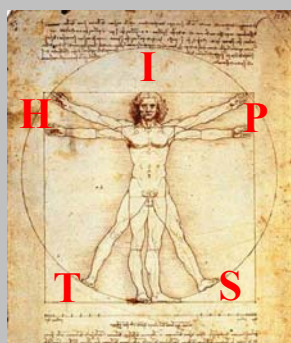


מסע אל ההיסטוריה של הבנת התנועה – *DE MOTU*



יגאל גלילי ומיכאל צייטלין
האוניברסיטה העברית בירושלים

תש"ע - 2010



מסע אל ההיסטוריה של הבנת התנועה – *DE MOTU*

יגאל גלילי ומיכאל צייטלין

האוניברסיטה העברית בירושלים

igal@vms.huji.ac.il

תקציר

מטרתו של מסע זה היא לשפר את הבנת הבסיס המושגי של הלומדים את התיאוריה הקלסית של התנועה. מטרה זו מושגת באמצעות הצגת התיאוריות של העבר, זו של אריסטו מתקופת המדע ההלני – ההסבר המדעי הראשון של התנועה – וזו שלאחריה, הידועה כתיאוריה של הדחף (Impetus), ששלטה בפיזיקה עד למהפכה המדעית של המאה ה-17. התיאוריה של הדחף נוצרה מתוך הביקורת על תיאוריית התנועה האריסטוטלית, והופרכה במעבר אל המדע המודרני של המכניקה הקלסית. מושג הדחף היה מרכזי בפיזיקה שלאחר אריסטו, ושימש כמתווך בין המכניקה האריסטוטלית והמכניקה הניוטונית. הרלוונטיות של הכרת הלומד את התיאוריות הקדומות נשענת על העובדה שתלמידי פיזיקה בני זמננו מגלים שוב ושוב מחדש, ובאופן ספונטני, את רעיון הדחף, ובכך מסבירים את התנועה באופן שגוי לפני, במהלך ולאחר הלימודים בבית הספר. הכרות עם התיאוריות הקדומות מעניקה לידע האמור את נקודת המבט המושגית, כמו את זו התרבותית. ניסיון זה הוא בעל ערך חינוכי הואיל והוא מעודד את התלמידים לארגן את הידע שלהם כתיאוריה מדעית, כלומר לטעון טיעוני "בעד" ו-"נגד" כשהם דנים בנושא מדעי. ההחלפה של המושגים הרלוונטיים והשינוי המושגי במעבר אל התפיסה הניוטונית נעשה קל יותר. המכניקה הקלסית הופיעה מתוך מאמץ קשה ומדוקדק של ביקורת כלפי תיאוריית הדחף. המסע אל ההיסטוריה של הבנת התנועה מאפשר לתלמידים להכיר מדענים מתקופות תרבותיות שונות, מאריסטו ועד ניוטון, ואת גישותיהם לידע המדעי שהשתנה באופן משמעותי מתקופה לתקופה. הכוונה היא להראות שלמרות המגוון הזה, יצרו המלומדים את הידע האובייקטיבי של התנועה. חלוצי תיאוריות התנועה היו בעת ובעונה אחת פילוסופים גדולים וחוקרים נלהבים של המציאות במונחים של ידע אובייקטיבי, למרות הטעויות שעשו, ולמרות הדעות להן איננו שותפים אנו כיום. התיאור והניתוח שלנו משתרע לא רק על פני הטענות הקשורות לתחום התוכן, אלא גם נוגע באפיסטמולוגיה שהופעלה, סוג העדויות שאומצו, והטיעונים בהם נעשה שימוש. הכרות עם האפיסטמולוגיות הללו עשויה לאפשר ללומד להעריך הן את התיאוריה החדשה והן את השיטה החדשה, שהתבססה על אימות ניסויי, ועל הפרכה של שיקולים מטפיזיים. קל יותר להבין את הרעיונות הפיזיקליים החדשים באמצעות השוואה עם אלו הישנים, כמו הדחף. זוהי חוויה מאלפת להכיר את התוצרים האינטלקטואליים של מוחות העבר המבריקים, שהציעו תיאוריות תנועה אחרות ותרמו באופן משמעותי להתקדמות המדעית. מדענים אלו יכולים לשמש כדוגמא למצוינות רוחנית ובכך מתאפשר לתלמידנו כיום להעריך את החוב התרבותי שלנו כלפי מלומדי העבר, ולהבין את האופי המצטבר של המדע כמאמץ אנושי מתמשך לבניית ידע אובייקטיבי של המציאות.

מילות מפתח: כוח, דחף, תנועה, תיאוריה של תנועה, "מטען של תנועה", שיווי משקל מנוחה-תנועה.

הבנת התנועה

תיאור של חקר המקרה



וַיֹּאמֶר יְהוָה אֶל-קַיִן, אֵי הֶבֶל אֲזוּיָהּ; וַיֹּאמֶר לֹא יָדַעְתִּי, הֲשֹׁמֵר אֲזוּי אֲנֹכִי.

(בראשית ד' פסוק 9)

הֵן זָרַשְׁתָּ אֹתִי הַיּוֹם, מֵעַל פְּנֵי הָאֲדָמָה, וּמִפְּנֵיךָ, אָסַתְרָה; וְהֵייתִי נֶעַ וְנָדָה, בְּאֶרֶץ, וְהָיָה כָּל-מִצְאָי, יִהְרָגָנִי. וַיֹּאמֶר לוֹ יְהוָה, לָכֵן כָּל-הָרֶג קַיִן, שִׁבְעָתַיִם, יִקָּבֵם; וַיֵּשֶׁב יְהוָה לְקַיִן אֹתוֹ, לְבִלְתִּי הַכּוֹת-אֹתוֹ כָּל-מִצְאוֹ. וַיֵּצֵא קַיִן, מִלִּפְנֵי יְהוָה; וַיֵּשֶׁב בְּאֶרֶץ-נֹדָד, קְדֵמַת-עֵדֵן.

(בראשית ד' פסוק 14-16)

סלח לנו אלוהים, על... שנכשלונו בשפיטת עצמנו בתחום מסוים זה. כמה פעמים החלקנו את הדעות הקדומות שלנו ונהגנו בן כחסרות חשיבות, ... תודה לך על... עזרתך לנו להבין מה מתרחש ... מי ייתן ונוכל לעמוד בכך באופן מציאותי ואמיתי. ...אמן.

כשאנו לומדים את החוק הראשון של ניוטון, אנו קוראים:¹

חוק I. כל גוף מתמיד במצבו, מנוחה או תנועה קצובה בקו ישר קדימה, אלא במידה שהוא מאולץ לשנות את מצבו על ידי הכוח שהופעל עליו.

אנו רואים כי ניוטון מתכוון כאן לגוף ש"מתמיד במצבו, במנוחה או בתנועה קצובה בקו ישר קדימה". ניוטון מציב את שני המצבים, מנוחה ותנועה קצובה בקו ישר, זה בצד זה, כשהם מופרדים במילה "או" המציינת שהם אינם זהים. בהמשך החיבור היסודי הזה של ניוטון במכניקה הקלאסית, בדיוק כמו בכל ספר לימוד מודרני במכניקה, אנו לומדים כי שני מצבי התנועה המוזכרים הם למעשה שווי ערך: מהירות היא ישות יחסית: תלויה בייחוס לקביעת המהירות. מכך נובע שמנוחה היא מקרה פרטי של תנועה קצובה בקו ישר, במהירות השווה לאפס, ולכן ניוטון יכול היה שלא להזכיר זאת כלל. מדוע בכל זאת הזכיר?

התשובה נעוצה בהיסטוריה של הפיזיקה שקדמה לניוטון. מראשית תחילתה של הפיזיקה, מהמאה ה-4 לפנה"ס ועד למהפכה המדעית של המאה ה-17 (במשך יותר מאלפיים שנה!), הבחינו מלומדים בין מנוחה לבין תנועה, כשני מושגים השונים מהותית. בזכרנו זאת, ניתן לפרש את הניסוח הזה של ניוטון כמכיל שריד למחויבות מנטלית (שהייתה לו "אות קין" מהתפיסה הקודמת) וכסוג של אמירה שלו בשיח

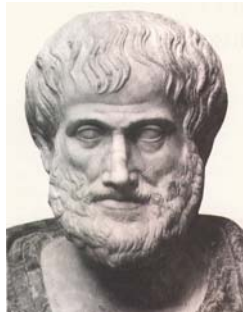
¹ Newton, I. (1687/1999). *The Principia. Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Translated by B. Cohen & A. Whitman. University of California Press, Berkeley, CA, p. 416.

הבלתי פוסק להבנת טבעה של התנועה. ניוטון פנה אל המלומדים האחרים בנוגע למושג שאמור היה להשתנות.

בהמשך, אנו מתכוונים לחשוף בקצרה את הנקודות המושגיות העיקריות בשיח זה שהתנהל על מנת להבין את התנועה והכין יסודות מושגיים של המכניקה הקלאסית, אשר מאז הפכו לבסיסה של פיזיקה כולה ושל תכנית לימודים במדעים.

* * *

I. התיאוריה הראשונה של התנועה – אריסטו



אריסטו

התיאוריה המדעית הראשונה של התנועה נוצרה על ידי אריסטו, בחיבורו *פיזיקה* (במאה הרביעית לפני הספירה). צעד זה היה הגשמה כבירה, שכל התיאוריות שבאו אחריה הסתמכו עליה, במובן שהיא הגדירה הן את תחום התוכן והן את סדר היום המושגי. אריסטו הגדיר שינוי באופן כללי, כנושא השייך לתחום החקר הפיזיקלי. תנועה – השינוי של המקום בזמן, או *ניידות* (מעבר ממקום למקום) במושגיו של אריסטו – הייתה אחת הדרכים האפשריות להתרחשותו של שינוי בעולם. התיאוריה של אריסטו מתמקדת בתנועה של גופים, ומותירה את כל ההיבטים האחרים מחוץ לנושא. ועדיין, גם לאחר הנחה זו, לא הייתה זו משימה פשוטה לתאר את התנועה ולהסביר אותה.

הסבר במדע

לאריסטו היה חשוב שכל חקירה תאורגן בתוך מסגרת, מעין תכנית שתקבע באופן כללי מה המטרה של המאמץ המחקרי האמור. הוא שאל את עצמו מהי המשמעות של לדעת משהו?²

”ידע הוא מטרת המחקר שלנו, ואנשים אינם סבורים שהם יודעים משהו עד אשר הם יכולים להבין את התשובה לשאלה ”מדוע” (כלומר להבין את הסיבה העיקרית לדבר). ולכן, ברור שגם אנו חייבים לעשות זאת בהקשר של ההיווצרות והכיליון, ושל כל שינוי פיזיקלי, בכדי שעל ידי ידיעת עקרונותיהם, נוכל לנסות ולייחס עקרונות אלו לכל אחת מהבעיות שלנו.”

אם כך, על מנת להסביר משהו, יש למצוא ולהציג את הסיבות לו, מתוך ידיעת עקרונות כלליים. בתחילה הזכיר אריסטו כי החומר ממנו עשויים העצמים חשוב על מנת להבין את העצם. למשל, אם העצם הוא פסל, והוא עשוי משיש, עובדה זו מסבירה את יופיו – בכך שהיא מספקת את הסיבה *החומרית*. ואז, המשיך אריסטו, ברור שגם צורת הדברים והאירועים הקשורים בהם חשובים להבנתם. במקרה של הפסל, קל לראות את הסיבה *הפורמלית* – צורתו של הפסל.

² Aristotle, *Physics*. (-IVc. B.C.), Book II, part 3. <http://classics.mit.edu/Aristotle/physics.2.ii.html>

בסוג הבא של ההסבר, הצביע אריסטו על "הסיבה הראשונית" של העצם או של השינוי בו דנים. במקרה של הפסל זהו כישרונו המיוחד של האמן, היודע בדיוק את האופן בו צריך לעבוד על מנת ליצור את החפץ הזה. זו הייתה הסיבה "האפקטיבית" של העצם.

לבסוף, מזכיר אריסטו כי הייעוד של העצם גם היא חשוב, משום שהבנתו יכולה ללמד הרבה על טבעו. אם כך, עלינו לחשוב לשם מה נועד העצם? כיצד הוא מתאים ליעודו? זוהי סיבה טלאולוגית. במקרה של הפסל, אם אנו יודעים שהפסל ישמש לקישוט, נניח, במקדש, אנו יכולים להבין טוב יותר את המאפיינים הספציפיים המכוונים לשרת מטרה זו.

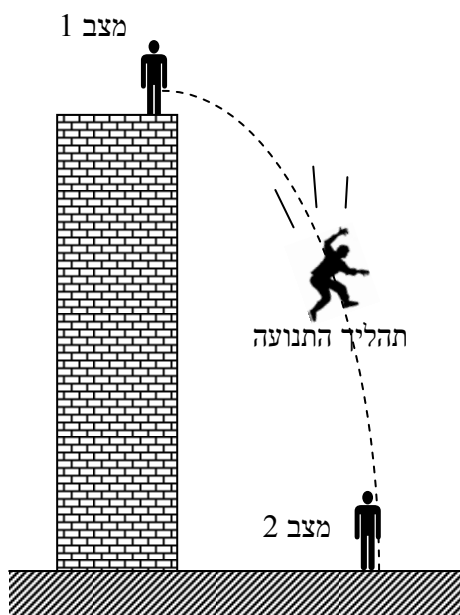
הסבר התנועה

בעקבות מסגרת מחשבתית זאת, פנה אריסטו אל שאלת התנועה. תנועה נחשבה כמנוגדת למצב של מנוחה, שתי מהויות שונות לחלוטין. תנועה נחשבה כשינוי, במיוחד כשינוי במקום. לכן היא נקראה "ניידות" (שינוי מקום, locomotion). מצב מנוחה, חשב אריסטו, בהיותו טבעי, לא דורש כל סיבה. על התנועה חשב לא כעל מצב, אלא כתהליך של שינוי מקום (תרשים 1). התנועה, על פי אריסטו, הייתה מימוש או הגשמה של סיבות כלשהן.

אריסטו הבחין בין שני סוגים של תנועה: טבעית ומאולצת.

התנועה הטבעית

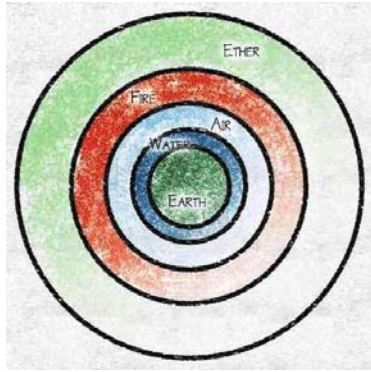
התנועה הטבעית יוחסה לסדר הטבעי של הדברים. ראשית, כל העצמים החומריים נחשבו כמורכבים מארבעה יסודות, שבאופן טבעי נטו להסתדר על פי המשקל והקלות שלהם: מהכבד, הקרוב יותר אל מרכז היקום, אל הקל – למעלה, בכיוון ממרכז היקום והלאה ממנו. היסודות היו: אדמה, מים, אוויר ואש. מעבר לתחום האש, מתחילות הספרות (קליפות כדוריות) השמימיות, עשויות מהיסוד החמישי – האתר (תרשים 2).



תרשים 1. תנועה כתהליך של מעבר בין שני מצבים של מנוחה

כשהסדר הזה מופר על ידי היסודות המרכיבות את הגוף המסוים, מופיע גורם, ויתכן יותר מאחד, המשפיע על התנועה הטבעית של הגוף על מנת להשיב את היסוד למקומו הטבעי.

תנועה מתרחשת כתוצאה מהגורם החומרי (כמו אוויר המצוי בתוך מים), הפרמלי (כמו אש המונחת מתחת לאדמה) והטלאולוגי (לשם החזרת הסדר על כנו). ברור כי התנועה הטבעית יכולה להיות מעלה (קל יותר מהסביבה) ומטה (כבד יותר מהסביבה). במקרה של גוף המורכב מכמה יסודות, המגמה הכללית, זו שנובעת מסך ההשפעה של כל היסודות המרכיבים את הגוף בהשוואה לסביבה, קובעת את כיוונה של התנועה הטבעית.



תרשים 2. הסדר הטבעי של היסודות ביקום על פי השקפתו של אריסטו

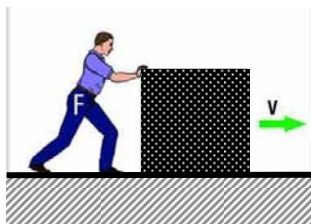
בהקשר זה, מושג המשקל נקבע על ידי אריסטו כנטייה להחזיר את הסדר הטבעי, מידת הכוונה לתפוס את המיקום הגבוה או הנמוך יותר ביחס למרכז העולם. חשוב לציין, כי בהתאם לאופן בו תפסו היוונים את המציאות, משקל הוצג תמיד עם ההיפוך שלו: קלות – הנטייה של העצמים הקלים לעלות מעלה. לכן, הקלות יוחסה לאוויר ולאש.

כאשר התנועה מתחילה, הגוף הנע יכול לשנות את מיקומו במהירות שונה. תנועת הגוף היא ביחס ישר למשקלו וביחס הפוך להתנגדות התווך בו הוא מצוי. למרות שאריסטו לא השתמש במושג המהירות ולא הציג את היחסים הללו בצורה מתמטית-סימבולית, נוכל לעשות כך ולבטא את הבנתו באשר לתנועה הטבעית בנוסחה הבאה:

$$v \propto \frac{W}{R} \quad (1)$$

כאשר v – מייצג מהירות, W – מייצג את משקל הגוף, ו- R – את התנגדות התווך. נפילה חופשית נחשבה כמקרה המייצג של התנועה הטבעית. תלות זו נראית הגיונית מתוך הניסיון היומ-יומי שלנו. ואמנם, כדור ברזל נופל מהר יותר מכדור פלסטי באותו גודל, ומהירות הנפילה קטנה בהשוואה לזו שבאוויר, אם כדור ברזל מופל בתוך מים. התנסויות אלו תומכות בתלות המבוטאת בנוסחה (1).

התנועה המאולצת



תרשים 3. על מנת להזיז גוף, יש צורך בגורם מניע – זה שמפעיל כוח

כל תנועה שהיא שונה מהתנועה הספונטנית הטבעית והמאונכת לפני כדור הארץ, נחשבה כתנועה מאולצת. שלא כמו התנועה הטבעית, התנועה המאולצת דרשה סיבה אפקטיבית – כוח. הכוח נחשב כמעין גורם, או מניע חיצוני לגוף, המשמש כיוצר התנועה (תרשים 3). גורם התנועה הזה מייצג את העיקרון של הדינמיקה האריסטוטלית.

כל הרמה של גוף נחשבה כתנועה מאולצת. נניח שאדם דוחף חבית כבדה לאורך מישור משופע (תרשים 4). הגורם האפקטיבי (זה שיוצר את האפקט) של ההרמה (התנועה) הוא האדם הדוחף. האדם הוא המקור של התנועה מעלה. הבה נדגיש את השוני מההסבר המודרני. בעוד שהסיבה האפקטיבית של אריסטו הוא האדם שיוצר את הכוח, אותנו, בהסבר המודרני, הוא לא יעניין. לנו חשוב הכוח הפיזיקלי הפועל על הגוף, ולא



תרשים 4. כל הרמה של גוף מייצגת תנועה מאולצת

המקור שלו.

כמו ביחס לתנועה הטבעית, גם במקרה של תנועה מאולצת יש חשיבות לקצב השינוי של מיקום הגוף (מה שאנו מכנים – מהירות). ברור שביחס לתנועה שנכפתה על גוף אריסטו קישר את מהירותה ביחס ישר לעוצמת הכוח הפועל, וביחס הפוך להתנגדות התווך או המשקל של הגוף:

$$v \propto \frac{F}{R} \quad \text{or} \quad v \propto \frac{F}{W} \quad (2)$$

כאשר v – מייצג את המהירות, F – מייצג את עוצמת הכוח המופעל, W – מייצג את משקל הגוף, ו- R – את התנגדות התווך. במובן מסוים, שתי הנוסחאות קובעות כי המשקל של הגוף מייצג התנגדות להנעתו למשל כאשר מנסים להרים אותו. חשוב לראות כי נוסחאות אלו נכונות רק כאשר F גדול מ- $R(W)$. רק אז, כאשר הכוח מתגבר על ההתנגדות הוא גורם לתנועה. אם לא כך הדבר ($F \leq R(W)$), הגוף יישאר במנוחה ($v=0$).

נוסחאות אלו הגיוניות בהרבה מצבים רגילים, אותם לא קשה להדגים. אם מישהו דוחף חזק יותר גוף המצוי על גבי משטח מחוספס כלשהו – ינוע הגוף מהר יותר. אם נניח גוף על גבי משטח מחוספס עוד יותר ואז נמשוך או נדחוף אותו באותו הכוח כמו קודם, מאמצינו יגרמו לתנועה איטית יותר. ולבסוף, אם מפעילים את אותו הכוח על גוף כבד ואחר כך על גוף קל יותר, המהירויות שלהם תהיינה ביחס הפוך למשקלים שלהם. ברור שקל יותר להניע גופים קלים יותר.

למרות שישנם מצבים פשוטים רבים התואמים את הסדירות שקבע אריסטו, התיאוריה שלו נתקלת מהר מאוד באתגר רציני – תנועתם של קליעים. ואמנם, כשאנו משליכים אבן, מה משמש כסיבה האפקטיבית לתנועה לאחר שהאבן ניתקה מהיד? מה משמש כגורם המניע את האבן? שאלות אלו היוו את קריאת התגר המשמעותית ביותר לתיאוריה האריסטוטלית של התנועה.

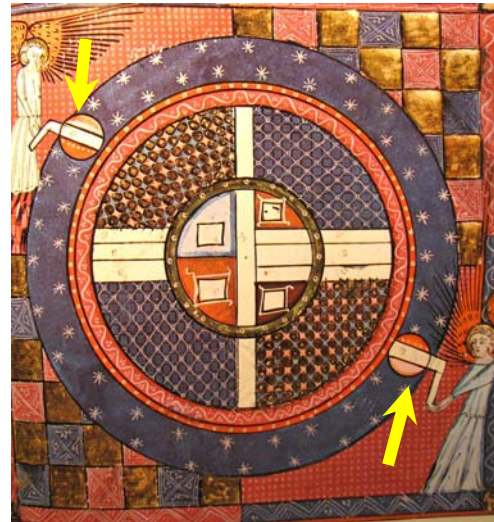
ההפרדה לשני עולמות



תצפית על העולם, הביאה את אריסטו לרעיון שהוא מופרד לשני אזורים עיקריים, שני עולמות בהם מתקיימים חוקי תנועה שונים. אזור אחד כולל את הסביבה הרגילה שלנו, ומשתרע ממרכז כדור הארץ עד למסלול הירח. באזור זה התנועה הטבעית היא במאונך לפני הארץ, אל המרכז היקום או ממנו. האזור השני הוא האזור השמימי של האתר. שם התנועה היחידה היא זו הטבעית, ולא כמו בעולם שמתחת לירח, תנועה טבעית זו היא תנועתם המעגלית הקצובה של כוכבי הלכת.

תרשים 5. ההפרדה לשני עולמות כפי שמופיעה על תחריט עתיק. המנגנון המניע מיוצג על ידי גלגל (ראו חץ).

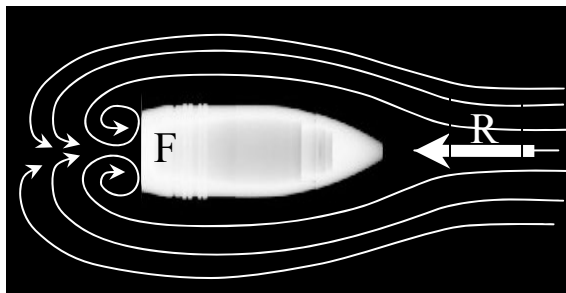
שני התרשימים המוצגים כאן, מציינים את תחילת השינוי בתמונת העולם האריסטוטלית שהתרחש בימי הביניים. בתור השינוי הראשון של התיאוריה המקורית, מלומדי ימי הביניים הציעו שגם התנועה של הגופים השמימיים דורשת סוג מסוים של גורם מניע. גורם זה מיוצג על ידי מנגנון מכני, הגלגל המתואר בתמונה (תרשים 5, ראו חץ). בתרשים 6, נראים מלאכים שתפקידם לספק את התנועה המעגלית לכדורים השמימיים באמצעות מנגנון מכני.



תרשים 6. שני מלאכים מניעים את הקליפות השמימיות, גם כן באמצעות מנגנון מכני המשמש כגורם התנועה, מנגנון הדומה לזה בו מרימים דלי מים מתוך באר (מסומן בחצים).

תנועת קליעים

נתאר את תנועתה של אבן הנזרקות באמצעות היד, כפי שנדרש על פי התיאוריה של אריסטו. אנו זקוקים לכוח שיוכל להסביר את התנועה המאולצת של האבן לאחר שהיא עוזבת את היד של הזורק. מה יכול לספק כוח כזה? תשובתו של אריסטו הייתה מקורית – האוויר, הוא הגורם האפקטיבי של תנועת הקליע. כיצד ייתכן הדבר? כאשר היד מאיצה את האבן, היא מניעה גם את האוויר המקיף אותה. האוויר המצוי בשכבות הבאות במגע עם האבן גם הוא מונע, ומקיף אותה. זאת משום שהאבן מפצלת את האוויר, נעה קדימה ומותירה חלל מאחוריה. כאשר האוויר זורם



תרשים 7. מערבולות אוויר יוצרות, על פי השקפתו של אריסטו, את הדחף קדימה המניע את הקליע בתוך התווך – antiperistasis.

אל תוך השטח שמאחורי האבן, הוא מפעיל כוח (דחיפה) על החלק האחורי של האבן, ודוחף אותה בכיוון התנועה (תרשים 7).³ התוצאה היא די מוזרה: האוויר שנראה כמי שיוצר דווקא את התנגדות לתנועה, R, מקבל לפתע את תפקיד המניע, ויוצר, בנוסף, גם את הכוח הדוחף F. מכאן נובע שללא האוויר, לא תיתכן תנועת הקליעים.

בהתייחסו לאבן הנזרקות מעלה, מתאר

אריסטו⁴ את שתי הנטיות: הטבעית (ללא כוח) הפועלת מטה, והמאלצת, המופעלת על הגוף מבחוץ (על ידי הכוח של האוויר):

³ ביוונית, ἀντιπερίστασις היא צורה של ἀντί ("כנגד"), ו-περίστασις ("עומד מסביב"), הקובעת את התנאים להתנגדות לכל מה שמקיף או מכתר משהו. מבחינת הקליע, זה מרמז על הכוח כנגד התנגדות האוויר.

⁴ Aristotle (1952), *On the Heavens*, Book III, Part 2. Great Books of the Western World. Encyclopaedia Britannica. Chicago.

"אך הואיל ויטבע פירושו מקור של תנועה ללא הדבר עצמו, בעוד שכוח הוא מקור של תנועה במשהו שהוא שונה ממנו או בתוכו לכשעצמו, והואיל והתנועה היא תמיד כתוצאה מהטבע או מאיזשהו אילוץ, תנועה שהיא טבעית, כמו שתנועה מטה היא עבור האבן, לא תתקיים על ידי כוח חיצוני, בעוד שתנועה לא טבעית תהייה אך ורק כתוצאה מכוח בלבד. בכל מקרה, האוויר כפי שהוא משמש כמכשיר לכוח."

אריסטו⁵ המשיך להסביר את התפקיד הכפול של האוויר על ידי היותו, בו זמנית, קל (ביחס לאדמה ולמים) וכבד (ביחס לאש):

"הואיל והאוויר הוא גם קל וגם כבד, בתור היותו קל הוא יוצר תנועה מעלה, נדחף, ומונע על ידי הכוח, ובתור היותו כבד הוא יוצר תנועה מטה. בכל אחד מהמקרים, הכוח מעביר את התנועה אל הגוף על ידי, קודם כל, מילוי האוויר. זוהי הסיבה לכך שגוף המונע על ידי אילוץ ממשיך לנוע גם כאשר הגורם המניע מפסיק ללוות אותו. אחרת, למשל אם האוויר לא היה רוכש את היכולת הזו, תנועה מאולצת לא הייתה אפשרית. והתנועה הטבעית של גוף יכולה להיעזר באותו האופן. דיון זה מספיק להראות (1) שכל הגופים הם או קלים או כבדים, וכן (2) כיצד מתאפשרת תנועה לא טבעית."

האם היה זה הסבר משכנע? נראה שלא, משום שלמרות היותו עקבי עם יתר התיאוריה, הוא משך אליו ביקורת זמן לא רב לאחר אריסטו.

II. הפיזיקה של רעיון הדחף (Impetus)

הסבר תנועת הקליעים באמצעות זרם האוויר, אשר בו זמנית תומך בתנועה ומתנגד לה, נראה מלאכותי כבר לבני זמנו של אריסטו. המורכבות של ההסבר עמדה בניגוד לפשטות הנראית בתנועתם של הקליעים. מה שנתפס כבעייתי הייתה העובדה שהאבן המושלכת באוויר נראתה ממשיכה בתנועתה ללא גורם מניע נראה לעין שימשיך ויקיים אותה. נראה שהיה צורך ברעיונות אחרים על מנת להסביר את תנועת הקליעים.

היסטוריה מוקדמת



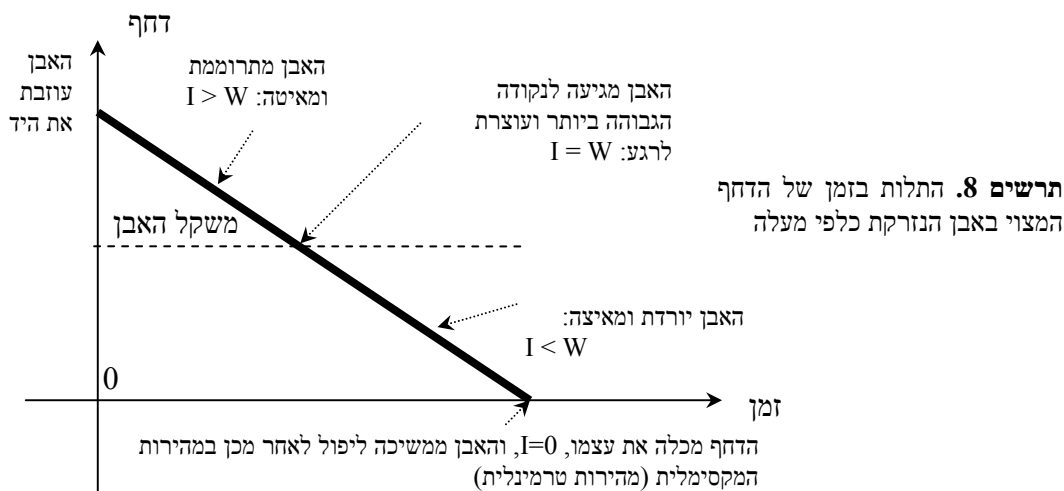
היפרכוס

בין הראשונים שסיפקו הסבר חלופי לתנועת הקליעים היה האסטרונום והפיזיקאי היווני היפרכוס [Hipparchus] (שחי סוף המאה השנייה לפני הספירה) – מלומד מבריק בן התרבות ההלניסטית שהחליפה והמשיכה את זו ההלנית. וזה היה הסברו לתנועת האבן המושלכת באוויר: היד המשליכה את האבן מעניקה לה באותו הזמן יכולת מסוימת ("כוח משליך"), המתנגד לכוח המשיכה. אנו יכולים לקרוא ליכולת זו בשם "דחף" (Impetus) – השם שכוח, או יכולת זו, קיבל מאוחר הרבה יותר,

באירופה של ימי הביניים. בזמן שהכוח המשליך מתגבר על הכבידה, הגוף נע באיטיות מעלה. כשהם משתווים הוא עוצר (עיקרון אריסטו: תנועה של גוף מחייבת כוח שפועל עליו), וזוהי

⁵ Ibid.

הנקודה הגבוהה ביותר של המסלול. ומשם, הכבידה מתגברת על הכוח המשליך, והגוף נע במהירות מטה. התנועה מגיעה למהירותה המכסימלית כאשר הכוח התנועתי המסופק על ידי היד מכלה את עצמו. אחרי שדחף זה נגמר, ממשיך הגוף ליפול רק הודות לכבידה שלו. באמצעים מודרניים נוכל להציג את התסריט באופן גרפי (תרשים 8).



לאחר היפרכוס, במאה השישית לספירה, חזר לנושא זה ג'ון פילופונוס [Philoponus] (המכונה "אוהב העמל", 490-570), הפרשן הנוצרי המוקדם של אריסטו. הוא הסביר את המקרה הכללי של תנועת קליעים. באופן מעשי, עלתה השקפתו בקנה אחד עם זו של היפרכוס. פילופונוס הציע להסביר את תנועת הקליע, לאחר שהאדם המטיל מפסיק להניע אותו, באמצעות "יכולת תנועתית לא חומרית" המוטבעת בגוף הנע על ידי האדם המטיל. מעין "טעינה" של הקליע ב"מטען של תנועה".



המצב בו הגוף פשוט נעזב מגובה (מהירות התחלתית שווה ל-0), דרש הסבר אחר. במקרה זה, שער פילופונוס את קיומו של שטף קבוע של דחף מהיד התומכת אל תוך הקליע, בהתאם לכמות הנדרשת על ידי המשקל המסוים שלו (ולכן היד מתעייפת כאשר היא מחזיקה את הגוף). השטף פוסק כאשר הגוף נעזב והדחף נעלם באופן ספונטני והדרגתי, ובכך מסביר פילופונוס את המהירות הגדלה של הגוף הנופל.

פילופונוס ביקר את תיאוריית התנועה של אריסטו בשני אופנים. ראשית, הוא פנה אל הניסוי. כששני אבנים כבדות שאחת שוקלת פי שניים מהשנייה, נעזבות מהיד, שתיהן מגיעות אל הקרקע כמעט באותו הזמן, ולא כפי שאריסטו חזה: האבן הכבדה תהיה מהירה פי שניים מהקלה. יותר מכך, מדוע איננו יכולים להשליך עצמים קלים (נוצה למשל) למרחק רב יותר מאשר עצמים כבדים (כמו אבן למשל)? מדוע הרוח אינה מעיפה גופים כבדים אך יכולה לתמוך בתנועתם כשהם באוויר? כך שאל פילופונוס ולכך לא הייתה תשובה לאריסטו.

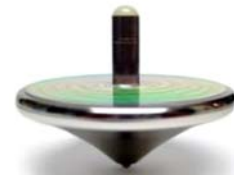
עם זאת, אי ההתאמה עם הניסוי לא נתפסה אז כפסקנית בעניין. אחרי הכל, יתכן שאריסטו סיפק את ההסבר העיקרי והמצויאות המורכבת מוסיפה עוד גורמים אחרים כמו איזושהי תלות

מורכבת בהתנגדות האוויר. אולם, מפתיעים אף יותר מאלה היו נראים מקרים מיוחדים של תנועה אשר לא הסתדרו עם התיאוריה, למשל, חץ (כידון) וסביבון.



ואכן, איך להסביר מדוע החץ ממשיך בתנועתו גם לאחר שעזב את המיתר? הייתה זו חידה של ממש, הרי ידוע כי שחץ (כמו גם כידון), המחודד בשני קצותיו, מתקדם מהר יותר ובמשך זמן ארוך יותר מאשר גוף שצידו האחורי שטוח, למרות שניתן לחשוב כי קצה אחורי שטוח יתאים טוב יותר ל"דחיפה עקב ההתנגדות" [antiperistasis], ולכן ינוע מהר יותר ובמשך זמן ארוך יותר. המציאות הייתה אחרת וזה כמובן היווה סתירה עם התיאוריה.

סתירה עוד יותר מרשימה מתגלית בתנועת הסביבון. במקרה זה, חלקים שונים של הגוף הנע מחליפים זה את זה בלי להשאיר לאוויר מקום כלשהו לדחוף ולסיע על ידי דחיפה. אם האוויר אינו דוחף, מדוע סביבון שהחל בתנועתו ממשיך להסתובב?



שאלות אלו לא יכלו לקבל מענה במסגרת תיאוריית התנועה של אריסטו, והן תמכו במציאת הבנה חלופית חדשה: לגוף שהונע מוענקת תכונה של תנועה. גורם התנועה הוא פנימי ולא חיצוני. כך חשבו.

ויותר מזה. פילופונוס ביקר את חוק התנועה העיקרי של אריסטו, אותו הצגנו בנוסחה 1. נקודה זו הייתה חשובה משום שבאמצעות החוק הזה שלל אריסטו את קיומו של הריק: אם אין שום תווך ($R=0$) תתקבל מהירות אינסופית – אבסורד מוחלט. במקום זאת, הציע פילופונוס תלות אחרת:

$$v \propto F - R \quad (3)$$

המשמעות: תנועה מתרחשת כאשר כוח F מתגבר על ההתנגדות R או על הכבידה (בזריקה מעלה), כלומר כאשר $F > R$. היה לו ברור ששום דבר דרמטי לא מתרחש כאשר ההתנגדות של התווך נעלמת ($R=0$). למרות שפילופונוס לא קבע את קיומו של הריק, הוא לא דחה אותו: כאשר גופים נעים, הם משנים את מקומם, מה שמרמז על קיומו חלל ריק שמתמלא על ידי הגופים.



תרשים 9. פעולת הפיפטה: לאחר שמועכים אותו, הבלון האלסטי הקטן חוזר למצבו הקודם, וגורם לנוזל לעלות ולהיכנס לתוך הבלון

פילופונוס המשיך והצביע על העיקרון של הפיפטה (clepsydra - "גונב המים") – מכשיר ששימש ביוון העתיקה לשאיבת מים מכלים שהיו גדולים מידי למזיגה (תרשים 9). אנו משתמשים רבות באמצעי זה על מנת לשאוב משקאות קלים מתוך בקבוק. במשך תקופה ארוכה שכללה גם את פעילותו של



גלילאו במאה ה-17, הוסברה פעולתה של הפיפטה שלא

כהלכה על ידי יכולתו של הריק לשאוב נוזלים.
 פילופונוס, אם כן, שינה את ההבנה באשר לתפקיד התווך בהקשר של התנועה: מהמסייע
 העיקרי לתנועה – על פי אריסטו, למשהו שמהווה רק מכשול עבורה.

הדחף (*Impetus*) בפיזיקה של ימי הביניים

המסורת המדעית של התרבות ההלנית והתרבות ההלניסטית נשמרה על ידי העולם המוסלמי שבא אחריהן. ההתפתחות המדעית שאבה מהידע שהשתמר. שני מלומדים ידועים בשל הצגתם את רעיון הדחף: איבן סינא (Ibn Sīnā ובשמו הלטיני: Avicenna) הפרסי, שחי בשנים 981-1037, ואבו-אל-באראקת אל-בגדדי [Abu'l-Barakat al-Baghdadi] פיזיקאי ורופא ממוצא יהודי-ערבי שנוולד בבגדד. אריסטו המשיך להוות תמריץ לביקורת, והרעיון החילופי של איבן סינא ואל-באראקת



איבן סינא [Avicenna]

דמה לאלו של היפרכוס ושל פילופונוס.

אביסנה הציג את הישות שנקראה "נטייה" [mayl] השייכת לתנועה והמועברת אל הקליע על ידי הזורק. הוא קבע כי תנועת הקליעים בריק לא תיפסק. הנטייה לתנועה מתפזרת על ידי התווך – באמצעות התנגדות האוויר, למשל. הנטייה מוגדרת כמי שמצויה ביחס ישר למכפלת המשקל (W) במהירות (v), הקדמה ברורה למושג התנע (mv):

$$M \propto W \cdot v \quad (4)$$

גם אל-באראקת קבע כי הגורם המניע הוכנס אל הגוף שנע כ"נטייה" חזקה (mayl qasri), נטייה שהולכת ונחלשת ככל שהעצם הנע מתרחק מהגורם המניע. הוא קבע כי כוח קבוע יוצר תנועה קבועה, די בהתאם לאריסטו (2), אבל תיאר את התנועה בצורה הרבה יותר בשלה: הוא הציג את מושג התאוצה כקצב השינוי של המהירות. נפילה הוסברה כמי שנובעת מדחף הולך וגדל.



באירופה של המאה ה-14, חלה התקדמות נמרצת בתחום המכניקה בזכותו של הכומר והפרופסור מאוניברסיטת פריס, ז'אן בורידן [Jean Buridan] שחי בשנים 1295-1358, ואשר היה מודע לעבודתו של אל-באראקת. היה זה בורידן שהציג את המונח "הדחף" [Impetus] – תכונה הגורמת לתנועה של הגוף. כאמור, רעיון זה הוכנס לפיזיקה בדרכים שונות ובזמנים שונים על ידי מלומדים קודמים שהתנצחו עם השקפתו של אריסטו.

בורידן הציג את הסברו באשר לתנועה של גוף הנזרק כלפי מעלה ולעובדה שגוף זה מאיץ כשהוא נופל. הוא עשה זאת בהערותיו לחיבורו של אריסטו פיזיקה. על פי השקפתו, האוויר לא יכול להיות הגורם המניע. יותר מכך. האוויר גורם להתנגדות לתנועה: כאשר הגוף נע הוא נאלץ לדחוף את האוויר על מנת לפלח אותו. בורידן חזר והצביע על העובדה המוזרה: בהעדרה של היד המטילה, הגוף לא חוֹנָה כל דחיפה לתנועה כנגד הרוח. מדוע הכל תלוי ביד? וגם, כיצד ניתן

להסביר את תנועת גלגל האובניים? הוא מונע על ידי היד ואז ממשיך לנוע זמן רב. לא ניתן להסביר זאת באמצעות האוויר.



ותצפית נוספת: כאשר מושכים סירה כנגד זרם המים ולפתע מפסיקים את המשיכה, אין הסירה נעצרת מיידית ומתחילה לנוע לאחור עם הזרם הדוחף, אלא ממשיכה לנוע קדימה זמן מה עד שהיא נעצרת, ורק אז נעה לאחור עם זרם המים.

אם אריסטו צודק, אז:⁶

”... היית אמור לזרוק נוצה רחוק יותר מאשר אבן, ומשהו קל יותר מאשר משהו כבד, בהנחה שלשניהם אותו הגודל ואותה הצורה. הניסיון מראה שאין זה כך.”

במקום ההסבר של אריסטו, מציע בורידן הסבר אחר: המניע של התנועה היא היד הזורקת שמעבירה "דחף" (לחץ, כוח, שאיפה, יכולת לנוע), שדוחף את הגוף קדימה:⁷

”ולכן, אנו יכולים ומחויבים לומר שבאבן או בקליע אחר יש משהו מוטבע, שהוא הכוח המניע (*virtus motiva*) של הקליע. וברור שזה עדיף מאשר להסתמך על הקביעה שהאוויר ממשיך להניע את הקליע. משום שהאוויר נראה דווקא כמתנגד. ולכן, נראה לי שיש לומר שהמניע של התנועה טובע בגוף הנע דחף מסוים או איזשהו כוח מניע, בכיוון שבו הזורק הניע את הגוף, מעלה או מטה, או הצידה, או במעגל. ובמידה בה הכוח הזה המניע את הגוף מהר יותר, כך הוא יטביע בו דחף חזק יותר. בזכות הדחף הזה ממשיכה האבן לנוע גל לאחר שהזורק חדל מתנועתו. אבל דחף זה מוקטן בהתמדה על ידי האוויר המתנגד ועל ידי הכבידה הפועלת על האבן, המטה אותה בכיוון מנוגד לזה שהדחף כיוון אותה לנוע באופן טבעי. לכן, תנועת האבן הופכת בהדרגה לאיטית יותר, ולבסוף הדחף הזה קטן ונפגם עד כדי כך שהכבידה של האבן יכולה לו, ומניעה אותה מטה אל מקומה הטבעי. שיטה זו, כך נראה לי, אמורה לקבל תמיכה משום שהשיטה השנייה לא נראית אמיתית וגם משום שכל מה שנראה, מצוי בהתאמה מושלמת עם שיטה זו.”

למרות היותו ארוך ומעט חוזר על עצמו, הסבר זה של התנועה מושך בזכות פשטותו. הדחף אכן דומה לתנע במכניקה הקלאסית. שניהם מצויים ביחס ישר למהירות ובדרך מסוימת גם למסה. הטענה האחרונה מוצדקת, משום שלבורידן לא היה מושג לגבי המסה, כפי הוכנסה לפיזיקה על ידע ניוטון, ובמקומה השתמש ב"כמות החומר". כך מצדיק בורידן את התלות הזאת:⁸

⁶ Buridan, J. (1509). 'Questions on the eight books of Physics of Aristotle.' In Clagett, M. (1959). *The Science of Mechanics in the Middle Ages*. The University of Wisconsin Press, Oxford University Press, London, Document 8.2, p. 534.

⁷ Clagett, *op.cit.* p. 534-535.

⁸ *Ibid.*, p. 535.

"משום שאם מישהו שואל מדוע אני מיידה אבן רחוק יותר מאשר נוצה, וברזל או עופרת התואמים לכף ידי רחוק יותר מאשר פיסת עץ, אענה שהקבלה של כל הצורות ונטייתם הטבעית היא בחומר ובזכות החומר. ומכאן, שכל שיש יותר כמות בחומר, בזכות כמות זאת הגוף יכול לקבל יותר מהדחף הזה ויותר בעוצמה. כעת, בחומר דחוס וכבד יותר, בהיות הדברים האחרים שווים, יש יותר חומר ראשוני מאשר בהגוף דליל וקל יותר. ולכן, גוף דחוס וכבד מקבל יותר מהדחף הזה ויותר בעוצמה, בדיוק כמו שברזל יכול לקבל יותר דחף מאשר עץ או מים באותה הכמות. יותר מכך, נוצה מקבלת דחף כל כך חלש שהוא מתכלה מייד עקב התנגדות האוויר. וכך גם אם עץ קל וברזל כבד בנפחים שווים ובצורות זהות יונעו במידה שווה של מהירות על ידי הזורק, הברזל ינוע מהר יותר משום שמוטבע בתוכו דחף חזק יותר, שאינו נפגם כמו שקורה לדחף המופחת יותר. זוהי גם הסיבה מדוע קשה יותר לעצור גלגל תנופה גדול של נֶפֶח הנע במהירות, מאשר לעצור גלגל קטן יותר, ללא ספק משום שבגלגל הגדול יותר, בהנחה ששאר הדברים שווים, יש יותר דחף."

בורידן מתייחס גם לתופעה הידועה של קפיצה לרוחק:⁹

"[נהדחף, אם כן, מסביר מדוע] זה הרוצה לקפוץ לרוחק נסוג לאחור על מנת לרוץ מהר יותר, כך שבזכות הריצה הוא יוכל לרכוש דחף כזה שיישא אותו למרחק גדול יותר בקפיצה. האדם שכך רץ וקופץ אינו חש כי האוויר מניע אותו, אלא מרגיש שאוויר מתנגד לו בחוזקה."



דחף ונפילה

למרות שהמאמץ העיקרי להסביר את התנועה בעזרת רעיון הדחף התייחס לתנועה מאולצת, לא הותירו מלומדי ימי הביניים את התנועה הטבעית מבלי ליישם גם בה את רעיון הדחף – מטען התנועה. הנה ההסבר של בורידן לתנועת גופים נופלים:¹⁰

"... נובע מכך שעלינו להניח כי גוף כבד לא רק רוכש תנועה מהגורם המניע העיקרי שלו, כלומר מהכבידה שלו, אלא שהוא גם רוכש לעצמו דחף מסוים עם תנועתו. לדחף זה יש את היכולת להניע את הגוף הכבד בשיתוף עם הכבידה הטבעית הקבועה. והואיל ודחף זה נרכש עם התנועה, ככל שהיא מהירה יותר כך הדחף גדול וחזק יותר. וכך, בתחילה מונע הגוף הכבד על ידי הכבידה הטבעית בלבד; ולכן הוא נע לאט. לאחר מכן הוא מונע בו זמנית על ידי הכבידה הזאת ועל ידי הדחף שנרכש; כתוצאה מכך הוא נע מהר יותר. והואיל והתנועה נעשית מהירה יותר גם הדחף נעשה גדול וחזק יותר, וכך הגוף הכבד מונע בו זמנית על ידי הכבידה הטבעית שלו ועל ידי הדחף הגדול יותר, ושוב ינוע מהר יותר; הוא תמיד ייאץ עוד ועוד עד הסוף."

וממשיך:¹¹

⁹ Clagett, M. (1959). *Op.cit.*, p. 536.

¹⁰ Clagett, M. (1959). *Op. cit.*, pp. 551-552.

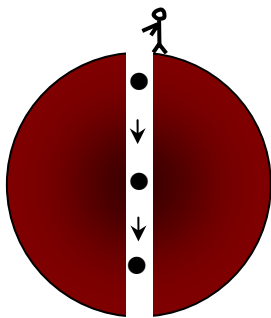
”מתיאוריה זו ניתן להסביר גם מדוע התנועה הטבעית של גוף כבד כלפי מטה מואצת בהתמדה. משום שמההתחלה רק הכבידה הניעה אותו. לכן, הוא נע לאט יותר, אבל תוך כדי תנועתו מטביעה הכבידה בגוף זה את הדחף. כעת, דחף זה, יחד עם הכבידה מניעים אותו. לכן התנועה הופכת למהירה יותר; ובמידה שהיא מתחזקת, כך הדחף נהייה חזק יותר. וכן ברור שהתנועה נהיית מהירה יותר ויותר.”

ניתן לראות שההקשר של תנועה חופשית – נפילה, הביא את המלומד לייחס תכונה חדשה לדחף. אם בתנועה מאולצת אופקית הדחף, באופן טבעי, היה הולך ונחלש תוך קיום התנועה, הרי שבהקשר של הנפילה הוא נוצר בתחילה על ידי המשקל הטבעי של הגוף הנופל ואז, יחד עם הכבידה הטבעית הוא יכול ליצור יותר דחף. דחף זה זוהה עם המשקל המקרי של הגוף הנופל. ברור שזה היה רק הסבר תיאורי של התאוצה הנראית לעין של גוף נופל. ה’משקל הטבעי’ בהתחלה, כמו תוספת המהירות כתוצאה מה’משקל המקרי’ במהלך התנועה, נראו כמבוססים על התנסות חושית ישירה. למעשה, שני המשקלים מייצגים את המאמץ לעצור את הגוף הנופל: ברור שלתמוך בגוף המצוי במנוחה קל יותר מאשר לעצור אותו כשהוא בתנועה, וקל בהרבה מאשר לעצור אותו כשהוא כבר נופל במהירות גבוהה.

מכל מקום, המנגנון החדש שבו הדחף לבדו לא רק תומך בתנועה אלא גם מאיץ אותה, מהווה את הרחבת התקפות של חוק הדינמיקה של אריסטו הקובע כי מהירות התנועה היא ביחס ישיר לסיבת התנועה: גם התנועה הופכת במובן מסוים לכוח הגורם להגברה נוספת של התנועה. התהליך שבו נוצרת תנועה מואצת, משום מה, מתרחש רק בנפילה.

הולדת המטוטלת

אחד מהכלים המרכזיים ששימש את מלומדי ימי הביניים היה ”ניסוי מחשבתני”. הוא הובן כיישום תיאורטי של העקרונות בהם דנים לתיאור של מצב דמיוני מסוים, תוך ניתוח והסקת מסקנות. ניסוי מחשבתי אחד הפך למפורסם במיוחד. הוא הציע לתאר תעלה לאורך כדור הארץ (משהו שלחלוטים לא ניתן לביצוע) ואדם המשליך עצם קטן לתוכה (תרשים 10). מה יקרה אז?



תרשים 10. הפלת גוף לכיוון מרכז כדור הארץ

בהתאם לתיאוריה של אריסטו, הגוף ייפול אל מרכז היקום (הארץ) ויעצור שם. אך המלומדים של ימי הביניים כבר חשבו אחרת. הנה מה שאלברט מסקסוניה (1316-1390), אחד ממשיכי דרכו של בורידן, כתב:¹²

”... ייאמר גם שאם הארץ הייתה מנוקבת לכל אורכה, ודרך חור זה היה נופל גוף כבד במהירות אל המרכז, אז כשמרכז הכובד של הגוף הכבד היה במרכז העולם, גוף זה היה ממשיך לנוע מטה רחוק יותר בכיוון השני, כלומר לכיוון הרקיע, משום שהדחף שבתוכו עדיין לא נגמר.”

¹¹ Ibid., p. 535-536.

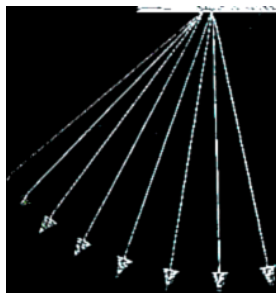
¹² Ibid., p. 566.

באופן זה, גילו המלומדים שעסקו במכניקה סוג חדש של תנועה: תנועה חוזרת של עצם ביחס לנקודה מסוימת. וכך המשיך אלברט:

"וכך, תוך כדי טיפוס, כשהדחף יקלח, הגוף ירד במהופך. ובירידה זו הוא שוב ירכוש לעצמו דחף קטן מסוים, שבאמצעותו הוא יונע שוב מעבר למרכז. כשהדחף הזה יקלח, הגוף ירד שוב. וכך הוא יהסס ויתנווד [titubando] סביב המרכז עד שלא יישאר כל דחף בתוכו, ואז הוא יעצור."



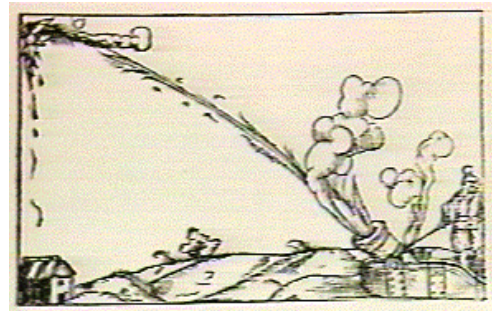
מהתיאוריה החדשה של התנועה עולה תרחיש חדש למצב דמיוני זה. בגלל הדחף המצטבר, הגוף לא יעצור במרכז הארץ אלא ימשיך להתנווד סביב אלברט מסקסוניה



המרכז. זה היה מקובל שהמלומדים של התקופה ההיא לא חיפשו אחר עדות ניסויית התומכת בטענותיהם. במקרה זה, בכל אופן, נעשתה השוואה לתנועה של גוף המתנווד בקצה חוט. כך נוצר מכשיר פיזיקלי שמילא תפקיד נכבד בהיסטוריה של התיאוריות הפיזיקליות – המטוטלת, וכך הומצאה התנועה המחזורית של גופים בפיזיקה. היה זה השג גדול וחשוב בהתפתחות ההיסטוריה של הפיזיקה.

קליעים ודחף

המלומדים של ימי הביניים שחיו במאה ה-14 לא אהבו לחדש דבר בתיאוריה של אריסטו והעדיפו לקרוא לשינויים בשם בירורים והערות. למרות זאת, אין להתעלם מן השינוי המהותי שחל בתיאוריה של התנועה עם הופעתו של מושג הדחף. השינוי בלט במיוחד ביישומים של רעיון זה, כמו בתיאור התנועה של קליעים.

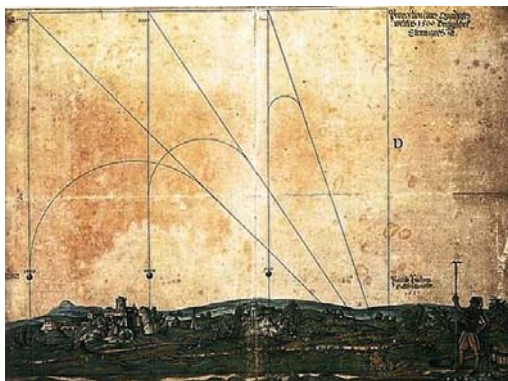


תרשים 11. מסלול פשוט של קליע מוסבר באמצעות שימוש בתיאוריית הדחף.

בגרסה הפשוטה ביותר הובן שקליע (פגז תותח) רוכש דחף בזמן שיגורו, ונע בקו ישר עד שהוא "מאבד את הדחף שלו", ובנקודה זו הוא נופל

בפתאומיות אל הקרקע (תרשים 11). לעומת זאת, אלברט מסקסוניה הציע הבנה מתוחכמת יותר,

והמתאימה טוב יותר לנצפה במציאות. על פי התיאור שלו, מסלולו של הקליע מורכב משלושה קטעים. המקטע הראשון, הישר, נקבע אך ורק על ידי הדחף הניתן לקליע. במקטע השני, המעגלי, הדחף, המסופק מגורם חיצוני, מתחרה עם הכבידה עד שהוא כלה לחלוטין. המקטע השלישי, הקווי, נקבע לחלוטין על ידי הכבידה, והוא מכוון כלפי מטה – נפילה אל האדמה בקו ישר.



תרשים 12. מסלול מציאותי יותר של קליע המוסבר באמצעות תיאוריית הדחף.

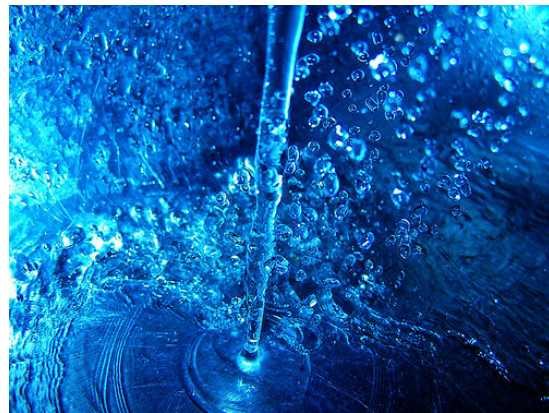
ההתקדמות בקינמטיקה בימי הביניים

עד כה, היה הסברם של המלומדים לתופעת התנועה יותר פילוסופי, כלומר איכותני, ופולמוסי במובן שהוא נעזר במושגים מעורפלים שלא הוגדרו בדיוק כמותי. כך התייחס אריסטו לתנועת הגוף לא במונחים של מהירות אלא במונחים של הזמן שנדרש לגוף לעבור מרחק מסוים. ראייה זו שונה מהמודרנית ותואמת יותר את התיאור במונחים של מהירות ממוצעת, אם כי לא הוגדרה כך במפורש:

$$(6) \quad \frac{\text{המרחק שכוסה}}{\text{הזמן שעבר}} = \text{מהירות ממוצעת}$$

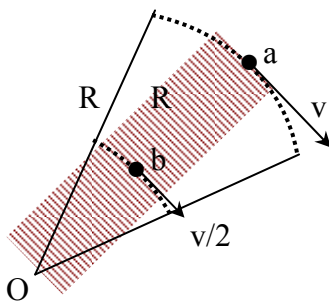
עם זאת, לא היה בכך די לתיאור של המציאות. המלומד יוצא הדופן בן המאה ה-13, ג'ורדנוס נמורריוס [Jordanus Nemorarius]¹³,

מצא עדות לכך שמים נופלים מגבירים יותר ויותר את מהירותם. ובאמת, כשאנו צופים בסילון של מים נופלים אנו רואים אותו מתכנס, והופך לצר יותר בתחתיתו. ג'ורדנוס הבין שתופעה זו מצביעה על מהירות גדלה והולכת, ולמעשה הציג את מושג התאוצה. זו הייתה העדות הניסויית הראשונה במדע לתנועה מואצת של גופים נופלים.



ג'ררד [Gerard]¹⁴, הפיזיקאי הפלמי החשוב מאותה התקופה, חקר את השאלה החשובה של תיאור התנועה¹⁵. נניח שהגוף נע באופן לא אחיד, מהר ולאט לסירוגין. ג'ררד תיאר מהירות מייצגת לתנועה מסוג זה: המהירות של תנועה קצובה שתכסה את אותו המרחק (s) במשך אותו הזמן (Δt). זה שווה ערך למה שאנחנו מכנים כיום בשם מהירות ממוצעת \bar{v} :

$$S = \bar{v} \cdot \Delta t \quad (6)$$



תרשים 13. תיאור של תנועה מעגלית על ידי ג'ררד.

הרעיון של מהירות ממוצעת היה חשוב מאוד. הוא סיפק דרך לתיאור של תנועת גופים עם מימדים סופיים. לדוגמא, הראה ג'ררד בפעם הראשונה שאם נקודה a (תרשים 13) נעה במעגל סביב O, הרי השטח שיכוסה על ידי הרדיוס בזמן נתון (הגזרה), ישתווה לשטח המכוסה על ידי אותו הרדיוס, אם היה נע בקו ישר ובמהירות קבועה ששווה למהירותה של נקודה b המצויה באמצע הרדיוס (השטח המקווקו שבתרשים).

¹³ לא הרבה ידוע על המלומד המבריק הזה, פרט להיותו שייך למסדר הדומיניקני. התוצאות יוצאות הדופן שלו היוו את ההסבר לשינוי המשקל הסטטי של שני משקולות המונחים על מישורים משופעים, וזאת באמצעות עיקרון מיוחד אותו הוא הציג. זה האחרון הוא שווה ערך לעיקרון של המעתק הוירטואלי – המחקר הראשון שהציג את המכפלה של הכוח במרחק (עבודה!).
¹⁴ מלומד זה מהמאה ה-13 ידוע בעיקר בזכות עבודותיו ששרדו, בנושא הקינמטיקה.
¹⁵ *Liber de Motu* של ג'רארד, היה החיבור הראשון שהוקדש כולו לקינמטיקה.

הסבר זה מהמאה ה-13 אפשר למעשה את ההבנה שלנו את התנועה הסיבובית, אותה אנו מבטאים בדרך כלל באמצעות התלות בין המהירות הקווית v , המהירות הזוויתית ω ורדיוס הסיבוב:

$$v = \omega \cdot R \quad (7)$$

המאה ה-14 הביאה איתה התפתחות חשובה בתיאור התנועה – קינמטיקה. התקדמות זו התרחשה באוקספורד, במכללת מרטון [Merton College], על ידי קבוצת מלומדים שנודעו בשם כאסכולת מרטון: תומס ברנדוורדין, וויליאם הייטסבורי, ריצ'רד סווינשיד וג'ון דמבלדון [Thomas Bradwardine, William Heytesbury, Richard Swineshead and John Dumbldon]. מלומדים אלו הגיעו אל העיסוק במכניקה מתוך הויכוחים של הפילוסופיה הסכולסטית¹⁶ וכיוונו אל הצורך לשדרג את ההסברים האיכותניים של התנועה באמצעות מושגים כמותיים, מדויקים יותר.¹⁷

למעשה, התקדמות זו בתיאור התנועה בעזרת גדלים פיזיקליים חייבה לזהות ולהפריד בין הגדלים האינטנסיביים לעומת אלו האקסטנסיביים, לקבוע את המאפיינים של ההעצמה ושל ההפחתה במשמעות הכוללת. כך הייתה, לדוגמא, הבעיה להבחין בין הגודל האקסטנסיבי של המסה והגודל האינטנסיבי של צפיפות; הגודל האקסטנסיבי של החום והגודל האינטנסיבי – יעילות פעולת החימום על ידי הגורם המחמם (בעתיד – טמפרטורה). בהקשר לתנועה, היה זה המרחק, הגודל האקסטנסיבי, שעבר הגוף לעומת הגודל האינטנסיבי – מהירות התנועה. למעשה, בעיה זו הייתה רחוקה מלהיות טריוויאלית, ובסופו של דבר הביאה להבנה של חשבון האינפיניטסימליים (חשבון הגדלים הקטנים לאינסוף) ואל פתרון הבעיה של המשמעות השינוי כאשר בחישוב יש לחלק גודל קטן מאוד אחד בגודל קטן מאוד אחר. בעיה זו נוצרת בחישוב של גודל אינטנסיבי.

בהקשר של התנועה הקצובה, כתב תומס ברנדוורדין [Bradwardine]:¹⁸

"תנועה נקראת קצובה כאשר הגוף עובר מרחקים שווים בזמן שווה, באותה המהירות."

זוהי, למעשה, הגדרת התנועה במהירות קבועה. ובאשר למהירות הרגעית, הציע וויליאם הייטסבורי:¹⁹

"בתנועה לא קצובה, יכולה המהירות ברגע זמן נתון להיחשב כמרחק שהגוף יעבור אם, בפרק זמן מסוים, הוא היה נע באופן אחיד במהירות שהייתה לו ברגע הנתון."

היה זה צעד גדול בהתקדמות של הפיזיקה – הצגתה של המהירות הרגעית. למרות שהגדרה זו של הייטסבורי [Heytesbury] לא הייתה מספיק מדויקת, היא הכניסה לשימוש מושג בעל חשיבות

¹⁶ הדיון בתפעול של איכויות שונות התחיל באריסטו והמשיך בתומס אקווינס, שחקרו את המשמעות של חיבור איכויות שונות.

¹⁷ Clagett, M. (1950). Richard Swineshead and Late Medieval Physics: I. The Intension and Remission of Qualities. *Osiris*, 9, 131-161.

¹⁸ Pedersen, O. & Phil, M. (1974). *Early Physics and Astronomy*. Macdonald & Janes, London, p. 220.

¹⁹ *Ibid.*, pp. 220-221.

מרכזית, וכמובן, הצביעה על הקושי העצום להגדיר מהירות רגעית לפני הצגת החשבון הדיפרנציאלי ומושג הגבול.

יותר מכך, אותו הייטסבורי הגדיר את התנועה שוות התאוצה: ²⁰

"כל תנועה היא בעלת תאוצה קבועה אם המהירות גדלה במידות קבועות, במרווחים שרירותיים אך שווים של זמן."

ולמרות הדיוק המוגבל בהגדרת הגדלים הרגועים, מלומדי אסכולת מרטון יכלו להגיע לכמה תוצאות מרחיקות לכת בחשיבותן, בהתפתחות של המכניקה. הידועה ביניהן הייתה קשורה למרחק שעובר גוף הנע בתאוצה קבועה: ²¹

"אם המהירות של הגוף עולה באופן אחיד מ- v_0 ל- v_1 במשך מרווח זמן t המרחק שיעבור הגוף באותו הזמן יהיה:"

$$s = \left[v_0 + \frac{v_1 - v_0}{2} \right] \cdot t \quad (8)$$

נוסחה זו עבור מהירות התחלתית אפס נותנת: $s = \frac{1}{2} v_1 \cdot t$ ²² שיחד עם השינוי במהירות

$v_1 = a \cdot t$ מובילה אל הנוסחה המוכרת מאוד על ידי תלמידי בית הספר:

$$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad (9)$$

תוצאה זו הייתה ידועה למדענים מאז ואילך (המאה ה-14).

תוצאה (8) תואמת את מסקנותיו של ג'ררד בהקשר של המהירות הממוצעת \bar{v} (6). לכן היא נקראת כלל המהירות הממוצעת. ואכן:

$$s = \left[v_0 + \frac{v_1 - v_0}{2} \right] \cdot t = \frac{v_1 + v_0}{2} \cdot t = \bar{v} \cdot t \quad (10)$$

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_0}{2} \quad \text{כאשר:}$$

עם זאת, המשמעות הברורה ביותר שנוסחה 10 קיבלה הייתה מגאון אחר של מדע ימי הביניים: ניקול אוֹרְם.

²⁰ *Ibid.*, p. 221.

²¹ *Ibid.*, p. 222.

²² נוסחה זו ידועה כ"חוק המהירות הממוצעת של מרטון", והיא תוצג שוב בהמשך.

ניקול אורם

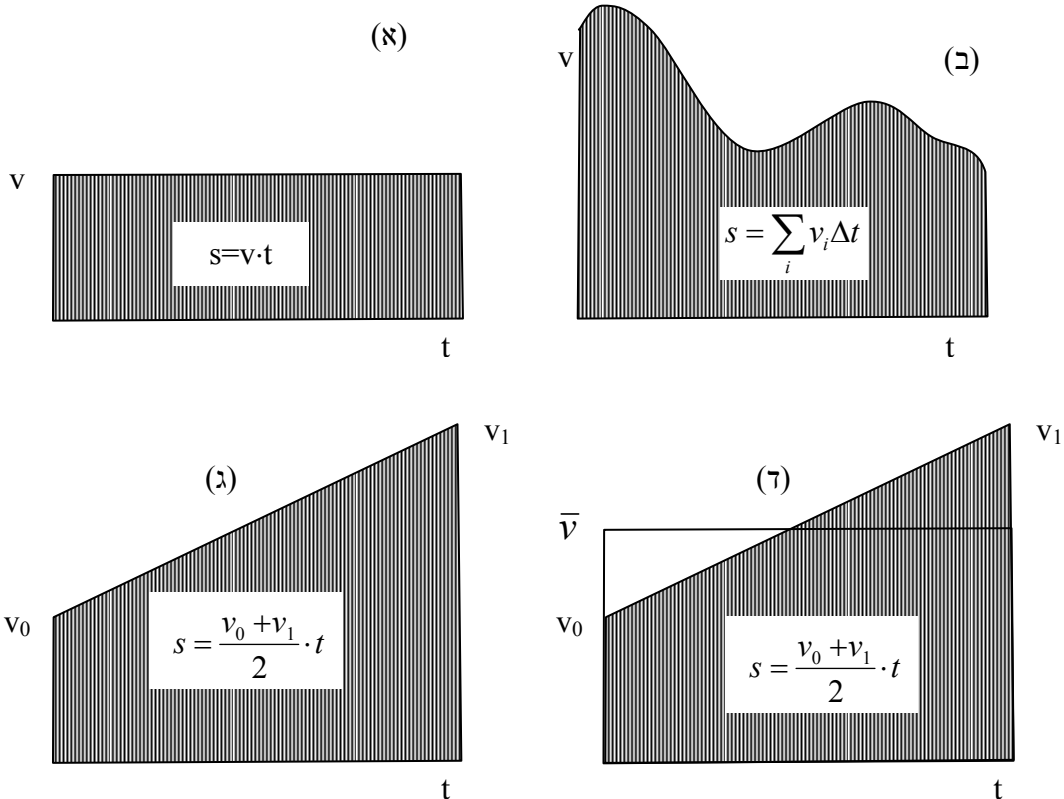


אורם ב-1377

הצעד הגדול ומבריק בניתוח התיאורטי של התנועה שייך למלומד הידוע מאוניברסיטת פריז – ניקול אורם [Nicole Oresme] (1320-1382), תלמידו של יוהן בורידן. הוא היה הראשון שהציג תיאור גרפי של גדלים המשתנים עם הזמן (למעשה תיאור גרפי ראשון של פונקציה). שיטה זו הפכה את ההתקדמות בקינמטיקה שהושגה לפני אורם למוחשית ונראית לעין. היא אפשרה התקדמות רבה של הפיזיקה בהמשך על ידי גלילאו ואחרים.

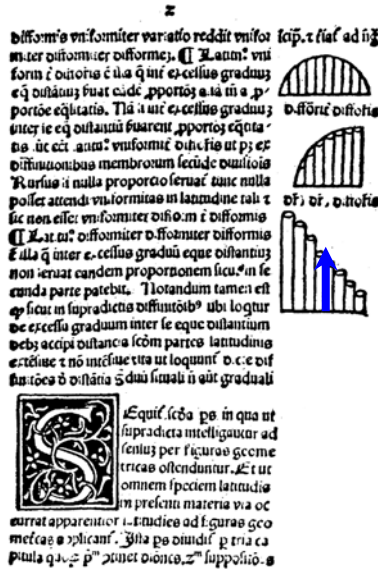
כיום אנו ממשיכים בדרכו של אורם ומייצגים את הגדלים המשתנים בזמן, כמו המהירות v , כך שעוצמתם תואמת לגדלים שעל הציר האנכי (קו גובה), הממוקם במאונך לציר אופקי (קווי אורך) המייצג רגעי זמן שונים.

כתוצאה, מתקבל גרף המייצג את השינוי במהירות עם הזמן. במקרה של תנועה קצובה, $(v = \text{קבוע})$ הגרף יהיה קו ישר (תרשים 14א'). ברור שהשטח מתחת לגרף בהיותו שווה ל: $v \cdot t$, מייצג את המרחק שעבר הגוף s . במקרה של תנועה לא קצובה, נקבל את הייצוג התנועה כמו בתרשים 14ב'. ובמקרה של תנועה המשתנה באופן אחיד (תאוצה קבועה), מקבלים גרף בצורת טרפז (תרשים 14ג'). תוצאה (10) שהתקבלה באוקספורד, מקבלת משמעות ברורה כביטוי לשטח טרפז (תרשים 14ד') – הכלל של המהירות הממוצעת.



תרשים 14. ייצוג גרפי של מהירות בתנועה: (א) קצובה, (ב) משתנה, (ג) "משתנה באופן קבוע", (ד) ייצוג של כלל מרטון [Merton Rule] באשר למרחק שעובר גוף הנע בתאוצה קבועה.

בתרשים 15 ניתן לראות את האופן בו הציג אורס בכתב ידו את שינוי המהירות בסוגים שונים של תנועה.



תרשים 15. ייצוג גרפי של סוגי תנועה שונים על ידי אורס. ניתן לראות כי אורס חשב במונחים של קטעי זמן קצרים, עמודים צרים בעלי עובי, ולמעשה החליף תנועה במהירות משתנה בתנועות עם מהירויות קבועות אך משתנות עם הזמן. זהו למעשה הרעיון של אינטגרל מסוים, שהוכנס למתמטיקה רק במאה ה-17, בתחום ידע החדש שמכונה החשבון הדיפרנציאלי.

מאתיים שנה לאחר מכן כתב גלילאו בספרו העוסק בגוף המאיץ באופן טבעי כתוצאה מנפילה:²³

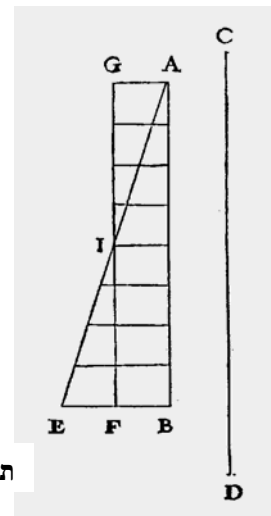
משפט I, טענה I

הזמן בו כל מרחק אותו עובר גוף המתחיל ממנוחה ומאיץ באופן קבוע, שווה לזמן בו יעבור אותו הגוף את אותו המרחק, אך בתנועה קצובה ששיעורה הוא הממוצע בין המהירות הגבוהה ביותר למהירות הנמוכה ביותר לפני שהתאוצה החלה.

(תרשים 16).

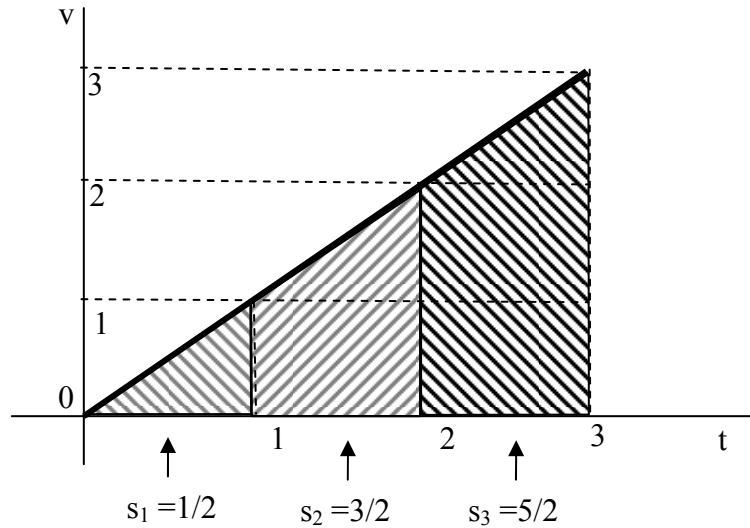
בפסקה זו אנו יכולים להבחין ברעיון של ג'ררד מבריסל ובכלל המהירות הממוצעת של האסכולה של מרטון ובשיטה של אורס, כמובן. גלילאו אימץ את כולם בהסברו את התנועה של גופים הנופלים באופן טבעי (השוו תרשים 14 ד' לתרשים 16. תרשימים אלה זהים ממש).

בהיותו מצויד בשיטה רבת העוצמה של הייצוג הגרפי, קיבל אורס את המאפיינים החשובים של התנועה בתאוצה קבועה. בחינת הגרף של מהירות כנגד זמן לתנועה מסוג זה (תרשים 17) אפשרה קבלת היחס כללי בין המרחקים שעובר גוף הנע בתאוצה קבועה בפרקי זמן שווים.



תרשים 16. השרטוט של גלילאו מ-1638.

²³ Galilei, G. (1638/1914). *Dialogues concerning Two New Sciences*. Dover, New York, p.173.

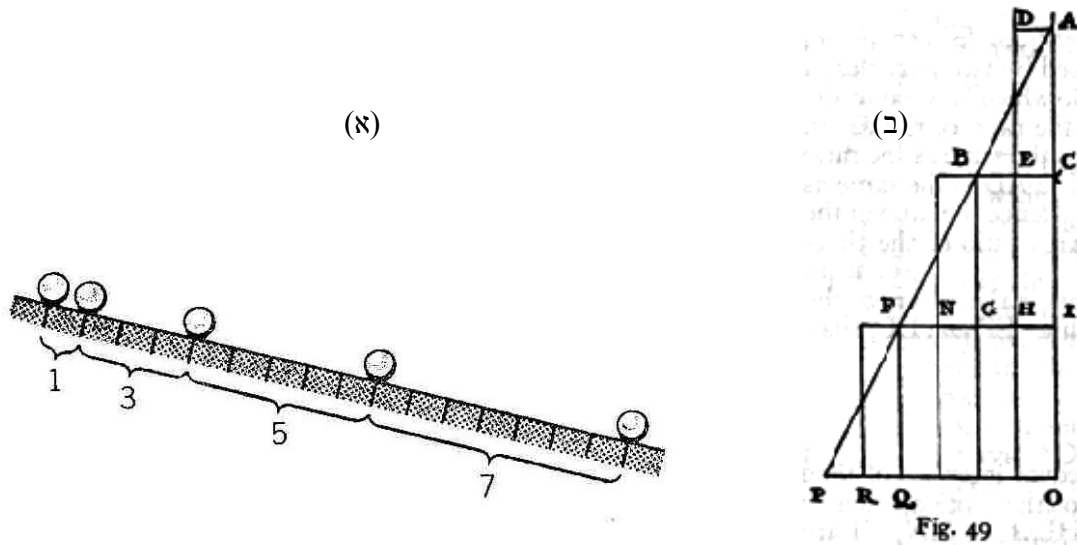


תרשים 17. תנועה בתאוצה קבועה. השוואה בין המרחקים שעבר הגוף במרווחי זמן שווים ועוקבים.

השוואה בין השטחים המסומנים בגרף מובילה אל היחס:

$$s_1 : s_2 : s_3 : s_4 : \dots = 1 : 3 : 5 : 7 : \dots \quad (11)$$

תוצאה זו מצביעה על כך שהיחס בין המרחקים שעובר גוף הנע בתאוצה קבועה בפרקי זמנים שווים הוא כמו היחס בין המספרים האי-זוגיים עוקבים. זוהי תוצאה מעניינת שקיבל אורם²⁴, המציגה את המאפיין שבאמצעותו ניתן להבדיל את תנועה בתאוצה קבועה מכל תנועה אחרת. אורם לא השתמש בתוצאה זו, אבל גלילאו כן. כמאתיים שנה מאוחר יותר, הוא נתן לקשר (11) שימוש ישיר, והוכיח באמצעותו שגוף היורד במישור משופע, נע בתאוצה קבועה (תרשים 18). גלילאו לא ציטט את אורם, ומורים בני ימנו נוטים ליחס תוצאה זאת לגלילאו עצמו.



²⁴ Drake, S. (1999). *Essays on Galileo and the History and Philosophy of Science*. University of Toronto Press, Toronto, Vol. II, p.249.

תרשים 18. (א) הניסוי של גלילאו במישור משופע. (ב) השרטוט של גלילאו התומך בהוכחה שלו שהמרחקים הנמדדים, אותם עובר הכדור היורד במדרון בפרקי זמן שווים, "מתייחסים זה לזה ביחס של סדרת מספרים אי-זוגיים 1, 3, 5, 7..."²⁵

עוד על ההתקדמות בהבנת הדינמיקה בימי הביניים

המלומדים של מכללת מרטון השתמשו בכלים מתמטיים על מנת לתאר גם את הדינמיקה של התנועה, כלומר את הקשר בין התנועה לכוחות. תומס ברנדוורדין הציע, בשנת 1328, קשר משלו, שדמה לחוקים של אריסטו (2) ושל פילופונוס (3) שקישרו בין מהירות הגוף מצד אחד, לכוח המופעל עליו ולכוח ההתנגדות הסביבה, מצד שני.

הצורה של תלות זו הייתה מיוחדת ובעלת בניסוח מורכב, כך שאנו נציג אותה באופן כמותי. נניח שכוחות F ו-R הם בעלי הערכים: $F=3$ ו- $R=1$ והם גורמים למהירות התנועה v. אז, בהתאם לחוק של ברנדוורדין, כוח גדול יותר, $F=9$, עם אותו $R=1$ יגרמו למהירות כפולה, $2v$. במילים אחרות, מהירויות כפולות (או גדולות פי שלוש, וכו'), נוצרות על ידי העלאה בחזקה שנייה או שלישית של היחס F/R , כלומר, מהירות $2v$ היא תוצאה של $(F/R)^2$.

במונחים כלליים, החוק של ברנדוורדין קבע כי המהירות v היא פונקציה של היחס F/R המקיימת את הדרישה:

$$n \times v = \varphi \left(\left[\frac{F}{R} \right]^n \right) \quad (11)$$

במילים אחרות, הגידול במהירות v בגורם n נגרם על ידי העלייה המעריכית ביחס (F/R) . במונחים של הפונקציה הלוגריתמית, שהופיעה מאוחר יותר, חוק זה מקבל את הצורה:

$$v \propto \log(F/R) \quad (12)$$

היתרון בהצגה זו היה שכאשר F התקרב בערכו ל-R, המהירות התקרבה בהדרגה לאפס: זה לא קורה בביטוי (2) עבור חוק אריסטו. בנוסף, הנוסחה דרשה באופן טבעי כי F יהיה גדול מ-R ($F > R$) ושמרה על ההתבדרות בערך של המהירות v כאשר התנגדות לתנועה R הלכה והתקרבה לאפס:

$$R \rightarrow 0 \Rightarrow v \rightarrow \infty \quad (13)$$

התנהגות זו של (13) דומה לזו של החוק של אריסטו (2), דמיון שהיה אטרקטיבי עבור מהמלומדים הסכולסטיים של התקופה שלא רצו לסתור את אריסטו.

חשוב לציין כי המלומדים של אותה התקופה (המאה ה-14) שקלו נכונותם של קשרים שונים בין גדלים פיזיקליים המתארים את התנועה – מהירות, מרחק, זמן – בהתאם להתאמתם לעקרונות תיאורטיים פילוסופיים, אך בשום אופן לא על סמך המבחן הניסוי הממשי. כזה היה המדע הסכולסטי.

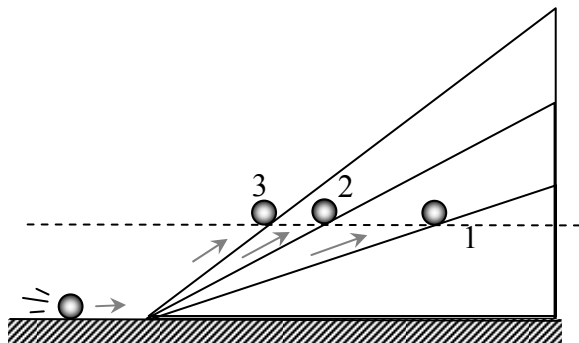
²⁵ *Ibid.*, Corollary I, pp. 175-176.

גלילאו גליליי (1564-1642), אימץ בתחילת פעילותו המדעית את המושג דחף כגורם המניע לתנועה וכסיבתה. עם זאת, עלתה גם ביקורת. בהתייחסו לעבודתו המוקדמת של גלילאו על התנועה – De Motu, כתב קוירה [Koyre²⁶]:²⁷

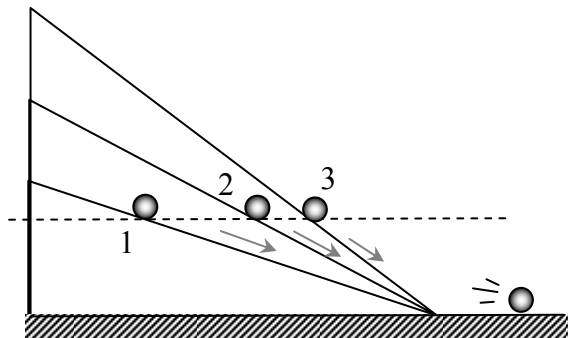
”[גלילאו סבר כי] זהו אבסורד שלא יעלה על הדעת, לא להודות כי הסיבה או הכוח היוצר את התנועה חייב בהכרח להתבזבז, ולבסוף למצות את עצמו ביצירת התנועה. הוא [הדחף] לעולם לא יכול להישאר בלתי משתנה למשך שני רגעים עוקבים, ולכן התנועה שהוא יוצר חייבת בהכרח להאט ולהסתיים. לכן, זהו שיעור חשוב ביותר מגלילאו הצעיר. הוא מלמד אותנו שפיזיקה של דחף, למרות היותה תואמת לתנועה בריק, היא כמו זו של אריסטו, אינה תואמת לעיקרון ההתמדה.”

כלומר גלילאו קבע שרעיון הדחף כמטען של התנועה נוגד את ההמשכיות הספונטנית של התנועה שאינה תלויה במרחק ובזמן – תנועה בהתמדה. אין מקום להתמדה לזמן ממושך אם המטען של התנועה חייב לכלות את עצמו.

במהלך הניסויים שערך, מצא גלילאו כי:²⁸



תרשים 19ב'. הכדור מטפס לאותו הגובה, ללא תלות בדרכו אותה הוא עובר.



תרשים 19א'. הכדור רוכש את אותה המהירות כשהוא נעזב מאותו הגובה, ללא תלות בדרכו.

”המהירות הנרכשת על ידי אותו הגוף הגולש במורד מישורים בעלי שיפועים שונים, שווה כאשר הגבהים של מישורים אלו שווים.”

זה אומר שהמהירות הסופית של הנפילה תלויה בגובה האנכי של השיפוע ולא בדרכו שנעשתה בפועל על ידי הגוף הנע (תרשים 19א').

²⁶ אלכסנדר קוירה (1892-1964) היה היסטוריון בולט של המדע, שסיפק הסברים רבים וחשובים בתחום ההיסטוריה והפילוסופיה של המדע.

²⁷ Koyre, A. (1943). Galileo and Plato. *Journal of the History of Ideas*, 4(4), 400-428.

²⁸ Galilei, G. (1638/1914). *Op. cit.* p. 169

יותר מכך. אותו הדבר נכון גם לגובה שאותו הגוף יכול לטפס על מישורים שונים: המהירות ההתחלתית קובעת את הגובה אך לא את הדרך בעליה במדרון (תרשים 19ב). אם היה "תשלום" עבור התנועה עצמה – הדחף שהגוף אוצר בתוכו – זה לא היה המקרה.

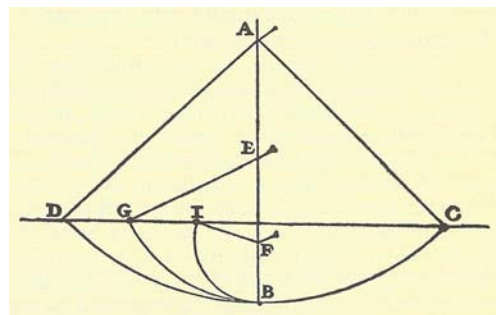
גלילאו הדגים כלל זה בעזרת ניסוי המטוטלת הידוע שלו (תרשים 20):²⁹

"דמיינו קיר אנכי עם מסמר קבוע בו; ונניח כי מהמסמר תלוי קליע עופרת במשקל של אונקיה אחת או שתיים, באמצעות פתיל אנכי עדין, AB , נניח באורך של ארבע עד שש רגליים. על קיר זה ציירו קו אופקי DC , בזוויות ישרות לפתיל האנכי AB , שתלוי במרחק של כארבע אצבעות לפני הקיר. כעת, הביאו את הפתיל AB עם הכדור המחובר אליו למיקום AC , ושחררו אותו. בתחילה ניתן יהיה לראות שהוא יורד לאורך הקשת CBD , עובר את הנקודה B ונע לאורך הקשת BD עד שהוא כמעט מגיע לקו האופקי CD , כשמחסור קטן נגרם על ידי התנגדות האוויר והחוט.



גלילאו גליליי

מכאן אנו יכולים להסיק נכונה כי הכדור, ברדתו לאורך הקשת CB רכש מתקף $[impeto]$ כשהוא הגיע ל- B , שהספיק לשאת אותו דרך קשת דומה BD עד לאותו הגובה. בחזרנו על ניסוי זה פעמים רבות, הבה נקבע מסמר בקיר קרוב לאנך AB , נניח בנקודה E או F , כך שיבלוט החוצה במרחק של חמש או שש אצבעות, במטרה שהפתיל, הנושא שוב את הקליע לאורך הקשת CB , יוכל לפגוע במסמר E כשהקליע מגיע לנקודה B , ובכך יאלץ אותו לעבור דרך הקשת BG ,



תרשים 20. ניסוי המטוטלת המאולצת של גלילאו. כשהיא משוחררת מנקודה C , נעצרת המשקולת של המטוטלת בנקודה המנוגדת D , I, G , באותו הגובה DC , ללא תלות במסלול שעליה לעבור על ידי מסמר F או E הניצבים בדרכה.

המתוארת סביב E כמרכזו. מכאן אנו יכולים לראות מה ניתן להיעשות על ידי אותו המתקף $[impeto]$ שקודם התחיל באותה הנקודה B , נשא את אותו הגוף לאורך הקשת BD , לקו האופקי CD . כעת, מכובדי, תבחינו בהנאה שהכדור ינוע לנקודה G שעל הקו האופקי, ותראו את אותו הדבר מתרחש אם המחסום היה מונח בנקודה כלשהי נמוכה יותר, נניח ב- F , שסביבה יתאר הכדור את הקשת BI , וכשהעלייה של הכדור תמיד תסתיים בדיוק על הקו CD . אך כשהמסמר יוצב כה נמוך עד שהשארית של הפתיל מתחתיו לא תגיע לגובה CD (מה שיקרה

אם המסמר היה מונח קרוב יותר ל- B מאשר לחיתוך של AB עם הקו האופקי CD), אז הפתיל יקפוץ מעל המסמר ויתלפף סביבו."

²⁹ Ibid., pp. 170-171.

גלילאו הגיע למסקנה: התכונה אותה רוכש הגוף בתנועה נבחנת על ידי הגובה של עלייתו או ירידתו (או פשוט נפילתו). לכן, על מנת לקיים תנועה אופקית, כלומר ללא עלייה, אין צורך בשום "כוח" כזה, בהנחה שאין שום חיכוך עם האוויר או עם המשטח. זו הייתה לא רק הטענה לקיומה של תנועה התמדתית, אלא בו זמנית גם הפרכה של הדחף (impetus). במקום זאת, עוצמת התנועה אופיינה על ידי גלילאו באמצעות המושג מומנטום (impeto). את הדחף, כמו "כוח התנועה" הדומה לו, השאיר גלילאו לשימוש על ידי סגרדו [Sagredo], שביטא את ההשקפות הנאיביות, וסימפליציו [Simplicio], שייצג את הפיזיקה הישנה. כך, למשל, שיחזר סגרדו את ההסבר, שכבר מוכר לנו מהיפרכוס ומבורידן, עבור תנועת הגוף הנזרק כלפי מעלה:³⁰

"סגרדו: משיקולים אלו נראה לי שנוכל לקבל פיתרון נאות לבעיה שנדונה על ידי הפילוסופים, כלומר, מה גורם לתאוצה בתנועה הטבעית של גופים כבדים? הואיל, כפי שנראה לי, הכוח הפועל על ידי הגורם המטיל את הגוף מעלה מופחת בהדרגה, כוח זה, כל זמן שהיה גדול מהכוח המנוגד של הכבידה, הניע את הגוף מעלה; כשהשניים הם בשיווי משקל, הגוף חדל לעלות ועובר דרך מצב של מנוחה בו הדחף המוקנה לו לא כילה את עצמו, אלא רק העודף שמעבר למשקל הגוף נגמר – העודף שגרם לגוף לעלות. ואז, כאשר ההפחתה של הדחף שהתקבל

נמשכת, וידה של הכבידה היא על העליונה מתחילה הנפילה, אבל בתחילה לאט בגלל הדחף המתנגד, שהרי חלק גדול ממנו נותר בגוף; אבל כשזה ממשיך להצטמצם, ממשיכה הכבידה להתגבר עליו יותר ויותר, ומכאן התאוצה המתמשכת של התנועה."



במתקפתו על מושג הדחף ניסה גלילאו להראות כי המצב של התנועה והמצב של המנוחה לא היו שונים כל כך מבחינה איכותית. הייתה זו מהלומה קשה לרעיון הדחף שהניח קיומו של הבדל מהותי בסיסי בין שני המצבים: מנוחה ותנועה:³¹

"סגרדו: כשאני חושב על גוף כבד הנופל ממנוחה, כלומר, מתחיל במהירות אפס וצובר מהירות ביחס לזמן שעבר מתחילת תנועתו; תנועה כזו, שתצבור, לדוגמא, במשך שמונה פעימות של הדופק, שמונה דרגות של מהירות; רכשה בסוף השנייה הרביעית ארבע דרגות; בסוף השנייה השנייה, שתיים; בסוף השנייה הראשונה, אחת: והואיל והזמן ניתן לחלוקה ללא גבול, נובע מכל השיקולים הללו שאם המהירות הקודמת של הגוף היא קטנה מהמהירות הנוכחית שלו ביחס קבוע, אז אין גבול למידה הקטנה של המהירות, (או, ניתן לומר, שאין גבול לאיטיות, ככל שהיא גדולה),

³⁰ Ibid., p. 168.

³¹ Ibid., p. 162.

בה אנו יכולים למצוא את הגוף נע אחרי שהוא מתחיל מאיטיות אינסופית,
כלומר ממנוחה."

מצב המנוחה מופיע כאן כשהוא למעשה קשור ברצף אל מצב התנועה, כאילו שהוחלף בתנועה במהירות שהיא קטנה במידה אינסופית. הניגוד האיכותי בין השתיים, שנשמר במוחם של המלומדים במשך אלפי שנים, התמוטט. מהו אם כן ההיגיון שמאחורי רעיון הדחף? האם הוא מצוי כלל בגוף הנע? היה זה שינוי מושגי קיצוני שהלך והתרחש באותם הימים.

ניתן להזכיר שני צעדים נוספים של גלילאו להפרכת הדחף ובכיוון הבנייה של תיאוריה חדשה של תנועה: ההסבר החדש לנפילת גופים ועיקרון היחסיות.

עיקרון היחסיות

נראה הגיוני שלאחר ההבנה כי תנועה אופקית של גוף מיוחסת באופן רציף למצב של מנוחה ושהתנועה האופקית לא זקוקה לשום סיוע (כמו זה שסופק על ידי הדחף), ניתן להציג שאלת חקר כללית יותר: האם יש בכלל ייחוד בגופים הנעים אופקית במהירות קבועה? כאן הניח גלילאו הנחה חסרת תקדים וטען כי: שום דבר אינו משתנה במציאות הקיימת בחדר שנע במהירות קבועה. ב"שום דבר" הכוונה לכל העצמים, לההתנהגות שלהם והחוקים השולטים במציאות. על מנת לייצג את המוחלטות הזו, תיאר גלילאו את החוק החדש באופן מאוד "ארצי":³²

"סלביאטי [Salviati]: נעל עצמך יחד עם חבר בתא המצוי מתחת לסיפונים על איזושהי ספינה גדולה, והכנס איתך כמה זבובים, פרפרים וכמה חיות מעופפות. הכנס גם מיכל גדול עם כמה דגים בתוכו; תלה בקבוק המטפטף אל תוך כלי שמתחתיו. כשהספינה עומדת ללא ניע צפה בוהירות כיצד החיות הקטנות עפות



במהירות שווה לכל צידי התא; הדגים שוחים לכל הכיוונים ללא הבדל; טיפות המים נופלות אל הכלי שמתחתן; וכשתזרוק משהו אל חברך, לא תצטרך לזרוק זאת חזק יותר בכיוון אחד מאשר בכיוון השני, המרחקים יהיו שווים; וכשתקפוץ ברגלים צמודות, תעבור מרחקים שווים בכל כיוון. לכשצפית בכל הדברים האלו בקפדנות

(למרות שללא ספק כשהספינה עומדת כל הדברים הללו חייבים להתרחש כך), השט את הספינה בכל מהירות שתמצא, כל זמן שהמהירות אחידה ולא משתנה כך או אחרת. אתה תגלה שאין ולו השינוי הקל ביותר בכל התופעות שצוינו, ולא תוכל לקבוע בהסתמך על אף אחת מהן, אם הספינה שטה או עומדת ללא נוע.



מפקד הספינה בתאו בשנת 1745. התמונה מעת וויליאם הוגרט [William Hogarth].

מרחקים כמו קודם, ולא תעשה קפיצות

³² Galilei, G. (1953). *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems*. University of California Press, Berkeley, CA, pp. 186 - 187 (Second Day).

גדולות יותר לכיוון הירכתיים או החרטום, אפילו אם הספינה שטה די מהר, למרות העובדה שבזמן שהייתך באוויר הרצפה מתחתיך תנוע בכיוון המנוגד לקפיצתך. בזרקך משהו לחברך, לא תצטרך יותר כוח על מנת להגיע אליו גם אם הוא נמצא בכיוון החרטום או הירכתיים, כשאתה ניצב ממול. הטיפות תיפולנה כקודם לתוך הכלי שמתחתן, מבלי ליפול לכיוון הירכתיים, למרות שבזמן שהטיפות באוויר הספינה עוברת מרווחים ארוכים. הדגים בתוך המים ישחו לכיוון החזית של המיכל שלהם ללא מאמץ גדול יותר מזה הדרוש לנוע לצידו האחורי, ויגיעו באותה נינוחות אל הפיתיון המונח בכל מקום בשולי המיכל. לבסוף, הפרפרים והזבובים ימשיכו את מעופם ללא הבדל לכל כיוון, ולא יקרה שהם יתרכזו לכיוון הירכתיים, כמי שהתעייפו מלשמור על כיוון תנועת הספינה ממנו הופרדו במהלך המרווחים הארוכים, בזמן ששהו באוויר. ואם ייווצר עשן על ידי שריפת קטורת, הוא ייראה עולה מעלה בצורה של ענן קטן, ויישאר ללא תזוזה ויגיע לא יותר לכיוון אחד מאשר לכיוון השני. הסיבה לכל ההתאמה בתופעות האלה היא שתנועת הספינה היא משותפת לכל הדברים הכלולים בה, ולאוויר גם כן. זוהי הסיבה שאמרתי שעליך להישאר מתחת הסיפונים; משום שאם זה התרחש מעלה, באוויר הפתוח שאינו מציית לכיוון התנועה של הספינה, הבדלים בולטים במידה רבה או פחותה ייראו בכמה מהתופעות שצוינו."

הטענה בדבר השקילות המוחלטת של המציאות ללא תלות בתנועה, שוללת כל ביטוי לישות המיוחדת שנכנסה בגוף על מנת לקיים את התנועה, כפי שדמיינו אנשים במשך זמן כה רב. ואם אין כל ביטוי לדחף, מדוע בכלל לייחס אותו לגופים נעים? גופים פשוט נעים בכל מהירות ללא כל גורם מניע בתוכם.

כל הניסיון שלנו מעיד על כך שאין כל סיבה לקיומו של הדחף או של כל שינוי פנימי אחר של הגופים, הקשורה לעובדת התנועה שלהם.

נפילה

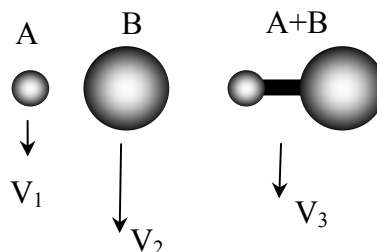


עד כאן באשר לתנועה האופקית, שמאז אריסטו יוחסה לאילוץ שהוטל על הגוף, מעין פעולה או מימוש של איזושהי תכונה גנוזה. המגמה האחרת של המחשבה כוונה אל התנועה "הטבעית", שלבסוף הצטמצמה לטיפול בגופים נופלים – תנועה אנכית. למרות שהטענה המקורית של אריסטו – גופים נופלים במהירות המצויה ביחס ישר למשקלם (1) – לא תאמה את העדות הניסויית במקרים רבים – באחרים היא דווקא כן. לכן, דיווחים על אי התאמה עם הניסוי לא הספיקו לבסס את ההבנה של סוג תנועה זה.

גלילאו תרם כאן שתי תרומות מכריעות. ראשית, על ידי ביצוע סדרות של ניסויים (כמו זה שבתרשים 18), הוא יכול היה לבסס את העובדה המדויקת והמוכחת כמותית: בהזנחת התנגדות האוויר, גופים יפלו בתאוצה אחידה וקבועה, ללא תלות בכמות החומר המצויה בהם. שנית, גלילאו הראה שבטענה של אריסטו יש סתירה פנימית. ללא האמירה מהו ההסבר הנכון לנפילה, מבטלת הסתירה הפנימית הזו את תיאורית הנפילה של אריסטו.

בהפריכו את הטיעון האריסטוטלי שגופים כבדים נופלים מהר יותר, שיחזר גלילאו את הטיעון של גיאנבטיסטה בנדטי [Benedetti]³³ משנת 1553, מתמטיקאי איטלקי בן וונציה שחי בשנים 1530-1590 (תרשים 21).

תרשים 21. ניסוי החשיבה של בנדטי: גוף קטן A אמור ליפול במהירות V_1 הקטנה ממהירותו V_2 של גוף גדול B. כשהם מחוברים, עליהם ליפול במהירות V_3 . אולם מהירות הנפילה המשותפת אמורה להיות, מצד אחד, קטנה מ- V_3 (מאחר ש-A מאט את נפילתו של B, ומצד שני גדולה מ- V_3 (מאחר ש-A+B גדולים מ-B – זוהי סתירה).



וכך הציג גלילאו את הסתירה הפנימית שבתיאוריה של אריסטו:³⁴

”סלביאטי: אם ניקח שני גופים שהמהירויות

הטבעיות שלהם שונות, ברור שעל ידי האיחוד שלהם המהירה תואט מעט על ידי האיטיות, והאיטיות תואץ מעט יותר על ידי המהירה. האם אתה מסכים איתי לגבי דעה זו?

סימפליציו: אתה צודק בוודאות.

סלביאטי: אך אם זה נכון, ואם אבן גדולה נעה במהירות של, נניח, שמונה, בזמן שקטנה נעה במהירות של ארבעה, אז כשהן מאוחדות, המערכת תנוע במהירות קטנה משמונה; אבל שתי האבנים כשהן קשורות יחדיו יוצרות אבן אחת הגדולה מזו שנעה קודם במהירות של שמונה. לכן, הגוף הכבד יותר נע במהירות קטנה מזה הקל; תופעה המנוגדת להנחה שלך. לכן אתה רואה כיצד, מתוך ההנחה שלך שהגוף הכבד נע מהר יותר מהגוף הקל, אני מסיק שהגוף הכבד נע לאט יותר.”

גלילאו ידע שאינו יכול להציג הסבר תיאורטי אחר עבור גופים נופלים – לא הייתה לו תיאוריה טובה יותר (כמו זו שסופקה מאוחר יותר על ידי ניוטון). לכן, הדבר הטוב ביותר שיכול היה לעשות היה לפסול את התיאוריה הישנה ולספק עדות ניסויית לעובדה שגופים נופלים ללא תלות בגדלם או בחומר ממנו הם עשויים (בהנחה שניתן להזניח את התנגדות האוויר).

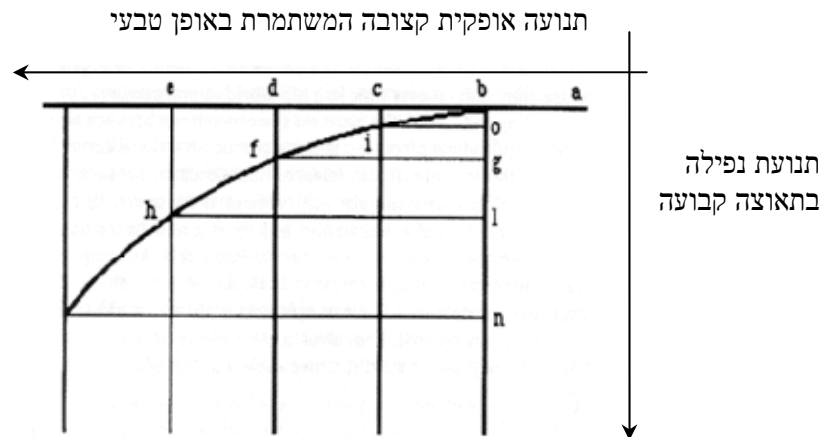
על תנועתם של קליעים

בעקבות שני ההישגים שתוארו קודם בהבנת התנועה: תנועת התמדה אופקית ותנועה מואצת (נפילה), ביצע גלילאו התקדמות גדולה נוספת – הסבר מלא לתנועתם של קליעים. הסבר זה הוצג בדיון של היום הרביעי, בספרו “דיאלוג על שני מדעים חדשים” שיצא לאור בשנת 1638. בפעם הראשונה בתולדות הפיזיקה קבע גלילאו שתנועת קליע מורכבת משתי תנועות: אופקית במהירות

³³ Gliozzi, M. (1965). *Storia della Fisica*. Vol.II, Storia della Scienze, Torino.

³⁴ Galilei, G. (1638/1914). *Dialogues concerning Two New Sciences*. Dover, New York, p. 63.

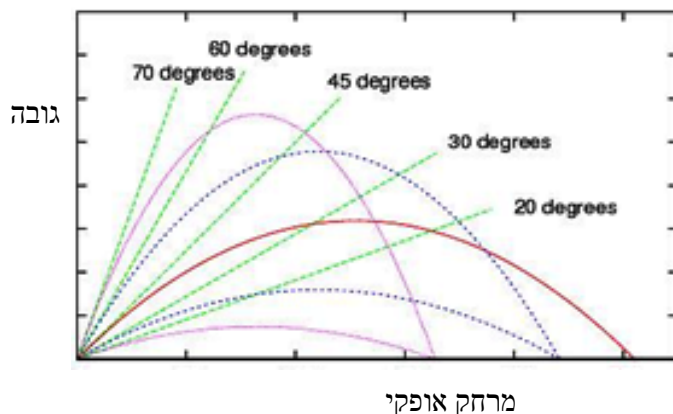
קבועה, ואנכית – נפילה בתאוצה קבועה. באחדו את השתיים קיבל גלילאו את הצורה המדויקת של המסלול – פרבולה (תרשים 22).³⁵



תרשים 22. תרשימו של גלילאו המייצג את בניית הפרבולה כמסלול התואם את השילוב בין התנועה האופקית הקצובה והתנועה האנכית בתאוצה קבועה.

באמצעות פיתוח מתמטי מדויק קיבל גלילאו את ההוכחה התיאורטית לזווית השיפוע בת ה- 45° עבורה יגיע הקליע למרחק המרבי. בנוסף, התגלתה תוצאה חדשה לחלוטין: קליע שייזרק בשתי זוויות המשלימות זו את זו ל- 90° יגיע לאותו המרחק (תרשים 23).

הבעיה של תנועת קליעים קיבלה טיפול מלא על ידי גלילאו. עם זאת, למרות היותו שלם, היה זה טיפול קינמטי בלבד. הסיבה מדוע סוג זה של תנועה מורכב משתי תנועות משני סוגים שונים (שוות מהירות ושוות תאוצה), המשיכה להעיק על המדענים, עד ההסבר הדינמי (השייך לקשר בין תנועה לכוח), במסגרת התיאוריה של ניוטון.



תרשים 23. מסלולים של קליעים הנורים בזוויות שונות ביחס לאופק. שימו לב למרחק השווה אליו מגיעים קליעים הנורים בזוויות המשלימות ל- 90 מעלות.

³⁵ Ibid, p.249.



רנה דקארט

רנה דקארט [Descartes] (1650-1596), פילוסוף-טבע צרפתי ידוע, הכיר את תוצאות מחקריו של גלילאו, אך העדיף כיוון אחר. גישתו הייתה לנסות לבנות תיאוריית תנועה חדשה המבוססת על רעיונות ראשוניים הנכונים באופן וודאי (לדעתו) ובאמצעות השימוש בלוגיקה אנליטית ובמתמטיקה, בין אם התוצאות יתאימו לעדות הניסיונית ובין אם לא. כל זמן שהכוונה היא להבין את הטבע, דרך זו יכולה להביא רק להצלחה חלקית.

דקארט ניסח את תפיסתו בחיבור מיוחד שנקרא: *עקרונות הפילוסופיה*, ושהודפס בשנת 1644. בחיבור זה ניסח את רעיונות הליבה ביחס לארגון המכני של החומר בטבע בשלושה חוקים, שכללו רעיונות חדשים על תנועתם של גופים חומריים. כפי שהתברר במהרה חלקם היו נכונים וחלקם התבררו כשגויים. ראשית, שלא כמו אריסטו, הגדיר דקארט את התנועה כ"מצב", מצב טבעי, וככזה נדרשת סיבה על מנת לשנותו, ולא סיבה לקיומו. כך כתב:³⁶

החוק הראשון של הטבע: כל גוף, הנעזב לעצמו, יתמיד כל הזמן באותו המצב; ולכן, מה שהוזז פעם, תמיד ימשיך להיות בתנועה.

דקארט נימק את הקביעה הזו ב"אי ההשתנות" של אלוהים, שאולי לא תשכנע את הלומד בן זמננו: מדוע יעדיף הבורא שלא לשנות דווקא מצב זה (תנועה) ולא מצב אחר (מנוחה, למשל)? עם זאת, התייחסותו של דקארט לתנועה כאל מצב של הגוף (ולא כאל תהליך), ובמילים אחרות, הכנסת המושג של תנועה התמדית (כמצב פשוט ובסיסי לא פחות מן המנוחה): תנועה ללא מניע, הייתה ניחוש נכון, ונותרה כעיקרון במכניקה הקלאסית.

באותו הזמן, תפיסת דקארט את התנועה כמשהו "המנוגד למנוחה", תאמה את התפיסה האריסטוטלית והייתה מנוגדת לעיקרון היחסיות של גלילאו, והייתה שגויה. עם זאת, הניגוד תנועה-מנוחה דווקא תאם את התפיסה הנאיבית של התנועה (המכונה לעיתים "השכל הישר").

כפי שהובן על ידי גלילאו, לא ניתן להבחין בין המציאות בתוך שתי מערכות של גופים הנעות כל אחת בתנועה קווית קצובה במהירויות כלשהן, הן שקולות. בדיוק באותה מידה, גם לא ניתן להבחין בין המציאות במערכת במנוחה ובין המציאות במערכת שנעה. תנועה ומנוחה מתקיימות יחדיו באותו הגוף בעיני צופים שונים.

החוק הראשון של דקארט לא היה מדויק דיו ביחס לסוג התנועה. בחוק השני חזר דקארט ודייק יותר:³⁷

החוק השני של הטבע: כל תנועה היא קווית מטבעה; ולכן מה שהונע במעגל ישאף תמיד להתרחק ממרכז המעגל אותו הוא מתאר.

³⁶ Descartes, R. (1644/2004). *The Principles of Philosophy*. Kessinger Publishing, Montana, Part II.

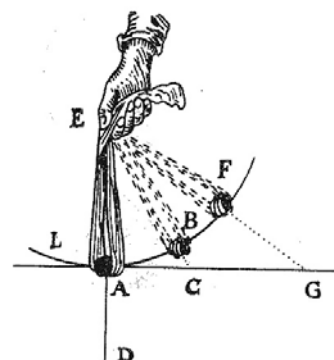
³⁷ *Ibid.*

בחוק השני של הטבע, מפרט דקארט את סוג התנועה שנוטר בלתי משתנה כל זמן שאין סיבה לשנותו – התנועה הקווית. בכך באה לקיצה התפיסה העתיקה שתנועה מעגלית קבועה מייצגת מצב טבעי נצחי הנשמר ללא כל סיבה, ומודגם בתנועתם של כוכבי הלכת. דקארט מנמק זאת שוב על ידי "הפעולה הבלתי משתנית ופשטות הפעולה, באמצעותם אלוהים משמר את התנועה בחומר". בהתייחסות להשתמרות התנועה הקווית מנמק דקארט באמרו:³⁸

"הוא [אלוהים] אינו משמר את התנועה בכל דרך שאינה מדויקת ברגע הזמן אותו הוא משמר, אך ללא קשר למה שהיה אולי רגע לפני. למרות ששום תנועה אינה מתרחשת מיידית, ברור כי כל מה שמוזז, ברגע המדויק שניתן לציין שהוא אז, הוא נקבע להמשיך בתנועתו לכיוון מסוים לאורך קו ישר, ולעולם לא לאורך קו עקום."

ניתן להבחין כאן בנימוק הפונה אל מרווחי זמן קטנים. כשהגוף משוחרר ב-A עומדות בפניו שתי אפשרויות: להמשיך לאורך ACG (תרשים 24) או לסטות לאורך ABF. דקארט קובע כי המסלול הראשון הוא הטבעי ומציג את אותו המצב, והמסלול השני משנה את המצב, ולכן דורש סיבה מיוחדת (הקלע והיד) לכך:³⁹

"למשל, אבן A, המסובבת קלע EA סביב מעגל ABF, ברגע שהיא בנקודה A היא "מחליטה" לנוע בכיוון מסוים, כלומר לאורך הישר לכיוון C, כך שהקו הישר AC משיק למעגל. אך לא ניתן לגרום שהיא תחליט לנוע תנועה עקומה כלשהי; משום, שגם אם קודם היא באה מ-L ל-A לאורך קו עקום, דבר מעקמומיות זאת לא יכול להישאר בה כשהיא בנקודה A. זה מאומת גם על ידי הניסיון, משום שאם היא תעזוב את הקלע אז, היא לא תמשיך לנוע לכיוון B אלא לכיוון C. מכאן נובע שכל מי שנע במעגל, ישאף לנצח להתרחק מהמרכז של המעגל אותו הוא מתאר. אנו חווים זאת באמצעות חוש המישוש באבן שאנו מניעים במעגל, בעזרת קלע."



תרשים 24: תרשים של רנה דקארט המדגים את החוק השני של הטבע.

כמו בחוק הראשון, חסר לנו עדיין הביטוי "אחידה" לגבי התנועה של הגוף, הנדרש למען הדיוק. עם זאת, הבה לא נשכח כי גלילאו היה מורגל עדיין לחשוב על תנועת התמדה מעגלית.⁴⁰ דקארט דחה בפירוש רעיון זה; הוא העניק לתנועה הקווית מעמד מיוחד: רק תנועה כזו משתמרת כהתמדת.

היבט אחר נוגע בכוחות הפועלים. החוק של דקארט מכוון אל הנטייה של הגוף הנאלץ – על ידי הקלע – לנוע במסלול מעגלי. ברגע שהגורם המאלץ את התנועה המעגלית (הקלע) מפסיק

³⁸ Ibid.

³⁹ Ibid.

⁴⁰ Galileo, G. (1613/1957). *Letters on Sunspots*, trans. S. Drake 1957, in *Ideas and Opinions of Galileo*, Doubleday.

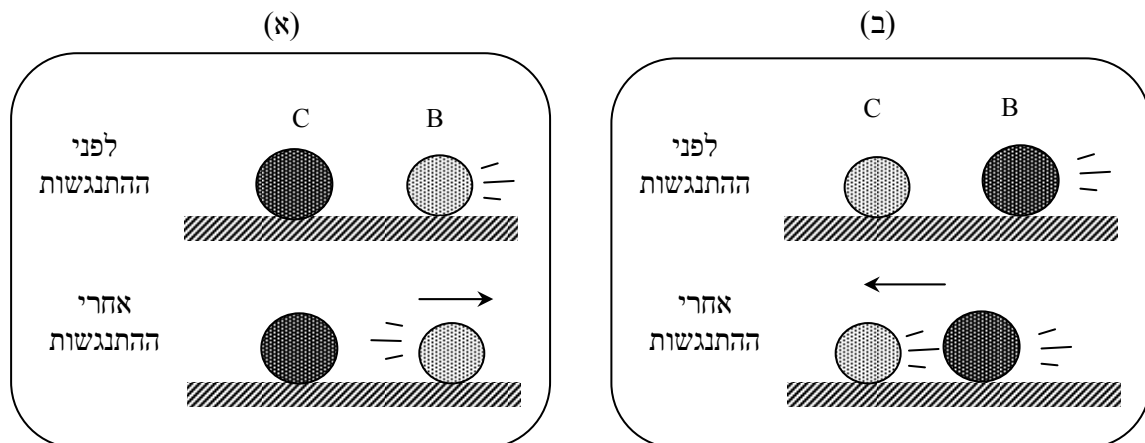
להשפיע על האבן, היא תמשיך בכיוון משיקי. הגישה הזו של דקארט – להתייחס לנטייה – אומצה גם על ידי ניוטון, שבאותה רוח של דברים קבע בספרו עקרונות, בשנת 1687:⁴¹

”כל גוף מתמיד במצב של מנוחה או תנועה קצובה בקו ישר קדימה במידה שאינו מאולץ לשנות מצב זה על ידי כוחות המופעלים עליו.”

כפי שאנו רואים, ניוטון אינו מדבר פשוט על היעדר כוח, אלא בדומה לדקארט, יותר על הנטייה להתמיד במצב המנוחה או התנועה במהירות קבועה המצליחה במידה שהכוחות החיצוניים מתבטלים.

לבסוף, מנסח דקארט את חוק התנועה הנובעת מאינטראקציה בין גופים, אשר מבחינתו יכולה הייתה להיות רק כתוצאה ממגע, ובמיוחד, בהתנגשות:⁴²

החוק השלישי של הטבע הוא זה: כאשר גוף נע פוגש אחר, אם יש לו פחות כוח על מנת להמשיך בקו ישר מאשר לאחר יש כדי להתנגד לו, אז הוא יפנה לאחור [תרשים 25א], בשומרו על כמות התנועה, ומשנה רק את ההחלטיות שלו לנוע. אם, יש לו כוח גדול יותר [תרשים 25ב], אז הוא יניע את הגוף האחר יחד איתו ויאבד כמות תנועה השווה לזו שהוא מעניק לאחר.”



תרשים 25. הייצוג הסכמטי של חוק התנועה השלישי של דקארט. החוק מכוון אל שני מקרים אפשריים שונים (א') ו-(ב') בהתאם ליחס בין "כוחות התנועה" של הגופים המתנגשים.

דקארט קבע כאן חוק מרכזי בפיזיקה, שמאז מקושר לשמו – שימור כמות התנועה, או במונחים שלנו, שימור התנע. עם זאת, התנע, או כמות התנועה, נתפס אצל דקארט כגודל סקלרי – התברר שזו טעות. אם נרצה לייצג רעיון זה מתמטית, נוכל לכתוב:

$$\sum_{in} mv_i = \sum_{fin} mv_f \quad (14)$$

⁴¹ Newton, I. (1687/1999). *The Principia. Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Translated by B. Cohen & A. Whitman. University of California Press, Berkeley, CA.

בתרגומו של קרילוב לרוסית, החוק הראשון הופיע בצורה כוללנית יותר מאשר זה שהופיע באנגלית: "כל גוף ממשיך להתמיד במצב של מנוחה או תנועה קצובה בקו ישר, עד אשר ובמידה שהוא לא מאולץ לשנות מצב זה על ידי כוח הפועל עליו."

⁴² Descartes, R. (1644/2004), *op.cit.*

אי הוודאות באינדקסים של המהירויות היא כתוצאה מההפרדה שנקט דקארט בחוק ההתנגשויות בין שני מקרים: התנגשות של גוף בעל "כוח תנועה" קטן יותר עם הגוף בעל כוח "תנועה קטן" יותר ולהפך. בהמשך מעדן דקארט את החוק הזה באמצעות שבעה מקרים מיוחדים: כללי ההתנגשות.⁴³

וכך, במקרה א' מתאר דקארט מצב ובו לגוף B, המתנגש עם גוף C, פחות "כוח תנועה". ואז, טוען דקארט, גוף C מתנגד ב"כוח גדול יותר". כתוצאה, C אינו משנה את מצבו, ו-B מוחזר לאחור באתה מהירות (בגודל) שהייתה לו (וכך נשמרת כמות התנועה, כפי הגדיר דקארט). זוהי טענה שגויה לחלוטין. המציאות מתקרבת לתסריט זה כאשר גוף קטן מתנגש עם "הקיר" (גוף בעל מסה גדולה במיוחד, יחסית). בהנחה מיוחדת זו חוק שימור תנע יכול להיראות, כאילו, כמשמר כמות התנועה "הסקלרי" mv. יתכן שתצפית זו כיוונה דקארט להכללה השגויה: גוף B, בעל תנע פחותה, לא יוכל לשנות מצבו של גוף C.⁴⁴

עתה לגבי מקרה ב', שגם הוא מוזר ושגוי. במקרה זה, לגוף B כוח תנועה גדול יותר והוא מחייב גוף C לשנות את מצבו. דקארט טוען שבמקרה זה שני הגופים ממשיכים במהירות שווה כזאת שכמות התנועה הכללית של שני הגופים תשמר ותהיה כמו זו של גוף B לפני ההתנגשות. כאמור, גם זו מסקנה שגויה, שאינה תואמת את המציאות.

בהמשך, דקארט טען טענה נכונה: בהתנגשות סימטרית לחלוטין הגופים נפרדים בכיוונים הפוכים לתנועתן המקורית (כלל 1). בכל יתר המקרים של התנגשויות לא סימטריות טעה דקארט במסקנותיו, למרות שהיה משוכנע בצדקתו לגבי כל מצב:⁴⁵

" כל המקרים המיוחדים של התנגשות הגופים והסיבות לשינויי מצבם בתנועה כלולים בחוק השלישי, או לפחות אלו שהם פיזיקליים; משום שאיננו חוקרים כאן אם, ובאיזה דרך, יש למחשבות אנושיות או מלאכיות את הכוח להזיז גופים, אלא משאירים טיפול בנושא זה לחיבור אחר שלנו – 'על האדם' "

כפי שניתן לראות, הרחיק דקארט מהדיון בהתנגשויות כל השפעה ש"אינה פיזיקלית", ושלהשקפתו כללה התערבות של "אדם או מלאך". בכל המקרים, דקארט היה עקבי בעקרונותיו השגויים: הוא הפריד באופן מהותי בין מצב של מנוחה ובין מצב של תנועה (ובכך הפר את עקרון היחסות של גלילאו), הוא התייחס באופן שונה להשפעה של גופים אחד על השני בהתאם ל"כוח התנועה" שבגוף (ובכך הפר את חוק השלישי של ניוטון), והוא שמר על כמות התנועה כגודל סקלרי (ללא כיוון, כלומר הפר את אופי הווקטורי של תנע).

עם זאת, הפריד דקארט, בצדק, בין התנגשויות של גופים קשים ורכים; כשכל אחת דורשת הסבר אחר. דיכוטומיה זו של התנגשויות נשמרה בפיזיקה. למרות שהכללים שלו מתייחסים להתנגשויות בין גופים קשים, העיר דקארט הערה באשר לגופים רכים. הערה זו התבררה כשגויה גם כן: התנגשות לא אלסטית אינה מחייבת את עצירת הגופים:⁴⁶

⁴³ יתר פירוט ביחידה נפרדת באוסף זה של חומרי למידה.

⁴⁴ Descartes, R. (1644/1983). *Principles of Philosophy*. Reidel Publishing Co., Dordrecht, p. 66.

⁴⁵ *Ibid.*

⁴⁶ *Ibid.*

”... כשהם [גופים נעים] פוגשים גוף רך, שאליו הם יכולים בקלות להעביר את תנועתם, הם מייד נעצרים.”

כפי הנראה תיאר דקארט במחשבתו את הפיזור של התנועה של גוף בתווך ”רך”, כמו כשכדור קשה מתגלגל בחול.

על תנועתם של קליעים

בספרו עקרונות הפילוסופיה, מתייחס דקארט אל הנושא המסורתי של תורת התנועה – תנועת קליעים. לאחר הצלחתו של גלילאו בטיפול בנושא זה, נראה הסברו של דקארט חלש ובלתי משכנע: ⁴⁷

”ברור כי הניסיון היומיומי בוריקת עצמים מאשר במלואו את הכלל שלנו. משום שאין סיבה אחרת מדוע גופים הנזרקים ימשיכו בתנועתם במשך כל הזמן לאחר שהופרדו מהזורק, מהסיבה שברגע שהניעו אותם הם נשארים בתנועה עד אשר הם מואטים על ידי גופים המתנגדים להם. וברור שהם בדרך כלל מואטים בהדרגה על ידי האוויר, או גופים גמישים אחרים בתוכם הם נעים, ולכן תנועתם לא יכולה להמשך לאורך זמן. אנו יכולים לחוש את האוויר מתנגד לתנועה של גופים אחרים באמצעות חוש המגע שלנו, אם נכה בו במניפה; מעוף הצפרים גם מאשר את אותו הדבר. ואין שום זורם אחר שלא מתנגד לתנועתם של קליעים, אפילו באופן ברור יותר מהאוויר...”

מתוך החוק הראשון שלו מסיק דקארט את התשובה לשאלה שהתשובה עליה הייתה קשה לאריסטו: מדוע אבן ממשיכה לנוע גם אחרי שהיא עוזבת את ידו של הזורק. המנגנון המיוחד של אריסטו המסתמך על מערבולות האוויר – *antiperistasis* – נדחה על ידי העיקרון של שימור מצב התנועה (או כמות התנועה), והאוויר נחשב כגורם המעכב את התנועה בלבד. דקארט, למרות שפעל אחרי גלילאו, לא סיפק הסבר כולל לתנועת קליעים כמו שעשה גלילאו (מסלול, שינוי המהירות, תאוצה), ונותר ברמה הכללית ביותר של ההבנה. גישה זו לא הספיקה משום שדקארט החשיב את התנועה כגודל סקלרי. זה מנע ממנו לפצל את התנועה של הקליע לשני רכיבים השונים מהותית: אופקי התמדתי ואנכי מואץ. מסיבה זו לא הושג כל תיאור כמותי מדויק של תנועת הקליעים.



איזיק ניוטון

ההפרכה הסופית של תיאוריות התנועה הקדומות – ניוטון

בסופו של דבר, תיאוריית התנועה החדשה התבססה במאה ה-17, הודות לתרומתו של ניוטון [Newton] (1643-1727) – פיזיקאי אנגלי יוצא דופן ביכולתו כתיאורטיקן וכניסיונאי כאחד. הוא אשר ייסד את תחום הדעת אותו אנו מכנים ”מכניקה קלאסית”.

בהיותו סטודנט בגיל העשרה באוניברסיטת קיימברידג' למד ניוטון בקפדנות כל מילה בחיבורו של דקארט ”עקרונות הפילוסופיה”, העתיק

⁴⁷ Ibid.

אותו למחברתו ורשם הערות. ניוטון הסתמך על התוצאות הקודמות שהתקבלו במסגרת תיאוריות התנועה של ימי הביניים וגם על אלו של המהפכה המדעית של המאה ה-17, על ידי מדענים שונים: גלילאו, קפלר [Kepler], דקארט, הוק [Hooke] והויגנס [Huygens].

שלא כמו הגישה האיכותנית של דקארט שכשלה בהסבר הקביעות המתמטיות המדויקות של קפלר בדבר תנועת כוכבי הלכת, ניוטון הצליח בכך, לאחר ויכוח קשה עם הוק, שהתנהל בחברה המלכותית של לונדון. התיאוריה החדשה הוצגה בשנת 1687 בחיבור שהפך לאבן פינה בתרבות האנושית – "העקרונות המתמטיים של פילוסופיית הטבע" [*Mathematical Principles of Natural Philosophy*] – תשובתו של ניוטון ל"עקרונות הפילוסופיים" של דקארט. ניוטון החל את הדיון שלו עם דקארט כבר בכותרת: "עקרונות מתמטיים" במקום "עקרונות", ו"פילוסופיית הטבע" במקום "פילוסופיה".

כבר בהתחלה הציג ניוטון את חוקי התנועה שלו, שהחליפו את כל החוקים שהוצגו עד כה, מאריסטו ועד דקארט. הנה הם כאן, בהשוואה אלו לאלו:

חוקי הטבע ב"עקרונות" של ניוטון ⁴⁸	חוקי הטבע ב"עקרונות" של דקארט
<p><u>חוק I</u>. כל גוף מתמיד במצב של מנוחה או תנועה קצובה בקו ישר, במידה שאינו מאולץ לשנות מצב זה על ידי כוח הפועל עליו.</p> <p><u>חוק II</u>. שינוי בתנועה הוא פרופורציוני לכוח המניע המופעל, ומתקיים לאורך הקו הישר לאורכו כוח זה פועל.</p> $\Delta(mv) \propto F$ <p><u>חוק III</u>. לכל פעולה קיימת תמיד תגובה שווה ומנוגדת; במילים אחרות, הפעולות של שני כוחות זה על זה הן תמיד מנוגדות בכיוונם.</p>	<p><u>חוק התנועה הראשון של הטבע</u>: כל גוף, הנעזב לעצמו, יתמיד כל הזמן באותו המצב; ולכן, מה שהוזז פעם, תמיד ימשיך להיות בתנועה.</p> <p><u>החוק השני של הטבע</u>: כל תנועה היא קווית מטבעה; ולכן מה שהונע במעגל ישאף תמיד להתרחק ממרכז המעגל אותו הוא מתאר.</p> <p>"<u>החוק השלישי</u>: כאשר גוף נע פוגש אחר, אם יש לו פחות כוח על מנת להמשיך בקו ישר מאשר לאחר יש כדי להתנגד לו, אז הוא יפנה לאחור בשומרו על כמות התנועה ומשנה רק את ההחלטיות שלו לנוע. אם, יש לו כוח גדול יותר, אז הוא יניע את הגוף האחר יחד איתו ויאבד כמות תנועה השווה לזו שהוא מעניק לאחר".</p> $\sum_{in} mv_{\gamma} = \sum_{out} mv_{\gamma}$

מה היו השינויים העיקריים אותם הציג ניוטון בחוקים שלו? השינויים היו רבים ומהותיים:

1. החוקים הראשונים של שני המלומדים, דקארט וניוטון, עשויים להראות די דומים. עם זאת, מבט קרוב יותר חושף הבדלים מהותיים.⁴⁹ החוק של ניוטון כולל את הקשר של גוף

⁴⁸ Newton, I. (1687/1999). *Op.cit.*

לכוח הפועל עליו ומתארים את הנטייה של הגוף לשמר את מצבו – תנועה קצובה בקו ישר או מנוחה – בכל רגע. מצבים אלו, תנועה קצובה בקו ישר או מנוחה מיוחסים כשווי ערך לחלוטין, שלא כמו אצל דקארט. זהו היה שינוי פרדיגמה בידע הפיזיקלי, שהפך להיות בין המאפיינים המרכזיים של הפיזיקה המודרנית.

2. החוק השני והשלישי של דקארט הורחקו לחלוטין על ידי ניוטון. במידה מסוימת, החוק השני של דקארט צורף לחוק הראשון, ובאופן כללי, הפך למקרה פרטי של החוק השני של ניוטון. החוק השלישי של ניוטון הוחלף לטענה של פעולה הדדית בין הגופים באמצעות כוחות, לא בהכרח דרך התנגשויות (כמו במקרה של כבידה). כל ה"נטייות" הוחלפו על ידי כוחות אינטראקציה.

באשר לחוק השלישי של דקארט שקבע שימור של (כמות) התנועה, הוא שונה מיסודו. העיקרון של שימור כמות התנועה (הפעם זהו גודל הרגיש לכיוון התנועה – גודל וקטורי במושגים של היום) נקבע במסקנה III מחוק השני של ניוטון:⁵⁰

"כמות התנועה, המתקבלת על ידי סיכום התנועות המכוונות אל אותם החלקים, וההפרש של אלו שמכוונות לחלקים מנוגדים, אינה עוברת כל שינוי מהפעולה ההדדית של הגופים ביניהם לבין עצמם."

שינוי זה כלל במפורש את הדרישה (וגם את המושג) החדשה – על מערכת הגופים להיות סגורה, כלומר מבודדת מהשפעה חיצונית. זהו צעד ענק לקראת תורת תנועה בשלה ומתוחכמת יותר.

3. הטעות היסודית של דקארט, שהחשיב את האינטראקציה בין גופים כתהליך לא סימטרי (במונחים של "מנצחים" ומפסידים) הוסרה על ידי ניוטון בחוק השלישי. ייתכן כי ניוטון קבע טענה זו כחוק נפרד רק בגלל הויכוח עם דקארט. שלא כמו החוקים הקודמים שלו, שהוצגו כאקסיומות (כלומר ללא הוכחה), ניוטון מוכיח את החוק השלישי בהתבססו על הראשון.⁵¹ האינטראקציה בין כל שני גופים נקבעה כסימטרית באופן מוחלט: כל כוח פועל בין שני גופים ומלווה בכוח השווה בגודלו: פעולה ותגובה, אשר שווים בגודל והפכים בכיוון.

שלא כמו החוקים של דקארט, התאימו חוקי ניוטון באופן כמותי לניסיון במצבים פיזיקליים רבים, ולכן העדיפו אותם המלומדים, על פני אלו של דקארט. התוצאות האמפיריות והתצפיות התאימו למכניקה של ניוטון בדרגת דיוק גבוהה.

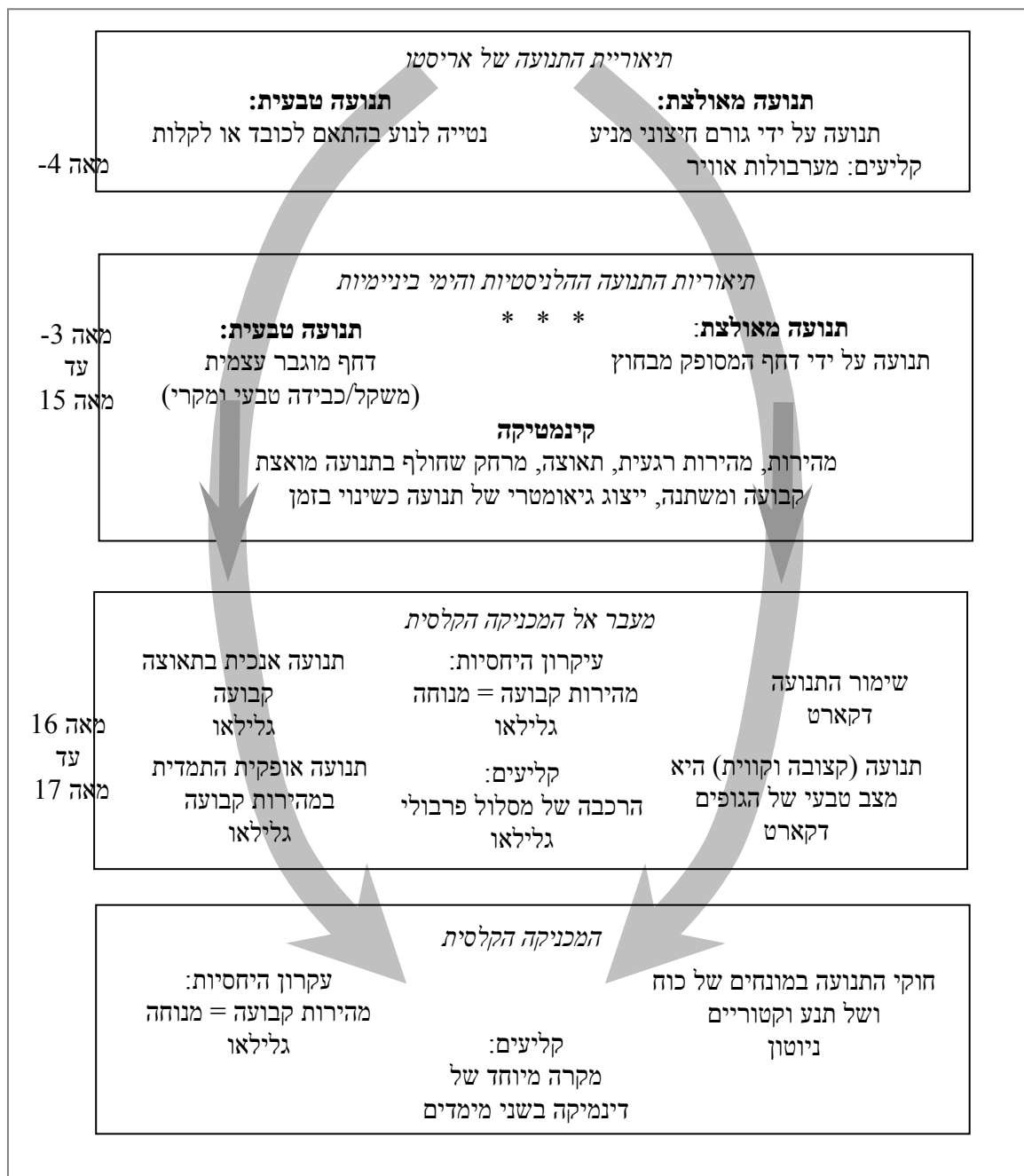
התיאוריה של ניוטון ביססה את המכניקה הקלאסית, שהחליפה את התיאוריות הקדומות של התנועה. כאמור, כל זה התרחש במאה ה-17, ומאז נמשך הפולמוס בין תפיסה זו של ניוטון והתפיסות שקדמו לה. אך הפעם זירת הוויכוח היא כיתת הפיזיקה.

⁴⁹ Galili, I. & Tseitlin, M. (2003). Newton's first law: text, translations, interpretations, and physics education. *Science and Education*, 12 (1), 45-73.

⁵⁰ Newton, I. (1687/1999). *Op.cit.*, p.420.

⁵¹ Newton, I. (1687/1999). *Op.cit.*, p.428.

אנו יכולים לסכם את הנקודות המרכזיות שנדונו במהלך מסע זה להכרת ההתפתחות של תיאוריית התנועה במשך אלפיים שנה: מאריסטו לניוטון. ניתן לעשות זאת בעזרת תרשים הזרימה הבא: שימו לב לשני קווי התפתחות הנפרדים של הבנה לגבי התנועה הטבעית והמאולצת, אשר אוחדו במסגרת הסבר אחד כולל רק על ידי ניוטון.



* * *

רקע היסטורי ופילוסופי הכולל את טבע המדע

מעקב אחר ההתפתחות ההיסטורית של תיאוריות התנועה חושף שלושה מעברים מהותיים של התקדמות בידע. תיאוריות אלו זיהו סוגים שונים של תנועה ותיארו אותם במסגרת תיאורטית כללית. שלוש התיאוריות של התנועה שנוסדו היו: ההלנית (התיאוריה של אריסטו), ההלניסטית-ימי ביניימית (תיאוריית הדחף), והמכניקה הקלאסית (של ניוטון). כל אחת משלוש התקופות ראתה את התנועה בפרספקטיבה אונטולוגית ואפיסטמולוגית שונה. נתייחס אליהן כאן. ראשית, בקשר לאונטולוגיה, ניתן לזהות שלושה שלבים של תפיסה.

תנועה כהגשמה (מימוש)

בהתאם לאריסטו, תנועה של גופים בעולם הארצי, כפי שכבר תואר, יכולה להיות משני סוגים: *תנועה טבעית ומאולצת*. הסוג הראשון מתרחשת באופן ספונטני – ללא סוכן כלשהוא אשר נמצא במגע עם הגוף. התנועה נוצרת, למשל, כאשר הופר סדר היסודות ביחס למרכז העולם (בעולם תת-ירחי, האבן מועלת לגובה מסוים ואז משוחררת) או על פי הסדר הטבעי של העולם (בעולם על-ירחי, כתנועת כוכבי הלכת). בתנועה מאולצת, תמיד היה נוכח גורם חיצוני לגוף, המכריח אותו לנטוש את מצב מנוחה ולנוע. כלומר, עצם התנועה מעידה על קיום איזושהי סיבה פוטנציאלית אשר התממשה כאשר נוצרה התנועה. לכן ראה אריסטו את התנועה כהגשמה של פוטנציאליות, *תהליך של מימוש*.

תנועה כפעילות הנטענת בגוף

באופן כללי, הקוסמוס היווני נשמר בתקופת ימי הביניים, למרות שהמלומדים התרחקו מאריסטו בנקודות רבות, ואף ביקרו אותו. כך קרה בתורת התנועה. בפיזיקה החדשה של הדחף, הסיבה לתנועה המאולצת הייתה כבר מקומית (בלתי תלויה בסדר העולמי) ומוקמה בתוך הגוף עצמו. הדחף, כסוג של מטען, מספק תכונה לגוף, היכולה להגביר את עצמה (כך בנפילה) או להתבזבז (עקב התנגדות התווך).

באשר לתנועה מאולצת, דרש אריסטו קיום של מגע בין הגוף הנע לבין הגורם המניע אותו מבחוץ. למעשה קיום השרשרת דחף-נדחף שללה את אפשרות קיומו של הריק. עם הכנסת הדחף פנימה אל תוך הגוף, ננטש המנגנון האריסטוטלי של מערבולות האוויר, מבלי שיהיה בו כל צורך. הריק נעשה אפשרות הגיונית. מושג הכוח ללא קשר לגורם המפעיל אותו, ניכנס לשימוש בפיזיקה. מערך של כוחות הפך לאפיון עיקרי של מערכת הגופים בפיזיקה הניוטונית, שלא כמו הניגוד בין מנוחה לתנועה שנשמר בתיאוריית הדחף והורחק ממנה עקב הביקורת מאוחר יותר. שימו לב לרעיונות שאפשרו הקמת הפיזיקה הקלאסית.

תנועה כמצב

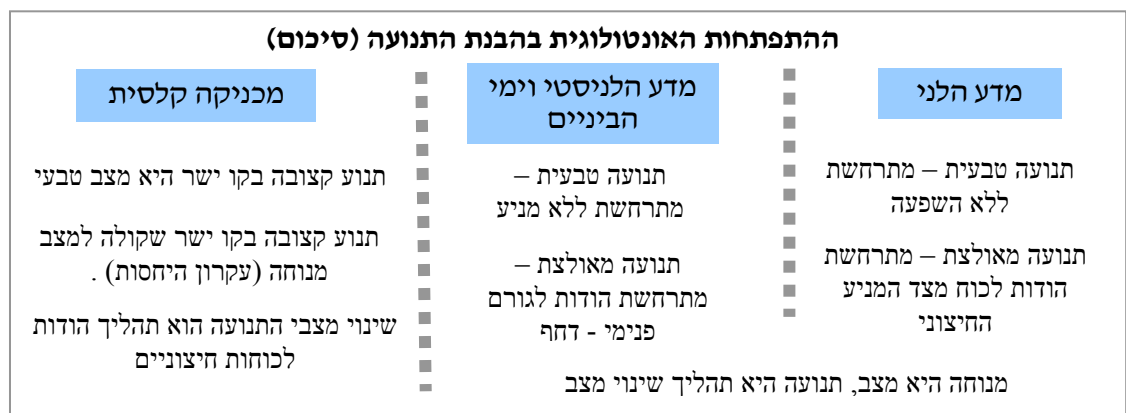
בפיזיקה הקלאסית, תנועה קצובה בקו ישר של גוף הפכה להיות מצב טבעי, ולכן אינה דורשת עוד סיבה, שלא תלויה בגוף עצמו. לעומת זאת, הנפילה ה"טבעית" שנתפסת כתנועה טבעית ולא דרשה שום גורם, הפכה לתנועה הנגרמת על ידי כוח המשיכה. ההתמדה (מסה התמדית) הוסברה כתכונה שמביאה עצמה לביטוי בהתנגדות לשינוי במצב של התנועה הטבעית (תנועה קצובה בקו ישר או מנוכה). כל תנועה שאינה קצובה ובקו ישר או מנוחה נחשבה כתהליך שינוי

של מצבים שונים המתבטא בתאוצה של הגוף. השינוי במצב התנועה הוסבר כנגרם על ידי אינטראקציה עם גופים אחרים – כוחות.

כפי שצוין על ידי קוירה [Koyre⁵²] שני שינועים קרדינליים מאפיינים את המפכה המדעית של המאה ה-17. ראשית, הרס הקוסמוס היווני, כלומר החלפת העולם הסופי, המסודר באופן היררכי של אריסטו ושל ימי הביניים ביקום אינסופי המכיל ריק ומסות נקודתיות, והנשלט על ידי חוקים אחידים (הפרדיגמה של ניוטון). שנית, הפיכת המרחב לגיאומטרי, כלומר החלפת המרחב המוחשי של אריסטו (מצבור של "מושבים" במליאה) במרחב אוקלידי מופשט – בו הריק נתפס כישות ממשית.

המאפיין החשוב ביותר של תיאוריית התנועה החדשה היה שהעולם על כל הגופים בו נתפס כמצוי בתוך מרחב מוחלט, אינסופי וריק (וכן זמן מוחלט). התנועה בחלל זה ייסדה את התנועה המוחלטת. עם זאת, ניוטון הכיר שבאופן מעשי, לא ניתן להתייחס למיקום ולתנועה של גוף אלא ביחס לגופים אחרים. עם זאת, ניוטון סיפק את העידות למרחב המוחלט בניסוי המחשבה שלו, בדלי המסתובב עם המים בתוכו.⁵³ על אי התקפות של הטענות הזו בפיזיקה הצביע א. מאך אחרי שלוש מאות שנה בספרו *The Science of Mechanics* שפורסם בשנת 1889 ווישר על התפיסה של פיזיקה המודרנית. מאך הצביע על ההזנחה הבלתי מוצדקת של נוכחותם של עצמים מסביב, כולל הכוכבים הרחוקים.

לאור הצורך להסביר את התנועה ההתמדית, היה חשוב למכניקה של ניוטון להפריד, מבחינה אונטולוגית, בין הכוחות הפנימיים והחיצוניים. ההתמדה הייתה מקושרת אל "כוחות פנימיים", והגרביטציה, האינטראקציה עם גופים אחרים – אל כוחות חיצוניים. איינשטיין, גם הוא בניסוי המחשבה המפורסם שלו בדבר המעלית המואצת, הראה את השקילות הפיסיקלית של התמדה וכבידה.⁵⁴ הואיל והתמדה ייצגה תכונה פנימית של הגופים, וכבידה – תכונה חיצונית, העמידה הגישה של איינשטיין בשאלה את עצם הרעיון של ההפרדה בין גורמים חיצוניים לפנימיים לשינויי תנועה. כך, למעשה, בוטל גם הרעיון של המרחב המוחלט של ניוטון. בעולם החדש, המתואר על ידי הפיזיקה המודרנית, זו של איינשטיין, המושג של מרחב מוחלט אינו מוצדק: כל התנועות וכל חוקי התנועה מנוסחים במושגים של תנועה יחסית. נסכם את ההתפתחות האונטולוגית בהבנת התנועה:



⁵² Koyre, A. (1968). *Metaphysics and Measurement: Essays in Scientific Revolution*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.

⁵³ Newton, I. (1687/1999). *Op. cit.*, pp. 412-413.

השינוי האפיסטמולוגי: השיטה המדעית

מסע זה מציג את ההתפתחות ההיסטורית של תיאוריית התנועה. במקביל להתפתחות אונטולוגית בהבנת התנועה התרחש שינוי מהותי אפיסטמולוגי. למעשה, שלוש תקופות בהן שלטו מסגרות שונות להבנת התנועה, כפי שצוינו, התאפיינו על ידי שלוש מסגרות אפיסטמולוגיות שונות למדי.

המדע היווני העתיק

באותה תקופה המלומדים חשבו על העולם כתופעות מתרחשות הודות לסיבות (עקרונות וחוקיות) שעמדו מאחורי הדברים וניסו לגלותם. כזה היה מדע הראשוני – מדע הלני. הוא הפריד עצמו לחלוטין מעולם המעשה שנחשב כסובייקטיבי וככפוף לרצון הפרט. המדע התבונן מעבר לניטור הפשוט של הדברים, וניסה לראות את הבלתי ניתן לשינוי שמאחורי השינויים הנצפים. המדענים ניסו לחפש את המהויות הקבועות, האידיאליות. בתהליך ההתבוננות במציאות המשתנה, ניסו המדענים לנחש ולחשוף מהי מהותו של הקוסמוס, היקום המסודר, המאורגן המושלם בו לכל דבר יש את מטרתו, מקומו ויעדו. זו לא הייתה משימה קלה בעולם המלא שינויים. אפלטון נמנע מלבנות תיאוריה של תנועה בגלל המורכבות בתיאור של השינוי במונחים מתמטיים. אריסטו בחר בדרך אחרת וניסה להבחין ולהפריד בין המתמטיקה והפיזיקה. השאיפה של המדע האריסטוטלית הייתה להבין את העולם דרך רעיונות (עקרונות) בלתי משתנים ולנתח אותם על ידי הפעלת הכללים להסקת מסקנות, להיות קפדני וזהיר, תוך ביטול גורמים לא מהותיים ומטעים.

המדע של ימי הביניים

במהלך התקופה הזו, כל העצמים הקיימים ובכל ההיבטים האפשריים שלהם, הובנו מבחינת המדע בהקשרם לאלוהים. המדע של ימי הביניים בחן את האפיסטמולוגיה האריסטוטלית באמצעות התיאולוגיה. משמעויותיהן של התופעות הנבדקות נבחנו בהקשר שלהן לרעיון ולעיקרון מרכזי – אלוהים. לכן, לדוגמא, בדיון על קיומו של הריק, לטיעונים של אריסטו התאספו טיעונים תיאולוגיים כמו: האם זה תואם לשכל האלוהי לצור שום דבר? מהי התועלת העליונה בכך? וכך, אנשי המדע היו בו בזמן גם תיאולוגים, והמדע היה שזור במושגים וברעיונות תיאולוגיים.

אך למרות שסמכות האל הייתה חזקה מזו של אריסטו, זה האחרון יכול היה לומר הרבה יותר על העולם ועל העקרונות עליהם עולם זה היה מושתת ("מתוכנן" – על פי השקפתם של הפילוסופים הסכולסטיים). לכן, הטקסטים של אריסטו הפכו למקור ההכרחי של הידע המדעי בימי הביניים, חשובים יותר מהמציאות עצמה.

ההתקדמות האפיסטמולוגית החשובה בהבנת התנועה התבצעה בימי הביניים. המלומדים דנו וניתחו תכונות ייחודיות של הגופים בניתוק מגופים עצמם. תנועה חדלה להיות תהליך מימוש הסיבות, כפי שטען אריסטו, אלא יותר ביטוי לתכונה מיוחדת של הגופים – דחף.

⁵⁴ במידה מסוימת של צדק, ניתן להגיד שבנושא זה הוינגס הקדים את איינשטיין. על כך הראו את היחידה על כוחות ההתמדה באוסף זה.

במיוחד הייתה פריצת דרך בקינמטיקה – התיאוריה המתארת את התנועה. בזכות התרומה של ג'ררד מבריסל, אורם מפריז ואסכולת מרטון האנגלית מאוקספורד, תוארה התנועה במונחים חדשים שאפשרו את תיאורה הכמותי. בין התוצאות המרכזיות היו: העלאת השאלה בדבר המהירות הרגעית, מושגים של מהירות ממוצעת, תאוצה, תנועה קצובה ותנועה משתנה באופן אחיד, התלות הפונקציונלית של המרחק שעובר הגוף בתנועה המשתנה באופן אחיד (משפט המהירות הממוצעת). ההתקדמות המאוד חשובה של אורם הייתה הייצוג הגרפי של תנועה. כל התוצאות הללו, למרות שלא יושמו לתופעות מציאותיות (זו היה על סדר היום של המהפכה הבאה), אומצו על ידי המדענים בתקופות מאוחרות. תוצאות אלו ייסדו בסיס מושגי והיוו קדימונים לתוצאות הדומות, ולעיתים זהות, של גלילאו, דקארט וניוטון, לאחר המהפכה המדעית של המאה ה-17.

המדע המודרני

במהפכה המדעית של המאה ה-17 ואילך, בתקופת המדע הקלסי, השתנתה שוב מסגרת הטיפול בתנועה. ניתן לייצג שינוי זה כפיתוח וסינתזה מאוזנת של אפיסטמולוגיות מתקופות קודמות. אם התיאוריה של אריסטו הייתה הוליסטית, טיפול חובק כל של המציאות, המבוסס על עקרונות כלליים מהתנסות אמפירית והנמנע מהסברים מתמטיים מדויקים; ואם תיאוריית התנועה הימי ביניימית הייתה, במידה רבה, מושגית פורמלית, מתמטית, רציונלית, וחסרה אימות ניסויי; המדע המודרני, שהתבסס במהלך המהפכה, כלל את שתי הגישות, בסינתזה מאוזנת היטב של הרציונלי והאמפירי.

התיאוריה החדשה של תנועה (המכניקה הקלאסית) היתה מאורגנת באופן רציונלי כמערכת הירארכית של ידע קוהרנטי הנשען על בסיס אמפירי מוצק שנוצר בניסויים מבוקרים. לא הייתה עוד תיאוריה פיזיקלית אחת חובקת כל כמו זו של אריסטו. המכניקה הקלאסית עסקה רק בתנועת גופים באופן כללי, ובהשפעה על תנועתם הודות לפעולה הדדית ביניהם. המכניקה הקלאסית השאירה מחוץ לטיפול שטחים שונים ונרחבים של הידע על היבטים ייחודיים של הטבע שבהם תופעות חשמליות, מגנטיות, חום אור וכו'. אלה רק החלו להתגבש בהשפעה של מכניקה.

בתקופות של מדע הלני וימי הביניים, לא התעניין המדע בדברים שנוצרו באופן מלאכותי, אלא צפה ישירות בטבע, תוך הימנעות מהתערבות. בניגוד לכך, מלומדי המדע המודרני תכננו וחקרו את המציאות אותה הם יצרו, למרות שהצופה נותר מרוחק מהתופעה הנצפית, וטענו שהתופעה קיימת ללא תלות בצופה. על ידי שימוש במכשור, יצרו המלומדים תנאים שלא היו זמינים בקלות בטבע. לדוגמה, עדויות לחוק האינרציה יכלו להיות מודגמות במעבדה, בקלות יותר מאשר בסביבה היום יומית הנשלטת על ידי החיכוך. פרנסיס ביקון, בתחילת המאה ה-17, כינה את תהליך החקר של הטבע – חשיפה של סודות הטבע באמצעות "חקירה". אפיסטמולוגיה כזו הייתה נראית אבסורדית ושגויה לאריסטו ולמלומדי ימי הביניים שחשבו שלא ניתן לדעת ועוד יותר, לשחזר את מלוא התנאים במציאות העשירה. ניסויים עם פרמטרים מבוקרים במצבים ומערכות מלכותיות במעבדות הפכו לכלי מרכזי במחקר המדעי. כאלה היו ניסויים של גלילאו עם המישור המשופע. כאלה היו ניסויים של גלילאו וניוטון עם המטוטלת. המדע המודרני כלל לא הזניחה את התצפיות הישירות בטבע אשר התלוו באיסוף נתונים, ניתוח שלהם וקביעת חוקיות בתופעות הטבע. בהקשר לתנועה כאלה היו חוקי התנועה של כוכבי הלכת שנקבעו על ידי קפלר

בשנת 1605. בקביעתם התבסס קפלר על הנתונים שנאספו על ידי טיכו ברהה במשך כעשרים שנה של תצפיות מיגעות.

בטבלה הבאה נסכם את ההתפתחות האפיסטמולוגית של הבנת התנועה.



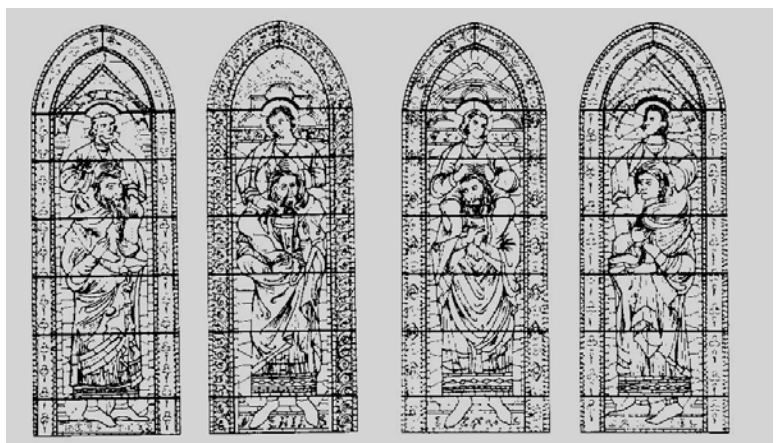
טבעו המצטבר של המדע

המאפיין המרכזי של הידע המדעי הוא האובייקטיביות. בו בזמן, כל מדען הוא אדם פרטי אינדיבידואל שהידע שלו כולל ידע אובייקטיבי וסובייקטיבי גם יחד. זהו אתגר גדול לראות כיצד המלומדים, שכל אחד מושפע ממגוון של גורמים היוצרים מימדים של סובייקטיביות בידע שלהם, מצליחים, למרות זאת, ליצור ידע מדעי משותף שהוא אובייקטיבי. כמה גורמים מתנים את ההצלחה הזו. אחד מהם הוא טבעו המצטבר ודיאלוגי, שיחי, של הידע המדעי. מאפיין זה בא לביטוי כבר בתחילת המדע. בתקופת ימי הביניים הוא הפך לסיסמא הפרדיגמטית של המלומדים. המטפורה הידועה של ברנארד משארטר [Bernard of Chartres], מדען ופילוסוף צרפתי נאו-פלטוני בן המאה ה-12. ברנארד הציג את הרציונל של האופי המצטבר של המדע. מטפורה זו הובאה על ידי ג'והן מסליסברי [John of Salisbury] אשר כתב ב-1159:⁵⁵

”ברנארד משארטר היה אומר שאנחנו כמו גמדים היושבים על כתפיהם של

ענקים, כך שאנו יכולים לראות יותר מהם, דברים במרחק גדול יותר, לא בזכות חדות עיננו, או איזשהו ייחוד פיזיקלי, אלא בגלל שאנחנו נישאים גבוה יותר ומורמים מעלה על ידי קומתם הגבוהה.”

תרשים 26 מציג את חלון הזכוכית הצבעוני בקתדרלת שארטר המבטא רעיון זה.



⁵⁵ Crombie, A.C. (1959). *Medieval and Early Modern Science*. Doubleday Anchor Books, New York, p. 27.

תרשים 26. המחשה של הרעיון בדבר אופיו המצטבר של הידע המדעי, על הזכויות הצבועות בקתדרלת שארטר. ארבעה מטיפים יושבים על כתפי הנביאים: ישעיהו, ירמיהו, יחזקאל ודניאל.

אייזיק ניוטון השתמש באותה המטפורה במכתב ליריבו רוברט הוק [Hooke] מהתאריך ה-5 לפברואר 1676:

"אם יכולתי להרחיק ראות יותר מאחרים, היה זה בזכות עומדי על כתפיהם של ענקים"

ההתפתחות של תיאוריית התנועה, שהחלה עם אריסטו, מציגה את תהליך הבנייה שמלומדים רבים תרמו לו. אלו שחיו מאוחר יותר השתמשו, ביסודו של דבר, בתוצאות שהתקבלו במחקרים הקודמים, פיתחו, שדרגו ושינו אותם. לרעיון זה התייחס, לדוגמא, ההיסטוריון אדוארד גרנט [Grant] שכתב על שימושו של גלילאו במשפט המהירות הממוצעת:⁵⁶

"ההוכחה הגיאומטרית והרבה הוכחות חשבוניות אחרות של משפט המהירות הממוצעת הופצו ברחבי אירופה במהלך המאות ה-14 וה-15 והיו לפופולאריות בעיקר באיטליה באמצעות הוצאות לאור מודפסות בסוף המאה ה-15 ובתחילת המאה ה-16. סביר להניח כי גלילאו היה מודע להן. הוא הציב את משפט המהירות הממוצעת כטענה הראשונה של "היום השלישי" בספרו "דיאלוג על שני מדעים", שם שימש כבסיס של מדע התנועה החדש. לא רק שההוכחה של גלילאו דומה בצורה בולטת לזו של אורם, אלא שהתרשים הגיאומטרי המלווה אותה הוא למעשה זהה, פרט לסיבוב של 90 מעלות שכבר נעשתה על ידי כמה כותבים מימי הביניים."

למעשה, לא היה יכול להיות אחרת: הידע המדעי הוא מורכב ונרחב ומשך החיים של אדם אחד כמו גם יכולותיו, מוגבלים מידי על מנת שיוכל לתפוס ידע כזה ולקדם ולפתח אותו לבדו. ידע מדעי הוא בעיקר ידע קולקטיבי השוכן במוחות רבים מאוד. מסיבה זו בדיוק קארל פופר [Karl Popper], פילוסוף דגול של מדע במאה ה-20, הציג את המושג של העולם השלישי:⁵⁷

"בעולם 3 אני מתכוון לעולם של התוצרים של המוח האנושי, כמו שפות; אגדות וסיפורים ומיתוסים דתיים; השערות או תיאוריות מדעיות, ומבנים מתמטיים; שירים וסימפוניות; ציורים ופסלים. אבל גם מטוסים ושדות תעופה וניצחונות הנדסיים אחרים."

באותו הזמן, ההתפתחות של תיאוריית התנועה מגאלה שהצטברות זאת אינה שווה לתוספת (חיבור) פשוטה במהלך ההתקדמות, אנשים זיקקו ועידנו את הידע ושינו את הפרדיגמות ואת המסגרות האפיסטמולוגיות והאונטולוגיות. זה נעשה תוך כדי דיון הן סינכרוני, המתמשך בין המשתתפים במחקר מדעי באותה תקופה, והן דיאכרוני, המתקיים באופן וירטואלי בין המדענים שחיו ועבדו בתקופות שונות לגמרה. שני סוגי שיח אלה הכרחיים ליצירת ידע מדעי אובייקטיבי, תקף ומהימן.

* * *

⁵⁶ Grant, E. (1977). *Physical Science in the Middle Ages*. Cambridge University Press, Cambridge, Mass, p. 58.

⁵⁷ Popper, K. (1978). *Three Worlds*. The Tanner Lecture on Human Values. The University of Michigan. Online: <http://www.tannerlectures.utah.edu/lectures/documents/popper80.pdf>

קהל יעד, רלוונטיות לתכנית הלימודים ותועלת זידקטית

תיאוריית התנועה מייצגת את החלק הארי של תכנית הלימודים במכניקה, ללא קשר לרמת הלימוד. לכן, קהל היעד ללימוד החומרים המצויים במסע זה, שהם בעיקר איכותניים, הוא, קודם כל, מורי הפיזיקה, בזמן הכשרתם ובמהלך עבודתם. בנוסף, חומרים אלו מומלצים ללימוד על ידי תלמידים המוצאים עניין בהצדקה הסיבתית לתיאוריית התנועה של המכניקה הקלאסית: מדוע הקביעות הבסיסיות של התיאוריה (כמו השקילות בין תנועה במהירות קצובה למצב מנוחה) הם כאלו כפי שמוצגות בכתה, ולא כפי שנראות ללומד הנאיבי טרם הלימוד.

בהצגת המסע הזה, יש להצדיק את הרלוונטיות של החומרים המצויים בו לתכנית הלימודים. זאת משום שלמרות חשיבותם הנראית לעין של התכנים שהוצגו, תיאוריות התנועה הישנות הנכללות בחיבור זה, הן בדרך כלל מחוץ לתכנים הנלמדים בכתות הפיזיקה הרגילות, גם בבתי הספר וגם במכללות. עם זאת, החזון החדש של הלימודים בפיזיקה, המקודם על ידי מיזם זה⁵⁸, מדגיש רלוונטיות ואף הכרחיות של תכנים היסטוריים לצורך בחשיפה של תהליך בו נוצר והתקדל הידע המקובל כיום. הוא מתייחס לחשיפה של תיאוריות שהיו מקובלות בעבר כתנאי ללמידה משמעותית של התנועה במסגרת הפיזיקה הקלאסית.

ניתן לסכם את הטיעונים בדבר הרלוונטיות של תיאוריות התנועה הקדומות כדלקמן:

1. החומרים המוצגים כאן יוצרים דמות אוטנטית של הפיזיקה כתחום דעת בו הידע מתכנס לראייה המקובלת תוך שיח מתמשך. מסע זה מתחיל בתיאור התיאוריה האריסטוטלית ובעקרונות ההסבר שאומצו במדעי הטבע. המסע מציג את תיאוריית הדחף, ששלטה בפיזיקה במשך תקופה ארוכה מאוד, מהתקופה שלאחר אריסטו ועד לגלילאו וניוטון.
2. ההסברים החלופיים לתנועה, המקדימים באופן היסטורי את ההבנה הנוכחית של תחום דעת זה, יוצרים נגוד לתיאוריה הנלמדת במסגרת המכניקה הקלאסית, ולכן מדגישים את הנקודות הקריטיות של תחום התוכן.
3. ההסברים החלופיים לתנועה, המקדימים את ההבנה הנוכחית, יוצרים מרחב למידה בו נלמד תחום הדעת ביעילות, דרך הוראה של מושגי היעד תוך השתנות ההיבטים העיקריים. המטרה של המסע היא קידום הלמידה המושגית במקום האימוץ העיוור של הטענות מנוגדות האינטואיציה והתמקדות בעמון בפתרון טכני של בעיות.
4. התיאוריות הישנות של התנועה מציגות את המורשת התרבותית ויוצרות ידע תרבותי של הפיזיקה. המסע להסבר התנועה משתרע לאורך היסטוריה וכולל תקופות שונות של המדע. ידע איכותני זה מאפשר את ההערכה להישגים של התרבות האנושית, התנאי לחינוך ההומניסטי החסר אצל נוער הלומד דיסציפלינה. חינוך לערכים הומניסטיים, ולעקרונות (כמו היבטים "הלא מעשיים" של החקר המדעי, והאופי הבינלאומי של מדע) לא אמורים להישאר מחוץ לכתות. היבטים אלו קיימים בהתגבשות תיאוריית התנועה, וחושפים את השפעותיהן של הסיבות התרבותיות השונות.

⁵⁸ ראו את ההקדמה התיאורטית

5. בלימודי הפיזיקה אין להזניח את האפיסטמולוגיה של המדע (אופיו של המדע). התיאוריות הקדומות של התנועה התפרשו על תקופות היסטוריות שונות והביאו לביטוי שינויים אפיסטמולוגיים. המורכבות של הנושא היא בכך שהאפיסטמולוגיה הנוכחית ממוזגת מגוון הדרכים והמאפיינים מן העבר. למשל, השיטה המדעית המודרנית ממוזגת בין רציונליזם ואמפיריציזם. התקופות הקודמות, למרות שאיחדו את שני ההיבטים הללו, הראו העדפה של האחד על פני האחר: תיאורטי (רציונלי) או ניסיוני (אמפירי). לימוד על הצלחותיהם וכישלונותיהם יעיל מבחינה פדגוגית, מאותן הסיבות כמו השונות בתחום האונטולוגי (היבטים של תחום התוכן) שאליהם כבר התייחסנו לעיל.

6. בלימודי הפיזיקה לימוד הפיזיקה יוצר לעיתים אינטראקציה עם נושאים בעלי אופי דתי. ההיסטוריה של הבנת התנועה יכולה להיות מאוד מועילה ומאלפת בהיבט זה. היא מראה גישות שונות של מדענים כולל היבטים לא רציונליים של עבודתם. אריסטו, היפרכוס, אביסנה, מלומדים מימי הביניים, גלילאו, דקארט וניוטון היו שונים מאוד בהשקפותיהם הדתיות וכולם תרמו משמעותית לבנייתה של תיאוריית התנועה כפי שבשימוש כיום. תועלת חינוכית רבה יכולה להיות מושגת מחשיפתן של השקפות אלו, תוך דיון בכיתה בו המורה משמש כמתווך. כך ניתן יהיה להעניק לתלמיד ידע כללי ותרבותי שלם יותר.

* * *

פעילויות, שיטות ואמצעי הוראה

המטרה של מסע היסטורי-פילוסופי זה אל התיאוריה של התנועה אינה רק לספק את הידע החדש, אלא גם להכיר את התפיסות והגישות החלופיות להסברים המדעיים של התנועה. מטרה זו מקדמת שינוי מהותי בתפיסת המורה והתלמיד את המדע בכלל, ואת הפיזיקה בפרט. כדי להגיע אל זה יש צורך ביותר מאשר הרצאות, אלא בדיון המשותף גם את התלמיד. השאלות הבאות יכולות להדגים נושאים אפשריים לדיון כזה.

נושאים לדיון

- התיאוריה האריסטוטלית מסבירה את תנועת הקליע על ידי מנגנון מיוחד של מערבולות דחף. האם ישנו איזשהו חוק שימור במכניקה הקלאסית הסותר תסריט זה?
- ההיסטוריה המוקדמת של הדחף מסבירה את תנועת הקליעים באמצעות מתן מטען של תנועה המשנה את האיכויות שלהם. האם במסגרת המכניקה הקלאסית, סיבה פנימית טהורה של תנועה היא אפשרית? מדוע?
- חשבו על ניסוי שיפריך את התיאוריה של הדחף. אפשרות לניסוי כזה ניתן למצוא בניסוי המחשבתי הבא:

דמיינו מטבע שנזרק באוויר. אנו יודעים כיצד הוא נע: עולה, עוצר לרגע, ונופל מטה. בזריקת המטבע, אנו מפריס את "הסדר העולמי" בעולמו של אריסטו. היפרכוס הציע דרך לפצות על הנטייה השל גופים כבדים לחפש אחר מרכז כדור הארץ – דחף שהזרק מכניס למטבע. אנו יכולים לשאול כעת מה יקרה אם נאזן את השפעת הכבידה של הגוף כשהוא יגיע לשיא מסלולו? ברור שהדחף, שעוד אינו התבזבז כולו, יישאר בתוך המטבע. אז, בדיוק ברגע בו נבטל את הכבידה הגוף צריך להתרומם מעלה מייד. זאת הודות לדחף המצוי במטבע. התחזית תהיה שונה לחלוטין במסגרת מכניקה הקלאסית. אם מישהו יבטל את הכבידה ברגע שהגוף בשיא מעופו, הגוף יישאר במנוחה וימשיך שם כל עוד אין כבידה. ברגע שהכבידה תחזור הגוף יתחיל ליפול.



למרות שאיננו יכולים לבטל את הכבידה ניתן לאזן אותה באמצעות שדה אלקטרוסטטי או פשוט על ידי תמיכה באמצעות כף יד. אם נבצע ניסוי כזה הוא יהווה מכה ניצחת לפיזיקת הדחף: המטבע מייד ייפול מטה. זכרו כי עצם קיומה של אפשרות ההפרכה הזו של תיאוריית הדחף, הופך אותה למדעית, כפי שטען פילוסוף המדע המהולל סר קארל פופר.

שאלות למחשבה ולדיון

- בהנחה שתיאוריית הדחף נכונה, מה תהייה תנועת הגוף אם נניח יד מתחתיו כשהוא בשיא מסלולו?
 - נניח שהמכניקה הקלאסית נכונה. מה יקרה עם הגוף במצב שתואר בשאלה הקודמת?
 - נניח שתיאוריית הדחף נכונה ושהגוף נזרק באוויר. הוא נע מעלה ואז נופל. האם ישנו רגע בו הדחף הניתן לגוף מתאפס? היכן זה יקרה, אם בכלל?
 - נניח שהמכניקה הקלאסית נכונה. במצב המתואר מעלה, האם ישנה נקודה במהלך התנועה בה התנע מתאפס? ואם כן, היכן?
- ניתן לומר שהדחף תופס את ההסבר לתפקיד של הכוח, התנע והאנרגיה. עם זאת, הוא אינו נכון תמיד, אפילו ברמה האיכותנית. השאלות הבאות יכולות להצביע על מגבלות של תיאוריית הדחף, אפילו בשימוש איכותני (ומכאן כוחה של המכניקה הקלאסית).

שאלות למחשבה

- כיצד מסבירה תיאוריית הדחף (אם בכלל) את העובדה שגוף הנזרק באוויר נופל מטה? במילים אחרות, מדוע הגוף לא נשאר למעלה?
- כיצד עונה המכניקה הקלאסית על אותה השאלה? מהם המושגים של הפיזיקה הקלאסית המשחקים תפקיד עיקרי בתשובה זו?
- כיצד מסבירה תיאוריית הדחף (אם בכלל) את העובדה שגוף הנזרק באוויר נופל מטה ומאיץ?

- כיצד תסביר תיאוריית הדחף את החזרתו לאחור של כדור הנורק אל קיר? כיצד עושה זאת המכניקה הקלסית?
- האם יכולה תיאוריית הדחף להסביר התנגשות בין שני גופים (זהים, למשל)? מדוע הכדורים אינם נצמדים זה לזה לאחר ההתנגשות?
- כיצד מסבירה המכניקה הקלסית את אותו המצב? מה הגודל הפיזיקלי הנדרש לגופים על מנת לסגת, תנע ו/או אנרגיה קינטית?

* * *

מכשולים להוראה ולמידה

מכשולים בתכנים

העובדה המתועדת היטב שלתלמידים ישנם קשיים רבים בלימודי תיאוריית התנועה יוצרת קשיי הוראה עבור המורים. חוסר הבנה של ההסברים הפיזיקליים לתנועה הוא נפוץ מאוד ונחקר על ידי אנשים מתחום החינוך.⁵⁹ קל להיוודע בכך. פשוט יש להציג את רעיון הדחף למישהו. אם הוא אינו מצליח לזהות האם רעיון זה נכון או שגוי, הדבר יצביע על חוסר הבנה מושגית של הדינמיקה של ניוטון. ואכן, רעיון הדחף קרוב מאוד לתפיסות הנאיביות של התלמידים, טרם לימודיהם.⁶⁰

מצב התנועה

הקושי הראשון בהבנת חוק ההתמדה הוא לאמץ את הרעיון שהמושג "מצב" המתייחס למנוחה ולתנועה קצובה בקו ישר במובן זהה. ואכן, הזהות בין תנועה ומנוחה מנוגדת לשכל הישר ולניסיון היום יומי.

הקושי הבא קשור למאפייניה של התנועה הרגעית. ואכן, מהירות קשורה תמיד לפרק זמן מסוים ולמרחק שעבר הגוף. כיצד אם כן ניתן לדבר על מהירות (או מנוחה) "ברגע זה" בלבד? לקושי זה התייחסו מלומדי ימי הביניים שהציגו את הבנת המהירות הרגעית כמהירות של תנועה אחרת, דמיונית, שהייתה אחידה ובה עובר הגוף ברגע נתון לתנועה קצובה.

המונח "מצב" מעביר מסר של משהו קבוע בזמן. כיצד אם כן ניתן לייחס אותו לתנועה, שהיא סוג של שינוי? בהקשר זה אין לבלבל בין מצב התנועה למצב של גוף נע. האחרון מתואר על ידי המיקום והמהירות הרגעית של הגוף בכל רגע. מומלץ למורה הפיזיקה לקדם את ההבנה של תלמידיו כך שיוכלו להפריד בין השניים. ניתן להדגים על ידי מצבי גוף נע שונים (זוגות מיקום-מהירות) תוך תנועה באותו מצב תנועה (תנועה קצובה, למשל).

לבסוף, זהו אתגר להבין כי ההתמדה של ניוטון אינה השאיפה לשמר את התנועה (ההבנה המיושנת מתיאוריית אריסטו ומתיאוריית הדחף), אלא "ההתנגדות" לשינוי במצב התנועה, כלומר הצורך בהשקעת מאמץ לכך על ידי מישהו או משהו שגורם לשינוי במצב התנועה.

⁵⁹ Galili, I. & Bar, V. (1992), Motion implies force. Where to expect vestiges of the misconception? *International Journal of Science Education*, 14 (1), 63-81.

⁶⁰ McCloskey, M. (1983). Intuitive Physics, *Scientific American*, 248(4), 122-130.

הוראת הדינמיקה

במכניקה קלסית, התנועה יכולה להיות מתוארת רק במונחים קינמטיים (מהירות, מסלול, תאוצה, ומרחק). תיאור זה אינו מהווה הסבר מספק לתופעת התנועה, ויש להשלים אותו במונחים של דינמיקה – גורמים סיבתיים לשינוי במצב התנועה. להיות במצב של תנועה (קצובה ובקו ישר) אינו דורש התערבות (כוח), אך המעבר בין המצבים מצריך "גורם מניע" שיצור את המעבר הזה של הגוף הנע.

הקושי בהוראת הדינמיקה הוא באינטואיציה של התלמידים, המבוססת על ניסיונם היום יומי. האינטואיציה אומרת להם שכל תנועה דורשת כוח. התנועה בסביבתנו הרגילה מתרחשת כשהכבידה וכל סוגי החיכוך קיימים. עובדה זו יכולה לסכל את הבנת החוקים הכלליים השולטים בתנועה. המצב בו אין חיכוך, מרמז יותר על הרעיון שתנועה (קצובה וקווית), כמצב, אינה זקוקה לכוח על מנת לתמוך בה. חוק האינרציה מתייחס לעובדה שאותו מצב התנועה נשמר.

היוצרים של המכניקה החדשה, גלילאו וניוטון, הגיעו להבנה החדשה על ידי מחשבה על מקרים אידיאליים. גלילאו ניתח מצבים מציאותיים עם חיכוך הולך ופוחת של התווך או בחר לעקוב בניסוי אחרי תנועה של כדורים כבדים (כעשרה קילוגרמים) כאשר ניתן להזניח בחיכוך עם המדרון. ניוטון השיג יתרון זה כאשר החליט לחקור תנועה של כוכבי לכת במערכת השמש – כוכבי לכת הנעים, כידוע, בריק – והסיק משם על החוקים השולטים בתנועה באופן כללי.

הוראת טבע המדע

מדע הוא אופן מיוחד בו האדם מסביר את המציאות. תחומים אחרים של התרבות האנושית – כמו אמנות, ספרות, פילוסופיה וכדומה – עושים את אותו הדבר על ידי שימוש באמצעים אחרים. יש ערך בהשוואה בין טבע המדע ובין המתודולוגיות שנקטות בתחומים אחרים של הידע האנושי. הקשיים בהוראה ובלמידה של טבע המדע יכולים להיות בכמה מימדים. לכמה מהם נתייחס להלן:

קשיי שפה

קושי זה נובע משתי רמות של שפה בה משתמשים בהוראת הפיזיקה. הרמה הראשונה של השפה נועדה לתיאור של המציאות, תופעות טבע ואת התוצרים המלאכותיים, ומציגה את החוקיות הקיימת. כך למשל ניתן להסביר את תופעת גאות ושפל, שינויי אקלים ותופעות אסטרונומיות. תופעות תנועה מסוימות של גופים וחוקיות בהן מקבלות תאור על בסיס ניסיוני. אומנם, תאור ברמה זו של שימוש בשפה, התיאור של הטבע הוא מאוד מוגבל ובמהרה עולה הצורך בשדרוג השפע הנדרשת. בשפה החדשה, המותאמת, משתמשים הפיזיקאים במושגים, בעקרונות, בחוקים, בהגדרות, בתיאוריות, במודלים ובמונחים אחרים. זוהי הרמה המופשטת יותר של השפה, המכונה לעיתים בשם: "מְטָה-שפה". המשמעות של המונחים הללו שמורה לפילוסופיה של המדע, אשר מגדירה את המעמד של כל אחד מהם, תחום תקפותו והדרך בה אנו קובעים את מהימנותו. מידע זה חושף את האופי של הידע המדעי.

מורים לפיזיקה משתמשים לעתים קרובות במטה-שפה (הכוללת שמות פרטיים – אום, ניוטון, אמפר וכו' – אשר אינם כוללים שום מידע שעוזר לתלמיד להבין משמעות של תוכן), אבל רק

עתים רחוקות מנסים להגדיר את מעמדם של המושגים, תחום תקפותם, מידת מהימנותם. שימוש כזה גורם לעתים קרובות לבלבול של התלמידים וכישלון ביישום הידע. למשל, התלמידים מתקשים לענות על השאלה: האם חוקי ניוטון תקפים תמיד? מה הם התנאים לתקפותם? מה זה כוח? האם אנו יכולים לדבר על תנועת אלקטרון בתוך אטום? בלבול נוסף מתרחש בנוגע לשוני במשמעות של חוק בהשוואה לעקרון, של מודל בהשוואה לתיאורה, של ניסוי רגיל לעומת ניסוי מחשבתי, וכו'.

על מנת להתגבר על קושי זה מורה צריך להתייחס באופן מפורש לאופי המושג בו הוא משתמש, להסביר משמעותו, לספק הגדרות מקובלות למטרה זו (תיאורטיות ואופרציונליות) ולהדגים על ידי דוגמאות מבהירות.⁶¹ כך למשל, תוך כדי הייצוג של מושג המהירות, הממוצעת והרגעית, יש להשלים את הגדרה התיאורטית (או נומינלית):

מהירות היא קצב שינוי של מיקום בזמן

על ידי הגדרה אופרציונלית:

על מנת לקבל מהירות יש למדוד את המיקום x_1 (על ידי סרגל) ברגע של זמן t_1 (על ידי שעון) ואחרי כן את המיקום x_2 (על ידי סרגל) ברגע של זמן t_2 . לאחר מכן יש לחשב את היחס $\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$ שמספק את המהירות ממוצעת של הגוף הנע בקטע הזמן $(t_2 - t_1)$. הגבול של תוצאה זו, כשמשך הזמן הולך ונעשה קטן: $t_2 \rightarrow t_1$ קובע את המהירות הרגעית.

רק שתי ההגדרות יחדיו מגדירות את המהירות באופן מספק.⁶² למרות שהדבר אינו קל ודורש מחשבה והכנה, הצורך בהתייחסות לתבניות של ה"מטה-שפה" – ההושפות את טבעו של הידע המדעי (מדוע אנחנו מחליטים לסמוך עליו וכיצד ידע זה נוצר), הוא ברור – והתעלמות ממנה מובילה ישירות לתפיסות מוטעות של תלמידים ומורים כאחד, תפיסות המתועדות במספר מחקרים.

אובייקטיבי מול סובייקטיבי

אין ספק כי הידע המדעי הוא נושא אינטלקטואלי אשר נוצר באמצעות תרומות של מספר רב של יחידים. קל להסכים כי ידע זה שוכן בהרבה מסגרות הבנה אישיות. קארל פופר הציג את המושג של העולם השלישי, שכבר הוזכר למעלה, והוא שוכן בתודעה ושייך לחברה כולה – הידע החברתי.

שלא כמו יסודות ידע אחרים של העולם השלישי הידע המדעי מתיימר להיות אובייקטיבי. לכן, זהו אתגר גדול עבור מורה הפיזיקה להראות, להדגים ולהסביר באמצעות דוגמאות משכנעות ועידון מושגי, כיצד מצליח ידע המצוי בתודעה של פרט, למרות מקורו האישי, להיות ידע פיזיקלי, אובייקטיבי בהגדרתו.

כאשר אנו טוענים אובייקטיביות של הידע המדעי הכוונה היא לידע שאינו תלוי רצון הפרט וחופשי מגורמים מיתיים ועל טבעיים. הידע המדעי טוען חוקים, כללים, ועקרונות שיכולים

⁶¹ 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.

⁶² Arons, A. (1990). *A Guide to Introductory Physics Teaching*. Wiley, New York, p.15; Margenau, H. (1950). *The Nature of physical Reality*. McGraw-Hill, New York, pp. 220-244.

להבחן בכל פעם שנוצרים התנאים של תקפותם. זו הייתה תמיד אמת המידה של הפילוסופים של הטבע ושל הפיזיקאים, בין אם היו דתיים בהשקפת עולמם, או לא.

מאפיינים אלו של אובייקטיביות ניתן למצוא בכל תיאוריות התנועה הקדומות. אובייקטיביות, עם זאת, אל לה להיות מבולבלת עם נכונות. למרות כוונתם להתאים את התיאוריות לתנועה כפי שמשקפת במציאות, ניסיונותיהם של האנשים להסביר אותה נשאו הצלחה מוגבלת, ולעיתים קרובות אף נכשלו. מסע זה מציג כמה ניסיונות שקדמו למכניקה הקלאסית. היום אנו יודעים שהפיזיקה הקלאסית גם היא מוגבלת, ותקפה רק לעצמים המקרוסקופיים של סביבתנו הקרובה. עם זאת, התחום המוגבל של תקפותה אינו הופך תיאוריה זאת לסובייקטיבית. אנו משתמשים באובייקטיביות של התיאוריה הקלאסית של התנועה באינספור יישומים: מניטור מוצלח של מכונות, מטוסים וספינות ועד לשיגור של אנשים לירח ושל מעבדות אוטומטיות לכל כוכבי הלכת של מערכת השמש.

חשיבה היסטורית

כאשר מורים מתייחסים לידע מתקופות תרבותיות שונות, יתכן ויש צורך לקשר בין המשמעויות הישנות והחדשות של המושגים והמונחים השונים. כל המהפכות המדעיות התלוו בשינויים קיצוניים בטבע המדע ובאוצר המושגים המדעיים (מטה-שפה).

למשל, כשהמורה מספר על התצפיות במדע האריסטוטלי, עליו להבחין וכבדנות בין תצפית (התבוננות) וניסוי. על המורה להיות מודע לכך שהתיאוריה של אריסטו התכוונה למשהו שונה מהמשמעות בת זמננו לאותו המושג (כמו תצפית). כמו כן, המושג מודל הוא חסר משמעות לחלוטין במדע ההלני. הפילוסופים היווניים האמינו שהידע שלהם משקף את המציאות כפי שהינה, ללא החלפות או פשרות. ההתאמות המושגיות הללו דורשות הסברים מתאימים.

בשימוש חופשי של הפתגם של הולדרלין [Holderlin⁶³], ניתן לומר שכאשר הישועה מופיעה, מופיעה גם הסכנה. חומרים היסטוריים יכולים, כפי שאנשי הוראה רבים מאמינים, להביא ישועה לתלמידים הלומדים נושאים הקשים בפיזיקה. עם זאת, אותו הצעד יכול לגרום לקשיים בהבנה ובמתן משמעות למושגים פיזיקליים. באופן טבעי, הטקסט העתיק כולל לעיתים קרובות רעיונות ישנים שנחשבו מוצלחים פעם אך במהלך ההיסטוריה נפסלו ונדחו במחקרים מאוחרים יותר. על מנת לזהות את הנקודות הבעייתיות מבחינה מושגית, נדרשת גישה זהירה וביקורתית מצד המורה, על מנת להעריך את גבולות התקפות של הטענות שפעם הושמעו, ולא לאמצם באופן עיוור, גם אם המקור ידוע כסמכות בפיזיקה. כך, למשל, למרות שאנו מקבלים מכניקה קלאסית של ניוטון, לא נובע מכך שיש להסכים לטענות שלו לגבי תנועה, זמן ומרחב מוחלטים, למשל, כמו גם עם הזהות של כוח הכבידה עם המשקל.⁶⁴

חומרים היסטוריים יכולים לכלול הערות, רעיונות ופרשנויות הסותרים זה את זה. זה מה שקורה בדרך כלל כאשר משווים בין תיאוריית התנועה בפיזיקה של אריסטו ובין הפיזיקה של החדף. קריאה שטחית המחפשת את התשובה המיידית והפשוטה יכולה להוביל לבלבול בקשר

⁶³ ציטוט ידוע של המשורר הגרמני פרידריך יוהאן הולדרלין [Holderlin] אומר: "היכן שיש סכנה, צומחת גם הישועה" Patmos. F. Holderlin, Poems and Fragments. Ann Arbor, The University of Michigan Press 1966, pp. 462-463.

⁶⁴ נושא המשקל טופל בהרחבה ביחידה נפרדת באוסף זה של חומרי למידה.

לפירושים השונים של אותן הדוגמאות. כך, רעיון הדחף, בהיותו בעל אופי סביר המשכנע את השכל הישר, יכול להיראות כנכון לתלמיד מתחיל, ולגרום לתפיסה שגויה. עם זאת, בלמידה רחבת מבט, ההיסטוריה של המדע יכולה לעזור בשחזור ההתמודדות בין המושגים השונים, כמו למשל ההתמודדות בין התנע וההתמדה לדחף. חשיבה היסטורית מאפשרת ארגון הדברים בתמונה אחת הגיונית וכוללת. בתמונה זאת, מתברר שכל אחד משני המושגים, תנע והתמדה, קיבל משהו מתפקידו של הדחף, כפי שהשתקף בתיאוריה הישנה של התנועה.

* * *

עדות מחקרית

תוצאות של מחקרים מצביעות על כך שתלמידים מפתחים ומחזיקים לעיתים קרובות בהשקפות על התנועה הדומות לאלו של תיאוריית ישנות. זה נכון הן לגבי רעיונותיה של התיאוריה של אריסטו והן לגבי אלה של הדחף. אופיו של ההקשר קובע אלו תפיסות חלופיות מועדפות על ידי התלמיד. למשל, ההקשר של משיכה ודחיפה של גופים מעודד אימוץ נאיבי של התפיסה האריסטוטלית: תנועה פרושה קיום הכוח⁶⁵, אך בהקשר של תנועת קליעים, גובר הרעיון של הדחף: גוף נע הודות לסגולה המיוחדת שסופקה לו.⁶⁶ רעיון זה מסתמך לעיתים על האנלוגיה למכונת הזקוקה למילוי של דלק על מנת לנוע. באופן דומה, מזמינה לעיתים קרובות התנועה המעגלית אצל הלומדים תפיסה המשתמשת במושג של הכוח הצנטריפוגלי, אותו מושג שהחזיקו בו דקארט ובורלי [Borelli].⁶⁷

* * *

המשך

פיתוח מתמשך של ידע הקשור לשימוש בהיסטוריה ובפילוסופיה של המדע בהוראת הפיזיקה, יכול להתחיל משימוש בחומרים המצויים במסע זה. עם זאת, על מנת להיות יעילים ולאפשר יישום דומה גם לנושאים אחרים, יש צורך לקרוא טקסטים המהווים מבוא להיסטוריה ולפילוסופיה של המדע, כמו אלו של קון⁶⁸, או טקסטים של ניתוח ביקורתי של היסטוריה של המדע. הדוגמאות היפות של כתבים המפתחים ידע וטעם להיסטוריה והפילוסופיה של מדע ניתן למצוא בכתבים של קוירה⁶⁹.

* * *

⁶⁵ Whitaker, R. J. (1983). Aristotle is not dead: Student Understanding of Trajectory Motion. *American Journal of Physics*, 51(4), 352-357

⁶⁶ McCloskey, M. (1983). Op.cit., McCloskey, M. (1983). Naive Theories of Motion, in Gentner and Stevens, eds. *Mental Models*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, pp. 299-324.

⁶⁷ Galili, I. & Bar, V. (1992), 'Motion implies force. Where to expect vestiges of the misconception?' *International Journal of Science Education*, 14 (1), 63-81. Galili, I. & Kaplan, D. (2002). 'Students' interpretation of water surface orientation and inertial forces in physics curriculum'. *Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule*, 51(7), pp. 2-11.

⁶⁸ Kuhn, T. (1970). *The Structure of Scientific Revolutions*. The University of Chicago Press, Chicago, IL.

⁶⁹ Koyré, A. (1965), *Newtonian Studies*, The University of Chicago Press; (1966), *Metaphysics and Measurement*, Chapman & Hall, London; (1973), *Galileo Studies*, The Harvester Press.