

גזים ופלסמה



גזים, בדומה לנוזלים, יכולים לזרום; לכן, אלה גם נקראים זורמים. ההבדל העיקרי בין גז לנוזל הוא המרחק בין המולקולות. בגז, המולקולות מרוחקות זו מזו וחופשיות מכוחות הקשירות המכתיבים את תנועתן במצב הנוזלי והמוצק. תנועות המולקולות בגזים מוגבלות פחות. כאשר המולקולות בגז מתנגשות זו בזו או בדפנות כלי הקיבול, הן נרתעות בלא לאבד אנרגיה קינטית. גז מתפשט ללא גבול וממלא את כל הנפח העומד לרשותו. רק במקרה שכמות הגז גדולה מאוד, כמו באטמוספירה של כדור הארץ או בכוכבים, כוחות הכבידה מגבילים את גודלה של מסת הגז וקובעים את צורתה.

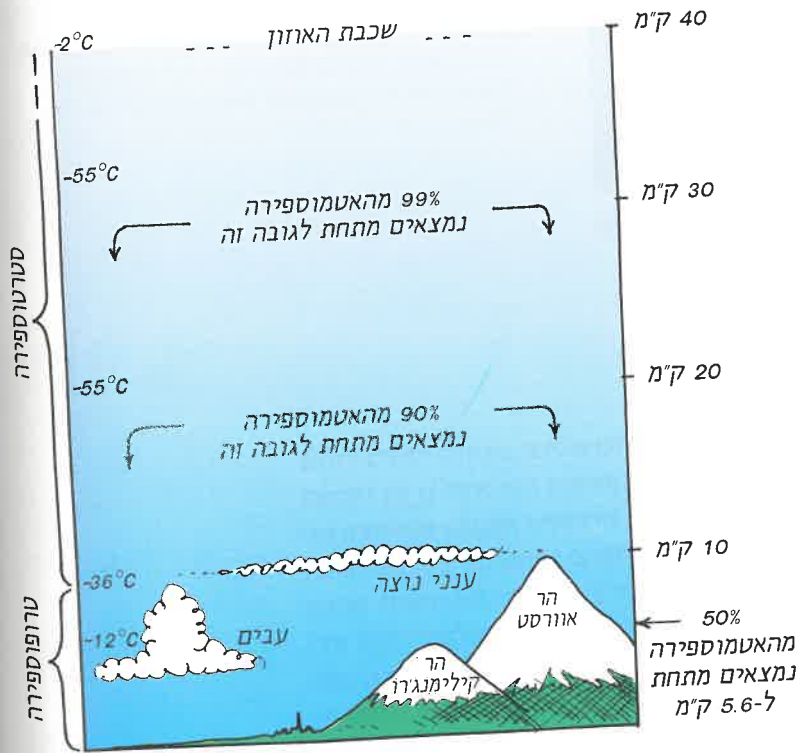
קרינת השמש, המספקת אנרגיה למולקולות האוויר ומאפשרת את תנועתן המתמדת, וכוח הכובד המושך אותן הם המאפשרים את קיום האטמוספירה של כדור הארץ. אילו לא היו מולקולות הגז בתנועה מתמדת, ה"אטמוספירה" שלנו היתה רק תוספת של חומר על פני כדור הארץ. היא היתה מונחת על האדמה כמו פופקורן המונח על תחתית הסיר במכשיר לקליית הפופקורן. אך כאשר מעניקים חום לפופקורן ולמולקולות הגז, אלה גם אלה קופצים מעלה לגבהים. מהירותם של גרעיני הפופקורן היא אך מספר קילומטרים בשעה וכך הם מסוגלים להגיע לגובה של מטר או שניים בלבד; לעומת זאת, מולקולות האוויר נעות במהירויות של כ-1600 קילומטרים בשעה והן מזנקות מעלה

האטמוספירה

לגובה של קילומטרים רבים. אלמלא קיומו של כוח הכובד, היו גרעיני הפופקורן וגזי האטמוספירה עפים לחלל החיצון. למזלנו קיימים הן השמן המספקת אנרגיה והן כוח הכובד, ולנו יש אטמוספירה. אי אפשר לקבוע גובה מדויק לאטמוספירה. ככל שמגביהים האוויר נעשו דליל יותר ויותר, ובסופו של דבר הוא מתקלש והופך בהדרגה לריק של החלל הבין-כוכבי. אך גם בריק, במרחב הבין-כוכבי, עדיין צפיפות הגז היא כמולקולה לסנטימטר מעוקב - בעיקר מולקולות מימן, שהוא היסוד הנפוץ ביותר ביקום. כ-50 אחוזים מהאטמוספירה נמצאים מתחת לגובה של 5.6 ק"מ, 75 אחוזים מצויים מתחת ל-11 ק"מ, 90 אחוזים - מתחת ל-17.7 ק"מ ו-99 אחוזים מתחת לכ-30 ק"מ (איור 13.1). במרבית האנציקלופדיות תוכלו למצוא תיאור מפורט של האטמוספירה.

איור 13.1

האטמוספירה. האוויר דחוס יותר בגובה פני הים מאשר בגובה רב יותר. כנוצות בשמיכת פוך ענקית, החומר שבתחתית צפוף יותר מזה שבחלק העליון.



אנו חיים על קרקעיתו של אוקיינוס אוויר. האטמוספירה, כמים באגם, מפעילה לחץ. אחד הניסויים המפורסמים ביותר המוכיחים את קיום הלחץ האטמוספירי נערך ב-1654 בידי אוטו פון-גריקה, ראש העיר מגדבורג שבגרמניה וממציא משאבת הריק. פון-גריקה הצמיד שני חצאי-כדור מנחושת שקוטרם כחצי מטר, ויצר כדור, כמתואר באיור 13.2. הוא הקיף את מקום החיבור של חצאי-הכדור ברצועת עור טבולה בשמן ובשעווה כדי לאטמם. לאחר שרוקן את הכדור מאוויר באמצעות משאבת הריק שלו, לא הצליחו שתי קבוצות בנות שמונה סוסים כל אחת להפריד בין החצאים.

הלחץ האטמוספירי



טבלה 13.1 צפיפויות של גזים אחדים

הגז	צפיפות (ק"ג/מ ³)*
אוויר יבש	
0° צלסיוס	1.29
10°	1.25
20°	1.21
30°	1.16
הליום	0.178
מימן	0.090
חמצן	1.43

* בלחץ אטמוספירי של גובה פני הים
וב-0° צלסיוס (אלא אם מצוין אחרת)

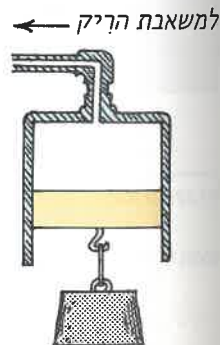
איור 13.2

הניסוי המפורסם "חצאי הכדורים ממגדבורג", משנת 1654, המוכיח את קיום הלחץ האטמוספירי. שתי קבוצות של סוסים נכשלו בניסיון להפריד בין החצאים המרוקנים מאוויר. האם נמשכו חצאי הכדור זה אל זה או נדחפו זה לעבר זה? על ידי מה?

כאשר מקטינים את הלחץ בגליל המתואר באיור 13.3, פועל על הבוכנה כוח כלפי מעלה. כוח זה די בו להרים את המשקולת הכבדה. אם קוטרו הפנימי של הגליל 10 ס"מ או יותר, הכוח יכול להרים אדם.

מה מוכיחים הניסויים המתוארים באיורים 13.2 ו-13.3? האם הם מראים שהאוויר לוחץ או שמא הם מוכיחים שקיים "כוח יניקה"? אם נאמר שזהו כוח יניקה, אזי אנו מניחים שהריק מסוגל להפעיל כוח. אך מהו ריק? זהו העדר חומר; זהו מצב של אֵין. כיצד יכול האֵין להפעיל כוח? חצאי-הכדור אינם נמשכים זה לזה, והבוכנה המחזיקה במשקולת אינה נמשכת כלפי מעלה. לחץ האטמוספירה הוא שדוחף את חצאי-הכדור ואת הבוכנה.

בדיוק כשם שלחץ המים הוא תוצאה ממשקל המים, כך הלחץ האטמוספירי נוצר ממשקל האוויר. אנו כה מורגלים לכך שהאוויר בלתי נראה, עד כי לעיתים אנו שוכחים שלאוויר יש משקל. בדומה לכך "שוכחים" אולי הדגים את משקל המים. הגורם לכך שאיננו חשים שלחץ זה מועך את גופנו הוא הלחץ בתוך גופנו, השווה ללחץ האוויר שמסביבנו. התוצאה היא שאין כוח שקול הפועל עלינו שנוכל לחוש בו.



איור 13.3

האם הבוכנה נמשכת מעלה או נדחפת מעלה?

בגובה פני הים, מסתו של מטר מעוקב אחד של אוויר היא כ-1¼ ק"ג. משקל האוויר בחדרה הקטן של אחותך הצעירה הוא בקירוב כמשקלה! צפיפות האוויר קטנה ככל שמגביהים מעל כדור הארץ. בגובה של 10 ק"מ, למשל, מסת מטר מעוקב של אוויר היא כ-0.4 ק"ג. במטוסים מגביהי טוס דוחסים את האוויר כדי לפצות על כך; כמות האוויר הנוספת הדרושה לדחיסה מלאה של אוויר במטוס גימבו, למשל, עולה על 1000 ק"ג. לכמויות גדולות של אוויר משקל רב. אחותך הקטנה אולי אינה מאמינה שלאוויר יש משקל, מפני שהיא

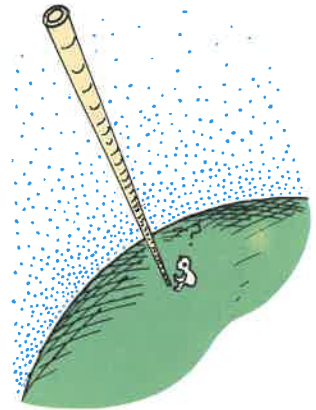
איור 13.4

כאשר אנו שקועים במים, איננו חשים במשקלה של השקית המלאה במים. בדומה לכך, איננו חשים במשקל האוויר.



מוקפת כל הזמן באוויר. אם תיתנו לה שקית פלסטיק מלאה במים, היא לא תפקפק בכך שלשקית המלאה יש משקל. אך אם תגישו לה אותה שקית בשעה שהיא טובלת בבריכת שחייה, היא לא תחוש במשקלה, כי היא והשקית מוקפות במים. זאת גם תחושתנו באוויר המקיף אותנו (איור 13.4).

נתבונן במסת האוויר שבמוט חזרן (דמיוני) שגובהו 30 ק"מ ושטח החתך שלו 1 ס"מ². אם צפיפות האוויר בתוך המוט שווה לצפיפות האוויר שמחוץ לו, מסת האוויר הכלוא היא כ-1 ק"ג. משקלה של כמות כזאת של אוויר הוא כ-10 ניוטון. לפיכך, לחץ האוויר בתחתית המוט הוא בקירוב 10 ניוטון לס"מ² (10 נ"ס"מ²) (איור 13.5). זהו, כמובן, הלחץ גם ללא מוט החזרן. ב-מ"ש יש 10,000 ס"מ², לכן מסתו של עמוד אוויר המתנשא לגובה האטמוספירה, ששטח החתך שלו 1 מ"ר, היא כ-10,000 ק"ג. משקלו של אוויר זה הוא כ-100,000 ניוטון (105 נ"ו). משקל זה מפעיל לחץ של 100,000 ניוטון ל-מ"ר, שהם 100,000 פסקל או 100 קילו-פסקל (איור 13.6). ליתר דיוק, הלחץ האטמוספירי הממוצע בגובה פני-הים הוא 101.3 קילו-פסקל*.



איור 13.5

מסת האוויר במוט חזרן המתנשא עד "פסגת" האטמוספירה היא כ-1 ק"ג. משקלו של אוויר זה הוא כ-10 ניוטון.

1. כמה ק"ג אוויר יש בכיתה ששטח רצפתה 200 מ² וגובה תקרתה 4 מ' (הניחו שהמטפרטורה בחדר היא 10° צלסיוס).
2. מדוע אין לחץ האטמוספירה מנפץ שמשות?

שאלות

1. מסת האוויר היא 1000 ק"ג. נפח האוויר הוא 200 מ³ × 4 מ' = 800 מ³, מסתו של כל מטר מעוקב של אוויר היא 1 ק"ג, ולכן המסה היא 800 מ³ × 1 ק"ג/מ³ = 800 ק"ג.
2. הלחץ האטמוספירי פועל משני צידי החלון, ולכן אין על החלון כוח שקול. אם מסיבה כלשהי הלחץ מצד אחד קטן או גדל, מוטב שתיזהרו!

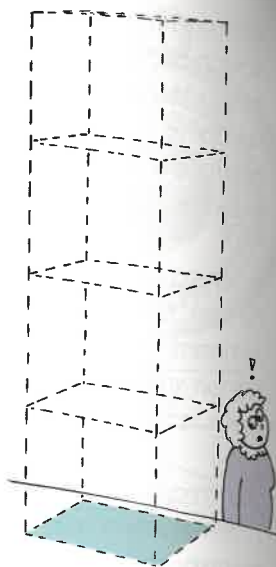
תשובות:

* הפסקל או הקילו-פסקל הוא יחידת המדידה במערכת המטרית הבינלאומית (SI). לפני שהונהגה שיטת היחידות SI, הלחץ הממוצע בגובה פני הים נקרא 1 אטמוספירה. המושג עדיין נמצא בשימוש. אטמוספירה אחת שווה איפוא ל-101.3 קילו-פסקל.

לחץ האטמוספירה אינו אחיד. מלבד הבדלים הנובעים משינויי הגובה, נוצרים הבדלים מקומיים בלחץ האטמוספירי כתוצאה מזרמי אוויר ומסערות. חזאים מסתייעים במדידת השינויים בלחץ האוויר כדי לערוך תחזיות מזג אוויר.

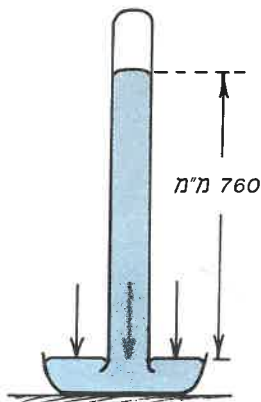
ברומטרים

את לחץ האטמוספירה מודדים באמצעות מכשירים הקרויים **ברומטרים**. ברומטר כספית פשוט מתואר באיור 13.7. לתוך קערה המכילה כספית הופכים צינור זכוכית שאורכו עולה על 76 ס"מ, הסגור בצידו האחד ומלא בכספית. חלק מן הכספית נשפך דרך פתח הצינור השקוע בקערה עד שגובה הכספית הנוותרת בצינור הוא 76 ס"מ בקירוב. בחלל שבחלקו העליון של הצינור נוצר ריק מושלם, למעט אדי כספית מעטים. גובה עמוד הכספית נותר קבוע גם אם מטים את הצינור, אלא אם כן יורד קצהו העליון של הצינור אל מתחת לגובה של 76 ס"מ מעל פני הכספית שבקערה - או אז ממלאת הכספית את הצינור כולו.



איור 13.6

משקל האוויר המעיק על שטח של 1 מ² הנמצא בגובה פני הים הוא כ-100,000 ניוטון. לכן הלחץ האטמוספירי הוא כ-105 נ"מ², שהם 100 קילו-פסקל.



איור 13.7

ברומטר כספית פשוט.

מדוע הכספית מתנהגת כך? המצב כאן דומה למצבה של נדנדה המאוזנת כשמשקל האנשים היושבים בקצותיה שווה. הברומטר "מאוזן" כאשר משקל הנוזל שבצינור יוצר לחץ השווה ללחץ האטמוספירה שבחוץ. ללא תלות בשטח הצינור, משקלו של עמוד כספית שגובהו 76 ס"מ הוא כמשקלה של כמות האוויר שהיתה ממלאת צינור בעל שטח חתך שווה שגובהו 30 ק"מ. אם הלחץ האטמוספירי עולה, עמוד הכספית נדחף מעל ל-76 ס"מ. למעשה, הכספית נדחפת לתוך צינור הברומטר על ידי הלחץ האטמוספירי.

האם ניתן להשתמש במים לבניית ברומטר? התשובה חיובית, אלא שצינור הזכוכית חייב להיות ארוך בהרבה - ליתר דיוק, אורכו צריך להיות גדול פי 13.6. אולי הבחנתם שמספר זה הוא היחס בין צפיפות הכספית לצפיפות המים. כדי לספק משקל השווה למשקל הכספית שבצינור (או למשקל עמוד האוויר הדמיוני שבחוץ) נדרש נפח מים הגדול פי 13.6 מנפח הכספית. לכן, גובה הצינור חייב להיות גדול לפחות פי 13.6 מגובה עמוד הכספית. גובהו של ברומטר-מים חייב להיות 13.6×0.76 מ', שהם 10.3 מ' - גובה מדי לשימושים מעשיים.

המתרחש בברומטר דומה לתהליך השתייה בקשית. בזמן היניקה, לחץ האוויר בקשית הטבולה במשקה קטן. הלחץ האטמוספירי הפועל על המשקה דוחף את הנוזל לתוך אזור הלחץ המוקטן. ליתר דיוק, הנוזל אינו נמשך למעלה; הוא נדחף כלפי מעלה על ידי לחץ האטמוספירה (איור 13.8). אם מונעים את פעולת לחץ האטמוספירה על המשקה, כמו בבקבוק תעלולים, שבו הקשית חודרת למשקה דרך פקק הצמוד לבקבוק וחוסם את מעבר האוויר, אזי אפילו אם נמצוץ ונשאב, לא נזכה לטעום מן המשקה.



איור 13.8

למען הדיוק, הם אינם יונקים את המשקה דרך קשיות השתייה. למעשה הם מקטינים את הלחץ בקשיות ומאפשרים למשקל האטמוספירה ללחוץ על הנוזל ולדחפו לתוכן. האם ניתן לשתות כך על הירח?

אם הבנתם כראוי את הרעיונות הללו, תוכלו להבין מדוע הגובה המרבי שאליו ניתן להעלות מים במשאבות-ריק הוא 10.3 מ'. משאבת הכפר העתיקה שבאיור 13.9 פועלת בדרך של יצירת ריק חלקי בצינור הטבול במים שמתחתיה. הלחץ האטמוספירי הפועל על פני המים דוחף אותם לתוך אזור הלחץ המוקטן שבצינור. התוכלו להבין מדוע גם ביצירת ריק מוחלט, הגובה המרבי שאליו ניתן להעלות את המים הוא 10.3 מ'?

הברומטר האנרואידי (הברומטר היבש) הוא מכשיר קטן ונייד למדידת לחץ אטמוספירי (איור 13.10). הוא בנוי מקופסת מתכת קטנה המרוקנת חלקית מאוויר ומכוסה במכסה גמיש המתקמר פנימה או החוצה בהתאם לשינויים בלחץ האטמוספירי. תנועת המכסה מוצגת על גבי סקלה באמצעות מחוג המחובר למערכת של קפיץ ומנוף. מכיוון שהלחץ האטמוספירי קטן עם העלייה בגובה, ניתן להשתמש בברומטר כזה למדידת גבהים. ברומטר אנרואידי המכיל למדידת גבהים נקרא מד-גובה. קיימים מכשירים כאלה הרגישים דיים למדידת שינויים בגובה הקטנים ממטר אחד.

איור 13.9

האטמוספירה דוחפת מים מלמטה לתוך הצינור שרוקן מאוויר בפעולת המשאבה.

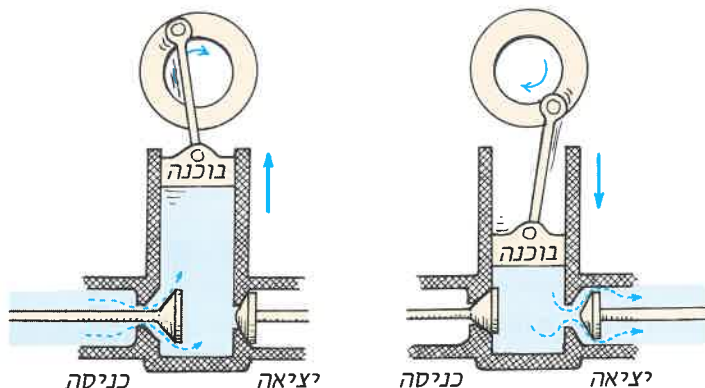


הלחץ (או הריק) בתוך שפופרת טלויזיה הוא בקירוב החלק העשרת-אלפים של פסקל (10^{-4} פסקל). בגובה של 500 ק"מ, באזור שבו נעות חלליות, לחץ הגז קטן פי עשרת אלפים מלחץ זה (10^{-8} פסקל). במושגים ארציים זהו ריק טוב מאוד. ריק טוב עוד יותר קיים בשובלי חלליות הנעות במרחקים האלה, ושם הוא יכול להגיע עד ל- 10^{-13} פסקל. זהו אכן ריק מעולה.

בכדור הארץ יוצרים ריק בעזרת משאבות, שפעולתן מבוססת על העיקרון שגז נוטה למלא את כל נפח כלי הקיבול שלו. אם יוצרים חלל בעל צפיפות נמוכה יותר, הגז יזרום מהאזור שבו הצפיפות גבוהה לאזור הצפיפות הנמוכה. משאבת הריק יוצרת אזור של צפיפות נמוכה ואליו חודרות באקראי מולקולות הגז המהירות. לחץ האוויר מוקטן שוב ושוב בפעולת הבוכנה והשסתום (איור 13.11). הריק הטוב ביותר שניתן לקבל במשאבות מכניות הוא כפסקל אחד. ריק טוב יותר, בסביבות 10^{-8} פסקל, ניתן להשיג במשאבות עפעוע (דיפוזיה) של אדים. קשה להגיע לריק טוב יותר. טכנולוגיות המחייבות ריק רב יותר מצפות להקמת מעבדות חלל שינועו במסלולים סביב כדור הארץ, ובהן ניתן יהיה ליצור ריק טוב בהרבה.



איור 13.10
רומטר אנרואיד.



איור 13.11
משאבת-ריק מכנית. כאשר הבוכנה מורמת, שסתום הכניסה נפתח ואוויר ממלא את החלל הריק. כאשר הבוכנה מורדת, שסתום היציאה נפתח והאוויר נדחף החוצה. אילו שינויים יש לבצע כדי להפוך את המשאבה למדחס-אוויר?

מהו הגובה המרבי שאליו ניתן לינוק מים בעזרת קשית?

שאלה

לחץ האוויר בצמיגי מכונית מנופחים גדול בהרבה מהלחץ האטמוספירי. גם צפיפות האוויר בתוך הצמיג עולה על הצפיפות החיצונית. כדי להבין את הקשר בין לחץ לצפיפות, חישבו על מולקולות האוויר בתוך הצמיג (בעיקר חנקן וחמצן). המולקולות מתנהגות ככדורי פינג-פונג זעירים, הנעים בחופזה בתנועה מתמדת ופוגעים בדפנות הפנימיות. התנגשות המולקולות במשטח הפנימי

חוק בוייל

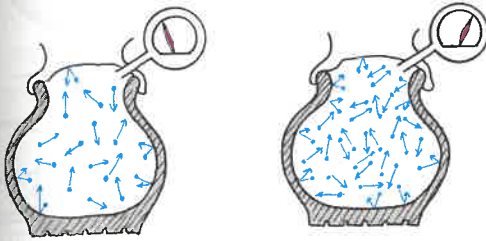
גובה פני-הים, ללא תלות בחוזק ריאליטיכם ובמנגנון שתשתמשו בו ליצירת הריק בקשית, הגובה המרבי שאליו אפשר לדחוף מים בלחץ האטמוספירה אינו עולה על 10.3 מ'.

תשובה:

יוצרת כוח משתנה, הנקלט בחושינו הבלתי-רגישים כדחיפה מתמשכת. ממוצע כוח הדחף הזה ליחידת שטח יוצר את לחץ האוויר הכלוא. נניח שמספר המולקולות הנמצאות באותו נפח מוכפל (איור 13.12). אזי גם צפיפות האוויר מוכפלת. אם מהירותן הממוצעת של המולקולות אינה משתנה - או, במילים אחרות, אם הן בעלות אותה טמפרטורה - אז, בקירוב מצוין, מספר ההתנגשויות מוכפל. פירוש הדבר הוא שהלחץ הוכפל. מכאן שהלחץ מתכונתי לצפיפות.

איור 13.12

כאשר צפיפות הגז בצמיג עולה, הלחץ גדל.



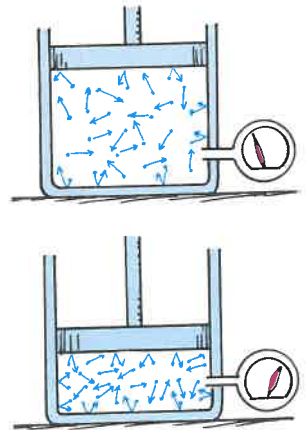
נוכל להכפיל את צפיפות הגז גם על ידי דחיסת האוויר למחצית נפחו. התבוננו בגליל בעל הבוכנה הניידת באיור 13.13. אם הבוכנה נדחפת כלפי מטה, באופן שהנפח קטן למחצית שיעורו המקורי, צפיפות המולקולות מוכפלת, ובהתאמה מוכפל גם הלחץ. אם נקטין את הנפח לשליש מערכו ההתחלתי, הלחץ יגדל פי שלושה, וכן הלאה.

שימו לב שבדוגמאות אלו מכפלת הלחץ בנפח קבועה. לחץ כפול המוכפל במחצית הנפח, למשל, שווה ללחץ משולש המוכפל בשליש הנפח. ככלל נוכל לומר שעבור מסה נתונה של גז, כל זמן שהטמפרטורה אינה משתנה, מכפלת הלחץ בנפח קבועה. המכפלה "לחץ $\times$ נפח" לכמות גז מסוימת בזמן נתון שווה למכפלה "לחץ $\times$ שונה $\times$ נפח שונה" בזמן אחר. ובקיצור:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

באשר V_1 ו- P_1 הם, בהתאמה, הלחץ והנפח ההתחלתיים, ו- V_2 ו- P_2 הם הלחץ והנפח הסופיים. הקשר הזה נקרא **חוק בויל**, על שם רוברט בויל, הפיסיקאי בן המאה ה-17, שמייחסים לו את גילוי החוק. שימו לב לדמיון בין קשר זה לשימור האנרגיה המכנית במנוף פשוט, למשל. עבורו, מכפלת הכוח בדרך קבועה: $F_1 d_1 = F_2 d_2$.

חוק בויל תקף לגזים אידיאליים. גז אידיאלי הוא גז שבו ההשפעות של הכוחות הבין-מולקולריים ושל הנפח המולקולרי כה קטנות שהן ניתנות להזנחה. האוויר וגזים אחרים בלחצים רגילים מקיימים בקירוב את התנאים לגז אידיאלי*.



איור 13.13

כאשר מקטינים את נפח הגז, צפיפותו ולחצו גדלים.

* חוק כללי, התקף גם במקרים שבהם חלים שינויי טמפרטורה, הוא $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$, כאשר T_1 ו- T_2 מייצגים את הטמפרטורות המוחלטות - ההתחלתית והסופית - הנמדדות בשיטת SI, ביחידות קלווין (פרק 17).

שאלות

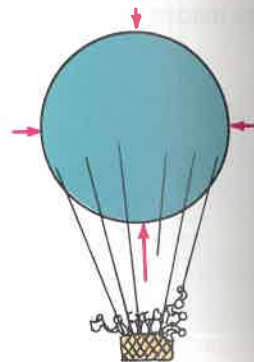
1. מגדילים פי שלושה את נפח האוויר בחללה של משאבת אוויר באמצעות משיכת הבוכנה. מהו השינוי בלחץ?
2. צוללנית הנמצאת בעומק של 10.3 מ' נושמת אוויר דחוס. אם היא עוצרת את נשימתה עד לחזרתה לפני המים, בכמה ישאף נפח ריאותיה לגדול?

סרטן חי בקרקעית אוקיינוס המים ומתבונן למעלה לעבר מדוזות ויצורים אחרים הקלים מהמים וצפים מעליו. בדומה לסרטן, אנו חיים בתחתיתו של אוקיינוס אוויר וצופים כלפי מעלה אל כדורים פורחים ועצמים אחרים קלים מהאוויר הצפים מעלינו. כדור פורח מרחף באוויר ומדוזה "מרחפת" במים בשל אותה סיבה: כל אחד מהם נדחף מעלה בכוח השווה למשקל הזורם שנדחה, השווה למשקלו. במקרה האחד הזורם הנדחה הוא אוויר, ובמקרה האחר הזורם הוא מים. במים, גופים טבולים נדחפים כלפי מעלה מכיוון שהלחץ הפועל כלפי מעלה על חלקם התחתון גדול מהלחץ הפועל כלפי מטה על חלקם העליון. באותו אופן, לחץ האוויר הפועל כלפי מעלה על גוף הנמצא באוויר גדול מהלחץ הפועל על חלקו העליון ודוחפו מטה. בשני המקרים כוח העילוי שווה מספרית למשקל הזורם שנדחה. נוכל לנסח את **חוק ארכימדס לאוויר**:

גוף המוקף באוויר נדחף כלפי מעלה בכוח השווה למשקל האוויר שנדחה.

ידוע שמסתו של מטר מעוקב של אוויר בתנאים רגילים של לחץ אטמוספירי ובטמפרטורת החדר היא כ-1.2 ק"ג, כלומר, משקלו כ-12 ניוטון. לכן, כל גוף שנפחו 1 מטר מעוקב נדחף כלפי מעלה בכוח של 12 ניוטון. אם נשחרר גוף שנפחו 1 מטר מעוקב ומסתו גדולה מ-1.2 ק"ג (כך שמשקלו גדול מ-12 ניוטון), הוא ייפול ארצה. אם מסת הגוף קטנה מ-1.2 ק"ג, הוא יעלה מעלה. כל גוף שמסתו פחותה ממסת האוויר שנפחו כנפח הגוף יתרומם. דרך אחרת לומר זאת היא שכל גוף שצפיפותו קטנה מצפיפות האוויר יינשא מעלה. כדורים פורחים הממולאים בגז ומתרוממים הינם צפופים פחות מאוויר (אוויר 13.14). את הכדורים הפורחים ממלאים בגז, פשוט כדי למנוע מלחץ האטמוספירה למעוך אותם. לרוב משתמשים בהליום, מפני שמסתו קטנה דיה כך שהמשקל

כוח העילוי של האוויר



איור 13.14

על כל גוף פועל כוח עילוי השווה למשקל האוויר שהגוף דוחה. מדוע, אם כן, לא כל הגופים מרחפים כמו הכדור הפורח שבאיור?

תשובות:

1. נפח האוויר קטן פי שלושה. זהו עקרון הפעולה של משאבת-ריק מכנית.
2. הלחץ האטמוספירי מאזן עמוד מים שגובהו 10.3 מ', לכן הלחץ הנובע ממשקל המים בלבד שווה בעומק של 10.3 מ' ללחץ האטמוספירי. אם נוסיף לזה את הלחץ האטמוספירי על פני המים, הלחץ הכולל בעומק הנתון יהיה כפליים מהלחץ האטמוספירי. למזלה הרע של הצוללנית, אם היא תעצור את נשימתה בעלותה אל פני המים, ריאותיה ישאפו להכפיל את נפחם הרגיל. שיעור ראשון בצלילה הוא לא לעצור את הנשימה בעלייה. התוצאות עלולות להיות קטלניות.

הכולל של ההליום, הכדור הפורח והמשא שהוא נושא קטנים ממשקל האוויר הנדחה*. בכדור פורח משתמשים בהליום מאותה סיבה שבגללה גלגל הצלה עשוי משעם. לשעם אין נטייה מיוחדת להימשך אל פני המים ולהליום אין נטייה יוצאת דופן להתרומם באוויר. שניהם, ככל הגופים, נדחפים כלפי מעלה בכוח העילוי. הם פשוט כה קלים, שכוח העילוי הפועל עליהם ניכר.

להבדיל ממים, לאטמוספירה אין גבול חד ב"פסגתה". נוסף על כך, להבדיל ממים, צפיפות האטמוספירה קטנה עם הגובה. לכן, לעומת השעם, העולה עד לפני המים, כדור פורח מלא בהליום לא יתרומם עד לפני האטמוספירה. האם ימשיך כדור פורח הקל מהאוויר להתרומם ללא גבול? לאיזה גובה יגיע הכדור? את התשובה אפשר לנסח בכמה דרכים: הכדור הפורח ימשיך להתרומם כל עוד משקל האוויר שהוא דוחה גדול ממשקלו. כאשר משקל האוויר הנדחה שווה למשקל הכדור הפורח, ההאצה תיפסק ועד מהרה הכדור ייעצר. נוכל לומר גם כי כאשר כוח העילוי שפועל על הכדור הפורח שווה למשקלו, התאוצה מתאפסת. ובמילים אחרות, כאשר צפיפות הכדור הפורח שווה לצפיפות האוויר בסביבתו, תיפסק העלייה. בדרך כלל, כאשר משחררים בלוני-משחק מלאים בהליום הם מתפוצצים, כי כאשר הם מגיעים לאזורי לחץ נמוך, ההליום שבתוכם מתפשט, מגדיל את נפח הבלון ומותח את מעטפתו עד לקריעתה.

שאלות

1. האם פועל כוח עילוי על כל אחד מאיתנו? אם כן, מדוע איננו מתרוממים כתוצאה מכך?
2. שני כדורים פורחים בעלי משקל ונפח שווים מולאו בכמויות שוות של הליום. כדור אחד קשיח והאחר חופשי להתפשט עם ירידת הלחץ החיצוני. איזה כדור פורח יתרומם לגובה רב יותר כאשר ישוחררו שניהם?

ספינות אוויר גדולות בנויות כך שבשעה שהן עמוסות הן תתרוממנה אט-אט באוויר; כלומר, משקלן הכולל קטן במעט ממשקל האוויר הנדחה. כשהן משייטות ניתן להרים אותן או להורידן בעזרת מעין משוטים אופקיים. עד כה דנו בלחץ של זורמים השרויים במנוחה. כאשר הזורמים נמצאים בתנועה נכנסים לתמונה גורמים נוספים.

תשובות

1. תמיד פועל עלינו כוח עילוי הדוחף אותנו כלפי מעלה. איננו מבחינים בכוח זה מפני שמשקלנו גדול ממנו בהרבה.
2. הכדור הפורח החופשי להתפשט ידחה אוויר רב יותר מהכדור הפורח הקשיח. לכן, כוח העילוי על הכדור הגמיש גדול יותר והוא יתרומם לגובה רב יותר.

* מימן הוא גז שצפיפותו נמוכה יותר, אך הוא דליק מאוד ומשתמשים בו לעיתים נדירות.

חוק ברנולי

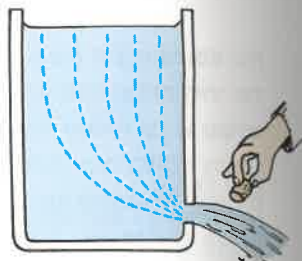
האם לדעתכם נכונה הטענה הבאה? - ברוח פרצים, בסופת טורנדו או בסערת הוריקן הלחץ האטמוספירי גדל. אם תשובתכם היא כי המשפט נכון - טעות בידכם. רוחות מהירות מסוגלות לעיתים להעיף את גג הבית, אך הלחץ ברוחות אלו נמוך מלחץ האוויר שצפיפותו שווה השרוי במנוחה בביתכם. בתחילה אולי תיראה עובדה זו מוזרה, אך בפועל, כשמהירותו של זורם גדלה, הלחץ הפנימי בו קטן ביחס ישר לגידול במהירותו. קשר זה מתקיים בכל זורם - בנוזל או בגז. דניאל ברנולי, מדען שווייצי בן המאה ה-18, חקר את הקשר בין מהירות הזורם ללחצו. כאשר זורם עובר במעבר צר, מהירותו גדלה. קל להבחין במהירותו המוגדלת של נחל העובר לפתע באפיק צר. שמירה על הזרימה הרציפה מחייבת את הגברת מהירות הזורם באזור הצר. ברנולי תהה מהו מקור האנרגיה להגדלת מהירות הזורם. הוא טען שהאנרגיה מתקבלת מהקטנת הלחץ הפנימי. גילוי, הנקרא עתה **חוק ברנולי**, קובע:

כשמהירות הזורם גדלה לחצו קטן.

חוק ברנולי נובע מעקרון שימור האנרגיה. לזורם - נוזל או גז - המצוי בזרימה עמידה ניתן לייחס שלושה סוגי אנרגיה: אנרגיה קינטית הנובעת מתנועתו, אנרגיה פוטנציאלית הנובעת מלחצו, ואנרגיה פוטנציאלית כובדית בהתאם לגובהו. בזרימה קבועה אין פחת או גידול באנרגיה הכוללת, ולכן סכומם של שלושת סוגי האנרגיה נותר קבוע*. אם גובה הזורם הנע אינו משתנה, הגדלת המהירות גוררת ירידה בלחץ, ולהיפך.

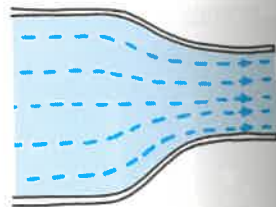
הקטנת לחץ הזורם כשמהירותו גדלה עשויה להיראות תמוהה בתחילה, בעיקר אם איננו מבחינים בין הלחץ בזורם ללחץ שהזורם מפעיל על גוף הנקרה בדרכו. הלחץ בתוך זורם המים בברז לכיבוי שריפות נמוך יחסית, אך הלחץ שהמים עשויים להפעיל על עצמים המעכבים אותם במסלולם יכול להיות עצום. בזרימה קבועה, כל אזור קטן של הזורם נע לאורך מסלול שאינו משתנה בזמן. במצב זה של זרימה קבועה הנוזל או הגז נעים לאורך קווי זרימה, המיוצגים באיורים 13.15, 13.16 ובאיורים הבאים בקווים מקוטעים. קווי זרימה הם המסלולים החלקים - או הנתבים - של אזורים סמוכים בזורם. באזורים הצרים קווי הזרימה קרובים זה לזה, מהירות הזרימה גדולה יותר והלחץ נמוך יותר.

כאשר מהירות הזרימה גדולה מדי, הזרימה הופכת ערבולית ומסלולי התנועה המסתלסלים, המשתנים עם הזמן, נקראים ערבולות. בתנועה זו חוק ברנולי אינו מתקיים.



איור 13.15

שליפת הפקק גורמת להקטנת הלחץ בנקב.



איור 13.16

המים מואצים בהיכנסם לחלקו הצר של הצינור. קווי הזרימה המצופפים מעידים על כך שהמהירות גדלה והלחץ הפנימי ירד.

* ובאופן מתמטי: קבוע $= pV + mgy + \frac{1}{2}mv^2$; m היא המסה של של יחידת נפח V , v - מהירותה ו- p הלחץ שלה, g היא תאוצת הכובד ו- y גובה נפח הגז V . אם נחלק את כל המשוואה בנפח V , משוואת ברנולי מתקבל בצורה:

קבוע $= p + \rho gy + \frac{1}{2}\rho v^2$, כאשר $\rho = m/V$ היא הצפיפות. בצורה זאת לשלושת איברי המשוואה ממדים של לחץ. אם הגובה y אינו משתנה, אזי גידול במהירות v כרוך בהקטנת הלחץ p , ולהיפך.

שימושים בחוק ברנולי

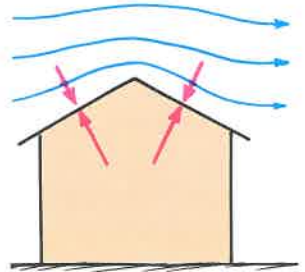
החזיקו דף נייר לפניכם, כבאיור 13.17. אם תנשפו מעל למשטח העליון, הנייר יתרומם. הסיבה לכך היא שהאוויר הנע מפעיל על חלקו העליון של הנייר לחץ נמוך מזה שמפעיל האוויר הנח על תחתית הדף.



איור 13.17

הנייר מתרומם כשנושפים מעל צידו העליון.

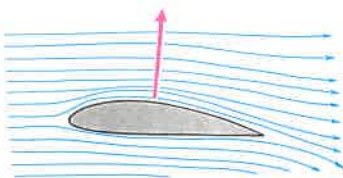
בתחילת הדיון בחוק ברנולי קבענו שהלחץ האטמוספירי קטן ברוחות חזקות, בטורנדו או בהוריקן. לפיכך, הסכנה הנשקפת ליציבותו של בית ללא פתחים, שחלונותיו אטומים, גדולה יותר מזו הנשקפת לבניין בעל פתחים. הסיבה לכך היא שהלחץ בתוך הבניין עלול להיות גדול במידה ניכרת מהלחץ האטמוספירי המוקטן שבחוץ. במצב זה הגג עלול להידחק החוצה על ידי האוויר הדחוס יחסית שבתוך הבית, והסכנה לכך גדולה יותר מהסכנה שהרוח תעיף אותו. התופעה בולטת אף יותר בעת שהרוח נושבת על פני גג משופע, כמתואר באיור 13.18. אין הכרח שיהיה הבדל ניכר בין הלחץ הפנימי לחיצוני. די בהפרש לחצים לא גדול שפועל על שטח גדול. מי שחי באזורים המועדים לסופות טורנדו לומד שכדאי להשאיר פתח אוורור קטן להשוואת הלחצים, החיצוני והפנימי, זאת אם בבית לא תוכננה מראש מערכת אוורור מתאימה.



איור 13.18

לחץ האוויר הפועל על צידו העליון של הגג נמוך מלחץ האוויר הפועל על תחתית הגג.

אם נחשוב על הגג המתעופף כעל כנף מטוס, נוכל להבין טוב יותר מהו כוח העילוי התומך במטוס כבד. בשני המקרים הלחץ הגדול יותר מתחת דוחף את הגג או את המטוס לעבר אזור הלחץ הנמוך יותר ממעל. סיכויי של גג מקומר להתעופף גדולים יותר מאלה של גג שטוח. בדומה לכך, כוח העילוי על כנף המקומרת בצידה העליון גדול יותר מכוח העילוי על כנף שמשטחיה שטוחים (כדוגמת אלה של דאוני-משחק העשויים מעץ בלזה). הן במטוס שכנפיו שטוחות והן במטוס בעל כנפיים מעוגלות, הכוח שמפעיל האוויר הפוגע בדופן התחתונה של הכנף, הנטויה במקצת אחורה ומטה את האוויר הפוגע בקדמת המטוס כלפי מטה, הוא המטיס את המטוס (כמתואר בקצרה בפרק 4). אולם צורתה האירודינמית של הכנף המעוגלת מגדילה במידה ניכרת את כוח העילוי שפועל על המטוס וגורמת להגדלת הפרש הלחצים בין צידה התחתון של הכנף לבין צידה העליון. כוח העילוי שווה למכפלת הפרש הלחצים בשטח הכנף (איור 13.19). כוח העילוי גדל כאשר שטח הכנף גדל וכאשר מהירות המטוס עולה. שטח הכנפיים של דאוני גדול יחסית, ולכן הם אינם חייבים לנוע במהירות גבוהה כדי להגיע לכוח העילוי הנדרש. לעומת זאת, שטח הכנפיים של מטוסי קרב, המתוכננים לנוע במהירויות גבוהות מאוד, קטן ביותר. לפיכך, הם חייבים להמריא ולנחות במהירויות גבוהות יחסית.



איור 13.19

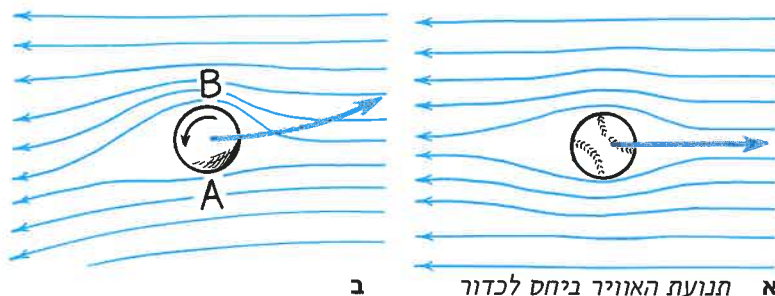
החץ מייצג את הכוח השקול הפועל כלפי מעלה (העילוי). הוא נובע מכך שהלחץ על הדופן העליונה נמוך מהלחץ על הדופן התחתונה.



איור 13.20

היכן לחץ האוויר גדול יותר - מצידו העליון של הגלשון או מצידו התחתון?

שחקני כדור בסיס יודעים שניתן להשליך את הכדור כך שמסלולו יתעקם לכיוון הרצוי. אפשר לעשות זאת אם מעניקים לכדור מהירות סיבובית גדולה סביב צירו. בדומה לכך, שחקן טניס יכול לחבוט בכדור כך שמסלולו יתעקם. כוח החיכוך - המוגדל בשל חוטי התפרים שעל מעטה כדור הבסיס או בשל חספוס כדור הטניס - גורר שכבה דקה של אוויר סביב הכדורים המסתובבים. השכבה הנעה גורמת להצטופפות קווי זרימה בצד אחד. התבוננו באיור 13.21 ותראו שעבור הכדור המסתחרר במגמה המסוימת בחץ הקטן, קווי הזרימה בצד B צפופים יותר מבצד A. לפיכך לחץ האוויר בצד A גדול יותר ומסלול הכדור מתעקם כמתואר.



איור 13.21

(א) קווי הזרימה משני צידי של כדור שאינו מסתחרר - שווים.

(ב) כדור מסתחרר גורם להצטופפות של קווי הזרימה ומוטה ממסלולו כמתואר בחץ העבה.

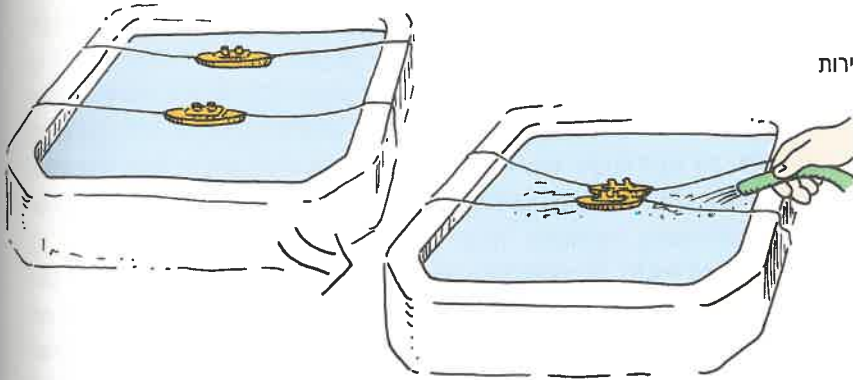
לא רק במקרה של כדורים מסתובבים נוצר כוח שקול כתוצאה מהפרשי לחצים. מאז 1920 מיושם חוק ברנולי במידות שונות של הצלחה להשטת ספינות מפרש ללא מפרשים. בספינות אלו, במקום תרנים, ניצבים גלילים אנכיים גדולים המסובבים באמצעות מנועים. כבדוגמת הכדורים, הכוח השקול

איור 13.22

ספינתו של ז'אק קוסטו "אלסיון" מונעת על ידי הרוח באמצעות מערכת מפרשי-ערבול במקום מפרשים רגילים. כבדוגמת הכדורים המסתובבים, הגלילים האנכיים מסיטים את זרימת האוויר. במבנה זה הגלילים אינם מסתובבים, אלא יונקים אוויר בעזרת מאזור פנימי דרך פתחים שנוקבו באחד מצידיו הגליל. תוצאת פעולתם דומה לזו של גלילים מסתובבים, וכך מוסטת זרימת האוויר. בתגובה, זרם האוויר מפעיל כוח שקול על הגלילים. לכוח השקול רכיב הפונה קדימה ומניע את הספינה.



שנוצר מניע את הספינה, ולרוב יעילותו רבה יותר מיעילותם של מפרשים. ספינתו של זיאק קוסטו, "אלסיון" (איור 13.22), היא דגם עכשווי. בספינה זו, במקום גלילים מסתובבים הוצבו גלילים קבועים בעלי מערכת אוורור מיוחדת. גלילים אלו מצוידים במאווררים פנימיים היוצרים הבדלי לחצים. כאשר מהירות הרוח אינה מספקת, מניע את הספינה זוג מנועי דיזל רגילים. כשמהירות הרוח מתאימה הספינה חוסכת למעלה מ-50 אחוז מצריכת הדלק, וכשמהירות הרוח עולה על 25 קשר (12.5 מ'ש"י) ניתן להפסיק את פעולת מנועי הדיזל והספינה משייטת במהירות של תשעה קשרים.

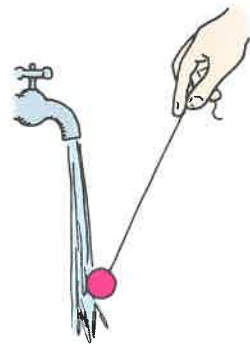


איור 13.23

הרי לכם ניסוי לאמבטיה.
קישרו באופן רופף שתי סירות
משחק זו בצד זו.
עתה כווננו את זרם
המים ביניהן. הסירות
תימשכנה זו אל זו
ותתנגשנה. מדוע?

חוק ברנולי מבהיר מדוע ספינות החולפות זו בצד זו עלולות להתנגש. התנגשות צד. המים הזורמים בין הספינות נעים במהירות גבוהה יותר מהמים הזורמים בצידן החיצוני. קווי הזרימה בין הספינות מצטופפים, ולכן לחץ המים הפועל על הדפנות הפנימיות קטן. אם הנוהגים בספינות אינם פועלים בהתאם, הלחץ הגדול יותר על הדפנות החיצוניות דוחף את הספינות זו לעבר זו. איור 13.23 מתאר כיצד ניתן להדגים זאת בכיור המטבח או באמבטיה.

הרי דרך אחרת להדגמת חוק ברנולי בכיור המטבח (איור 13.24). חברו כדור טניס-שולחן לחוט והניחו לכדור להתנדנד לתוך זרם המים. תגלו שהכדור נשאר בתוך הזרם גם אם תמשכו אותו בעדינות הצידה, כמתואר. הסיבה לכך היא שלחץ האוויר הנייח בסמוך לכדור גדול מלחץ המים הנעים. הכדור נדחף על ידי האטמוספירה לאזור הלחץ הנמוך.



איור 13.24

הלחץ בזרם הנייח (אוויר)
גדול מהלחץ בזרם הנע (זרם
המים). האטמוספירה דוחפת
את הכדור לאזור הלחץ הנמוך.

דבר דומה קורה לוויילון האמבט כאשר מי המקלחת זורמים במלוא השצף. הלחץ באזור המקלחת קטן והלחץ הגדול יחסית מעבר לוויילון דוחף אותו פנימה. בפעם הבאה שתתקלחו והוויילון ינוע לעבר רגליכם, חישובו על דניאל ברנולי!

שאלה

האם גובה הכספית בברומטר מושפע כשנושבות רוחות?



לכל הרוחות,
דניאל ברנולי!

איור 13.25

כשנושבות רוחות עזות,
צורתה הקמורה של המטרייה
עלולה להיות לרועץ.

פלסמה

בנוסף למצב המוצק, לנוזל ולגז, החומר קיים גם במצב צבירה רביעי, המצב הנפוץ פחות מכולם בסביבתנו היומיומית - **פלסמה** (אל תבלבלו בינו לבין הנוזל הצלול חסר-הצורה המהווה חלק מהדם, הנקרא אף הוא פלסמה). הפלסמה נראית ומתנהגת כגז בטמפרטורה גבוהה, למעט הבדל חשוב אחד: היא מוליכה חשמל. האטומים והמולקולות המרכיבים את הפלסמה מיוננים, מפני שאלקטרון אחד או יותר הוצאו מהם בהתנגשויות החזקות המתרחשות בטמפרטורות גבוהות. כזכור, באטום ניטרלי מספר הפרוטונים החיוביים בגרעין שווה למספר האלקטרונים שמחוץ לגרעין. כאשר קורעים אלקטרון אחד או יותר מהאטום, הוא נותר בעל מטען חיובי עודף ובמצב זה הוא נקרא יון חיובי (בנסיבות מסוימות עשוי להיות לאטום עודף אלקטרונים, ואז הוא נקרא יון שלילי). בפלסמה אידיאלית, כל האלקטרונים נקרעו מהאטומים והתערובת מורכבת רק מאלקטרונים חופשיים ומגרעינים חשופים. אף שהאלקטרונים והיונים עצמם טעונים חשמלית, הפלסמה ככלל ניטרלית מבחינה חשמלית כי כמויות המטען החיוביות והשליליות שוות. האלקטרונים החופשיים והיונים יוצרים תווך המוליך חשמל. בעזרת שדות חשמליים ומגנטיים ניתן לעצב, לשנות ולהזיז את היערכות האלקטרונים והיונים.

פלסמה בחיי יומיום

אם במקרה אתם קוראים ספר זה לאור נורת כספית, אינכם צריכים להרחיק לכת כדי לפגוש בפלסמה בפעולה. בתוך שפופרת הנורה הזוהרת מצויה פלסמה המורכבת מאדי-כספית בלחץ נמוך. הכספית מיוננת על ידי המתח החשמלי שבין האלקטרודות שבקצות השפופרת. כתוצאה מכך היא מוליכה זרם חשמלי הגורם לפלסמה לקרוך, וקרינה זו גורמת לפליטת קרינה מן הציפוי הזרחני שעל הדפנות הפנימיות של השפופרת.

תשובה: כשנושבות רוחות הלחץ האטמוספירי קטן, לכן גובה הכספית בברומטר ירד יחסית לגובה הרגיל.



איור 13.26
תאורת הרחובות בלילה
מקורה בקרינת הפלסמה של
נורות אדים.

בדומה לכך, מתח גבוה מיינן את גז הניאון שבשלטי פרסומת חוצות והופך אותו לפלסמה מוליכת חשמל. צבעיהם המגוונים של שלטים אלה מתאימים לסוגים שונים של אטומים הקורנים במצב הפלסמה. גם נורות אדים המשמשות לתאורת רחובות פולטות את אור הפלסמות הקורנות (איור 13.26). מקורו של האור הכחלחל הבוהק באחדות ממנורות אלו הוא באטומי כספית המצויים במצב פלסמה, ואילו האור הצהוב בנוורות אחרות נובע מפלסמה המורכבת מאטומי נתרן.

גם במנורות לייזר האור נפלט מפלסמה קורנת. ליתר דיוק, כאשר מופעל המתח הגבוה בלייזר גזי הוא הופך ללייזר פלסמה. בלייזרים נדון ביתר הרחבה בפרק 29.

זוהר הקוטב נפלט מפלסמה קורנת בחלקה העליון של האטמוספירה. שכבות של פלסמה בטמפרטורה נמוכה מקיפות את כדור הארץ. לעיתים חודר קטר של אלקטרונים מן החלל החיצון ומחגורות הקרינה ל"חלונות המגנטיים" שבקוטבי כדור הארץ, וכאשר הוא מתנגש בשכבות הפלסמה נוצר אור. שכבות אלו, המשתרעות מגובה של 55 ק"מ ומעלה, יוצרות את היונוספירה ופועלות כמראות המחזירות קרינת רדיו בתדרים נמוכים. גלי רדיו בתדרים גבוהים יותר וכן גם גלי טלוויזיה חודרים דרך היונוספירה. לכן אפשר לקלוט תחנות רדיו מרוחקות בתדרים הנמוכים של שידורי AM, אך חייבים להימצא "בקו הראייה" של המשדרים או של תחנות הממסר כדי לקלוט את גלי ה-FM בעלי התדרות הגבוהה ואת שידורי הטלוויזיה. השמתם לב לכך שבשעות הלילה קל לקלוט תחנות מרוחקות מאוד במקלט ה-AM? הסיבה לכך היא שבהעדר קרינת השמש שכבות הפלסמה מצטופפות ופועלות כמחזירות גלי רדיו טובות יותר.

אנרגיית פלסמה

ממנוע של טיל נפלטת פלסמה בטמפרטורות גבוהות ביותר. זוהי פלסמה בדרגת יינון נמוכה, אך כאשר מוסיפים לה כמויות זעירות של מלחי אשלגן או את המתכת צזיום, היא הופכת למוליך מעולה, וכאשר מכוונים אותה לעבר מגנט, נוצר חשמל! זוהי אנרגיה מגנטו-הידרו-דינמית, הנוצרת מפעולת הגומלין בין הפלסמה לשדה המגנטי. (בפרק 24 נדון באופן יצירת החשמל בדרך זו.) שיטה זו ליצירת אנרגיה, הגורמת לזיהום סביבה מועט בלבד, נמצאת עתה בשלבי פיתוח וכבר מנוצלת במספר מקומות בעולם. ניתן לצפות להתרחבות השימוש בתחנות כוח המבוססות על התופעה המגנטו-הידרו-דינמית.

הישג מבטיח יותר הוא אנרגיית פלסמה מסוג שונה - ההיתוך המבוקר של גרעיני אטומים. נדון בפיסיקת ההיתוך הגרעיני בפרק 33. חשובה אף יותר מהפיסיקה של ההיתוך התרמו-גרעיני היא ההשפעה החברתית שתהיה לשימוש המבוקר בו. כבר ראינו את ההשלכות הראשונות של ההיתוך התרמו-גרעיני הלא-מבוקר - פצצת המימן. ככל טכנולוגיה אחרת, גם ההיתוך הגרעיני יכול לשמש לטובת האנושות אך גם לגרום לחורבנה. יתרונות ההיתוך המבוקר עשויים להיות מרחיקי-לכת יותר מאלו שהעמידה לרשותנו האנרגיה החשמלית במאה האחרונה. לא זו בלבד שמתקני היתוך גרעיני יספקו אנרגיה חשמלית בשפע, הם גם יעניקו את האנרגיה והאמצעים למיחזור חומרים ואף ליצירת

יסודות. בקרת ההיתוך תבנה את התשתית לעידן חדש. לראשונה בתולדות המין האנושי, נוכל לבנות חברה המבוססת על שפע. חברה זו תהיה שונה מאוד מהחברות שנאלצו להתמודד עם מחסור בשני מרכיבים חיוניים - אנרגיה וחומר. דרך ארוכה עברנו בחקר שלושת המצבים הראשונים של החומר ובריתותם לשירותנו. שליטה במצב הצבירה הרביעי של החומר תביא אותנו אף רחוק יותר.

6. מהי בקירוב מסתו של עמוד אוויר ששטחו 1 ס"מ² המתנשא מגובה פני הים ועד לחלקה העליון של האטמוספירה? מהו משקלו של עמוד זה?
7. מהן היחידות ללחץ אטמוספירי בשיטת היחידות המטרית (SI)?
8. מהו הלחץ בתחתיתו של עמוד האוויר המתואר בשאלה 6?

ברומטרים

9. מהו הלחץ בתחתיתו של עמוד כספית שגובהו 76 ס"מ בהשוואה ללחץ הנובע ממשקל האטמוספירה?
10. מה הקשר בין משקל הכספית בברומטר לבין משקל עמוד אוויר בעל אותו שטח תחת המתנשא מגובה פני הים לפסגת האטמוספירה?
11. מדוע גובהו של ברומטר מים גדול פי 13.6 מגובהו של ברומטר כספית?
12. כששותים משקה באמצעות קשית, האם נכון יותר לומר שהמשקה נדחף לתוך הקשית או שהוא נשאב לתוכה? מיהו הדוחף? נמקו.
13. מדוע לא תפעל משאבת ריק בבור מים שעומקו עולה על 10.3 מ'?
14. כיצד ניתן למדוד בברומטר יבש גם גובה וגם לחץ אטמוספירי?
15. כיצד יוצרים ריק באמצעות משאבה מכנית?

חוק בויל

16. פי כמה עולה צפיפות האוויר כאשר דוחסים אותו למחצית נפחו?
17. מה קורה ללחץ האוויר בתוך כדור פורח כשהוא נדחס למחצית נפחו?
18. מהו גז אידיאלי?

כוח העילוי באוויר

19. מה גודלו של כוח העילוי הפועל על כדור פורח מרחף שמשקלו 1 ק"ג? מה יקרה אם כוח זה יקטן? ואם יגדל?
20. האם מפעיל האוויר כוח עילוי על כל הגופים הנמצאים בו או רק על גופים קלים מאוד כמו כדורים

תקציר מונחים

לחץ אטמוספירי הלחץ שפועל על גופים הנמצאים באטמוספירה, הנוצר ממשקל המולקולות של הגזים באטמוספירה ומתנועתן. בגובה פני הים, הלחץ האטמוספירי הוא כ-101 קילו-פסקל.

ברומטר מכשיר המודד לחץ אטמוספירי.

חוק בויל כשטמפרטורה של גז נותרת קבועה, מכפלת לחץ הגז המצוי בכלי בנפחו, עבור מסה נתונה, היא קבועה, ללא תלות בשינויים החלים בנפרד בלחץ או בנפח:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

חוק ארכימדס לאוויר על גוף המוקף באוויר פועל כוח עילוי השווה למשקל האוויר הדחוי.

חוק ברנולי הלחץ בזורם קטן ככל שמהירות הזורם עולה.

פלסמה חומר חם הנמצא מעבר למצב הגזי ומורכב מחלקיקים טעונים חשמלית. רוב החומר ביקום נמצא במצב של פלסמה.

שאלות חזרה

1. הסבירו את ההבדלים בין גז, נוזל וזורם.
2. מהו המקור לאנרגיית התנועה של המולקולות בגזים שבאטמוספירה? מה מונע מהגזים באטמוספירה להימלט לחלל?
3. לאיזה גובה יש לעלות כדי שמחצית מהאוויר באטמוספירה תימצא מתחתיו?
4. לחץ אטמוספירי מהו הגורם ללחץ האטמוספירי?
5. מהי מסתו של מטר מעוקב של אוויר בטמפרטורת החדר (20° צלסיוס)?

פורחים? מדוע כוח העילוי יעיל רק בצופית גופים
שצפיפותם נמוכה מאוד?

21. מה קורה בדרך כלל לבלון מלא הליום הנישא לגבהים
באטמוספירה?

חוק ברנולי

22. כיצד משתנה הלחץ הפנימי בזורם הנע בצינור
כשמחירות הזורם עולה?

23. מהם קווי זרימה? האם באזורים שבהם קווי הזרימה
צפופים יותר, הלחץ גדול יותר או קטן יותר?

שימושים בחוק ברנולי

24. האם חוק ברנולי הוא ההסבר היחיד לטיסת מטוסים?

25. מדוע מתעקם מסלולו של כדור מסתובב?

26. כשנושבות רוחות, האם הלחץ האטמוספירי גדל או קטן?

27. האם מתקיים חוק ברנולי בנוזלים? נמקו את תשובתכם.

פלסמה

28. מהו ההבדל בין פלסמה לגז?

29. האם הפלסמה טעונה חשמלית או ניטרלית? הסבירו.

פלסמה בחיי יומיום

30. מנו לפחות שלוש דוגמאות של פלסמה בסביבתכם
היומיומית.

31. מה לפלסמה ולזוהר הצפוני?

32. מדוע בלילות משתפרת קליטת שידורי AM ברדיו?

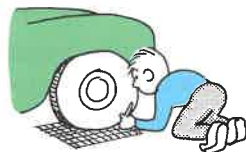
אנרגיית הפלסמה

33. מהי אנרגיה מגנטו-הידרו-דינמית?

34. אילו שני תוצרים משערים שניתן יהיה להפיק ממתקני
היתוך גרעיני?

מטלות בית

1. ניתן לחשב את משקלה של מכונית על ידי מדידת שטח
המגע של ארבעת צמיגיה עם הכביש והכפלתו בלחץ האוויר
בגלגלים. את השטח ניתן להעריך על ידי התווית גבולות
אזורי המגע של הצמיג על דפי נייר משובצים המונחים
מתחת לכל צמיג. אם אכן תעשו זאת, חישוביכם יהיו תרגיל
במעברים בין יחידות, בפרט אם השטח נמדד בסנטימטרים
מרובעים והלחץ בליברות לאינטש רבוע (PSI).



2. עירכו את הניסוי הבא

באמבטיה או כשתדיחו כלים.
השקיעו לתוך המים כוס שפתחה
פונה כלפי מטה מעל גוף קטן צף.
במה תבחינו? לאיזה עומק יש
להשקיע את הכוס כדי שנפח
האוויר בתוכה יקטן למחציתו?
(לא תוכלו לבצע זאת באמבט,
אלא אם כן עומקו 10.3 מ'
לפחות.)



3. בדרך כלל, כאשר מוזגים מים מכוס מלאה לכוס ריקה
מניחים את הכוס המלאה מעל לכוס הריקה ומטים אותה.
האם אי-פעם מוזגתם אוויר מכוס לכוס? התהליך דומה.
הכניסו לתוך מים שתי כוסות שפתחן פונה כלפי מטה.
אפשרו לאחת הכוסות

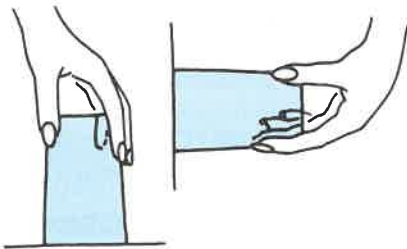
להתמלא במים על ידי הטיית
פתחה מעלה. עתה הניחו את
הכוס המלאה מים כשפתחה
פונה מטה מעל לכוס המלאה
באוויר. הטו בזהירות את
הכוס הנמצאת למטה ותנו
לאוויר להימלט ולמלא את
הכוס העליונה. אתם מוזגים
אוויר מכוס לכוס?



4. הוציאו מתוך המים כוס מלאה
במים כשפתחה הפונה מטה שקוע
במים. מדוע המים אינם
מתרוקנים? מה צריך להיות גובהה
של הכוס כדי שהמים יחלו
להתרוקן? (לא תוכלו לבצע זאת
בתוך הבית, אלא אם כן גובה
התקרה בביתכם הוא 10.3 מ').



5. הניחו קלף משחק על פתחה של כוס המלאה במים עד
שפתה והיפכו אותה. מדוע נותר הקלף במקומו? נסו להפוך
אותה גם לצדדים. (מומלץ לבצע את הניסוי מעל לכיור...)





12. נעצו סיכה בפיסת קרטון והניחו אותה בתוך החלל שבסליל חוטים. נסו להעיק את הקרטון בנשיפה דרך החלל. נסו זאת בכל הכיוונים.

13. קיראו באנציקלופדיה כיצד מיושם חוק ברנולי במאייד (קרבורטור) של מכונית. בדוגמה זו ובשימושים אחרים התופעה נקראת אפקט ונטורי.



14. החזיקו כף בזרם מים כמתואר באיור וחושו בהשפעת ההבדלים בלחץ.

6. היפכו בקבוק מלא מים שצווארו צר. שימו לב שהמים אינם נשפכים בקלות החוצה אלא מבעבעים (ומבקבקים...) כתוצאה ממשקלם של קילומטרים רבים של אוויר הדוחפים מלמטה ומאלצים את האוויר להיכנס לתוך הבקבוק ואת המים לצאת ממנו. כיצד היה מתרוקן בקבוק מלא מים אילו היו הופכים אותו על הירח?

7. מייגו חצי כוס מים לתוך קנקן מתכת בעל מכסה מתברג שנפחו כ-5 ליטרים. הניחו את הקנקן על הכיריים כשהוא פתוח וחממו אותו עד שהמים יחלו לרתוח ואדים ייפלטו מהפתח. הרחיקו את הקנקן במהירות והבריגו בחוזקה את המכסה. הניחו לקנקן לעמוד והתבוננו בתוצאות. ניתן להאיץ את התהליך אם שופכים מים קרים על הקנקן. הסבירו את תצפיותיכם.

8. הרתיחו כמות קטנה של מים בפחית אלומיניום והיפכו אותה במהירות לתוך קערה ובה מים קרים. מפתיע מאוד!

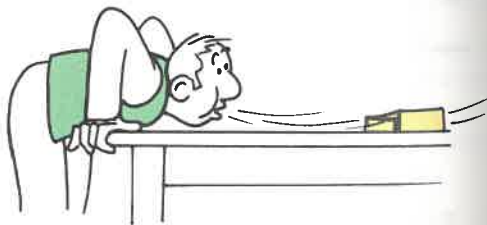


9. נקבו פתח קטן קרוב לתחתית של קופסת שימורים. מלאו אותה במים, והם יקלחו מהנקב. כשו בידכם בחוזקה על חלקה העליון של הפחית והזרימה תיעצר. הסבירו.

10. הכניסו לתוך מים צינורית זכוכית צרה או קשית והניחו את אצבעכם על הפתח העליון. הוציאו את הצינורית מהמים והרימו את אצבעכם מהפתח. מה קורה? (תעשו זאת לעיתים קרובות אם תשתתפו במעבדה לכימיה).



11. קפלו את קצותיו של כרטיס או קלף כך שיווצר מעין גשר קטן. העמידו אותו על השולחן ונישפו דרכו כמתואר באיור. גם אם תנשפו בעוצמה רבה לא תצליחו להעיק את הכרטיס מהשולחן (אלא אם תנשפו לצידיו). הראו זאת לחבריכם שאינם לומדים פיסיקה והסבירו להם את התופעה.



תרגילים

1. אומרים שגז ממלא את כל נפח הכלי שבו הוא מצוי. מדוע, אם כך, אין האטמוספירה מתפשטת לחלל החיצון?

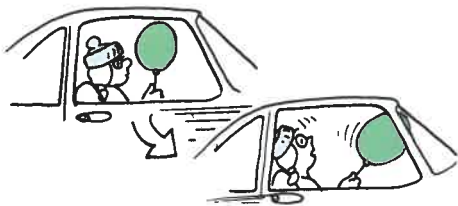
2. מדוע אין לירח אטמוספירה?

3. סיפרו כמה צמיגים יש למשאית-ענק הפורקת מזון במרכול, ואולי תתפלאו לגלות שמספר הצמיגים יכול להיות כ-18. מדוע דרושים צמיגים כה רבים? (רמז: שימו לב למטלת בית 1.)

4. מה תפקידם של החריצים המונעים התאמה מדויקת של משפך לפיית הבקבוק?

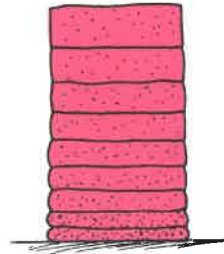


15. הניחו שבמשאבה באוויר 13.9 נוצר ריק מוחלט. מהו עומק הבאר שניתן לשאוב ממנה מים?
16. לאיזה גובה יעלה הנוזל בברומטר ביום שבו שורר לחץ אטמוספירי רגיל, אם צפיפות הנוזל בברומטר היא מחצית מצפיפות הכספית?
17. מדוע שטח החתך של הברומטר אינו משפיע על גובה הנוזל?
18. מהו עומקו המרבי של כלי שאפשר לשאוב ממנו כספית?
19. היכן קשה במעט לשתות סודה בקשית - בגובה פני הים או על פסגת הר גבוה מאוד? נמקו.
20. פיל שמשקלו מחולק במידה שווה בין ארבע רגליו מפעיל על הקרקע לחץ הקטן מאטמוספירה אחת. מדוע, אם כך, נימקך מתחת לרגליו של הפיל אך איננו ניזוקים מלחץ האטמוספירה?
21. חבר טוען שכוח העילוי של האטמוספירה הפועל על פיל גדול באופן משמעותי מכוח העילוי הפועל על בלון קטן ממולא בהליום. מה תשיבו לו?
22. מדוע כה קשה לנשום בשנורקל כשנמצאים מתחת למים בעומק של 1 מ', ולמעשה בלתי אפשרי לנשום באמצעותו בעומק של 2 מ'? מדוע צולקן אינו יכול לנשום דרך צינור העולה עד לפני המים?
23. משקלם של גוש עץ וגוש ברזל המונחים על מד-משקל הוא 1 טון. למי מהם מסה גדולה יותר?
24. מדוע משקלו של גוף באוויר שונה ממשקלו בקרקע? תנו דוגמה למקרה שבו יש להתחשב בהבדל זה.
25. ילדה קטנה היושבת במכונית שעצרה ברמזור אוחזת בידה בלון המלא בהליום. החלונות סגורים והמכונית אטומה למדי. כאשר אור הרמזור מתחלף לירוק והמכונית נעה בתאוצה, ראש הילדה נרתע לאחור בעוד הבלון נזקק קדימה. הסבירו מדוע.



26. האם משקלו של בקבוק מלא הליום גדול או קטן ממשקלו של בקבוק מלא אוויר באותו לחץ? ממשקלו של בקבוק שהאוויר נשאב מתוכו?

5. מהי צפיפות האוויר במכרה עמוק בהשוואה לצפיפות האוויר על פני האדמה?
6. מדוע גדלות בועות גז העולות בנוזל כשהן מתקרבות אל פניו?
7. מדוע נשמעים באוזנינו קולות פצפוף כשאנו מתרוממים לגבהים?
8. שתי קבוצות בנות שמונה סוסים כל אחת לא היו מסוגלות להפריד בין חצאי הכדור של מגדבורג (איור 13.2). מדוע? הניחו ששתי קבוצות בנות תשעה סוסים כל אחת היו מצליחות להפריד ביניהם. האם קבוצה אחת של תשעה סוסים היתה מצליחה במשימה אילו שמו במקום הקבוצה השנייה עץ חזק? נמקו את תשובתכם.
9. לפני עלייתכם למטוס אתם קונים סרט צילום או חפץ אחר הנארו באריזה אטומה. בשעת הטיסה אתם מבחינים שהאריזה התנפחה. הסבירו מדוע.
10. מדוע החלונות במטוס קטנים בהשוואה לחלונות באוטובוס?
11. מוזגים כחצי כוס מים לקנקן שנפחו 5 ליטרים ומחממים אותו עד שרוב המים מתאדים. אזי סותמים את פתח הקנקן בפקק מוברג ומהודק, מסירים את הקנקן ממקור החום ומניחים לו להתקרר. מה יקרה לקנקן ומדוע?
12. האם בשבירת שפופרת טלוויזיה מתרחשת קריסה פנימה או פריצה החוצה?
13. נוכל להבין כיצד הלחץ במים תלוי בעומק אם נתבונן בערמת לבנים. את הלחץ על תחתית הלבנה התחתונה קובע משקל הערמה כולה. במחצית הגובה, שיעור הלחץ הוא מחצית משיעור הלחץ שבתחתית, מפני שמשקל הלבנים שמעל הוא מחצית המשקל הכולל. כדי להסביר את הלחץ האטמוספירי עלינו לדון בלבנים דחיסות, למשל כאלה שעשויות מגומי ספוגי. מדוע?



14. ה"משאבה" בשואב אבק ביתי היא פשוט מאוורר מהיר ביותר. האם נצליח לשאוב אבק משטיח המונח על הירח באמצעות שואב האבק הביתי? הסבירו.

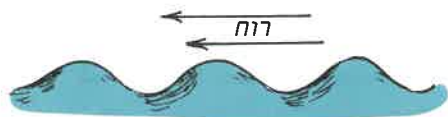
38. מה מעניק את כוח העילוי לצלחת מעופפת (פריזי) במעופה?

39. כאשר אתם חולפים על פני משאית הנעה לקראתכם, מכוניתכם נוטה לפתע לצד המשאית. מדוע?

40. מדוע מתנפח גג הברזנט של מכונת בעלת גג נפתח כאשר המכונת נעה במהירויות גבוהות?

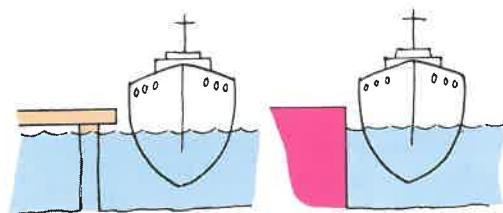
41. מדוע לעיתים מתנפצים החלונות ברכבות ישנות כשרכבת מהירה הנעה במסילה מקבילה חולפת על פניהם?

42. רוח קבועה נושבת על גלי האוקיינוס. מדוע מגביהה הרוח את שיאי הגלים ומעמיקה את שקעיהם?



43. תשובתו של חברך לשאלה מדוע דגלים מתנפפים ברוח היא שהנפנוף הוא תוצאה של חוק ברנולי. (התשובה אינה מספקת, הלא כן?) כיצד הייתם משיבים על אותה שאלה?

44. מזחים בנויים מעמודים המאפשרים מעבר חופשי של מים תחתיהם. מדוע מזח הבנוי מקיר מוצק אינו יעיל לספינות המנסות לשוט לצידו?



45. לעיתים אומרים שלחצו של אוויר הנע מהר נמוך מלחצו של אוויר הנע לאט. האם תוכלו להציג טיעון המסביר את המצב ההפוך: שתנועת אוויר מהירה היא התוצאה של הלחץ הנמוך ולא הסיבה לו?

46. באילו תנאים יימצאו אטומי הכספית בנורה פלורסצנטית במצב גזי? במצב של פלסמה?

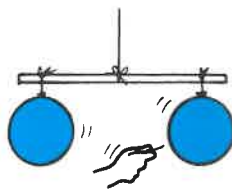
47. מה הסיבה לכך ששידורי AM של תחנות רדיו מרוחקות נקלטים טוב יותר ברדיו בשעות הלילה?

27. מכל פלדה שמולא בהליום לא יתחיל לרחף, ולעומתו, כדורים פורחים המכילים אותה כמות של הליום ירחפו בקלות. מדוע?

28. בלון מלא אוויר ייפול לקרקע ואילו בלון מלא הליום יתרומם. מדוע?

29. לחץ הגז בבלון גומי מנופח גדול תמיד מהלחץ החיצוני של האוויר. מדוע?

30. שני בלונים זהים המלאים אוויר בנפח שווה תלויים בקצותיו של מוט מאוזן. מנקבים את אחד הבלונים. האם יופר איזון המוט? אם כן, לאיזה כיוון?



31. שני בלונים שווי-משקל ונפח מולאו בכמויות שוות של הליום. בלון אחד קשיח והאחר יכול להתרחב כשהלחץ החיצוני קטן. כשנשחרר את הבלונים, איזה מהם יינשא לגובה רב יותר? נמקו.

32. דמו לעצמכם מושבת חלל ענקית המורכבת מגליל מסתובב מלא באוויר. מה הקשר בין צפיפות האוויר "על פני הקרקע" לצפיפות האוויר "למעלה"?

33. האם בלון מלא הליום "יתרומם" באטמוספירה של מושבת חלל מסתובבת? נמקו את תשובתכם.

34. ציינו מספר הבדלים בין ספורט הכדורים הפורחים באטמוספירה של מושבות חלל גליליות לבין ספורט זה במושבות כדוריות. עשו כן גם לגבי דאייה בגלשוניס.

35. הכוח שהאטמוספירה מפעילה מבחוץ על חלון ראווה ששטחו 10 מ^2 הנמצא בגובה פני-הים הוא כמיליון ניוטון. מדוע אין כוח זה מנפץ את השמשה? מדוע עלול החלון להתנפץ כאשר נושבת רוח חזקה?

36. מדוע מפזזת האש באח ביתר עוז כשנושבות רוחות?

37. בחנות כל-בו, זרם אוויר מצינור המחובר לשואב אבק מכוון בזווית מסוימת כלפי מעלה ותומך בכדורים המרחף באוויר. האם זרימת האוויר התומכת בכדור היא זו שמתחתיו או זו שמעליו?

בעיות

1. התוכלו לאמוד את כוח העילוי הפועל על גופכם? (לשם כך, העריכו את נפח גופכם על סמך משקלכם ובהנחה שהמשקל הסגולי שלכם קטן במעט מהמשקל הסגולי של מים.)
2. צפיפותם של חנקן ושל חמצן במצב נוזלי היא 0.8 ו-0.9 מצפיפות המים. הלחץ האטמוספירי הוא בעיקר תוצאה

ממשקלם של גזי החנקן והחמצן שבאוויר. אילו הפכה האטמוספירה לנוזל, האם עומקה היה גדול או קטן מ-10.3 מ'?

3. נסו לאמוד את הכוח שמפעילה האטמוספירה על גופכם ולאחר מכן השוו כוח זה למשקל של חפץ מוכר בסביבתכם. לשם כך, העריכו את שטח הפנים שלכם בעזרת שטח בגדיכם, וכיפלו ב- 10^5 נ"מ². מדוע שונה מאוד תשובתכם לשאלה זו מהתשובה לבעיה 1?