

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

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

אורנים - ביה"ס לחינוך של התנועה הקיבוצית, אוניברסיטת חיפה והמרכז הישראלי להוראת המדעים, האוניברסיטה העברית, ירושלים.

א. הצגת הבעיה

הדינמיקה הניוטונית היא אחת מיצירות הפאר של רוח האדם. היא התחום הראשון בפיסיקה, ואף במדעים הניסיוניים כולם, שהגיע למעמד של תיאורית מדעית במלוא מובן המלה. בתור שכזאת היתה לה השפעה עצומה על התפתחות המדע והמחשבה הפילוסופית.

מרבית האוניברסיטאות נפתחת תוכנית לימודי הפיסיקה בקורס רציני של מכניקה. השיטות המתמטיות והנסיוניות, המושגים וחוקי הטבע שהסטודנט לומד בקורס זה משמשים בסיס להמשך לימודיו בפיסיקה.

עד לפני שנים לא רבות שלטה בקרב הפיסיקאים הדיעה כי לימוד "אמיתי" של פיסיקה - בכל רמה שהיא! - חייב להפתח בלימוד המכניקה. [כדוגמה קיצונית אציין קוריוז מתוך הביוגרפיה האישית שלי. אני בוגר ביה"ס הריאלי בחיפה, שהיה אז ב"ס מפורסם בסלקטיביות שלו ונחשב לאחד מבתי"ס הטובים בארץ. לפיסיקה היה מעמד של מקצוע חשוב ביותר והוחלט שצריך להתחיל ללמוד אותה בהקדם. מכיוון שברור היה שמוכרחים לפתוח ב"מכניקה", למדנו מקצוע זה בכיתה ט' (הריאליסטית) במשך כל השנה. מלימוד זה לא נשאר בזכרוני דבר וברור לי שאיש מחברי הכיתה לא הבין מה מלמדים אותו. מאידך, העובדה שכבר למדנו מכניקה נתנה לנו "זכות חוקית" ללמוד פרקי פיסיקה נוספים. אכן בכיתה י' למדנו אופטיקה וזה היה לימוד מובן ומעניין לרוב תלמידי כתתנו (הריאליסטית). מדוע אי אפשר ללמוד אופטיקה (ואף תורת הגלים) לפני שלומדים מכניקה, לא ברור לי עד עצם היום הזה. זאת, כנראה, רק דוגמה נוספת לעוצמה של מסורות ואוטריטות בתחום החינוך. בכיתה י"א שוב למדנו מכניקה והפעם היו אלה שיעורים מובנים ומעניינים שעוררו בי התלהבות אינטלקטואלית עצומה. אין לי ספק כי ההישג הזה בכיתה י"א לא התבסס כלל על הלימוד המבוזבז בכיתה ט'.

היום משוכנעים כל אנשי הוראת המדעים כי לימודי המדע חייבים להתחיל בגיל הרבה יותר צעיר. תוכנית לימודי הפיסיקה חייבת להתחשב במידת הקושי של הנושאים השונים. היא צריכה גם להביא בחשבון מה הם המושגים הפיסיקליים הדרושים ללימוד מדעי הטבע האחרים. יחד עם זאת נטשו אנשי הוראת המדעים את העמדה שכניסה לתחום מדעי חדש חייבת תמיד להיות "תאורטית" ולהתבסס על פיתוח לוגי-מתמטי של גוף התחום המדעי מתוך עקרונות ראשוניים בעלי מעמד בלתי מעורער (למשל: שלושת הפרינציפים המפורסמים של ניוטון).

פוחו, איפוא, תוכניות לימודים לחטיבת הביניים אשר אינן כוללות את הנושא מכניקה. נושא זה הוכנס, בצדק, לתוכנית הפיסיקה של החטיבה העליונה. תוכנית הלימודים של חטיבת הביניים בישראל כוללת את הכרת הגדלים מסה, כוח, משקל, אנרגיה; יחידות מידה שלהם ודרכים למדידתם. נלמדות נוסחאות כמותיות של אנרגיה פוטנציאלית כובדית ("אנרגיה גובה"), אנרגיה תנועה, אנרגיה קפיצית, אנרגיה חום ואנרגיה חשמלית. לחוק שימור האנרגיה ניתן מעמד מרכזי והוא משמש בסיס עיוני לגזירת הנוסחאות הכמותיות של צורות האנרגיה השונות מתוך ניסויים שמתרחשים בהם גלגולי אנרגיה. בצמוד למושג המסה נלמד גם חוק שימור המסה. הרשימה המובאת לעיל אינה תאור מלא של תוכנית חטיבת הביניים, אלא רק של פרקים הנוגעים לדיוננו. את המתעניין בפרטי התוכניות הנ"ל נפנה למובאות 1-3. לניסוח מעט יותר מדויק ומתקדם של אותם תכנים יוכל הקורא לעיין במובאה 4.

מן הראוי להדגיש כי המושגים "מסה", "כוח", "משקל" ו"אנרגיה" אינם נגזרים מתוך תאוריה פיסיקלית מוגדרת (כגון, "דינמיקה ניוטונית", "התורה האלקטרומגנטית", וכדומה). מושגים אלה נגזרים מתוך עובדות נסיוניות תוך הסתמכות על כללים מתודולוגיים וסמי-אמפיריים פשוטים; לעתים, תוך מאמץ להבהיר ו"לזקק" מושגים שאנו משתמשים בהם בחיי היומיום. תפקיד מיוחד יש, כמובן, לחוק שימור האנרגיה אשר בתוכניות המתוארות לעיל יש לו מעמד התחלתי של "עקרון חקר" ובהתפתחות הלימוד הוא מקבל מעמד של חוק טבע אוניברסלי. מאליו מובן שכל תאוריה פיסיקלית שתפותח "בעתיד" (דהיינו, בלימודי החטיבה העליונה) תהיה חייבת להיבנות בהתחשב בחוקי השימור של האנרגיה והמסה. נוכל לסכם באומרנו כי תוכנית חטיבת הביניים מספקת ללומד מספר "אבני בנין" חשובות של מושגים יסודיים וחוקים אוניברסליים. רציפות הציור של תמונת העולם הפיסיקלית, כמו גם רציפות ההתפתחות הרוחנית של הלומד, היו מחייבים כי "אבני בנין" אלה אכן תשמנה

להמשך הבניה של תמונת העולם הפיסיקלית בתוכניות לימודי הפיסיקה בחטיבה העליונה.

למרבה הצער, המשאלה המובעת בסוף הסעיף הקודם עדין לא התגשמה. המבנה הרעיוני (להבדיל משיפורים פדגוגיים חשובים) של קורסי המכניקה בחטיבה העליונה הוא עדין כפי שהיה לפני שנים רבות. מושגי הכוח, המשקל, המסה והאנרגיה נלמדים מחדש בגישה שאינה מתישבת עם הגישה (היותר מתקדמת!) שבה הט נלמדו בחטיבת הביניים. הנזק שבשבירת הרציפות הפדגוגית מובן מעצמו. לכך מצטרפת הסכנה של עיוות התפיסה הנכונה של מושג האנרגיה וכן שטטוש נקודת הראות המדגישה את מעמדם המרכזי של חוקי השימור בתיאוריה הפיסיקלית בת זמננו.

במה שיבוא להלן נסקור תחילה את דרך הלימוד של המושגים "מסה", "כוח", "משקל" ו"אנרגיה" ברוח שתוארה לעיל. נדון גם בחוקי הטבע היסודיים שהם קשורים בהם: שימור המסה, שימור האנרגיה וחוק הכובד. את עיקר דיוננו נקדיש למבנה חדש של קורס במכניקה שיתבסס על הידע הנזכר לעיל, יבליט את המעמד המרכזי שיש לחוקי השימור בפיסיקה ולא יפגע בהבנה הנכונה של מושג האנרגיה.

ב. קווים להוראת המושגים "מסה", "כוח", "משקל" ו"אנרגיה" בחטיבת הביניים

I. כללי

בהקשר של מאמר זה, אנו מתעניינים, בעיקר, בתוכניות המכוונות לתלמידי "רמה א'" בחטיבת הביניים. הלא מחצית זאת (בערך) של תלמידי חטה"ב כוללת את רובם המכריע של התלמידים העשויים ללמוד פיסיקה בחטיבה העליונה.

התוכניות הנ"ל נכתבו ונמצאות כבר בשימוש (ראה מובאות 1-3). על פי נסיוני, יש מקום לשיפור פדגוגי ניכר בלימוד מושגי המסה והמשקל, בהשגת היכולת להבחין ביניהם והבנת היחס ביניהם. אני משוכנע כי התוכנית המשופרת תוכל להגדיל את אחוז התלמידים שילמדו ע"פ תוכנית "רמה א'" וגם להגדיל את מידת ההבנה של החומר הנלמד.

הקווים המותווים להלן תואמים את הדרך הפדגוגית הננקטת בתוכנית "מושגי יסוד במדע ודרכים להוראתם"⁽⁵⁾, יחידה I, עבודות 2-7. זאת אומנם תוכנית שנכתבה למורי כיתות יסוד, אך חלקה הראשון עוסק במערכת המושגים מסה,

כוח ומשקל. לשם השוואה פדגוגית יוכל הקורא המעוניין לעיין בספר א' של מובאה 4 שאף הוא מיועד למורי כיתות יסוד, והעוסק באותם מושגים עצמם, בדיוק על-פי המבנה הרעיוני של תוכנית חטיבת הביניים.

בסעיפים הבאים נטפל בעיקר בבעיה של הוראת המושגים "מסה" ו"משקל" ובהכנת ההבדל ביניהם. אנו פותחים בניסוי מוטיבציה (ראה מובאה 5, עבודה 2) המעורר את השאלה: מהו המדד המדעי ל"כמות החומר"? - בחי היומיום עונים על שאלה זאת לעיתים על-ידי מדידת נפחו של גוף, לעיתים על-ידי מדידת מסתו ולעיתים על-ידי שקילתו. (בדרך כלל, אין מבחינים כלל בין שתי המדידות האחרונות). דיון רציני - ובלתי ניתן להכרעה בשלב זה - בשאלה הנ"ל מביא למסקנה כי קודם עלינו להכיר באופן יותר מדויק את משמעות הגדלים "נפח" ו"משקל". רק אחר כך נוכל לנסות לברר מי מהם הוא "המדד המדעי" (דהיינו, המדד הנכון תמיד) ל"כמות החומר" של גופים. במה שיבוא להלן לא נתאר את לימוד הגודל "נפח". נעסוק בשני הגדלים האחרים, שעיקר הבלבול המחשבתי הוא בין שניהם. לאור האמור לעיל כמעט אין צורך לציין כי בשלב זה אנו מתעלמים כליל מנקודת הראות הרלטיביסטית על מושג המסה.

II. קווים להוראת מושג המסה

מושג "מסה" (או, "כמות החומר") הוא אחד המושגים המרכזיים במדע. כל מדעי הטבע הנסיוניים נזקקים לו, אם כי דרגת מודעותם לכך אינה שווה. מאידך, ידוע כי הוראת מושג המסה הוא אחד האתגרים הקשים ביותר העומדים בפני מורה המדע.

הקושי העיקרי בהכנת הגודל "מסה" נובע מן הערבוב המחשבתי והלשוני בינו לבין הגודל "משקל". כמה מן הסיבות לערבוב זה הן: א) על פני כדור הארץ שני הגדלים פרופורציוניים (בקרוב רב), כך שמדידת כל אחד משניהם מודדת למעשה גם את השני.

ב) כאשר מתחילים את הלימוד מהמושג "משקל" נקשר מושג זה עם כל האסוציאציות מהחיים הקשורות במלה "משקל", כולל האסוציאציות שענינן האמיתי הוא "כמות החומר"; אותו דבר בדיוק קורה לרעיונות המתעוררים בתלמיד עקב הניסויים שהוא מבצע. בהמשך הלימוד קשה מאוד לעשות דיפרנציאציה ו"לזקק" מתוך "מושג" המעורבב הזה את התכנים הספציפיים המאפיינים, לאמיתו של דבר, את המושג "מסה". ג) דרך מתבקשת מאליה

להתגבר על הקשיים המתוארים בסעיף (ב) הוא ללמוד קודם את מושג ה"מסה" ורק אחר כך לעבור ל"משקל". במציאות נוסה סדר לימוד כזה רק בתוכנית שבהן נבנה מושג המסה מתוך חוקי הדינמיקה הניוטונית, שהיא מקצוע קשה, הדורש דרגת הפשטה גבוהה וידע מתמטי נרחב.

בתוכנית הנוכחית מנסים להתגבר על כמה מהקשיים המתוארים לעיל ע"י המכנה הפדגוגי הבא:

א. אנו יוצאים מלימוד מושג המסה, אך המסה של גוף מוגדרת ע"י מספר הגופים התקניים המאזנים גוף זה במאזניים שווי - זרועות. זאת הגדרה פשוטה, אופרטיבית-ניסויית, שיוצרת קשר ישיר בין המושג לדרך המדידה שלו.

ב. מושג המסה, שכדרך זאת מזוהה מלכתחילה עם מדידה פשוטה ומוכרת המתבצעת בחיי יום-יום, מתורגל עתה ע"י פעילות מעשית רבה ומגוונת. זה עוזר לתלמיד להפנים את ההגדרה הזאת.

ג. אנו מקפידים על תרגול השימוש בלשון מיוחדת. אין "שוקלים" גוף במאזניים - "מאזנים" אותו! נוצרת, איפוא, בהדרגה לשון מיוחדת המתארת את תהליך מדידת המסה ואשר מילות המפתח שלה שונות ממילות המפתח של הלשון שבה מתוארת מדידת המשקל.

ד. מתבצעות פעילויות של השוואת גופים תקניים שונים (ע"י איזונים במאזניים, כמובן!), אשר כולם משמשים כיחידות למדידה מסה. הגרם מוצג בתורת גוף תקני שיש עליו הסכם בין לאומי. חבר "טבלת היפוך" בין יחידות המסה השונות מאפשר תרגול נוסף של מדידת מסה.

ה. גילוי ניסויי של חוק מדידת המסה ע"י איזון של מאזניים שוני-זרועות ושימוש בחוק זה בהקשרים נסיוניים שונים מאפשר חיזוק נוסף של ההבנה שהושגה בעבודות במאזניים שווי-זרועות.

בגישה הזאת, חלק ניכר של הקשיים שתיארנו בראשית הסעיף אינם קיימים, או שחומרם פוחת מאוד. אולם ישנה בעיה פדגוגית אשר שום דרך הוראה לא תוכל לחמוק ממנה - ההבדל בין מערכת המושגים שהוקנו בכיתה לבין הרגלי הדיבור והחשיבה היומיומיים שהלומד מורגל בהם שנים רבות. אין, איפוא, מנוס מעימות רוחני. הסיכוי להצליח בעימות זה גדל משום שאנו דוחים אותו עד אחרי שמערכת המושגים המדעית מוקנית לתלמיד במירב הבהירות וההמחשה.

נציין לבסוף כי גם בתוכנית הנוכחית של חטיבת הביניים (ראה מובאה 1) נלמד מושג המסה מתוך הגישה של "מסה כובדית", שאינה מסתמכת על הדינמיקה הניוטונית. דא עקא שלפני כן נלמדים המושגים "כוח" ו"משקל" וכל הפעילות הניסויית נקשרת למושגים אלה. כפי שכבר נאמר לעיל, "המושג היומיומי "משקל" מכיל בתוכו בשלב זה "תערובת" של המושגים המדעיים "כוח" ו"מסה" וכל הפעילות הלימודית והניסויית רק מחזקת את "המושג" המעורבב הזה. בפרק הבא של התוכנית נעשים מאמצים, בעזרת דיון עיוני ומילולי גרידא (שהרי כל הפעילות המעשית כבר נתמצתה!) להפריד בין המושגים "מסה" ו"משקל", אשר עד אותו הרגע מצויים בערבוביה במוחו של התלמיד. זאת משימה פדגוגית קשה ביותר ומצליחה רק לגבי חלק קטן מן התלמידים, שיש להם כישורים גבוהים לחשיבה מופשטת.

חשוב, איפוא, מאוד לשכתב את התוכנית "כוח משקל ומסה" ברוח הקווים שהובאו לעיל.

III קווים להוראת המושגים "כוח" ו"משקל"

בתוכניות חטיבת הביניים מוצג המשקל ככוח טבע חשוב ביותר. כנקודת מוצא, מוגדר משקלו של גוף בתור הכוח אשר כדור הארץ מפעיל עליו. בהמשך מורחב מושג המשקל גם למצבים שבהם הגוף עשוי להימצא על גרמי שמים אחרים; למשל, על הירח. בגישה זאת (שאני מסכים לה בהחלט), כל הדרוש להגדרת מושג "המשקל" הוא הבנת מושג "הכוח" ולימוד דרך למדידת כוחות. את המשך הדיון בסעיף זה נקדיש איפוא למושג הכוח. הטיפול בו נותן הזדמנות להדגים לתלמידים יציאה ממושג אינטואיטיבי ו"זיקוקו" עד שמקבלים מושג מדעי. מובן שהכתוב להלן אינו מתאר אלא קווים כלליים.

מושג אינטואיטיבי של "כוח" הוא נחלת כולנו. זאת משום שאנו יכולים להפעיל כוח בעזרת שרירינו ואז יש לנו תחושה ישירה שלו.

המושג האינטואיטיבי שלנו אינו מדעי מהסיבות הבאות: -

- א. כוחות רבים וחשובים אינם מופעלים על ידינו ואז אין לנו תחושה ישירה שלהם.
- ב. התחושה הישירה שלנו אינה מאפשרת לנו למדוד כוח.
- ג. המושג האינטואיטיבי של כוח (אפילו בתחומים הצרים שבהם יש לו משמעות) מכיל, בדרך כלל, "תערובת" של מושגים מדעיים שונים. בעיקר: "כוח", "אנרגיה", "הספק".

היחידות "קילוגרם - כוח" או "גרם - כוח" (אשר המהנדסים עדין משתמשים בהן) נפסלו באופן מוחלט, בגלל "התרומה" שלהם להגדלת הבלבול בין המושגים "מסה" ו"משקל".

לתאור יותר מפורט של התהליך הלימודי המתואר לעיל, ראה מובאה 4, ספר א'.

IV מסה ומשקל. המדד המדעי ל"כמות החומר"

אחרי שגומרים את הלימוד של מסה ומשקל, יש לנכח את שני המושגים ("הגדלים"). בכל התוכניות שהזכרנו עד כה (מובאות 1; 4; 5) נעשה דבר זה בשני "צעדים". עקרונית, אלה אותם צעדים בשלוש התוכניות; ההבדל הוא רק במידת העומק והפרוט. כאן נתאר את שני הצעדים בקיצור נמרץ.

צעד ראשון: סיכום ההבדלים בין "מסה" ו"משקל".

נערכת שיחת סיכום על הבדלים אלה, שבה נוגעים (לפחות) בנקודות הבאות: ההבדל במדידה ובהגדרה האופרטיבית של מסה ומשקל; מוחלטות המסה מול יחסות המשקל; מוחלטות היחס בין שני משקלים; למשקל יש כיוון, אך למסה אין.

בהמשך לשיחה זאת עונים התלמידים (בכתב) על שורה ארוכה של בעיות, אשר בכל אחת מהן הם צריכים להחליט אם הגודל הרלבנטי הוא המסה או המשקל. דיון כיתתי על תשובות התלמידים תורם רבות להבהרת המושגים.

צעד שני: מהו המדד המדעי ל"כמות החומר"?

נזכיר כי בתוכנית המוצעת על ידינו משמשת שאלה זאת כמוטיבציה לכל תהליך הלימוד של נפח, מסה ומשקל (וכן הדבר במובאה 5), אך השאלה עצמה נשאלת בכל התוכניות שתארנו כפתיחה ללימוד מושג המסה. נערך דיון כיתתי על השאלה מהם האפיונים שהיינו רוצים ליחס לגודל שנקרא לו "כמות החומר". כדי לחשוף אפיונים שאנו משתמשים בהם ללא מודעות גמורה נעזרנו על-ידי השאלה: "מדוע במקרה קונקרטי זה או אחר העדפנו מדד אחד על פני השני (כאשר הם נתנו לנו תשובות סותרות)?"

בסופו של דבר מתגבשים 4 האפיונים הבאים: -

- 1) גודל המוגדר לכל גוף שבעולם.
- 2) גודל אדיטיבי.
- 3) גודל מוחלט.
- 4) גודל שאינו אפס לכל גוף שבעולם.

תהיה לנו הגדרה אופרטיבית-כמותית של כוח אם נמדוד את אחד האפקטים שהכוח גורם להם. כוח מתגלה, בדרך כלל, בתופעות הבאות:

1. שינוי צורתו של גוף.

2. שינוי מהירותו של גוף.

3. איזון של כוח אחר.

התופעה השלישית אינה יכולה לשמש להגדרה של כוח. זאת משום שלתאורה יש כבר לדעת מה זה כוח. אפשר להגדיר כוח ע"י התופעות (1) או (2). אנו מסתמכים על התופעה הראשונה (שינוי צורה של גוף), משום שהטיפול בה אינו דורש שליטה בדינמיקה הניוטונית.

כמקובל, אנו בוחרים כ"מד-הכוח" שלנו בגוף אלסטי נוח לטיפול - הקפיץ. הכוח מוגדר אופרטיבית (דהיינו, נמדד) ע"י שעור ההתארכות של קפיץ נתון. יחידת הכוח שלנו - ה"ניוטון" - מוגדרת בתור המשקל על פני כדור הארץ של גוף בעל 0.102 ק"ג מסה של 102 גרם.

בהגדרת הכוח אנו מניחים, למעשה, שהמשקל הוא אדיטיבי. משתמשים בהנחה זאת כאשר מכיילים את הקפיץ ע"י העמסתו במספר גופים זהים וטוענים שהכוח הפועל על הקפיץ שווה לסכום המשקלים של הגופים האלה. בגיל חט"ב, הנחה זאת נראית כמובנת מעצמה. אני מציע לא לעורר את הנקודה הזאת במהלך הלימוד (אלא אם כן יעורר אותה אחד התלמידים). לאחר מכן, בדיון על המדד המדעי ל"כמות החומר", ממילא נעסוק גם בבעיה של גדלים אדיטיביים ולא-אדיטיביים.

נציין לבסוף כי יחידת הכוח שאנו משתמשים בה היא הניוטון. בשלב זה הוא מוגדר בתור המשקל של גוף שמסתו 102 גרם על פני כדור הארץ. מוסבר לתלמידים כי (בניסוח פשוט זה) זאת הגדרה לא מדויקת לגמרי (שהרי המשקל על-פני כדור הארץ תלוי במידת מה במקום). מוסבר לתלמידים כי המספר "הבלתי עגול" 102 גרם הוא תוצאת העבודה כי ההגדרה הראשונה של הניוטון לא הסתמכה על הכובד, אלא על תופעת טבע אחרת.

על אף הקשיים המעשיים של הגדרת הניוטון, חשוב להרגיל את התלמידים מלכתחילה ליחידת הכוח שהם ימשיכו להשתמש בה בלימודי הפיסיקה היותר מתקדמים, ובפרט בדינמיקה.

אחרי שמגיעים לכך, קל לראות כי הגודל "מסה" אכן מקיים את כל האפיונים הנ"ל, ואין הדבר כן לגבי "נפח" ו"משקל", המקיימים רק חלק מן האפיונים.

במסגרת מאמר זה לא נוכל לתאר את כל השלבים האינטלקטואליים והפדגוגיים הכרוכים בדיון הנ"ל, בהבנתו המלאה ובמסקנותיו. נעיר רק כי דיון זה הוא קשה ומופשט. אף-על-פי כן יש הבדל מכריע בין הקושי הכרוך בו בהתאם לתוכנית הלימוד המוצעת במאמר זה (ושכבר בוצעה הלכה למעשה במובאה 5) לבין הקושי הכרוך בו על פי התוכנית הנוכחית של חטיבת הביניים (מובאות 1 ו-4). על פי התוכנית שאנו מציעים תפקיד הדיון הוא להבחין היטב בין שני גדלים שכבר הוכרו ונלמדו באופן מלא לפני הדיון. לעומת זאת, על פי תוכנית חטיבת הביניים, רק בדיון הזה עצמו מתגלה לתלמידים מושג "המשקל" אינו מספיק וצריך ליצור מושג נוסף - "המסה".

שתי משימות פדגוגיות נכבדות הופכות, איפוא, למשימה אחת שנעשית ממילא להרבה יותר קשה. העובדה שמשימה זאת צריכה להתבצע כמעט רק בעזרת דיון עיוני הופכת אותה ל"יעד" שקשה מאוד להגיע אליו.

V קווים להוראת מושג האנרגיה

"אנרגיה" היא המושג המרכזי בתוכנית כיתה ט' בישראל. שתי התוכניות שחוברו על ידי קבוצות של המרכז הישראלי להוראת המדעים הן בעלות מבנה רעיוני בסיסי שווה ומחבריהן דאגו במתכוון שמרבית הניסויים המתבצעים בהן יהיו שווים (ראה מובאות 2 ו-3). שתיהן מתבססות על תוכנית קודמת⁽⁶⁾, "חשמל וחוקי שימור", שחוברה ע"י קבוצת רחובות לפיסיקה בו זמנית לתוכנית⁽⁷⁾ "Physical Science II" אשר חוברה בבוסטון. יש קרבה רבה בין שתי התוכניות.

כל התוכניות שהוזכרו לעיל יוצאות מן העמדה כי אין אפשרות לתת הגדרה פורמלית סגורה לגודל "אנרגיה". במשך שנים רבות שלטה בספרי הלימוד "ההגדרה" המוטעית: "אנרגיה היא היכולת לעבוד עבודה". היום ברור כי הביטוי "היכולת לעבוד עבודה" אינו חד-משמעותי ועל כן "ההגדרה" הנ"ל אינה אלא שגיאה. למרבה הצער, זאת שגיאה שהוראת הפיסיקה טרם נפטרה ממנה לגמרי; בבעיה פדגוגית זאת עוד נדון בהמשך המאמר. לביקורת מדעית של ההגדרה המוטעית הנ"ל ראה, למשל, מובאה 8.

את הגישה של התוכניות הישראליות (ולא שלהן בלבד) ללימוד מושג האנרגיה אפשר לנסח כך: את מושג האנרגיה אפשר לבנות רק "צעד צעד", דהיינו ע"י ניסויים שבהם מתרחש גלגול של צורת אנרגיה מוכרת לצורת אנרגיה חדשה נחקרת; הפרוש הכמותי של ניסויים כגון אלה ינתן ע"י שימוש בעקרון שימור האנרגיה.

פרוש הגישה הנ"ל הוא שעלינו לבחור תחום סגור של תופעות פיסיקליות (למשל: גלגולי חום במערכת מבודדת תרמית, או: גלגולי אנרגיה מכנית במערכת סגורה שהחיכוך בה זניח, וכדומה). במערכת זאת אנו מגלים גודל משתמר. לגודל זה אנו קוראים "צורת האנרגיה המאפיינת את התחום הסגור הנ"ל". [מכיוון שלימוד אינו מחקר עצמאי והזמן אף הוא מוגבל, דואגת התוכנית לכך שהגודל המשתמר שנגלה אכן יהיה אנרגיה ולא גודל משתמר אחר. מסה, למשל].

אחר כך אנו עוברים לניסויים שבהם מתרחשות תופעות מן הסוג שכבר חקרנו בצרוף תופעות מעוד סוג אחד (למשל, תופעות חום + נפילה של גופים). במקרה זה אנו רואים שצורת האנרגיה הראשונה אינה משתמרת, אך מתגלה גודל חדש שאפשר לקרוא לו "צורת האנרגיה של התופעות מן הסוג הנוסף". אנו מניחים כי האנרגיה הכוללת (דהיינו, סכום שתי צורות האנרגיה) השתמרה. הנחה זאת מאפשרת לנו לפתח נוסחה כמותית בשביל צורת האנרגיה החדשה.

בתהליך החקר שתואר סכמטית לעיל אפשר להמשיך עוד ועוד. חקר כמותי של תהליכי גלגול מצורת אנרגיה שיש לנו כבר נוסחה כמותית בשבילה אל צורת אנרגיה חדשה + עקרון שימור האנרגיה (אשר בהקשר זה יש לו תפקיד של "עקרון חקר"), מאפשרים לנו להגדיר כמותית את צורת האנרגיה החדשה. זהו התהליך אשר קראנו לו בקיצור "הגדרת האנרגיה צעד צעד". בתהליך זה נמשיך עד שנגדיר את כל צורות האנרגיה שאנו מעוניינים בהן. עקרונית, זהו תהליך שאף פעם לא נגיע לסיומו המוחלט.

התהליך הסכמטי שתארנו כאן משותף לכל התוכניות שהזכרנו לעיל. הן נבדלות אחת מן השניה בהדגשים פדגוגיים ומתודולוגיים ובבחירת צורת האנרגיה אשר משמשת להן נקודת מוצא. לענייננו חשוב להדגיש כי שתי התוכניות הישראליות מגיעות באמצעות ניסויים של גלגולי אנרגיה אל הנוסחאות הכמותיות של (לפחות) צורות האנרגיה הבאות: אנרגית תנועה, אנרגית גובה, אנרגית חום, אנרגיה חשמלית. התהליך שבעזרתו חוקרים את צורות האנרגיה הנ"ל מדגיש ביותר את מעמדו של עקרון שימור האנרגיה כחוק טבע אוניברסלי.

מי שלמד והבין את תוכניות רמה א' של חטיבת הביניים בישראל מכיר כמותית את הגדלים: מסה, כוח, משקל ואנרגיה. הוא מכיר את יחידות המידה של גדלים אלה. חוקי השימור של מסה ושל אנרגיה ידועים לו היטב והוא רואה בהם חוקי טבע אוניברסליים.

נחזור ונדגיש כי המושגים והחוקים הנ"ל נבנו על סמך מחקר ניסויי ישיר ושימוש בעקרונות מתודולוגיים מדעיים מקובלים. יש, איפוא, למושגים הנ"ל מעמד של מושגים בלתי תלויים בדיסציפלינה פיסיקלית מסוימת. כל לימוד עתידי של דיסציפלינה פיסיקלית יוכל, איפוא, להסתמך על המושגים והחוקים הנ"ל. יתר על כן, אם רוצים למנוע נתק בין לימודי הפיסיקה בחטיבת הביניים ובחטיבה העליונה חשוב ביותר כי כל הרחבת דעת תסתמך על הדעת שכבר נרכשה. בודאי שחשוב למנוע סתירות בין מה שנלמד בשלבים השונים. גם בהכשרת מורים לחטיבת הביניים חשובה מאוד בנית הקשר העקבי בין התוכניות שהם יצטרכו להורות לבין הלימוד היותר מקיף ומעמיק של פיסיקה, שהוא עיקר הכשרתם המדעית.

כאשר נדון על התוכנית הרצויה ללימוד מכניקה נצטרך להתחשב בשיקולים הללו. מובן שאין אלה השיקולים היחידים.

ג. קווים להוראת מכניקה בחטיבה העליונה

במה שיבוא להלן נביע בקורת על חלקים מסוימים בתוכניות המקובלות להוראת מכניקה בישראל ובעולם ונציע הצעות חילופיות להוראת חלקים אלה. לא נעשה זאת על-ידי הצגה מפורטת של שתי תוכניות זו מול זו; נדון בעיקר בנושאים השנויים במחלוקת.

I. הנחה פדגוגית

אנו מניחים כי לימוד הדינמיקה (והקינמטיקה) הניוטונית חייב להפתח בלימוד התנועה של חלקיק בקו ישר. המושגים היסודיים - כגון: חוקי התנועה, התנע ושימורו, אנרגיה מכנית ועבודה - חייבים להילמד קודם כל בהקשר זה. רק בשלב יותר מאוחר של הלימוד יש לעסוק גם בתנועה שאינה בקו ישר ואז יגיע התלמיד להבנה רבה יותר של האופי הווקטורי של כמה גדלים מכניים. הבנת עקרונות הדינמיקה ומושגי היסוד שלה אינה קלה כלל. הוא הדבר בהשגת הבנה ושליטה מסוימת בטכניקה הווקטורית. אנו מציעים

איפוא, להקל על התלמיד בכך שלא "ננחית" עליו שני ענינים קשים אלה בעת ובעונה אחת.

הגישה הפדגוגית הנ"ל מקובלת בכל תוכניות המכניקה הידועות לי שמשתמשים בהן היום בישראל. דיוננו להלן מסתמך על ההנחה הזאת.