

תוכן העניינים

מבוא 1

פרק 1 מדידה 5

מבוא 5	1-1
מדידות בסיסיות בחקר התנועה 5	1-2
השאיפה לדיוק 8	1-3
מערכת היחידות הבין-לאומיות התקניות 8	1-4
יחידות הזמן התקניות של SI 11	1-5
יחידות האורך התקניות של SI 13	1-6
תקני SI של מסה 14	1-7
כלי מדידה למעבדות פיזיקה 15	1-8
המרת יחידות 16	1-9
חישובים בכמויות לא ודאיות 18	1-10
ממדים ויחידות 20	1-11
סיכום פרק 1 24	

פרק 2 תנועה לאורך קו ישר 33

תנועה 34	2-1
מיקום והעתק לאורך קו 35	2-2
מהירות וגודל מהירות 39	2-3
תיאור שינוי מהירות 46	2-4
תאוצה קבועה: מקרה מיוחד 49	2-5
סיכום פרק 2 56	

פרק 3 כוחות ותנועה לאורך קו ישר 69

מה גורם לתאוצה? 70	3-1
החוק הראשון של ניוטון 70	3-2
כוח בודד ותאוצה קווית 72	3-3
מדידת כוחות 73	3-4
הגדרה ומדידה של מסה 75	3-5
החוק השני של ניוטון לכוח בודד 77	3-6
שילוב כוחות לאורך קו 80	3-7
כל הכוחות נובעים מאינטראקציה 84	3-8
כוחות כבידה ותנועה בנפילה חופשית 85	3-9
חוק התנועה השלישי של ניוטון 90	3-10
הערות על המכניקה הקלאסית 94	3-11
סיכום פרק 3 95	

פרק 4 וקטורים 107

מבוא 108	4-1
העתקי וקטורים 108	4-2
חיבור גרפי של וקטורים 110	4-3
רכיבי וקטור ניצבים 112	4-4
וקטורי יחידה 116	4-5
חיבור וקטורים באמצעות רכיבים 116	4-6
הכפלה וחלוקה של וקטור בסקלר 118	4-7
וקטורים וחוקי הפיזיקה 119	4-8
סיכום פרק 4 120	

7-8 מערכת שיש בה חילופי מסה - טיל והדלק שנפלט ממנו 244

סיכום פרק 7 248

פרק 8 מערכות מורכבות 259

- 8-1 תנועתם של גופים מורכבים 260
- 8-2 הגדרת המקום של גוף מורכב 260
- 8-3 המקום האפקטיבי - מרכז המסה 261
- 8-4 איתור מרכז המסה של מערכת 262
- 8-5 חוקי ניוטון למערכת של חלקיקים 267
- 8-6 התנע של מערכת חלקיקים 270

סיכום פרק 8 272

פרק 9 עבודה ואנרגיה קינטית 279

- 9-1 מבוא 280
- 9-2 מבוא למונחים עבודה ואנרגיה קינטית 281
- 9-3 המושג עבודה פיזית 284
- 9-4 חישוב העבודה כשהכוחות קבועים 285
- 9-5 העבודה שמבצע כוח של קפיץ 287
- 9-6 עבודת כוח משתנה חד-ממדי - שיקולים כלליים 291
- 9-8 כוח והעתק במספר ממדים 293
- 9-8 מכפלת וקטור בווקטור: המכפלה הפנימית (הסקלרית) 297
- 9-9 עבודה כוללת ואנרגיה קינטית 299
- 9-10 הספק 304

סיכום פרק 9 306

פרק 10 אנרגיה פוטנציאלית ושימור אנרגיה 317

- 10-1 מבוא 318
- 10-2 תלות העבודה במסלול 318
- 10-3 אנרגיה פוטנציאלית כ"עבודה אגורה" 324
- 10-4 שימור אנרגיה מכנית 329
- 10-5 קריאת עקומת האנרגיה הפוטנציאלית 333

פרק 5 כוח שקול ותנועה דו-ממדית 127

- 5 מבוא 128
- 5 תנועה בליסטית 128
- 5 ניתוח תנועה בליסטית אידיאלית 131
- 5 העתק בשני ממדים 137
- 5 מהירות ממוצעת ורגעית 140
- 5 תאוצה ממוצעת ורגעית 142
- 5 תנועה מעגלית קצובה 145
- 5 חקירת תאוצה משיקית ותאוצה נורמלית 153
- כום פרק 5 158

פרק 6 זיהוי כוחות והשימוש בהם 171

- 6 חיבור כוחות בחיי היומיום 172
- 6 כוח שקול כסכום וקטורי 172
- 6 העבודה הנעשית על ידי גזים אידאליים 176
- 6 כוחות מגע 177
- 6 כוח גרר ומהירות סופית 192
- 6 הנחיות לשימוש בחוקי ניוטון 195
- 6 כוחות היסוד של הטבע 200
- 6 משוואות תנועה כמשוואות דיפרנציאליות 202
- 6 מערכות מואצות ועיקרון ד'אלמבר (D'Alembert) 266
- כום פרק 6 214

פרק 7 תנע קווי 227

- 7 התנגשויות והתפוצצויות 228
- 7 תנע קווי של חלקיק 228
- 7 מערכות חלקיקים מבודדות 230
- 7 מתקף ושינוי תנע 232
- 7 חוקי ניוטון ושימור תנע 237
- 7 התנגשויות פשוטות ושימור תנע 237
- 7 שימור תנע בשני ממדים 241

377 תשובות לתרגילי קריאה ובעיות בלתי זוגיות

387 זכויות לתמונות

389 מפתח העניינים

393 הסדרה המדעית

10-6 כוחות בלתי משמרים ואנרגיה 336

10-7 שימור אנרגיה 338

10-8 אנרגיה ושימור תנע בממד אחד 340

10-9 התנגשויות אלסטיות חד-ממדיות 343

10-10 שימור אנרגיה ותנע בשני ממדים 347

סיכום אנרגיה פוטנציאלית ושימור אנרגיה 350

365 נספחים

נספח א' ערכים של קבועים פיזיקליים 365

נספח ב' ערכים אסטרונומיים 366

נספח ג' נוסחאות מתמטיות 367

נספח ד' גורמי המרה 370

נספח ה' התכונות של היסודות הכימיים 373

נספח ו' הטבלה המחזורית 376

הקדמות לספר מבינים פיזיקה

הקדמה למהדורה העברית

סטודנט להנדסה הפוגש לראשונה את תורת הפיזיקה עלול לחוש כאדם שנקלע לארץ זרה. המושגים שהוא רגיל בהם בחיי היומיום כמו: מהירות, כוח ועבודה לובשים משמעויות חדשות לחלוטין. לצד הקושי של מכמני הפיזיקה, מרבית הסטודנטים חווים קושי נוסף, עד לפני חמש שנים לא היה ספר פיזיקה ברמה אקדמית בעברית. בשיחות עם סטודנטים ומרצים עלה הצורך בעריכת ספר פיזיקה בעברית עבור סטודנטים להנדסה ומדעים. בעקבות שיחות אלה ביצענו מחקר בנושאי קריאה ולמידה^{1,2}. התברר כי סטודנטים בשנה הראשונה ללימודיהם כמעט ואינם קוראים ספרי לימוד, ובמיוחד לא ספרי לימוד בפיזיקה. הסיבות לכך רבות; אחת הבולטות בהן היא השילוב בין צבר הקשיים בהם נתקל הסטודנט בתחילת לימודיו: הקושי בכניסה לעול הלימודים האקדמיים, ההתמודדות 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 של האקדמיה.

לאור זאת החליטה המכללה האקדמית להנדסה אורט בראודה, לפני חמש שנים, לפתח סביבת לימוד בהוראת פיזיקה ולהעמידה לרשות כל המוסדות להשכלה גבוהה בארץ.

בעקבות הופעת הסדרה "מבינים פיזיקה" זכינו לקבל תגובות נלהבות של סטודנטים ומרצים ממוסדות להשכלה גבוהה בארץ. פרופ' יגאל גלילי, ראש המחלקה להוראת המדעים באוניברסיטה העברית בירושלים, כתב על אחד מספרי הסדרה "מבינים פיזיקה":

"הספר נועד לקורסי מבוא בפיזיקה הניתנים לסטודנטים למדעים ולהנדסה בתחילת לימודיהם האקדמיים. קיימת חשיבות להופעת הספר, שהרי אין ספרי לימוד בעברית בפיזיקה ברמה אקדמית בהיקף ובאיכות שכזאת... מחברי הספר מרבים בהסברים שיכולים להוביל להכרות שיטתית של הפיזיקה מושגיה ויישומיה הבסיסיים בטכנולוגיה ובתחומים שונים... הספר עשיר במגוון נושאי התוכן, הדגמות בהירות, דוגמאות לבעיות מבוא ודרכי פתרון, שאלות, תרגילים, סיכומים, הערות ועוד. איכות הספר ותכנון הם תוצאה של מסורת ופיתוח הנמשך כבר לאורך עשרות שנים... אינני מכיר ספר לימוד אחר, הכתוב בשפה העברית, שיכול להתחרות במימדים אלו עם ספר זה."

כמענה לצרכי הסטודנטים ולאור הרצון לעדכן את הוראת הפיזיקה פותחה סביבה התומכת בהוראת הפיזיקה. סביבה זו מבוססת על ארבעה מרכיבים עיקריים. המרכיב הראשון סדרת הספרים 'מבינים פיזיקה' שהופיעה בארבעה חלקים - א. מכניקה, ב. חשמל, מגנטיות ואופטיקה ג. פיזיקה מודרנית ד. זורמים, גלים ותרמודינמיקה; המרכיב השני הוא אתר

1 Pundak, D. & Maharshak, A., (2010). Employing a marketing approach to create a learning environment for engineering student. **Research in Higher Education Journal**. <http://aabri.com/manuscripts/10452.pdf>.

2 פונדק, ד., הרשקוביץ, א., שחם, מ. (2010). מאפייני קריאה בספרי לימודים וחומרים מקוונים בקרב סטודנטים במכללה ובאוניברסיטה. על הגובה - כתב עת לענייני הוראה בחינוך הגבוה, 9, 20-25.

אינטרנטי לתמיכה בלמידת סטודנטים ובהוראה של מרצים בפיזיקה, ובו מופיעים: תקצירים מהספר, שאלות, הדמיות, מערכות מושגים, פתרונות לשאלות, סרטי וידאו והרצאות. כתובת האתר: <http://up.braude.ac.il>. בדרך זו אנו מקווים לאפשר עדכון מתמיד של נושאים הקשורים בהוראת הפיזיקה והזדמנות לשפר את הספר והאתר התומך בו. מרכיב שלישי המסייע בהוראת הפיזיקה הוא בודק המטלות ברשת - WebAssign. במערכת זו, שפותחה בתחילת המאה ה-21 בארה"ב, מופיעות שאלות מספר זה (ומעוד כמה וחמישים ספרים נוספים בפיזיקה) אותן ניתן להציג לסטודנטים באמצעות הרשת. המערכת עובדת בהצלחה, בגרסתה העברית, מזה עשר שנים במכללתנו ובמכללות נוספות, ומסייעת לסטודנטים ולמרצים בלמידה ובהוראה. כתובת האתר של בודק המטלות היא: www.wa2u.net. המרכיב הרביעי הוא סדרת הדמיות שפותחה על ידי אוניברסיטת קולורדו ומאפשרת לסטודנטים לחקור באמצעות הדמיות רכיבים רבים בתורת הפיזיקה ובמדעים אחרים. כתובת האתר היא: <http://phet.colorado.edu>.

סדרת הספרים "מבינים פיזיקה" פותחה לאורך כחמש שנים כאשר מלווים אותה לאורך כל הדרך שני עורכים מסורים. הראשון, מר דוד אגמון, העורך המדעי של הספר, איש אשכולות המפליא בידיעותיו הרחבות, בנוסף להיותו מורה מוכשר לפיזיקה. בעריכת הספרים הקפיד דוד על קלה כבחמורה והוסיף שאלות רבות. השני הוא דר' אהרון גרו מהטכניון - מכון טכנולוגי לישראל. אהרון מרצה מצטיין בעל יכולת מופלאה להבחין בפרטים מבלי לאבד את השלם, הטיב להגיה פעם אחר פעם את סדרת הספרים. בעצה אחת עם צוות העורכים הוחלט להתקין מחדש את הספר "מכניקה" בסדרה "מבינים פיזיקה". הספר המקורי היה כבד-משקל וחסר את הנוחות הנדרשת מספר לימוד. לפיכך הוחלט לפצל את הספר לשני חלקים. לכל פרק נוסף סיכום המאפשר לסטודנטים לבחון במבט קצר את עיקרי הנושאים שנידונו בפרק. במהדורה זו נצמדנו לסדר הפרקים של הספר המקורי. נוסף לחלק השני פרק 15 המקורי העוסק בזורמים. בשני החלקים יש עתה 17 פרקים.

מיזם פיתוח סביבת למידה חדשה, תרגום ועריכה של סדרת ספרים מאופיין במורכבות ודורש שיתוף פעולה נרחב וסיוע של גורמים רבים. זוהי הזדמנות נעימה להודות לחלק מהם. ברצוני להודות למיכל ברוק העורכת הגרפית של הסדרה שעמלה בכישרון, ימים ולילות, על הכנתה תוך התאמתה לכל הדרישות המדעיות והאסטטיות. לאביחי בלמס ושאדי עסאקלה - בוני אתר הסדרה, עמיתי ליחידת התקשוב בהוראה, תודות על הפגנת ידע ותושייה רבים בתרגום רעיונות פיזיקאליים לביטים ושורות קוד. לדר' זאב רובין מהמחלקה לפיזיקה במכללה, שכתב השלמות לספר המקורי. השלמותיו עוסקות: ביחידות וממדים (11-1), תאוצה משיקית ותאוצה נורמאלית (8-5), משואות תנועה (8-6), מערכות מואצות ועקרון ד'אלמבר (9-6), גרדיאנט וכוח משמר (11-10). תודתנו נתונה להוצאת Wiley על שנאותה להעניק לנו את זכויות התרגום, ולהוצאת מאגנס ומנהלה מר חי צבר שעבדו עמנו בשיתוף פעולה פורה בהפקה ובשיווק. לעונג היה לי לבלות עם עמיתי פרופ' אריה מהרשק בדיונים על שיפור ההוראה ופיתוח סביבות למידה והתרומה ניכרת בספר זה. עזרה חיונית הגישו לנו אנשי המנהלה במכללה: צביקה קרני - מנהל הכספים, ונתן שטיינפלד - החשב, שדאגו להיבטים חשובים בלעדיהם הספר לא היה רואה אור. אחרונים יבואו על הברכה מובילי החזון ואמונה בחשיבות פיתוח אמצעי לימוד והוראה, נשיאי המכללה האקדמית להנדסה אורט בראודה דר' שמריהו רוזנר, פרופ' יוחנן ארזי ז"ל ופרופ' אריה מהרשק הנשיא הנוכחי.

דר' דוד פונדק

ראש היחידה לתקשוב בהוראה

המכללה האקדמית להנדסה אורט בראודה

הקדמה

ברוכים הבאים למבינים פיזיקה. הספר מבוסס על המהדורה השישית לספרם של הלידיי, רזניק ו-ווקר, יסודות הפיזיקה, ולא אחת או מאזכרים אותו בשם HRW – המהדורה השישית. הכותבים הראשונים של טקסט HRW – המהדורה השישית ושל הטקסטים הקודמים לו היו דיוויד הלידיי ורוברט רזניק, והטקסטים שלהם היו רבי-מכר בתחום ספרי המבוא לפיזיקה בארבעים השנים האחרונות. ספריהם אלו קבעו את הרף לטקסטים רבים אחרים. אם כך אתם ודאי שואלים את עצמכם: "למה בכלל לשנות משהו מוצלח כל כך?" ננסה להסביר.

מדוע לשנות את הטקסט?

סטודנט לתואר שני בפיזיקה סיפר באחרונה שזמן מה הצליח רק בקושי להתמודד עם המחצית הראשונה של קורס מכניקה למתחילים, ואז פתאום הרגיש שהוא מתמודד בהצלחה רבה יותר עם הקורס. מה השתנה? האם היה לו רקע טוב יותר בחומר הלימוד החדש? לא, ברור שסטודנט זה למד דבר מה חשוב מאוד, משהו שמרבית המורים לפיזיקה היו רוצים ללמד את כל תלמידיהם כבר בתחילת הקורס. לא משנה עד כמה הסטודנטים חכמים, אפילו עד כמה מעולים תכנון הקורס בפיזיקה והוראה בו, הסטודנטים יצליחו יותר בלימודי הפיזיקה אם ילמדו לקרוא בעיון ספר לימוד הניתן להבנה.

סקרים מלמדים אותנו שהרוב הגדול של הסטודנטים בקורסי מבוא לפיזיקה אינם קוראים בעיון את ספרי הלימוד שלהם. שתי סיבות עיקריות לכך לדעתנו: (1) סטודנטים רבים מתלוננים שאי-אפשר להבין את ספרי הפיזיקה ושהם מופשטים מדי, ו-(2) הסטודנטים עסוקים מאוד במאבק הישרדות בין העבודה האקדמית שלהם, מחויבויות אישיות, עבודה, חיים חברתיים ותחביבים. לכן הם מפתחים אסטרטגיות כיצד לעבור את לימודי הפיזיקה שלהם בלי להשקיע זמן בקריאה מעמיקה. נתנו דעתנו לשתי הסיבות הללו גם יחד; שינינו את המהדורה השישית של יסודות הפיזיקה באופן שיקל על סטודנטים להבין ויספק למורה **תרגילי קריאה** נוספים ואסטרטגיות נוספות כדי לעודד סטודנטים לקרוא את הטקסט בתשומת לב. למרבה המזל אנו מנסים לשפר ספר לימוד מצוין, ספר שהמחבר הפעיל שלו, ג'רל ווקר, עמל בלא לאות כדי לעשות כל מהדורה חדשה שלו למרתקת ומובנת יותר.

בסעיפים הבאים אנו מציגים סיכום של האופן שבו הסתמכנו על HRW – המדורה השישית ועיצבנו אותו לכדי ספר לימוד.

סיפוריות בשירות ההבנה

אחת המטרות המרכזיות שלנו היא לסייע לסטודנטים להבין את הפיזיקה שהם לומדים. לא נוכל להגשים יעד זה אם סטודנטים יראו בפיזיקה מערכת של משוואות מתמטיות מנותקות שכל אחת מהן רלוונטית רק למספר קטן של מצבים ספציפיים. אנחנו מדגישים הבנה מושגית וכמותית ויוצרים כל הזמן קשרים בין משוואות מתמטיות ורעיונות מושגיים. כמו כן אנחנו מנסים להתבסס על רעיונות שסטודנטים מן הסתם כבר מבינים, על סמך המשאבים שהם מביאים עמם מחוויות היום יום שלהם.

במבינים פיזיקה ניסינו לספר סיפור שזורם מפרק לפרק. כל פרק מתחיל בסעיף מבוא שדן בחשיבותם של הנושאים החדשים בפרק זה, מסביר כיצד מבוסס הפרק על פרקים קודמים ומכין סטודנטים לפרקים הבאים. אנו שמים דגש מיוחד על מושגי יסוד שחוזרים לאורך כל

הספר. אנחנו משתמשים בהפניות רבות קדימה ואחורה כדי לחזק את הקישורים בין נושאים. כך למשל, במבוא לפרק 15, פרק העוסק בתנודות, אנו כותבים: "חקר התנועה ההרמונית הפשוטה (תה"פ) יקדם אמנם את הבנתנו במערכות מכניות, אך הבנה זו חיונית גם כדי להבין סוגיות מתחומי הגלים, החשמל, המגנטיות והאור, ובאלה נפגש בספר המשך. לבסוף, היכרות עם תה"פ היא בסיס להבנת הפיזיקה המודרנית, ובה גם להבנת אופיו הגלי של האור ולהבנת האופן שבו אטומים וגרעינים סופגים ופולטים אנרגיה".

דגש על תצפיות ניסוי

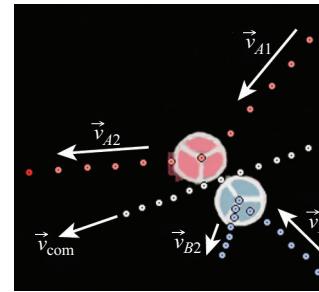
תצפיות וחוויות של ממש מחיי היום יום הן נקודת המוצא לפיתוח ביטויים מתמטיים. בניית תאוריות המבוססות על ניסויים היא מאפיין מרכזי של הספר. אנו בונים רעיונות על סמך ניסיון שכבר יש לסטודנטים או שיוכלו לרכוש בקלות בתצפיות שייעשו בתשומת לב.

במידת האפשר, המושגים הפיזיקליים והתאוריות שאנו מפתחים במבינים פיזיקה מבוססים על תצפיות פשוטות או נתונים ניסויים ממעבדות טיפוסיות של מבוא לפיזיקה. אנחנו רוצים שהקוראים שלנו יפתחו הרגל לשאול את עצמם: מה מרמזים הנתונים, התצפיות וההתנסויות שלנו על חוקי הטבע של הפיזיקה? כיצד אנו יודעים אם הצהרה נתונה נכונה? מדוע אנחנו מאמינים שפיתחנו מודלים נכונים לעולם?

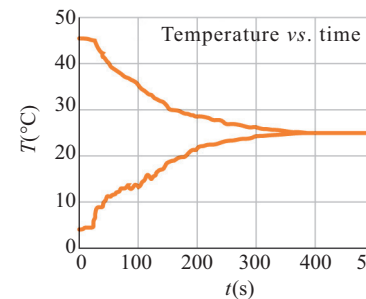
כדי להשיג מטרה זו הטקסט פותח לעתים קרובות בפרק של תיאור תצפיות שמוכרות לסטודנטים מחיי היום יום. עובדה זו עושה את מבינים פיזיקה לטקסט בעל רלוונטיות לחיי היום יום של סטודנטים, הטקסט מסתמך על ידע שכבר קיים אצלם. אנו מנסים לפעול על פי העיקרון של ארנולד ארונו: "תחילה צריך להציג את הרעיון, ואחר כך לתת לו שם"; כלומר, אנו עושים כל מאמץ להתחיל דיון בשפת יום יום כדי לתאר חוויות משותפות. רק אז אנו מציגים מונחים פיזיקליים פורמליים כדי לייצג את המושגים שהוצגו. כך למשל, תחילה אנו דנים בדחיפות ומשיכות מחיי היום יום ובהשפעתן על תנועתו של עצם, ורק אחר כך אנחנו מציגים את המונח 'כוח' או את החוק השני של ניוטון; תחילה אנחנו עוסקים בהצטמקותו של בלון בסביבה קרה ובהתקררות דלי מים לטמפרטורת החדר, ורק אחר כך אנחנו מציגים את חוק הגזים האידיאליים או את מושג העברת האנרגיה התרמית.

פילוסופיית 'הרעיון תחילה', השם אחר כך' מסייעת לבסס תבניות של קשרים בין מושגים שסטודנטים מנסים ללמוד לבין הידע שכבר יש להם. יש בה גם כדי לסייע לסטודנטים לפרש מחדש את חוויותיהם באופן שעולה בקנה אחד עם חוקים פיזיקליים.

האיורים והדוגמאות במבינים פיזיקה מציגים לעתים קרובות נתונים שהתקבלו ממכשירי מעבדה מודרניים, ממוחשבים. במכשירים אלו יש מערכות איסוף נתונים מבוססות-מחשב ותוכנות לניתוח וידאו דיגיטלי. אנחנו מציגים מכשירים אלו לסטודנטים בסוף פרק 1. דוגמאות לשיטות אלו מוצגות באיורים ה-1 ו-ה-2, ובאיור ה-3 בעמוד הבא. מאחר שמורים רבים משתמשים במכשירים ממוחשבים אלו במעבדה או לצורך הדגמות בהרצאות, המכשירים



איור 1-1 ■ ניתוח וידאו מראה את מרכז המסה של כדור בת שתי דיסקיות שנעה במהירות קבועה.



איור 2-2 ■ חיישני טמפרטורה אלקטרוניים מגלים גם מערבבים כמויות שוות של מים חמים וקרים, ומפרטורה הסופית היא ממוצע הטמפרטורות נחיליות.



איור 3-3 ■ ניתוח וידאו של תנועה אנושית חושף שבנפילה חופשית מרכז המסה של גוף פשוט-אברים נע בנתיב פרבולי תחת ההשפעה של כוחות הכבידה של כדור הארץ.

מהווים חלק מחוויית קורס המבוא לפיזיקה של מספר הולך וגדל מהסטודנטים שלנו.

לשימוש בנתוני אמת יש יתרונות אחדים. הוא מקשר בין הטקסט לבין ניסיונם של הסטודנטים בחלקים אחרים של הקורס, והוא מקשר את הטקסט ישירות לחוויות הסטודנטים בעולם האמיתי. בלי קשר לשאלה אם אכן משתמשים במכשירי איסוף נתונים וניתוח במעבדה של התלמיד, השימוש שלנו בנתונים מציאותיים במקום בנתונים אידאליים מסייע לסטודנטים לפתח הערכה איך הערכות וניתוח של נתונים תומכים בתאוריה.

השימוש במחקרים מתחום החינוך הפיזיקלי

במהלך הכתיבה מחדש של הטקסט ניצלנו שני ממצאים חשובים מתחום חקר החינוך הפיזיקלי. ממצא אחד הוא זיהוי מושגים סטודנטים מתקשים בהם במיוחד. השני הוא זיהוי אסטרטגיות למידה פעילה שיכולות לסייע לסטודנטים לפתח הבנה מוצקה יותר של הפיזיקה.

התמודדות עם קשיי למידה

מחקרים אקדמיים רבים עוסקים בקשיי הלמידה של תלמידי פיזיקה.³ עשינו מאמץ מרוכז להתמודד עם קשיים אלו. במבינים פיזיקה ייחדנו מחשבה רבה לדיון בנושאים שידוע כי הם עשויים לבלבל סטודנטים. אנו נוקטים גישה זו אפילו בנושאים כגון 'מהותם של כוחות והשפעתם על מהירות ושינויי מהירות', אף שלפיזיקאים מקצועיים הם עשויים להיראות מובנים מאליהם. לנושאים מתוחכמים יותר, שלעתים נדמה שהם מנוגדים להיגיון, אנחנו מייחדים תשומת לב רבה ומלווים אותם בדוגמאות שנועדו להעלות על פני השטח את תפיסותיהם של הסטודנטים ולתקנן. כך למשל, אנו יודעים שסטודנטים מתקשים להבין כוחות פסיביים, למשל כוחות ניצבים וכוחות חיכוך;⁴ איך יכול שולחן קשיח להפעיל כוח על ספר שמונח עליו? בסעיף 4-6 אנחנו מציגים מודל אידאלי של מוצק, דומה למזרן קפיצים; כוחות הדחיה בין האטומים בו פועלים כקפיצים. נוסף על כך, אנו מזמינים את הקוראים שלנו ללחוץ על שולחן באצבע ולחוות את העובדה שככל שהם לוחצים חזק יותר על השולחן, השולחן לוחץ עליהם חזק יותר בכיוון הנגדי.



איור 4-4 ■ לחיצה בכוח על מזרן קפיצים. המזרן מפעיל על האצבע כוח נגדי, בעל עצמה שווה.

שילוב הזדמנויות למידה פעילות

תכננו את מבינים פיזיקה כטקסט אינטראקטיבי יותר המסוגל לפתח חשיבה מעמיקה אצל הקורא. שמרנו על כמה מהשאלות המצוינות בסופי הפרקים של HRW – המהדורה השישית. בספר זה אנחנו קוראים לשאלות אלו 'תרגילי קריאה'. יצרנו תרגילי קריאה חדשים רבים המחייבים את הסטודנטים להרהר בחומר המובא בסעיפים חשובים בכל פרק. כך למשל, מיד אחרי קריאת סעיף 2-6 המציג תרשים כוחות דו-ממדי, הסטודנטים מוצאים את תרגיל קריאה 1-6. תרגיל זה בנוי כמבחן אמריקני, והוא מחייב את הסטודנטים לזהות את תרשים הכוחות של מסוק ששלושה כוחות פועלים עליו מכיוונים שונים זה מזה. המסויחים של השאלות מבוססים על בעיות נפוצות שהסטודנטים נתקלים בהן בבניית תרשימי כוחות. אם משתמשים בשאלות אלו במסגרת מטלות 'הוראה בזמן אמת' או במסגרת דיון קבוצתי כיתתי, סוג כזה של תרגיל קריאה יכול לסייע לסטודנטים ללמוד במהלך קריאתם כישורים חיוניים של פתרון בעיות.

³ L. C. McDermott and E. F. Redish, "Resource Letter PER-1: Physics Education Research," *Am. J. Phys.* 67, 755-767 (1999)

⁴ John J. Clement, "Expert novice similarities and instruction using analogies," *Int. J. Sci. Ed.* 20, 1271-1286 (1998)

יצרנו גם מערכת של דוגמאות אבן-בוהן. מדובר בבעיות לדוגמה שנבחרו בקפידה כדי לפתח כישורים מרכזיים של פתרון בעיות. בחרנו כמה מדוגמאות אלו מתוך האוסף הנהדר של בעיות לדוגמה ב-HRW – המהדורה השישית והוספנו עליהן גם כמה בעיות חדשות שחיברנו. כדי לשמר את הזרימה הסיפורית בכל פרק צמצמנו את המספר הכולל של בעיות לדוגמה לבעיות הדרושות כדי להדגים יישום עקרונות יסוד. כמו כן בחרנו דוגמאות אבן-בוהן המחייבות את הסטודנטים לשלב חשיבה מושגית וכישורים מתמטיים של פתרון בעיות. את מרבית דוגמאות אבן-בוהן אי-אפשר לפתור בטכניקות של הצבה פשוטה או של התאמת אלגוריתמים.

מתוך HRW – המהדורה השישית הוספנו בעיות חלופיות למערכת הבעיות המובאת בסוף כל פרק שיעילותן הוכחה בכיתה. הבעיות החדשות שנוספו מבוססות על מחקרים שבחנו את קשיי הלמידה של סטודנטים. רבות מבעיות חדשות אלו מחייבות הנמקה איכותית וקפדנית. הן מקשרות במפורש בין הבנה מושגית לבין פתרון בעיות כמותי. כללנו גם בעיות הערכה, בעיות ניתוח וידאו ובעיות מחיי היום יום או 'עיתרות הקשרים'.

הארגון והסגנון של מבינים פיזיקה שונו כדי לאפשר להשתמש בהם בקלות בתכנית הלימודים עם חומרים אחרים המבוססים על מחקרים.

ארגון מחדש לצורך עקיבות ובהירות

רצף המכניקה החדשה

המהדורה השישית של HRW וספרי מבוא אחרים לפיזיקה, העוסקים במכניקה קלאסית, מתבססים על רצף מוכר. הרצף מתחיל בפיתוח המשוואות הקינמטיות, כדי לתאר תנועה בעלת תאוצה קבועה. לאחר מכן עוסקים בדרך כלל בווקטורים דו-ממדיים ובקינמטיקה של תנועת קליעים; ואחר כך בא תורו של הטיפול בדינמיקה, ובמסגרתו מוצגים חוקי התנועה של ניוטון כדי לסייע לסטודנטים להבין תנועה חד-ממדית ודו-ממדית. לבסוף עוסקים בנושאי אנרגיה, שימור תנע ותנועה סיבובית.

לפני כ-12 שנים, כאשר פריסילה לווז, רון תורנטון ודייוויד סוקולוף שיתפו פעולה בפיתוח תכניות לימודים על בסיס מחקר, הם התמקדו בקשיים שסטודנטים נתקלו בהם כאשר התבקשו לטפל בווקטורים דו-ממדיים ולהבין את תנועתם של קליעים בטרם למדו דינמיקה. באותה עת המליץ ארנולד ארונו להציג את המושג 'תנע' לפני המושג 'אנרגיה'.⁵ ארונו טען ש-(1) המושג 'תנע' פשוט יותר ממושג 'אנרגיה', הן בהקשר ההיסטורי הן בהקשר המודרני, ו-(2) הלימוד של שימור תנע כרוך בפיתוח מושג 'מרכז מסה', מושג זה דרוש לשם פיתוח נאות של מושגי אנרגיה. נוסף על כך, היחסים בין מתקף לתנע הם ניסוח חלופי ברור של חוק התנועה השני של ניוטון. לכן, המקום הטבעי ביותר לו הוא אחרי סקירת חוקי ניוטון.

לצורך טיפול בדאגות אלו בעניין רצף המכניקה המסורתית התכנסה בשנת 1992 קבוצה קטנה של חוקרי חינוך פיזיקלי ומתכנני תכניות לימודים כדי לדון בהנהגתו של סדר חדש בתחום לימודי המכניקה.⁶ תוצאה אחת של התוועדותם הייתה שלווז, סוקולוף ות'ורנטון שילבו בהצלחה רצף חדש של נושאים בחלקי המכניקה של חומרי לימוד המהווים חלק מערכת הפיזיקה המתוארת

⁵ התכתבות פרטית בין ארנולד ארונו ופריסילה לווז במסמך שכותרתו "הערות ראשונות והצעות" מ-19 באוגוסט 1990; וכן Arnold Arons, *Development of Concepts of Physics* (Addison-Wesley, Reading MA, 1965)

⁶ The New Mechanics Conference was held August 6-7, 1992 at Tufts University. It was attended by Pat Cooney, Dewey Dykstra, David Hammer, David Hestenes, Priscilla Laws, Suzanne Lea, Lillian McDermott, Robert Morse, Hans Pfister, Edward F. Redish, David Sokoloff, and Ronald Thornton

להלן.⁷ החומרים כוללים סדנה בפיזיקה, את מודול המכניקה של מעבדת הפיזיקה בזמן אמת ואת הדגמות ההרצאה האינטראקטיביות. רצף זה נכלל בספר זה וחייב ארגון ניכר מחדש של פרקים 2 עד 10 ב-HRW – המהדורה השישית.

ברצף המכניקה החדשה שנכלל בפרקים 2 עד 10 של מבינים פיזיקה, נכללים:

- פרק 2: קינמטיקה חד-ממדית המתבססת על שימוש ביישומי תאוצה אופקית קבועה ונפילה חופשית אנכית
- פרק 3: חקר הדינמיקה החד-ממדית מתחיל ביישום חוקי התנועה של ניוטון במערכות שכוח אחד או יותר פועל בהן לאורך קו אחד. הקוראים בוחנים תצפיות המובילות להשערה ש'כבידה' היא כוח בלתי נראה קבוע הפועל אנכית כלפי מטה.
- פרק 4: טיפול בווקטורים דו-ממדיים, העתקות וקטורים, וקטורי יחידה ופירוק וקטורים לרכיביהם.
- פרק 5: חקר הקינמטיקה והדינמיקה מורחב לתנועות דו-ממדיות עם כוחות הפועלים לאורך קו אחד. הדוגמאות כוללות תנועת קליע ותנועה מעגלית.
- פרק 6: חקר הקינמטיקה והדינמיקה מורחב לתנועות דו-ממדיות עם כוחות דו-ממדיים.
- פרק 7 ו-8: הנושאים בפרקים אלו עוסקים במתקף ושינוי תנע, שימור תנע, מערכות חלקיקים, מרכז המסה ותנועת מרכז המסה של מערכת מבודדת.
- פרק 9 ו-10: פרקים אלו מציגים אנרגייה קינטית, עבודה, אנרגייה פוטנציאלית ושימור אנרגייה.

מתמטיקה בזמן אמת

ככלל, אנו מציגים נושאים מתמטיים 'בזמן אמת'. כך למשל, אנו מטפלים במושגים של וקטור חד-ממדי בפרק 2 לצד פיתוח מושגי מהירות ותאוצה חד-ממדיים. אנו דוחים את הצגתם של וקטורים דו ותלת ממדיים, חיבור וקטורי, ופרוק וקטור לרכיביו עד פרק 4, מיד לפני הצגת כוחות ותנועה דו-ממדית בפרקים 5 ו-6. איננו מציגים תוצרים וקטוריים לפני שהם דרושים. ההצגה של מכפלות סקלריות נדחתה עד פרק 9, ושם מוצג מושג העבודה הפיזיקלית. בדומה, המכפלה הווקטורית מוצגת בפעם הראשונה בפרק 11 לצד הטיפול במומנט הסיבוב.

שינויים בסימון

לעתים קרובות הסימון המתמטי עשוי לבלבל והערפול במשמעותו של סימן מתמטי עלול להקשות על סטודנט להבין יחס חשוב. קשה גם לפתור בעיות אם הסמלים המשמשים להציג כמויות אינם ברורים. להלן כמה מאפייני מפתח של שיטת הסימון החדשה:

- אנו נצמדים להנחיות העדכניות לשיטת סימון שהוציא המוסד האמריקני הלאומי לתקנים וטכנולוגיה, (SP 811) Special Publication 811.
- אנו מנסים לאזן בין רצוננו להשתמש בשיטת הסימון המוכרת לבין רצוננו להימנע מלהשתמש באותו סימן למשתנים שונים זה מזה. כך למשל, p משמשת לעתים קרובות לציין תנע, לחץ והספק. בחרנו להשתמש ב- p (אות קטנה) כדי לציין תנע, וב- P (אות גדולה) כדי לציין לחץ, מאחר ששני המשתנים מופיעים בנגזרות של התאוריה הקינטית.

⁷ Laws, P.W. "A New Order for Mechanics" pp. 125-136, *Proceedings of the Conference on the Introductory Physics Course*, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy New York, May 20-23, Jack Wilson, Ed. 1993 (John Wiley & Sons, New York 1997)

עם זה אנו נצמדים לדרך המקובלת שבה שימוש ב- P (אות גדולה) מציין הספק, מאחר שהיא אינה מופיעה ברגיל לצד לחץ במשוואות.

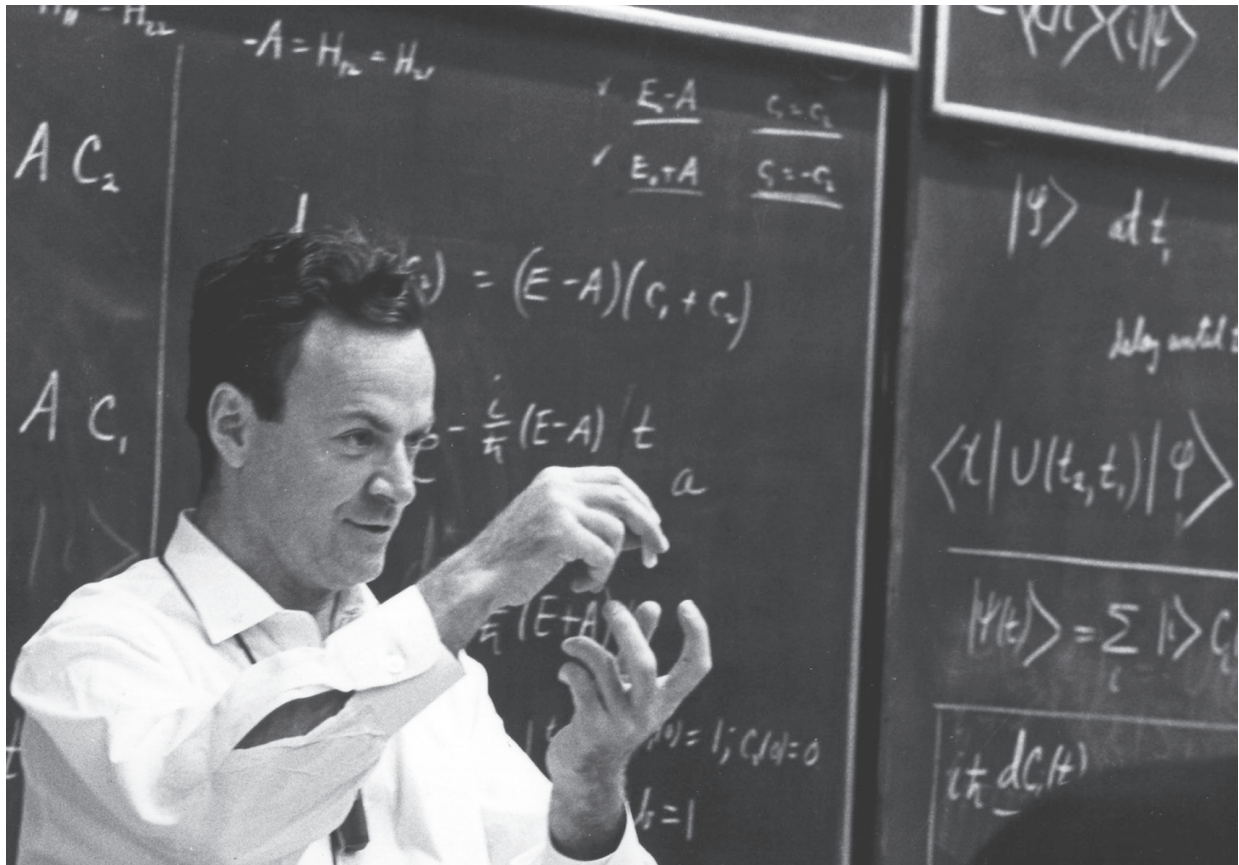
- אנו מציינים וקטורים בחץ ולא בהדגשה, כדי שאפשר יהיה להציג משוואות בכתב יד בדומה למשוואות מודפסות.
 - אנו מסמנים כל רכיב וקטורי באינדקס תחתי, כך הוא מקושר במפורש לציר הקואורדינטות שלו. בדרך זו אנו מסלקים את הערפול בשאלה אם כמות מייצגת גודל סקלרי או רכיב וקטורי שאינו סקלרי.
 - לעתים קרובות אנו משתמשים באינדקס תחתי כדי לאיית את שמותיהם של עצמים הקשורים למשתנים מתמטיים אף שמדריכים וסטודנטים ייטו להשתמש בקיצורים. אנחנו גם מדגישים את העובדה שעצם אחד מפעיל כוח על עצם אחר באמצעות חץ בכיתוב תחתי. כך למשל, הכוח שחבל מפעיל על בול יצוין כך: $\vec{F}_{\text{rope} \rightarrow \text{block}}$.
- מערך הסימונים שלנו מסוכם ביתר פירוט בנספח א'.

עידוד לקריאת טקסט

תיארנו שינויים אחדים שהנהגנו ושאלנו חשים שהם משפרים את הספר ואת יכולת הקריאה בו. אבל אפילו ספר הלימוד הטוב בעולם לא יוכל לסייע לסטודנטים שאינם קוראים אותו. לכן חשוב שמרצים יעשו מאמץ לעודד סטודנטים עסוקים לפתח הרגלי קריאה אפקטיביים. לדעתנו, הדרך האפקטיבית ביותר לגרום לסטודנטים לקרוא ספר לימוד היא להטיל עליהם אחרי כל שיעור קריאה של קטעי קריאה, תרגילי קריאה ושאלות אחרות בקשר לקריאה. לפניכם כמה דרכים אפקטיביות לעקוב אחר מטלות הקשורות לשאלות קריאה:

1. אנו מיישמים שיטה הנקראת 'הוראה בזמן אמת' (הב"א): סטודנטים מגישים את תשובותיהם לשאלות קריאה לפני השיעור ומשתמשים בדוא"ל פשוט או באחת המערכות הרבות הזמינות להגשת שיעורי בית באמצעות מחשב (כגון, Web-Assign או E-Grade). לעתים קרובות אפשר לקרוא די תשובות לפני כל שיעור כדי לזהות את השאלות הקשות הזקוקות לדיונים נוספים בשיעור;
 2. אפשר לבקש מהסטודנטים להביא את השאלות שהוטלו עליהם לכיתה ולהשתמש בתשובות בתור בסיס לדיונים בקבוצות קטנות במהלך השיעור;
 3. תוכלו לחלק שאלונים אמריקניים על כל סעיף או פרק. אפשר לדרג את השאלות אוטומטית באמצעות מערכת שיעורי בית ממוחשבת.
- ברור שכל הגישות הללו יעילות יותר אם הסטודנטים מקבלים ניקוד כלשהו על ביצוען. אפשר אפוא לדאוג לתמריץ - ציון לכל החומרים שהוגשו או למדגם אקראי מתוכם כדי להניע את הסטודנטים לקרוא בקביעות את הטקסט ולחשוב על התשובות לתרגילי הקריאה.

מבוא



מבחן הידע האנושי הוא הניסוי. אך מהו מקור הידע? מאין נובעים אותם החוקים שעלינו לבדוק? ... הניסוי עצמו מסייע ליצור חוקים אלה, בכך שהוא מספק לנו רמזים. אך בנוסף נדרש דמיון כדי ליצור מרמזים אלו הכללות - לנחש מהן התבניות המופלאות, הפשוטות והמוזרות הנמצאות בבסיס כל הכללות, ואז יש לשוב ולבחון אותן באמצעות הניסוי, כדי להיווכח אם אכן ניחשנו נכונה¹.

1 R.P. Feynman *The Feynman Lectures on Physics*, Ch.1. (Addison-Wesley, Reading, MA, 1964).

טבעם של מדע הפיזיקה ולימודי הפיזיקה

ברוכים הבאים אל לימודי הפיזיקה. הפיזיקה היא המדע העוסק בחקר עולם החומר, שמטרתו מציאת דרכים להבנת הדברים שאנו רואים ומודדים. כפי שכתב ריצ'רד פיינמן, המורה מעורר ההשראה: "ההתקדמות בכל מדעי הטבע נשענת על יחסי הגומלין שבין הניסוי לתיאוריה"¹.

הנקודה המרכזית היא שבלימודי הפיזיקה עליכם להשוות ולהציב תדיר את תצפיותיכם כנגד האינטואיציות והציפיות שלכם. לעיתים תתאמתנה צפיותיכם, לעיתים הן תהינה נכונות בחלקן ולעיתים הן תהינה שגויות לחלוטין. עריכת השוואה בין תצפיותיכם לבין האינטואיציה שלכם לא רק שתסייע לכם ללמוד פיזיקה, אלא אף תעזור לכם בהבנת הדרך שבה מתהווה הידע המדעי.

הפיזיקה אמורה לסייע לכם בהבנת הדרך שבה מתנהל העולם החומרי. אם תופעה פיזיקלית איננה מתקבלת על דעתכם, עליכם להוסיף ולהרהר בה. יש להוסיף ולנתח את התצפיות והניסויים הקשורים בה ולבחון את משמעותם. איינשטיין אמר "הפיזיקה אינה אלא עידון של ההיגיון הפשוט." הדגש כאן הוא על "עידון". הפיזיקה היא יותר מאשר שכל ישר. היא היגיון פשוט השומר בדרך עקבית על התייחסות אל הניסוי ואל התיאוריה גם יחד.

במובן מסוים לימוד הפיזיקה נראה פשוט יותר מלימודי הביולוגיה או הכימיה. קיימים בפיזיקה פחות גורמים שיש לבחון, והמערכות שעוסקים בהן פשוטות יותר. אם תערוך רשימה של כל המשוואות שתפגשו במהלך קורס בפיזיקה, מספרן קטן לאין שיעור בהשוואה למספר האורגניזמים שיפגוש סטודנט בקורס לביולוגיה או למספר הריאקציות הכימיות שבהן יתקלו סטודנטים בקורס הכימיה. בנוסף לכך התופעות הפיזיקליות נראות פשוטות יחסית. מערכת המורכבת מכדור מתגלגל במדרון או מסוללה המחוברת לנורה פשוטה יותר מתמנון או מתרכובת של ציקלוקסאן. אך סטודנטים רבים טוענים כי לימוד קורס המבוא בפיזיקה קשה יותר מקורסי מבוא בשאר המדעים. מה קורה פה? אחת הסיבות היא שקל לדבוק בדרך החשיבה לפיה הפיזיקה היא אסופת משוואות חסרות קשר שחייבים לשנן. אין זה כך! ניתן לגזור את מרבית המשוואות המופיעות בקורסי היסוד בפיזיקה ממספר קשרים פיזיקליים קטן יחסית.

אם תמקדו את מאמציכם בניסיון לזכור את תכונותיהן של מאות מערכות נפרדות, עד מהרה תכרעו תחת העומס. במקום זאת עליכם להתמקד בטבעם של תהליכים מדעיים על ידי לימוד מספר מועט של מערכות אידיאליות. כיצד תוכלו לומר האם ההשערה שלכם לגבי התנהגותה של מערכת פיזיקלית נכונה או שגויה? כיצד חוקר מגלה או יוצר "חוק מדעי"? כיצד ניתן לבטוח בכך שתיאוריה או חוק אכן תקפים? שאלות אלו הן קריטיות לצורך פתרון שאלות מהעולם האמיתי כמו: איך לייצר שבב מחשב? כיצד לזהות מחלה? או איך ניתן לשפר את הישגיו של מתעמל? המפתח להבנת הפיזיקה הם מאמציכם ללמוד את הקשרים הפונקציונאליים היסודיים שבין הגדלים הפיזיקליים וליישמם לצורך פתרון בעיות מדעיות.

אמנות הפשטות

בפיזיקה אנו מנסים להבין את החוקים השולטים בהתנהגות עולם הטבע. אך עולם הטבע הוא מקום מורכב להפליא. לכן, נתחיל בבחינת מערכת פשוטה ביותר, המאפשרת לנו לצפות ולהסביר את אופי התנהגותה. לדוגמא: כאשר לומדים תנועה נתחיל עם גוף קטן שניתן להתעלם ממבנהו וצורתו. נניח כי כדורגל אינו אלא גוש קטן. נמצא כיצד הוא נע לאחר שנבעט ורק כוח

1 R.P. Feynman *The Feynman Lectures on Physics*, Ch.1. (Addison-Wesley, Reading, MA, 1964).

הכבידה משפיע עליו. לשם כך נניח שהוא נע בריק ואינו מסתובב או מתעוות. כמוכן שהנחות אלה אינן מתאימות לכדורגל אמיתי! אך הן מספקות נקודת מוצא מצוינת להבנתן של תנועות יסוד. התיאור האידיאלי שבחרנו פועל טוב למדי לאורך מרחק קטן יחסית (מספר מטרים) ובמהירויות קטנות יחסית (פחות מ- 30 קמ"ש). ככל שנגביר את מהירות הכדור או נגדיל את המרחק שיעבור, חשיבותה של השפעת האוויר תגדל. למרות זאת, הסיבוכים שהוספנו ניתנים לטיפול. לאחר שתבין את עקרונות התנועה, תוכל לצרף פרטים נוספים אל "המודל" שלך, לקחת בחשבון את השפעת האוויר ולהבין מצב הקרוב יותר למציאות, ובכך תגדיל את מספר המצבים שעמם תוכל להתמודד.

אסטרטגיה שבה נוקטים פיזיקאים בתחילה היא הבנה טובה במידת האפשר של מערכות פשוטות, באמצעות שילובם של חוקים פיזיקליים המתארים מערכות אלה. לאחר שהושלמה משימה זו בהצלחה, הצעד הבא יהיה צרוף עוד ועוד מרכיבים מהעולם האמיתי למערכת, בכל שלב נוסף מרכיב אחד. זהו התהליך שבו נוהגים חוקרים לתרום לגוף הידע רב-העוצמה הקרוי פיזיקה.



FoxTrot

by Bill Amend



איור מ-1 ■ ג'ונסון מפרט את כל ההנחות שביצע, בעת פתרון השאלה.



איור מ-2 ■ שני כדורים בעלי מסות שונות נופלים באותה תאוצה, בכל פעם שניתן להזניח את התנגדות האוויר.

צפו להפתעות

סביר שתפגשו הפתעות רבות במהלך לימודי הפיזיקה ולא תצטרכו להמתין להן עד לימודי תורת היחסות או תורת הקוונטים (למרות ששני נושאים אלה מעוררי עניין ומשעשעים להפליא). אפילו תופעות פיזיקליות שנוצגו בפרקי הפתיחה של ספר זה חושפות עובדות יומיומיות שאנשים רבים מופתעים לגלותן. לדוגמא: נניח שאתם אווזים שני כדורים דומים שהאחד עשוי עופרת והשני עשוי פלסטיק ומשקל כדור העופרת פי עשרים ממשקל כדור הפלסטיק. אתם עומדים על כיסא הניצב איתן על הרצפה ושומטים את שני הכדורים בו-זמנית, הכדורים יפלו לאורך כשני מטרים ויגיעו לרצפה כמעט באותו הזמן. מדוע כדור העופרת אינו נע מהר יותר? או מדוע גוף השקוע במים שוקל פחות מאשר מחוצה להם, ופחת המשקל שווה למשקל המים שאת מקומם תפס הגוף? כיצד קשורים המים לכל זה? המים הללו כבר נדחו! כאשר מחברים שתי נורות זהות לסוללה, אם תחברו אותן בדרך אחת שתיהן תארנה בעוצמה כפולה מזו של נורה בודדת המחוברת לסוללה, אך אם תחברו אותן בדרך אחרת הן תארנה רק במחצית העוצמה של נורה בודדת. הכיצד? מדוע זה כך? ספר זה עתיר בהפתעות שכאלה.

הסתייעו בספר זה ככלי למידה

ספר לימוד זה הוא אחד ממקורות למידה רבים שעליכם להסתייע בהם במהלך לימודי הפיזיקה. קיימת חשיבות רבה שתקראו בספר זה באופן קבוע ותענו על תרגילי הקריאה המופיעים בסיומם של קטעים רבים בכל פרקי הספר. ניסינו להציג באמצעותם הן תוצאות ניסויים התומכות בתיאוריות והן מסקנות שסייעו בפיתוח תיאוריות. מכל מקום, תוכלו להבין פיזיקה רק לאחר שתבצעו בעצמכם תצפיות ותהיו מעורבים באופן פעיל בהסקת מסקנות. לכן, קיימת חשיבות מכרעת שתצפו בתופעות פיזיקליות או תבחנו בתשומת-לב את תוצאות הניסויים שנתאר. לאחר מכן עליכם לחשוב האם ההסברים שאנו מספקים מתקבלים על דעתכם. בנוסף, עליכם לבחון ולעדן את הבנת המושגים התיאורטיים על ידי שימוש בהם במהלך פתרון השאלות המופיעות בסיום כל פרק בספר. פתרון השאלות דורש ממך הפעלת עקרונות פיזיקליים שלמדת ושימוש ביחסים מתמטיים המתארים עקרונות אלה. לבסוף, ייתכן שתמצו לבחון את הבנתכם על ידי ניבוי תוצאותיהם של ניסויים שניתן לערוך במעבדה של קורסי היסוד בפיזיקה.

אנו מקווים שספר זה יגרום לכם ליהנות מלימוד הפיזיקה בדומה להנאה שאנו שאבנו מהם.

משמאל לימין: פרסילה ו. לוון, אדווארד פ. רדיש, קרן קמינגז, ופטריק ג'. קוני.
צלום: דוד הילדברנד.



תשובות לתרגילי קריאה ובעיות בלתי זוגיות

(תשובות הדורשות הוכחה, גרפים או פתרון ארוך אינן נכללות כאן)

פרק 1

ת.ק. 1-7: (א) נכון, $1 \text{ min}/60 \text{ s} = 1$ מפני שדקה אחת ו-60 שניות הם בדיוק אותו משך זמן. אך היחס $1 = 1/60$ הינו חסר משמעות, כאשר מסלקים את היחידות. (ב) בעזרת גורמי המרה והמרה בשרשת מספר הדקות ביום הוא:

$$1 \text{ d} = (1 \text{ d}) \left(\frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \right) \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \right) = 1440 \text{ min}$$

ת.ק. 1-8: (א) 2. (ב) מדויק, אם זה מספר הפרות שנספר. (ג) 6. זכרו שאין לסיפור את האפסים משמאל. (ד) 7. יש למנות את האפסים בסיום המספר. (ה) מדויק, על פי הגדרה.

ת.ק. 1-9: (א) 11. (ב) סביר 3, אך אין ודאות בכך. (ג) $2.09 \times 10^{10} \text{ ft}$. (ד) 10^{10} ft .

ת.ק. 1-10: (א) יש לשמור על כל הספרות לצורך חישובי ביניים. כל יש להשתמש ב- $A = 1.96 \text{ cm}^2$ לצורך חישוב הנפח V . (ב) 2.7 cm^3 , במקרה זו התשובה אינה יכולה להכין מספר גדול יותר של ספרות משמעותיות ממספרן בנתוני הבעיה. (ג) 2.8 cm^3 .

ת.ק. 1-11: (א) 27, (ב) 198.0, (ג) 0.6, (ד) 0.9986, התבונן בערכת פונקציות בנספח א חלק ה'. (ה) היות וחמש הוא מספר מדויק, ארבעת הספרות המשמעותיות באורך הממוצע מגביל את תשובה ל- 10.67 m .

ת.ק. 1-12: (א) 0.01 s, (ב) 0.01 s מתוך 1.78 s או $0.00562 = 0.01/1.78$ או לערך 0.6%.

בעיות

1. (a) 0.98 ft/ns; (b) 0.30 mm/ps. 3. C, D, A, B, E; the important criterion is the constancy of the daily variation, not its magnitude. 5. 0.12 AU/min 7. 2.1 h. 9. $1.21 \times 10^{12} \mu\text{s}$. 11. (a) 160 rods; (b) 40 chains. 13. (a) $4.00 \times 10^4 \text{ km}$; (b) $5.10 \times 10^8 \text{ km}^2$; (c) $1.08 \times 10^{12} \text{ km}^3$. 15. $1.9 \times 10^{22} \text{ cm}^3$. 17. $1.1 \times 10^3 \text{ acre-feet}$. 19. 9.0×10^{49} . 21. (a) 10^3 kg ; (b) 158

ת.ק. 1-1: הדוגמאות כוללות שנייה או שעה, מטר או אינטש, גרם או קילוגרם.

ת.ק. 1-2: יש להניח כי שאורך סרגל של 30 ס"מ ישנתה פחות לאורך זמן, בהשוואה לאורך כף רגלך, במיוחד אם אתה עדיין גדל.

ת.ק. 1-3: אורך היום או פרק הזמן שנמשך סיבוב של 360° שמבצע כדור הארץ סביב צירו אינם קבועים, מפני מהירות הסיבוב של כדור הארץ קטינה, בקצב איטי מאד, לאורך השנים.

ת.ק. 1-4: (א) היות ומשך סיבוב של 360° אורך 24 שעות או 4 דקות לכל מעלה, או 240 שניות כל מעלה, הרי במשך 20 דקות ו-13 שניות קו אורך השתנה ב- $5.05^\circ = (1213 \text{ s})/(240 \text{ s/deg})$. (ב) אם השעון ממחר ב-2 דקות או 120 שניות, השגיאה בקו האורך תהיה ב- $0.5^\circ = (120 \text{ s})/(240 \text{ s/degree})$ (ג) היקף כדור הארץ הוא בקרוב 40,000 ק"מ כדי למצוא את מדידת הסטייה נעזר ביחס $0.5^\circ/360^\circ = x/(40,000)$.

ת.ק. 1-5: (א) אם השעונים מסונכרנים, הופעת הברק תימדד על ידכם באותו זמן. אף משך הזמן בין הופעת הברק למשמע הרעם יהיה שווה בתנאי ששעוניכם מדויקים ואתם סמוכים אחד לשני. (ב) לא! השעון הקטן שסיבובו נמשך 12 שעות מראה כי השעה 7:44 או 464 דקות מאז הצביע על השעה 12. כלומר החלק היחסי של היום עליו מורה השעון הוא: $0.322 = 464 \text{ min}/(1440 \text{ min/day})$. השעון הגדול שסיבובו נמשך 10 שעות מראה כי השעה היא 8.23, מאז החל את סיבובו, כלומר החלק היחסי של היום עליו מורה השעון הוא: $0.41 = 8.23/(20 \text{ hr/day})$.

ת.ק. 1-6: אחת הדרכים היא להסתייע במאזנים כדי למדוד כמות חומר השווה לק"ג אחד. אז לחלק את החומר ל-1000 חלקים השווים בנפח. בהנחה שצפיפות החומר אחידה, הרי מסתו של כל חלק היא גרם אחד. ניתן עתה למדוד את מסת הגוף באמצעות החלקים שמסתם גרם אחד.

opposite to its initial velocity. **19.** (a) m/s^2 , m/s^3 ; (b) 1.0 s; (c) 82 m; (d) -80 m; (e) 0, -12 , -36 , -72 m/s; (f) -6 , -18 , -30 , -42 m/s². **21.** 0.10 m. **23.** (a) 1.6 m/s; (b) 18 m/s. **25.** (a) 3.1×10^6 s = 1.2 months; (b) 4.6×10^{13} m. **27.** 1.62×10^{15} m/s². **29.** 2.5 s. **31.** (a) 3.56 m/s²; (b) 8.43 m/s. **33.** (a) 5.00 m/s; (b) 1.67 m/s²; (c) 7.50 m. **35.** (a) 0.74 s; (b) -6.2 m/s². **37.** (a) 10.6 m; (b) 41.5 s. **39.** (a) 30 s; (b) 300 m. **41.** (a) 54 m, 18 m/s, -12 m/s²; (b) 64 m at $t = 4.0$ s; (c) 24 m/s at $t = 2.0$ s; (d) -24 m/s²; (e) 18 m/s. **49.** (a) 0.75 s; (b) 50 m. **57.** Since there is some latitude in what might be considered "the right answer" here, we have elected to mention some Web sites (current as of May 2002) where graphs for model rocket kinematics are shown: <http://www.rocket-roar.com/rap/alt.html>; <http://mks.niobrara.com/altitude.html>; <http://www.boilerbay.com/rockets/>; **59.** 40 m.

פרק 3

ת.ק. 3-1: (א) מהירות העגלה על השטיח המחוּספס יורד לאפס במשך $t = 1.1$ s. (ב) מהירות העגלה על המסילה בזמן $t = 1.1$ s היא בקרוב 0.65 m/s, לכן היא נעה ב- $(0.65$ m/s/ 0.80 m/s) או 81% מהמהירות המקורית.

ת.ק. 3-2: (א) במעלית או מכונית בזמן האצה או בלימה, או בקרוסלה הנעה במהירות זוויתית קבועה. (ב) אדם מרגיש כבד יותר בזמן האצה כלפי מעלה וקל יותר בזמן בלימה בתנועה כלפי מעלה. גוף, כמו חרוז למשל יתחיל לנוע בתנועה מעגלית ללא סיבה נראית לעין בזמן תנועה בקרוסלה.

ת.ק. 3-3: (א) אין תאוצה בזמן: החלקה של בול על פני שולחן כאשר פועל עליו כוח קטן קבוע, או דחיפה חזקה של גוף כגודל כמו מקרר או מכונית וכו'. כתוצאה מהפעלת הכוח הגופים נעים במהירות קבועה או שאינם נעים כלל. (ב) תאוצה: דחיפה חזקה של גוף קל על פני שולחן חלק, דחיפה של כדור מתגלגל, דחיפה או משיכה של אדם היושב על עגלה וכיוב'.

ת.ק. 3-4: ניתן לתלות קצה אחד של הגומייה על הוו ואת הקצה השני לקפיץ המכויל היטב. יש לרשום את האורך הרפוי של הגומייה כאשר לא פועל עליה כוח. עתה נתחיל למשוך את המאזניים עד שהמחוג יורה על 1 N ואז יש לרשום את האורך החדש של הגומייה. בדרך זו ניתן להוסיף ולרשום את אורך הגומייה כאשר מפעילים כוחות של 2 N, 3 N, וכן הלאה. בדרך זו ניתן ליצור טבלה או גרף של הכוח ביחס לאורך הגומייה.

ת.ק. 3-5: (א) $\vec{F} = (-26 \text{ N})\hat{i}$, $\vec{a} = (-0.42 \text{ m/s}^2)\hat{i}$ (א) $m = F/a =$ (ב) $\vec{F} = (-26 \text{ N})\hat{i}$, $\vec{a} = (-0.42 \text{ m/s}^2)\hat{i}$ (א) 62 kg (ג) 62 kg

kg/s. **23.** (a) 1.18×10^{-29} m³. **25.** 3.8 mg/s. **27.** 8×10^2 kg. **29.** 6.0×10^{26} . **31.** (a) 60.8 W; (b) 43.3 Z. **33.** 89 km. **35.** 8.8×10^{36} . **37.** 700 to 1500. **39.** (a) 293 U.S. bushels; (b) 3.8×10^3 U.S. bushels. **41.** 9.4×10^{-3} . **43.** 5.95 km. **45.** 1.9×10^5 kg. **47.** 2×10^4 to 4×10^4 . **49.** 10.7. **59.** (a) 13 597 k (b) 4917 L; (c) 6172 kg; (d) 20 075 L; (e) 45%

פרק 2

ת.ק. 2-1: (א), (ב), (ג) ו-(ד)

ת.ק. 2-2: הסדר הנכון (ג), (ב), ו-(א)

ת.ק. 2-3: כן, העתק יכול להיות חיובי כל עוד החלקיק נע לכיוון זרם שלילי.

ת.ק. 2-4: (א) המהירות הממוצעת היא העתק חלקי משך זמן תנועה, $\langle v_x \rangle = 10 \text{ mi}/30 \text{ min} = 0.33 \text{ mi}/\text{min}$, גודל המהירות הממוצעת הוא המרחק הכולל חלקי הזמן הכולל $\langle s \rangle = 30 \text{ mi}/30 \text{ min} = 1 \text{ mi}/\text{min}$. (ג) התשובות שונות מפני שגודל העתק שונה מגודל המרחק הכולל שעברתם.

ת.ק. 2-5: גודל המהירות הרגעית, מד המהירות מציין את גודל המהירות ברגע מסוים, לא את התאוצה ולא את הכיוון.

ת.ק. 2-6: (א) יש לזכור שהמהירות הרגעית היא נגזרת העתק ביחס לזמן. המהירות נותרת קבועה אם אינה משתנת בזמן. משוואות המיקום ו-4 מצביעות על מהירות קבועה. (ב) המהירות שלילית במשוואות 3-1.

ת.ק. 2-7: בזמן החזרה ל- x_1 גודל העתק $\Delta x = x_1 - x_1$ שווה לאפס. כן גם המהירות הממוצעת $\Delta x/\Delta t$ שווה לאפס.

ת.ק. 2-8: (א) +, (ב) -, (ג) -, (ד) +; יש לזכור כי \vec{a} יש אותו כיוון כמו ל- \vec{v} או ל- $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$.

ת.ק. 2-9: ניתן להסתייע במשוואות של טבלה 1-2 כאשר a_x קבוע. ייחס לנגזרת השנייה של המיקום ביחס t כדי למצוא את a_x . רק משוואות 1, 3 ו-4 התאוצה קבועה, יש לזכור כי גם $a_x = 0$ היא תאוצה קבועה.

עיות

1. 414 ms. **3.** (a) +40 km/h; (b) 40 km/h. **5.** (a) 73 km/h; (b) 68 km/h; (c) 70 km/h; (d) 0. **7.** (a) 0, -2 , 0, 12 m; (b) +12 m; (c) +7 m/s. **9.** 1.4 m. **11.** (a) -6 m/s; (b) negative x direction; (c) 6 m/s; (d) first smaller, then zero, and then larger; (e) yes ($t = 2$ s); (f) no. **13.** 100 m. **15.** (a) velocity squared; (b) acceleration; (c) m^2/s^2 , m/s^2 . **17.** 20 m/s², in the direction