

## תנע

**ב**פרק 2 הצגנו את תכונת ההתמדה שגילה גלילאו ובפרק 4 הראינו כיצד תכונה זו נכללת בחוקי התנועה של ניוטון. דנו בתכונת ההתמדה בקשר לגופים במנוחה ובקשר לגופים בתנועה. פרק זה נקדיש לתכונת ההתמדה של גופים השרויים בתנועה. שילוב רעיונות ההתמדה והתנועה מוביל אותנו אל מושג התנע. תנע הוא תכונה של גופים בתנועה.

כולנו יודעים שקשה יותר לעצור משאית כבדה ממכונית קטנה הנעה באותה מהירות. ניתן לקבוע, אם כן, כי למשאית יש יותר תנע מאשר למכונית הקטנה. בהשתמשנו במונח **תנע** כוונתנו להתמדה בתנועה. ביתר פירוט, התנע מוגדר כמכפלת המסה של גוף במהירותו, כלומר:

$$\text{תנע} = \text{מסה} \times \text{מהירות}$$

או בקיצור:

$$\text{תנע} = m \times v$$

כאשר לכיוון אין חשיבות ניתן לומר:

$$\text{תנע} = \text{מסה} \times \text{גודל המהירות}$$

## תנע



### איור 5.1

מדוע מדמימים את מנועיה של אוניית מכל ענקית במרחק 25 ק"מ מהנמל?

מן ההגדרה עולה כי התנע של גוף יכול להיות גדול אם אחד משני הגורמים גדול - מסתו של הגוף או מהירותו, או אם הן המסה והן המהירות שלו גדולות. התנע של המשאית גדול יותר מזה של המכונית הפרטית שנעה באותה מהירות מפני שהמסה של המשאית גדולה יותר. מכאן מובן כי לספינת ענק שנעה במהירות נמוכה יכול להיות תנע גדול. תנע גדול יש גם לקליע קטן של רובה, הנע במהירות גדולה. וכמוכן, לגוף ענק, הנע במהירות גבוהה, כמו למשל משאית גדולה המתגלגלת ללא בלמים במדרון תלול, יש תנע עצום, ולעומת זאת, לאותה משאית במנוחה אין תנע כלל.

שינויים בתנע של גוף יחולו אם יהיה שינוי במסתו של הגוף, במהירותו או בשתייהן. אם התנע משתנה כשהמסה נשארת קבועה, וכך אמנם קורה לעיתים קרובות, הרי זה משום שהמהירות משתנה, כלומר - מתרחשת תאוצה. ומה גורם לתאוצה? התשובה היא כוח. ככל שהכוח הפועל על גוף גדול יותר, כן יגדל קצב השינוי במהירותו, ולפיכך גם השינוי בתנע שלו.

אך יש גורם נוסף המשפיע על השינוי בתנע, והוא הזמן - משך פעולתו של הכוח. הפעילו כוח למשך זמן קצר בלבד על מכונית שמתקשים להתניעה, ותגרמו לשינוי קל בלבד בתנע שלה. הפעילו אותו כוח למשך זמן ארוך יותר, והשינוי בתנע יהיה גדול יותר. כוח המופעל זמן ממושך גורם לשינוי גדול יותר בתנע מאותו כוח המופעל זמן קצר בלבד. שינוי התנע של גוף מושפע, אם כן, הן מגודל הכוח והן ממשך הזמן שבו הכוח פועל. המכפלה של הכוח במשך הזמן שבו הוא פועל נקראת **מתקף**.

$$\text{מתקף} = \text{כוח} \times \text{משך הזמן}$$

כל אימת שמפעילים כוח על גוף, מפעילים עליו גם מתקף. מידת התאוצה תלויה בכוח, ואילו השינוי בתנע תלוי הן בכוח והן במשך הזמן שבו הכוח פועל.

מתקף

1. האם לגוף נע יש מתקף?
2. האם לגוף נע יש תנע?

הקשר בין מתקף לתנע נובע מהחוק השני של ניוטון ( $a = F/m$ ). מרווח הזמן של המתקף "מסתתר" באיבר התאוצה (השינוי במהירות חלקי מרווח הזמן). דרך אחרת להציג את החוק השני של ניוטון היא בנוסחה\*

$$\text{כוח} \times \text{מרווח זמן} = \text{השינוי ב- (מסה} \times \text{מהירות)}$$

ובמילים אחרות:

$$\text{המתקף המופעל על גוף} = \text{השינוי בתנע של הגוף}$$

ניתן לבטא את כל האיברים במשוואה זו בדרך מקוצרת, על ידי שימוש בסימן  $\Delta$  (האות היוונית דלתא) שבאמצעותו מסמנים "שינוי ב-" (או "הפרש של"):

$$F \times t = \Delta(m \times v)$$

או במילים: הכוח כפול משך-הזמן-שבו-הוא-פועל = השינוי בתנע. הקשר מתקף-תנע מסייע לנו בניתוח של מגוון מצבים שבהם חל שינוי בתנע. נתבונן במקרים מוכרים שבהם מתקף גורם (1) הגדלת התנע, (2) הקטנת התנע בפרק זמן ממושך וכן (3) הקטנת התנע בפרק זמן קצר.

### מקרה 1: הגדלת התנע

אם רצונכם להגדיל את התנע של גוף כלשהו במידה רבה ככל האפשר, עליכם להפעיל לא רק את הכוח הגדול ביותר שאתם מסוגלים, עליכם גם להאריך את משך זמן הפעלתו של הכוח ככל שניתן. מכאן ההבדל בתוצאות בין דחיפה קצרה של מכונית שמתקשים להתניעה לבין דחיפה ממושכת.

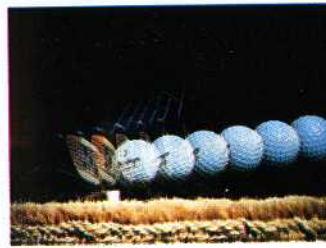
לתותחים ארוכי-טווח יש קנים ארוכים. ככל שהקנה ארוך יותר, מהירותו של הקליע (הפגז) הנורה ממנו גדולה יותר. מדוע? כוחו של חומר ההדף בקנה ארוך פועל על קליע התותח במשך זמן ארוך יותר. הגדלה זו במתקף גורמת לתנע גדול יותר. הכוח הפועל על קליע התותח אינו קבוע, כמוכך - הוא גדול בתחילה והולך ונחלש עם התפשטות הגזים. במקרה זה, כמו במקרים אחרים,

### תשובות:

1. לא, מתקף אינו משהו שיש לגוף, כדוגמת תנע. מתקף הוא משהו שגוף יכול להפעיל כשמתרחת פעולת גומלין בינו לבין גוף אחר כלשהו. לגוף כשלעצמו לא יכול להיות מתקף, ממש כפי שלא יכול להיות לו כוח.
2. כן, אך בדומה למהירות, במובן יחסי - כלומר, ביחס למערכת ייחוס, שלרוב תהיה פני כדור הארץ. התנע שיש לגוף נע ביחס לנקודה נייחת על פני כדור הארץ שונה מן התנע שיש לו ביחס לגוף נע אחר.

\* בדרך הצגה מחדשת זו של החוק השני של ניוטון גורם הזמן נראה בצורה ברורה יותר. אם נשווה את הביטוי לתאוצה ( $F/m = a$ ) להגדרתה (תאוצה = השינוי ב- $v$  חלקי  $t$ ) נקבל:  $F/m = \Delta v/t$ . לאחר סידור האיברים מחדש מתקבלת הנוסחה:  $Ft = \Delta(mv)$  - המתקף שווה לשינוי בתנע.

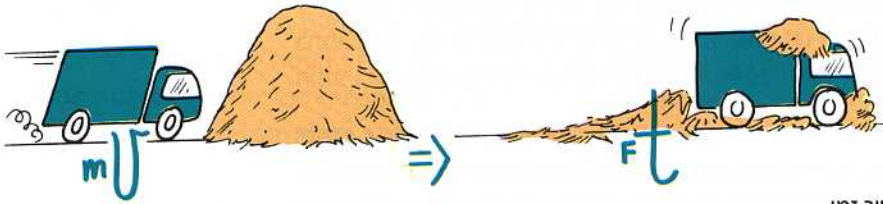
הכוחות היוצרים את המתקף משתנים במשך הזמן. הכוח הפועל על כדור הגולף באיור 5.2, למשל, גדל במהירות רבה בזמן שהכדור מתעוות, ואחר כך קטן ומתאפס כשהכדור צובר מהירות וחוזר לצורתו המקורית. בפרק זה, כשאנו מדברים על כוחות חבטה, כוונתנו תמיד לכוח החבטה הממוצע\*.



**איור 5.2**  
כוח החבטה על כדור גולף.

**מקרה 2: הקטנת התנע בפרק זמן ממושך**

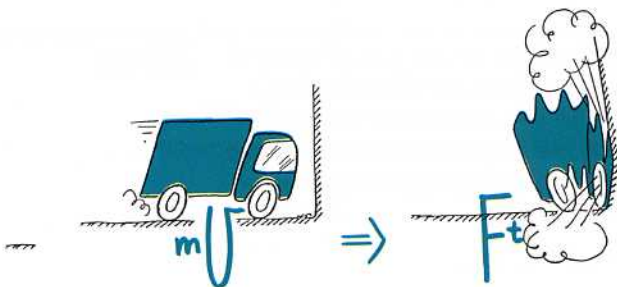
תארו לעצמכם שאתם במכונית שיצאה מכלל שליטה ועומדת בפניכם הברירה לפגוע בקיר בטון או בערמת חציר גדולה. לא דרוש ידע רב בפיסיקה כדי להחליט בתבונה, אך ידע מסוים בפיסיקה יסייע להבין מדוע תוצאות הפגיעה בגוף רך שונות לחלוטין מן הפגיעה בגוף קשה. בדוגמת הפגיעה בקיר או בערמת החציר, התנע יקטן באמצעות אותו מתקף. אותו מתקף אין פירושו אותו כוח או אותו זמן, אלא אותה מכפלה של כוח בזמן. בידיכם הברירה: אם תבחרו לפגוע בערמת החציר ולא בקיר, תאריכו את משך זמן הפגיעה, כלומר, תאריכו את משך הזמן שבו התנע יורד לאפס. הארכת משך הזמן מביאה להקטנת הכוח. אם תגדילו את משך החבטה פי 100, תקטינו את כוח החבטה פי 100. ובכך, כל אימת שרצונכם להקטין את כוח המכה, האריכו את משך הפגיעה!



**איור 5.3**  
שינוי גדול בתנע במשך זמן ארוך דורש כוח קטן.

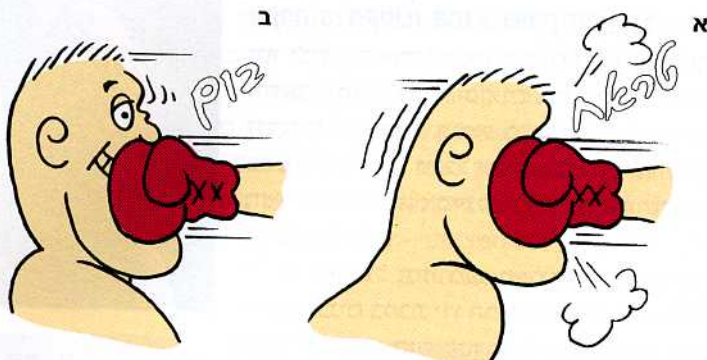
מתאבק המושלך אל הקרקע מנסה להאריך את משך פגיעתו ברצפה על ידי הרפיית שריריו וחלוקת הפגיעה לכמה התנגשויות שבהן הרגל, הברך, המותן, הצלעות והכתף פוגעות בזו אחר זו ברצפה. משך הפגיעה המתארך גורם להקטנת עוצמת הכוח של הפגיעה, או כוח החבטה.

אדם הקופץ ממקום גבוה אל הרצפה שמתחתיו מכופף את ברכיו עם יצירת המגע, ובכך מאריך את משך הזמן שבו התנע שלו מוקטן פי 10 עד פי 20 ביחס לקופץ שרגליו מתוחות, הנוחת נחיתה קשיחה. כפיפת הברכיים מקטינה את



**איור 5.4**  
שינוי גדול בתנע במשך זמן קצר דורש כוח גדול.

\* לעיתים הם מכוונים כוחות הולם - במלעיל. כמו חושך, חודש (המתרי)



השינוי בתנע  $Ft$

השינוי בתנע  $Ft$

איור 5.5

בשני המקרים המתקף של לסת המתאגרף מקטין את תנע האגרוף הפוגע. (א) המתאגרף נע לעבר הכפפה ומקטין בכך את משך זמן הפגיעה. המתקף נובע במידה רבה מהכוח הגדול. (ב) המתאגרף מתרחק עם פגיעת הכפפה ובכך מאריך את משך המגע. המתקף הגדול נובע איפוא במידה רבה ממשך הזמן הארוך.

הכוח המופעל על העצמות פי 10 עד פי 20. עדיף, כמובן, ליפול על מזרן מאשר ליפול על הרצפה הקשה, שכן גם כך גדל משך זמן החבטה. כולנו יודעים שעדיף ליפול על רצפת עץ מאשר על רצפת בטון. הסיבה לכך היא שרצפת העץ מתעוותת בעת הפגיעה יותר מרצפת הבטון ובכך מתארך משך הפגיעה וקטן כוח החבטה. השימוש ברשת בטיחות ללוליניים בקרקס מדגים בבירור מצב שבו כוח חבטה קטן מתחלק על פני משך זמן ארוך, וכך נוצר המתקף הדרוש להקטנת תנע הנפילה. אם מושיטים את היד קדימה כאשר תופסים כדור מהיר, מותירים לה מרחב רב לנוע אחורה לאחר יצירת המגע עם הכדור. כך מאריכים את משך זמן העצירה ובכך מקטינים את כוח החבטה. בדומה לכך, מתאגרף מאפשר לגופו לנוע עם המהלומה שהוא סופג כדי להקטין את כוח החבטה (איור 5.5).

**שאלות**

1. אם המתאגרף שבאיור 5.5 מצליח להאריך את משך הפגיעה פי 3 בכך שהוא נע עם המכה, באיזה שיעור יקטן כוח החבטה?
2. אם המתאגרף נע לעבר המכה ובכך מקטין את משך זמן החבטה לכדי מחצית, באיזה שיעור יגדל כוח החבטה?
3. מתאגרף הסופג חבטת אגרוף מנסה, לטובתו, להאריך את משך זמן הפגיעה, ואילו מומחה לקראטה מנסה להכות במשך זמן קצר ככל האפשר כדי להשיג את התוצאה הטובה ביותר. האין כאן סתירה?

**תשובות:**

1. כוח החבטה יקטן פי שלושה מכפי שהיה אילו לא היה המתאגרף נרתע לאחור.
2. הכוח יהיה גדול כפליים משיעורו אילו היה המתאגרף נשאר במנוחה. כמו כן, הכוח גדל עוד יותר בשל המתקף הנוסף שנוצר עקב תוספת התנע הנובעת מתנועתו של הנחבט, תנע שגם אותו צריך המתקף לבלום. המתקף המוגדל ומשך החבטה הקצר גורמים לכוחות שבמקרים רבים מביאים ל"נוק אאוט".
3. אין כל סתירה מכיוון שהתוצאה המיטבית שונה בכל מקרה. התוצאה הטובה ביותר למתאגרף המוכה היא כוח מוקטן, המתקבל בהארכת משך הזמן ככל האפשר, ואילו התוצאה הרצויה למומחה הקראטה המכה היא כוח מוגדל, המתקבל במשך זמן מזערי.

### מקרה 3: הקטנת התנע בפרק זמן קצר

נסו לנוע אל אגרוף המוטח לעברכם בשעת תחרות איגרוף במקום לנוע ממנו והלאה, ותהיו בצרה. כך גם אם תתפסו כדור מהיר תוך שאתם מניעים את ידכם לעבר הכדור הפוגע ברגע יצירת המגע, במקום ממנו והלאה. ואם תהיו במכונית שיצאה מכלל שליטה ותכוונו אותה אל קיר בטון במקום אל ערמת חציר, תהיו בצרה אמיתית. במקרים אלו של זמני חבטה (פגיעה) קצרים, כוחות החבטה גדולים.

הרעיון של זמני מגע קצרים מסביר כיצד יכול מומחה לקראטה לשבור ערמת לבנים במכת ידו החשופה (איור 5.6). הזרוע והיד מונפות בתנע גדול לעבר הלבנים. התנע הזה קטן במהירות כשהוא מפעיל מתקף על הלבנים. המתקף הזה הוא הכוח שמפעילה היד כפול משך הזמן שבו היא נמצאת במגע עם הלבנים. ביצוע זריז של התרגיל מקצר מאוד את משך המגע ובהתאם לכך כוח החבטה גדל מאוד. אם גורמים ליד להירתע לאחור בעת ההתנגשות, הכוח גדל עוד יותר.

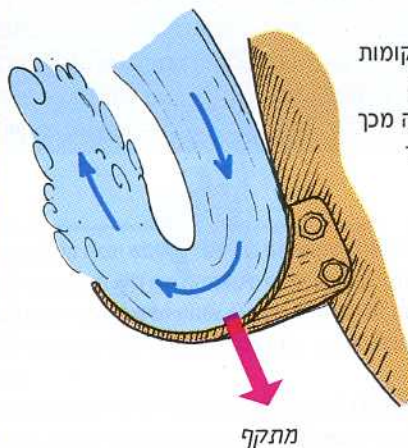
לכולנו ידוע שאם עציץ ייפול ממדף גבוה על ראשנו, אנחנו עלולים להיות בצרה. ובין שאתם יודעים זאת ובין שאינכם יודעים זאת, אם העציץ יחזור וינתר מהראש לאחר הפגיעה, נהיה בצרה גדולה עוד יותר. המתקפים גדולים יותר אם בעקבות הפגיעה מתרחש ניתור. הסיבה לכך היא שהמתקף הדרוש כדי לגרום לגוף לעצור ואחר כך, למעשה, "לשוב ולזרוק אותו" גדול יותר מהמתקף הדרוש כדי לעצור את הגוף בלבד. נניח, למשל, שאתם תופסים את העציץ הנופל בידיכם. אתם מפעילים מתקף כדי לתפוס את העציץ ולהקטין את התנע שלו לאפס. אם אחר כך תרצו לשוב ולזרוק את העציץ מעלה, יהיה עליכם להפעיל מתקף נוסף. כלומר, דרוש מתקף גדול יותר כדי לתפוס את העציץ ולשוב ולזרוק אותו, מזה הדרוש כדי לתפוס אותו בלבד. אותו מתקף גדול יותר מפעיל גם הראש אם העציץ מנתר ממנו חזרה.



איור 5.6

הוא מפעיל מתקף גדול על הלבנים במשך זמן קצר ויוצר כוח רב.

### ניתור



איור 5.7

גלגל פלטון. הכפות העקומות גורמות למים לנתר מהן בתנועת פרסה וכתוצאה מכך מופעל מתקף גדול יותר לסיבוב הגלגל.

יישום מעניין למתקף הגדול יותר המופעל כשמתרחש ניתור הומצא בקליפורניה בתקופת הבהלה לזהב. גלגלי המים ששימשו להנעת מכוונות בפעולות כריית הזהב לא היו יעילים. אדם בשם לסטר אי פלטון (Pelton) הבין שמקור הבעיה הוא בכפות השטוחות של הגלגלים. הוא בנה כפות עקומות, שגרמו למים הפוגעים בהן לשוב בפניית פרסה בעת הפגיעה, או במילים אחרות - לנתר חזרה. באופן הזה גדל מאוד המתקף שהמים מפעילים על הגלגל (איור 5.7). פלטון רשם את המצאתו - גלגל פלטון - כפטנט, והרוויח בזכותה יותר משהרוויח מישהו ממחפשי הזהב.

## שאלות

1. בהתייחס לאיור 5.6, מה הקשר בין הכוח שהאדם מפעיל בידו על הלבנים לבין הכוח שפועל על היד?
2. כיצד ישתנה המתקף בפגיעה אם היד תנתר מן הלבנים בעקבות החבטה?

## שימור התנע

אנו זוכרים מפרק 4 כי לפי החוק השני של ניוטון, אם רוצים להאיץ גוף, יש להפעיל עליו כוח. במידה רבה אנו אומרים אותו דבר בפרק זה בטענה שכדי לשנות את התנע של גוף עלינו להפעיל עליו מתקף. בכל מקרה, את הכוח או המתקף חייב להפעיל על הגוף גורם חיצוני. כוחות פנימיים אינם נחשבים. כך למשל, לכוחות הפנימיים הפועלים בתוך כדור טניס אין כל השפעה על התנע של הכדור, ממש כפי שלאדם היושב במכונית ודוחף את לוח המחוונים קדימה אין כל השפעה על שינוי התנע של המכונית. הסיבה לכך היא שהכוחות הם כוחות פנימיים, כלומר, כוחות פעולה וכוחות תגובה הפועלים בתוך הגופים עצמם. דרוש כוח חיצוני, כוח הפועל מבחוץ על כדור הטניס או על המכונית, כדי לגרום לשינוי בתנע. אם אין כוח חיצוני, לא ייתכן שינוי בתנע.

כאשר קליע נורה מרובה, הכוחות הפועלים הם כוחות פנימיים במערכת קליע-רובה. לכן, התנע הכולל של המערכת המורכבת מן הרובה והקליע אינו משתנה (איור 5.8). לפי החוק השלישי של ניוטון, חוק הפעולה והתגובה, הכוח הפועל על הקליע שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח הפועל על הרובה. הכוחות הפועלים על הקליע ועל הרובה פועלים באותו זמן, והתוצאה היא תנעים שווים ומנוגדים. הרובה הנתע רוכש תנע שווה בגודלו לזה של הכדור הנורה. אף שכל אחד מהשניים - הכדור והרובה - רכש תנע ניכר, במערכת המורכבת מן הרובה ומן הכדור גם יחד לא חל כל שינוי בתנע. לפני הירייה התנע היה אפס; אחרי הירייה, התנע הכולל עדיין שווה לאפס. כל תנע לא נוסף למערכת וכל תנע לא נגרע ממנה.

## תשובות:

1. לפי החוק השלישי של ניוטון, הכוחות יהיו שווים. רק הגמישות וכושר ההתאוששות של יד הקראטיסט והאימונים שהוא עבר כדי לחזק את ידו מאפשרים לו לבצע את התרגיל ללא שבירת עצמות.
2. המתקף גדול יותר אם היד מנתרת מהלבנים בעקבות החבטה. אם משך זמן הפגיעה אינו מוגדל באותה מידה, הכוח שיפעל על הלבנים (ועל היד!) יהיה גדול יותר.

