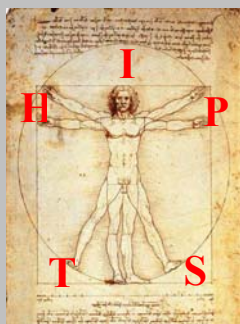


מסע אל ההיסטוריה של מושג המשקל: מאריסטו דרך ניוטון ועד אינשטיין



יגאל גילי ומיכאל צייטלין
האוניברסיטה העברית ירושלים

2010 תש"ע
ירושלים



מסע אל ההיסטוריה של מושג המשקל:

מאריסטו דרך ניוטון, ועד אינשטיין

יגאל גלילי ומיכאל צייטלין

האוניברסיטה העברית ירושלים

תקציר

יחידה זו עוסקת במושג המשקל בפיזיקה והיא מיועדת למורים המלמדים פיזיקה בבית הספר התיכון. להוראת הפיזיקה יש שתי מטרות עיקריות: לימוד הידע הפיזיקאלי והכרת הדרך בה ידע זה מושג ומאומת. במילים אחרות, הדברים אמורים בהכרת האונטולוגיה (המהות) והאפיסטמולוגיה (העיסוק בידע האנושי, סוגיו ומקורותיו) של הפיזיקה. המושג משקל מספק הזדמנות ייחודית לחשוף שני היבטים אלו של הידע הפיזיקאלי, השזורים ומשפיעים זה על זה. ליתר דיוק, מעקב אחר ההיסטוריה של המושג משקל, מאפשר לשחזר את הדרך בה הפיזיקה פועלת להבנת המציאות, במונחים של תמונות רעיוניות של העולם (תיאוריות), ולהבנת האופן בו מתקבלות טענות פיזיקאליות כאמת מדעית.

סיפורו של מושג המשקל החל עם הפיזיקה עצמה (ואפילו עוד קודם), וההבנה הנוכחית של המושג הושגה רק בתחילת המאה ה-20. הבנה זו לא הועתקה במלואה לתכנית הלימודים בפיזיקה, ולכן ההיסטוריה והפילוסופיה של מושג זה יכולים להוות גורם מבהיר ומזמן השלכות להוראה בכיתה. במסע אל ההיסטוריה של הפיזיקה המוצג כאן נתחקה אחר הדרך בה הובן המושג משקל לפני ניוטון, החל מהמדע ביוון העתיקה (אריסטו). משם, נעקוב אחר מושג המשקל במהפכה המדעית של המאה ה-17, כשניוטון זיהה את מושג המשקל ככוח הגרביטציוני והבדיל אותו ממושג המסה ההתמדתית (האינרציאלית). נסביר מדוע ההגדרה הניוטונית של משקל הייתה חייבת להשתנות בפיזיקה החדשה - שבה נעשתה ההבחנה בין המושגים משקל וכוח כבידה, והמשקל הוגדר אך ורק דרך פעולת השקילה. התקדמות זו התחוללה בעקבות ההבנה החדשה של טבע הכבידה, הנובעת מעקרון השקילות של אינשטיין בתורת היחסות הכללית.

ככלל, הסיפור מייצג את ההתפתחות מושג המשקל – ממושג המתאר תכונה של גופים חומריים, דרך אינטראקציה הכבידה בין גופים חומריים, ועד לשילוב המשלים של שתי הגדרות המשקל: ההגדרה התיאורטית האלסטית וההגדרה האופרציונאלית של משקל (שקילה תקינה). ההשלכות המעשיות של המשקל בחברה המודרנית הן בעיקר בהקשר של שינוי המשקל במערכות מואצות, במצב של נפילה חופשית (לווין של כדור הארץ) ובחלומות של חוקרים חובבי חלל על תחנות חלל מסתובבות, החל מזיול וורן במאה התשע-עשרה.

* * *

מילות מפתח: משקל, גרביטציה (כבידה), כוח התמדה, כוח צנטריפוגאלי, הגדרה אופרציונאלית, צופה התמדי (אינרציאלי) ולא התמדי, שקילות בין התמדה וכבידה

* * *

”מאזני מרמה תועבת יהוה ואבן שלמה רצונו” משלי, יא פסוק א’

פסוק זה המופיע בתנ”ך בספר משלי (אחד מספרי החוכמה שכוונתם להדריך את הקורא בדרכי החיים), מתאר את רצונו של האלוהים לשקילה תקינה (שהאבנים המשמשות למשקל יהיו שלמות ומשקלן לא יחסר). מכאן, אפשר להבין שיש להתייחס ברצינות הראויה לשקילה ומשקל.

אנו חושבים שיש במסע המוצג כאן התאמה לצרכיהם של מורים ותלמידים: אלו הרוצים להיות פיזיקאים ואלו הרוצים לדעת על האופן שבו מאורגן ופועל העולם – גם מבלי להיות פיזיקאים. לבטח היה זה רצונו של האל שנבין את מושג המשקל, אך התנ”ך לא יכול לסייע לנו בכך. הבנה זו אפשרית רק בעזרת הפיזיקה.

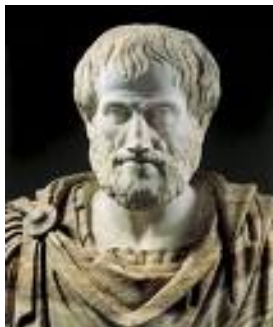
* * *

I. הבנה קדומה של מושג המשקל

התפתחות מושג המשקל במדע החלה מוקדם מאוד ונבעה מהרעיון של **כובד** (משקל- heaviness) ו**קלות** (levity). שני המושגים הופיעו בפילוסופיה הטבע היוונית כתכונות יסודיות ומהותיות של גופים.

הרעיון של **קלות** (levity) איבד את הצדקתו בפיזיקה רק בתקופת הרנסנס (Galilei 1638). גלילאו העלה את השאלה: האם חיבור של שני גופים קלים יחד יוצר גוף קל יותר? [חיבור שני הגופים אמור ”לחזק” את התכונה, באותו אופן שחיבור שני גופים כבדים יוצר גוף כבד יותר]. שאלה זו הובילה לנטישת רעיון **הקלות** של הגופים ולחשיבה רק על מושג **הכובד** של הגופים – המשקל שלהם.

לגבי המשקל – שתי תפיסות תיאורטיות גברו על האחרות במדע היווני: הראשונה מיוחסת לאפלטון והשנייה לאריסטו. לפי אפלטון, המשקל הוא נטיית הגופים להימשך לגופים הדומים להם¹. אריסטו² הציע גישה שונה, לפיה המשקל מהווה חלק מהיקום: היקום של אריסטו כלל ארבעה יסודות בסיסיים (אדמה, מים, אוויר ואש), המאורגנים במרחב לפי כובדם לאורך קו דמיוני ממרכזו של היקום. משקל הגופים התבטא בנטייתם להחזיר אל כנו את הסדר המקורי שהופר. אריסטו טען כי החיפוש התמידי אחר המצב המתאים של מנוחה, הוא הגורם התכליתי של התנועה הטבעית של הגופים, ואילו המשקל שלהם הוא הגורם היעיל של תנועה כזו.



אריסטו

אריסטו³ ייחס את המשקל המוחלט ליסוד האדמה, את הקלות המוחלטת ליסוד האש ומשקל יתר היסודות היה יחסי. משקלו של גוף המורכב מכמה יסודות נקבע בהתאם ליחס המרכיבים הכבדים והקלים

¹ Plato (1952). *The Dialogues of Plato. Timaeus*. Chicago: Encyclopedia Britannica, 63, p. 463.

² Aristotle (1952). *On the Heavens* Chicago: Encyclopaedia Britannica. Book II, Ch. 13, 295a, b, 296a.

³ Aristotle (384 BC-322 BC) – one of the greatest Greek philosophers – actually founded science as a discursive activity dealing with organization of the Nature. He systemized the rules of logical reasoning and suggested the first scientific holistic picture of the world, which was preserved and later modified during the whole history of science.

שבו.

במצב של תנועה טבעית של הגופים - המשקל שימש כגורם לתנועה: ככל שהמשקל גדול יותר – כך גם התנועה. במצב של תנועה מאולצת, לא טבעית, המשקל הווה גורם המתנגד למניע: ככל שהמשקל גדול יותר, כך תנועת הגוף הייתה איטית יותר.

$$v \propto \frac{F}{W} \text{ (תנועה מאולצת)} \quad v \propto \frac{W}{R} \text{ (תנועה טבעית)}$$

כאן, v – מהירות, F – עוצמת הכוח המניע, W – משקל הגוף, R – התנגדות התווך.

ניתן היה לזהות שני ביטויים למשקל: הנפילה של גופים שאינם נתמכים והלחץ שהם מפעילים כלפי מטה על תמיכה אפשרית. לגופים השמימיים אין תמיכה והם לא נופלים, לכן, אריסטו הסיק שהם חסרי משקל.

גישה אחרת למשקל הופיעה מיד אחרי אריסטו, במדע ההלניסטי. ארכימדס ראה במשקל מאפיין המתנגד לכוח הציפה הדוחף את הגופים השקועים במים⁴, שתוצאתו הייתה ציפה או שקיעה של הגופים. אוקלידס לעומתו, התייחס למשקלו של הגוף כלחץ של הגוף על התמיכה – כפי שהוא נמדד על ידי איזון. זו הייתה ההגדרה האופרציונאלית הראשונה של המשקל⁵:



משקל הוא מדד הכבדות והקלות של גוף אחד לעומת גוף אחר באמצעות איזון.

למעשה, השימוש במאזני איזון למדידת משקל היה קיים בתרבויות הקדומות עוד הרבה לפני שהועלו הרעיונות התיאורטיים לגבי משקל.

המדע של ימי הביניים שימר את פרשנות המשקל של אריסטו מטייה של הגוף (ולא ככוח). תומס אקווינס, חסיד מושבע של אריסטו פיתח אבחנה זו⁶:

גוף נע באופן מאולץ על ידי גוף אחר, אם הוא נע כנגד נטייתו; אבל אם הוא נע על ידי גוף אחר הנותן לו את נטייתו שלו, אין זה מאולץ. לדוגמה, כאשר גוף כבד אמור לנוע כלפי מטה מסיבה כלשהי, אין זה מאולץ. באופן דומה אלוהים, בהעבירו את הרצון, אינו כופה זאת, מכיוון שהוא נותן לרצון את נטייתו שלו. (הדגשה של המחבר)

⁴ Archimedes (1978). *On Floating Bodies*. Chicago: Encyclopaedia Britannica. Book II, pp. 540, 543.

⁵ Euclid (1959) *The Book of Balance*. In M. Clagett, *The Science of Mechanics in the Middle Ages* Oxford, Oxford University Press. Def. 1.

⁶ Aquinas (1267/1952). *Summa Theologica* Chicago: Encyclopaedia Britannica. Part I, Q. 105, Art. 4; Part I, Q. 2, Art. 3.

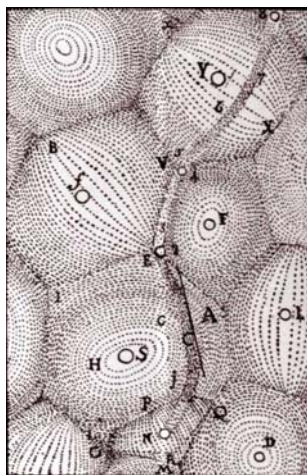


ניקולה אורם

כאשר חכמי ימי הביניים גילו כי גופים מאיצים בעת נפילה, מושג המשקל 'היה חייב' עידון והתאמה. הם פיצלו את המשקל לשני רכיבים: רכיב המשקל הטבעי (הרגיל), משקל המנוחה (או משקל הלחיצה - *pondus*) - הנשאר תמיד ללא שינוי, ורכיב הכבידה האקטואלי, המשקל המעשי (כובדיות *gravitas*) – המשקף את העלייה הנראית במהירות הנפילה.

ואכן, במסגרת העבודה האריסטוליאנית, גידול במהירות (תוצאה) העיד על גידול במשקל (הסיבה)⁷. המושגים החדשים ייצגו את הכבידה הפוטנציאלית (האפשרית) והאקטואלית (הממשית)⁸. עם הזמן, האימפטוס של בורידאן (שהוגדר כמכפלת המשקל במהירות), החליף את הכבידה האקטואלית בתארו את האצת הנפילה⁹.

כל האמור קודם בהקשר למשקל - השתנה כאשר כדור הארץ איבד את מקומו כמרכז היקום האריסטוטליאני. בתמונת היקום החדשה של קופרניקוס איבד העולם את הסימטריה הגיאוצנטרית ונוצר מחדש הצורך למציאת הגורם לנפילת הגופים אל הקרקע. הרעיון האפלטוני הישן של 'משיכה לאותו סוג' קם לתחייה כדי להצדיק את הנפילה הטבעית. במקום החיפוש אחר מרכז העולם של היקום האריסטוטליאני, היה נדמה כי כל גוף שמימי מושך אליו גופים דומים. התמונה משמאל ממחישה את הרעיון, אם כי במנגנון פעולה אחר שהוצע על ידי דקארט במאה ה-17.



ציורו של דקארט ובו העולם מלא במערבולות

במאה ה-17, המשיך גלילאו מאותה התפיסה של ימי הביניים. בשנת 1608 הוא הציע דרך למדוד את ההבדל בין 'משקל מת' (משקל המנוחה - *pondus*) והמשקל בתנועה (הכובד *gravitas*)¹⁰. תחילה, שימר גלילאו את הרעיון לפיו משקל הוא התכונה של הגוף הגורמת לכובד – רעיון הדומה לרעיון המשקל של ארכימדס¹¹, אך

⁷ Brown J. E. (1978) *The Science of Weight*. In D. C. Lindberg (ed.), *Science in the Middle Ages*. Chicago: The University of Chicago Press. p. 180.
⁸ Albert of Saxony (1961). *On the Heavens and the World*. In M. Clagett (ed.) *The Science of Mechanics in the Middle Ages*. Oxford: Oxford University Press. p. 139.
⁹ Clagett, M. (1961). *The Science of Mechanics in the Middle Ages*. Oxford: Oxford University Press 22, pp. 541-556. Grant (1990). *Physical Science in the Middle Ages*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 45, 53.
¹⁰ Drake, S. (1978). *Galileo at Work*. New York: Dover, pp. 126-127.
¹¹ Sharratt, M. (1994). *Galileo: Decisive Innovator*. Oxford: Blackwell.

מאוחר יותר, הוא התייחס למשקל כיחסי לכמות החומר שבגוף (בדומה למסה של ניוטון). יחד עם זאת, הצהרותיו כמו זו למשל¹²:

...כפי שנאמר כבר לעיתים קרובות, התוודך מפחית את המשקל של כל חומר השקוע בו...

מעידות על מסורבלות מסוימת, כיוון שכמות החומר נשמרה מן הסתם גם לאחר שהשקיעו את הגוף בתוך המים.



רנה דקארט

באותו הזמן היה מקובל להשתמש במונחים 'pondus' – כבידה – משקל' כמילים נרדפות. כך השתמש בהן גלילאו בהתייחסו לאותו הרעיון של משא או כובד הנמדדים על ידי שקילה¹³.

להשלמת התמונה, נזכיר את רעיונו המקורי של דקארט¹⁴, שניסה להסביר את מהות המשקל באופן שונה: דקארט ייחס את המשקל לתוצאה המתקבלת מחיבור של שאיפות צנטריפוגאליות. ברור שבהתמודדות בין השאיפות, הגופים הקלים יותר נדחפים פנימה בניגוד לשאיפה הטבעית שלהם. כך לדעתו נוצר כח הכובד. כלומר כוח הכובד הוא שארית הדחיפה הצנטריפטאלית המופעלת על הגוף במערבולת של חומר

התוודך ('matiere subtile'). חלקיקי חומר התוודך הממלאים את הנקבוביות בנפח של כל הגופים, נמצאים במגמה של ערבול מהיר ונטייה צנטריפוגאלית חזקה. יחד עם זאת, תנועתם הרדיאלית כלפי חוץ יוצרת את הדחיפה הצנטריפטאלית, ההודפת את הגופים פנימה וגורמת להם להיות כבדים וליפול אל הקרקע. דקארט הדגים זאת על ידי ניסוי: בקערה גדולה של כדורי אקדח היו כמה פיסות של פקק קל. במהלך הסיבוב של הקערה, פיסות הפקק נעו למרכז הסיבוב. למותר לציין כי המצב המתואר בניסוי לא דמה כלל למצב המציאותי של גופים בקרבת הקרקע, אך מטרתו העיקרית של דקארט הייתה לחפש אחר המנגנון המייצר את הדחיפה הצנטריפטאלית¹⁵.

שאלות למחשבה:

1. מדוע אנו יכולים לדבר על ה כובד של הגופים - כמאפיין פיזיקאלי שלהם, ואין אנו יכולים לעשות כך לגבי הקלות?
2. אריסטו לא התייחס למשקל כאל כוח אלא כאל נטייה של הגופים. מהו לדעתכם ההבדל?

¹² Galilei, G. (1638/1914). *Discourses Concerning Two New Sciences*. New York: Dover. First Day: pp. 78, 81.

¹³ e.g. Moody, E.A. & Clagett, M. (1952). (eds.) *The Medieval Science of Weights*. Madison, Wisconsin: The University of Wisconsin Press. Jammer, M. (1957). *The Concept of Force*. New York: Harper Torchbooks.

¹⁴ Descartes, R. (1647/1983). *Principles of Philosophy*. Dordrecht: D. Reidel, pp. 191-192.

¹⁵ Aiton, E. J. (1959). The Cartesian Theories of Gravity, *Annals of Science*, 15(1), 27-49.

3. חכמי המדע של ימי הביניים לא היו מרוצים מרעיון יחיד של משקל (כבידה), והבחינו בין משקל *מנחה* (או *pondus*) שתמיד נשאר ללא שינוי, וכובד *ממשי* (*אקטואלי*) או משקל זמני (*gravitas*). מה לדעתכם היה הרציונאל של תפיסה זו?

4. כיצד הסביר דקארט את המשקל? האם רעיון כזה סביר בעיניכם? הסבירו.

II. המשקל במכאניקה הקלאסית של ניוטון

אחרי גלילאו, החיפוש אחר הסיבה לכבידה נטש את התחום הארצי וההקשר נעשה אסטרופיזיקאלי. במובן מסוים הוצג מצב פיזיקאלי פשוט יותר, לפחות כהסבר ראשוני. כאן, ראוי שנכיר בחשיבות דרכי הטיעון של ניוטון:

ראשית, ניוטון הציג פרדיגמה של כוחות המארגנים את היקום וביסס את לב התיאוריה שלו על חוקי התנועה. בחפשו אחר הגורם לתנועת כוכבי הלכת סביב השמש, בנה ניוטון את מושג הכוח הצנטריפטאלי, הפועל ביחס הפוך למרחק בין כל הגופים - כולל תנועת הירח סביב הארץ¹⁶.

$$F_{cp} \propto \frac{1}{r_{12}^2}$$

F_{cp} מייצג את הכוח הצנטריפטאלי ו- r_{12} מייצג את המרחק בין שני עצמים חומריים.

כוח מרכזי זה, המושך בין הגופים השמימיים, היה הצעד הראשון לקראת חוק הכבידה העולמי. ניוטון ביצע ניסוי מחשבתי כדי לקשור כוח זה אל הכבידה¹⁷:

...אם נדמיין עתה את הירח שיהיה משולל כל תנועה וניתן לו ליפול כך שייפול לכיוון הארץ עם כל הכוח הזה שדוחק אותו אשר (לפי מסקנה היגד III), הוא [באופן טבעי] נשאר במסלולו... הכוח הזה אשר שומר את הירח במסלולו בירידתו ממסלול הירח אל פני הארץ, מתגלה כשווה לכוח הכבידה כאן על פני האדמה, וכך, (לפי כללים 1 ו-2), זהו ממש אותו הכוח שאנו מכנים בדרך כלל כבידה.

כלומר, נראה כי הכוח המושך את הירח אל הארץ, הוא בדיוק כמו כוח הכבידה. ניוטון הגיע לכך על ידי מעקב אחר השינויים בגודל התאוצה של הירח כשאנו מקרבים אותו לסביבת קרקע כדור הארץ. מכאן, טען ניוטון לפי שני חוקי ההיסק שלו:

חוק I: אין עלינו להוסיף לגורמים לתופעות טבעיות- מעבר לאמת המספיקה כדי להסביר את קיומן.

חוק II: לכן, אנו חייבים ככל האפשר לשייך את אותם הגורמים לתופעות דומות.

¹⁶ Newton, I. (1687/1999). *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Berkeley, CA: University of California Press, Book III, Proposition I, II, III, pp. 802-803.

¹⁷ *ibid.* Book III, Proposition IV, pp. 804.

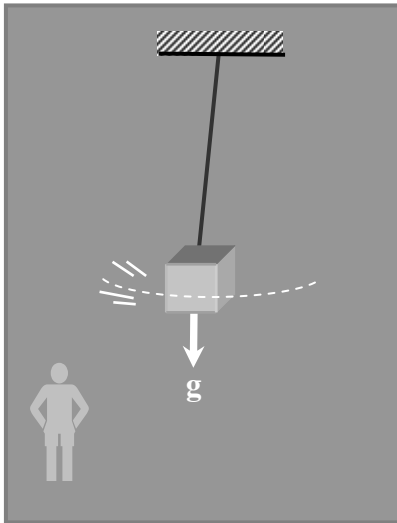
ומכאן ניתן להקיש¹⁸ :

ולכן (לפי חוקים I ו-II), הכוח השומר את הירח במסלולו הוא אותו כוח שאנו בדרך כלל מכנים כבידה (gravity); אילו הכבידה הייתה כוח שונה מזה, אזי הגופים, עם הדחף המשותף של שני הכוחות, היו נופלים אל הקרקע במהירות כפולה.

הטענה האחרונה מופיעה בדיון (Scholium)¹⁹ :

הכוח השומר על הגופים השמימיים במסלוליהם, נקרא עד עתה כוח צנטריפטאלי, אך עתה זה ברור שאין הוא אלא כוח המשיכה...

$$F_{cp} = F_g$$



היה זה הרגע הגדול באמת. מה שהיה עד כה מושג מעורפל של כבידה, משקל וכדומה, הפך מעתה ל כוח של הכבידה, כוח מושך, או כמו שאנו מכנים זאת עכשיו: כח הכבידה (the gravitational force). המשקל, שבעבר השווה לכבידה, נקשר עכשיו בברית זוגיות עם כוח הכבידה. ניוטון המשיך והשלים באומרו²⁰ :

...כי כל הגופים נמשכים לכיוון כל כוכב לכת, וכי המשקלים של הגופים ביחס לכל כוכב, כשהם נמצאים במרחקים שווים ממרכז הכוכב - הם ביחס לכמויות החומר שהם מכילים.

ניוטון הדגים זאת באמצעות ניסויים עם מטוטלות שוות-גיאומטריה וצורה, העשויות מחומרים שונים²¹ :

ניסיתי זאת עם זהב, כסף, עופרת, זכוכית, חול, מלח בישול, עץ וחיטה. לקחתי שתי קופסאות עץ עגולות ושוות: מלאתי אחת מהן בעץ, ותליתי משקל זהה של זהב (הכי מדויק שיכולתי) במרכז התנודה של [הקופסה] האחרת. הקופסאות, התלויות על חוטים שווים של 11 פיט, הוו זוג מטוטלות שוות לגמרי במשקל ובצורה, ומושפעות במידה שווה מהחיכוך עם האוויר. וכן, כשהצבתי את האחת ליד השנייה, הבחנתי שהן מתנדדות יחד קדימה ואחורה במשך זמן רב עם תנודות שוות.

בכך שהראה כי כוח המשיכה אינו תלוי בסוג החומר (כל המטוטלות נעו בדיוק באותו האופן), הגיע ניוטון למסקנה שכוח המשיכה הוא פרופורציונאלי למה שהוא כינה: כמות החומר. אנו מעדיפים לכנות זאת: מסה התמדית (אינרציאלית) :

¹⁸ *ibid.*

¹⁹ *ibid.* Book III, Scholium, p. 805.

²⁰ *ibid.* Book III, Propostion VI, p. 806.

²¹ *ibid.*

$$F_g \propto m$$

כאן, עשה ניוטון צעד ענק: עד עתה היה בלבול בין המושגים מסה וכבידה (גרביטציה). מושג האימפטוס של ימי הביניים הוגדר כמכפלה של **משקל** ומהירות, בעוד התנע (כמות התנועה) שהחליף את האימפטוס, כבר הוגדר על ידי ניוטון כמכפלת **המסה** במהירות. הצעד המהפכני היה להפריד בין הכבידה והמסה. מעתה, כוח הכבידה היה יחסי למסה ולא שווה לה.

וכך לבסוף, באמצעות הסימטריה של האינטראקציה (חוק III), נקבל:

$$F_g \propto m_1 \cdot m_2$$

אם נצרף תוצאות אלה, נקבל את חוק הכבידה העולמי המפורסם:

$$F_g \propto \frac{m_1 \cdot m_2}{r_{12}^2}$$

ניוטון יכול היה להשלים את החוק רק באופן חלקי, מכיוון שלא ניתן היה למדוד במעבדה את כוח המשיכה בין שתי מסות ידועות. קאוונדיש ביצע מדידה זאת מאה שנים מאוחר יותר, באותה אוניברסיטת קיימברידג', בניסוי שנקרא "שקילת כדור הארץ".

הזהות של המשיכה הקוסמית עם המשקל של הגופים על הארץ נראתה טבעית לגילברט, דקארט, הויגנס וכמובן, ניוטון. רק לאחר יותר ממאתיים שנים, אותה הזהות בין הסיבה (כוח הכבידה) ותוצאתה (המשקל), הוכרה כמושא ייחודי לחקירה נוספת.

בהתפתחות זו, המזוהה עם כוח הכבידה, המשקל חדל להיות מאפיין אוניברסאלי של הגופים, בעוד המסה (כמות החומר) וההתמדה (*vis insita*) נשארו ככאלה. המאפיין (הנשכח לעיתים) של המשקל הניוטוני, הוא שהמשקל בא תמיד כאינטראקציה של זוג כוחות. ניוטון כתב²²:

... המשקלים של כוכבי הלכת לעבר השמש חייבים להיות יחסיים לכמות החומר שלהם... (ההדגשה במקור).

פירוש הדבר כי המשקל של כדור הארץ לעבר השמש, שווה למשקל השמש לעבר כדור הארץ, ובאותו האופן, משקל כדור הארץ לעבר הירח, שווה למשקל הירח לעבר כדור הארץ. המשקל הניוטוני איננו מאפיין של הגוף הבודד אלא של זוג גופים. משקל כזה לא יכול היה לשרוד בחיי היום יום, שבהם המשמעות המעשית היחידה הייתה המשקל של הגופים לעבר כדור הארץ, ואכן, המשמעות הניוטונית של המשקל לא שרדה.

ניוטון לא שכח להגדיר את המשקל גם באופן אופרציונאלי²³ (אופרציה- פעולה):

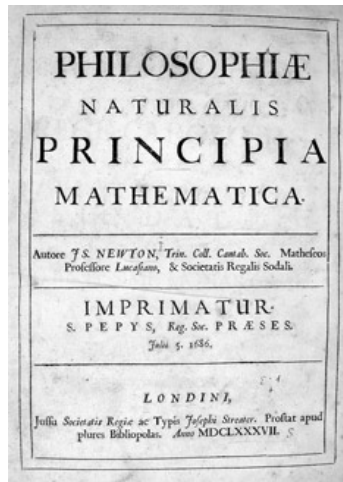
לכן, המשקל גדול יותר בגוף יותר, ופחות בגוף פחות; ובאותו הגוף, המשקל גדל בקרבת הקרקע, ופחות במרחקים מרוחקים. סוג כזה של כימות הוא השאיפה והנטייה של כל הגוף לעבר המרכז, או, כפי שאני יכול לומר, משקלו; והוא ידוע תמיד

²² *ibid.* Book III, Proposition 6, pp. 806-810.

²³ *ibid.* Definition VIII, pp. 407-408.

בכמות של כוח שווה ונגדי, המספיק רק כדי למנוע את נפילת הגוף (הדגשה של המחבר).

למרות שהיה מקובל לאחר ניוטון שכוח הכבידה תמיד תואם לתוצאת השקילה, היה גם ידוע כי תוצאת השקילה תלויה בבירור בקו הרוחב הגיאוגרפי בו היא מתבצעת. זה הגביל את נכונות המשוואה: 'תוצאת שקילה = כוח כבידה'. למרות זאת, ההשוואה הניוטונית בין שני המושגים נשמרה, יחד עם התפיסה השגויה לפיה ניתן למדוד את כוח המשיכה באמצעות מדידה ישירה ופשוטה - שקילה.



בלמידה על רעיון המשקל של ניוטון, אי אפשר להחמיץ את התכונה החשובה של גישתו אותה הביע בשורות האחרונות של המסה הגדולה שלו: הימנעות מספקולציות בהקשר למקור הכבידה. אלה היו מילותיו המסכמות בספרו 'היסודות המתמטיים של פילוסופיית הטבע' (בלטינית: *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* - פילוסופיה נטוראליס פרינקיפיה מתמטיקה)²⁴:

עד כה יש באפשרותנו להסביר את תופעות השמים והים שלנו על ידי כוח הכבידה, אבל עדיין לא התייחסנו לגורם הכוח הזה.

ודאי הוא, כי הגורם חייב לנבוע מסיבה החודרת ממש למרכזי השמש וכוכבי הלכת, מבלי להפחית אפילו במעט מכוחו; אין הוא פועל לפי כמות משטחי החלקיקים (כפי שגורם מכאני רגיל לעשות), אלא לפי כמות החומר המוצק שהם מכילים, סגולותיו, אותן הוא מפיץ למרחקים עצומים, מופחתים תמיד ביחס כפול למרחקים...

אבל, עד כה לא הייתי מסוגל לגלות מהתופעות את הגורם למאפיינים אלה של כבידה, ואינני בודה השערות; מכיוון שכל מה שלא ניתן להסיק מן התופעות חייב להיקרא השערה; והשערות, אם הן מטאפיזיות או פיזיקאליות, אם הן מבוססות על איכויות נסתרות או מכאניות, אין להן מקום בפילוסופיה הניסויית. בפילוסופיה זו, הנחות מסוימות נגזרות מן התופעות, ואחר כך, הן מתקבלות באופן כללי באמצעות אינדוקציה. כאלו היו הגילויים של אי חדירות של הגופים, ניידותם, כוחות המניעים של הגופים, וחוקי התנועה והכבידה. ועברנו זה מספיק שכוח הכבידה קיים באמת, והוא פועל לפי החוקים שהסברנו, ומשמש בשפע כדי לדווח על כל התנועות של הגופים השמימיים ושל הים שלנו.

²⁴ Newton, I. (1687/1999). Op. cit., General Scholium, p. 943.



לאונרד אוילר

אוילר²⁵ חי במאה ה-18, ממש לאחר המהפכה המדעית, כשהמכאניקה של ניוטון הפכה לתיאוריה העיקרית. במאמרו על המכאניקה²⁶, אוילר הציג את רעיונותיו של ניוטון על המשקל כטענות שכבר אומצו על ידי מדע הפיזיקה. זאת, למרות שבקהילה המדעית עדיין התווכחו על תקפות הרעיון למול רעיון המערבולות של דקארט, לפיו המערבולות גורמות למשקל באמצעות הלחץ של התווך המקיף את הגוף. אוילר כתב:²⁷

הגדרה 16

179. הכבידה היא הכוח אשר מאלץ את כל הגופים הקרובים לפני השטח של כדור הארץ ליפול למטה; כוח הכבידה אשר מופעל על כל גוף, נקרא המשקל של אותו הגוף.

מסקנה 1

180. כוח הכבידה הוא הגורם החיצוני, אשר מאלץ את הגופים הארציים לנטייה כלפי מטה; לכן, אין הוא יכול להיות תכונה המיוחסת לגופים מסוימים עצמם.

מסקנה 2

181. לכן גוף הנשלח קרוב לפני השטח של כדור הארץ, גם אם הוא צריך להיות במנוחה, הוא נדחק בתנועה כלפי מטה, ובינתיים הוא שוקע עד שהוא מגיע למכשולים המונעים את הנפילה.

מסקנה 3

182. יתר על כן, כל עוד הנפילה מעוכבת, או בגלל שהגוף מוחזק נייח כשהוא לוחץ על אובייקט, או בגלל שהוא תלוי, משקלו של גוף זה מפעיל את עצמו על ידי לחיצה כלפי מטה.

בהתאמה למשקל כפי שהוגדר על ידי ניוטון, אוילר מזכיר: כבידה זו "לא יכולה להיות תכונה המיוחסת לגופים מסוימים עצמם" (מסקנה 1), כלומר, המשקל מאפיין את זוג הגופים ולא את אחד מהם. אוילר, כמעט כמו ניוטון, מתייחס למשקל כגורם ללחץ הגופים כלפי מטה (מסקנה 2). כאן, אוילר הגדיר בדיוק את כוח הכבידה ואת המשקל בסגנון של ניוטון, כלומר, הוא מציין את העובדה בלי שום השערות לגבי הסיבה. ההתייחסות לכך מופיעה אחר כך, בדיון (Scholium), שם, אוילר הביע במישרין את חוסר הנוחות שלו בהקשר לסיבה או למקור הלא ברור של כוח

²⁵ Leonhard Paul Euler (1707–1783) was a pioneering Swiss mathematician and physicist who worked in Russia and Germany. Euler made important discoveries in mathematical analysis (he introduced the notion of function). He is also renowned for his work in mechanics, fluid dynamics, optics, and astronomy.

²⁶ Euler, L. (1765). *Theory of the motion of solid or rigid bodies.*

<http://www.17centurymaths.com/contents/euler/mechvol3/genmotch4.pdf>

²⁷ *ibid.*

הכבידה. שלא כמו ניוטון, אויילר משער ומציג את הבלבול שלו, ובסופו של דבר חוזר הרעיון הקרטזי המייחס את הכבידה ל"הפעולה של חומר עדין יותר, שחמק מתפיסת החושים שלנו"²⁸:

184. גם האנשים האלה, שראו את הגורם לכך כמשיכה המשותפת זה אל זה, מזהים את הדברים האלה, כי הכבידה היא כוח חיצוני, אשר פועל מבחוץ על הגופים ומאלץ אותם לנטות כלפי מטה. וזאת כי גופים אינם נדחפים לכיוון הארץ על ידי אינסטינקט מיוחד, אלא הם מוגדרים להמשך לארץ על ידי כוח הגורר אותם אחד כלפי השני. ניתן להבין בבירור את העניין כך, כאילו הארץ הייתה שולחת אי אילו כוחות חובקים הפועלים על גופים, ואשר שולחים את הגופים לעבר הארץ; כעת, לא שהם רואים כיצד כל זה יכול להתרחש ללא התערבות של תווך, אבל הם רוצים שהכוחות יפעלו במקום באופן זהה, גם אם נלקח כל החומר בין הגוף והארץ [תווך]. לכן, כוח הכבידה איננו כוח חמרי הפועל על הגוף, ובכך באמת הוא קשור לארץ, כדי שעם הרחקתו, גם הכוח יעלם; ולכן באופן דומה, כאילו רוח מסוימת צריכה לנוע במהירות כדי לאלץ גופים כלפי מטה; כי אחרת לא ניתן לשקול או להבין בשום אופן איך יכול הכוח עצמו לעבור דרך מרחקים גדולים ללא תמיכה של חומר מתווך מכל סוג שהוא. ...מה שאולי סביר יותר להיות נכון הוא שכוח הכבידה נובע מהפעולה של חומר עדין נוסף שחומק מתפיסת החושים שלנו...כאשר המתפעלים מהמשיכה אומרים שכוח המשיכה הושם במקום על ידי אלוהי הארץ, אין הם אלא אומרים שהגופים נדחפים מייד על ידי אלוהים עצמו. (הדגשה של המחבר).

בנוסף, אויילר הרחיק לכת בכינון מסגרת העבודה של הפיסיקה. הוא הדגים את היכולת להשתמש במשקל למדידת כוחות ומסות²⁹:

191. אנו יכולים לבטא את הכוחות הפועלים בעקביות באמצעות המשקלים השווים להם.

192. ביטוי הכוחות על ידי המשקלים אינו יוצר כל קושי; מאחר והמשקל של כל גוף הוא כוח, וככזה הוא מושך כלפי מטה, הכוחות הפועלים והמשקלים הם כמויות שקולות בינן לבין עצמן; וכל גוף המופעל עליו כוח כלשהו, אפשר להתייחס לכך כאילו פועל עליו כוח שווה המכוון כלפי מטה למקום על פני כדור הארץ, כך שהמשקל המדויק של גוף זה יציג את המידה של כוח זה. וכאשר השאלה נוגעת לכוח כה גדול, שאין איש בקרבת פני הארץ המסוגל להציג משקל זהה, מספיק יהיה לדעת פי כמה גדול כוח זה ממשקלם של מספר גופים קטנים הנוכחים על פני הארץ; אם זה אכן כך – יש בוודאי יכולת להגדיר את העוצמה של כוח זה.

בהתאם למסורת זו, אנו, במעבדה המודרנית של בית הספר, מכיילים מד כוח על ידי תלית משקלים שונים על הקפיץ ומשתמשים בקפיץ המכויל כדי למדוד כוחות אחרים.

²⁸ Euler, L. (1765). Op. cit. <http://www.17centurymaths.com/contents/euler/mechvol3/genmotch4.pdf>
²⁹ *ibid.*

הויגנס

השפעתו של ניוטון על מסגרת העבודה של המחשבה הפיזיקאלית הייתה עצומה. עם זאת, היה



קריסטיאן הויגנס

אדם מבריק נוסף – קריסטיאן הויגנס³⁰, פיזיקאי הולנדי בולט שעבד כמעט במקביל לניוטון והעלה רעיונות חלופיים לגבי סוגיות יסוד במכאניקה וגם באופטיקה³¹. במסע זה ניגע ברעיון הבסיסי שלו לגבי טבעו של הכוח הצנטריפוגאלי והדמיון בינו לבין כוח הכבידה.

נקודת המבט של הויגנס הייתה מאוד מיומנת ומקורית. בשנת 1659, לפני ההמצאה הגדולה של תמונת הכבידה הניוטונית, הויגנס הציג את הרעיון של *כוח צנטריפוגלי*³² וקבע את המשתנים שלו. היום אנחנו מבטאים כח זה באופן מודרני, באמצעות שימוש בנוסחה:

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

הויגנס יכול היה רק לתאר את התלות של מה שהוא החשיב ככוח צנטריפוגלי בפרמטרים שונים: משקל (ולא המסה, אליה אנו מתייחסים היום), המהירות ורדיוס הסיבוב. הויגנס נהג לתאר זאת באמצעות השוואה בין שני גופים בתנועה דומה.

עם זאת, אל לנו לשכוח שהויגנס מעולם לא כתב נוסחה זו. יתר על כן, לפני ניוטון אנשים חשבו רק במונחים של משקל, אשר לא נבדל ממושג המסה ההתמדית (האינרציאלית) וגם לא מכוח הכבידה. שני מושגים אלו הומצאו על ידי ניוטון. גם רעיון הכוח עצמו היה מעורפל ולא מוגדר היטב וחיכה למגע של ניוטון. ולמרות כל אלה, הויגנס היה הראשון שניסה לתאר מצב פיזיקאלי מנקודת המבט של צופה במערכת מסתובבת. לשם כך הוא הציע להשתמש בניסוי מחשבת³³:

הבה נדמיין גלגל גדול מאוד, כזה שבקלות נושא עמו אדם העומד על היקפו. האדם מחובר כך שאינו יכול להיזרק מן הגלגל; ניתן לאדם להחזיק בידו חוט עם קליע עופרת הקשור לקצה השני שלו.

כדי להקל על הבנת הניסוי של הויגנס, עלינו ראשית להציג את ההסבר המודרני במקרה זה. לדעתנו, יש להבחין בין תיאור המצב הנראה על ידי הצופה A הנמצא מחוץ לגלגל (איור 1), ובין זה הנראה על ידי הצופה B שעל הגלגל, שבו התחשב הויגנס.

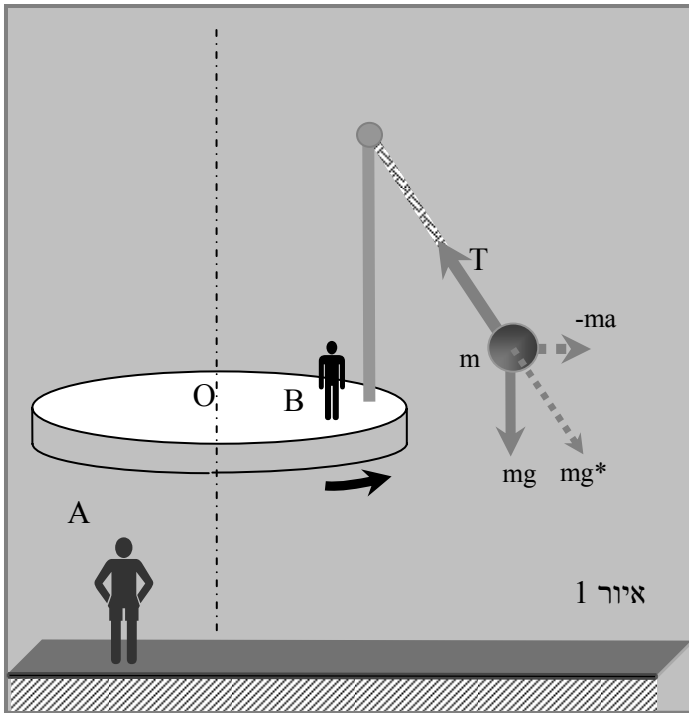
³⁰ Christian Huygens (1629 – 1695) was a Dutch physicist who invented the first pendulum clock, which greatly increased the accuracy of time measurement. He worked on mechanics, astronomy and probability

³¹ In the optics, Huygens confronted the ideas of particle (light rays) paradigm with the wave theory of light (elastic distortions in the ether medium).

³² Huygens, Ch. (1659/1703). On the centrifugal force. From *De vi Centrifuga*, in *Oeuvres Complètes*, Vol. XVI, pp. 255-301, Translated by M.S. Mahoney.

Online: <http://www.princeton.edu/~hos/mike/texts/huygens/centriforce/huyforce.htm>

³³ *ibid.* p. 1



שני צופים מתארים את המצב בו מסטוב כדור תלוי בעמוד שהוקם על הדיסק המסתובב. צופה B אינו מתאר את המצב על סמך חוקי התנועה של ניוטון וללא כוח צנטריפוגלי. צופה B, המסתובב, מתאר את מצב של שיווי משקל וזקוק כוח צנטריפוגלי $-ma$.

צופה A, שבו ניוטון התחשב מאוחר יותר, מציין את המתח של החבל T ואת כוח המשיכה mg הפועל על המסה m . הוא מתאר באופן מלא את הסיבוב באמצעות החוק השני של ניוטון. כלומר, A מייצג את הצופה ההתמדי (אינרציאלי).

צופה B, שבו התחשב הויגנס, אינו מבחין בסיבוב של מסה m , אך טוען לשיווי משקל של הכדור הנח (המסה). המתח T וכוח המשיכה mg אינם מספיקים למטרה זו. כדי להגיע לשיווי משקל הוא זקוק לכוח נוסף $-ma$.

הכוח הנוסף $(-ma)$, שלא היה קיים עבור ניוטון אך נדרש על ידי הויגנס, מכונה היום **כוח התמדה**. צופה B, מוגדר כצופה לא התמדי (לא אינרציאלי) (הוא זה המפעיל כוחות אינרציאליים), והגלגל המסתובב מציג מסגרת התייחסות לא אינרציאלית.

הכוח הצנטריפוגאלי הוא כמו כוח הכבידה

בהעדר תורת הכבידה וחוקי התנועה של ניוטון, הויגנס היה מוגבל ביכולתו לטפל בסיבוב. עם זאת, הוא עשה הערכה גאונית כשניסה להראות כי כוח הכבידה הוא כמו הכוח הצנטריפוגלי. לו היה יודע את הנוסחאות עבור שני הכוחות שאנו יודעים היום:

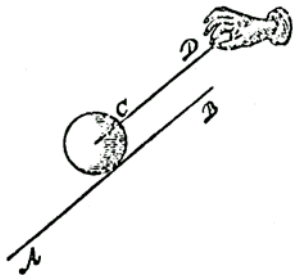
$$F = \frac{mv^2}{r} \quad \text{ו-} \quad F_g = mg$$

הוא היה רואה כי שני הכוחות יחסיים למסת האובייקט, ובמובן הזה הם דומים במהותם (הם מקבילים באופן הסימון: $a_R = v^2/R$ ו- $a_g = g$).

מכאן נובע כי הצופה B יכול לטעות לגבי כוח הכבידה, בהתחשב בכך שהוא משווה את כוח הכבידה עם המשקל - הכובד של הגוף התלוי במנוחה (mg^*). צופה A יכול להבחין בבירור במשקל הגרביטציוני (mg), אך הוא חייב לצאת מהזהות בין משקל (הכובד של הגוף) לבין כוח המשיכה: במקרה שלו הכוח הצנטריפוגלי מגדיל את משקל הגוף. זו אכן יכולה הייתה להיות נקודת מפנה המבדילה בין כבידה ומשקל, אבל כפי שכבר הוזכר, הויגנס לא הגיע לזאת.

למרות שהויגנס לא ידע את כל זאת, הוא הכיר את עבודותיהם ותפיסותיהם של גלילאו ודקארט והשתמש בהם. שלא כמו ניוטון, הויגנס הגדיר את הכבידה לפי רעיון ה- *conatus* (מתח רדיאלי) של דקארט (איור 2)³⁴:

הכובד הוא הנטייה ליפול [*Gravitas est conatus descendendi*]



איור 2

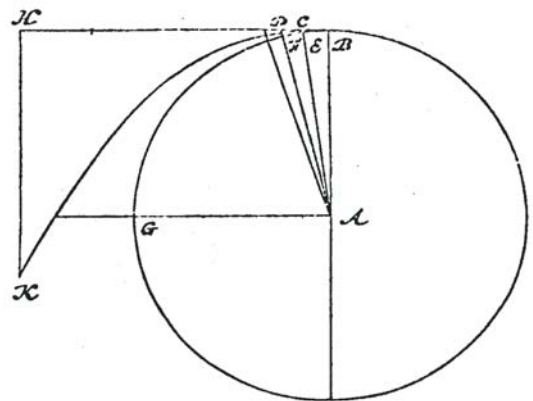
ואז, הויגנס התייחס לגוף כאילו הוא קשור על ידי חבל. כאן דקארט ביסס את רעיון המתח הרדיאלי - *conatus* - הנוצר בחבל המסובב את האבן. הויגנס התכוון להראות כי אין הבדל בין *conatus* זה ובין זה הנוצר בגלל הכבידה. אך איך לעשות זאת?

הויגנס הראה כי אם משחררים את האבן מן החבל, והיא מתרחקת לאורך הקו הישר (בהתאמה לחוק התנועה השני של דקארט), אזי המרחקים ממרכז הגלגל גדלים ברצף תואם בדיוק לזה שהוצג על ידי גלילאו עבור הנפילה החופשית של גוף. זה מעיד, כך חשב הויגנס, על הזהות בין אופיו של המתח הסיבובי (הכוח הצנטריפוגלי) והכבידה.

הנה ציטוט מתוך כתביו של הויגנס על הכוח הצנטריפוגאלי (*De vi Centrifuga*)³⁵:

יהי BG [איור 3] גלגל המסתובב במקביל לאופק על מרכז A . כדור קטן מחובר

להיקף, וכאשר הוא מגיע לנקודה B , הוא נוטה להמשיך לאורך הקו הישר BH , אשר משיק לגלגל בנקודה B . כעת, אם בנקודה זו הוא היה מופרד מהגלגל ועף, הוא היה נשאר על הנתיב הישר BH ולא היה עוזב אותו אלא אם היה נמשך כלפי מטה על ידי כוח הכבידה, או אם מסלולו היה משתנה בשל התנגשות עם גוף אחר. אמנם, במבט ראשון נראה כי קשה להבין מדוע החוט AB נמתח כל כך כשהכדור מנסה לנוע לאורך הקו הישר BH , הניצב ל- AB . אך הכול יתבהר באופן הבא: הבה נדמיין גלגל גדול מאוד,



איור 3

כזה שבקלות נושא עמו אדם העומד על היקפו. האדם מחובר כך שאינו יכול להיזרק מן הגלגל; ניתן לאדם להחזיק בידו חוט עם קליע עופרת הקשור לקצה השני שלו. עקב כך החוט יימתח על ידי הכוח של הסיבוב באותו האופן ובאותה העוצמה, בין אם הוא החזיק את החוט כך, או שאותו החוט יוארך אל המרכז A ויחובר שם. אבל הסיבה לכך שהחוט מתוח יכולה להיות עכשיו יותר ברורה.

ניקח קשתות שוות EF, BE קטנות מאוד בהשוואה להיקף כולו, למשל החלק המאית או אפילו קטן מזה. לכן, האיש שדיברתי עליו כמחובר לגלגל, חוצה את

³⁴ *ibid.*
³⁵ *ibid.*

הקשתות האלה בזמנים שווים, אבל [כדור] העופרת, לו היה משוחרר, היה חוצה בקווים ישרים BC, CD, השווים לאותן קשתות. עם זאת, נקודות הקצה לא נופלות בדיוק על הקווים הישרים הנמשכים מהמרכז A דרך נקודות E, F, אלא יונחו מעבר לקווים אלה מעט הצידה לכיוון B. כעת, ברור שכשהאדם מגיע ל E, [כדור] העופרת יהיה ב C אם הוא היה משוחרר בנקודה B, וכשהאדם מגיע ל F, [כדור] העופרת יהיה ב D. מניין לנו לומר במדויק כי נטייה זו קיימת בעופרת. אבל עכשיו, אם הנקודות C, D היו על הקווים הישרים AE, AF המוארכים, יהיה זה בטוח שהעופרת תיטה להתרחק מן האדם לאורך הקו הנמשך מן המרכז דרך מיקומו [של האדם]; ואכן כך בחלק הראשון של הזמן הוא [הכדור] יתרחק ממנו במרחק EC, ובחלק השני של הזמן הוא [הכדור] יהיה רחוק במרחב FD. אבל מרחקים אלה EC, FD וכו' גדלים כסדרה של ריבועים החל מאחד: 1, 4, 9, 16 וכו'. עכשיו הם תואמים לסדרה הזאת יותר מתמיד, בדיוק כפי שהחלקיקים BE, EF הופכים לקטנים יותר, ולכן ממש בהתחלה הם נחשבים כאילו אין ביניהם כל הבדל.

כך, נטייה זו תהייה בבירור דומה לזו שהורגשה כאשר הכדור הוחזק תלוי על חוט, כי גם אז הוא [הכדור] נוטה להתרחק לאורך קו החוט בתנועה מואצת דומה, דהיינו, [תנועה] כזאת שבחלק המסוים הראשון של הזמן הוא [הכדור] יחצה מרווח אחד, בשני חלקים של הזמן [הוא יחצה] 4 מרווחים, בשלושה 9 וכו'.

עבודתו של הויגנס על הכוח הצנטריפוגלי היא אחת המרשימות במכאניקה של המאה ה-17, והייתה מאוד מוערכת על ידי בני דורו. ניוטון, אשר לעתים נדירות שיבח את עמיתו, כתב על המחקר הזה³⁶:

ועל ידי טענות כאלה, מר הויגנס, בספרו המצוין *De Horologio Oscillatorio*, השווה את כוח הכבידה עם הכוחות הצנטריפוגליים של גופים מסתובבים.

הויגנס הקדים את טיפולו של ניוטון במכאניקה. אף שגישתו של ניוטון הייתה בשלה יותר, היא לא לקחה בחשבון מצבים של צופים לא אינרציאליים. למעשה, ניוטון לא לקח כלל בחשבון את הצופים. מתפיסתו את היקום כעולם יחיד וסטטי המתואר במרחב וזמן אבסולוטיים משתמע צופה יחיד אמיתי - אלוהים. לכן, למרות שעבודתו של הויגנס זכתה לשבחים, איש לא יכול היה להעריך אותה באמת, כולל הויגנס עצמו. הזמן לא היה בשל לכך.

המשקל הוא כוח הכבידה

עבודתו וגישתו של הויגנס נשארו בשולי המכאניקה התיאורטית, אולם בפועל, אומצו תוצאותיו הנוגעות לכוח הצנטריפוגלי. ואכן, ניתן להתייחס לכדור הארץ שלנו כאל גלגל ענק מסתובב. בגלל קיום הסיבוב, תוצאות השקילה משתנות לפי קו הרוחב: זוהי עובדה חשובה לאין ערוך שאין להתעלם ממנה בתחום הסחר והטכנולוגיה. תאוצת הנפילה החופשית g בקו המשווה היא פחותה מאשר במדינות הצפוניות, ויחד איתה משתנה גם המשקל mg. מחזור תנודות המטוטלת:

³⁶ Newton, I. (1687/1999). *Op.cit.*, Book 1, Section II, Prop. IV, Theorem IV, Scholium.

$$T = 2\pi \sqrt{L/g}$$

משתנה גם כן (בשל השינוי ב-g) וגדל בקו המשווה. מכל מקום, המסגרת הניוטונית שלטה בפיסיקה, וההתייחסות לתופעות שהוזכרו הייתה רק לצורך תיקונים למען יעדים מעשיים, ולא היה בכך כדי לשנות את התפיסה הבסיסית.

המשקל המשיך להיות מזוהה על דעת הכול ככוח הכבידה. לאחר תגליתו של לבואזיה על שימור המשקל בתגובות כימיות, נעשה מושג זה חשוב עוד יותר. המושג 'משקל אטומי' (אם כי במשמעות של מסה, אך האם זה חשוב כשהבדל הוא גורם מספרי?) הפך מהותי בידע הכימי, והיה לו תפקיד מרכזי בארגון הידע החדש, בהתאם למסגרת התפיסתית של המבנה האטומי של החומר.³⁷

השינויים החלו במאה ה-19 עם הקרע בין התיאוריה האלקטרומגנטית ובין המכאניקה, אך החזון הכללי של תפיסה של עולם אחד - ובהתאם תפיסה אחת נכונה - נשמר. רק בסופה של המאה ה-19 הפיזיקאים הטילו ספק בבסיס הרעיוני של מסגרת העבודה הניוטונית. האם היא מספיק מוצדקת ומבוססת על הניסוי? ארנסט מאך³⁸ היה בין הראשונים שתבעו בסיס אמפירי עבור כל מושג פיזיקאלי.

הבסיס האמפירי למשקל הוא שקילה באמצעות איזון או באמצעות קפיץ מכויל. אם הגוף נתמך או תלוי, אנו יכולים לדמיין אותו נשקל, אבל אם הוא נופל - האם המשקל מושפע מכך? איך אנו יכולים לשקול גוף בנפילה חופשית? מכל מקום, כל השאלות האלה לא שינו דבר לגבי תפיסת המושג משקל. כל עוד נשמרה מסגרת החשיבה הישנה של צופה אמיתי יחיד, כל הסטיות בשקילה, לרבות נפילה, היו ניתנות להסבר במסגרת החשיבה הניוטונית והותאמו לצרכים מעשיים. כל זה השתנה כאשר הפיזיקה נכנסה לתקופת בנייה מחדש במהלך המהפכה המדעית החדשה.

שאלות למחשבה:

1. איך הראה ניוטון כי כוח הכבידה הוא פרופורציונאלי לכמות החומר (מסה אינרציאלית)?
2. כיצד פיצל ניוטון את מושג המשקל של ימי הביניים?
3. נסו לאפיין את מושג המשקל של ניוטון. באיזה מובן ננטש מושג זה בהמשך ההיסטוריה?
4. מדוע ניוטון לא היה מרוצה מהבנתו את הכבידה?
5. לפי תפיסתו של אויילר, כיצד מתבטא המשקל במציאות?
6. מהו מנגנון הכבידה שאויילר דמיין לעצמו?
7. הויגנס הראה שהכבידה (כובד) זהה לכוח הצנטריפוגאלי. באיזו דרך בחר על מנת להראות זאת?

³⁷ Merz, J. T. (1904/1965). *A History of European Scientific Thought in the Nineteen Century*. New York: Dover. Vol. I, p. 395.

³⁸ Mach, E. (1893/1989). *The Science of Mechanics*. La Salle, Illinois: Open Court Classics.

8. הויגנס היה הראשון שהתייחס לתיאור המצב מנקודת מבט של הצופה המסתובב. מדוע לדעתכם ננטשה גישה זו עד הפיזיקה של המאה העשרים?

III. המשקל בפיזיקה המודרנית של המאה העשרים

איינשטיין: עיקרון השקילות



אלברט איינשטיין

השינוי הגדול חל בתחילת המאה ה-20, אז גילו הפיזיקאים את התפקיד המיוחד מאוד של הצופה בפיזיקה. בשנת 1905, אלברט איינשטיין³⁹ היה הראשון ששם את הצופה ההתמדי במרכז התיאוריה הפיזיקאלית, ותבע כי החוקים הפיזיקאליים והתיאורים של תופעות הטבע יהיו זהים עבור כל צופה אינרציאלי. הרעיון של תורת היחסות המיוחדת היה יפה מאוד, אך מעמדו המיוחד של הצופה ההתמדי נראה לאיינשטיין מוזר. שאיפתו להשיג את תיאור הטבע עבור כל צופה הביאה אותו אל ההצלחה הגדולה ב-1916. בתורת היחסות הכללית נכללו צופים שונים התמדיים ולא התמדיים (אינרציאליים ולא אינרציאליים). האיחוד הגדול הושג בשל

עצם רעיון חדש. איינשטיין הגיע למסקנה, שהויגנס כבר עסק בה: כוחות התמדה (אינרציאליים) זהים לכוחות הכבידה. לכן, את תיאור הטבע על ידי צופה לא התמדי (מאיץ), ניתן לצמצם לתיאור על ידי צופה התמדי יחד עם הכבידה המתאימה⁴⁰. רעיון זה נוסח מעיקרון השקילות, אותו יכול היה לומר הצופה של הויגנס שנמצא על הגלגל המסתובב⁴¹:

אין ניסוי שהצופים יכולים לבצע כדי להבחין אם התאוצה נובעת בגלל כוח כבידה או בגלל שמסגרת ההתייחסות שלהם מאיצה.

ברור, כי לעיקרון השקילות של איינשטיין היו חייבות להיות השלכות מהותיות על מושג המשקל. לפני שנדון בהן, נשחזר את הדרך בה הגיע איינשטיין לעיקרון זה.

איינשטיין ביצע ניסוי מחשבתי, הידוע בכינוי ניסוי המעלית המואצת (איור 4). ניסוי זה יכול לשמש נקודת מפתח לבנייתנו את הגדרת המשקל. רייכנבאך⁴² כתב⁴³:

תאר לעצמך קופסה בגודל של חדר, שבו פיסיקאי תולה קפיץ ועליו משקולת. לקופסה אין חלונות והיא מונחת על הקרקע. נניח שהקופסה נמשכת על ידי חבל

³⁹ Albert Einstein (1879 – 1955), the most famous scientist ever, who shaped the modern physics in the 20th century.

⁴⁰ Einstein, A. (1916/1923). *The Foundation of the General Theory of Relativity in the Principle of Relativity* (pp. 111-164). Dover, New York.

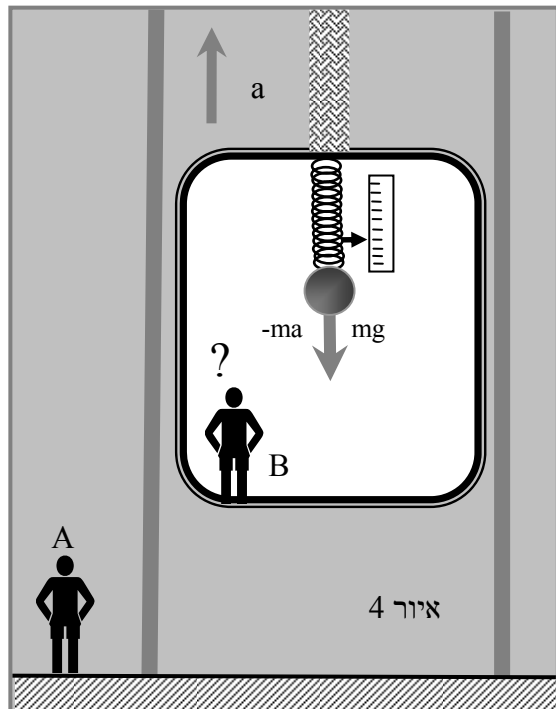
⁴¹ Giancoli, D. C. (1988). *Physics for Scientists and Engineers*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, p. 155.

⁴² Hans Reichenbach (1891-1953) was a prominent philosopher of science, the founder of the famous group Vienna Circle who developed the new philosophy of science – logical positivism.

⁴³ Reichenbach, H. (1927/1942). *From Copernicus to Einstein*. New York: Philosophical Library, pp. 86-89.

כלפי מעלה, כמו מעלית בכיוון חץ a . האם הפיזיקאי שבתוך הקופסה ירגיש בכך? כן בוודאי. ואכן, בגלל ההתמדה m [המשקולת] תישאר מעט מאחרי התנועה; אורך הקפיץ יגדל מעט, וזה ילווה בגידול המתח שלו. כך התנועה המואצת תתבטא בהתארכות הקפיץ. נשים לב שאם התנועה הייתה במהירות קבועה, לא הייתה מתרחשת כלל התארכות של הקפיץ. זה נובע מעיקרון היחסות של גלילאו.

כעת, אומר איינשטיין, האם היה צורך שהפיזיקאי יסיק שהקופסה נעה? בהחלט לא. זה מכיוון שיש תרחיש אחר שיכול להסביר את התארכות הקפיץ. הגורם האחר שיכול היה לגרום לאותו אפקט הוא הכבידה. ואכן, אותה ההתארכות של הקפיץ הייתה מתרחשת אם היינו מניחים כי מסיבה מסוימת המסה של הארץ הייתה גדלה לפתע. המשיכה שלה הייתה פועלת על המשקל בכיוון של החץ g ומושכת אותו למטה. לכן, הפיזיקאי לא יכול היה להחליט מה בדיוק קרה לפי ההתארכות הנצפית של הקפיץ. הנקודה היא, כמו שאיינשטיין טען, שאין דרך אחרת להבחין בין שתי האפשרויות האלה. אף ניסוי בתוך הקופסה אינו יכול להבדיל בין משיכה כבידתית ובין תנועה מואצת ... שתי תופעות שונות לחלוטין, אינרציה וכבידה, ממוקמות כאן במקביל זו לצד זו, וכל אחת מהן מובילה לאותו אפקט, כלומר, להגדלת המתח של הקפיץ ...



שני צופים מתארים את המצב בו כדור תלוי על הקפיץ במעלית עולה בתאוצה a . צופה A מתאר את המצב על סמך חוקי התנועה של ניוטון וללא כוח צנטריפוגלי. צופה B, בתוך המעלית, מתאר את מצב של שיווי משקל וזקוק כוח התמדה $-ma$ (אם הוא מודע על תנועתו) או. מסיק על כבידה מוגברת.

ישנה דרך נוספת לבטא את משמעות התוצאה של איינשטיין. כפי שלמדנו מניוטון, כל שני גופים נמשכים זה לזה בכוחות הפרופורציונאליים למסות האינרציאליות שלהם. עקרונית, ניתן לצפות שהגופים יכולים למשוך אחד את השני ביחס ישר למסות הכבידה שלהם. לכן, אפשר לראות כי התוצאה של איינשטיין מציגה את השוויון בין המסה האינרציאלית והמסה הכבידתית.

$$m_i = m_g$$

בעקבות עובדה זו אנו יכולים לגזור את התוצאה המפורסמת שהתקבלה באופן אמפירי על ידי גלילאו לגבי נפילה חופשית של עצמים על הקרקע. אם נכתוב את משוואת התנועה עבור הגוף m_i הנופל בגלל משיכת הכבידה עם הגוף M_i , כשהמרחק בין מרכזי שני הגופים הוא r , נקבל:

$$m_i a = G \frac{m_g \cdot M_g}{r^2}$$

ואם המסה האינרציאלית שווה למסה הכבידתית - נקבל את תאוצת הנפילה:

$$m_i a = G \frac{m_g \cdot M_g}{r^2} \Rightarrow a = G \frac{M_g}{r^2}$$

המשמעות היא כי ללא קשר למסת הגופים בשדה הכבידה, הם נופלים באותה תאוצה (המסומנת בדרך כלל כ g). זהו ההסבר לחוק הנפילה האמפירי שטען גלילאו בתחילת המאה ה-17, אך השאיר אותו ללא כל בסיס תיאורטי. רייכנבאך כתב⁴⁴:

למרות שהשוויון בין מסת ההתמד למסה הכבדה [מסת הכבידה] היה ידוע זמן רב, בכל זאת איינשטיין היה האדם הראשון שזיהה את המשמעות של העובדה הבסיסית הזו. הוא הבין כי כאן טמונה הסיבה לכך שלא ניתן להבחין בין הכבידה לתנועה מואצת, ומדוע, לכן, הפיסיקאי בתיבה לא יכול לקבוע אם הוא נע כלפי מעלה בתנועה מואצת או ששדה הכבידה משפיע על תנועתו. לפיכך, איינשטיין קרא לשתי התפיסות תפיסות מקבילות וטען כי חיפוש אחר האמת המבחינה ביניהם הוא חסר משמעות.

הגדרה חדשה של המשקל

כפי שאנו רואים, הגילוי המחודש של הזהות בין המסה ההתמדית למסה הכבידתית מרמז על אי הוודאות בפירוש השקילה, במובן זה שתוצאת השקילה אינה יכולה להעיד על קיום כוח הכבידה. במצב זה, אין דרך אחרת אלא לשנות את הגדרת המשקל.



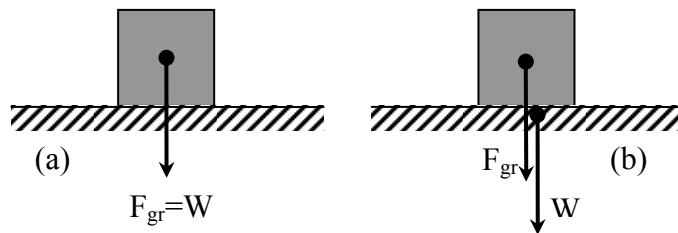
הנס רייכנבאך

בשנת 1928, מעט לאחר המבוא לעיקרון השקילות, רייכנבאך כתב⁴⁵:

מהו הבסיס של חוסר היכולת הזו להבחין? לדברי איינשטיין, הבסיס האמפירי שלה הוא השוויון בין מסת כבידה והמסה ההתמדית. צריך להוסיף הבחנה חדשה זו להבחנה המקובלת בין מסה ומשקל. ולכן יש שלושה מושגים: מסה התמדית, מסת הכבידה ומשקל.

ההבחנה של ניוטון בין המסה וכוח הכבידה כבר לא הספיקה. עכשיו היה צורך בעידון נוסף – על מנת להבחין בין כוח הכבידה ומשקל. לאחר הברית בת מאות השנים, הופרדו המושגים כוח המשיכה והמשקל זה מזה (איור 5). משקלו של גוף הוגדר כלהלן (הגדרה תיאורטית):

משקל הוא הכוח שהגוף מפעיל על תמיכתו במצב מנוחה כפי שנקבע על ידי צופה מסוים (במנוחה במערכת ייחוס תואמת).



⁴⁴ Reichenbach, H. (1927/1942). *Op.cit.*, p. 93.

⁴⁵ Reichenbach, H. (1928/1958). *The philosophy of space and time* (p. 223). New York: Dover.

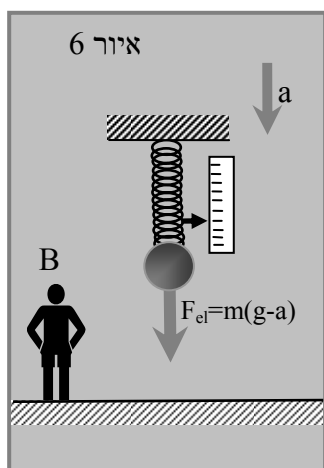
איור 5. (a) ההגדרה הישנה של משקל: משקל, W , הוא כוח המשיכה הפועל על הגוף, F_{gr} ; (b) הגדרה חדשה של משקל: משקל, W , הוא הכוח המופעל על התמיכה.

בהתאם להגדרה זו, משקל הוא הכוח נמדד על ידי קפיץ מכויל, בדיוק כמו שעשה הצופה בניסוי המחשבתי של איינשטיין. אנו מוסיפים גם את ההגדרה האופרציונאלית של משקל:

משקל הוא התוצאה של שקילה תקינה.

מהי תוצאה זו? כדי לענות על שאלה זו, נניח שהקפיץ המכויל נמצא במעבדה סגורה (איור 6). על הקפיץ תלוי גוף, הגורם להתארכות הקפיץ. מהי משמעות הקריאה על הקפיץ אם המעלית נעה? החישוב תקף עבור הצופה התמדי (אינרציאלי) B, הטוען כי הכוח האלסטי שנמדד שווה:

$$F_{\text{elastic}} = m(g - a)$$



ואכן, ללא האצה של המערכת, $a = 0$, ניתן לקבוע כי הכוח האלסטי הנמדד (תוצאת השקילה), שווה לכוח הכבידה mg :

$$F_{\text{elastic}} = mg$$

עם זאת, במקרים אחרים שבהם $a \neq 0$, תוצאת השקילה לא נמצאת בקנה אחד עם כוח הכבידה, ולכן, לא צריכה להיחשב כמדידה המעידה עליו.

במקרה המיוחד, כאשר $g = a$ (נפילה חופשית), נקבל את המצב של חוסר משקל בתוך התא. מצב זה יכול להיות מוסבר על ידי הצופה החיצוני (איור 4) כפועל יוצא של כוחות התמדה וכבידה הפועלים

אך מבטלים אחד את השני. הצופה הפנימי B אינו יכול לדעת מהו מקור המשקל שהוא או היא חווים. כיום, בהתאם לרעיונות המהותיים ביותר של הפיזיקה המודרנית, אנו יודעים כי עובדה זו משקפת את אי היכולת להבחין בין ההתמדה לכבידה.

גישה זו מאפשרת לפיזיקאים להכליל את מושג הכבידה במובן הישן, במשמעות של היות האובייקטים כבדים - אם בשל כוח הכבידה (mg) או בשל כוח התמדה ($-ma$). מקורו של המשקל חבוי בהגדרת המשקל (תוצאת שקילה והכוח הפועל על תמיכה), ומבוסס רק על הניסיון האישי של האדם אשר מבצע את השקילה.

הפרשנות שלנו את המצב שואפת להיות וודאית, ולכן אינה מגיעה מעבר לתופעות הקשורות לכובד ולמתח הפנימי שבתוך הגופים הנפרש לאורך כל גופם. מתח זה הנפרש בכיוון מסוים של גידול (בכיוון למעלה-למטה), הוא המכונן את מושג המשקל. לכן, גם מגפיים מגנטיים היכולים להדביק את הגוף אל משטח כלשהו, אינם יכולים להחליף את המשקל במצב של חוסר משקל - היות והגוף כולו נשאר חסר משקל.

המשקל במערכות מסתובבות

מקרה חשוב במיוחד הוא המשקל במערכות המסתובבות או מסתחררות ברציפות. כאלה הם המקרים של תא מסתובב המחובר באמצעות קורה אל ציר הסיבוב, וכמובן - כדור הארץ עצמו. הויגנס היה הראשון שדן בתופעות המתרחשות במערכות מסתובבות, והתייחס במחקרו לצופה בתוך מערכת כזו – גלגל מסתובב.

ניתוח מפורט הוביל את הויגנס למסקנה כי הצופה על הגלגל יתייחס למציאות של האובייקטים המסתובבים ללא הבחנה מהותית בין הכבידה לבין הכוח הצנטריפוגלי הפועל רדיאלית בכיוון כלפי חוץ. כיום אנו יודעים מה שהויגנס לא ידע: ששני הכוחות פרופורציוניים למסת הגוף. עקב כך, שני הכוחות תורמים למשקל (כבידה) של הגופים המסתובבים סביב ציר סיבוב כלשהו.

בשל העובדה שהכוח הצנטריפוגלי יכול להיות מווסת על ידי קצב הסיבוב, ניתן לכוונן את משקל הגופים במערכת מסתובבת. דבר זה חשוב במיוחד במקרים בהם נדרש לייצר משקל קבוע כשכוח הכבידה לא יכול לספק אותו. זהו המצב בלוויין פשוט - תחנת החלל הנמצאת במצב של חוסר משקל. בני אדם לא יכולים לשרוד במצב זה במשך זמן רב (יותר מאשר כמה חודשים). שינויים ביולוגיים בלתי הפיכים גורמים בסופו של דבר נזק חמור לתפקוד האורגניזם ברמה של תהליכים ביוכימיים, כתוצאה מכך מתדרדר המצב הבריאותי של האורגניזם - עד למוות. כאורגניזמים חיים, אנחנו חייבים משקל באופן מהותי. במצב של נפילה חופשית בשדה כבידה, הסיבוב יכול למנוע את חוסר המשקל ולעזור לנו ביצירת משקל. זהו רעיון חיוני עבור פרויקטים עתידיים בחלל.

שאלות למחשבה:

1. מהו רעיון פיצול מושג המשקל שהציע רייכנבאך? מה היה הרציונאל של פיצול זה?
2. מהו הגורם החיוני לתפקוד בני האדם: הכבידה או המשקל? הסבירו מדוע אתם חושבים כך?

סיכום

נוכל לסכם את המסע שלנו להיסטוריה בת אלפי השנים של המשקל: בהתחלה, רעיון המשקל שיקף את התפיסה של כובד וכמות החומר. עד ניוטון, המשקל הוסבר כתכונה הטבעה בגוף. אריסטו קישר זאת גם לכוונה או לנטייה הגלומה בגוף להגיע למקומו הטבעי בהתאם לסוג החומר המרכיב את הגוף.

ניוטון זיהה את המשיכה הכבידתית בין כל הגופים החומריים כגורם למשקל והוסיף כי היד התומכת בגוף חשה את משקלו. עם זאת, אוילר הדגיש כי הלחץ על התמיכה רק מיידע על קיום המשקל, המשקל עצמו איננו הלחץ, אלא הוא כוח הכבידה הגורם הלחץ.

משקל הפך למאפיין של זוג אובייקטים מסוים. כמות החומר אופיינה במושג שונה - מסה התמדית (אינרציאלית). ניוטון גילה כי המסה ההתמדית קובעת גם את משיכת הכבידה. בשל עובדה זו, מתעלמים לעתים קרובות (לא תמיד!) מההבדל בין מסה ומשקל בחיי היום יום.

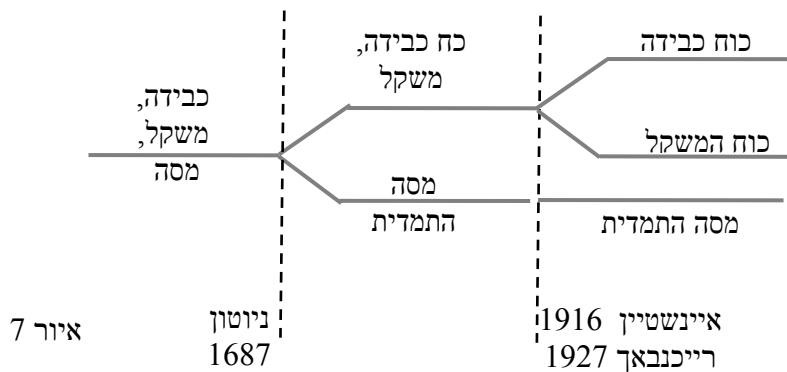
במהלך המאה ה-17 עד המאה ה-19, מושג המשקל שימש בעיקר בסביבה הארצית שבה אינטראקציה הכבידה החשובה הייתה רק זו שבין כדור הארץ לאובייקטים שעליו. במצב זה,

איבד המשקל את משמעותו כמאפיין משיכה זוגית של גופים. משקלו של גוף זוהה עם כוח המשיכה של כדור הארץ - המופעל על הגוף. ככזה, חזר המשקל להיות מאפיין של גוף מסוים, בדומה מאוד למשמעות שניתנה לו בתקופה שלפני ניוטון.

עם כניסתה של הפיזיקה המודרנית, התיאורים הפיזיקאליים של המציאות הורחבו לכל צופה (התמדי ולא התמדי) והמשקל איבד את התאמתו החד משמעית לכוח הכבידה. אנו מתייחסים לכוחות התמדה כתורמים כשרים לתוצאות השקילה. לכן, המשקל הוגדר כשווה לתוצאת השקילה או, באותו האופן, ככוח שהגוף מפעיל על התמיכה כשהוא נמצא במנוחה עבור צופה מסוים (מסגרת התייחסות).

חשוב לציין שהגדרת המשקל, כפי שהגדרנו באופן אופרציונאלי ובאופן תיאורטי, איננה תלויה בצופה: אין זה משנה אילו כוחות משמשים צופה מסוים להסביר את המשקל – תוצאות השקילה נותרות ללא שינוי. לעומת זאת, התשובה לשאלה "מהו הגורם למשקל?" – היא תלויה צופה: עיוות הקפיץ עשוי להצביע על כוח צנטריפוגלי עבור הצופה הלא-התמדי (לא אינרציאלי) המסתובב, או על כוח אלסטי צנטריפטלי - עבור הצופה ההתמדי (האינרציאלי) החיצוני.

נוכל לסכם את ההיסטוריה של מושג המשקל באיור המושגי הבא (איור 7):



* * *

רקע היסטורי ופילוסופי ואופיו של המדע



גיבור אגדתי – אטלאס המזיק את כדור הארץ ומנוע נפילתו עקב משקלו הרב

המשקל נכנס לראשונה אל המדע ההלני כמאפיין מהותי של גוף כלשהו, החל מאטומים עבור חלק מהאנשים וכלה ביסודות - עבור האחרים. המשקל אפיין את הכובד. במסגרת המושגית של יוון העתיקה, לווה רעיון המשקל ברעיון נגדי – קלות, הקלות של הגופים. רעיון זה הוסר כמושג, רק על ידי גלילאו שנימק זאת בעזרת ההיגיון: שני אובייקטים המחוברים יחד לא יהיו לעולם קלים יותר אלא תמיד כבדים יותר מאשר כל אחד מהם לחוד. בתוך תמונת העולם הכללית של אריסטו, משקל היה נטייתו של הגוף לרדת ולתפוס את מקומו הטבעי – מקום ייחודי עבור כל אובייקט.

החידוש במשקל של ניוטון - כוח - היה האופי האינטראקטיבי

שלו. משקל הופיע בזוגות של כוחות שווים בין כל שני גופים ואפיין את המשיכה ביניהם. בספרו *Principia* (היסודות המתמטיים של פילוסופיית הטבע), כתב ניוטון על גופים שמימיים הנמשכים אחד כלפי השני, כך שלמשקל הייתה משמעות רק עבור צמד גופים.⁴⁶

עם זאת, בהקשר של כדור הארץ, מכיוון שאינטראקציה הכבידה איננה נראית באופן מעשי בין גופים רגילים, המשקל נשאר מאפיין של גוף יחיד, לא זוג, והיה מזוהה עם הכוח הפועל על הגוף ומושך אותו לכיוון קרקע כדור הארץ. המשמעות של משקל ככוח הבא בזוגות ננטש בסביבה הרגילה של כדור הארץ, וניוטון עצמו דיבר על משקל במשמעות חדשה, ככוח הלוחץ במגע, הנתמך על ידי תמיכה⁴⁷. בהקשר השמימי - איש לא השתמש ברעיון המשקל שם, ודי היה ברעיון של כוח הכבידה.

לאחר שלא הצליחו לגלות מהו המנגנון המפעיל את הכבידה ממרחק דרך החלל הריק, החליט ניוטון כי על פילוסופיה הטבע לתאר את הכבידה ללא השערות לגבי מקורה. היה זה שינוי אפיסטמולוגי, וגם שינוי בסדר היום המדעי שתבע דקארט, שכן, דקארט הדגיש כי המטרה האמיתית של המדע היא הבהרת המנגנון של התופעות. גישתו של ניוטון לעומת זאת, הייתה כי יש להימנע בכל האמצעים מכל השערה שלא מבוססת על ראיות ישירות. השקפה זו באה לידי ביטוי באמירה המפורסמת שלו: אינני בודה השערות (בלטינית: *Hypotheses non fingo*), אשר ביססה את תוכנית הפילוסופיה החדשה של המדע המודרני⁴⁸:

טרם הצלחתי לגלות מתוך התופעות את הסיבה למאפיינים אלה של הכובד, ואינני בודה השערות. מכיוון שכל מה שלא ניתן להסיק מן התופעות חייב להיקרא השערה; והשערות, אם הן מטאפיזיות או פיזיקאליות, או מבוססות על איכויות נסתרות, או מכאניות, אין להן מקום בפילוסופיה הניסויית. בפילוסופיה זו הנחות מסוימות נגזרות מן התופעות, ואחר כך, הן מתקבלות באופן כללי באמצעות אינדוקציה.

במאה ה-20, הביע שרדינגר רעיון דומה באומרו שתמיד הרגיש כי המשוואה שלו חכמה יותר ממנו. למרות זאת, נראה כי רעיון זה מעולם לא גרם לאנשים לעצור את סקרנותם. הם המשיכו בחקירתם ובהשערותיהם לגבי המנגנון הלא ידוע של חוקים וכללים. כפי שידוע לנו, תופעת הכבידה הפועלת ממרחק שנעזבה ללא הסבר, הוסברה במאה ה-20 בתיאורית היחסות הכללית של איינשטיין.

נקודה אפיסטמולוגית (מהותית) חשובה נוספת המתייחסת למשקל, היא שניוטון מעולם לא שקל אפשרות של ריבוי צופים, וגם לא את הדרך בה יצליחו לתאר את המציאות הפיזיקאלית. זה היה פשוט לא רלוונטי: ניוטון הגה את היקום כמשהו שניתן לצופה ייחודי שכאילו עף מעל היקום. יקום זה כבש את החלל המוחלט והתנהל בזמן מוחלט. המושגים של מרחב וזמן היו מובנים מאליהם, ומעבר לכל צורך בהגדרה⁴⁹.

⁴⁶ e.g. *ibid.*: Book III, Proposition 6, page 806.

⁴⁷ e.g. *ibid.*: Book II, Proposition 20, Theorem 15, page 689.

⁴⁸ *ibid.* General Scholium, page 943.

⁴⁹ *ibid.*: Definitions, Scholium, pp. 408-415

למרות שניוטון השתמש במונחים מנוחה אמיתית ויחסית, כמו גם תנועה אמיתית ויחסית, הבנתו את המושגים האלה הייתה ייחודית. ניוטון הבין את התנועה האמיתית ואת המנוחה האמיתית כפי שהם נתפסים על ידי הצופה הייחודי, העל-טבעי של היקום, היחיד שיכול לתפוש ולהבין את היקום בדיוק כפי שהוא... ובאומרו: 'תנועה ומנוחה יחסיים או נראים' - התכוון ניוטון למצבים או לכמויות כפי שהם נתפסים על ידי כל שאר הצופים האנושיים הרגילים, שבאופן בלתי נמנע עושים טעויות בתפיסתם ובמדידותיהם⁵⁰:

אלא שאני חייב לציין כי האנשים הרגילים מתייחסים לכמויות אלה כאל רעיונות לא אחרים מאשר ההתייחסות שלהם לגופים מוחשיים. ומכאן מתעוררות דעות קדומות מסוימות, וכדי להסירן כדאי להקפיד ולהפריד בין המוחלט והיחסי, האמיתי והנראה לעין, המתמטי והרגיל.

בהקשר לזמן מוחלט ויחסי, הוא כתב⁵¹:

אבל אנו יכולים להבחין בין מנוחה ותנועה, מוחלטת ויחסית, לפי התכונות שלהן, סיבות ותוצאות. התכונה של המנוחה היא, שגופים הנחים באמת, הם נחים אחד ביחס לשני. ולכן זה אפשרי, שבאזורים מרוחקים של הכוכבים הקבועים, או אולי הרבה מעבר להם, ייתכנו כמה גופים במנוחה מוחלטת; אבל אין אפשרות לדעת, מתוך מיקום הגופים זה ביחס לזה בסביבה שלנו, אם אחד מהם שומר על אותו המיקום ביחס לגוף המרוחק; נובע מכך שמנוחה מוחלטת לא ניתנת לגילוי מתוך המיקום של הגופים בסביבה שלנו... הזמן המוחלט באסטרונומיה נבדל מ[הזמן] היחסי על ידי משוואה או תיקון של הזמן הנראה לעין.

במקרה של סיבוב, ניוטון הבדיל בין תנועה יחסית ותנועה מוחלטת באמצעות כוחות המופיעים רק בתנועה אמיתית⁵². אך גם אז, ניוטון לא התייחס למשהו שיכול להזכיר מסגרות התייחסות שונות.

קויירה [Koyre] סיכם פילוסופיה זו של ניוטון באומרו⁵³:

בעולם הניוטוני ובמדע הניוטוני, אין זה האדם, אלא אלוהים הוא המודד את הדברים.

באופן דומה במקצת, הרעיון של משקל-אמיתי היה שמור לכוח הכבידה. לעומתו, המשקל הנראה - המונח המתאים בפילוסופיה של ניוטון - ייצג את תוצאות מדידת המשקל בנוכחות גורמים מגבילים, העלולים להטעות את איש המעשה, אבל לא את הפילוסוף. ניוטון נתן דוגמה לגורם מטעה כזה: כוח הציפה. עבורו, המשקל-הנראה, בדומה לזמן יחסי, עלול לגרום לאי הבנה. ניוטון תיאר כך את המקרה של גוף השקוע בתוך נוזל^{54,55}:

⁵⁰ *ibid.*

⁵¹ *ibid.*

⁵² Newton exemplified by his famous thought experiment of a rotating bucket of water, *ibid.*: pp. 412-413.

⁵³ Koyre, A. (1956). Influence of Philosophic Trends on the Formulation of Scientific Theories. In: P. G. Frank (ed.), *The Validation of Scientific Theories*, New York: Collier, p. 183

⁵⁴ Newton, I. (1687/1999). *Op. cit.* Book II, Proposition 20, Theorem 15, Cor. VI.

אך הדברים האלה (השקועים במים) אשר לא יורדים על ידי הכרעת הנוזל, ולא עולים ידי כניעתם לנוזל המכריע, על אף המשקל האמיתי שלהם הם מגדילים את המשקל של המערכת כולה, עדיין באופן יחסי, וכמו שבדרך כלל מתפרש, שהם נמשכים פחות כלפי מטה כשהם במים. (ההדגשה של המחבר).

כובד הגופים בנוזלים הוא לכן כפול: האחד אמיתי ומוחלט; השני הנראה, הרגיל, והיחסי. כוח כבידה מוחלט הוא כל הכוח שבו הגוף נוטה כלפי מטה; כבידה יחסית או רגילה היא יתרת הכבידה שבה הגוף נוטה כלפי מטה יותר מהנוזל שמסביבו. ... הדברים האלה שהם באוויר ואינם נופלים, הם בדרך כלל נראים כלא כבדים. אלה שכן נופלים נחשבים לכבדים, שכן הם לא נישאים על ידי משקל האוויר. המשקל הרגיל אינו אלא יתרת המשקל האמיתי מעל משקל האוויר. (ההדגשה של המחבר).

הגדרה נומינלית (תיאורטית)

שאלת היחסים בין הידע התיאורטי והידע האופרציונאלי (ומכאן ההגדרה) של משקל, מעולם לא התעוררה במדע הקלאסי. היה זה לא לפני סוף המאה ה-19 כשהמגמה החדשה בפילוסופיה של המדע - פוזיטיביזם- הראתה רגישות מיוחדת לקיום בסיס אמפירי עבור כל מושג תיאורטי בידע הפיזיקאלי. המטרה הייתה לצמצם את ההצהרות השרירותיות (המטאפיזיות, כפי שכונו), במיוחד בבסיס המדע. פיזיקאים היו צריכים לדאוג להשמיט את הטענות שלא נתמכו ישירות על ידי הליך אמפירי שיכול לשמש עבור הגדרות המושג.⁵⁶ בדרך זו נקבעה הפרדה מוחלטת בין ההגדרות המבוססות על תיאוריה ואלה המבוססות באופן ניסיוני (אמפירי). ההגדרה אשר מציגה את המושג ומבוססת על הידע התיאורטי נקראה - נומינלית (נומוס- *nomos* ביוונית פירושו החוק). במקרה של משקל, ניוטון היה החלוץ של ההגדרה הנומינאלית הגרביטציונית של משקל, לפיה:

משקל הוא כוח הכבידה (הכוח הגרביטציוני) הפועל על הגוף.

כפי שכבר הוזכר, כוח הגרביטציה (כוח הכבידה) והמשקל הגרביטציוני, הוצגו שניהם על ידי ניוטון בהקשר למשיכה הגרביטציונית בין כל זוג גופים חומרניים. מאז ועד היום, בספרי לימוד רבים, כוח הכבידה לעבר כדור הארץ הפועל על גוף קטן ליד כדור הארץ נחשב למשקל של גוף זה.

הצגת עקרון השקילות והצופה הלא-התמדי במאה ה-20 הביאו להפרכת ההגדרה הנומינלית הגרביטציונית ולהחלפתה על ידי ההגדרה הנומינלית אלסטית, כפי שצוטט לעיל:

משקל הוא הכוח שהגוף מפעיל על תמיכתו במצב מנוחה כפי שנקבע על ידי צופה מסוים במערכת ייחוס תואמת.

⁵⁵ *ibid*: Book II, Proposition 20, Theorem 15, Cor. VI. p. 691.

⁵⁶ In 1893, in his renowned *The Science of Mechanics*, Mach exemplified his critique by his new, operational definition of inertial mass. Mach (1893/1989), *op. cit.*, pp. 213-213.

הגדרה אופרציונאלית

לחילופין, הפילוסופים של הזרם הפוזיטיביסטי⁵⁷ התעקשו על הגדרות אופרציונאליות של מושגים פיזיקאליים [אופרציה- פעולה]. דרישה זו גרמה להיווצרות הזרם בפילוסופיה של הפיסיקה הידוע כ'אופרציונאליזם'. גישה זו דורשת שבכל הגדרה של מושג פיזיקאלי יצוין במפורש הליך המדידה, שתוצאתו אמורה להיות המושג המוגדר. לכן, במקרה של משקל, ההגדרה האופרציונאלית היא:

משקלו של גוף הוא תוצאת שקילתו.

מכיוון שהפעולה עצמה (כמו שקילה) אינה מוגדרת כאן, ניתן להציע הליכים רבים. יש להסיר עמימות מושגית זו, כי הפיזיקה דורשת התייחסות ברורה לסוג המכשירים בו משתמשים. במקרה של משקל, אפשר כמובן להציע איזון בעזרת מאזניים או שימוש בקפיץ מכויל. יש צורך איפה, להציג פעולה תקינה:



פרסי ברידג'מן

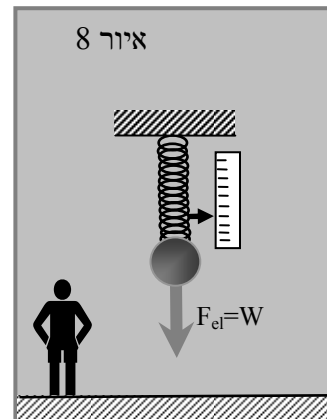
משקל גוף הוא תוצאה של פעולת שקילה תקינה.

הגדרה כזו תואמת את הדרישות של ברידג'מן⁵⁸, ויש לכוונתה ההגדרה האופרציונאלית, בניגוד להגדרה הנומינלית (התיאורטית) שהוצגה קודם.

ניתן לקבוע הגדרה סטנדרטית באופן מפורש:

משקל הגוף נקבע על ידי שקילת הגוף, באמצעות קפיץ מכויל (מאזני קפיץ) במנוחה.

שימוש בקפיץ מכויל (מד כוח) (איור 8) מציג היבט חשוב של שקילה תקינה. המאזניים משווים את הכוחות ולא מעריכים את גודלם, ולכן בעזרת המאזניים נוח יותר להסיק על המסה של גוף בהשוואה לתקן כלשהו. המאזניים גם אינם רגישים לשינויי משקל עקב שינוי קו הרוחב הגיאוגרפי.



הקפיץ הספיראלי (הסלילי) המתעוות, מספק תמיכה לגוף הנשקל ומונע ממנו ליפול. כפי שתואר על ידי חוק האלסטיות של הוק, טווח התארכות הקפיץ נמצא ביחס ישר לפעולת הכוח, כך הקפיץ המכויל משמש כלי נוח למדידת משקל.

חשוב לציין כי הפילוסופיה המודרנית של המדע דורשת שתי הגדרות עבור כל מושג פיזיקאלי: הגדרה נומינלית (תיאורטית) והגדרה אופרציונאלית⁵⁹. שתי ההגדרות משלימות זו את זו ביצירת המשמעות של המושג הפיזיקאלי.

⁵⁷ e.g. Mach, E. (1893/1989), op. cit.

⁵⁸ Percy Williams Bridgman (1882 – 1961). The Nobel Prize in Physics 1946 for his work on the physics of high pressures. He explored the scientific method and established the trend of operationalism in the philosophy of science. Bridgman, P. W. (1952), *The Nature of Some of Physical Concepts*, Philosophical Library, New York.

⁵⁹ e.g. Margenau, H. (1950). *The Nature of physical Reality* (Ch. 12, pp. 220-244). McGraw-Hill, New York.

שאלות למחשבה

1. מה היה אמיתי ומה היה יחסי (נראה) עבור ניוטון? באיזה מובן רעיונות אלו שונים מתפיסתנו הרגילה אותם?
2. מהם משקל אמיתי ומשקל נראה? איך ניתן להגדיר מושגים אלה?
3. נסו לתת הגדרה אופרציונאלית למשקל אמיתי.
4. מדוע לדעתכם חשוב לספק הגדרה אופרציונאלית למושגים פיזיקאליים?
5. מדוע לדעתכם חשוב לקבוע פעולה סטנדרטית (תקינה) למדידת משקל (שקילה תקינה)? תנו דוגמה לחשיבות פעולה זו.
6. מדוע לדעתכם שקילה תקינה כוללת קפיץ מכויל ולא איזון מאזניים?
7. מדוע לדעתכם יש צורך לספק זוג הגדרות לכל מושג פיזיקאלי? הסבירו באמצעות השימוש המקרה של מושג המשקל.

* * *

קבוצת יעד, נגיעה לתכנית הלימודים ויתרונות זידקטיים

מורים לפיזיקה, כאלה המלמדים בפועל או פרחי הוראה, הם קבוצת היעד למסע זה אל ההיסטוריה. ההיכרות עם תכנים אלה אינה צפויה, שכן בדרך כלל אין לכך התייחסות בתוכניות ההכשרה הרגילות. משקל מוגדר בדרך כלל באמצעות ההגדרה הגרביטציונית, כפי שהיה נהוג לפני המאה ה-20, והעיסוק בכוחות התמדה וריבוי צופים – גם הם אינם נושאים הכלולים בתכנית הלימודים הרגילה של בית הספר התיכון⁶⁰.

יחד עם זאת, נושא המשקל הוא רלוונטי עבור הפיזיקה והוראת המדעים בבתי הספר. מושג המשקל נכלל בכל תכניות הלימודים בפיסיקה/מדע בבתי הספר ובכל רמות ההוראה. יש צורך להורות את המושג כך שתהיה התאמה ועקביות מן הגן ועד התיכון (K-12 - הרעיון של פרויקט 2061 בארה"ב); אבל כיום:

- תוכניות לימודים של בית הספר היסודי (גיל 6-12) כוללות בדרך כלל את ההגדרה האופרציונאלית של משקל, לפיה משקל הוא מה שמתקבל על ידי שקילת הגוף.
- תכנית הלימודים של חטיבות הביניים (גיל 12-15) כוללות בדרך כלל את ההגדרה הנומינאלית הגרביטציונית של משקל, לפיה משקל הוא הכוח הגרביטציוני הפועל על הגוף. הגדרה זו מעלה בעיה של חוסר עקביות הבולטת במיוחד במצבים של חוסר משקל.
- תכנית הלימודים של בית הספר התיכון (גיל 15-18) ממשיכה בדרך כלל עם ההגדרה הנומינאלית הגרביטציונית של המשקל. כדי למנוע את חוסר העקביות עם המשמעות

⁶⁰ זהו המצב בארץ.

האופרציונאלית של משקל, מגדירים את תוצאות השקילה כמשקל נראה, והכוח הגרביטציוני הפועל על הגוף מוגדר כמשקל אמיתי.

מספר מחקרים דווחו על רמת הצלחה נמוכה של מהלך זה להוראת המשקל, וגם לתלמידים טובים מאוד יש תפיסות מוטעות רבות ביחס להבחנה בין תוצאות שקילה וכוח הכבידה⁶¹.

הדרך המוצעת להוראת משקל באמצעות מסע היסטורי לא עוצרת בהבנה הניוטונית של משקל (המאות ה-17-19), אלא משדרגת אותה להגדרה האופרציונאלית של משקל, ומתאימה אותה להבנה חדשה של שוויון בין כוחות התמדה וכבידה, הבנה שהושגה בתחילת המאה ה-20. מסע זה פורש עידון מושגי הדרגתי של הגדרת המשקל. המורה יכול להשתמש בחלקים של מסע זה בשלבים שונים של הוראת המדע המבוצעים לאורך שנות הלימוד – מרמת בית הספר היסודי ועד לרמה הגבוהה של הלימוד.

יש כמה רמות בלימוד נושא המשקל. רמת ההוראה הראשונה היא "הרמה של הדברים" – בה המשקל מושייך לתכונה הגלומה בגופים ומהווה סכמה אינטואיטיבית, לפיה הלומד מייחס כובד לגופים המוכרים⁶². לפי סכמה זו המשקל יכול להיות קשור ישירות לתוצאת המדידה המסופקת באמצעות קפיץ מכויל.

בדמת ההוראה השנייה, מושג המשקל קשור למושגים פיזיקאליים אחרים. ברמה זו המורה יכול להגדיר משקל ככוח שמפעיל גוף על תמיכתו (או תלוי על חוט). הגדרה זו מסבירה את המשקל באמצעות מושגים אחרים, כמו הלחץ על התמיכה או המתח הנוצר בחוט – אשר גורמים לתגובת מכשיר המדידה. הידע של המשקל הופך תיאורטי, וההגדרה – תיאורטית או נומינאלית. במקביל, אפשר להגדיר את המשקל באופן אופרציונאלי – כתוצאת השקילה. בדרך זו אנו מספקים את זוג ההגדרות של המושג: התיאורטית והאופרציונאלית.

כוח הכבידה (הגילוי של ניוטון) מוזכר כאן כגורם למשקל של כל הגופים בסביבה. כאן המקום להזכיר את השינויים במדידת המשקל כתלות במיקום הגוף על פני כדור הארץ (קו רוחב גיאוגרפי). אפשר להסביר שינויים אלה באופן איכותי בלבד – כתוצאה מפחיסות כדור הארץ וסיבובו סביב צירו. כך יש הכנה לשלב הבא של ההוראה: משקל השונה בשיעורו מכוח הכבידה.

הדמה השלישית של ההוראה מעדנת את מושג המשקל בהצביעה על העובדה שקיום המשקל יכול לנבוע מכוחות כבידה או כוחות התמדה. שלב זה כרוך בהצגת כוחות ההתמדה ולכן, בקיום האפשרות של צופה לא התמדי (לא אינרציאלי). כאן חשוב להדגיש כי ההגדרה של משקל, כפי שהוצגה ברמה הראשונה (האופרציונאלית) וברמה השנייה (התיאורטית), איננה תלויה בצופה: תוצאות השקילה נותרות זהות, ללא קשר לכוחות שבהם הצופה המסוים משתמש כדי להסביר אותן. השאלה "מהי הסיבה למשקל?" היא העשויה להיות תלויה בצופה.

היתרון הדידקטי של גישת ההוראה שהוצגה כאן הוא המבוא הטבעי לרעיון של צופים הלא-התמדיים. בהתחשב במצבים שונים הקשורים עם שינויי משקל (האצת כלי רכב, לוויינים),

⁶¹ e.g. Ruggiero et al. (1985), Galili (1993), Galili & Kaplan (1996), Galili & Lehavi (2003), Gurel & Acar (2003), Gönen (2008).

⁶² e.g. Piaget, J. (1972). *The Child's Conception of Physical Causality*. Totowa Adams Littlefield, New Jersey; Galili & Bar (1997), Children's operational knowledge about weight, *International Journal of Science Education*, 19 (3), 317-340.

תלמידים בדרך כלל מזהים עצמם עם הצופה בתוך המערכת המאיצה. ההצגה של צופה לא התמדי נותנת לגיטימציה לנקודת מבט זו, לדיון ולהתייחסות אינטואיטיבית הקשורה לצופים כאלה. כך מוסר המתח הלא נחוץ ומוגברת הלמידה המשמעותית.

יתרון דידקטי נוסף מצוי בבחינת המשקל במקרה של תחנת חלל מסתובבת. במקרה זה, המשקל נגרם על ידי כוח צנטריפוגלי והוא אינו תלוי כלל בכוח המשיכה.⁶³

הדרך המוצעת כאן ללימוד מושג המשקל מציגה את הדיון בהקשר המדעי של ההתפתחות ההיסטורית של תופעות, דיון שיכול להיות מוכרע על סמך שימוש מהותי בפילוסופיה של המדע. גישה זו מציגה לתלמידים את התפקיד החשוב של ההגדרות האופרציונאליות של המושגים הפיזיקאליים. הפילוסופיה נכנסת לפעילות של הפיזיקה, דבר המהווה יתרון דידקטי חשוב של המסע ההיסטוריה של הגדרת המשקל.

* * *

פעילויות, שיטות וסביבת הלמידה

1. הוראה של משקל יכולה להיות מחוזקת על ידי הגברת המודעות לחשיבות של מושג זה על חיינו. זה יכול להוות נושא לדיון מעניין היות ולמשקל יש תפקיד מרכזי בחיינו, הקשור בדרך בה אנו אוכלים ושותים, נעים ועוד. החיים אינם אפשריים ללא משקל, וחוסר משקל יביא למותנו בשל עיכוב התהליכים החיוניים המתרחשים באורגניזם האנושי בהעדר משקל.

2. כדי לאמוד עד כמה מטעה ההגדרה הגרביטציונית של משקל, מומלץ לדון בקטע המתאר את מצב חוסר המשקל כפי שמשווה בדמיונו ז'ול וורן (1828-1905), סופר המדע הבדיוני המפורסם של

המאה ה-19.



רגע של חוסר משקל בדרך אל הירח לפי ז'ול וורן

בספרו מהארץ אל הירח (1865), הסביר וורן במפורט את הבנתו שהתבססה על אימוץ פשוט של התיאוריה של ניוטון: משקל הוא כוח המשיכה. הסופר המשכיל, שמעולם לא ראה כל תיעוד של טיסות חלל, הסביר כי הושג מצב של חוסר משקל כאשר החללית הגיעה לנקודה שבה השתוו המשיכה לכדור הארץ



רגע של חוסר משקל בדרך אל הירח לפי ז'ול וורן

והמשיכה אל הירח.

צריך לעודד את התלמידים לדון בהסבר

שגוי זה שממנו משתמע מצב של חוסר משקל רק לרגע. דיון כזה יכול להועיל מאוד בהתמודדות עם תפיסות שגויות דומות המוחזקות על ידי תלמידים בני זמננו, כפי שתועד במספר מחקרים.⁶⁴

⁶³ For the rotating space-station and space-ships one may use clips from Stanly Kubrick's celebrated movie *2001: A Space Odyssey*

⁶⁴ e.g. Galili & Kaplan (1996).

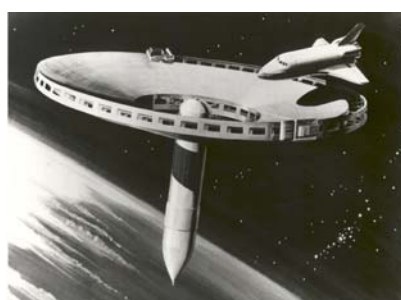
3. ראוי להקדיש מספר פגישות לפעילות מיוחדת בנושא של תחנת חלל מסתובבת.



ראשית, כדאי לדון בהרמן פוטוצ'ניק⁶⁵ (Nordung) (1892-1929), מהנדס טילים סלובני, חלוץ טייסי החלל, שהיה הראשון שתיאר תחנת חלל מסתובבת בספרו *הבעיה של מסעות בחלל היקום*⁶⁶. גלגל המגורים שתיאר היה בעל צורה של גליל טבעתי גדול מאוד והושג בו משקל קבוע על ידי סיבוב של תחנת החלל.



פרויקט ראשון של תחנת חלל מסתובבת



במוקד הפעילות אפשר לעסוק במהנדס הטיילים המפורסם ורנר פון בראון. במאס 1952, פרסם פון בראון מאמר במגזין הפופולארי *Kolers* בשם: *דרך הגבול האחרון*. במאמר תיאר תחנת חלל ענקית מסתובבת וכן מגוון רחב של טכניקות חלל, כולל כלי רכב שיגור לשימוש חוזר (מעבורת החלל של היום), ומושבת חלל של אסטרונאוטים המשמשת גם לחקר החלל ולמחקר.

פרויקט של ורנר פון בראון של תחנת חלל מסתובבת שהיא הלויין של כדור הארץ

בדיון זה ניתן להרחיב על נושא שאינו קשור ישירות למשקל: ורנר פון בראון, המומחה המעולה שהוביל את הפרויקט הטכני הגדול ביותר בהיסטוריה של התרבות

האנושית, פרויקט אפולו שהציב אדם על הירח - היה אדם בעל אישיות בעייתית. ורנר פון בראון היה קצין אס אס בכיר בגרמניה הנאצית, אחראי באופן ישיר על ההפגזה של אנגליה על ידי טילי V-2, ואחראי ישיר על ייצור טילים אלה במפעלים בהם הועסקו עבדים (אסירים הכלואים במחנות ריכוז). רק עשר שנים לאחר מכן הוא כבר הוביל את תוכנית החלל האמריקאית.



ורנר פון בראון

שאלות רבות עשויות להתעורר בהקשר זה: כיצד יכול מדען מכובד לשתף פעולה על משטרים אנטי-דמוקראטיים שטניים? האם אמורה עובדה זו להשפיע על לימוד ההישגים הגדולים של מדענים כאלה? כאן אפשר להרחיב את הדיון גם אל הייזנברג ופרויקט האטום שלו. המשחק הידוע *קופנהגן* יכול לשמש להרחבת פעילות זו לאירוע תרבותי עשיר בחיי בית הספר.

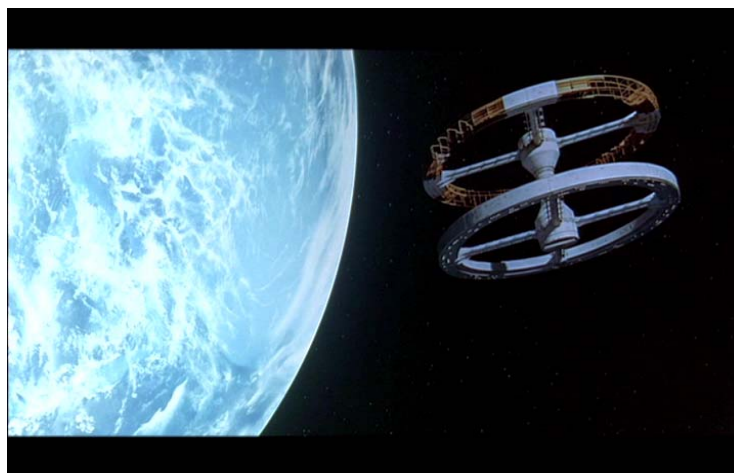
4. ההיבטים המהותיים של מושג המשקל מתוארים בפירוט ביצירות העוסקות במדע בדיוני: סרטים וספרים. למשל, הבעיה של יצירת משקל לאסטרונאוטים בטיסות ארוכות מרחק - נפתרת באמצעות שימוש בספינות חלל מסתובבות.

⁶⁵ <http://www.astronautix.com/astros/noordung.htm>

⁶⁶ Noordung, H. (1929). *Das Problem der Befahrung des Weltraums*. Schmidt & Co., Berlin.

הדוגמה המרשימה ביותר של יצירות אמנות כאלה הוא סרט המדע הבדיוני הידוע: *אודיסאה בחלל 2001* שנעשה על ידי סטנלי קובריק [Stanley Kubrick] בשנת 1968, בעקבות הרומן של ארתור ס. קלארק [Arthur Clarke]. בסרט, מתוארת באופן סגוני תחנת החלל המסתובבת: *גלגל ענק* המיצג את האב טיפוס של תחנות החלל העתידיות שיספקו משקל לתושביהם.

בסרט, החללית משוגרת לכוכב צדק (יופיטר), במשימה מיוחדת ארוכת טווח, ומספקת משקל לאסטרונאוטים שבתוכה על ידי סיבוב סביב צירה. לצורך הפקת הסרט, הורה קובריק על בנייתו של גלגל מסתובב בן 30 טון. בניית הגלגל נעשתה על ידי קבוצת ההנדסה של ויקרס ארמסטרונג, בעלות של 750,000 דולר.



תחנת חלל מסתובבת קבועה ליד כדור הארץ בסרטו של קובריק

היום משמש הסרט רק כאובייקט מוזיאוני הממשיך להצית את דמיונם של האנשים בהקשר לעתיד האנושות - הקשור לכאורה לבניית מושבות חלל המספקות משקל לנוסעים הרבים שיעזבו את כדור הארץ לנצח.

5. נסו לחשב את רדיוס התחנה, שיעור הסחרור, מהירות משיקית וזוויתית של התחנה המסתובבת. קחו בחשבון כי עוצמת כוח הכבידה (g) שנוצרת על ידי הסיבוב לא תשתנה ביותר מ 1% על גובה של אדם (גובה = 2 מטרים)⁶⁷. האם ממדי החללית ששוגרה לכוכב צדק בסרט "אודיסאה בחלל 2001" של קובריק היו מציאותיים?

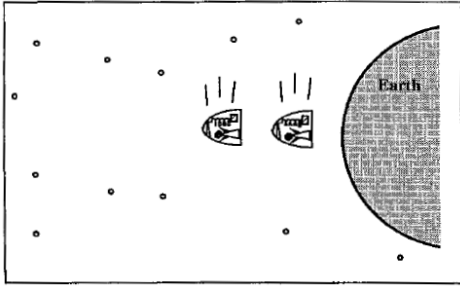


תא מסתובב בחללית הנעה לעבר הצדק בסרטו של קובריק

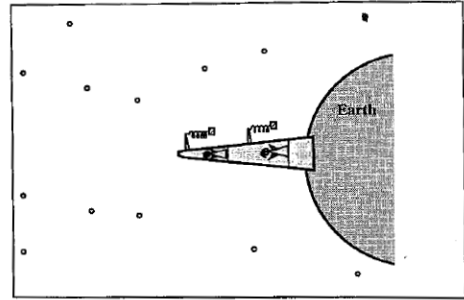
6. במהלך המסע ההיסטורי ותוך הצגת הרקע הפילוסופי-היסטורי, אנו מספקים שאלות למחשבה (שיקוף, רפלקציה) שניתן לדון עליהן עם התלמידים. להלן מוצגות מספר שאלות נוספות שיכולות לשמש לבדיקת הבנת התלמידים את מושג המשקל:

⁶⁷ See <http://visions2200.com/SpaceHabitat.html> for possible help.

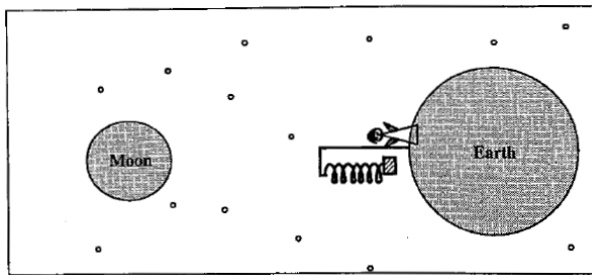
א. נתונים שני לוויינים החגים במסלולים נפרדים סביב כדור הארץ בגבהים של 100 ו- 200 ק"מ (ראו איור משמאל). בכל אחד מן הלוויינים מבצעים האסטרונוטים שקילה של מסה בת 1 ק"ג. מהן תוצאות השקילה המתקבלות בכל אחד משני הלוויינים? הסבירו שיקוליכם.



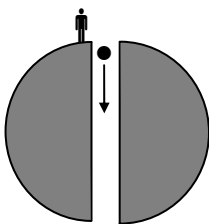
ב. נתון מגדל בגובה 200 ק"מ. שני חוקרים מבצעים שקילה של מסה בת 1 ק"ג (ראו איור משמאל): האחד נמצא בגובה 100 ק"מ והשני - בגובה 200 ק"מ. מהן תוצאות השקילה בכל אחד מן המקרים? הסבירו את שיקוליכם.



ג. השוו בין המקרים המתוארים בסעיפים א ו-ב. האם תשובותיכם לשני המקרים שונות? הסבירו כיצד. מהן ההשלכות לגבי משקל של גופים?



ד. נניח שאדם מבצע שקילה של תיבה באמצעות קפיץ מכויל רגיש במיוחד. בדיוק ברגע המדידה, הירח עובר מעליו (ראו איור משמאל). האם תהיה השפעה של הירח על תוצאות השקילה? האם משקל התיבה ישתנה? הסבירו שיקוליכם



ה. נניח שחצבו מנהרה החוצה את כדור הארץ לאורך הקוטר שלו (ראו איור משמאל). גוף נופל לתוך המנהרה (מצב זה נדון על ידי מלומדי ימי הביניים באוניברסיטת פריז במאה ה-14). מה קורה למשקל הגוף מהרגע שהוא מתחיל ליפול? הסבירו תשובתכם.

ו. בתמונות שלהלן ניתן להבחין בארבעה מקרים: (i) קפיצה ממתוס (ii) ציפה מתחת למים (iii) צניחה (iv) קפיצות מגבעה. השוו בין ארבעת המקרים מבחינת שינויי המשקל של ארבעת האנשים. הניחו שלכולם יש את אותה המסה.



ז. בתמונות שלהלן נתבונן בשני מקרים: (i) אדם הנמצא בתא הנופל חופשית בקרבת הקרקע (ii) אסטרונוט שעזב את תא הלוויין והוא מרחף חופשי בחלל. השוו ואפיינו את מצבם של שני האנשים מבחינת המשקל שלהם וכוח הכבידה הפועל עליהם.



ח. גוף נופל נמצא במצב של חוסר משקל. חשבו על אדם שזורק כדור בזווית מסויימת עם האופק. באיזו נקודה ניתן יהיה לומר שהכדור חסר משקל? הזניחו את התנגדות האוויר.

ט. מהו משקלו של הירח? כיצד לדעתכם היה ניוטון עונה על שאלה זו? האם התשובות (שלכם ושל ניוטון) שונות? הסבירו.

י. בתמונות שלהלן ניתן לראות את המתוס המשמש את נאס"א לאימון והכשרת אנשים לתפקד במצב של חוסר משקל (התמונה משמאל), ואדם הנמצא בתא של מתוס זה (התמונה מימין). הסבירו כיצד ניתן להגיע למצב של חוסר משקל בטיסה בתוך האטמוספירה?



יא. האם במצב של חוסר משקל בחללית, אפשר ליצור משקל באמצעות שימוש במגפיים מגנטיות (כפי שמציג ס. קובריק בסרט "אודיסיאה בחלל 2001")? הסבירו שיקוליכם.

יב. נאסא משתמשת בברכות מים עבור אימון האסטרונאוטים. האם ציפה במים מספקת לצוללנים מצב של חוסר משקל? מהו לדעתכם ההגיון מאחורי השימוש בברכות מים בהכשרת האסטרונאוטים?

* * *

מכשולים העומדים בפני ההוראה והלמידה

ישנם כמה קשיים הצפויים בלמידה על הגדרת המשקל. ראשית, יש הרואים בעצם העיסוק בהגדרת המושג - כבעל חשיבות משנית. למעשה נושא זה ממחיש את החשיבות החיוניות של סוגיות פילוסופיות בהוראת הפיזיקה⁶⁸. המשמעות הישירה של סוגייה זו היא החשיבות של סוג ההגדרה האופרציונאלית, שיש בה גם רווח פדגוגי⁶⁹.

קושי רציני נוסף עלול לנבוע מהעובדה שמורים רבים פועלים לפי תכנית הלימודים שמאמצת את ההגדרה הגרביטציונית של המשקל. בין ספרי הלימוד בשפה האנגלית, ניתן להבחין בין שתי קבוצות: המחברים מן הקבוצה הראשונה הם חסידי המסורת הישנה של ההגדרה הגרביטציונית של משקל⁷⁰ ואילו הקבוצה השנייה בחרה ללכת לפי הגישה החדשה שהוצגה במסע זה. הגישה החדשה שהחלה בשנות ה-60 של המאה הקודמת, מגדירה משקל כתוצאת השקילה באמצעות

⁶⁸ Galili, I. & Lehavi, Y. (2006). Definitions of Physical Concepts: A study of physics teachers' knowledge and views. *International Journal of Science Education*, 28(5), 521-541; Vinner, S. (1991). The Role of Definitions in Teaching and Learning Mathematics. In: D. Tall (Ed.) *Advanced Mathematical Thinking* (pp. 65-81). Academic Publishers, Boston.

⁶⁹ Arons, A. B. (1990), *A guide to introductory physics teaching*, Wiley, New York; Reif, F. (1994), *Understanding Mechanics* (p. 5), Wiley, New York.

⁷⁰ e.g. Young, H. D. & Freedman, R. A. (2004). *University Physics* (pp. 120, 441, 459-460). Pearson, Addison Wesley, New York.

קפיץ מכויל (מד כוח)⁷¹. מדיניות תכנית הלימודים תלוייה במדינה⁷² והויכוח בין אנשי החינוך הפיזיקאלי ממשך⁷³. מול הקושי הזה אפשר להציע למורים ללמוד את הטיעונים בעד שינוי ההגדרה של משקל, כנדרש על ידי הפיזיקה המודרנית בת זמנינו והפילוסופיה של המדע.

ההגדרה האופרציונאלית של משקל יכולה לתמוך בסילוק קושי נוסף הקיים בהוראת המשקל, הנוגע בנושא של צופים מרובים. כך, הלימוד בבתי הספר המוגבל לצופים ההתמדיים עלול להתנגש עם גישת התלמידים שבדרך כלל מעדיפים אינטואיטיבית את נקודת המבט של הצופה, מבלי לתת את הדעת אם הצופה הוא התמדי או לאו. גם כדי לפסול את הצופה הנמצא בתוך מערכת מואצת, המורה יהיה צריך לדון בקיומם של שני סוגי צופים: התמדיים ולא התמדיים – נושא שאינו נדון בדרך כלל בכיתת הפיזיקה היום.

למשל, ההסבר למצב של חוסר משקל המוגבל לנקודת המבט של צופה התמדי (כמו זה שעל כדור הארץ), קובע כי האסטרונוטים לא "מרחפים" אלא למעשה נופלים. שימוש בנקודת המבט של צופים לא התמדיים (כמו אלו שבתוך הלוויין), קובע כי הגופים המרחפים בתוך הלווין נמצאים במצב של חוסר משקל.

הגישה התרבותית להוראת הפיזיקה טוענת להוראה באמצעות שיח. דרך הוראה כזו מציגה פרספקטיבה רחבה יותר ונותנת לגיטימציה לשני הסברים שונים: ההסבר הניתן על ידי צופה התמדי (חיצוני) כמו גם זה הניתן על ידי הצופה הלא התמדי (הפנימי). ההגדרה האופרציונאלית של משקל ככוח אלסטי במגע - מתאימה לגישה זו של ההוראה.

* * *

מיומנויות פדגוגיות

מעבר לכישורים הרבים הנדרשים מהמורה בהוראה הרגילה של מדע⁷⁴, אפשר להזכיר כאן שהשימוש בהיסטוריה ופילוסופיה של המדע בשיעורי פיזיקה דורש מיומנות מיוחדת של הוראת חומר תרבותי עשיר. התכונה האופיינית של חומר תרבותי הוא האופי הדיאלוגי שלו, המציג את הידע על כל גווניו והשינויים שחלו בו⁷⁵. עמדתו של ניוטון עוצבה בדיאלוג עם רעיונות של אריסטו, כמו גם עם אלה של דקארט והויגנס. איינשטיין התווכח עם מדענים רבים עד

⁷¹ e.g. Orear, J. (1961), *Fundamental Physics* (p. 82), Wiley, New York; Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2000), *Fundamentals of Physics* (6th ed., p. 80), Wiley, New York; Keller, F. J., Gettys, W. E., & Skove, M. J. (1993), *Physics* (pp. 99-100), McGraw Hill, New York; Lerner, S. L. (1996), *Physics* (p. 62), Jones & Barlett, Sudbury, Mass; Marion, J. B. & Hornyack, W. F. (1982), *Physics for Science and Engineering* (Vol. 1, p. 129), Saunders New York; Hewitt, P. G. (2002), *Conceptual Physics* (9th ed., p. 160), Addison Wesley, San Francisco.

⁷² Physics textbooks in Russian unanimously follow the operational approach to weight definition, as presented in this excursion.

⁷³ Morrison, R. C. (1999). Weight and Gravity – The Need for Consistent Definition. *The Physics Teacher*, 37, 51-52, Galili, I. & Lehavi, Y. (2003). The importance of weightlessness and tides in teaching gravitation. *American Journal of Physics*, 71(11), 1127-1135.

⁷⁴ See for example, Hassard, J. (2005). *The Art of Teaching Science*. Oxford University Press, New York.

⁷⁵ Tseitlin, M. & Galili I. (2005), Teaching Physics in Looking for Itself: From a Physics-Discipline to a Physics-Culture, *Science & Education*, 14(3-5), 235-261. Marton, F. Runesson, U. & Tsui, A. B. M. (2004), The Space of Learning, in F. Marton, & A.B.M. Tsui (Eds.), *Classroom Discourse and the Space of Learning* (pp. 3-40). Lawrence Erlbaum, Mahwah, New Jersey.

שהתיאוריה שלו התקבלה. לאור זאת המורה יכול לארגן דיאלוג בכיתה. תוקפה של אסטרטגיה זו נשען על אופיה הדיאלקטי של האמת המדעית, התרומה המשלימה של מספר היבטים לידע מדעי בר תוקף.

בהוראה כזו דרושה מיומנות מיוחדת המשלבת מרכיבים מטאפיזיים (ידע על המדע: היסטורי, פילוסופי, חברתי) בהוראה בפועל של תכנים מדעיים. דיון חופשי בכיתה יכול בקלות להסיט את הסטודנטים מן הנושא הנלמד. על המורה לתווך ולהוביל את התלמידים לבניית ידע תקף על משקל וכבידה בסביבה עשירה תרבותית. החומרים של מסע זה תוכננו לתמוך באסטרטגיה זו.

* * *

הפניות למחקרים בחינוך פיזיקאלי הקשורים למושג המשקל

- Galili, I. & Kaplan, D. (1996). Students' Operation with the Concept of Weight. *Science Education*, 80(4), 457-487.
- Galili, I. (1993). Weight and Gravity: teachers' ambiguity and students' confusion about the concepts. *International Journal of Science Education*, 15(1), 149-162.
- Galili, I. (2001). Weight versus gravitational force: Historical and educational perspectives. *International Journal of Science Education*, 23, 1073-1093.
- Gönen, S. (2008). A Study on Student Teachers' Misconceptions and Scientifically Acceptable Conceptions about Mass and Gravity. *Journal of Science Education and Technology*, 17, 70-81.
- Gurel, Z. & Acar, H. (2003). Research into Students' Views about Basic Physics Principles in a Weightless Environment. *Astronomy Education Review*, 2(1), 65-81.
- Kavanagh, C. & Sneider, C. (2007). Learning about Gravity I. Free Fall: A Guide for Teachers and Curriculum Developers. *The Astronomy Education Review*, 5(2).
- Noce, G., Torosantucci, G. & Vincentini, M. (1988). The Floating of Objects on the Moon: Prediction from a Theory or Experimental Facts? *International Journal of Science Education*, 10(1), 61-70.
- Ruggiero, S., Cartelli, A., Dupre F., & Vincentini, M. (1985). Weight, gravity and air pressure: Mental representations by Italian middle school pupils. *European Journal of Science Education*, 7(2) 181-194.

* * *