

כמה כוחות פועלים על כדור אחד?

אירינה ויסמן¹, אלישבע כהן², סאוסן עילבוני², דפנה כהן ברנר³

לצאת
מהשיגרה



תלמידים מגיעים ללימודי הפיזיקה עם תפיסות מגובשות על חוקי הטבע, תפיסות שנבנו בחיי היום יום שלהם. לפעמים תפיסות אלה אינן עולות בקנה אחד עם החוקים והעקרונות של המדע ומזכרות בספרות המדעית כ"תפיסות אלטרנטיביות".

"תפיסות אלטרנטיביות" קיימות בהרבה נושאים מתחומי המדעים (פיזיקה, כימיה, ביולוגיה, אסטרונומיה...) ואפילו בהוראה (למשל: "מה שאדם לומד תלוי בחכמתו ולא בכמות המאמץ שהוא משקיע" - פרקינס 1998).

אחת מהתפיסות האלטרנטיביות, שזוהתה בשנות ה-70, נסמכת על הרעיון שלפיו כדי לשמור על גוף בתנועה, צריך להפעיל עליו כוח. תפיסה זו מלווה תדיר בתפיסה של קיום כוח פנימי, "אימפטוס", הגורם לתנועת הגוף (ראו למשל, Halloun & Hestenes, 1985; Clement, 1982; McCloskey 1983).

על פי תפיסת האימפטוס, הכוח שגורם לתנועת קליע הוא כוח פנימי המוענק לגוף עם שיגורו. גוף שנזרק כלפי מעלה ממשיך לנוע בהשפעת הכוח המוענק לו ברגע הזריקה ("כוח היד/כוח הזריקה/ כוח התנופה") עד שכוח הזה מתאפס. אימפטוס מוענק לגוף גם כאשר הוא נע בתנועה מעגלית ולכן בצאתו ממסלול מעגלי הגוף ממשיך לנוע במסלול מעגלי כברת דרך עד שהאימפטוס דועך.

התנגדות האוויר גורמת לכך שכוח האימפטוס קטן תמיד. לעומת זאת השפעת הכבידה גורמת לכך שגודלו של כוח האימפטוס קטן כאשר הגוף נמצא בתנועה **כלפי מעלה וגדל** כאשר הגוף נע כלפי **מטה**.

יש לציין שבמקרים רבים, אם מחליפים במשפט האחרון את המונח אימפטוס במונח תנע או אנרגיה קינטית, מקבלים משפט פיזיקלי תקין לחלוטין.

למעשה, תפיסת האימפטוס של התלמידים אינה רחוקה מרעיון האימפטוס שהופיע עוד בימי הקדם ונעד להסביר את תנועת הקליעים. רעיון האימפטוס שונה והורחב במאה ה-14 על ידי סומר צרפתי בשם ג'אן בורידן שהתייחס לנושא בספרו "שאלות על הפיזיקה של אריסטו"⁴.

מאז שנות השמונים של המאה הקודמת נערכו מחקרים רבים על תפיסת האימפטוס בקרב תלמידי תיכון, מכללות ואוניברסיטאות, פרחי הוראה ואפילו מורים פעילים (ראו למשל, Clement, 1982; McCloskey, Caramazza and Green, 1980; Kruger, Summers, & Palacio 1990, Halloun & Hestenes, 1985, Kozhevnikov & Hegarty, 2001).

נמצאי המחקרים מראים על קיומה של תפיסת האימפטוס בקרב כל הנחקרים, אפילו בקרב מורים לפיזיקה ופיזיקאים מומחים.

1 | קריית החינוך "רבין", מזכרת בתיה והמרכז הארצי למוחי הפיזיקה

2 | המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות

3 | תיכון מקיף ט' ותיכון מקיף י', ראשון לציון

4 | http://brahms.phy.vanderbilt.edu/a203/impetus_theory.html

כמורים שהשתתפו בשנים תש"ע, תשע"א בקורס סוגיות בהוראת הפיזיקה בתכנית חטשילד-ויצמן למצוינות בהוראת המדעים, התבקשנו לענות על שאלון "זריקת כדור כלפי מעלה" (ראו איור מספר 1). השאלון התייחס לכוחות הפועלים על כדור במהלך תנועתו לאחר שנזרק כלפי מעלה (מיד אחרי הזריקה, בשיא הגובה ורגע לפני הפגיעה בקרקע). לאחר שענינו על השאלון, נשאלנו כיצד, לדעתנו, היו עונים עליו תלמידינו. מרביתנו חשבנו שהם יענו על השאלון ללא בעיות מיוחדות. לאחר מכן התבקשנו להעביר את השאלון בקרב תלמידינו ולבדוק כיצד הם מנתחים תנועת כדור הנזרק אנכית כלפי מעלה.

המורים העבירו בכיתותיהם את השאלון, ומשימתנו הייתה לרכז את כל הממצאים שהתקבלו על ידי המורים, להפיק מידע ביחס לכלל התלמידים ולהציג את הממצאים שלנו בפני כל המורים המשתתפים בקורס.

להלן חלק מן הממצאים⁵.

מה מצאנו בתשובות התלמידים?

205 תלמידים שמרביתם לומדים פיזיקה ברמה של 5 יח"ל ב-12 כיתות שונות (מ-ט' עד י"ב), ענו על שאלון זה. בתשובות התלמידים מצאנו עדויות לכך שתפיסת האימפטוס "חיה, קיימת ומועטת"; בפרט מצאנו תשובות האומרות שהכדור ממשיך לנוע כל עוד פועל עליו הכוח הראשוני שהוענק לו בעת זריקתו (וצוין כ"כוח היד", "כוח התנפה" וכד'). כאמור, מחקרים רבים שנערכו במשך למעלה מעשרים וחמש השנים האחרונות חשפו ממצאים דומים בכל העולם אצל תלמידים החל מגילאי חט"ב ועד לסטודנטים במכללות ואפילו אצל מורים⁶.

בטבלה 1 מוצגות תשובות של 126 תלמידי כיתות י"א בהתייחס לכוחות הפועלים על הכדור בזמן תנועתו:

מיד אחרי הזריקה	בשיא הגובה	רגע לפני הפגיעה בקרקע
כוח הכובד	כוח הכובד	כוח הכובד
כוח החיכוך/התנגדות האוויר	כוח החיכוך/התנגדות האוויר	כוח החיכוך/התנגדות האוויר
כוח ה"זריקה"/דחיפה/תנפה	כוח ה"זריקה"/דחיפה/תנפה	כוח ה"זריקה"/דחיפה/תנפה
כוח התמדה		
כוח התאוצה	כוח התאוצה	כוח התאוצה
	לא פועלים כוחות	

טבלה 1: תשובותיהם של תלמידי כיתות י"א לשאלה: "מהם הכוחות הפועלים על הכדור בשלושה מצבים של תנועתו?"

כוחות נוספים שהופיעו אצל תלמידים בודדים היו: הכוח הנורמלי, כוח חיכוך, כוח המופעל על כ"א בזמן הזריקה, עוצמת הזריקה, אנרגיית הזריקה.

5 | יש לציין כי אין להתייחס לממצאים המוצגים כאן כאל תוצאות מחקר מובנה.

6 | ראו גם במקור הבא: <http://etd.ohiolink.edu/send-pdf.cgi/Lark%20Adam.pdf?bgsu1174931800>



שאלון – זריקת כדור כלפי מעלה

תלמיד זורק כדור קטן כלפי מעלה.
בכל מצב א', ב' וג', ציין מהם הכוחות הפועלים על הכדור. במקרה שפועל על הכדור יותר מכוח אחד, רשום מהו הכוח הגדול ביותר בערכו המוחלט ומהו הכוח הקטן ביותר בערכו המוחלט. הוסף בתרשים את הכוחות בכל אחד מן הסעיפים.
א. מיד אחרי שהכדור עזב את ידו של התלמיד.
הכוח (או הכוחות):



במקרה ופועל על הכדור יותר מכוח אחד

- הכוח הגדול ביותר בערכו המוחלט הוא:
- הכוח הקטן ביותר בערכו המוחלט הוא:

ב. בשיא הגובה.

הכוח (או הכוחות):

במקרה ופועל על הכדור יותר מכוח אחד

- הכוח הגדול ביותר בערכו המוחלט הוא:
- הכוח הקטן ביותר בערכו המוחלט הוא:

ג. רגע לפני פגיעת הכדור בארץ.

הכוח (או הכוחות):

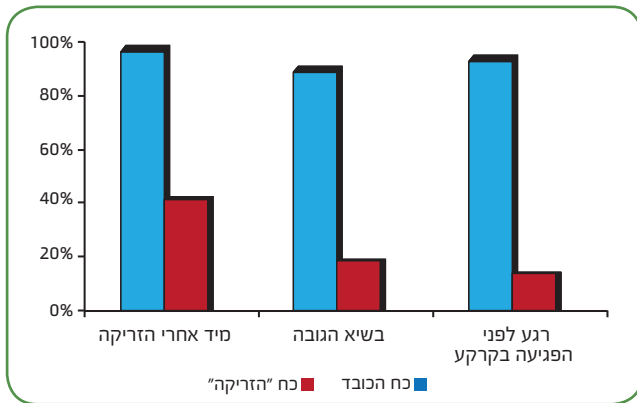
במקרה ופועל על הכדור יותר מכוח אחד

- הכוח הגדול ביותר בערכו המוחלט הוא:
- הכוח הקטן ביותר בערכו המוחלט הוא:



איור: עפרה יצחק

איור 1: שאלון - זריקת כדור כלפי מעלה



תרשים 1: התפלגות התשובות בקרב 126 תלמידי כיתה י"א

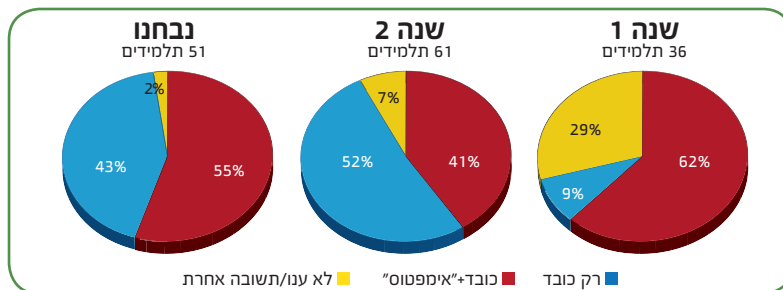
בדקנו את התפלגות התשובות המתייחסות לכוח הכובד ולכוח ה"זריקה" בשלושת המצבים המצוינים בשאלה ומצאנו את ההתפלגות המתוארת בתרשים 1:

מן התרשים ניתן לראות שאחוז התלמידים שהזכיר את כוח ה"זריקה" (כוח האימפטוס) רגע אחרי זריקת הכדור כלפי מעלה שווה ל-40%, והוא קטן ל-17% בשיא הגובה ול-13% רגע לפני הפגיעה בקרקע. ממצאים אלה עולים בקנה אחד עם ממצאיו של קלמנט (1982) ששאל 34 סטודנטים להנדסה בתחילת דרכם האקדמית מהם הכוחות הפועלים על גוף שנזרק כלפי מעלה, בדרכו מעלה. גם קלמנט מצא ביטויים כמו "כוח היד" ו"כוח הזריקה", אלא שאחוז הסטודנטים שטענו שכוח האימפטוס פועל על הגוף היה 88%. אותה שאלה שהופנתה ל-43 סטודנטים להנדסה שכבר למדו קורס במכניקה, הניבה 72% תשובות המפגינות את תפיסת האימפטוס.

כאשר בדקנו את תשובות התלמידים המתייחסות לשקול הכוחות בשלושת המצבים, מצאנו שקרוב לחמישית מן תלמידים (17%) ציינו שבשיא הגובה שווה כוח ה"זריקה" לכוח הכובד, ומיעוטם ענו שבשיא הגובה אין כלל כוחות הפועלים על הכדור.

כיוון שבבתי ספר שונים מתחילים ללמוד פיזיקה ברמה מוגברת בכיתות שונות (מ-ט' עד י"א), ביקשנו לבדוק את התפלגות תשובות התלמידים לא לפי הכיתה שבה הם לומדים אלא לפי שיוכם לאחת מהקבוצות הבאות: לאחר בחינת הברגות במכניקה, בשנה שנייה של לימודי המכניקה ולפני בחינת הברגות ובשנה ראשונה של לימודי המכניקה.

בדקנו את תשובותיהם של 51 תלמידי כיתה י"ב שכבר נבחנו בבחינת הברגות במכניקה (נסמן כ"נבחני"), של 61 תלמידים שלומדים מכניקה זו השנה השנייה (נסמן כ"שנה 2"), ושל 36 תלמידים שלומדים מכניקה זו השנה הראשונה (נסמן כ"שנה 1") לשאלה "מהם הכוחות הפועלים על הכדור מיד אחרי שהכדור עזב את ידו של התלמיד?" התפלגות התשובות מופיעה בתרשים 2.



תרשים 2: התפלגות התשובות של 148 תלמידים לשאלה: "מהם הכוחות הפועלים על הכדור מיד אחרי שעזב את ידו של התלמיד?"

מן התרשים עולים הממצאים האלה:⁷

1. תפיסת ה"אימפטוס" היא החזקה ביותר בקרב התלמידים שזו השנה הראשונה שלהם ללימודי המכניקה. יותר מ-60% מן התלמידים חושבים שעל הגוף שנזרק כלפי מעלה פועלים מיד אחרי הזריקה גם כוח הכובד וגם כוח ה"אימפטוס" (המכונה

7 | בשאלון לא נטען שהתנגדות האוויר זניחה, ואכן היו תלמידים שהזכירו את התנגדות האוויר תשובות אלה נספרו בדרך זו: אם הופיעו בתוספת לכוח הכובד בלבד, נספרו כ"רק כוח הכובד". אם הופיעו ביחד עם כוח הכובד וכוח ה"אימפטוס", נספרו כ"כובד+אימפטוס". במקרים אחרים נספרו כ"תשובות אחרות".

בשמות שונים כגון: כוח ה"זריקה", ה"תנפה", ה"דחיפה", ה"יד"....).

2. ההתייחסות לכוחות אחרים הפועלים על הכדור (למשל, אנרגיית הזריקה) הולכת ופוחתת עם העלייה במספר שנות לימודי המכניקה.

3. התשובות של התלמידים שכבר נבחנו בבחינת הבגרות במכניקה טובות פחות מאלה של תלמידי השנה השנייה בלימודי המכניקה. בעוד שקצת יותר ממחצית תלמידי השנה השנייה חושבים שהכוח היחיד הפועל על הכדור מיד עם שחרור הכדור מן היד הוא כוח הכובד, אזי רק 43% מן התלמידים שכבר נבחנו חושבים כך. (לעומת זאת, אם כ-40% מתלמידי השנה השנייה חושבים שבנוסף לכוח הכובד פועל גם כוח ה"אימפטוס", הרי שבקרב התלמידים שכבר נבחנו בבחינת הבגרות במכניקה, עולה מספר זה ל-55%).

ממצאים אלה עולים בקנה אחד עם ממצאי מחקר שנערך על ידי גלילי ובר (Galili & Bar, 1992). במחקר התבקשו תלמידי תיכון וסטודנטים שלומדים פיזיקה לענות ברצף על שמונה שאלות העוסקות בתנועה של גופים. חלק מהסיטואציות המתוארות בשאלות היו מוכרות לנשאלים וחלק לא. הממצאים מראים שאף שבתשובות לשאלות הראשונות כמעט ולא היו ביטויים של תפיסת האימפטוס, הרי שככל שהנשאלים התקדמו במספר השאלה, כך גדל השימוש באימפטוס ולא בחוקי ניוטון. כדברי החוקרים, הנשאלים "חזרו" לתפיסות הנאיביות המוקדמות שלהם. גם מחקר שנערך בשנת 2001 בקרב אוכלוסיות שונות של לומדי פיזיקה על ידי Kozhevnikov, & Hegarty מצא שאפילו פיזיקאים מומחים נסמכים על האימפטוס כשהם נדרשים לענות בו ברגע על שאלה המציגה סיטואציה שאינה מוכרת להם.

השלכות להוראה

כאשר הצגנו בפני המורים את הממצאים של כלל התלמידים, הם הגיבו בהפתעה: "כאשר בדקתי את התשובות של תלמידי, הייתי המומה, עכשיו אני רואה שזוהי בעיה של מורים רבים". "ככל הנראה אכן קיימת אמונה בסיסית בקיומו השיורי של הכוח שהופעל באמצעות הידיים, ונלווית לכך האמונה/אינטואיציה שכוח זה הולך ופוחת ככל שמתרחקים מאירוע הזריקה"; "האינטואיציה חזקה יותר מאשר הלמידה (וגם יותר ממה שחשבתי). התפיסה השגויה באה לידי ביטוי בעיקר בתנועת הכדור כלפי מעלה". המורים הופתעו בעיקר מן הממצאים הנוגעים לתלמידים שכבר נבחנו בבחינת הבגרות במכניקה: "לא תיארתי לעצמי שתלמידים שלמדו מכניקה וסיימו בהצלחה יפלו בשאלון זריקה אנכית"; "תלמידי יב' 'חזרו' לכוח ה"אימפטוס" ולתפיסות השגויות למרות שלמדו נושא זה כשנתיים ואף נבחנו עליו".

מרגע שהמורים הבינו שתפיסת האימפטוס איננה רק בעיה פרטית שלהם אלא נחלת הכלל, הם ציינו את החשיבות של היסודות האלה:

- המודעות של המורים לקיומה של תפיסת האימפטוס ולכך "שלכל אחד יש נטייה אנושית לטעות". גם קלמנט מדגיש שצעד ראשון בהתמודדות עם תפיסת האימפטוס הוא מודעותם של המורים לקיומה של תפיסה זו בקרב התלמידים.
- המודעות של התלמידים לקיומה של תפיסת האימפטוס - לשם כך מורים הציעו לנתח עם התלמידים את התפיסות האלטרנטיביות השונות ולנסות להסביר את מקורותיהן. היו גם מורים שהציעו ללמד באופן מפורש את מושג ה"אימפטוס", אגב הדגשת ההבדלים בין נבייה של תאוריית האימפטוס לנבייה של תאוריית ניוטון. לדברי המורים, ההוראה המפורשת יכולה להשיג שתי מטרות: "האחת, הרגשה נוחה של התלמידים שאם הם טועים, זה נורמאלי. השנייה, שתלמיד המודע לתפיסה שגויה, פחות יטעה בה". Clement מציע לעורר את המודעות של התלמידים לתפיסת האימפטוס שלהם על ידי כך שיתארו תופעות ויתנו את ההסבר המפורט שלהם לתופעות.

■ **ימוות התלמידים עם תפיסת האימפטוס** - מורים הציעו לנקוט באסטרטגיה של ניבוי, צפייה והסבר של הדגמות שימחישו לתלמידים את הטעות שבתפיסת האימפטוס. לדוגמה: מציבים מסילה מעגלית על שולחן. מבקשים מתלמיד להחזיק כוס במרחק

מסוים מחוץ למסילה, כך שכאשר יצא כדור אל מחוץ למסילה, הוא ייכנס לתוך הכוס. התלמיד או התלמידים ינבאו היכן צריך התלמיד להחזיק את הכוס. לאחר מכן תבצע ההדגמה, ולאחריה יתבקשו התלמידים להסביר את התוצאות. Clement מציג לעודד תלמידים לעשות השוואה מפורשת בין הסברים נאיביים (אימפטוס) לבין הסברים מדעיים להדגמות משכנעות. כמו כן הוא מציג שתלמידים ירבו בהצגת תחזיות איכותיות והסברים על תופעות פשוטות כמו זריקת מטבע כלפי מעלה והתייחסות לגודל היחסי של הכוחות, המהירות והתאוצות במקומות שונים של המסלול. גלילי ובר מציגים לא להסתפק רק בתופעות פשוטות המוכרות לתלמידים, אלא לחשוף אותם גם לסיטואציות לא מוכרות.

- הבנה שאם אין אינטראקציה בין גופים, אין כוח - עוד לפני הדיון בחוקי ניוטון, מציגים מורים לדון עם התלמידים על סחות ועל אלה שמפעילים אותם ולהדגיש את העובדה שכוח מודד אינטראקציה בין שני גופים.
- ריבוי של שאלות איכותיות שאינן דורשות שימוש בנוסחאות ובהקשר של חיי היום יום - גם גלילי ובר וגם קלמנט מדגישים את החשיבות של שאלות איכותיות, כי הן מאלצות את התלמידים לחשוב על התפיסות שלהם בלי שיוכלו "לברוח" לנוסחאות.
- רפלקציה שיעשו תלמידים על השינוי התפיסתי שלהם ועל הסיבת השינוי ושימוש בידע המעודכן במצבים חדשים.

תודות

הסתכלות מגוונת על מספר כה גדול של תוצאות התאפשרה הודות למורי חטשילד-ויצמן שהעבירו את השאלונים בכיתותיהם. לכולם תודה.

מקורות

- פרקינס, ד. (1998). לקראת בית-ספר חכם, מאימון הזיכרון לחינוך החשיבה. מכון ברנקו וייס לטיפוח החשיבה והאגף לתכניות לימודים במשרד החינוך התרבות והספורט. ירושלים.
- Clement, J. (1982). Students' Preconceptions in Introductory Mechanics. *American Journal of Physics*, 50, 66-71
- Galili, I. & Bar, V. (1992). Motion implies force: where to expect vestiges of the misconception? *International Journal of Science Education*, 14(1), 63-81
- Halloun, I.A. & Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53, 1056-1065.
- Kozhevnikov, M. & Hegarty, M. (2001) Impetus beliefs as default heuristics: Dissociation between explicit and implicit knowledge about motion. *Psychological Bulletin & Review*, 8(3), 439-453.
- Kruger, C., Summers, M., & Palacio, D (1990). A survey of primary school teachers' conceptions of forces and motion. *Educational Research*, 32 (2), 83-95.
- McCloskey, M., (1983). 1983"Intuitive Physics", *Scientific American*, 248(4), 122-130.