

קווים להוראת מכניקה, כהמשך רציף של תוכניות הפיסיקה בחטיבת הביניים חלק ב'

מאת: יהודה שדמי
ביה"ס לחינוך של התנועה הקיבוצית "אורנים", אוניברסיטת חיפה.

II העקרונות של ניוטון - "חוקי טבע" או "הגדרות"?

לימוד הקינמטיקה הוא מכוא הכרחי ללימוד הדינמיקה. באשר ללימוד הסטיקה, הבחירה היא בידי המורה. אני עצמי, כהיותי תלמיד תיכון, למדתי בספר שבו היחה הסטיקה באחד הפרקים האחרונים והוצגה כמקרה פרטי של הדינמיקה. היום מקובל בישראל ללמד סטיקה לפני הקינמטיקה. זה מאפשר לתלמיד פגישה מקדימה (נוספת לזו שהיתה לו בחטיבת הביניים) עם הגודל כוח, מבהיר את המושג "שיווי משקל" ומאפשר תרגול ראשוני בווקטורים בתנאים פשוטים במיוחד (וקטור הפועל בנקודה קבועה ואינו פונקציה של הזמן).

יצוין כי גם הספרים המקדימים את הסטיקה (9, 10) מתיחסים בפרק זה אל "כוח" כאל מושג שהוגדר באופן ארעי. לעתים הם אף מוגישים זאת ע"י השימוש ביחידה "קילוגרם כוח", המקובלת עדין על המהנדסים, אך לא על הפיסיקאים (ולא נדון כאן בבלבול שהשימוש ביחידה זאת יוצר בהמשך לימודי הפיסיקה). יותר מאוחר, כאשר פותחים ספרים אלה בלימוד הדינמיקה, הם מתעלמים למעשה מהמושג של "כוח" כפי שהם עסקו בו בפרק המקדים על סטיקה. הם רואים צורך להגדיר מחדש, באופן "מדעי", את כל המושגים הפיסיקליים שהם עוסקים בהם. זה אמור במיוחד לגבי המושגים "מסה" ו"כוח". בכמה ספרים אף חוזרים שנית אל הסטיקה בסוף הקורס ומציגים אותה כמקרה פרטי של הדינמיקה. מנקודת ראות זאת, ברור כי לפרק המקדים על סטיקה היה רק תפקיד של תרגול התחלתי. מבחינת המכה השיטתי של המכניקה, הדינמיקה היא המהווה את הבסיס העיוני השלם והבלתי תלוי. הסטיקה (במידה שהיא נלמדת) אינה אלא אחד היישומים שלה.

הדינמיקה מסתמכת, כידוע, על הקינמטיקה, שהיא הכיטוי המתמטי להשקפת הניוטונית על מרחב וזמן. התוכניות שאנו דנים בהן מסתפקות בנקודת הראות הניוטונית. נקודת המוצא של הדינמיקה הניוטונית הם שלושת העקרונות המפורסמים של ניוטון. מבחינה מתמטית גרידא נראה העקרון הראשון ("חוק ההתמדה") כמקרה פרטי של העקרון השני ("חוק התנועה") - הלא העקרון השני טוען כי תאוצתו של גוף פרופורציונית לשקול הכוחות הפועלים עליו; אם שקול

הכוחות שווה לאפס, מתאפסת גם התאוצה של הגוף; הווה אומר, המהירות שלו היא וקטור קבוע (הן בגודלו והן בכיוונו). לאמיתו של דבר, העקרון הראשון הוא הגדרת "המגרש שעליו אנו משחקים". כלשון יותר מדעית, מערכות הייחוס שבהן הדינמיקה הניוטונית תקפה הן אלה שמתקיים בהן העקרון הראשון. מערכות ייחוס כאלה קרויות "מערכות ייחוס אינרציאליות". רק יחסית להן אנו טוענים לתקופתם של העקרון השני והשלישי. למרבה הצער, מורים רבים מתיחסים לעקרון הראשון התיחסות מתמטית גרידא. זה מביא במבוכה דוקא את התלמידים החושבים, שאינם מבינים מדוע מתיחסים מעמד של עקרון ראשוני למשפט שאינו אלא מסקנה מתמטית מיידית של עקרון ראשוני אחר.

נעבור לעקרון השני והשלישי. הם עוסקים בגודל הקינמטי תאוצה ובגדלים הדינמיים מסה וכוח. אם "מסה" ו"כוח" נחשבים כמוגדרים מן הלימודים הקודמים, מקבלים העקרונות של ניוטון מעמד של חוקי טבע יסודיים שהם סיכום והכללה של עובדות נסיוניות רבות. לעומת זאת, על פי הגישה המקובלת הרואה בלימוד הדינמיקה את ראשית הלימוד "המדעי באמת", העקרונות השני והשלישי אינם אלא שני היגדים הכוללים שני מושגים (מסה וכוח) שטרם הוגדרו. אנו נאלצים, איפוא, לראות בעקרון השני והשלישי של ניוטון משפטים המגדירים את המושגים "מסה" ו"כוח". בקיצור נמרץ נציין כאן כי התהליך הפורמלי של מתן הגדרות אופרטיביות למסה וכוח דורש קודם להגדיר פורמלית את התנע כתור מכפלת המהירות בגודל (הבלתי מוגדר עדיין) מסה, לגזור את חוק שימור התנע מתוך העקרונות של ניוטון ולכצע ניסוי מחשבתי של התנגשות פלסטית בין גוף שמסתו הוגדרה כיחידת המסה לבין הגוף הנמדד. מסתבר כי יחס המסות של שני הגופים הוא הערך התפוח של היחס בין מהירויות ההתקרבות של שני הגופים אל מרכז המסה המשותף שלהם. מדידת מהירויות גרידא מאפשרת, אם כן, את מדידת המסה. לאחר שיש לנו הגדרה אופרטיבית של "מסה", אפשר לראות בחוק התנועה ($F = ma$) את ההגדרה האופרטיבית של "כוח".

המכניקה הניוטונית היא אחת היצירות הגדולות של רוח האדם והיא שימשה דגם לתאוריות מדעיות רבות. כתוכנית הלימודים אין היא התחום המדעי הראשון שהתלמיד פוגש בו, אולם היא התחום הראשון שבו הוא פוגש (בצד ניסויים רבים ומאלפים) במכנה עיוני - דדוקטיבי שלם. הן מבחינת תמונת המדע והן כדי לספח את היחס הנאות של התלמיד לתחום זה, חשוב לראות בחוקים של ניוטון הישגים כבירים של רוח האדם במאבקו להבנת הטבע.

כך יראה אותם התלמיד בהציגנו אותם בפניו כחוקי טבע יסודיים.

נעיר לבסוף כי אם נראה בכוח מושג שהוגדר מדעית רק ע"י החוקים השני והשלישי של ניוטון, נמצא במצוקה לגבי משמעות החוק הראשון. הלא בחוק זה משתמשים כבר כמושג הכוח ומושג זה טרם הוגדר! הפתרון "הפשוט" של החלפת סדר העקרונות אינו הופס, שהרי העקרון הראשון קובע באיזה תנאים תקפים שני העקרונות הבאים אחריו! לפרושים וצרופים פילוסופיים אין גבול, אך אינני מקנא במורה (המעמיק!) שירצה ללמד את העקרונות של ניוטון על פי הפרוש שלהם כ"הגדרות".

מן הראוי להדגיש כי הצגת העקרונות של ניוטון כחוקי טבע יסודיים אינה מונעת להשתמש בהם בכל דרך מועילה שאין בה טעות. למשל, במקרים רבים ידועה לנו מסתו של גוף ואנו יכולים למדוד את האוצתו. מוכן מאליו שמכפלת מסת החלקיק בתאוצתו נתן לנו את הכוח הפועל עליו. השתמשנו במקרה זה בחוק התנועה כדי לחשב את הכוח, אך לא השתמשנו בו כדי להגדיר כוח זה. בתאוריה מדעית מפותחת לא חייבת להיות התאמה חד-חד-ערכית בין אלמנטים ספציפיים של התאוריה לבין עובדות נסיוניות. התאוריה נבדקת בגוף שלם אחד ע"י התאמה שלה עם כלל העובדות הנסיוניות שהיא מכארת או מנבאה. העמדה שהבענו לעיל לגבי הוראת העקרונות של ניוטון היא בפרוש עמדה רק לגבי נקודת המוצא לבנין התאוריה "דינמיקה ניוטונית".

ברור כי בכיתה שונות לא נגיע לעומק שווה בהכנת העקרונות של ניוטון. גם בכיתה אחת יהיו ללא ספק הבדלים גדולים בכושר ההעמקה של תלמידים שונים. מאידך, הכרחי שמורה הפיסיקה יבהיר לעצמו נושא זה לעומקו. זה יאפשר לנו להחליט עד היכן יעמיק בנושא ומה יענה על שאלות של תלמידים הערים יותר לבעיות עקרוניות.

III. עקרונות מנחים לתוכנית להוראת המכניקה

בהתוויית קווי התוכנית נונחה על-ידי שלושת העקרונות דלקמן:

1. העקרונות הבסיסיים של המכניקה יוצגו כחוקי טבע יסודיים. המושגים שהם משתמשים בהם יובנו באופן שבו הם הוגדרו כלימוד הקודם.
2. יודגש מעמדם המרכזי בפיסיקה של חוקי שימור המסה, התנע והאנרגיה. העקרונות הבסיסיים של המכניקה ייבנו בהסתמך על חוקים אלה.

3. מושג העבודה ייגזר מתוך מושג האנרגיה, אשר כמה צורות שלה כבר הוכרו כמותית בלימודים הקודמים. חישמר תפיסת האנרגיה כמושג מדעי מאחד שהקפו חורג כהרבה מגבולות המכניקה. תימנע כל אפשרות להיתפש לרעיון המוטעה כי "אנרגיה היא היכולת לעבוד עבודה".

עקרונות אלה אינם מגדירים חד-ערכית את המבנה הרעיוני של תוכנית במכניקה. הם מגדירים את עמדתנו בנקודות שאין עליהן הסכמה כללית. לא ראינו לנכון לפרט את הדברים הרבים שבהם אנו מסכימים עם התוכניות הקיימות.

העקרון המנחה הראשון הוא המקובל ביותר בין השלושה. ספרים רבים מציגים את שלושת העקרונות של ניוטון כמבטאים הכללה של עובדות נסיוניות רבות וכמאוששים ע"י החקיימות (מדויקת) של ניבויים רבים הנובעים מהם. לצערנו, לעתים קרובות אין ספרים אלה עקביים ובקטעים אחרים של אותו פרק עצמו משחמשים בעקרונות אלה להגדרת המושגים "מסה" ו"כוח". במשים או בלי משים מאבדים על-ידי כך עקרונות אלה לפחות חלק ניכר ממעמדם כחוקי טבע. אנו מקווים בכל לב כי בתוכניות שיחברו בעתיד יתגברו על הסתירה הזאת על-ידי הסתמכות על העובדה שהמושגים "מסה" ו"כוח" כבר הוגדרו לפני שהותחל בלימוד המכניקה הניוטונית.

העקרון המנחה השלישי עוסק בתיקון שגיאה מושרשת. בתוכנית שתארכו את קוויה לעיל (פרק ב', סעיף V) מתואר לימוד שיטתי של "אנרגיה" כדרך התואמת את מעמדו של מושג זה במדע בן זמננו. בקורסי המכניקה עדין מקובל להגדיר קודם את הגודל "עבודה" ולבסס עליו (לפחות) את מושג "האנרגיה המכנית". בכך נהרס ההישג הלימודי שהושג בשלב הלימודים הקודם ומסתלפת ההבנה הנכונה של מושג האנרגיה. בהמשך יובאו הצעות יותר מפורטות לתיקון המשגה החמור הזה.

העקרון המנחה השני אינו קשור הכרחית לשני העקרונות האחרים. עקרון זה מסתמך על העובדות הבאות: (1) המעמד המרכזי שיש לחוקי השימור בפיסיקת זמננו; (2) במכניקה באים לידי ביטוי שלושה חוקי שימור חשובים (שימור המסה, התנע והאנרגיה); (3) שנים משלושת החוקים הנ"ל כבר נלמדו בתוכניות חט"ב.

מצב דברים זה מאפשר לבנות תוכנית שבה יוכרו מושג התנע וחוק השימוש שלו (על סמך מערכת ניסויים מתאימה) מיד אחרי העיסוק בעקרון השני של ניוטון ("חוק התנועה"). עקרון שימור התנע במערכת סגורה יאומץ כאחד משלושת

העקרונות היסודיים של המכניקה; "חוק הפעולה והתגובה" יהפוך למסקנה של עקרון שימור התנע וחוק התנועה. (זאת בגבולות התקפות של הדינמיקה הניוטונית).

יש לגישה הזאת יתרונות וחסרונות. בהמשך נתאר תוכנית המותווית על פי שלושת העקרונות המנחים שניסחנו לעיל. מורה שירצה לותר על העקרון המנחה השני, יוכל לשנות בנקל את קווי התוכנית שתוצע להלן, כך שתוכניתו תתאים לעקרונות המנחים הראשון והשלישי, אך תשמור על מעמדו של "עקרון הפעולה והתגובה" במערכת העקרונות היסודיים של המכניקה הניוטונית.

IV. קווים להוראת "חוק התנועה"

בשלב זה אין לנו מה להוסיף על הדיון במשמעותו ובדרך הוראתו של העקרון הראשון של ניוטון, כפי שהוכח בסעיף II לעיל. לדיון נוסף במערכות אינרציאליות ראה, למשל, את כרך א' של הקורס של ברקלי⁽¹¹⁾ (הפרק על אינוואריאנטיות גלילאית).

ניסויי מוטיבציה להשערה כי תאוצתו של גוף היא ביחס ישר לכוח הפועל עליו וביחס הפוך למסתו מצויים כשפע בתוכניות שונות להוראת מכניקה. אחרי שמתעוררת השערה זאת, נערכים ניסויים מתוכננים נוספים אשר מאששים אותה. על אף חשיבותו הרבה של נושא זה נוכל, איפוא, להסתפק בתיאור סכימטי של כמה ניסויים.

1. הפעלת כוחות שונים על מסה קבועה

בתרשים I מתוארת סכימטית עגלה A הנוסעת על מסלול מיועד לכך. לעגלה קשור חוט הכרוך על גלגלת ובקצהו השני תלויות משקלות B, אשר משקלן מאיץ את עצמן ואת העגלה.

כרגיל בניסויים מעין אלה, מחובר לצד האחורי של העגלה סרט הנייר של רשם הזמן. לא טרחנו להראותו בתרשים. בניסוי זה המשקל של B הוא הכוח הפועל והמסה הכוללת של A ו-B היא המסה המואצת. בעזרת רשם הזמן מודדים את התאוצה.

הערכת מסות מ-A ל-B, או להיפך, משנה את הכוח, אך אינה משנה את המסה המואצת. אפשר, איפוא, לערוך גרף של התאוצה כפונקציה של הכוח המאיץ. בגבולות הדיוק של הניסוי מקבלים שיש ביניהם יחס ישר. במסגרת מאמר זה לא נעסוק בכעיות טכניות של איזון כוח החיכוך והגדלת דיוק המדידה.



תרשים 1

אותו ניסוי עצמו אפשר, כידוע, לבצע על ספסל אוויר כאשר ניצוצות חשמליים הנבזקים בתדירות קבועה ממלאים את מקום רשט הזמן, אין הבדל עקרוני בין שני הניסויים, אך אפשר להשיג דרגת דיוק יותר גבוהה,

כ"תוכנית נפילד" מוצע ניסוי שבו אין העגלה A מואצת על-ידי משקולות, אלא על-ידי קפיץ מתוח המחובר אליה, הקפיץ מחובר לחלק האחורי של פני העגלה ומסמנים על העגלה עד היכן למתוח אותה. הקפיץ נמתח כיד ועל התלמיד להניע את ידו במהירות הולכת וגדלה, כך שבמשך כל הניסוי נמתח הקפיץ עד לסימן המצוין על העגלה. זהו ניסוי קשה, הדורש זריזות, ומצליח רק אחרי שמתאמנים בו כמה פעמים.

אם כי זהו ניסוי פחות מדויק ויותר קשה לביצוע, יש לו חשיבות חינוכית. זאת משום שחשוב להראות כי החוק שגילינו חל על כל כוח ולא רק על הכוח "משקל". יתר על כן, כאשר עסקנו במושג הכוח (ראה פרק ב', סעיף III) מדדנו אותו ע"י שיעור ההתארכות של קפיץ. זאת היתה, איפוא, "ההגדרה האופרטיבית" של גודל זה. על כן, הניסוי האחרון יוצר קשר ישיר בין מושג הכוח, כפי שהוא נלמד בשעור, לבין תפקידו של הכוח בחוק התנועה. גם על ניסוי זה אפשר לחזור מספר פעמים עם שיעורי מתיחה שונים של הקפיץ.

2. הפעלת כוח קבוע על מסוח שונות

כל המחקנים הנסיוניים שהארנו קודם מתאימים גם לניסויים אלה. למשל, בניסוי הראשון שתארנו לעיל משנים את מסח העגלה A מבלי לשנות את המשקל B. כן הדבר לגבי כל הניסויים שתארנו לעיל.

כחוצאת ניסויים אלה רואים בעליל כי הגדלה המסה מקטינה את התאוצה. מנחשים כי לפנינו יחס הפוך ועריכת גרף של התאוצה a כנגד $\frac{1}{m}$ מאשרת את הניחוש הזה.

סיכום שני סוגי הניסויים מוביל אותנו למסקנה כי $a \propto \frac{F}{m}$. הפרופורציה
 הכתובה לעיל היא ביטוי מתימטי לטענה כי תאוצתו של גוף פרופורציונית
 לכוח הפועל עליו ופרופורציונית הפוכה למסתו. בביטוי זה כתובות "הסיכוח"
 באגף הימני של השוויון ו"התאוצה" כתוכה לכרה באגפו השמאלי. זה מבליט
 את משמעותו של "חוק התנועה", כפי שהוא מתגלה בניסויים שערכנו עד כה.

"חוק התנועה" אומר לנו כי תאוצתו של גוף תלויה בגורם "חיצוני" לגוף
 (במקרה זה, הכוח הפועל עליו) ובתכונה של הגוף עצמו (במקרה זה, מסת
 הגוף). ראוי לעודד את תשומת לב התלמיד לעובדה כי זהו המכנה של חוקי
 טבע רבים. כדוגמאות נוספות לכך אפשר להזכיר את תלות הזרם במתח שבין
 קצות המוליך ("הגורם החיצוני") ובהתנגדות המוליך (תכונה של המוליך
 עצמו), או את תלות עליית הטמפרטורה של גוף באנרגיית החום הנמסרת לו
 ובקיבול החום של הגוף הזה.

כשלב זה כתוב עזיין חוק התנועה כפרופורציה ואנו רוצים לכתוב אותו
 כשוויון. פורמלית אנו יכולים לכתוב $a = K \frac{F}{m}$ ולשאול את עצמנו מה ערכו
 של מקדם הפרופורציה K. יש קשר אמיץ בין השאלה הזאת לבין מערכת היחידות
 שאנו מאמצים. את המסה אנו מודדים ב-"ק"ג ואת התאוצה ב- $\frac{\text{מטר}}{\text{שנייה}^2}$. יחידות
 אלה מוגדרות על-פי ההגדרה הסטנדרטית כמערכת SI. את הכוח אנו מודדים
 אמנם ביחידה ניוטון, שאף היא שייכת למערכת SI, אך הגדרת הניוטון הידועה
 לתלמידינו מלימודיהם הקודמים ("המשקל של 102 גרם על פני כדור הארץ")
 אינה ההגדרה הסטנדרטית של היחידה הזאת. אני מציע לטפל בבעיה זאת בדרך
 הבאה. התלמידים יסכמו את הניסויים שבהם ידוע לנו ערכו המספרי של הכוח
 המאיץ ע"י עריכת גרף של a כנגד $\frac{F}{m}$ (או של ma כנגד F). גרף זה הוא קו
 ישר ששימועו שווה כקרום ל-1.

סיכום הניסויים עם ספסל האוויר נותן אותן תוצאות עצמן, במידת דיוק
 יותר גבוהה. צילום טרובוסקופי של נפילה חופשית של גוף, אשר מסתו m
 ומשקלו F נמדדו קודם לכן, מאפשר למדוד את תאוצתו a ומקבלים כדיוק רב
 את התוצאה הניסויית $1 = \frac{ma}{F}$.

לאור העובדות הנ"ל, אנו מסיקים כי מקדם הפרופורציה K שווה ל-1 ואת חוק
 התנועה אפשר לכתוב בצורה $a = \frac{F}{m}$ או $F = ma$. בשלב זה אנו יכולים לציין
 שוב כי ההגדרה המוכרת לנו של הניוטון אינה מדויקה וקשה מאוד להפוך
 אותה להגדרה סטנדרטית. אנו מבארים כי ההגדרה ההיסטורית הסטנדרטית של
 ניוטון היא "הכוח המעניק למסה של 1 ק"ג תאוצה של $1 \frac{\text{מ}'}{\text{שנייה}^2}$ ". הגדרנו

בשעתו את הניוטון כמשקל (על-פני כדור הארץ) של 102 גרמים (ולא של "המספר
העגולי" 100 גרמים), כדי להתאים את הגדרתנו מראש, במידת דיוק סבירה,
להגדרה הסטנדרטית (המבוססת על חוקי הדינמיקה) שלמדנו זה עתה.

לימוד "חוק התנועה" כפי שתארנוהו לעיל מסתמך באופן מלא על המושגים
שנלמדו בחטיבת הביניים. פעילות ניסויית והכללתה מביאים לגילוי חוק
טבע יסודי. בעזרת חוק טבע זה אנו מגיעים להגדרה חדשה של היחידה
ניוטון. הגדרה זאת אינה סותרת את מה שלמדנו בחטיבת הביניים; היא רק
משפרת את הידע הקודם שלנו ועושה אותו ליותר מדויק.

לאחר שנלמד העקרון השני של ניוטון ומערכת היחידות המכניות הוגדרה
כמתואר לעיל, נמשך הלימוד של חוק התנועה והשימוש בו כמו בספרי הלימוד
המקובלים. זהו לימוד רציני, הדורש זמן, מחשבה ותירגול. מכיוון שבמאמר
זה אנו מתרכזים בהצעות לשינויים, לא נעסוק כאן במכלול הנושאים החשובים
האלה.