

# לתולדות ההסבר לתנועת הקליע

מאריסטו עד תקופת הסכולסטיקה\*

אדוארדו דונייק

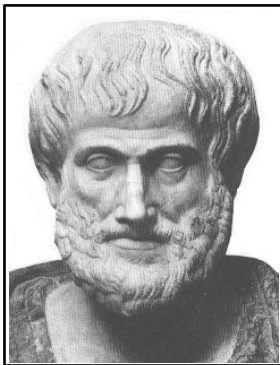
לצד מניעים דתיים ואחרים, הקשיים בניסיונות להסביר את תופעת תנועת הקליע על בסיס הסברו הקלאסי של אריסטו היו מהגורמים המרכזיים שהביאו למפלתה של הפיזיקה האריסטוטלית שלטתה מאות שנים. את מקומה תפסה במאות השלוש-עשרה והארבע-עשרה 'תורת האימפטוס'. תהליך היסטורי זה התרחש על בסיס ביקורת הטקסט של אריסטו: פרשנים ומבקרי אריסטו תיקנו או ניסו לתת משמעות חדשה לטקסט האריסטוטלי, וחלק מהם אף ניסו להוכיח כי נקודות מסוימות בטענותיו אינן הגיוניות או עקביות ולכן יש להחליפן באחרות. חשיבות הנושא מבחינת תולדות המדע הינה בכך שהוא מראה כי הרעיונות אשר הוינו את הפיזיקה החדשה במאה השבע-עשרה לא התפתחו באופן בלתי תלוי בהשקפותיו של אריסטו אלא באו כתגובה אליהן.

הפיזיקה האריסטוטלית שלטה במשך מאות שנים. החלפתה במערכת מושגים חדשה הייתה, במונחים של היסטוריון המדע הנודע תומס קון (Kuhn), מהפכה מדעית של ממש.<sup>1</sup> בפרט, יש מקום חשוב בתולדות המדע להסברו של אריסטו לתנועת הקליע, ולביקורות שמתחו על הסבר זה פרשנים אריסטוטליים ופילוסופים של הטבע שבאו אחריו.<sup>2</sup> חוקי התנועה

\* מאמר זה נכתב במקורו בשפה האנגלית והוגש כרפרט לפרופסור רות גלזנר במסגרת הקורס 'תולדות המדע בעת העתיקה' באוניברסיטה העברית בשנת תשנ"ח. ברצוני להודות לפרופסור גלזנר, לצבי גלאון וליניי שפיצר על עזרתם בהכנת הגרסה העברית. את הציטוטים ממקורות אשר לא תורגמו לעברית, תרגמתי אני.  
<sup>2</sup> הכינוי המתאים להוגים אלה, אשר עסקו בנושאים הקשורים לחקר הטבע, הוא 'פילוסוף הטבע' (philosopher of nature או natural philosopher). יש לזכור כי מאמר זה עוסק בתקופה שבה 'מדע' עדיין לא היה קיים כתחום

של אריסטו והסברו לתנועת הקליע היו מוכרים כנקודת תורפה בפיזיקה האריסטוטלית; מבקריו (שחלקם פעלו גם ממניעים דתיים) ניצלו את החולשה הזאת כדי לחתור מתחת לתורתו.<sup>2</sup>

בדיקת התפתחות התיאוריה על תנועת הקליע מאפשרת לראות את הקשר בין השקפותיו של אריסטו (מהמאה הרביעית לפנה"ס) ובין הרעיונות הפיזיקליים המהפכניים שהזינו ולאט לאט גם הובילו לקראת הפיזיקה החדשה הקשורה בשמותיהם של גלילאו וניוטון. רעיונות אלה לא התפתחו באופן בלתי תלוי בהשקפותיו של אריסטו אלא באו כתגובה אליהן. ניתן לזהות דפוס אופייני בתהליך התפתחות הרעיונות: פרשנים ומבקרי אריסטו מתקנים או מנסים לתת משמעות חדשה לטקסט האריסטוטלי; יש ביניהם אף מי שמנסים להוכיח כי נקודות מסוימות בטענותיו אינן הגיוניות או עקיבות, ולכן הם מבקשים להחליפן באחרות. הפלתו של ה'בניין' האריסטוטלי נעשתה אפוא מבפנים, מתוך מסגרת הדעות של אריסטו עצמו.<sup>3</sup>



במאמר שלפנינו נעקוב אחרי תהליך זה באמצעות בחינת המקרה הספציפי של ההסבר לתנועת הקליע. לאחר שאציג את הסברו של אריסטו אדון בפרשנים האריסטוטליים ובפילוסופים העיקריים שביקרו אותו ואבחנו את מקומם בתהליך התפתחות החשיבה הפיזיקלית, תהליך שהביא להבנה המודרנית של הבעיה.

אריסטו (384 – 322 לפנה"ס)

פיזיקה האריסטוטלית שלטה במשך מאות שנים ועיצבה את תפיסת העולם המדעית של התרבויות המוסלמית והנוצרית.

## א. התיאוריה על תנועת הקליע בפיזיקה של אריסטו

את ממדי הבעיה שעמדה לפני אריסטו כשניסה להסביר את תנועת הקליע ניתן להעריך רק בהקשר של תורתו על התנועה הכללית. ההנחה כי לכל תנועה יש מניע היא אקסיומה בסיסית בפיזיקה האריסטוטלית. יתר על כן, המניע חייב להיות בתוך הגוף עצמו (כמו הנפש המניעה את הגופים החיים) או במגע ישיר עמו. לא תיתכן פעולה מרחוק.<sup>4</sup> תנועה אפשרית אך ורק בתוך חומרי, כגון אוויר או מים.<sup>5</sup>

מרכזית לתפיסה האריסטוטלית היא ההבחנה הבסיסית בין תנועה 'טבעית' לתנועה 'מאולצת'. תנועה טבעית מתרחשת בגלל נטייתם של היסודות לחזור אל מקומם הטבעי.

מובחן ונפרד מ'פילוסופיה'. להלן אשתמש בכינויים 'פילוסוף' או 'פילוסוף הטבע' לחילופין, כשכוונתי לאותם חוקרים שעסקו בחקר הטבע כחלק מהפעילות האינטלקטואלית שלהם.

מהיסודות המצויים באזור התת-ירחי,<sup>8</sup> הכבדים (אדמה ומים) נעים באופן טבעי כלפי מטה, אל מקומם הטבעי במרכז, והקלים (אש ואוויר) נעים כלפי מעלה, הרחק מן המרכז. תנועתם הטבעית של כל היסודות התת-ירחיים היא בקו ישר. תנועה בכל כיוון שאינו אל המקום הטבעי נקראת 'תנועה מאולצת', והיא תוצאה של כוח חיצוני ה'מאלץ' את הגוף לנוע שלא לפי נטייתו הטבעית.<sup>6</sup> על פי חוקי התנועה של אריסטו, בתנועה טבעית המהירות היא ביחס ישר לכובד הגוף הנע וביחס הפוך לצפיפות התווך שבו מתקיימת התנועה.<sup>7</sup> בתנועה מאולצת המהירות היא ביחס ישר לכוח המופעל על הגוף הנע וביחס הפוך לכובדו.<sup>8</sup>

אולם כאן עולה קושי במקרה של תנועת הקליע: גוף כבד (לדוגמה אבן) מושלך בכיוון אחר מזה של תנועתו הטבעית (בדוגמה שלנו, כלפי מעלה או הצדה). זהו מקרה מובהק של תנועה מאולצת. אולם אם לכל תנועה יש מניע, ואם יש יחס ישר בין אותו כוח מניע למהירותו של הגוף המושלך, כיצד ייתכן שהגוף ימשיך ויוסיף לנוע כלפי מעלה או הצדה אחרי שהופסק המגע בין המניע (למשל היד) ובין הגוף המונע (האבן)?<sup>9</sup> נדמה כי אריסטו עצמו היה מודע לגודל הבעיה, שכן בחיבורו פיזיקה הוא דוחה את הדיון בה לפרק האחרון של הספר האחרון,<sup>1</sup> שבו הוא מתייחס באופן מפורש לצורך לדון בקושיה הקשורה לתנועה:

אם כל דבר הנע מונע על-ידי אחר, חוץ מדברים המניעים את עצמם, כיצד יש דברים, כגון הנזרקים, שנעים ואינם פוסקים גם לאחר שפסק מגעם במניעים?<sup>9</sup>

אריסטו פותר את הבעיה בעזרת תפקיד התווך (בדוגמה שלנו, האוויר). התווך הוא הדבר היחיד שבא במגע עם הקליע, ולכן הוא הגורם היחיד שיכול לשמר את תנועתו:

הנה על כורחנו אנו אומרים, שהמניע הראשון נותן כוח מניע, בין לאוויר בין למים בין לכל דבר אחר, שמטבעו הוא עשוי להיות מניע ומונע; אבל דבר זה אינו פוסק בבת אחת מלהיות מניע ומונע, אלא אף-על-פי שהוא פוסק לנוע יחד עם המניע, עדיין הוא מניע, ולפיכך הוא מניע דבר אחר הצמוד אליו, והוא הדין לגבי הבאים אחריו.<sup>10</sup>

<sup>8</sup> על פי תפיסתו של אריסטו (ראו: סמבורסקי (תשי"ד), עמ' 86–89), יש הבחנה מובהקת ביקום בין אזור תחתון (מן הארץ עד לירח) לעליון (שבו מצויים הכוכבים). במאמר זה אתייחס אך ורק לסוג התנועה הטבעית המצויה באזור התת-ירחי, מכיוון שהיא התנועה הרלוונטית לבעיית תנועת הקליע. אתעלם מהתנועה הטבעית של הגלגלים השמימיים (העשויים מיסוד חמישי, נצחי ובלתי משתנה, הקרוי 'אֵתֶר' – *aether*), שהיא סיבובית ובלתי משתנה.

<sup>9</sup> למען השוואה, במסגרת הפיזיקה המודרנית אין צורך להניח קיומו של כוח מכל סוג שהוא על מנת להסביר את המשך תנועתו של הקליע ('חוק ההתמדה'). אלמלא הפעולה של כוחות חיצוניים כגון כוח המשיכה והיכוך האוויר, הקליע היה ממשיך לנוע בקו ישר (בהתאם לזווית הזריקה) ללא מפריע.

<sup>10</sup> אריסטו נוגע בנקודה זו בקצרה לפני כן, בספר ד' פרק 8 של ה'פיזיקה', אך בלי להרחיב את הדיבור על כך. יתרה מזאת, בפרק זה, בו אריסטו דן באפשרות קיום הריק (*vacuum*), סוגיית תנועת הקליע לא נידונה לכשעצמה. אריסטו משתמש בדוגמת הקליע ובתפקיד התווך כגורם להמשך תנועתו המאולצת, כאחד מהטיעונים שלו נגד קיום הריק.

כלומר שכאשר המניע (היד) מזיז את הגוף (האבן), בו בזמן הוא מניע גם את שכבת התווך (האוויר) הצמודה למניע ומעביר לשכבה הזאת את הכוח להניע גוף אחר. הנקודה האחרונה היא קריטית, כי גם על התווך חלים חוקי התנועה, ולכן כאשר המניע המקורי הפסיק את פעולתו (היד עצרה לאחר שהאבן הושלכה) כבר אין מה שיניע את שכבת התווך הצמודה ליד, והיא נעצרת. אולם בגלל כוח ההנעה שהמניע המקורי העביר לשכבה הזאת, היא הופכת לרגע מסוים למעין 'מניע בלתי מונע'. שכבה זו מעבירה את כוח ההנעה לשכבה הבאה הצמודה אליה וכן הלאה. בדרך זו הקליע נתון תמיד במגע עם חלק מהתווך המסוגל להניע אותו. אולם הכוח המניע נחלש במעברו משכבה לשכבה עד שמגיע הרגע שבו שכבה מסוימת מונעת אך אינה מקבלת עוד את הכוח להניע. בנקודה זו התנועה המאולצת נפסקת, והקליע נע בתנועתו הטבעית, משמץ האבן נופלת ישר כלפי מטה.<sup>11</sup>



איור 1: תנועת הקליע לפי תורת התנועה של אריסטו  
 בזמן הירי, התותח מניע בו זמנית את הקליע ואת שכבת האוויר הצמודה לו כשהוא מעביר אליה את הכוח להניע גוף אחר. שכבה זו מעבירה את כוח ההנעה לשכבה הבאה הצמודה אליה וכן הלאה. בדרך זו הקליע נתון תמיד במגע עם חלק מהאוויר המסוגל להניע אותו. אולם הכוח המניע נחלש במעברו משכבה לשכבה עד שמגיע הרגע בו שכבה מסוימת מונעת, אך אינה מקבלת עוד את הכוח להניע. בנקודה זו, התנועה המאולצת נפסקת והקליע נע בתנועתו הטבעית ונופל ישר כלפי מטה.

אריסטו שקל הסבר אפשרי נוסף לתנועת הקליע, אשר גם בו מיוחס תפקיד מרכזי לתווך. הסבר זה מבוסס על הרעיון של 'התחלפות' (antiperistasis)<sup>12</sup>: האוויר שהקליע דוחף במסלול תנועתו חוזר לאחור על מנת למלא את המקום הריק הנוצר מאחורי הקליע, ועל ידי כך הוא משמש כוח מניע המשמר את תנועתו של הקליע.<sup>13</sup> הוגים חשובים, כדוגמת ז'אן בורידן (Jean Buridan, מהמאה הארבע-עשרה),<sup>14</sup> פירשו את אריסטו כאילו הוא דוגל בהסבר זה. בורידן טען:

[אריסטו בנקודה מסוימת] טוען כי הקליע מפנה במהירות את המקום בו היה, והטבע, אשר לא מאפשר לריק להתקיים, שולח במהירות אוויר מאחוריו וממלא את הריק. האוויר המונע בדרך זו פוגע בקליע ומניע אותו. [תהליך] זה חוזר על עצמו ברציפות לאורך מרחק מסוים [...]<sup>14</sup>

<sup>14</sup> על בורידן ודעותיו בנוגע לתנועת הקליע ראו להלן.

לא ידוע לנו בדיוק מה היו מקורותיו של בורידן, אך מתקבל הרושם שהם, ואולי בורידן עצמו, נטו לבלבל בין שני ההסברים הללו (זה המבוסס על המושג של 'אנטיפריסטאסיס' והסברו של אריסטו עצמו). לאור הראיות העומדות לרשותנו כיום, הדעה הרווחת בקרב המומחים היא שאריסטו למעשה דחה את ההסבר המבוסס על 'אנטיפריסטאסיס'.<sup>15</sup>

## ב. הביקורת על ההסבר של אריסטו ודעות חלופיות

בסעיף זה אמנה בסדר כרונולוגי את הבעיות המרכזיות שהעלו הפילוסופים ופרשני אריסטו השונים ואתאר את הצעותיהם לפתרונות חלופיים.

### העת העתיקה

אם נסתמך על תומס קון, אריסטו עצמו היה המבקר הראשון של הסברו לתנועת הקליע:

נדמה כי הוא [אריסטו] לא היה מרוצה כל-כך מפתרון זה [של האוויר כמניע], מפני שהוא נתן לפחות שתי גרסאות הסותרות זו את זו, והוא תמיד היה מעט פולמוסי בנקודה זו.<sup>16</sup>

אולם, להערכתנו, פרשנותו של קון סובייקטיבית למדי, ויתר על כן, היא מתעלמת מכך שלמרות שאריסטו מזכיר את ההסבר השני (המבוסס על 'אנטיפריסטאסיס'), אין הוא מאמץ אותו.

פרשנותו של שמואל סמבורסקי, לעומת זאת, זהירה יותר, והיא עולה באופן חד-משמעי מהטקסט האריסטוטלי. בלי להרחיק לכת כפי שעשה קון, סמבורסקי מצביע על כך שבהסבר האריסטוטלי המקורי כבר מצוי רעיון מהפכני חשוב שאותו עתידים היו לפתח פילוסופים מאוחרים יותר. בסופו של דבר (ובאופן פרדוקסלי) רעיון זה הביא לדחיית ההסבר המקורי. בתפיסתו המקורית של אריסטו מצוי גרעין ראשון של רעיון ה'אימפטוס' (impetus), שאותו ניסחו פרשנים ומבקרים מאוחרים יותר – קרי הרעיון שהכוח להניע יכול להיות מועבר מאובייקט אחד לאחר. כזכור, בהסברו של אריסטו הכוח להניע מועבר מהמניע המקורי (בדוגמה שלנו – היד) אל שכבת האוויר הצמודה, ומזו אל השכבה הבאה, וכך הלאה.<sup>17</sup> תימוכין לפרשנותו של סמבורסקי נוכל למצוא בכך שכמה פילוסופים ופרשנים אריסטוטליים (כמו אֶבְנ־סִינָא, כפי שנראה בהמשך) ניצלו טיעון זה כדי לבסס את דעותיהם: אם מניחים שהכוח להניע מועבר מהמניע (המשליך) המקורי אל התווך (האוויר), למה אי-אפשר להניח שכוח מסוג זה מועבר ישירות אל הגוף עצמו?

ההוגה הראשון שידוע לנו שהציג הסבר אחר לבעיית הקליע לאחר אריסטו היה האסטרונום היווני הדגול היִפְּרָכּוּס (Hipparchus, מהמאה השנייה לפנה"ס). ניתן לראות

בו מקדים עתיק של מושג ה'אימפטוס'.<sup>18</sup> בפירושו לעל השמים של אריסטו, הפרשן האריסטוטלי מהמאה השישית לסה"נ סימפליקיוס (Simplicius) תיאר את עיקרי תפיסתו של היפרכוס אודות תנועת הקליע:

היפרכוס טוען בספרו על גופים הנישאים מטה על-ידי כובדם כי במקרה של [גוף כבד] הנזרק כלפי מעלה, כוח הזריקה הוא הסיבה לתנועה כלפי מעלה, כל עוד הוא חזק יותר מכוח הגוף הנזרק; ככל שכוח הזריקה חזק יותר, כך הגוף נע מהר יותר כלפי מעלה. בהמשך, כאשר הכוח פוחת, התנועה כלפי מעלה נמשכת במהירות מופחתת, עד שהגוף מתחיל לנוע כלפי מטה תחת השפעת המשיכה הטבעית שלו, למרות שכוח הזריקה עוד קיים במידה מסוימת; כאשר [כוח] זה דועך, הגוף נע כלפי מטה מהר יותר, ומשיג את מהירותו המרבית כשאותו כוח נעלם לחלוטין.<sup>18</sup>

אף על פי שאין בידינו עדויות על הביקורת של היפרכוס וגם איננו יודעים מה היו הנימוקים שלו לדחיית ההסבר של אריסטו, אפשר לשער על סמך ההסבר שלו שהוא דחה את ההנחה שיש צורך במגע מתמשך בין גורם חיצוני המניע את הגוף לגוף המונע. כמו כן משתמעת דחייה של הרעיון כאילו יש תפקיד כלשהו לתווך (האוויר) כגורם מניע המתווך בין הכוח המקורי ובין הגוף המונע.

על סמך תרגום לערבית של טקסט שכתב אלכסנדר איש אפרודיסיאס (Alexander of Aphrodisias) בערך בשנת 200 לסה"נ, ידוע לנו כי מבקר חשוב נוסף של דעותיו של אריסטו היה הרופא היווני הנודע גלנוס (Galen – מהמאה השנייה לסה"נ).<sup>19</sup> גלנוס דחה ככל הנראה את התזה כי כל גוף הנמצא בתנועה חייב להיות מונע על ידי משהו אחר. לעומת זאת הוא החזיק בדעה כי הדברים שנעים מעצמם הם אותם הדברים אשר המניע נמצא בהם והם אינם מונעים על ידי גורם חיצוני. אריסטו לא כלל את הגופים הדוממים ב'דברים שנעים מעצמם' (בניגוד ליצורים החיים, המסוגלים לעשות זאת), אבל ייתכן שגלנוס כן עשה זאת.<sup>20</sup>

אלכסנדר איש אפרודיסיאס, הפרשן האריסטוטלי ביותר מכל פרשני אריסטו,<sup>21</sup> נצמד להסבר המקורי והסכים עם אריסטו שהאוויר הוא הגורם המשמר את התנועה בתנועה המאולצת של הקליע. אולם על פי רישומיו של סימפליקיוס, יש הבדל דק בין פירושו של אלכסנדר למנגנון שהציע אריסטו ובין ההסבר המקורי. האוויר מקבל מהגוף שהניע את הקליע במקור את הכוח להניע (כפי שאריסטו טען), אבל על פי דעתו של אלכסנדר:

<sup>18</sup> אני משתמש במונח 'אימפטוס' כמעין קיצור דרך לאזכור השקפה זו, אבל חשוב להדגיש כי המונח עצמו הוא מונח לטיני מאוחר יותר, מתקופת הסכולסטיקה. השם היווני המקביל הוא *ροπή* (*ropé*); הפילוסופים האסלאמיים השתמשו במונח הערבי *مائل* (*מַיִל*, *maʿl*); המונח העברי המקביל הוא 'נטייה'. בטקסטים בשפה האנגלית נהוג לתרגם מונח זה כ-"inclination".

הכוח [האוויר] מקבל מהזורק הוא כזה שבהיותו [האוויר] מונע מעצמו, הוא יכול להיות מניע. במובן מסוים [האוויר] הופך למשך זמן קצר לחפץ המניע את עצמו, שטבעו לספוג [...] את הכוח של המניע [המקורי].<sup>22</sup>

אף על פי שבאופן ראשוני הרעיון כבר מצוי בגרסה האריסטוטלית, מהמשפט המודגש במובאה זו עולה שאלכסנדר ניסח באופן חד יותר את העובדה שיכולת או כוח כלשהו השמור או ה'מאוכסן' בתוך הגוף עצמו (במקרה זה האוויר) מאפשר לו להמשיך בתנועתו אפילו אחרי שהכוח המקורי (המשליך) כבר אינו פועל עליו (השוו לציטוט מאריסטו לעיל).<sup>23</sup> את העיקרון הזה, הרואה 'יכולת או כוח הקיים בגוף עצמו', ניסח אלכסנדר באופן ברור עוד יותר בנייתו את התנועה הטבעית. כפי שעולה מדחייתו את הביקורת של גלנוס, אלכסנדר הגן על האקסיומה האריסטוטלית שכל דבר שנע מונע על ידי משהו. אולם בניסונו להבהיר אחת מן הנקודות הפחות ברורות של הפיזיקה האריסטוטלית, הוא עשה צעד שחשיבותו ההיסטורית גדולה. בהתייחסותו לשאלה מהו הכוח המניע את הגופים הדוממים בתנועתם הטבעית\* טען אלכסנדר שלגופים אלה יש 'נטייה' בתוך עצמם הגורמת להם לנוע באופן טבעי כלפי מעלה או מטה. כלומר יש להם עיקרון פנימי של תנועה.<sup>24</sup> בהמשך נראה כי ייתכן שהמשגה זו של 'נטייה טבעית' כעיקרון פנימי הקיים בתוך הגוף השפיעה על פרשנים ופילוסופים מאוחרים יותר בהבנתם את התנועה המאולצת בנוסף לזו הטבעית.

תמיסטיוס (Themistius, מהמאה הרביעית לסה"נ), גם הוא פרשן אריסטוטלי חשוב, המשיך בקו של אלכסנדר באשר לרעיון שיש כוח כלשהו השמור בתוך (אוויר או מים) במקרה של התנועה המאולצת. נתמקד בדוגמה של קליע הנזרק באוויר:

האוויר [...] הופך, ניתן לומר, למונע מעצמו ולפיכך, למשך זמן מסוים, [הוא] מונע ומניע בו זמנית.<sup>25</sup>

בהסברו של תמיסטיוס, הרעיון של אפשרות העברת כוח מניע מגוף לגוף מקבל ביטוי מובהק באנלוגיה בין 'תנועה' ל'חימום'. לאחר הזריקה אין האוויר מונע על ידי הגורם המשליך את הקליע במקור,

\* אריסטו עצמו התייחס לשאלה זו וטען כי מספר סיבות מסבירות את התנועה הטבעית, אולם הוא לא נתן תשובה חד-משמעית לשאלה. פרשניו פירשו זאת בדרכים שונות, והסוגיה המשיכה להעסיק את הפרשנים האריסטוטליים השונים מאות שנים; ראו: אריסטו, פיזיקה, ספר ח פרק 4. לדיון בסוגיה זו ראו גם פינס (1960) (1986), עמ' 239-236; דיקסטררויס (1961), עמ' 26, 176-177; לינדברג (1992), עמ' 301-302. נושא התנועה הטבעית הוא חשוב ורחב כשלעצמו, ואין ביכולתי לדון בו במאמר קצר זה.

אלא על-ידי כוח[ו] של[ו] עצמ[ו]ן] אותו קיבל [...] כסימן מהמשליך, בדיוק כפי שמים שחוממו על-ידי אש לא רק נותרים חמים לאחר שהוסרו מהאש, אלא גם שומרים למשך זמן ארוך את היכולת לחמם בעצמם [דברים אחרים].<sup>26</sup>

האנלוגיה למים המחוממים וליכולתם לחמם גופים אחרים מצביעה מפורשות על יכולת המאוכסנת בגוף עצמו.

דעותיו של תמיסטיוס חשובות מבחינה נוספת. טענתו שקל יותר להמשיך את התנועה של גוף שכבר מצוי בתנועה מלהתחיל להניע גוף נייה מניחה את הקיום של 'משהו' בגוף הנמצא בתנועה המאפשר לו להמשיך בתנועה.<sup>27</sup> כמאתיים שנה מאוחר יותר שוב הועלתה בעיית הקליע על ידי שני פרשנים אריסטוטליים חשובים שנבדלו זה מזה בהבנת אריסטו ובהתייחסותם להשקפותיו. במאה השישית לסה"נ הצביע סימפליקיוס בפירושו לפיזיקה של אריסטו על בעיה חשובה בהסבר המקורי:

אך אם נאמר שהאיש המשליך את הקליע מעביר לאוויר תנועה רציפה, מדוע לא נאמר שתנועה זו מועברת לקליע מבלי לערב את האוויר ולכן מבלי שנהיה מוכרחים להניח [האוויר] לא רק מונע אלא גם מניע?<sup>28</sup>

עם זאת, להבדיל מהיפרכוס למשל, סימפליקיוס מצא כי אי-אפשר לוותר על הצורך בתווך (האוויר) בהסבר כי לאוויר (בגלל יכולתו לנוע בכל הכיוונים) יש 'כושר מייצב' החיוני לתנועת הקליע.<sup>29</sup>

לעומתו, יוהנס פילופונוס (Johannes Philoponus), פרשן נוצרי בן זמנו של סימפליקיוס, היה ביקורתי ביותר כלפי התאוריות של אריסטו בטענה שהן בלתי עקביות ואינן מתיישבות עם העובדות.<sup>30</sup> אצל פילופונוס אנו פוגשים באופן מוצהר וברור ביותר את רעיון ה'אימפטוס'. בפירושו לפיזיקה של אריסטו טען פילופונוס:

נראה כי ל[גופים] טבעיים יש עקרון פנימי של תנועה ומנוחה בתוך עצמם... לכן אבנים, כאשר משחררים אותן [ונותנים להן ליפול], אינן נעות כלפי מטה בגלל פעולת האדם ששחרר אותן (שהרי זה הדבר היחיד שעשה); אלא הנטייה הטבעית (ropé) המצויה בהן, היא זו שמובילה אותן כלפי מטה.<sup>30</sup>

לא ברור עד כמה הושפעו דעותיו של פילופונוס מדעותיו של היפרכוס.<sup>31</sup> שלמה פינס ומומחים אחרים משערים כי ייתכן שהוא שאב השראה דווקא מאלכסנדר איש אפרודיסיאס האריסטוטלי ומתורתו על ה'נטיות הטבעיות'. פינס משער כי ייתכן שפילופונוס הגיע על

<sup>30</sup> לביקורתו של פילופונוס היו מניעים דתיים חשובים לכשעצמם, אך כאן אתמקד בטיעונים הפיזיקליים הרלוונטיים.



סמך רעיון זה למסקנה כי גם 'נטייה מאולצת' או 'כפויה' היא אפשרית, ויישם זאת בבואו להסביר את התנועה המתמשכת של הקליע לאחר שזה נפרד מהגורם המשליך.<sup>32</sup> בקרב המומחים רווחת הדעה כי פילופונוס ניסח בבהירות גדולה יותר מכל קודמיו כי מה שמועבר לקליע הוא כוח מניע בלתי חומרי. יתרה מזאת, בידינו ראיות כתובות של הטיעונים שפילופונוס הציע כנגד הסברו של אריסטו.<sup>33</sup> בפירושו לפיזיקה הוא מבקר את המושג של 'אנטיפריסטאסיס' (שאריסטו כבר דחה) וכן את ההסבר של אריסטו עצמו, שבו אתמקד. בהתייחסותו להסבר של אריסטו, פילופונוס טוען:

אם [אדם שזרק אבן בידו] אינו חולק כל כוח לאבן, אלא מניע אותה על-ידי דחיפת האוויר בלבד, ובדומה לזה מיתר הקשת והחץ, לשם מה נגיעת היד באבן או נגיעת המיתר בחריץ זנב החץ? [...] ועוד, אם מיתר וחץ או יד ואבן נוגעים זה בזה במגע רציף ואין שום דבר חוצץ ביניהם, מה האוויר המתנועע מאחורי הקליע? ואם הוא מתנועע בצדדים, מה עניינו אצל הגוף הנזרק, הואיל ואין האוויר פוגע בו?<sup>34</sup>

פילופונוס גם מתאר ניסוי מחשבתי: נניח שנשים אבן על מוט וננסה להניע את האבן על ידי כך שנפנף את האוויר שמאחוריה. הוא מגיע למסקנה המתבקשת שהאבן לא תזוז כפי שניתן היה לשער מההסבר האריסטוטלי.<sup>35</sup> והוא מסכם:

מזה ומטעמים אחרים יכולים לראות, שאי אפשר להם לדברים שכופים עליהם תנועה שינועו בדרך זו; אלא מן ההכרח, שאיזה כוח מניע, שאינו גופני, יחלק [ינתן] לנוק על-ידי הוורק...<sup>36</sup>

במשפט אחר פילופונוס טוען באופן שאינו משתמע לשתי פנים כי התווך אינו עוזר. אדרבא, הקליע היה נע ביתר קלות בריק. הסברו של פילופונוס מתיישב עם העובדה שלרוב התווך נצפה כמעכב תנועה, ולא כגורם לה או כמאפשר אותה.<sup>37</sup>

#### הפילוסופים האסלאמיים

מושג ה'כוח המוטבע' או ה'כוח המניע הבלתי חומרי' שפילופונוס טבע, אשר בתקופת הסכולסטיקה קיבל את השם 'אימפטוס', עתיד היה למלא תפקיד מרכזי בתאוריות של הפילוסופים של הטבע מהמאות השלוש-עשרה, הארבע-עשרה ואילך. אולם, כפי שטען אדוארד דיקסטרהויס (Dijksterhuis), לא ברור אם הפילוסופים המאוחרים הללו למדו אותו ממקורות ערביים (שהשתמשו במושג ה'מִיִּל', הדומה מאוד למושג ה'אימפטוס', כפי שנראה בהמשך) או שההמשגה החדשה הייתה תגובה ספונטנית בפילוסופיה המערבית להסברו הבעייתי של אריסטו לתנועת הקליע.<sup>38</sup>

החוקרים מורדוך וסילה, למשל, סבורים כי התאורטיקנים הנוצריים של ימי הביניים

הגיעו לתפיסותיהם וניסחו את תיאוריות ה'אימפטוס' שלהם (בגרסותיהן השונות) בכוחות עצמם, ללא כל השפעה של הפילוסופים הערבים. לעומתם פינס טוען כי התרגומים של עבודותיו של פילופונוס בכלל, ודעותיו וטיעונו כנגד הסברו של אריסטו לתנועת הקליע בפרט, השפיעו רבות על הפילוסופים הערבים, ואלה השפיעו מאוחר יותר על הפילוסופים של תקופת הסכולסטיקה. חסנאוי אמנם אינו טוען זאת מפורשות, אך הוא רומז למסקנה דומה לזו של פינס בהצביעו על הדמיון המרשים בין תיאוריות התנועה של שני נציגים בולטים בכל אחת משתי התרבויות: הפילוסוף והרופא האסלאמי הנודע אַבן־סינא (ابن سينا – פעל במאה האחת־עשרה לסה"נ) ופילוסוף הטבע הנוצרי בורידן, כ־300 שנה אחריו.<sup>39</sup> לתרגומם של טקסטים ערביים ללטינית הייתה השפעה רבה על הפילוסופים בתקופת הסכולסטיקה ועל החייאת הלימוד, חקר הטבע והמדע במערב.<sup>40</sup> כתביהם של אַבן־סינא ואַבן־רושד (ابن رشد – בן המאה השתיים־עשרה לסה"נ), שני פילוסופים אסלאמיים מפרשניו החשובים ביותר של אריסטו, תורגמו ללטינית ונלמדו על ידי הסכולסטיקנים.<sup>41</sup> נפנה אפוא להסברו של אַבן־סינא לתנועת הקליע.

אַבן־סינא (בלטינית: Avicenna) קיבל את האקסיומה האריסטוטלית שעל פיה כל גוף הנמצא בתנועה מניח קיום של גורם מניע כלשהו, אך הוא הציע תיאוריה מורכבת של תנועה המבוססת על מושג ה'מַיִל' (ميل). אַבן־סינא הושפע ככל הנראה מפילוסוף אסלאמי מהמאה העשירית, אל־פאראבי (الفارابي, al-Fārābī), ועיבד ופיתח באופן שיטתי את הרעיונות אשר מצא בעבודותיו של קודמו.<sup>42</sup>

ההגדרה של 'מַיִל' אצל אַבן־סינא אינה חד־משמעית והוא משתמש במונח זה באופנים שונים: (1) כנטייה לתנועה טבעית, כלומר כמעין 'מתווך' (בין הטבע לגוף) האחראי לתנועה הטבעית של הגוף, בדומה לטענה המקורית של אלכסנדר איש אפרודיסיאס; (2) כהתנגדות של הגוף לתנועה מאולצת; (3) כמושהו שהמניע מעביר אל הגוף ו'מטביע' בו.<sup>43</sup> בהשקפתו של אַבן־סינא, ה'מַיִל', שקיים באופן טבעי בגוף (נטייה טבעית) או שמועבר אל הגוף על ידי גורם מניע חיצוני (נטייה מאולצת), הוא האחראי לתנועה כאשר אין כוח אחר הנראה לעין במגע עם הגוף. ניסיונו של אַבן־סינא להגיע למערכת מושגית מקיפה ושיטתית מתגלה בהצעתו שיש סוג שלישי של 'מַיִל', או 'נטייה נפשית', האחראי לתנועה של יצורים חיים המסוגלים להניע את עצמם ללא כל עזרה של מניע חיצוני.<sup>44</sup>

אַבן־סינא טען כי ניתן להסיק את קיום ה'מַיִל' (הן המאולץ והן הטבעי) משתי עובדות לפחות: מהאפקטים הקינטיים שלו (יכולתו או כוחו לגרום לתנועה) ומהאפקטים המוחשיים שלו (למשל, מה שאנו חשים כאשר היד מנסה לעצור את התנועה של גוף הנמצא בתנועה, דהיינו תחושה של כוח מוחשי הנמצא בגוף עצמו). נקודה נוספת שיש לה חשיבות גדולה בתורת התנועה של אַבן־סינא היא שהנטייה המאולצת (כל עוד היא נמשכת) מתגברת על הנטייה הטבעית של הגוף.<sup>45</sup>

בבואו לנתח את תנועת הקליע דחה אֶבְן־סִינָא את רעיון ה'אנטיפריסטאסיס' וגם את רעיון התווך (האוויר) ככוח מניע. כמו סימפליקיוס לפניו (אבל עם מסקנות אחרות) תהה אֶבְן־סִינָא מדוע אי־אפשר לטעון כי הכוח המניע, שלכאורה מועבר אל האוויר, אינו יכול להיות מועבר ישירות אל הקליע עצמו. ובאמצעות טיעון המזכיר במידה רבה את טיעונו של פילופונוס הצהיר אֶבְן־סִינָא כי תנועות האוויר החזקות ביותר (קרי רוחות), המסוגלות לשבור ענפי העצים, אינן מסוגלות להחזיק חפץ יחסית קל כגון חץ בתנועה.<sup>46</sup> בסיכומו של דבר אֶבְן־סִינָא טען:

כאשר בודקים עניין זה לאשורו, מוצאים אנו שנכונה ביותר היא השקפת אלה החושבים שהנע מקבל מן המניע נטייה [מ'ייל']. הנטייה היא מה שחשים בו בחוש בשעה שמנסים לכופ מנוחה על תנועה טבעית או על תנועה כפויה: מורגש אז כוח הדיפה שאין ספק במציאותו בגוף, אף אם הגוף נע מתוך כפייה... השקפתם של הטוענים שהאוויר הודף – בלתי נכונה.<sup>47</sup>

מעניין לראות כי אֶבְן־סִינָא מציג את הסברו של אריסטו בצורה שונה במעט מהמקור:

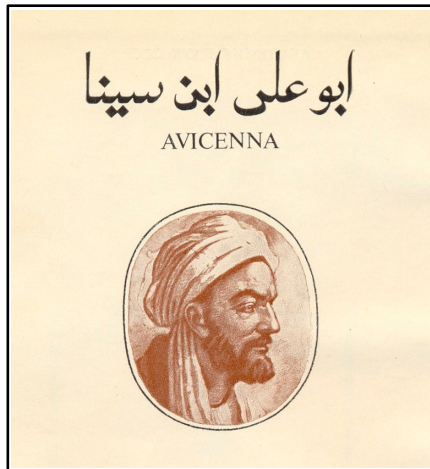
הדבר או האדם שמניע [את הגוף] גורם הן לאוויר והן לגוף לנוע. אולם האוויר, בגלל היותו מתאים יותר לקבל את ההדיפה, מונע במהירות רבה יותר, וסוחב עימו את הגוף המונח עליו.<sup>48</sup>

ציטוט זה והעובדה שאֶבְן־סִינָא דן בנימוקים שונים שהועלו להגנת הטענה המובאת בציטוט ממחישים שוב את המורכבות שבתהליך העברת הידע בעת העתיקה ובימי הביניים וגם את ההבדלים בדרכי הפירוש והעיבוד (ואף העיוות) של דעותיו של אריסטו במרוצת השנים.<sup>49</sup> לאחר שהציג טיעונים נוספים נגד תפיסת האוויר כגורם מניע, אֶבְן־סִינָא הגיע למסקנה שהאוויר הוא כוח מעכב תנועה.<sup>49</sup> יתר על כן, לפי פינס אֶבְן־סִינָא היה קרוב מאוד להבנה של מה שעתיד להיקרא 'עקרון ההתמדה':

[אֶבְן־סִינָא] ניסח את הטענה האומרת, שלוא היה קיים ריק (הוא קיבל את דעת אריסטו בעניין אי־אפשרות קיומו) לא היה נעצר לעולם טיל [קליע] הנע בתוכו כתוצאה מפעולת ה'נטייה'. במלים אחרות: תנועה, אם אינה מעוכבת על־ידי גורמים חיצוניים, יכולה להימשך ללא הפסקה. על אף ההבדל במושגים היסודיים ובמונחים, תפיסה זו מזכירה לנו את חוק ההתמדה.<sup>50</sup>

נקודה זו חשובה ביותר כיוון שהיא מבהירה הבדל מהותי בין תפיסתו של אֶבְן־סִינָא לזו של פילופונוס. אף על פי שפילופונוס טען כי הקליע היה נע ביתר קלות בריק, הוא עדיין חשב שאפילו בריק הקליע היה נעצר בנקודה כלשהי. הכוח המוטבע בגוף המושלך היה

\* לדוגמה: אֶבְן־סִינָא מפנה את טיעונו על 'הרוחות החזקות' כנגד פרשנים והוגים קודמים אשר בעצמם התגוננו (באמצעות טיעונים משלהם) מפני מבקרים שטענו שהאוויר אינו מסוגל לשמר או להחזיק דברים כבדים בתנועה (ראו: חסנאוי (1984)). ראו גם את הדוגמא של בורידן לעיל, שעל פי פרשנותו אריסטו אכן דגל בהסבר המבוסס על רעיון ה'התחלפות' ('אנטיפריסטאסיס').



אבן-סינא (c.1037–c.980)

רופא דגול ומגדולי הפילוסופים האסלאמיים. אבן-סינא כתב חיבורים רבים ברפואה, מטפיזיקה, פסיכולוגיה, פילוסופיית הטבע, אסטרונומיה, מתמטיקה ולוגיקה. כתביו ופרשנותו לכתבי אריסטו תורגמו ללטינית ונלמדו על-ידי הפילוסופים הסכולסטיים.

מתכלה כתוצאה מהזמן והמרחק שעבר מנקודת הזריקה. במילים אחרות, הכוח המוטבע הולך ונחלש ומאבד מעצמתו. בהשקפתו של אבן-סינא, ולעומת זאת, מנקודת מבט אונטולוגית 'הנטייה' המועברת אל הגוף קבועה ובלתי משתנה. מובן שכוחות חיצוניים נוספים הפועלים על הגוף (כגון התנגדות התווך) יכולים להשפיע על תנועתו ומסלולו של הגוף הנע, אבל ה'מיייל' שהועבר אל הגוף כתכונה פנימית של הגוף אינו משתנה (כמובן, ה'מיייל' יכול להשתנות אם כוח מניע חיצוני אחר מעביר אל הגוף 'נטייה מאולצת' חדשה; אבל אם כך, נטייה חדשה זו לא תשתנה עד שכוח חדש אחר יפעל על הגוף ויעביר לו נטייה מאולצת חדשה, וכן הלאה).<sup>51</sup>

#### תקופת הסכולסטיקה

בעיית תנועת הקליע ורעיון ה'אימפטוס' התעוררו מחדש בעצמה רבה ב'תקופת הסכולסטיקה', במאות השלוש-עשרה והארבע-עשרה, תקופה שבה אריסטו ופרשניו שימשו כנקודת המוצא לעיון בענייני הטבע. כפי שתומס קון מציין, כותרת ספרו של בורידן: שאלות על שמונת הספרים של הפיזיקה לאריסטו (*Questiones super octo physicorum libros Aristotelis*), היא כותרת אופיינית למדע הסכולסטי.<sup>52</sup> אף על פי שכמה פילוסופים עדיין קיבלו את הדעה על תפקיד האוויר כגורם לתנועה המתמשכת של הקליע,<sup>53</sup> החלה אז להישמע ביקורת נוקבת על הסברו של אריסטו לתנועת הקליע בפרט, ועל תורת התנועה שלו בכלל. ביקורת זו הייתה חלק מההערכה המחודשת באותה תקופה של דעותיו של אריסטו על הטבע.<sup>54</sup> נוסף על כך, ניתוח בעיית הקליע והבנת מהות הכוח המניע אותו קיבלו חשיבות מיוחדת מסיבות פרגמטיות למדי: השימוש ההולך וגובר בארטילריה בקרב.<sup>55</sup>

בתהליך ההערכה המחודשת של דעותיו של אריסטו על תנועת הקליע (בין היתר), ובדומה לאבן-סינא, התקרבו אנשי הסכולסטיקה להבנת עקרון ההתמדה. דמות חשובה בתהליך זה היה ויליאם איש אוקהם (William of Ockham), מהמאה הארבע-עשרה לסה"נ). כדי להפריך את הסברו של אריסטו הוא השתמש בטיעון המתוחכם (אחד מכמה טיעונים)

על שני חצים העוברים במעופם קרוב ביותר זה לזה אך בכיוונים מנוגדים. מי שדוגל בהסבר הרואה באוויר את הגורם המניע את החצים, טען אוקהם, חייב להגיע למסקנה האבסורדית שהאוויר (באותו אזור) נע ומניע בכיוונים הפוכים.<sup>56</sup> יתר על כן, אוקהם לא רק דחה כל הסבר הקושר את התווך לתנועת הקליע, אלא גם טען שאין צורך להניח קיומו של כוח מכל סוג שהוא על מנת להסביר את המשך תנועתו של הקליע:

הדבר הנע... לאחר היפרדות הגוף הנע מהמניע המקורי, הוא הוא הדבר המונע בעצמו ולא על-ידי כל כוח נפרד, כי הדבר הנע והתנועה אינם ניתנים להבחנה.<sup>57</sup>

אולם רוב הפילוסופים בני תקופתו לא הלכו בעקבות תפיסתו של אוקהם. עדיין שלט העיקרון שעל פיו 'כוח' (אפילו אם הוא נתפס כמושהו בלתי חומרי המוטבע בגוף עצמו) ו'תנועה' בלתי ניתנים להפרדה.<sup>58</sup>

התיאוריה המקובלת ביותר במאה הארבע-עשרה להסבר התנועה המתמשכת של הקליע לאחר שנפרד מהמשליך המקורי הייתה 'תורת האימפטוס'. הראשון לאמץ תיאוריה זו באופן מלא בתקופה זו היה התאולוג האיטלקי פרנציסקוס איש מרקיה (Franciscus of Marchia).<sup>58</sup> השקפתו הייתה קרובה יותר לתפיסתו המקורית של פילופונוס מאשר לתפיסתו של אבן-סינא: הוא חשב שאפילו בהעדר כוחות חיצוניים מעכבים, ידעך הכוח המוטבע בקליע תוך זמן קצר. בדומה לו הצרפתי ניקולס בונה (Nicolas Bonet), בן תקופתו של פרנציסקוס, הצהיר באופן חד-משמעי כי גם בריק תיעצר התנועה בגלל דעיכת ה'אימפטוס'.<sup>59</sup>

מהגרסאות השונות של 'תורת האימפטוס' שפותחו בתקופת הסכולסטיקה, אחת מן המפותחות ומתוחכמות ביותר, ובסופו של דבר – המשפיעה ביותר, הייתה זו של החוקר הפריזאי ז'ן בורידן (במאה הארבע-עשרה).<sup>60</sup> לפי בורידן, המניע חייב ללוות את הגוף המונע; ובעקבות פילופונוס, במקרה של הקליע, הכוח המניע מוטבע בקליע עצמו, קרי ה'אימפטוס' (בורידן הגדיר אותו כערך פרופורציונלי ל'כמות החומר' של הגוף ולמהירותו).<sup>61</sup> אולם, בשונה מפילופונוס ובדומה לאבן-סינא, לדעת בורידן ה'אימפטוס' המועבר אל הגוף על ידי הגורם המניע המקורי הוא מתמשך. כלומר כוח מוטבע זה מסוגל לשמר ולהחזיק את הקליע בתנועה במהירות קצובה ללא הגבלת זמן כל עוד לא יפעלו על הגוף כוחות חיצוניים נוספים (חיכוך האוויר וכוח המשיכה, למשל).<sup>61</sup> איני יכול להביא את כל הטיעונים המגוונים שהעלה בורידן נגד תפיסתו של אריסטו, לכן אסתפק בדוגמה מייצגת. הוא טען כי חנית שנזרקת לאוויר תנוע ללא שום בעיה גם כאשר שני קצותיה חדים ביותר, ובדיוק

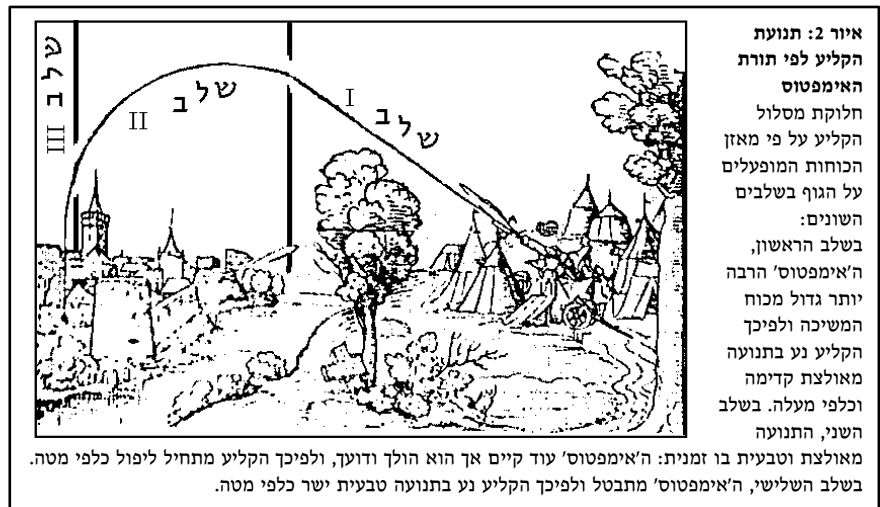
\* ככל הנראה מניעים תאולוגיים (יותר מהעניין בבעיה הפיזיקלית כשלעצמה) הביאו את פרנציסקוס איש מרקיה לעסוק בבעיית תנועת הקליע ומושג ה'אימפטוס'. לדין בסוגיה זו ראו פונקנשטיין (1986), עמ' 167-168.  
<sup>2</sup> מושג זה דומה (אך לא זהה) למושג המודרני של 'תנע' (momentum), המוגדר כמכפלה של המסה במהירות הגוף.

כפי שהייתה נעה חנית עם קצה אחורי קהה. לפי ההסבר האריסטוטלי, טוען בורידן, היה ניתן לצפות להבדל ואף לאפשרות שהחנית בעלת הקצה האחורי החד לא תנוע כלל (כי האוויר לא היה מסוגל 'לדחוף' את החנית מאחור בגלל חדותה).<sup>62</sup>

אלברטוס איש סקסוניה (Albertus of Saxonia) השתמש בתורתו של בורידן במחקריו על המסלול הבליסטי של קליעים. הוא תיאר את עקומת תנועת הקליע על פי המאזן בין ה'אימפטוס' המוטבע בו (תנועה מאולצת) ובין נטייתו הטבעית ליפול (תנועה טבעית). לפיכך הוא חילק את מסלול הקליע לשלושה שלבים:

- שלב I: בהתחלה התנועה מאולצת, כי ה'אימפטוס' גדול הרבה יותר מכוח המשיכה; הקליע נע קדימה וכלפי מעלה, לפי זווית הזריקה;
- שלב II: בשלב הביניים התנועה מאולצת וטבעית בו זמנית: הקליע ממשיך לנוע קדימה בזמן שהוא מתחיל ליפול כלפי מטה;
- שלב III: בשלב הסופי התנועה היא טבעית בלבד (ה'אימפטוס' שווה אפס): הקליע נופל ישר כלפי מטה.<sup>63</sup>

תיאור זה של מסלול הקליע והסברו של אלברטוס, המתבסס על מאזן הכוחות המופעלים על הגוף בשלבים השונים, מזכירים את התיאור של היפרכוס מאות שנים לפני כן, כפי שתיעד אותו סימפליקיוס (ראו לעיל).<sup>64</sup>



תורתו של בורידן הביאה אפוא לתיאורים של המסלול הבליסטי הנצפה שהיו מדויקים יותר מהתיאורים שהניבה תורתו של אריסטו. על פי חיזוי התיאוריה האריסטוטלית, לאחר הזריקה היינו מצפים לראות תנועה של הקליע קדימה וכלפי מעלה עד לנקודה מקסימלית שבה התווך כבר לא מקבל כוח להניע; באותה נקודה מתחילה התנועה הטבעית (ראו

איור 1).<sup>64</sup> לעומת זאת, התיאוריה של בורידן ופיתוחיו של אלברטוס הצליחו להסביר טוב יותר את המסלול הקשתי הנצפה במסלול הבליסטי (ראו איור 2).

ניקול אורם (Nicole Oresme), תלמידו של בורידן, תרם תרומה מעניינת נוספת להבנת בעיית הקליע בפרט והתנועה בכלל. הוא ניסה לקשר בין ה'אימפטוס' להגברתה של המהירות (התאוצה), ולא למהירות הגוף עצמו. כפי שמסכמים זאת פדרסן ופיל:

הדבר יכול היה להוביל למושג של כוח הדומה במובנים מסוימים לזה של ניוטון, אולם גרסתו של אורם לתורת האימפטוס נשכחה במהרה, והתורה הועברה לדורות הבאים בצורה בה נוסחה על-ידי בורידן.<sup>65</sup>

נקודה אחרונה הראויה לציון קשורה לתפיסתו של בורידן באשר למהות ה'אימפטוס' המועבר אל הקליע. כפי שראינו לעיל, בורידן סבר כי ללא כל הפרעה חיצונית היה הקליע ממשיך לנוע ללא קץ. נקודה זו ממחישה כי בורידן, כמו אבן-סינא לפניו,<sup>62</sup> למרות דבקותו באקסיומה שתנועה נמשכת כל עוד כוח ממשיך להניע את הגוף הנע ('אימפטוס' במקרה של הקליע), הכין את הקרקע להבנת עקרון ההתמדה.<sup>66</sup>

אולם, שתי נקודות מהותיות בתפיסתו של בורידן מדגישות את ההבדל בין תורתו ובין ההבנה המודרנית של עקרון ההתמדה. ראשית, בורידן עדיין דבק בתפיסה שקיומו של כוח חיוני על מנת שגוף ימשיך בתנועתו, אפילו אם כוח זה נתפס כבלתי חומרי. כלומר התנועה אינה נמשכת מאליה אלא נגרמת על ידי הכוח המוטבע ('אימפטוס').<sup>67</sup> שנית, ואולי חשוב אף יותר, בורידן יישם את 'תורת האימפטוס' שלו גם במקרים של תנועה סיבובית. ה'אימפטוס' של הגוף נתפס ככוח המשמר את התנועה ההתחלתית של הגוף, הן בקו ישר והן בתנועה סיבובית. הדוגמה הפרוטוטיפית של בורידן לאפשרות השנייה הייתה קשורה לבריאת העולם: בורא העולם נתן 'אימפטוס' סיבובי התחלתי לספרות השמימיות, והן ממשיכות בתנועתן הסיבובית הקצובה בגלל העדר כל כוח מעכב. כפי שאנחנו רואים, ההבנה של תנועה אינרציאלית כתנועה בקו ישר טרם הושגה.<sup>68</sup>

מנגד, אין כל ספק שתפיסת התנועה של בורידן ושאר חלוצי 'דינמיקת האימפטוס', אשר בסוף המאה הארבע-עשרה החליפה באופן סופי את ה'דינמיקה האריסטוטלית', הייתה גורם בעל השפעה מכרעת על גלילאו ועל ממשיכיו בהבנת תנועת הקליע ותופעות תנועה נוספות.<sup>69</sup>

<sup>64</sup> לפחות על פי הפרשנות הרווחת להסברו של אריסטו. מנגד, יש הטוענים כי מהסברו של אריסטו לתנועת הקליע לא בהכרח משתמע כי הקליע ינוע בתנועה מאולצת ושרק כשזו תסתיים, אז תתחיל התנועה הטבעית. ראו האנקינסון (1995), עמ' 150.

<sup>65</sup> נקודות דמיון רבות בין תפיסות התנועה של בורידן ואבן-סינא הוזכרו לעיל. נוסף על הבנת תנועת הקליע, שניהם ישמו את מושג ה'מיל' או ה'אימפטוס' להבנת התנועה של גופים הנופלים בנפילה חופשית. ראו חסנאוי (1984).

## ג. סיכום

במאמר זה תיארתי את התהליך ההיסטורי שהביא להבנת תנועת הקליע. להסברו הקלאסי של אריסטו תפקיד מרכזי בתהליך זה, שכן הפילוסופים והפרשנים שביקשו להתמודד עם הקושיה התיאורטית הזו פיתחו את תפיסותיהם כתגובה להשקפה האריסטוטלית השלטת. מנקודת מבט היסטורית, מעניינת העובדה כי 'המהפכה' שהביאה לנפילתה של הפיזיקה האריסטוטלית לא הייתה פתאומית ואף לא אירוע קצר טווח. אדרבא, כפי ש'תורת האימפטוס' בגרסתה המפותחת ביותר מראה, מושגים והשקפות אריסטוטליים (למשל, האקסיומה שקושרת באופן הכרחי בין תנועה לכוח מניע) חיו ביחד עם מושגים והשקפות ניאור, פוסט ואף אנטי-אריסטוטליים. שלמה פינס מסכם את תקופת ימי הביניים מנקודת המבט של הנושא שבמוקד מאמר זה במילים האלה:

רבגוניות התפיסה המוסלמית של הנטייה תרמה תרומה מכרעת לתורות המקבילות של אנשי האסכולאסטיקה באירופה. במאה הארבע-עשרה לימדו את התורות הללו ומשנות אנטי-אריסטוטליות אחרות בורידאן, ניקול אורם, אלברט מסאכסוניה ורבים אחרים. ההשקפה האריסטוטלית על התבל היתה בתהליך התפוררות... אף-על-פי-כן נחשבו עדיין רבים מן המושגים האריסטוטליים כשרירים וקיימים; לא בבת-אחת אירע שידוד-המערכות. הדבר התרחש עם בוא גליליאו – לאחר שעבר זמנם של הניחושים המוצלחים של המדע והפילוסופיה בתקופת הרנסאנס. עם זה ברור שהפיזיקה של המאה הארבע-עשרה סללה את הדרך לקראת ההתפתחות החדשה.<sup>70</sup>

## מראי מקום

- |    |   |    |  |
|----|---|----|--|
| 1  | סמבורסקי (תשי"ד), עמ' 81; קון (1970).                 | 12 | אריסטו, פיזיקה, ספר ח פרק 10.  |
| 2  | נאזר (1978), עמ' 167, 229-226.                        | 13 | כהן ודרבקין (1958), עמ' 221.   |
| 3  | פינס [1960] (1986), עמ' 231; קרומבי (1952), עמ' 212.  | 14 | מצוטט בקון (1957), עמ' 118-119.  |
| 4  | אריסטו, פיזיקה, ספר ז פרקים 1-2; ספר ח פרק 4.         | 15 | למשל סמבורסקי (1962), עמ' 75; לוי (1973), עמ' 158; מורדוך וסילה (1978), עמ' 210; דיקסטררויס (1961), עמ' 28. אריסטו דוחה הסבר זה באופן מפורש בפיזיקה, ספר ח פרק 10, 267 <sup>a</sup> 15-20. |
| 5  | אריסטו, פיזיקה, ספר ד פרק 8.                          | 16 | קון (1957), עמ' 118; ההדגשה שלי.   |
| 6  | אריסטו, על השמיים, ספר א פרקים 2-3.                   | 17 | סמבורסקי (1962), עמ' 70-71.  |
| 7  | אריסטו, פיזיקה, ספר ד פרק 8.                          | 18 | מצוטט בSimplicius, <i>De Caelo Comment.</i> 264, 25.   |
| 8  | אריסטו, פיזיקה, ספר ז פרק 5.                          | 19 | מצוטט בסמבורסקי (1962), עמ' 73.  |
| 9  | אריסטו, פיזיקה, ספר ח פרק 10, 266 <sup>b</sup> 27-31. |    | 'An Epistle of Alexander of Aphrodisias in refutation of Galen with regard to his criticism of Aristotle's [thesis] that   |
| 10 | מצוטט מתוך סמבורסקי (תשמ"ז), עמ' 88.                  |    |  |
| 11 | אריסטו, פיזיקה, ספר ח פרק 10, 267 <sup>a</sup> 8-12.  |    |  |



- 44 חסנאוי (1984).  
 45 חסנאוי (1984).  
 46 חסנאוי (1984).  
 47 Ibn Sina, *Kitab al-Shifa, Phys.*; מצוטט בסמבורסקי (תשמ"ז), עמ' 152.  
 48 Ibn Sina, *Kitab al-Shifa, Phys.*; מצוטט בחסנאוי (1984), עמ' 109.  
 49 גאזר (1978), עמ' 229.  
 50 פינס (1974 [1986]), עמ' 357. תרגום סמבורסקי (תשמ"ז), עמ' 139.  
 51 חסנאוי (1984), עמ' 113.  
 52 קזן (1957), עמ' 118.  
 53 קרומבי (1952), עמ' 246. קרומבי וחוקרים נוספים העוסקים בנייתו פילוסופיית הטבע הסכולסטית מסתמכים על מחקרה הקלאסי של א' מאייר: Maier, A., *Studien zur Naturphilosophie der Spätscholastik, II: Zwei Grundprobleme der scholastischen Naturphilosophie*, Rome, 1951.  
 54 קרומבי (1952), עמ' 273–212.  
 55 פדרסן ופיל (1974), עמ' 236–235.  
 56 פדרסן ופיל (1974), עמ' 237.  
 57 William of Ockham, *Super Quatuor Libros Sententiarium, Book 2*, question 26M; מצוטט בקרומבי (1952), עמ' 249.  
 58 קרומבי (1952), עמ' 250; פדרסן ופיל (1974), עמ' 237.  
 59 דיקסטררויס (1961), עמ' 181–180.  
 60 קרומבי (1952), עמ' 258–250; מורדוך וסילה (1978), עמ' 212; לינדברג (1992), עמ' 303.  
 61 קרומבי (1952), עמ' 253; פדרסן ופיל (1974), עמ' 238.  
 62 קזן (1957), עמ' 119–118. טיעונים נוספים מובאים למשל בקרומבי (1952), עמ' 253–250.  
 63 על פי קרומבי (1952), עמ' 255–254.  
 64 קרומבי (1952), עמ' 254.  
 65 פדרסן ופיל (1974), עמ' 240.  
 66 קזן (1957), עמ' 121.  
 67 דיקסטררויס (1961), עמ' 183; לינדברג (1992), עמ' 304.  
 68 קרומבי (1952), עמ' 251; פדרסן ופיל (1974), עמ' 240.  
 69 קזן (1957), עמ' 121; דיקסטררויס (1961), עמ' 183.  
 70 פינס (1974 [1986]), עמ' 358–357. תרגום סמבורסקי (תשמ"ז), עמ' 140.  
 everything that is in motion is moved by a mover'. טקסט זה מובא, מלווה בהסברים ופירושים, בפינס (1960 [1986]).  
 20 פינס (1960 [1986]), עמ' 230.  
 21 סמבורסקי (1962), עמ' 71.  
 22 Simplicius, *Phys. Comment.* 1347, 3; מצוטט בסמבורסקי (1962), עמ' 71; ההדגשה שלי.  
 23 סמבורסקי (1962), עמ' 71; האנקינסון (1995), 150–149.  
 24 פינס (1960 [1986]), עמ' 251–236.  
 25 Themistius, *Phys. Paraphras.* 234, 27–235, 8; מצוטט בסמבורסקי (1962), עמ' 72–71.  
 26 Themistius, *Phys. Paraphras.* 234, 27–235, 8; מצוטט בסמבורסקי (1962), עמ' 72–71.  
 27 מידע שנמסר על ידי רות גלזנר בקורס 'תולדות המדע בעת העתיקה' (תשמ"ח).  
 28 Simplicius, *Phys. Comment.* 1349, 26; מצוטט בסמבורסקי (1962), עמ' 72.  
 29 סמבורסקי (1962), עמ' 73–72.  
 30 מצוטט בפינס (1960 [1986]), עמ' 245.  
 31 לוי (1973), עמ' 160.  
 32 פינס (1960 [1986]), עמ' 246.  
 33 פינס (1960 [1986]), עמ' 245; סמבורסקי (1962), עמ' 75–74; לוי (1973), עמ' 160.  
 34 Philoponus, *Commentary on Aristotle's Physics*, 639.3–642.9; מצוטט בכהן ודרבקין (1958), עמ' 223–221. תרגום סמבורסקי (תשמ"ז), עמ' 132–131.  
 35 Philoponus, מצוטט בכהן ודרבקין (1958), עמ' 223–221.  
 36 Philoponus, מצוטט בכהן ודרבקין (1958), עמ' 223–221. תרגום סמבורסקי (תשמ"ז), עמ' 132–131.  
 37 Philoponus, מצוטט בכהן ודרבקין (1958), עמ' 223–221; ראו גם סמבורסקי (1962) עמ' 76; מורדוך וסילה (1978), עמ' 210.  
 38 דיקסטררויס (1961), עמ' 179.  
 39 מורדוך וסילה (1978), עמ' 212; פינס (1960 [1986]), עמ' 251; פינס (1974 [1986]), עמ' 357; חסנאוי (1984).  
 40 לדיון בטוגיות הקשורות למפעל התרגומים והשפעתו על העברת הידע והחשיבה המדעית ראו למשל ראשיד (1989).  
 41 פאחרי (1970), עמ' 148.  
 42 פאחרי (1970), עמ' 148–147.  
 43 חסנאוי (1984).

**רשימת מקורות**

סמבורסקי, שמואל (תשי"ד), חוקות שמים וארץ: הקוסמוס של היוונים (ירושלים).  
 סמבורסקי, שמואל (תשמ"ז), המחשבה הפיסיקאלית בהתהוותה: אנתולוגיה, מהדורה  
 שנייה (ירושלים).

- Aristotle (1984a), 'On the Heavens', Jonathan Barnes (ed.), *The Complete Works of Aristotle: The Revised Oxford Translation*, I (Princeton).
- Aristotle (1984b), 'Physics', Jonathan Barnes (ed.), *The Complete Works of Aristotle: The Revised Oxford Translation*, I (Princeton).
- Cohen, Morris R. & Israel E. Drabkin (eds.) (1958), *A Source Book in Greek Science* (Cambridge, Mass).
- Crombie, Alistair C. (1952), *Augustine to Galileo: The History of Science A.D. 400–1650* (London).
- Dijksterhuis, Eduard J. (1961), *The Mechanization of the World Picture* (Oxford).
- Fakhry, Majid (1970), *A History of Islamic Philosophy* (New York).
- Funkenstein, Amos (1986), *Theology and Scientific Imagination: From the Middle Ages to the Seventeenth Century* (Princeton).
- Hankinson, Robert J. (1986), 'Science', Jonathan Barnes (ed.), *The Cambridge Companion to Aristotle* (Cambridge).
- Hasnaoui, Ahmed (1984), 'La dynamique d'Ibn Sina (La notion d' "inclination": mayl)', Jean Jolivet & Roshdi Rashed (eds.), *Etudes sur Avicenne* (Paris).
- Kuhn, Thomas S. (1957), *The Copernican Revolution* (Cambridge, Mass).
- Kuhn, Thomas S. (1970), *The Structure of Scientific Revolutions*, 2<sup>nd</sup> Edition (Chicago).
- Lindberg, David C. (1992), *The Beginnings of Western Science* (Chicago).
- Lloyd, Geoffrey E. R. (1970), *Greek Science after Aristotle* (New York).
- Murdoch, John E. & Edith D. Sylla (1978), 'The Science of Motion', David C. Lindberg (ed.), *Science in the Middle Ages* (Chicago).
- Nasr, Seyyed H. (1978), *An Introduction to Islamic Cosmological Doctrines*, Revised Edition (Boulder).
- Pedersen, Olaf & Mogens Pihl (1974), *Early Physics and Astronomy: A Historical Introduction* (New York).
- Pines, Shlomo (1986 [1960]), 'Omne Quod Movetur Necessè Est Ab Aliquo Moveri: A Refutation of Galen by Alexander of Aphrodisias and the Theory of Motion', Shlomo Pines (ed.), *The Collected Works of Shlomo Pines, II: Studies in Arabic Versions of Greek Texts and in Medieval Science* (Jerusalem).
- Pines, Shlomo (1986 [1974]), 'The Middle Ages: Introduction to Medieval

Science', Shlomo Pines (ed.), *The Collected Works of Shlomo Pines, II: Studies in Arabic Versions of Greek Texts and in Medieval Science* (Jerusalem).

Rashed, Roshdi (1989), 'Problems of the Transmission of Greek Scientific Thought into Arabic: Examples from Mathematics and Optics', *History of Science*, 27.

Sambursky, Samuel (1962), *The Physical World of Late Antiquity* (London).