

מכניקה

אינכם יכולים לערר בלי שיוצרו בכם -
זה האוק השלישי של ניוטון!



תנועה על קו ישר



המדענים היוונים הקדומים, לפני למעלה מ-2000 שנה, הכירו רבים מן הרעיונות שאנו לומדים כיום במסגרת הפיסיקה; הם היטיבו, למשל, לתאר אחדות מתכונות האור. לא-כן הדבר ביחס לתנועת הגופים. כפי הנראה, הראשון שחקר ברצינות את תופעת התנועה היה אריסטו - המדען-הפילוסוף הבולט ביותר ביוון הקדומה. אריסטו ניסה להסביר את תופעת התנועה בדרך של חלוקה וסיווג.

אריסטו הציע להבחין בין שני סוגים עיקריים של תנועה: תנועה טבעית ותנועה מאולצת. נתאר בקיצור נמרץ את שני סוגי התנועה שתיאר, לא ממש כחומר לימוד בפיסיקה, אלא כרקע היסטורי לתפישה הפיסיקלית שלנו כיום.

"תנועה טבעית" מקורה - על-פי אריסטו - באופיים של הגופים. לפי תפישתו, לכל גוף בעולם יש מקום ראוי לו, בהתאם לאופיו ולטבעו; כל גוף שאינו נמצא במקום הראוי לו על-פי טבעו, שואף להגיע למקומו זה. אבן נוטה ליפול למטה, מפני שמקורה בקרקע. עשן עולה אל האוויר, מפני שהוא מרכיב של האוויר. נוצה, הכוללת בתוכה אוויר, אך בעיקר חומרים שמקורם הראשוני בקרקע, נוטה ליפול אל הקרקע, אם כי לא באותה מהירות כמו אבן, שכולה קרקעיות. מאחר שההנחה היתה כי גופים גדולים עושים מאמץ גדול יותר להגיע למקום הראוי להם מאשר גופים קטנים, חשבו כי גופים נופלים במהירות התלויה במשקלם: ככל שהגוף כבד יותר הוא נופל מהר יותר, כך טענו.

**התנועה על-פי
אריסטו**

תנועה טבעית יכולה להיות בקו ישר כלפי מטה או כלפי מעלה - כך הוא המצב על-פני כדור הארץ, או שהיא יכולה להיות מעגלית - כך נעים גרמי השמים. שלא כמו תנועה ישרה כלפי מעלה או כלפי מטה, התנועה המעגלית תוארה כתנועה שאין לה התחלה ואין לה סוף, והגופים השמימיים נתפשו כסובבים והולכים במסלוליהם הקבועים מבלי לסטות מהם. אריסטו האמין כי חוקי התנועה השולטים בגרמי השמים שונים מן החוקים הקבועים כיצד נעים הגופים על-פני כדור הארץ; הוא טען כי גרמי השמים הם גופים כדוריים מושלמים, העשויים מחומר מושלם ובלתי משתנה, חומר שמימי טהור, אותו כינה בשם אתר (העצם השמימי היחיד שהשינויים המתרחשים בו ניכרים לעין-כל הוא הירח); בימי הביניים הסבירו זאת בעזרת מונחים שהיו מקובלים בנצרות: הירח, שהוא גרם-השמים הקרוב ביותר לכדור הארץ, "נדבק והזדהם" בחוסר השלמות של כדור הארץ ושל יושביו, המושחתים-מטבעם).

תנועה מאולצת - סוג התנועה השני לפי גירסתו של אריסטו - מקורה הוא פעולתם של כוחות: כוחות דחיפה או משיכה. תנועה מאולצת היא תנועה הנכפית על גוף. אדם הדוחף עגלה או מרים סל מאלץ עצמים אלה לנוע, בדיוק כפי שעושה מי שמשליך אבן או מי שמתגבר על יריבו במשיכת-חבל וגורם לו לנוע ולהפסיד בהתמודדות. הרוח כופה על מפרשית לנוע. מי שיטפון כופים תנועה על סלעים וגזעים הנקרים בדרכם. לפי תפישתו של אריסטו, התנועה המאולצת היא תנועה המוקנית לגופים על-ידי גורם חיצוני - אין הם נעים מעצמם אלא נדחפים או נמשכים.

מושג התנועה המאולצת עורר קשיים, מאחר שלא תמיד ניתן היה להצביע בבירור על גורם חיצוני מושך או דוחף. למשל: מיתר הקשת דוחף את החץ כל עוד החץ לא נורה; ואולם מה ממשיך להניע את החץ במעופו? צריך היה להצביע על גורם אחר, נוסף למיתר, הדוחף או מושך את החץ במהלך מעופו. ההסבר שניתן היה כי בעת שהחץ חוצה את האוויר הוא נדחף קדימה בעזרת תופעה של "סחיטה" - מאחורי זנבו של החץ שואף האוויר לשוב ולתפוס את המקום שפינה החץ, וזאת כדי למנוע הופעת ריק (ואקום). לפי טענה זו, החץ נדחף דרך האוויר כשם שפיסת סבון נדחפת באמבטיה אם צובטים אותה בצד אחד.

אריסטו (384 - 322 לפנה"ס)



לספריה המפורסמת באלכסנדריה. במחצית השנייה של האלף הראשון לספירה (בערך בין השנים 476 ל-1000) דעכה רמת ההשכלה ברוב אזוירי אירופה וכתביו של אריסטו נשכחו ואף אבדו, לא כך היה בביזנטיון ובאימפריה האיסלמית, ששימרו את התרבות. במאות 11-12 שבו ונדעו כתבי אריסטו למשכילי אירופה וכתביו תורגמו ללטינית. הכנסייה הנוצרית, שבאותם ימים היתה בעלת השפעה מרכזית בתחומי הפוליטיקה והמדע במערב אירופה, דחתה מלכתחילה את עבודותיו המדעיות של אריסטו, אך כעבור זמן אימצה את כתביו לחיקה, והם הפכו לחלק מן האמונה הנוצרית התקנית. מאז, ובמשך זמן רב, מי שהעז לחלוק על טיעונו של אריסטו נחשב כאילו תקף את הכנסייה הנוצרית, ופירושו הדבר היה אי-נעימות רבה ובמקרים רבים סכנה ממשית ביותר.

פילוסוף, מדען ומחנך ביוון הקדומה. אריסטו היה בנו של רופא מלך מקדוניה. בן 17 בא אל האקדמיה של אפלטון, שם למד ועבד במשך 20 שנה, עד מותו של אפלטון. אז הפך חונך לבן-המלך בן ה-13, אלכסנדר, שהתפרסם לאחר-מכן בהיסטוריה בשם "אלכסנדר הגדול". שמונה שנים לאחר מכן ייסד אריסטו אסכולה (בית-מדרש) משלו. המטרה שהציב לעצמו היתה למצוא דרך ארגון שיטתית לידע הקיים, כפי שאיקלידס ארגן באורח שיטתי את הגיאומטריה. אריסטו ערך תצפיות חשובות, אסף דוגמאות ודגימות, תימצת, ריכז וסיווג כמעט את כל הידע אודות העולם החומרי שהיה קיים. גישתו השיטתית היתה אבן הפינה שעליה נבנה, מאוחר יותר, המדע המערבי. לאחר מותו נשמרו כתביו מלאי החוכמה והידע במערות ליד ביתו, ומאוחר יותר נמכרו

לסיכומו של דבר: אריסטו טען כי כל התנועות נובעות או מטבעו הפנימי של הגוף הנע, או מקיומו של גורם הדוחף או מושך אותו בכל זמן תנועתו. אם גוף נמצא במקום הראוי לו על-פי טבעו, הוא לא ינוע, אלא-אם-כן פועל עליו כוח. מלבד גרמי השמים, המתמידים בתנועתם, המצב התקין של גוף הוא מצב מנוחה - חוסר תנועה.

אריסטו עצמו התייחס לעבודתו כאל תחילתו של מחקר, ולא חשב כי ניסוחיו סופיים ומושלמים. שלא בטובתו הפכו כתביו למקודשים ממש, מעבר לכל פקפוק וספק. לאנשי העולם העתיק וימי הביניים היתה מובנת-מאליה הטענה כי מצבו התקין של גוף ארצי (בניגוד לגוף שמימי) הוא מצב של חוסר תנועה. מאחר שרוב הוגי-הדעות שפעלו עד המאה ה-16 הניחו כמובן מאליו כי כדור הארץ נמצא במקום הראוי לו, ומאחר שלא התקבל על הדעת קיום של כוח אדיר שיכול לכפות תנועה על גוף עצום כמו כדור הארץ כולו, היה ברור כי כדור הארץ חייב להימצא במנוחה.

זו היתה התפישה המקובלת בעת שאסטרונום ושמו קופרניקוס הגה תיאוריה מהפכנית, לפיה כדור הארץ נמצא בתנועה. בעקבות התצפיות האסטרונומיות שערך, הגיע קופרניקוס למסקנה כי כדור הארץ נע סביב השמש. במשך שנים רבות עסק במחקריו ובפיתוח רעיונותיו מבלי לתת לכך פרסום, וזאת משתי סיבות. ראשית, הוא חשש מרדיפות; תיאוריה המנוגדת כל-כך לדעה המקובלת היתה נתפשת כמתקפה על הסדר הקיים. וסיבה שנייה: הוא עצמו הטיל ספק במסקנותיו; לו עצמו קשה היה ליישב את הסתירה שבין התיאוריה שלו לבין הדעות הרווחות בעניין תנועותיהם של גופים. רק בערוב ימיו, בלחץ חבריו הקרובים, שלח את כתב-היד של ספרו "על הסיבובים" (De Revolutionibus) לדפוס. העותק הראשון של ספר חשוב זה בתולדות המדע והאנושות הגיע לידי מחברו ממש ביומו האחרון, יום מותו - 24 במאי 1543.

מפורסמת תגובתה של הכנסייה לרעיון שכדור הארץ סובב את השמש. מאחר שתפישותיו של אריסטו שלחו שורשים כה עמוקים במסורת הכנסייה הנוצרית, הפרכתן היתה כקריאת תיגר על הכנסייה עצמה, מוסד רב-כוח והשפעה. בעיניהם של רבים מראשי הכנסייה, הרעיון לפיו כדור הארץ נע במסלול הקפה סביב השמש נתפש כאיום על עצם סמכותם, כמו גם ערעור על היסודות הבסיסיים ביותר של האמונה והתרבות האנושית. ואכן, חשש זה היה לו על מה שיסמוך: התיאוריה של קופרניקוס אכן חוללה מהפכה בתפישת האדם את היקום (הקוסמוס) ואת מקומו בו.

גליליאו, גדול מדעני המאה ה-16, הוא שביסס את ההכרה בהשקפתו של קופרניקוס אודות תנועת כדור הארץ. הוא עשה זאת בכך שהפריך את הסבריו של אריסטו בעניין תנועות הגופים. אף שלא היה הראשון שהצביע על קשיים בתורתו של אריסטו, גליליאו היה הראשון שהוכיח כי טיעונו של אריסטו אינם עומדים במבחן התצפית והניסוי.

ההשערה שהעלה אריסטו בדבר נפילת הגופים נסתרה בקלות בידי גליליאו. מסופר עליו כי השמיט עצמים במשקל שונה מראשו של המגדל המפורסם שבעיר פיזה - המגדל הנטוי, והשווה את קצב נפילתם. בניגוד חריף לטענתו של אריסטו מצא גליליאו כי אבן שמשקלה כפול אינה נופלת במהירות כפולה. גליליאו מצא כי - למעט הבדלים קטנים יחסית שנובעים מהתנגדות האוויר

קופרניקוס ותנועתו של כדור הארץ

גליליאו והמגדל הנטוי



לתנועת עצמים דרכו - גופים שוני-משקל, אם משחררים אותם בעת-ובעונה- אחת, נופלים יחד ופוגעים יחד בקרקע. מסופר כי פעם זימן גליליאו קהל רב לחזות בנפילתם מראש המגדל הנטוי של שני גופים, גוף קל וגוף כבד. האגדה מספרת כי רבים מהנוכחים בהדגמה, שראו במו עיניהם כי שני העצמים פוגעים יחד בקרקע, לעגו למדען הצעיר והמשיכו להחזיק בתורתו המסורתית של אריסטו.

כחוקר טבע נקט אריסטו בגישה מעשית: הוא העדיף לעסוק בבעיות שהציב בפניו העולם שמסביבו, ולא במצבים מופשטים שלא נקרו לו בדרכו ובסביבתו. בעולמו, כל תנועה התרחשה בתוך סביבה (תווך) המגלה התנגדות לתנועה - בתוך אוויר או בתוך מים. הוא האמין כי ריק (ואקום) אינו אפשרי, ולפיכך לא הרבה להרהר באפשרות של תנועה בתוך ריק, וחשב רק על תנועה בתווך בעל התנגדות. מכאן הגיע אריסטו למסקנה כי גוף, כדי שינוע (חרף התנגדותו של התווך שבו הוא נע), חייב גורם כלשהו לדחפו או למושכו. גליליאו דחה עיקרון בסיסי זה, בקובעו כי אם אין הפרעה לתנועתו של גוף, הוא ימשיך תמיד לנוע בקו ישר, כלומר הוא יתמיד בתנועתו; לשם כך לא נדרשת דחיפה ולא משיכה, לא נדרש כוח כלשהו.

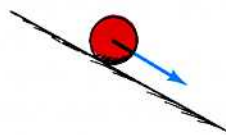
גליליאו בחן את השערתו בעזרת ניסויים שערך בתנועותיהם של גופים שונים על-גבי מישורים נטויים (מישורים משופעים). הוא שם-לב לעובדה כי כדורים המתגלגלים במורד של מישור משופע צוברים מהירות, ואילו כדורים המתגלגלים במעלה המישור הנטוי מאבדים מהירות (איור 2.2). מתוך כך הסיק כי כדור המתגלגל על-גבי מישור אופקי, מהירותו לא תגבר, אך גם לא תקטן. הכדור ייעצר לבסוף לא בגלל משהו הטבוע "בטבעו" אלא בגלל חיכוך. רעיון זה נתמך בתצפיותיו בתנועות של גופים על-גבי משטחים חלקים: ככל שהמשטח היה חלק יותר, הגוף המשיך לנוע במשך זמן רב יותר; ככל שקטן החיכוך כך מתקרבת התנועה למהירות קבועה. הוא הסיק כי במקרה של חוסר מוחלט בחיכוך ובכוחות מתנגדים אחרים, גוף הנע על-גבי מישור אופקי ימשיך לנוע לעד. המסקנה נתמכה על-ידי ניסוי נוסף ובסוג אחר של טיעונים. גליליאו הניח שניים ממישוריו המשופעים זה מול זה. הוא נוכח כי כדור שהוחזק במצב מנוחה בגובהו של אחד המישורים המשופעים, לאחר שמשחררים אותו הוא מתגלגל במורד השיפוע ואז מתחיל להתגלגל במעלה השיפוע השני, הפונה אל הראשון. בגלגולו זה הוא מגיע כמעט עד לגובה המקורי שממנו שוחרר להתגלגל.

איור 2.1

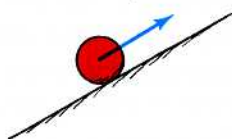
גליליאו עורך את ההדגמה המפורסמת.

המישורים המשופעים של גליליאו

שיפוע כלפי מעלה - המהירות גדלה והולכת



שיפוע כלפי מעלה - המהירות קטנה והולכת



ללא כל נטייה - האם המהירות תשתנה?



איור 2.2

תנועת כדור על-גבי מישורים שונים.

גליליאו גליליי (1564 - 1642)



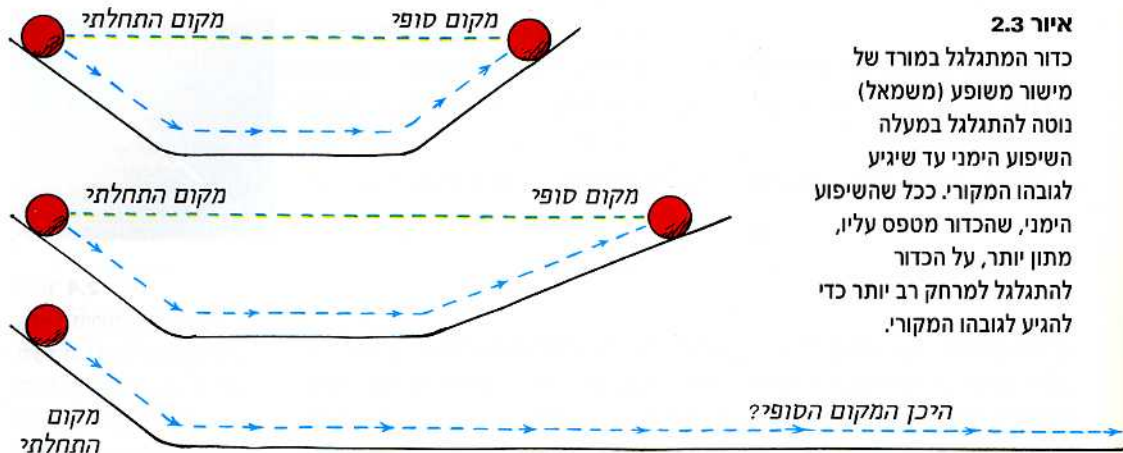
גליליאו נולד בפזיה שבאיטליה, בשנה רבת אירועים בתולדות התרבות: באותה שנה (1564) מת גדול הפסלים - מיכלאנג'לו, ונולד גדול המחזאים והמשוררים - שייקספיר. הוא למד רפואה באוניברסיטת פיזה, ואחר כך שינה כיוון ולמד מתמטיקה. הוא החל לגלות עניין רב בחקר התנועה ועד מהרה גילה תופעות בלתי ידועות, שלא התיישבו עם תורתו של אריסטו. גליליאו עזב את פיזה, והחל ללמד באוניברסיטה של פדואה ולתמוך בתיאוריה של קופרניקוס. הוא היה בין האנשים הראשונים שהתקינו טלסקופ, והוא הראשון שראה הרים על פני הירח וגילה את הירחים המקיפים את כוכב-הלכת צדק. בניגוד למה שהיה מקובל אז בין המלומדים, פרסם את ממצאיו לא בלטינית - שהיתה כעין שפה רשמית של המדע, אך בלתי מובנת להמוני

העם - אלא באיטלקית. הודות לכך, והודות למכונות הדפוס, עד-מהרה נודעו תגליותיו לקהל קוראים גדול. הכנסייה החלה לחשוש מדבריו, והוא הוזהר שלא לתמוך בדעותיו של קופרניקוס ולא ללמדן. הוא גזר על עצמו להפסיק לפרסם את מחקריו, גזירה שעמד בה קרוב ל-15 שנה. אז המרה את פי הכנסייה ופרסם את תצפיותיו ומסקנותיו, ששתרו את עקרונות הכנסייה. הוא הועמד למשפט, נמצא אשם כצפוי, ואולץ להתכחש לגילוייו. גליליאו היה אז אדם זקן שבריאותו רופפת ורוחו שבורה, ונזר עליו מאסר-בית לתמיד. למרות זאת הוא המשיך במחקרי התנועה שלו. כתביו הוברחו מאיטליה ופורסמו בהולנד. עוד קודם לכן נפגעו עיניו קשות עקב תצפיות שערך בעזרת טלסקופ בשמש, ובגיל 74 התעוור כליל. ארבע שנים אחר כך נפטר.

גליליאו טען כי רק החיכוך הוא שמונע מהכדור לטפס במעלה המישור המשופע השני בדיוק עד לגובהו המקורי; זאת מפני שהתברר לו כי ככל שהיו המישורים המשופעים חלקים יותר, כך התקרב גובהו הסופי של הכדור לגובהו המקורי. בשלב זה הקטיף גליליאו את הזווית של השיפוע העולה. והנה, גם במקרה זה טיפס הכדור בגלגולו לאותו גובה עצמו, אף שעכשיו היה עליו לנוע דרך ארוכה יותר כדי להשיג אותו גובה. הקטנה נוספת של זווית הנטייה של מישור הטיפוס גרמה לתוצאות דומות. לפיכך, כדי להשיג אותו גובה, צריך היה הכדור לנוע מרחק רב יותר. אז שאל את עצמו גליליאו שאלה זו: "אילו היה לי מישור אופקי ארוך, לאיזה מרחק צריך היה הכדור לנוע עליו כדי להגיע לגובה המקורי שממנו שוחרר?"! התשובה הברורה שהשיב לעצמו היתה: "הוא צריך להמשיך ולנוע ללא הפסק, שהרי לעולם לא יגיע (במישור אופקי) לגובה המקורי".

גליליאו ניתח את תופעת התנועה באופן נוסף. מאחר שדאג כי מהירות הכדור במדרון תהיה שווה בכל המקרים, מהירות הכדור ברגע שהוא מתחיל להעפיל במעלה המישור הנטוי השני גם היא היתה שווה בכל המקרים. אם הכדור נע לאורכו של שיפוע תלול, הוא מאבד את מהירותו בתוך זמן קצר. הכדור נע זמן ממושך יותר בהעפילו לאורך שיפוע מתון יותר. ככל שהשיפוע מתון יותר הוא מאבד את מהירותו לאט יותר. ומה באשר לשיפוע המתון ביותר, שיפוע אפס, כלומר - מישור אופקי? גליליאו השיב לעצמו כי במקרה זה הכדור כלל לא אמור לאבד מהירות. אם לא היו כוחות המפריעים לתנועה, הכדור היה ממשיך לנוע לאורכו של המישור לנצח (איור 2.3). תכונה זו של גופים, להתמיד בתנועתם, מכונה **התמדה** (אינרציה).

מושג ההתמדה שטבע גליליאו מוטט את תיאוריית התנועה של אריסטו. אריסטו לא הצליח להבחין בקיומה של התמדה, מאחר שלא יכול היה להעלות בדמיונו מצב של תנועה ללא חיכוך. כישלונו של אריסטו בזיהוי מהותו של החיכוך - כוח ככל הכוחות - עיכב את התקדמות הפיסיקה למשך כ-2000 שנה, עד זמנו של גליליאו. יישום מושג ההתמדה של גליליאו מבהיר כי שום כוח אינו



איור 2.3

כדור המתגלגל במורד של מישור משופע (משמאל) נוטה להתגלגל במעלה השיפוע הימני עד שיגיע לגובהו המקורי. ככל שהשיפוע הימני, שהכדור מטפס עליו, מתון יותר, על הכדור להתגלגל למרחק רב יותר כדי להגיע לגובהו המקורי.

נדרש לצורך שמירת תנועתו של כדור הארץ*. עתה נפתחה הדרך בפני אייק (יצחק) ניוטון לצייר דמות חדשה של היקום. בהמשך נחזור לעסוק בניוטון, ואילו עתה נברר לעצמנו אחדים מהמושגים שטבע גלילאו לצורך תיאור התנועה.

שאלה האם יהיה זה נכון לומר כי ההתמדה גורמת לגופים נעים להמשיך לנוע?

בתיאורו של אריסטו, למרחק של הגוף מן המקום הראוי לו נודעה חשיבות מכרעת. גלילאו שינה תפישה זו בהדגישו את החשיבות של מושג הזמן בתיאור התנועה. גלילאו תיאר את התנועה תוך שימוש במושג קצב השינוי. קצב השינוי בגודל כלשהו מתקבל מחלוקת גודל השינוי במשך הזמן שבו הוא התרחש; המנה, תוצאת החלוקה, מתארת כמה מהר קורה משהו, או באיזו מידה משתנה משהו בתוך פרק זמן מסוים. תיאורי הקצבים המשמשים בתיאור התנועה הם גודל-מהירות** (או: קצב ההתקדמות), מהירות, ותאוצה***.

תיאור של תנועה

תשובה: התשובה המדויקת היא: לא. איננו יודעים מדוע מתגלית בגופים תכונה זו. ואולם אנו מכנים את תכונת הגופים לנהוג כך בשם התמדה. דברים רבים אנו אכן מבינים ומכנים בשמות. אך אנו מכנים בשמות גם תופעות רבות שאין לנו הסבר לגביהן, כלומר – שאיננו מבינים אותן. בלימוד נכון אין צורך בהדגשת-יתר של רכישת שמות חדשים רבים, אלא של הכושר להבחין בין תופעות שאנו מבינים, לבין תופעות שבסך-הכל טבענו להן שמות.

* הכוונה היא כי שום כוח אינו נדרש על-מנת למנוע מכדור הארץ לעצור ולהפסיק לנוע. (המתר')
 ** באנגלית מבחינים בין speed לבין velocity, שני מושגים שפירושם מהירות, אם-כי המלה speed היא המקובלת בחיי יומיום. בעברית אפשר היה ליצור מקבילות כמו, למשל, להבחין בין "מהירות" לבין "יחופזה", אלא שדבר זה לא נעשה עד-כה. אולי כדאי להבחין בין קצב-התנועה במובן speed, לבין מהירות כמושג המקובל יותר בפיסיקה - velocity. ואולי אפשר היה להבחין בין "מהירות", שהיא המילה המקובלת בחיי יומיום לתיאור קריאת מד-המהירות (ספידומטר), לבין "מהירות", מעין הכלאה בין "מהירות" לבין "כיוון", כתרגום הולם ל-velocity. עד שיימצא פתרון לשוני מקובל ואלגנטי, נתרגם speed בעזרת הצירופים "גודל-המהירות" או "ערך המהירות" או "שיעור המהירות", או "קצב ההתקדמות", ואילו velocity נתרגם "מהירות". (המתר')
 *** אם פרק זה יסייע לך לשלוט בשלושה מושגים אלה, מה-טוב, אך בשלב זה ניתן גם להסתפק בהיכרות ראשונית איתם. הפרקים הבאים יחדדו אצלך את הבנת מושגים אלו, ואת ההבחנה ביניהם.

גודל-המהירות

עצמים הנמצאים בתנועה עוברים דרך מסוימת (מרחק מסוים) בזמן נתון. למשל, אנו אומרים כי מכונית עוברת כך-וכך קילומטרים בשעה. **גודל-המהירות** הוא המדד המבטא כמה מהר נוסעת המכונית. זהו הקצב של שינוי המקום, ומבטאים אותו במונחים של מנת הדרך במשך הזמן. בצורה כללית:

$$\frac{\text{דרך}}{\text{זמן}} = \text{מהירות}$$

לצורך הבעת גודל-המהירות ניתן להשתמש בכל צירוף של יחידות מרחק וזמן. עבור תנועת מכונית מקובלת היחידה "קילומטרים בשעה" (ק"מ/שעה או, בחיי יומיום, קמ"ש). עבור מרחקים קצרים משתמשים פעמים רבות ביחידה "מטרים בשנייה" (מ/ש). הביטוי "ב" (בשעה, בשנייה) וכך גם הלוכסן (ל) מציינים: "מחולק ב" (מחולק במספר השעות, מחולק במספר השניות). בספר זה נשתמש בעיקר ביחידת גודל-המהירות "מטרים בשנייה".



איור 2.4

מד-מהירות טיפוסית של מכונית. ניתן לקרוא בו ערכי-מהירות רגעיים הן ביחידות של ק"מ/שעה (יחידה מקובלת בישראל ובמדינות רבות אחרות) והן ביחידות של מיילים-לשעה, המקובלות, למשל, בארה"ב. מייל אחד אורכו כ-1609 מ'.

טבלה 2.1

מהירויות ביחידות שונות (ערכים מעוגלים).

20	ק"מ/שעה	6	מ/ש
40	ק"מ/שעה	11	מ/ש
60	ק"מ/שעה	17	מ/ש
65	ק"מ/שעה	18	מ/ש
80	ק"מ/שעה	22	מ/ש
88	ק"מ/שעה	25	מ/ש
100	ק"מ/שעה	28	מ/ש
120	ק"מ/שעה	33	מ/ש

גודל-המהירות הרגעי גודל-המהירות שיש לגוף ברגע, או "הרף עין", מסוים מכונה **גודל-המהירות הרגעי** שלו. זוהי המהירות הנראית בכל רגע במד-המהירות (ספידומטר) של המכונית. אם ברגע מסוים אומרים כי מהירות המכונית היא 60 ק"מ/שעה, הכוונה היא כי זה גודל-המהירות הרגעי באותו רגע, וכוונתנו בכך שאם תמשיך המכונית לנסוע שעה שלמה באותו ערך-מהירות, היא תתקדם מרחק של 60 קילומטר. אם המכונית תמשיך לנסוע באותו ערך-מהירות במשך חצי-שעה, היא תתקדם מחצית מהמרחק הזה, כלומר - 30 ק"מ בלבד. אם תנוע בגודל-המהירות הזה במשך דקה בלבד, היא תתקדם רק קילומטר אחד.

גודל-המהירות הממוצע מכונית אינה נוסעת תמיד באותו ערך של מהירות, אלא בדרך-כלל קצב ההתקדמות שלה משתנה במהלך הנסיעה. למעשה, במהלך של כל נסיעה חלים שינויים בגודל המהירות. יש להבחין, לפיכך, בין גודל-מהירות רגעי לבין גודל המהירות הממוצע. את גודל-המהירות הממוצע מגדירים כך:

$$\frac{\text{סך-כל הדרך}}{\text{משך הזמן}} = \text{גודל-המהירות הממוצע}$$

את גודל-המהירות הממוצע ניתן לחשב בקלות. אם במשך שעה אחת של נסיעה עברנו דרך של 80 קילומטר, נאמר כי גודל-המהירות הממוצע שבה נסענו הוא 80 קילומטר בשעה (80 ק"מ/שעה). כך גם אם במהלך נסיעה בת 4 שעות עברנו 320 ק"מ:

$$\text{גודל-המהירות הממוצע} = \frac{\text{סך-כל המרחק שעברנו} \quad 320 \text{ ק"מ}}{\text{משך זמן הנסיעה} \quad 4 \text{ שעות}} = 80 \text{ ק"מ/שעה}$$

אנו נוכחים לדעת כי אם נבטא את הדרך שעברנו בקילומטרים (ק"מ), ואת הזמן שחלף בשעות, התוצאה תתקבל ביחידות ק"מ/שעה (קילומטרים בשעה). מאחר שגודל-המהירות הממוצע שווה למנת החלוקה של סך-כל הדרך בסך-כל זמן התנועה, ממוצע זה אינו מבטא שינויים שהתרחשו במהלך התנועה. למעשה, בנסיעה רגילה מתרחשים שינויים בקצב התנועה, כך שהממוצע שונה בדרך-כלל מגודל-המהירות בכל רגע ורגע - גודל-המהירות הרגעי. אך בכל מקרה יש לזכור כי, בין אם אנו עוסקים בגודל-המהירות הממוצע או בגודל-המהירות הרגעי, אנו עוסקים למעשה בקצב שבו גופים חולפים על פני דרך. אם ידוע לנו גודל-המהירות הממוצע וידוע לנו זמן התנועה, קל לחשב את הדרך שעברנו. בסידור-מחדש של איברי המשוואה הקודמת נקבל:

$$\text{סך-כל המרחק שעברנו במהלך הנסיעה} = \text{גודל-המהירות הממוצע} \times \text{זמן הנסיעה}$$

אם, למשל, גודל-המהירות הממוצע בנסיעתך היה 80 ק"מ/שעה, ונסיעתך כולה נמשכה 4 שעות, הרי שעברת דרך של 320 ק"מ.

שאלות

- מהו גודל-המהירות הממוצע של נמר-צ'יטה שרץ 100 מטר במשך 4 שניות? ומהו גודל-המהירות הממוצע אם היה רץ 50 מ' במשך 2 שניות?
- אם מכונית נוסעת בגודל-מהירות ממוצע של 60 ק"מ/שעה במשך שעה אחת, היא עוברת דרך של 60 ק"מ.
 - איזו דרך תעבור אם תתמיד בקצב התקדמות זה במשך 4 שעות?
 - ובמשך 10 שעות?
 - האם ייתכן כי גודל-המהירות הממוצע של מכונית היוצאת לנסיעה יהיה 60 ק"מ/שעה ושבושם שלב שהוא גודל-המהירות הרגעי כפי שנראה על מד-המהירות שלה לא יעלה על 60 ק"מ/שעה?

תשובות

(את התשובות הניתנות בשולי העמוד יש לבחון רק לאחר ניסיון רציני לענות באופן עצמי. כפי שאי-אפשר לאמן את הגוף תוך התבוננות בתרגילי ספורט של אחרים, כך גם המחשבה - יש לתרגלה בעבודה עצמית!).

- התשובה בשני המקרים היא 25 מ' בשנייה:

$$\text{גודל-המהירות הממוצע} = \frac{\text{הדרך} \quad 100 \text{ מ'}}{\text{משך הזמן} \quad 4 \text{ שניות}} = \frac{25 \text{ מ'}}{1 \text{ שנייה}}$$
- הדרך שעברה המכונית שווה למכפלת גודל-המהירות הממוצע \times זמן הנסיעה, לפיכך:
 - הדרך = 60 ק"מ/שעה \times 4 שעות = 240 ק"מ
 - הדרך = 60 ק"מ/שעה \times 10 שעות = 600 ק"מ
 - לא. אם תחילת הנסיעה היא ממצב מנוחה, הרי שבהכרח יש פרק זמן שבו גודל-המהירות נמוך מ-60 ק"מ/שעה. לכן, כדי שהממוצע יהיה 60 ק"מ/שעה צריכים להיות פרקי זמן שבהם גודל-המהירות גבוה מ-60 ק"מ/שעה, כדי לפצות על פרקי הזמן האיטיים. באופן מעשי, גודל-המהירות הממוצע נמוך כרגיל במידה ניכרת מגודל-המהירות הרגעי הגבוה ביותר שהיה במהלך הנסיעה.



איור 2.5

המכונית בנתיב המעגלי נוסעת במהירות שגודלה אולי קבוע, אך המהירות משתנה בכל רגע. מדוע?

מהירות

בשפת יומיום איננו משתמשים במושג "גודל-המהירות" ואיננו מבחינים בין המושג גודל-המהירות לבין המושג מהירות, ואולם אם רוצים לדייק חשוב להבחין בין שני המושגים. אם אומרים כי מישוה נוסע 60 ק"מ/שעה אנו מתארים למעשה את גודל-המהירות שלו. ואולם אם נאמר כי מישוה נוסע 60 ק"מ/שעה בכיוון צפון, אנו קובעים את מהירותו. נהג מרוצים שואף להיות הנהג המהיר ביותר - הוא רוצה להגביר את גודל-מהירותו; לטייס חשובה המהירות - באיזה ערך-מהירות ובאיזה כיוון נע מטוסו. כשאנו מתארים את קצב ההתקדמות ואת כיוון התנועה גם יחד, אנו קובעים **מהירות***.

כמו בעניין גודל-המהירות, גם כאן נבחין בין המהירות הממוצעת לבין המהירות הרגעית. עבור גוף הנע במהירות קבועה, בלתי-משתנית, המהירות הרגעית שווה למהירות הממוצעת. גוף הנע במהירות קבועה, או בגודל-מהירות קבוע, חולף בפרקי זמן שווים מרחקים שווים. ואולם מהירות קבועה וגודל-מהירות קבוע יכולים להיות שונים מאוד זה מזה. מהירות קבועה פירושה קצב התקדמות קבוע ללא שינוי בכיוון. למכונית הנעה בסיבוב בקצב התקדמות קבוע אין מהירות קבועה - מהירותה משתנית כשכיוונה משתנה.

שאלות

1. "היא מתקדמת בקצב קבוע בכיוון קבוע" - כיצד ניתן לבטא זאת בקיצור?
2. מד-המהירות של מכונית הנוסעת מזרחה מראה 100 ק"מ/שעה. היא חולפת על-פני מכונית הנעה מערבה ב-100 ק"מ/שעה. האם לשתי המכוניות גודל-מהירות שווה? האם לשתיהן מהירות שווה?
3. במשך זמן-מה הראה מד-מהירות של מכונית 60 ק"מ/שעה. האם פירוש הדבר קצב התקדמות קבוע? מהירות קבועה?

תאוצה

ניתן לשנות את מהירותו של גוף נע על-ידי שינוי גודל-המהירות, שינוי הכיוון או שינוי בגודל המהירות ושינוי הכיוון גם-יחד. את קצב השינוי במהירות מגדירים **כתאוצה**:

$$\text{תאוצה} = \frac{\text{שינוי המהירות}}{\text{משך הזמן}}$$

תשובות:

1. "היא נעה במהירות קבועה".
2. לשתי המכוניות אותו קצב התקדמות, אך מהירויותיהן שונות מפני שהן נעות בכיוונים נגדיים.
3. הקריאה הקבועה מעידה על גודל-מהירות קבוע, אך לא על מהירות קבועה, מפני שהמכונית יכולה לבוע שלא לאורך קו ישר; במקרה זה יש לה תאוצה. (בפרק 4 ניווכח כי גוף שיש לו תאוצה שונה מאפס נתון בהכרח תחת השפעה של כוח כלשהו הפועל עליו.)

* גודל המתואר הן על-ידי ערך מסוים (המתאר "כמה") והן על-ידי כיוון מכונה וקטור. גודל המתואר רק על-ידי ערכו, כמו למשל קצב ההתקדמות, מכונה סקלר. במקרה הבא נעסוק במהירות כווקטור.

אנו מכירים את תופעת התאוצה מתוך חווייה יומיומית של נסיעה במכונית: כשהמכונית מגבירה לפתע את קצב ההתקדמות שלה אנו נדחפים אל גב המושב. בבסיס המושג תאוצה עומד רעיון השינוי. נניח שאנו נוהגים במכונית ובמשך שנייה אחת אנו מגדילים את המהירות מ-30 ק"מ/שעה ל-35 ק"מ/שעה, בשנייה הבאה מגדילים את המהירות ל-40 ק"מ/שעה, בשנייה שלאחריה ל-45 ק"מ/שעה וכך הלאה. בכל שנייה הגדלנו את מהירותנו ב-5 ק"מ/שעה. הקצב של שינוי זה במהירות - לו אנו קוראים תאוצה.

$$\text{תאוצה} = \frac{\text{שינוי המהירות}}{\text{משך הזמן}} = \frac{5 \text{ ק"מ/שעה}}{1 \text{ שנייה}} = 5 \text{ ק"מ/שעה/שנייה}$$

במקרה זה התאוצה שווה 5 ק"מ בשעה בשנייה (5 ק"מ/שעה/שנייה). חשוב לשים לב כי מופיעות כאן שתי יחידות זמן: אחת ליחידת המהירות, ואחת לצינון פרק הזמן שבו משתנה המהירות. חשוב גם לשים לב כי תאוצה איננה סך-כל השינוי במהירות, אלא היא קצב השינוי, השינוי במשך שנייה אחת (איור 2.6).

המונח תאוצה משמש הן לצינון הגברת המהירות והן לצינון הקטנה בה. למשל, אנו אומרים כי בלמי המכונית יוצרים תאוצת בלימה ניכרת; פירוש הדבר הוא שבכל שנייה יש הקטנה ניכרת במהירות המכונית. לעיתים קרובות מכנים זאת בשם תאוטה. אנו חשים בתאוטה בכך שגופנו נזרק קדימה בעת שהמכונית בולמת.

בכל מקרה שנעים במסלול עקום נמצאים בתאוצה, אפילו אם נעים בקצב התקדמות קבוע. זאת משום שתנועה לאורך מסלול עקום פירושה שינוי בכיוון התנועה ביחס לקו הישר, ושינוי בכיוון פירושו שינוי במהירות. בתאוצה כזו אנו חשים למשל כשגופנו נוטה כלפי צידו החיצוני של המסלול העקום בעת פניית המכונית. זו הסיבה להבחנה בין גודל-המהירות למהירות: אנו מגדירים תאוצה כקצב השינוי במהירות, ובכך אנו כוללים שינויים הן בגודל-המהירות והן בכיוונה.



איור 2.6

גוף שרוי בתאוצה בכל מקרה שמשנתה מצב המהירות שלו.

1. מכונית מסוימת יכולה להגיע ממצב מנוחה ל-90 ק"מ/שעה במשך 10 שניות. מהי תאוצתה?

2. במשך 2.5 שניות הגבירה מכונית את גודל-המהירות שלה מ-60 ק"מ/שעה ל-65 ק"מ/שעה. אופניים עברו באותו זמן ממצב מנוחה למהירות 5 ק"מ/שעה. למי היתה תאוצה גדולה יותר? מהי תאוצת כל אחד מכלי-רכב אלה?

שאלות

1. תאוצתה 9 ק"מ/שעה/שנייה. למען הדיוק יש לומר כי זוהי התאוצה הממוצעת, שהרי במהלך 10 השניות יכולים היו לחול שינויים בקצב השינוי במהירות.
2. התאוצות הן של המכונית והן של האופניים שוות זו לזו - 2 ק"מ/שעה/שנייה:

תשובות

$$\text{תאוצת המכונית} = \frac{\text{שינוי במהירות}}{\text{משך הזמן}} = \frac{\text{פחות } 60 \text{ ק"מ/שעה} - \text{פחות } 65 \text{ ק"מ/שעה}}{2.5 \text{ שניות}} = \frac{5 \text{ ק"מ/שעה}}{2.5 \text{ שניות}}$$

$$\text{תאוצת האופניים} = \frac{\text{שינוי במהירות}}{\text{משך הזמן}} = \frac{\text{פחות } 0 \text{ ק"מ/שעה} - \text{פחות } 5 \text{ ק"מ/שעה}}{2.5 \text{ שניות}} = \frac{5 \text{ ק"מ/שעה}}{2.5 \text{ שניות}}$$

למרות שהמהירויות של שני כלי הרכב שונות לחלוטין, קצב השינויים במהירויות שווה בשני המקרים. לפיכך התאוצות שוות.

כל מי שעמד אי-פעם באוטובוס נוסע חש בשוני שבין מהירות לבין תאוצה. אם האוטובוס נוסע במהירות נוסע קבועה אפשר לעמוד בו ביציבות ללא כל מאמץ, אפילו אם הוא נוסע במהירות גבוהה (ובלבד שהכביש תקין ואין בו מהמורות). יתר על כן, תוך כדי הנסיעה ניתן להטיל מטבע כלפי מעלה ולחזור ולתפוס אותו ללא כל בעיה, ממש כאילו האוטובוס עומד במנוחה (לא כדאי לעשות את הניסוי באוטובוס דחוס מדי...). רק בעת שהאוטובוס נמצא בתאוצה - מגביר את ערך-מהירותו, מאט, או משנה כיוון בעת פנייה - צריך להתאמץ כדי לעמוד וקשה לתפוס מטבע שהוטל כלפי מעלה.

בחלקים גדולים של ספר זה נעסוק בתנועה המתקיימת לאורך קו ישר. בתנאים אלה (ובהם בלבד) אפשר שלא להקפיד על ההבחנה שבין המונח גודל-מהירות לבין המונח מהירות. אם אין שינוי בכיוון, ניתן להביע את התאוצה כקצב השינוי בגודל-המהירות:

$$\text{תאוצה (במסלול שהוא קו ישר)} = \frac{\text{שינוי גודל-המהירות}}{\text{משך הזמן}}$$

תאוצה - המישורים המשופעים של גלילאו

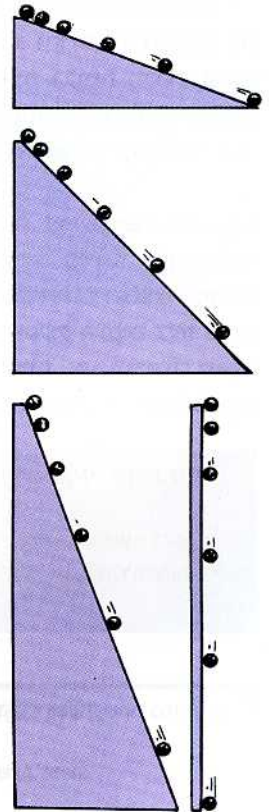
גלילאו פיתח את מושג התאוצה בעת שערך את ניסוייו במישורים המשופעים שלו. עיקר עניינו של גלילאו היה חקר נפילתם של גופים, אך מכיוון שלא היה מצויד במכשיר יעיל למדידת זמן, הוא השתמש במישורים משופעים כדי להאט גופים, על-מנת להיטיב לחקור את תנועתם.

במחקרים אלה מצא גלילאו כי כדור המתגלגל במורד של מישור משופע מגדיל את מהירותו במידה שווה בכל שנייה ושנייה; כלומר - הכדור מתגלגל בתאוצה קבועה. למשל, במישור משופע מסוים כדור מגדיל את מהירותו ב-2 מטר-בשנייה בכל שנייה של ירידה במורד. תוספת המהירות במשך שנייה אחת היא התאוצה. אם נבדוק את המהירות הרגעית שלו בהפרשים של שנייה שלמה נקבל את הערכים הבאים ביחידות של מטר-בשנייה: 0, 2, 4, 6, 8, 10. ניווכח כי המהירות הרגעית של הכדור בכל רגע ורגע לאחר ששחררנו אותו ממנוחה היא פשוט מכפלת התאוצה בזמן שעבר מתחילת התנועה*:

$$\text{המהירות ברגע נתון} = \text{התאוצה} \times \text{הזמן מתחילת התנועה}$$

אם נציב ערכים מתאימים במשוואה ניווכח כי בסופה של השנייה הראשונה לתנועה, מהירות הכדור היא 2 מטרים-בשנייה; בסופה של השנייה שלאחריה מהירותו 4 מילשנייה; בסופה של השנייה העשירית לתנועתו במורד מהירותו 20 מילש, וכו'.

גלילאו מצא כי בשיפועים תלולים יותר התאוצה גדולה יותר. לפיכך, לכדור תהיה התאוצה הגדולה ביותר כשהשיפוע חד ביותר. התאוצה הגדולה ביותר תהיה, אם-כן, בעת תנועה לאורך מישור אנכי, המכוון הישר כלפי מטה. במקרה



איור 2.7

ככל שגדל שיפוע המישור, גדלה תאוצת הכדור המידרדר. מה תהיה התאוצה אם המישור מאונך כלפי מטה?

* משוואה זו מתקבלת ישירות מהגדרת התאוצה, $a = v/t$. שינוי פשוט בסדר (כפל שני אנפי המשוואה בערך t) נותן $v = at$.

זה תאוצת הכדור שווה לזו של גוף נופל (איור 2.7). גליליאו מצא כי ללא קשר למשקל הגופים, כולם נופלים באותה תאוצה קבועה ובלתי משתנה (ובלבד שהתנגדות האוויר לתנועה היא קטנה מאוד וזניחה).

כמה מהר

עצמים נופלים עקב כוח הכובד. גוף ששום גורם אינו מגביל אותו או מפריע לו - באין חיכוך עם האוויר או עם כל גורם אחר - וכשהוא נופל בהשפעת הכובד בלבד, גוף כזה נופל במצב המכונה **נפילה חופשית**. על השפעת התנגדות האוויר לנפילה נרחיב בפרק 4, ובשלב זה נתעלם ממנה. בטבלה 2.2 מתוארת, בהפרשים של שנייה אחת, מהירותו של גוף הנופל נפילה חופשית. חשוב לשים לב לאופן שבו משתנית המהירות: בכל שנייה של נפילה הגוף מוסיף מהירות של 10 מטר-בשנייה. תוספת מהירות זו היא התאוצה. ואמנם, תאוצת הנפילה החופשית שווה (בערך) 10 מ'ש² בכל שנייה, ובצורה מקוצרת: 10 מ'ש² (יש לבטא זאת כך: עשרה מטרים בשנייה-בריבוע). יחידת הזמן, שנייה, מופיעה פעמיים - פעם אחת לביטוי המהירות, ופעם נוספת לביטוי פרק הזמן שבו נמדד השינוי במהירות.

במקרה של גופים הנופלים בנפילה חופשית נהוג לבטא את התאוצה באות g (קיצור של *gravitation*, כלומר - כבידה). הגם שערכו של g משתנה במידה מועטה באזורים שונים על-פני כדור הארץ, ערכו הממוצע הוא 9.8 מטרים-בשנייה בכל שנייה, ובקיצור, 9.8 מ'ש². כשלא נדרש דיוק מרבי נוח לעגל ערך זה ל-10 מ'ש², כפי שעשינו, למשל, בטבלה 2.2.

מהירותו הרגעית של גוף הנופל נפילה חופשית ממצב מנוחה מתאימה - כפי שניתן להיווכח מטבלה 2.2 - למשוואה הכללית שהסיק גליליאו מניסוייו במישורים משופעים:

$$\text{המהירות שרכש הגוף} = \text{תאוצה} \times \text{זמן התנועה}$$

את המהירות הרגעית v של גוף הנופל נפילה חופשית ממצב מנוחה* כעבור t שניות מתחילת התנועה ניתן לבטא בצורה מתומצצת כך:

$$v = gt$$

האות v מסמלת את המהירות; gt היא המכפלה: תאוצת הנפילה \times הזמן. כדאי לבדוק משוואה זו תוך שימוש בטבלה 2.2.

עד כה תיארונו גופים הנעים הישר כלפי מטה, בכיוון הכבידה. ומה בדבר גוף הנזרק הישר כלפי מעלה? מרגע שהשתחרר מאחיזת ידנו, גוף כזה נע זמן-מה כלפי מעלה, ואז יורד בחזרה. בנקודת שיא גובהו הוא משנה את כיוונו מכיוון עלייה לכיוון ירידה, ומהירותו הרגעית בנקודה זו היא אפס. אז הוא מתחיל לנוע מטה בדיוק כאילו שוחרר בגובה זה ממצב מנוחה.



איור 2.8

דמה לעצמנו שחיברנו מד-מהירות לאבן נופלת. בכל שנייה של נפילה היינו נוכחים כי מהירות האבן גדלה במידה שווה: כ-10 מ'ש² (בטבלה 2.2 ניתנים ערכי המהירות שהיינו קוראים בכל שנייה ושנייה).

* גוף שאינו מתחיל ליפול ממצב מנוחה אלא נזרק כלפי מטה במהירות v_0 , מהירותו v כעבור פרק זמן t כלשהו היא: $v = v_0 + gt$. לא נעסוק כאן במצב מורכב כזה, ונשתדל להפיק את המרב מלימוד המצבים הפשוטים ביותר. אם נצליח בכך - דיין!

שאלה

מה תהיה הקריאה במד-המהירות, הצמוד לאבן הנופלת שבאוויר 2.8, 3.5 שניות לאחר ששחררה ממצב מנוחה? ובתום 6 שניות? 100 ש"י?

במהלך עלייתו הגוף מאט, החל מגודל-המהירות ההתחלתי כלפי מעלה ועד אפס מהירות. מהירותו, אם-כן, קטנה והולכת - יש כאן תופעה של תאוצה (שבמשך העלייה ניתן לכנותה גם: תאוצה). בכמה קטן גודל-מהירותו בכל שנייה? ספק אם נופתע להיווכח כי מהירותו כלפי מעלה קטנה בכ-10 מטרים-בשנייה בכל שנייה (וליתר דיוק: ב-9.8 מטרים-בשנייה בכל שנייה, 9.8 מ'ש²) - בדיוק אותה תאוצה שיש לו בדרכו למטה. לפיכך - וזה מעניין מאוד! - גודל-המהירות הרגעי של הגוף בכל נקודת גובה לאורך המסלול שווה בעלייה ובירידה, כפי שמתאר איור 2.9. המהירויות הפוכות, כמוכן, מאחר שכיוון התנועה בעת העלייה מנוגד לכיוון התנועה בעת הירידה. במהלך כל שנייה ושנייה שינוי המהירות הוא 10 מ'ש², וכך התאוצה היא קבועה לאורך כל המסלול, בין בעלייה ובין בידידה: 10 מ'ש².

כמה רחוק

השאלה לאיזה מרחק נופל גוף שונה לחלוטין מהשאלה כמה מהר הוא נופל. בניסויים במישורים המשופעים מצא גליליאו כי המרחק שעובר גוף הנע בתאוצה קבועה נמצא ביחס קבוע לריבוע הזמן. בנספח ב' מוסברים הפרטים, וכאן נעסוק רק בתוצאות. הדרך שעובר גוף הנע בתאוצה קבועה, שהחל לנוע ממצב מנוחה, מתוארת במשוואה:

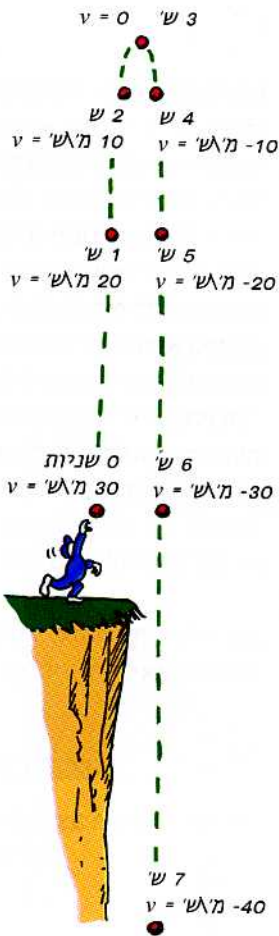
$$d = \frac{1}{2} a t^2 \quad (\text{תאוצה} \times \text{זמן} \times \text{זמן})$$

ביטוי זה מתאר גם את הדרך שעובר גוף נופל. ביחס לגוף הנופל נפילה חופשית נוכל לרשום זאת בקיצור בביטוי:

$$d = \frac{1}{2} g t^2$$

באשר d מסמל את הדרך שעבר גוף נופל במשך t השניות הראשונות לנפילתו*. אם נשתמש בערך המקורב של תאוצת הנפילה ($g = 10 \text{ מ'ש}^{-2}$), הדרך שעובר גוף בנפילה חופשית בזמנים שונים ניתנת בטבלה 2.3.

יש לשים-לב כי במשך השנייה הראשונה לנפילתו עובר גוף 5 מ', אף שמהירותו בסיום שנייה זו היא 10 מ'ש². אין בכך משום סתירה או קושי, שהרי כדי לעבור דרך של 10 מ' צריך היה לנוע שנייה אחת במהירות ממוצעת של 10 מ'ש², ואולם הגוף החל את תנועתו ממצב מנוחה (מהירות 0 מ'ש²), ומהירות של 10 מ'ש².



איור 2.9

קצב שינוי המהירות שווה בכל שנייה ושנייה.

הקריאות במד-המהירות תהיינה 35 מ'ש², 60 מ'ש² ו-1000 מ'ש² בהתאמה. תוכלו להסיק זאת מטבלה 2.2 או להשתמש בנוסחה $v = gt$ שבה מציינים 10 מ'ש² כערכו של g .

תשובה:

* שהרי

$$d = \frac{0+gt}{2} \times t = \frac{gt^2}{2} = \frac{\text{מהירות התחלתית} + \text{מהירות סופית}}{2} \times \text{זמן} = \text{זמן} \times \text{מהירות ממוצעת}$$

$$d = \frac{1}{2} g t^2 \quad (\text{הסבר רחב יותר ניתן בנספח ב'})$$

היתה לו רק ממש בסיום השנייה. לפיכך מהירותו הממוצעת בשנייה הראשונה היתה הממוצע בין 0 לבין 10. כדי לחשב ממוצע בין שני מספרים או מחברים אותם ומחלקים את הסכום ב-2. מכאן שהמהירות הממוצעת בשנייה הראשונה היתה 5 מ'ש', ותנועה במהירות ממוצעת זו במשך שנייה אחת אכן נותנת דרך של 5 מ'. כשהגוף ממשיך ליפול, הדרך שיעבור בכל שנייה תגדל ותלך משנייה לשנייה, מאחר שמהירותו גדלה והולכת כל העת.

מחיי יומיום או יודעים כי לא כל הגופים נופלים בתאוצה שווה. עלה שלכת, נוצה ודף-נייר צונחים לקרקע אט-אט. הסיבה לכך היא התנגדות האוויר לתנועה דרכו. ניתן להדגים זאת באופן משכנע בעזרת צינור זכוכית רחב ופקוק היטב, המכיל גוף קל וגוף כבד, למשל - מטבע ונוצה. כאשר הצינור מלא באוויר, כלומר - במצב רגיל ויומיומי - הנוצה והמטבע ייפלו בתאוצות נבדלות מאוד. אך אם נשאב את האוויר מן הצינור הסגור בעזרת משאבת-ריק (משאבת ואקום) ונהפוך את הצינור במהירות, הנוצה והמטבע ייפלו באותה תאוצה (איור 2.11). הגם שלהתנגדות האוויר השפעה ניכרת על נפילתם של עצמים כגון נוצות או דפי-נייר, נפילתם של עצמים כבדים יותר*, כגון אבנים, אינה מושפעת במידה רבה מהתנגדות האוויר (כל עוד המהירות אינה גבוהה). לפיכך ניתן ליישם את הביטויים $v = gt$ ו- $d = \frac{1}{2}gt^2$ לשם ביצוע חישובים מקורבים עבור רוב העצמים הנופלים באוויר.

הדרך שעבר הגוף (מטרים)	משך הנפילה (שניות)
0	0
5	1
20	2
45	3
80	4
125	5
..	..
..	..
..	..
$\frac{1}{2}(10t^2)$	t

טבלה 2.3
הדרך שעובר גוף בנפילה חופשית

חזון מחליק מהמעקה, נופל ומגיע לקרקע בתוך חצי שנייה.
(א) מהי מהירותו בעת פגיעתו בקרקע?
(ב) מהי מהירותו הממוצעת במשך חצי השנייה של נפילתו?
(ג) מהו גובה המעקה מעל פני הקרקע?

שאלה

תשובה:

אם נשתמש בערך המקורב $10 \text{ מ'ש}^2 = g$ נקבל:
(א) המהירות v שווה ל- gt (כאשר $v = gt$), כלומר 10 מ'ש^2 כפול $\frac{1}{2}$ שנייה = 5 מ'ש
(ב) מהירות ממוצעת $\bar{v} = \frac{v_{\text{התחלתי}} + v_{\text{סופי}}}{2} = \frac{0 \text{ מ'ש} + 5 \text{ מ'ש}}{2} = 2.5 \text{ מ'ש}$
הקו "גג" שסומן מעל האות v מסמל ממוצע, \bar{v} = מהירות ממוצעת.
(ג) המרחק d שווה $\bar{v}t$ כלומר: $2.5 \text{ מ'ש} \times (\frac{1}{2} \text{ ש}') = 1.25 \text{ מ'}$
ובדרך אחרת: $1.25 \text{ מ'} = (\frac{1}{2} \text{ ש}') \times (10 \text{ מ'ש}^2) = \frac{1}{2} \times (\frac{1}{2} \text{ ש}')^2 \times (10 \text{ מ'ש}^2) = \frac{1}{2} \times 10 \times (\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{2} \times 10 \times \frac{1}{4} = \frac{10}{8} = 1.25 \text{ מ'}$
כדאי לשים לב כי ניתן לחשב את המרחק בשתי דרכי החישוב.



איור 2.10

נדמה לעצמנו שהצמדנו - דרך לאבן נופלת. הקריאה על המכשיר בעת נפילתה החופשית של האבן מתוארת בכל רגע / באמצעות הנוסחה $\frac{1}{2}gt^2$, ונתונה בטבלה 2.3.

* למעשה מדובר ביחס שבין כובדו של הגוף לבין שטחו ובעזרתו. משקלו של מצנח, למשל, גדול בהרבה ממשקלו של מטבע, למרות זאת על המטבע כמעט אין השפעה של התנגדות האוויר, בעוד שהמצנח בנוי במיוחד כדי שיעורר התנגדות אוויר גדולה וייפול במהירות קטנה ביותר. אם נזרוק את המצנח כשהוא מקופל, הוא יצלול תוך התנגדות אוויר קטנה, ואילו אם נרקע את המטבע למשטח מתכתי דקיק הוא יצנח ארצה באיטיות. הסבר מפורט יותר יינתן בפרק 4. (המתרי')



איור 2.11
נוצה ומטבע נופלים באותה תאוצה בכלי שבתוכו ריק (ואקום).

באיזה קצב משתנה המהירות

בניתוח תנועתם של גופים נופלים שלא להחליף את השאלה "כמה מהר" בשאלה "כמה דרך", או "איזה מרחק". כשמבקשים לקבוע כמה מהר נופל עצם מסוים, מתכוונים למהירות או לגודל-המהירות, שעבורם נשתמש בביטוי $v = gt$. כשמבקשים לקבוע איזו דרך עבר גוף נופל מתכוונים למרחק, ועבורו מתקיים $d = \frac{1}{2}gt^2$. מהירות (כמה מהר) ומרחק (כמה דרך) הם מושגים שונים לחלוטין זו מזה.

מושג מבלבל ביותר, אולי המושג המבלבל ביותר בספר זה, הוא "כמה מהר משתנה המהירות" - כלומר, מושג התאוצה. מושג התאוצה הוא מושג מורכב בהיותו קצב של קצב. מהירות היא קצב - קצב שינוי המקום. תאוצה איננה מהירות, ואף איננה השינוי במהירות. תאוצה היא הקצב של שינוי המהירות. מן הראוי לזכור כי נדרשו קרוב לאלפיים שנה מאז זמנו של אריסטו ועד שהושגה הבנה ברורה של התנועה, לפיכך כדאי לכם להיות סבלניים, גם אם נדרשות עוד מספר שעות להבין היטב את הנושא!

עקרונות פיסיקליים מופשטים לניתוח מצבים יומיומיים. על-פי היקפו של הקורס ניתן להחליט מה כמות התרגילים שהמשתתפים נדרשים להגיש - מספרם הגדול של התרגילים אינו בהכרח מחייב, והוא יאפשר למורה לבחור את התרגילים הנראים לו מתאימים ביותר. **בעיות** מובאות רק בסיום אותם פרקים שאת עקרונותיהם קל יותר להפנים בעזרת דוגמאות מספריות ובעזרת חישובים, חישובים שבשום מקרה אינם מסובכים כשלעצמם. מספר הבעיות קטן למדי במתכוון, כדי שההיבט החישובי לא יאפיל על מטרתו העיקרית של ספר זה - עקרונות הפיסיקה - דהיינו: לפתח תובנה מעמיקה של עקרונות הפיסיקה כפי שהם מתגלים בתופעות יומיום. החישובים שנדרשים נועדו לבסס הבנה של מושגים, ולא חלילה להיפך.

תקציר מונחים

התמדה נטייתם של גופים שלא לשנות ממצב התנועה שלהם - מנוחה או תנועה במהירות קבועה. זוהי כעין "מנושמות" הטבועה בגופים.

גודל-המהירות הדרך שעובר הגוף ביחידת זמן.

מהירות גודל-מהירותו וכיוון תנועתו של גוף (מונח שאולי ראוי לכנותו: מהירות, כעין הכלאה של מהירות וכיוון. המתרי)

תאוצה הקצב שבו משתנית המהירות; השינוי במהירות יכול לכלול שינוי בגודל, שינוי בכיוון או שינוי בשניהם.

נפילה חופשית מצב של נפילה הנקי מהתנגדות האוויר ומכוחות אחרים; הכוח היחיד הפועל הוא כוח הכובד.

התנועה על-פי אריסטו

1. במסגרת רעיונותיו של אריסטו, השוו בין המושגים "תנועה טבעית" ו"תנועה מאולצת".
2. לדעת אריסטו, האם פועל כוח כלשהו על הירח המקיף בתנועתו את כדור הארץ? ועל פני כדור הארץ, האם לדעת אריסטו יש כוח המניע כדור המתגלגל על-גבי משטח אופקי וחלק?

קופרניקוס ותנועתו של כדור הארץ

3. השוו בין תפישותיהם של אריסטו ושל קופרניקוס אודות הקשר שבין כדור הארץ והשמש.
4. מה גילה גלילאו בניסוי שערך, כדברי האגדה, בעזרת המגדל הנטוי?

שאלות חזרה

כל פרק בספר זה מסתיים בשאלות חזרה ובתרגילים; לפרקים מסוימים מצורפות גם בעיות. **שאלות החזרה** נועדו לסייע בידך לגבש לעצמך את הרעיונות העיקריים שהופיעו בפרק. התשובות לשאלות אלו נמצאות בפרקים עצמם. **התרגילים** דורשים מחשבה עצמית, מעבר לחזרה על המידע כלשונו; כדי לפתורם עליך להיטיב להבין את ההגדרות והעקרונות שהובאו בפרק, אך גם את הקשרים שביניהם. במקרים רבים התרגיל מכוון להנחות אותך ליישום של

$$\frac{\text{הדרך}}{\text{הזמן}} = \text{גודל-המהירות}$$

(א)

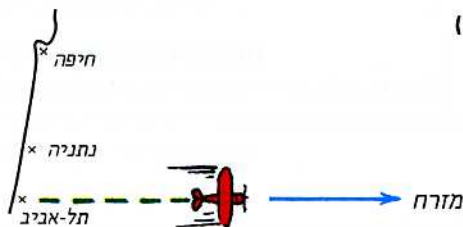
$$\text{גודל-המהירות} = \frac{95 \text{ ק"מ}}{1 \text{ שעה}} = 95 \text{ ק"מ/שעה}$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{גודל-המהירות} \\ \text{והכיוון} \end{array} \right\} = \text{מהירות}$$

(ב)

מהירות = 300 ק"מ/שעה, מזרחה

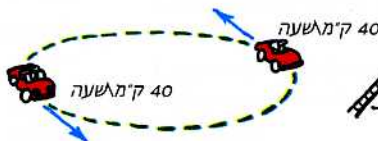


$$\left\{ \begin{array}{l} \text{שינוי בגודל-המהירות} \\ \text{ו/או בכיוון} \end{array} \right\} \text{ עקב } \left\{ \begin{array}{l} \text{קצב} \\ \text{שינוי} \\ \text{המהירות} \end{array} \right\} = \text{תאוצה}$$

(ג)



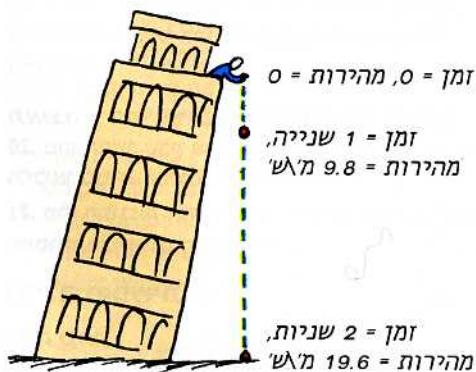
שינוי בגודל-המהירות
אך לא בכיוון



שינוי בכיוון אך לא
בגודל-המהירות



שינוי בגודל-המהירות
וכן שינוי בכיוון



$$\frac{\text{שינוי מהירות}}{\text{זמן}} = \text{תאוצה}$$

(ד)

$$\frac{19.6 \text{ מ'ש'}}{2 \text{ שניות}} = \text{תאוצה}$$

$$a = \frac{\text{מ'ש'}}{\text{שנייה}} 9.8$$

$$a = 9.8 \text{ מ'ש'}$$

$$a = 9.8 \text{ מ'ש}^2$$

23. מהי המהירות המיטוספת לגוף במשך שנייה אחת במהלכה של נפילה חופשית?
 24. גוף השרוי במנוחה נשמט ומתחיל ליפול נפילה חופשית. מהי מהירותו 5 שניות לאחר תחילת הנפילה? ומה מהירותו 6 שניות מתחילת הנפילה?
 25. תאוצתו של גוף הנופל נפילה חופשית היא כ-10 מ/ש². מדוע היחידה "שנייה" מופיעה בחזקת שתיים?

כמה רחוק

26. מהו הקשר שגילה גלילאו בעזרת המישורים המשופעים בין הדרך לבין זמן התנועה?
 27. איזו דרך עובר גוף בנפילתו החופשית, שהחלה ממצב מנוחה, במשך 5 שניות מאז החל בנפילתו? ובמשך 6 השניות הראשונות לנפילתו?

כמה מהר משתנה המהירות

28. נתונות לפניך 3 מדודות: 10 מ, 10 מ/ש, 10 מ/ש². איזו מביניהן היא מדידה של מרחק, איזו מדידה של גודל-המהירות ואיזו - מדידת תאוצה?

המישורים המשופעים של גלילאו

5. מה גילה גלילאו בניסויים שערך בעזרת מישורים משופעים?
 6. למה הכוונה בטענה כי לגוף יש התמדה? הדגימו.

תיאור של תנועה

7. מה פירוש "קצב השינוי"? תנו שלוש דוגמאות.

גודל-המהירות

8. אילו שתי יחידות נדרשות לתיאור גודל-המהירות?
 9. מה בין "גודל-המהירות" באופן כללי ל"גודל-המהירות הרגועי"? תנו דוגמה.
 10. מהו גודל-המהירות הממוצע של סוס העובר בדהרה 15 ק"מ במשך 30 דקות?
 11. איזה מרחק יעבור סוס שידהר בממוצע 25 ק"מ-בשעה במשך 30 דקות?

מהירות

12. מהו ההבדל שבין המושג "גודל-המהירות" לבין המושג "מהירות"?
 13. אם מכונית נעה במהירות קבועה, האם גם גודל-המהירות שלה קבוע? הסבירו.
 14. אם מכונית נעה בגודל-מהירות קבועה, האם ניתן לומר כי מהירותה גם היא קבועה? תארו דוגמה התומכת בטענתכם.

תאוצה

15. מהו ההבדל בין מהירות לבין תאוצה?
 16. מהי תאוצתה של מכונית המגבירה את מהירותה מ-0 ל-100 ק"מ/שעה במשך 10 שניות?
 17. מהי תאוצתה של מכונית הנעה במהירות קבועה של 100 ק"מ/שעה במשך 10 שניות? (מה, לדעתך, הסיבה לכך שתלמידים רבים עונים תשובה נכונה לשאלה הקודמת, ואילו בשאלה זו הם טועים?)
 18. מתי מרגישים בתנועת המכונית - כאשר היא נוסעת נסיעה "חלקה" או כאשר יש שינויים בתנועתה?
 19. תאוצה מוגדרת, כרגיל, כקצב השינוי במהירות. באילו נסיבות ניתן להגדירה כקצב השינוי בגודל-המהירות?

תאוצה - המישורים המשופעים של גלילאו

20. מהו הקשר שבין מהירות, תאוצה וזמן, כפי שגילה גלילאו בעזרת המישורים המשופעים?
 21. מהן התובנות אודות נפילה חופשית שהפיק גלילאו מניסוייו במישורים המשופעים?
 נפילה חופשית

כמה מהר

22. למה בדיוק הכוונה בגוף הנופל "נפילה חופשית"?

תרגילים

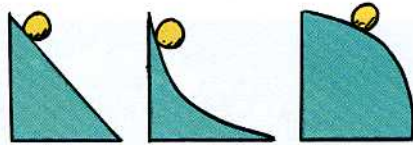
1. גולת זכוכית מתגלגלת על-גבי משטח אופקי עד שהיא נעצרת. כיצד היה אריסטו מנתח תצפית זו? וכיצד היה מסביר גלילאו אותה תצפית עצמה?
 2. מדוע השתמש גלילאו במישורים משופעים לחקר הנפילה החופשית?
 3. לאיזה מן הכדורים הבאים יש גודל-מהירות ממוצע רב יותר במהלך משחק: כדורגל, כדורסל או כדור גולף? נמקו את תשובתכם.
 4. מטוס נע דרומה ועובר 300 ק"מ בשעת טיסה. מטוס אחר נע צפונה ועובר 300 ק"מ בשעה. האם לשני המטוסים אותו גודל-מהירות? האם לשניהם אותה מהירות? הסבירו.
 5. סיגל נוהגת במכוניתה במהירות קבועה מסביב לכיכר. במונחים פיסיקליים, האם טענה זו יכולה להיות נכונה? נמקו.
 6. הביאו דוגמה למשהו שיש לו תאוצה בעת שהוא נע בגודל-מהירות קבועה. האם תוכלו לתת דוגמה לגוף הנע בתאוצה בעוד מהירותו קבועה? הסבירו.
 7. תנו דוגמה לגוף הנע כך שכיוון התאוצה שלו הפוך לכיוון תנועתו.
 8. אם תעמדו במכונית הנוסעת במהירות קבועה, האם תצטרכו להישען כדי לא ליפול? ואם המכונית נעה בתאוצה קבועה? הסבירו.
 9. על-גבי איזה מן הגופים המתוארים בשרטוט יתגלגל הכדור במהירות גדלה והולכת ובתאוצה קטנה והולכת?

בעולמנו היומיומי. מה תהיה תגובתך לטענה זו? מה, לדעתך, תהיה תגובתו של מחבר הספר לטענה כזו?

בעיות

1. אם נניח שהשיא העולמי בריצת 100 מ' הוא 10 שניות, באיזו מהירות יכולים בני-אדם לרוץ ביחידות של מל"ש? וביחידות של ק"מ/שעה?
2. מהי תאוצתה של מכונית המשנה את מהירותה במשך 10 שניות מ-100 ק"מ/שעה עד עצירה מוחלטת?
3. כדור נורק ישירות כלפי מעלה במהירות התחלתית של 30 מל"ש. לאיזה גובה יגיע וכמה זמן ישהה באוויר (בהנחה שהתנגדות האוויר זניחה)?
4. כדור נורק כלפי מעלה במהירות המספיקת לו שהייה בת מספר שניות באוויר. (א) מהי מהירותו בהגיעו לשיא גובה מסלולו? (ב) מהי מהירותו שנייה אחת לפני הגיעו לשיא המסלול? (ג) מהו השינוי במהירותו במשך שנייה זו? (ד) מהי מהירותו שנייה אחת לאחר שחלף בשיא המסלול? (ה) מהו השינוי במהירותו במהלך שנייה זו? (ו) מהו השינוי במהירותו במהלך 2 השניות הללו? (ז) מהי תאוצת הגוף בכל שנייה ושנייה במהלך מסלולו ומהי תאוצתו ברגע שבו מהירותו במסלול מתאפסת?
5. מהי מהירותו הרגעית של גוף כעבור 10 שניות מאז שהחל נופל נפילה חופשית ממצב מנוחה? מהי מהירותו הממוצעת במהלך 10 שניות אלו? איזו דרך יעבור במשך זמן זה?
6. רגלה של מטפסת הרים נוגעת קלות בסלע רופף בקצה המצוק והוא נשמט ונופל. היא רואה אותו פוגע בתחתית המצוק כעבור 8 שניות. מה היתה מהירות הסלע ברגע פגיעתו בקרקע? מאיזה גובה נפל הסלע?
7. מכונית עוברת ממצב $v = 0$ למצב 50 מל"שנייה v במשך 10 ש". אם ברצונך לחשב את הדרך שעברה המכונית במשך זמן זה על-פי הנוסחה $d = \frac{1}{2}at^2$, מהו הערך שעליך להשתמש בו עבור a ?
8. נניח שהגענו לביקור בכוכב-לכת שבו תאוצת הכבידה 20 מל"ש². מה תהיה מהירותו של גוף שייפול שם נפילה חופשית במשך שנייה אחת? מהי הדרך שיעבור בזמן זה? בזמנים נתונים, בכמה גדולה מהירותם של עצמים הנופלים שם נפילה חופשית, ובכמה גדולה הדרך שיעברו, בהשוואה לערכים אלה בכדור הארץ?
9. ייתכן שהדבר נראה מוזר, אך רק ספורטאים מעטים מסוגלים לנתר הישר כלפי מעלה יותר מ-60 סנטימטר. בעזרת הנוסחה $d = \frac{1}{2}gt^2$ חשבו כמה זמן עובר עד שספורטאי המתנר לגובה 60 ס"מ מגיע לשיא ניתורו. כדי לדעת כמה זמן מבלה ספורטאי כזה כשרגליו באוויר יש להכפיל ערך זה פי שניים.
10. חשבו את הגובה האנכי המרבי שאליו מתרומם מיקי ברקוביץ' בנייתור שבו שוהות רגליו בסך-הכל שנייה אחת באוויר.

זוהי דוגמה מומלצת להמחשת ההבדל שבין מהירות לתאוצה.



10. מהי תאוצתה של מכונית הנעה במהירות קבועה של 100 ק"מ/שעה במשך 100 שניות? הסבירו.
11. עבור גוף המתחיל ליפול נפילה חופשית ממצב מנוחה, מהי התאוצה שלו כעבור 5 שניות מתחילת הנפילה? ומהי תאוצתו כעבור 10 שניות מתחילת הנפילה? נמקו את תשובתכם.
12. נניח שהצמדנו מד-מהירות (ספידומטר) לגוף הנופל נפילה חופשית. בכמה היתה המהירות שקורא המכשיר משתנה במהלך כל שנייה של נפילה?
13. נניח שלגוף הנופל הנ"ל היינו מצמידים גם מד-דרך. האם קריאת הדרך שעבר הגוף במשך שנייה אחת היתה קבועה, או שקריאה זו היתה משתנה משנייה לשנייה? הסבירו.
14. זורקים כדור הישר כלפי מעלה. בהנחה שהתנגדות האוויר זניחה, בכמה קטנה מהירותו במהלך כל שנייה של עלייה? בכמה גדלה מהירותו בכל שנייה של ירידה-חזרה לאחר שחלף את נקודת שיא המסלול? השוו את זמן העלייה לזמן הירידה-חזרה.
15. להטוטן עומד בקצה מצוק (כבאיר 2.9) וזורק כדור במהירות מסוימת כלפי מעלה. בעת ובעונה אחת הוא משליך כדור דומה, במהירות שווה בגודלה, ישירות כלפי מטה. אם התנגדות האוויר זניחה, לאיזה מבין שני הכדורים תהיה מהירות גדולה יותר ברגע פגיעתו בקרקע? נמקו.
16. אם משחררים גוף ממצב מנוחה, הוא נופל בתאוצה שערכה 9.8 מל"שנייה² וכיוונה כלפי מטה. אם, במקום זאת, זורקים אותו במהירות כלפי מטה, האם תאוצתו כלפי מטה תהיה גדולה יותר מאשר 9.8 מל"ש²? הסבירו מדוע.
17. בהתייחס לתרגיל הקודם, האם תוכלו לשער מדוע תאוצת הכדור שנזרק כלפי מטה דרך האוויר תהיה, באופן מעשי, קטנה מ-9.8 מל"ש²?
18. נניח שתתבטל פתאום התנגדותו של האוויר; מדוע במצב זה יהיה מסוכן לצאת מפתח הבית ביום גשום?
19. המשיכו את הטבלאות 2.2 ו-2.3 עד 10 שניות (במקום עד 5 שניות). עשו זאת בהנחה שהתנגדות האוויר זניחה.
20. בפרק זה תיארנו מצבים "אידיאליים", לא מציאותיים - כדורים המתגלגלים על-גבי מישורים חסרי חיכוך ועצמים הנופלים מבלי להיות מושפעים מהתנגדות האוויר. נניח כי חברך לכיתה מעלה טענה לפיה חבל להקדיש זמן לבדיקת מצבים לא-מציאותיים שכאלה, שאינם מתקיימים כרגיל