, תבנית הצלילים שיוצר החליל נראה כמו הגרף של פונקציית סינוס או הקוסינוס. אם השינוי המחזורי של הגודל הפיזי בזמן הוא בעל צורה של פונקציית הסינוס (או הקוסינוס), אנו מכנים אותו **תנודה סינוסואידית**.

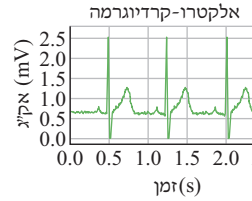
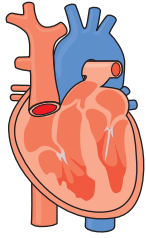


איור 16-2 - ההפרעה למולקולות אוויר גורמת לתנודות בלחץ האוויר בסמוך לכלים מוזיקליים. הדפוס של תנודות אלו בלחץ חוזר על עצמו בהרשי זמן קבועים; הצליל הוא מחזורי אפוא. את תנודות הלחץ העומדות ביחס ישר לפלט המתח של מיקרופון קטן ניתן להקליט במערכת ממוחשבת לאיסוף נתונים. (א) תו מתמשך הבוקע מחליל ו-(ב) תו מתמשך הבוקע מחצוצרה. (באדיבות Vernier Software and Technology)

מפתיע לגלות עד כמה שכיחות התנודות הסינוסואידיות, הלמידה על אודותיהן מסייעת לנו להבין תנועות מורכבות יותר. מסיבה זו אנו מתחילים פרק זה בחקירת המתמטיקה של תנודות סינוסואידיות ובבירור השאלה איך ניתן לקשר תנודות לתנועה המעגלית האחידה שלמדנו בפרקים 5, 11 ו-12. שליטה מלאה בתיאור המתמטי של תנועה סינוסואידית חשובה מאין כמותה כדי להבין היטב מערכות פיזיקליות מחזוריות. שליטה זו חיונית גם כדי להבין את אופן העברתם של גלים מכניים וגלי קול.

כפי שתראו, פיזיקאים ומהנדסים רואים בתנועות סינוסואידיות של חלקיקים במערכות מכניות **תנועה הרמונית פשוטה (או תה"פ)**. רוב הפרק יוקדש ללימוד הכוחות הפועלים בחיי היום יום שלנו שגורמים לתנועות הסינוסואידיות המכונות תה"פ.

חקר התנועה ההרמונית הפשוטה יקדם את הבנתנו במערכות מכניות, וכפי שנראה הבנה זו חיונית ללימוד סוגיות מתחומי הגלים, החשמל, המגנטיות והאור. לבסוף, היכרות עם תה"פ היא בסיס להבנת הפיזיקה המודרנית, ובה גם להבנת אופיו הגלי של האור ולהבנת האופן שבו האטומים וגרעיניהם סופגים ופולטים אנרגיה.



איור 16-1 - אלקטרו-קרדיוגרמה המציגה את הדפוס מחזורי של האותות החשמליים המניעים את פעימות הלב האנושי. הנתונים נאספו במחשב בעל חישן אק"ג, ונלת איסוף נתונים. (באדיבות Vernier Software and Technology)

תודה סינוסואידית - Sinusoidal oscillation



תודה הרמונית פשוטה - Simple harmonic motion

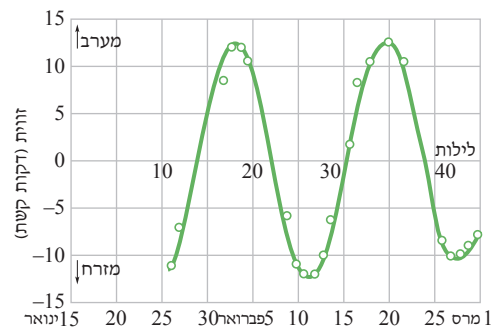
16-2 המתמטיקה של תנודות סינוסואידיות

תנודות סינוסואידיות ותנועה מעגלית אחידה

בשנת 1610 השתמש גלילאו בטלסקופ החדש שבנה כדי לגלות את ארבעת הירחים העיקריים של צדק. במשך שבועות של תצפית נדמה היה לו שכל ירח נע קדימה ואחורה יחסית לכוכב הלכת. היום היינו מכנים תנועה זו 'תנועה סינוסואידית'. דיסקת הכוכב היוותה את נקודת האמצע של התנועה. גם כיום עדיין אפשר לראות את התיעוד של תצפיות גלילאו, בכתב ידו. א"פ פרנץ' (A.P. French) מ-MIT השתמש בנתונים של גלילאו כדי לחשב את מיקומו של הירח קליסטו יחסית לכוכב צדק. בתוצאות המוצגות באיור 3-16 המעגלים הם נתוני גלילאו הנראים סינוסואידיים. העקומה מציגה את ההתאמה הטובה ביותר של פונקציה סינוסואידית לנתונים. תנודה מלאה אורכת כ-16.8 ימים, כפי שניתן לראות בשרטוט.

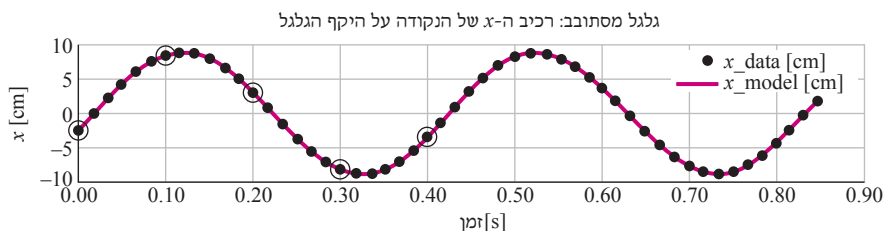
למעשה, קליסטו נע במהירות בעלת גודל קבוע, במסלול שהוא כמעט מעגלי סביב כוכב צדק. תנועתו האמיתית של הירח, הרחוקה מלהיות סינוסואידית, היא תנועה מעגלית אחידה. מה שגלילאו ראה - ומה שתוכלו לראות בעצמכם אם תצטיידו במשקפת טובה ובמעט סבלנות - הוא היטל התנועה המעגלית האחידה הזאת על קו הנמצא במישור התנועה. בעקבות תצפיותיו המדהימות של גלילאו אנו מגיעים למסקנה שהתנועה הסינוסואידית בה הוא צפה היא למעשה תנועה מעגלית אחידה (קצובה) הנצפית מהצד, ובשפה פורמלית יותר:

ההיטל של תנועה מעגלית אחידה על קוטר של מעגל שתנועה זו מתרחשת על היקפו מתאר תנודה סינוסואידית.

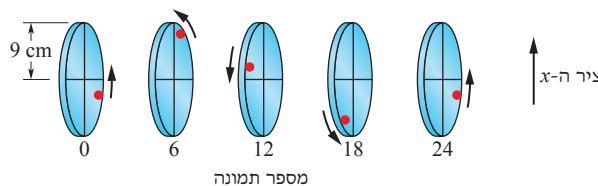


איור 3-16 ■ הזווית בין צדק לבין ירחו קליסטו, כפי שהיא נצפית מכדור הארץ. המעגלים מבוססים על מדידותיו של גלילאו מ-1610. העקומה היא ההתאמה הטובה ביותר לנתונים והיא מצביעה בברור על תנועת סינוסואידית. במרחק הממוצע של צדק מהארץ, $10 \times 10^6 \text{ km}$ דקות קשת תואמות מרחק של כ- $2 \times 10^6 \text{ km}$ (עובד מתוך, Newtonian Mechanics, A. P. French, W.W.Norton, New York, 1971, p. 288)

נוכל לחקור ביתר דקדקנות את הקשר שבין התנודות הסינוסואידיות לבין התנועה המעגלית האחידה שחקרנו בפרק 5 אם נבחן לא את הירח הסובב סביב כוכב רחוק אלא גוף פשוט מחיי היום יום. ניקח למשל נקודה על דיסקה המסתובבת במהירות זוויתית קבועה סביב ציר, כפי שמוצג באיור 4-16. שרטוט של ההעתק האנכי של הנקודה x בתלות בזמן מוצג באיור 5-16. במקרה זה בחרנו את כיוון ציר ה- x למעלה ואת כיוונו של ציר ה- y ימינה. אם נתבונן על הדיסקה מהצד, בסדרה של מבטים (כך שנוכל לראות רק את אחד הממדים שבהם היא נעה), ההיטל של הנקודה על ציר ה- x בתלות בזמן ייצור שרטוט סינוסואידי, כפי שמוצג באיור 4-16.



גלגל מסתובב: רכיב ה- x של הנקודה על היקף הגלגל



איור 5-16 ■ תנועת דיסקה הנעה במהירות זוויתית קבועה צולמה בקצב של 60 תמונות לשנייה. לשרטוט רכיב ה- x של נקודה על הדיסק צורת סינוס. משום כך הוא מתנווד בתה"פ. מיקום הנקודה על גבי הדיסקה מוצג מתחת לשרטוט בכל תמונה שישית. הערה: כדי להשתמש בקואורדינטות הקוטביות הקונבנציונליות על מנת לקשר את הנקודה על הדיסקה עם רכיב ה- x של מיקומה בחרנו להעמיד את ציר ה- x אנכית.

איור 4-16 ■ תמונות אלו מציגות את מקומה של נקודה על דיסקה המסלומה סיבוב כל 1/10 השנייה. הן מייצגות כל תמונה שישית ברצף וידאו שהוקלט בקצב של 60 תמונות לשנייה. הזווית שהנקודה יוצרת עם ציר ה- x הנבחר שלילית בהתחלה ולאחר מכן היא הולכת וגדלה בקצב קבוע. הערה: כדי ליצור את הקשר עם איור 5-16 בחרנו שציר ה- x יהיה הציר האנכי.

0 ϕ_0 $t_0 = 0.00 \text{ s}$

6 $\phi_6 = \omega_6 t_6 + \phi_0$ $t_6 = 0.10 \text{ s}$

12 $\phi_{12} = \omega_{12} t_{12} + \phi_0$ $t_{12} = 0.20 \text{ s}$

18 $\phi_{18} = \omega_{18} t_{18} + \phi_0$ $t_{18} = 0.30 \text{ s}$

24 $\phi_{24} = \omega_{24} t_{24} + \phi_0$ $t_{24} = 0.40 \text{ s}$

גלים מכניים רוחביים

אם תנוע חיפושית על החול במרחק כמה עשרות סנטימטרים מעקרב זה, הוא מיד יפנה ויעוט עליה (לארוחת צהריים). כך יוכל לעשות אף מבלי לראותה (הוא פעיל בלילה) ומבלי לשמעה.

**כיצד מצליח העקרב
לאתר את טרפו בדיוק
כה רב?**

התשובה תינתן בפרק זה



הַלָּאָה יִרְדּוּ, הַלָּאָה זֹל!
יִהְיוּ גְלִיָּה,
עֲלֵי גְדוֹתֶיהָ שְׁטוֹף וְגַל
חֲלָאֵת אֶרֶץָּהּ.

בְּקוֹל רַעַם הַרְעָם קוֹל
בְּהֶמּוֹן מִימֶיהָ
מִסְפֵּלֵת צִיּוֹן לְנוֹ סֹל
נִחְנוּ אַחֲרֶיהָ. (נפתלי הרץ אימבר).

17-1 גלים וחלקיקים

שתי דרכים ליצור קשר עם חבר בעיר רחוקה הן לכתוב מכתב ולהשתמש בטלפון.

הבחירה הראשונה (המכתב) קשורה במושג 'חלקיקים': גוף חומרי הנע מנקודה אחת לנקודה אחרת ונושא עמו מידע. מרבית הפרקים הקודמים דנו בחלקיקים או במערכות של חלקיקים.

הבחירה השנייה (הטלפון) קשורה במושג 'גלים', בו עוסק פרק זה. כשאתם משוחחים בטלפון, גלי קול נושאים את המסר שלכם ממיתרי קולכם אל הטלפון. שם גלי הקול מותמרים לגל אלקטרו-מגנטי, וזה עובר דרך חוט נחושת או סיב אופטי או דרך האטמוספירה, אולי באמצעות לוויין תקשורת. בקצה המקבל יש גל קול נוסף, העובר מהטלפון אל אוזן חברכם. אף שהמסר עובר, דבר מהדברים שבהם נגעתם אינו מגיע לחברכם. כך למשל, אם יש לכם שפעת, חברכם לא יידבק מכם אם ידבר אתכם בטלפון, מאחר ששום חומר (ולכן שום וירוס) אינו עובר בין שניכם. התנע והאנרגיה בגל עוברים מנקודה לנקודה, אך שום גוף חומרי אינו עובר.

לאונרדו דה-וינצ'י הבין את נושא הגלים כאשר כתב על גלי מים: "לעתים קרובות קורה שהגל בורח ממקום היווצרותו, ואילו המים נותרים כשהיו; כך גם הגלים שהרוח בשדה חיטה יוצרת, שם אנו רואים את הגלים רצים על פני השדה, ואילו הדגן נותר במקומו".

חלקיקים וגלים הם שתי הישויות החשובות שהפיזיקה הקלאסית מתארת. לשתייהן יש מקום ומהירות. ואולם, במובנים מסוימים שתי הישויות שונות מאוד זו מזו. המילה חלקיק מרמזת על ריכוז זעיר של חומר המסוגל להעביר אנרגיה ותנע ממקום אחד למקום אחר באמצעות תנועתו. כך למשל, כדור בסיס הוא חלקיק שבאמצעות תנועתו הוא מסוגל להעביר אל תופס הכדור את האנרגיה והתנע שהעניק לו זורק הכדור. לחלופין, האנרגיה והתנע הקשורים לגל מתפזרים במרחב ומועברים בלי שחומר כלשהו ינוע ממקום למקום. כך למשל, כאשר זורק הכדור צועק אל תופס הכדור, הוא יכול להניע את חלקיקי האוויר בקרבתו, אך גל הקול שמעביר את קולו תלוי בשרשרת של הפרעות זמניות באוויר ולא במולקולות העוברת מזורק הכדור אל התופס. בפרק זה נניח לזמן מה לחלקיקים ונעסוק בגלים מכניים ונחקור את אופן תנועתם.

17-2 סוגי גלים

קיימים שלושה סוגים עיקריים של גלים:

1. **גלים מכניים - Mechanical waves**
גלים מכניים. גלים אלו הם המוכרים לנו ביותר מפני שאנו פוגשים בהם כמעט כל הזמן; כמה מהדוגמאות הנפוצות הן: גלי מים, גלי קול וגלים סיסמיים. לכל הגלים האלה יש תכונות מרכזיות מסוימות: הם פועלים על פי חוקי ניוטון וביכולתם לנוע רק דרך תווך חומרי, כגון מים, אוויר וסלע.
2. **גלים אלקטרומגנטיים - Electromagnetic waves**
גלים אלקטרומגנטיים. גלים אלו מוכרים פחות, אך אנו משתמשים בהם כל הזמן; כמה מהדוגמאות הנפוצות הן אור רגיל ואור על-סגול, גלי רדיו וטלוויזיה, גלי מיקרו, גלי רנטגן וגלי מכ"ם. גלים אלו יכולים להעביר אנרגיה ותנע ללא תווך חומרי. גלי אור, למשל מכוכבים, עוברים דרך החלל הריק עד הגיעם אלינו. בגלים אלקטרומגנטיים נעסוק בכרך "מבינים פיזיקה: חשמל, מגנטיות ואופטיקה".
3. **גלי חומר - Matter waves**
גלי חומר. אף שבטכנולוגיה מודרנית מרבים להשתמש בגלים אלו, קרוב לוודאי שהם אינם מוכרים לכם. גלים אלו קשורים לאלקטרונים, פרוטונים וחלקיקי יסוד אחרים, ואפילו אטומים ומולקולות. לא אחת אנו רואים בגלים אלו גורמים המרכיבים את החומר, ולכן

הם נקראים גלי חומר. התנהגותם מתוארת בחוקי מכניקת הקוונטים. בגלי חומר נעסוק בכרך "מבינים פיזיקה מודרנית".

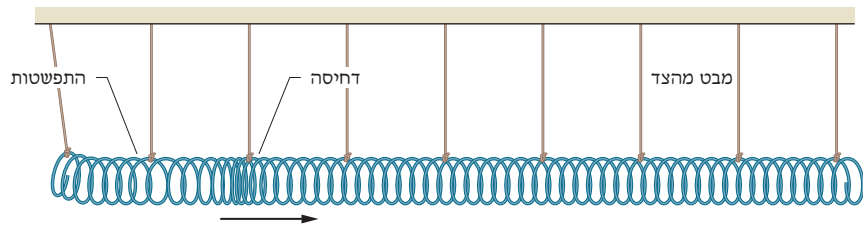
רבים הנושאים שבהם נדון בהם בפרק זה רלוונטיים לכל סוגי הגלים. עם זאת, כאשר נדון בדוגמאות ספציפיות נעסוק רק בגלים מכניים, מפני שהם הסוג הפשוט והמוכר ביותר. בפרק זה נשקול מהי הדרך המתמטית הטובה ביותר לתיאור גלים מכניים אידיאליים. גל מכני אידיאלי אינו מאבד אנרגיה מכנית ואינו משנה את צורתו בתנועה דרך תווך.

17-3 פולסים וגלים

נתבונן לדוגמה באיור 17-1. האיור מציג קפיץ סלינקי ארוך מאוד התלוי בעזרת מיתרים ארוכים שהמרווח ביניהם אחיד. אם נמשוך במהירות החוצה (שמאלה) את הקצה השמאלי של הסלינקי ולאחר מכן נדחוף אותו במהירות חזרה פנימה (ימינה) תעבור לאורכו הפרעה של דחיסה-התרחבות כמו זו המוצגת באיור 17-1. (התבוננו היטב באיור 17-1 ולא באיור 17-2 כדי לראות את ההשפעה). מאחר שהתנדודות של פיתולי הסלינקי קדימה ואחורה מקבילות לכיוון שהפרעה נעה בו, אנו אומרים שהתנועה אורכית.

Longitudinal motion - תנועה אורכית

איור 17-1 ■ קפיץ סלינקי ארוך התלוי בעזרת מיתרים מיתרים המפוזרים במרווח אחיד. שימו לב להפרעת הצפיפות בפיתולי הקפיץ. ההפרעה נעה משמאל לימין בסמוך למיתרים השני והשלישי ולהתרחבות מיד אחריה.

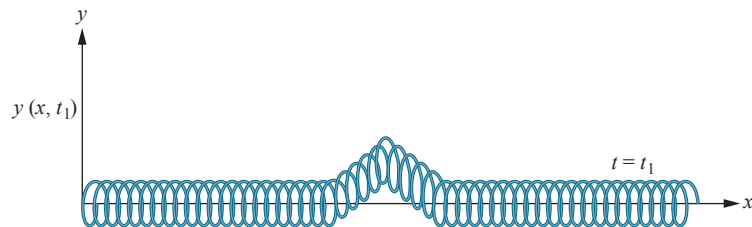


ואולם, אם נמשוך במהירות, אחורה וקדימה (לתוך העמוד וממנו), את קצה הסלינקי בניצב לכיוון שלאורכו הקפיץ פרוש, תתקבל הפרעה דוגמת זו המוצגת באיור 17-2, הפרעה הנעה לאורך הסלינקי. במקרה זה, ההעתק של פיתולי הסלינקי ניצבת לכיוון ההתקדמות של ההפרעה (דהיינו, לאורך הסלינקי). הפרעה כזו נקראת הפרעה רוחבית.

הפרעה רוחבית -

Transverse disturbance

איור 17-2 ■ הפרעה רוחבית או צדית שנעה משמאל לימין לאורך הקפיץ. במקרה זה הצופה שוכב על הרצפה מתחת לסלינקי ומתבונן כלפי מעלה בזמן $t = t_1$.



Pulse wave - פולס גלי

בשני המקרים הנזכרים לעיל ההפרעה הבודדת נקראת פולס או גל קצר. אם נחזור על התנועה שגורמת להפרעה (בין שזו המשיכה המהירה קדימה ואחורה או תנועת הדחיסה-משיכה) בפרקי זמן סדירים, התוצאה תהיה הפרעה נעה שחוזרת על עצמה ומכונה גל רציף. בדיוק כפי שקורה במקרה של פולסים בודדים, גם גלים יכולים להיות אורכיים או רוחביים.

Continuous wave - גל רציף

כך למשל, אם תמשכו קצה אחד של מיתר מתוח משיכה בודדת מעלה-מטה, פולס בודד יעבור לאורך המיתר, כמוצג באיור 17-3(א). פולס זה ותנועתו יכולים לקרות מפני שהמיתר מתוח. במהלך החלק העולה של המשיכה, כאשר אתם מושכים את קצה המיתר שבידכם כלפי מעלה, הוא מתחיל למשוך כלפי מעלה את החלק הצמוד למיתר באמצעות המתחות בין שני החלקים. כאשר החלק הסמוך נע כלפי מעלה, הוא מתחיל למשוך את החלק הבא כלפי מעלה וכן הלאה. בינתיים, ניח שמשכתם כלפי מטה את קצה המיתר שבידכם, ובכך השלמתם פעימה אחת מעלה-מטה.

אנטרופיה והחוק השני של התרמודינמיקה

21



**מה בעולמנו מעניק לזמן
את כיוונו?**

התשובה תינתן בפרק זה

כתובת בציור גרפיטי אנונימי על קיר בית-קפה ברחוב הפקאן באוסטין, טקסס, אומרת: "הזמן הוא דרכו של אלוהים לוודא שלא כל הדברים יקרו בבת-אחת." לזמן יש גם כיוון - מקצת הדברים מתרחשים בסדר מסוים ולעולם לא יתרחשו בכוחות עצמם בסדר ההפוך. לדוגמה, ביצה שנשמטה בשוגג מתנפצת ותוכנה מתפזר בתוך ספל. התהליך ההפוך - ביצה מפוזרת מתכנסת לכדי ביצה שלמה וקופצת מעלה אל כף היד המושטת - לעולם לא יתרחש מעצמו; אבל למה לא? למה התהליך הזה לא יכול להתרחש בסדר ההפוך, כמו קלטת וידאו המורצת לאחור?

בלי סדר דבר לא יכול להתקיים, אבל בלי תוחו, דבר לא יכול להתפתח. מי שאינו מכיר את החוק השני של התרמודינמיקה משול לאדם של קרא את יצירותיו של שקספיר. (סנאו).

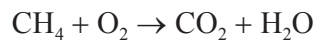
21-1 מספר תהליכים חד-כיווניים

נניח שאתם נכנסים הביתה ביום קר מאוד וכורכים את כפות ידיכם הקרות סביב ספל קקאו מהביל. ואז כפות ידיכם מתחממות והספל מתקרר. מאידך, זה לעולם לא יקרה בכיוון ההפוך. כלומר, כפות ידיכם הקרות לעולם אינן ממשיות להתקרר בעוד הספל דווקא מתחמם.

אם נניח שקצב העברת האנרגיה התרמית מהספל החם ומכפות-ידיכם אל החדר הינו איטי, המערכת המורכבת מכפות-ידיכם ומהספל היא, בקירוב, מערכת סגורה - מערכת המבודדת מסביבתה (אין למערכת פעולות גומלין איתה), פחות או יותר. להלן נציין תהליכים חד-כיווניים נוספים שהתרחשותם נצפית במערכות סגורות: (1) ארגז המחליק על פני משטח אופקי נעצר בסופו של דבר - אבל לעולם אינכם רואים ארגז ניח על פני משטח חלק, המתחיל לנוע מעצמו. (2) אם נשמט מידיכם גוש מַרְקָק, הוא נופל לרצפה - אבל גוש מרק חסר-תנועה המונח על הרצפה לעולם לא יקפוץ מעצמו לאוויר. (3) אם תנקבו בלון מלא בהליום בחדר סגור, גז ההליום יתפשט בחלל החדר - אבל אטומי ההליום היחידים לעולם לא ינדדו מפינות החדר כדי למלא את הבלון מחדש. תהליכים חד-כיווניים כאלה מכונים **בלתי-הפיכים**, ופירוש הדבר הוא שתהליכים אלו אינם יכולים להתרחש בכיוון ההפוך באמצעות שינויים קטנים בלבד בסביבתם.

בלתי הפיכים - Irreversible

תגובות כימיות רבות גם הן בלתי-הפיכות. לדוגמה, כששורפים גז מתאן, כל אחת ממולקולות המתאן מגיבה עם מולקולת חמצן. אדי-מים ופחמן דו-חמצני נוצרים כמתואר בתגובה הכימית להלן:



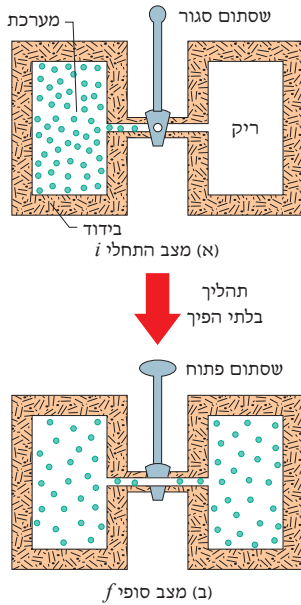
תהליך השריפה הזה הוא בלתי-הפיך. איננו רואים מים ופחמן דו-חמצני המגיבים באופן ספונטני ויוצרים גז של מתאן וחמצן.

האופי החד-כיווני של תהליכים תרמודינמיים כאלו הוא כה נפוץ עד שאנו נוטים לראות זאת כמובן מאליו. אילו התהליכים האלה היו מתרחשים באופן ספונטני (מעצמם) בכיוון "הלא נכון", היינו נדהמים. ועם זאת, אף לא אחד מהתהליכים הללו "בכיוון הלא נכון" לא היה מפר את חוק שימור האנרגיה. בדוגמה של "הידיים הקרות - הספל החם", אנרגיה יכולה הייתה להישמר גם במעבר אנרגיה "בכיוון הלא נכון" בין הידיים לספל. ציות לחוק שימור האנרגיה היה מתקיים אפילו אם ארגז ניח או גוש מרק ניח היו לפתע ממירים אנרגיה פנימית לאנרגיה קינטית מאקרוסקופית ומתחילים לנוע. האנרגיה הייתה נשמרת גם במקרה שאטומי ההליום שהשתחררו מהבלון היו מתקבצים יחדיו, מעצמם.

שינויים באנרגיה בתוך מערכת סגורה אינם קובעים את כיוון התהליכים הבלתי-הפיכים. לפיכך, אנו מסיקים שהכיוון נקבע על ידי תכונה אחרת שעדיין לא התייחסנו אליה. אנו נדון בהרחבה בתכונה החדשה הזו בפרק הנוכחי. היא נקראת האנטרופיה S של המערכת. מתברר שהשינוי באנטרופיה, ΔS , של מערכת מהווה גודל חשוב ושימושי בניתוח תהליכים תרמודינמיים. הוא מוגדר בסעיף הבא, אבל כאן אנו יכולים לומר את התכונה העיקרית של שינוי האנטרופיה (הנקראת תדיר 'הנחת האנטרופיה'):

אם תהליך בלתי הפיך מתרחש במערכת סגורה, האנטרופיה S של המערכת תמיד גדלה; היא לעולם אינה קטנה.

האנטרופיה - שלא כאנרגיה - אינה מציינת לחוק שימור כלשהו. האנרגיה של מערכת סגורה נשמרת. היא תמיד נשארת קבועה. עבור תהליכים בלתי הפיכים, האנטרופיה של מערכת סגורה תמיד גדלה. עקב התכונה הזו, השינוי באנטרופיה נקרא לעתים "חץ הזמן". לדוגמה, אנו



איור 21-1 - התפשטות חופשית של גז אידיאלי המכיל מספר גדול של מולקולות. (א) הגז כלוא במחצית השמאלית של מכל מבודד באמצעות שסתום סגור. (ב) כאשר פותחים את השסתום, הגז מהר למלא את המכל כולו. התהליך הזה בלתי-הפיך; דהיינו, אף פעם לא רואים תהליך כזה המתרחש בכיוון ההפוך, כאשר הגז מתכנס מעצמו למחצית השמאלית של המכל.

אנטרופיה - Entropy

תכונה של מצב - State property שינוי באנטרופיה - Change in entropy



איור 21-2 - תרשים $P-V$ המראה את המצב התחלתי i ואת המצב הסופי f של ההתפשטות החופשית המתוארת באיור 21-1. לא ניתן להראות את מצבי הביניים של הגז מכיוון שאלה אינם מצבי שיווי-משקל.

מקשרים את השבירה הבלתי הפיכה של הביצה בתמונת הפתיחה של הפרק עם הכיוון קדימה של הזמן וגם עם גידול באנטרופיה. הכיוון אחורה של הזמן (קלטת וידאו המורצת לאחור) היה מתקשר לביצה שבורה מתלכדת מחדש לביצה שלמה ומתרוממת באוויר. התהליך הזה בכיוון אחורה היה מביא לירידה באנטרופיה ולפיכך הוא לעולם לא מתרחש.

ישנן שתי דרכים שקולות להגדיר את השינוי באנטרופיה של מערכת. הראשונה היא מאקרוסקופית. היא מנוסחת במונחים של טמפרטורת המערכת ושל כל העברות האנרגיה התרמית הנעשות בין המערכת לסביבתה. הדרך השנייה היא מיקרוסקופית או סטטיסטית. היא מוגדרת באמצעות מניית האופנים שבהם אפשר לסדר את האטומים או המולקולות המרכיבים את המערכת. בסעיף הבא נשתמש בגישה הראשונה; בגישה השנייה נשתמש בסעיף 21-7.

תרגיל קריאה 21-1: התייחסו לתהליך הבלתי-הפיך של הפלת גוש מַרְק על הרצפה. תארו את העברות האנרגיה המתרחשות, המאפשרות לנו להאמין שהאנרגיה נשמרת.

תרגיל קריאה 21-2: רשמו תופעות יומיומיות נוספות המדגימות אי-הפיכות מבלי להפיר את עקרון שימור האנרגיה.

21-2 השינוי באנטרופיה

בסעיף הזה ננסה לפתח הגדרה עבור השינוי באנטרופיה על ידי בחינה מחדש של התהליך המאקרוסקופי שתואר בסעיפים 19-8 ו-10-20 - והוא, התפשטות חופשית של גז אידיאלי. באיור 21-1 (א) מתואר גז במצב שיווי-המשקל התחלתי שלו, i , כלוא באמצעות שסתום במחצית השמאלית של מכל מבודד מבחינה תרמית. אם פותחים את השסתום, הגז זורם וממלא את כל נפח המכל, עד שהוא מגיע - בסופו של דבר - למצב שיווי-המשקל הסופי f , כמתואר באיור 21-1 (ב). למעט המקרה שבו מספר המולקולות קטן (דבר שקשה מאד להשיגו), זהו תהליך בלתי-הפיך. שוב, כשאנו אומרים 'בלתי-הפיך' אנו מתכוונים לכך שזה בלתי-סביר לחלוטין שכל חלקיקי הגז יחזרו בכוחות עצמם למחצית השמאלית של המכל.

תרשים $P-V$ של התהליך באיור 21-2 מראה את הלחץ ואת הנפח של הגז במצבו ההתחלתי i ובמצבו הסופי f . כפי שנדון בסעיף 19-1, הלחץ והנפח של הגז תלויים רק במצב שבו נמצא הגז, ולא בתהליך שהביא אותו למצב הזה. לפיכך, לחץ ונפח הינם דוגמאות לתכונות של מצב. **תכונה (או פונקציה) של מצב** היא תכונה התלויה במצב הגז בלבד ולא באופן שבו הגיע הגז למצב הזה. תכונות נוספות של מצב הן טמפרטורה ואנרגיה פנימית. עתה נניח שלגז יש תכונה נוספת של מצב - האנטרופיה שלו. בנוסף, נגדיר את **השינוי באנטרופיה**, $S_f - S_i$, של מערכת במשך תהליך המביא את המערכת ממצב התחלתי i למצב סופי f , כך:

$$\Delta S = S_f - S_i \equiv \int_i^f \frac{dQ}{T} \quad \text{(הגדרת השינוי באנטרופיה)} \quad (21-1)$$

כאשר Q היא האנרגיה התרמית המועברת אל המערכת או ממנה בזמן תהליך התחממות או התקררות, ו- T היא הטמפרטורה של המערכת בקלווין. מכאן שהשינוי באנטרופיה תלוי לא רק באנרגיה התרמית המועברת, Q , אלא גם בטמפרטורה שבה מתרחשת ההעברה הזו. מכיוון ש- T תמיד חיובית, הסימן של ΔS זהה לזה של Q (חיובי - אם האנרגיה התרמית מועברת אל המערכת, ושלילי - אם האנרגיה התרמית מועברת מהמערכת). הקשר הזה (משוואה 21-1)