



## הקסיפב "פועמ"

### Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

### Citation for published version:

Bagno, E, Eylon, BS & Ganiel, U 1995, "הקסיפב "פועמ", הרומל וולע : הדוהת, 'לע-טבמ חותיפל דומיל תודיחי: הקסיפב "פועמ", vol. 17, no. 2, pp. 47-57. <<https://ptc.weizmann.ac.il/?pg=Editions&Page=2&EditionID=37>>

*Total number of authors:*

3

### Published In:

הקסיפב הרומל וולע : הדוהת

### License:

Other

### General rights

@ 2020 This manuscript version is made available under the above license via The Weizmann Institute of Science Open Access Collection is retained by the author(s) and / or other copyright owners and it is a condition of accessing these publications that users recognize and abide by the legal requirements associated with these rights.

### How does open access to this work benefit you?

Let us know @ [library@weizmann.ac.il](mailto:library@weizmann.ac.il)

### Take down policy

The Weizmann Institute of Science has made every reasonable effort to ensure that Weizmann Institute of Science content complies with copyright restrictions. If you believe that the public display of this file breaches copyright please contact [library@weizmann.ac.il](mailto:library@weizmann.ac.il) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



# מחקר בהוראת הפיסיקה

## "מעוף" בפיסיקה: יחידות לימוד לפיתוח מבט-על

אסתר כהן, בת שבע אלון ואורי אביאל המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות,

תקציר

המבנה המסורתי של הוראת הפיסיקה בבית הספר התיכון מחולק לתחומים נפרדים. שיטת הוראה זו יוצרת במוחם של התלמידים מבני ידע מקוטעים ומשפיעה לרעה על הבנת החומר וזכירתו לאורך זמן. במאמר זה מתואר תהליך המקשר בין המושגים הנלמדים בתחומים הנפרדים ומארגן את החומר. הארגון מתבצע באמצעות שבע יחידות "מעוף", המוצעות כחומר חזרה לתלמידים הלומדים פיסיקה בהיקף רחב. היחידות בנויות סביב המושגים והעקרונות הפיסיקליים המשותפים לתחומים השונים (מכניקה, חשמל, מגנטיות והשראה אלקטרומגנטית). כמושגי מפתח ביחידות ה"מעוף" נבחרו "שדה וקטורי" ו"פוטנציאל", הקושרים אליהם מושגים ועקרונות רבים מהחומר הנלמד בפיסיקה של בית הספר התיכון. הדוגמות הנדונות הן: השדה האלקטרוסטטי, שדה הגרביטציה, השדה החשמלי המושרה והשדה המגטי. תהליך הלמידה ביחידות כולל פתרון בעיות פשוטות מאד. הבעיות מתבססות על קשרים בין מושגים. פתרון הבעיה מוביל את התלמידים לניסוח מחדש של הקשרים. מבני הידע מיוצגים על-ידי מפות מושגים, והקשרים מוטמעים במוחות התלמידים באמצעות פתרון בעיות נוספות ותאור תהליכים פיסיקליים מוכרים, תוך כדי שימוש מודגש בקשרים שנוסחו. הטיפול המוצע הוא טיפול משולב המיועד למורים ותלמידים. הוא מיושם באמצעות סדרה של שעורי "מעוף" המתבססים על היחידות. בשעורים אלה מתבצעת פעילות מונחית של ארגון בין-תחומי, בסיוע ערכת שקפים שפותחה במיוחד למטרה זו.

מילות מפתח:

ארגון ידע, שדה וקטורי, פוטנציאל, פתרון בעיות.

### 1. מבוא

המבנה המסורתי של הוראת הפיסיקה בבית הספר התיכון, מחולק לתחומים נפרדים. שיטת הוראה זו יוצרת במוחם של התלמידים מבני ידע מקוטעים, ומחטיאה את אחת המטרות המרכזיות של לימוד הפיסיקה והיא: תאור מספר רב של תופעות באמצעות מספר קטן של עקרונות. מידור לימודי הפיסיקה (מכניקה, חשמל, אופטיקה ...) גורם לכך, שמושגים כלליים ודוגמות שונות של מושגים אלה נלמדים בהקשרים שונים ובשנים שונות. לדוגמה: תנועת גוף בשדה כבידה אחיד נלמדת בתחום המכניקה. תנועת מטען בשדה אלקטרוסטטי אחיד נלמדת בתחום האלקטרוסטטיקה. שתי התופעות מטופלות כאילו היו תופעות שונות, למרות ששתיהן מהוות דוגמות לגוף הנע בשדה כוח אחיד וניתן לתארן באמצעות מושגים ועקרונות משותפים. דוגמה אחרת: עבודת "כוח משמר" – עבודת כוח שאינה תלויה

במסלול, נלמדת בשני הקשרים שונים: בתחום המכניקה דנים בעבודת כוח הגרביטציה, ובתחום החשמל- דנים בעבודת הכוח האלקטרוסטטי. בדרך כלל לא נעשה ניסיון לקשר בין שני כוחות אלה ולדון בהם כדוגמות של מושג כללי יותר, מושג ה"כוח המשמר".

מבחינים שהעברנו לקבוצות גדולות של תלמידים, וראיונות מפורטים שערכנו עם רבים מהם מראים, שתלמידים אינם מצליחים לבנות בכוחות עצמם מבנה ידע מאורגן כהלכה בו קיימת הבחנה ברורה בין מושג כללי לבין דוגמותיו. כמו כן רבים מהם מבלבלים בין תכונה ספציפית של דוגמה נפוצה במיוחד לבין תכונת המושג הכללי. למשל, תלמיד האומר ש"אנרגיה פוטנציאלית קשורה למסה" חושב בדרך כלל על המקרה הפרטי, mgh, המהווה דוגמה למושג הכללי-אנרגיה פוטנציאלית.

ידוע שחסרונו של מבנה ידע בנוי כהלכה מוביל לקשיים

בזכירת החומר לאורך זמן, בהבנת מושגים, ובפתרון בעיות. (ראה למשל, Heller & Reif, 1984).

מטרתה של העבודה המתוארת במאמר זה להציע שיטת הוראה המובילה לשיפור מבנה הידע בפיסיקה של בית-הספר התיכון. בספרות הוראת המדעים מתואר הקשר בין מושג כללי לבין דוגמותיו באופן הבא:

כל מושג מאופיין בעזרת תכונות "קריטיות" המגדירות אותו: (Rosch & Mervis 1975, Hershkowitz 1989). תכונות אלה מבטאות את הקשרים בין המושג לבין מושגים אחרים הנחוצים להגדרתו. נדגים זאת באמצעות המושג: "מרובע". למרובע שתי תכונות קריטיות: הקשר בין המושג "מרובע" לבין המושג "מצולע", והקשר בין המושג "מרובע" לבין המושג "ארבע". לכל מושג יש תת מושגים שהם דוגמות שלו. אם אנו מתמקדים במושג מסוים, נכנה אותו "מושג כללי". למושג הכללי דוגמות רבות, שלהן כל התכונות הקריטיות שלו, וכן תכונות נוספות המיוחדות לכל דוגמה. נעיר כאן, כי במבנה ההיררכי, ייתכן שמושג שראינו אותו כ"מושג כללי" יהיה בעצם דוגמה של מושג כללי אחר הנמצא מעליו בהיררכיה. כך למשל, אם מתמקדים במושג "מרובע" כמושג כללי, אזי "ריבוע" הוא דוגמה שלו ממש כפי שהמרובע הוא דוגמה של מושג כללי יותר-מצולע. לדוגמה "ריבוע" יש כל התכונות הקריטיות של המרובע ותכונות נוספות, חלקן קריטיות וחלקן לא. למשל, "זוויות ישרות", ו"צלעות שוות" הן תכונות קריטיות של הריבוע (אך כמובן לא של המרובע). הריבוע נחשב לדוגמה שימושית נפוצה במיוחד של המושג הכללי - זוהי דוגמה "טיפוסית".

מחקרים העוסקים בלמידה מראים, שמבנה הידע, שבונה לעצמו הלומד במשך תהליך הלמידה, מאורגן הירארכית, (ראה למשל, Eylon & Reif, 1984). בראש המבנה ההיררכי מוצבת תמיד האינפורמציה הנחשבת כ"חשובה" בעיני הלומד. במשך הזמן נשכחת האינפורמציה הפחות חשובה, זו שברמות הנמוכות, והלומד יזכור רק את תוכן של הרמות הגבוהות.

על מנת להבהיר את הדברים, נתבונן בשני חברים הלומדים מכניקה. תלמיד אי חושב שחוקי ניוטון הם האינפורמציה החשובה ביותר במכניקה. לפיכך, יציב חוקים אלה ברמה הגבוהה ביותר במבנה הידע שלו. תלמיד ב', חברו לספסל הלימודים, עשוי להחליט שדיאגרמת כוחות היא האינפורמציה החשובה ביותר במכניקה, ולכן יציב אותה ברמה הגבוהה ואת חוקי ניוטון, הפחות חשובים בעיניו, יציב ברמה נמוכה יותר. סיכויו של תלמיד ב' לשכוח את חוקי

ניוטון גבוהים יותר מאלה של תלמיד א'.

אין ספק שהידע שתלמידים רוכשים במהלך לימודי הפיסיקה בבית הספר התיכון, חשוב שיכלול עקרונות מרכזיים המוצבים ברמה הגבוהה במבנה הידע שלהם. על הדוגמות להמצא ברמה נמוכה יותר, עם הבחנה ברורה בין התכונות הקריטיות ובין התכונות המיוחדות האופייניות לכל דוגמה. תלמידים שמבנה הידע שלהם מאורגן נכון מבחינת הקשר בין המושג הכללי ובין דוגמותיו, עשויים לזכור את העקרונות הפיסיקליים של החומר הנלמד לאורך זמן ולהשתמש בהם נכון בפתרון בעיות.

## 2. סקר מקדים

נושאים הקשורים לכוחות משמרים, כוחות משמרים המשתנים לפי  $\frac{1}{r^2}$  ודוגמות שונות של כוחות אלה, מהווים חלק גדול מהחומר הנלמד בפיסיקה של החטיבה העליונה. למרות השימוש בתכונות "הכוח המשמר", המושג עצמו אינו מוגדר בכיתות רבות. לפיכך, בשאלונים שהפנינו לתלמידים, בחרנו להתייחס למושג "אנרגיה פוטנציאלית", שהקשר שלו למושג "כוח משמר" הוא אחת מתכונותיו הקריטיות. כמו כן התייחסנו למושג של "כוח המשתנה לפי  $\frac{1}{r^2}$ ".

התכונות הבאות הן תכונות מרכזיות של שני המושגים הנ"ל: "אנרגיה פוטנציאלית" קשורה אל:

- א. כוח משמר
- ב. נקודת הייחוס
- ג. שימור אנרגיה מכנית
- ד. עבודה

"כוח המשתנה לפי  $\frac{1}{r^2}$ " קשור אל:

- א. התנהגות פונקציונלית של  $\frac{1}{r^2}$  : חוק גאוס

ב. תכונת השימור

בסקר המקדים בדקנו את מבנה הידע של התלמידים, בהתייחס למערכת מושגים הכוללת את שני המושגים הנ"ל ודוגמות שלהם.

### 2.1 התכונות הקריטיות של שני המושגים הכלליים

כדי לבדוק כיצד רואים התלמידים את תכונות המושג הכללי "אנרגיה פוטנציאלית", נוסחה המשימה הבאה:

כתוב משפטים בעלי משמעות פיסיקלית, רבים ככל שתוכל, המכילים את המושג "אנרגיה פוטנציאלית". משימה דומה נוסחה עבור המושג הכללי השני:

כתוב משפטים בעלי משמעות פיסיקלית, רבים ככל שתוכל,

המכילים את המושג "כוח המשתנה לפי  $\frac{1}{r^2}$ ".

על סמך ממצאי השאלונים והשיחות עם התלמידים ניתן לאמר:

א. קיימת התייחסות מועטה לתכונות הקריטיות של שני המושגים הכלליים.

ב. קיימת התייחסות מוגזמת לתכונות לא קריטיות של דוגמות טיפוסיות (כמו החץ המוביל מהאנרגיה הפוטנציאלית הכובדית לאנרגיה הפוטנציאלית וציון  $m-g$ ).

## 2.2 נקודת ייחוס: תכונה קריטית של אנרגיה פוטנציאלית

הקשר בין אנרגיה פוטנציאלית (פוטנציאל) ושרירותיות נקודת הייחוס הוא אחת התכונות הקריטיות של המושג "אנרגיה פוטנציאלית". שלש שאלות בדקו את יכולתם של התלמידים לזהות תכונה קריטית זו בשלשה תחומים ( שלש דוגמות): אנרגיה פוטנציאלית חשמלית, כובדית ואלסטית. השאלות נוסחו כמשפטים שהתלמידים נתבקשו לקבוע את נכונותם ולנמק. להלן מובאות השאלות.

### שאלה 1

נקודת הייחוס לחישוב הפוטנציאל החשמלי אינה יכולה להימצא על כדור הטעון במטען חיובי.

נכון                      לא נכון  
הסבר

כדי לחשב פוטנציאל חשמלי בקירבת גוף טעון, נוח לבחור את נקודת הייחוס במרחק אינסופי מהגוף הטעון.

בחירה זו היא תכונה לא קריטית של הפוטנציאל החשמלי. התלמידים שהתראיינו סבורים שאסור לבחור את נקודת הייחוס במקום אחר. לפיכך, תגובתם למשפט זה היתה: "נכון, אין היא יכולה להמצא שם כי היא חייבת להימצא באינסוף".

### שאלה 2

האנרגיה הקינטית, שיש להקנות לגוף כדי שיוכל להימלט מכדור הארץ, תלויה בבחירת נקודת הייחוס של האנרגיה הפוטנציאלית:

נכון                      לא נכון                      אפשרות אחרת  
הסבר

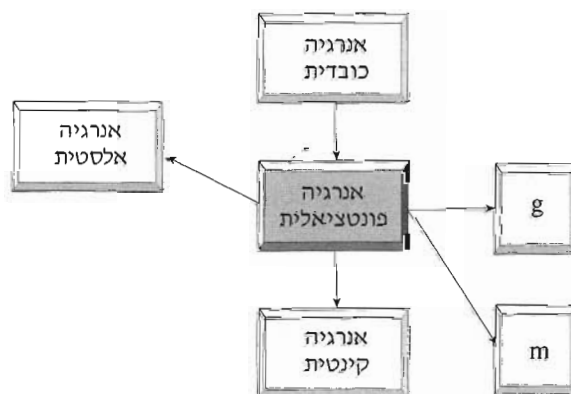
ראיונות שערכנו עם התלמידים מגלים שהם אינם קושרים בין האנרגיה הפוטנציאלית לבין נקודת הייחוס, ולכן אינם מבינים שמיקום נקודת הייחוס אינו משפיע על השינוי באנרגיה הפוטנציאלית.

כדאי להביא במקום זה ציטוט של ראיון שערכנו עם שני תלמידים על שאלה זו. הדיון נערך בין תלמיד שהוגדר על ידי

תשובות הנשאלים למשימות אלה מצביעות על החשיבות היחסית שמיחסים הנשאלים לרעיונות שונים בתחום. בדרך זו, מוארים רעיונות הנחשבים למרכזיים בעיני פסיקאים אך הושמטו מהרשימה, או רעיונות משניים שקיבלו משקל רב מדי. יתירה מזו, משימה כזו מאפשרת לנבא מהו המידע שסיכויי ההישרדות שלו עם השנים הוא גדול. מצאנו בין היתר, שפחות מ- 10% מהתלמידים קשרו בין אנרגיה פוטנציאלית לבין כוח משמר. לעומת זאת, רבים מהם כתבו משפטים כמו: "אנרגיה פוטנציאלית תלויה בגובה". כמו כן ראינו תלמידים באופן הבא:

במרכזו של דף חלק נכתב המושג הכללי. התלמידים נתבקשו לכתוב שמות של מושגים נוספים הקשורים אליו, ולציין את טיב הקשר.

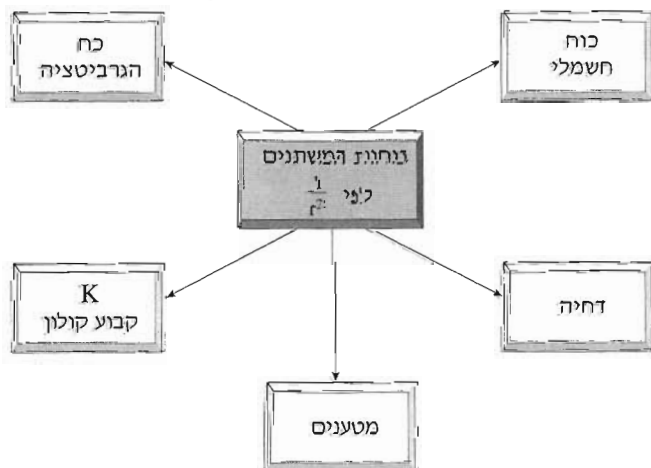
בתרשים 1 מתוארת מפה אופיינית של תלמיד המתייחסת למושג הכללי "אנרגיה פוטנציאלית".



תרשים 1: מפה של תלמיד למושג הכללי הראשון

בתרשים 2 מוצגת מפה אופיינית של תלמיד המתייחסת

למושג הכללי השני: "כוח המשתנה לפי  $\frac{1}{r^2}$ ".



תרשים 2: מפה של תלמיד למושג הכללי השני

מורהו כתלמיד "טוב" ותלמידה שהוגדרה על ידו כ"פחות טובה".

התלמיד: כן, בטח שזה תלוי.

התלמידה: רגע, אבל נקודת הייחוס לא יכולה להשפיע על זה. (ההדגשות הן שלנו)

התלמיד: מה את מדברת שטויות! הרי היא אנרגיה הכוללת נשמרת, נכון?

התלמידה: נכון.

התלמיד: אם כך, אז אם האנרגיה הפוטנציאלית משתנה, תשתנה כמוכן גם האנרגיה הקינטית.

התלמידה: יש לי בעיה עם זה. משהו לא סביר לי. איך יכולה המהירות לדעת ששינינו את נקודת הייחוס?

התלמיד: ראית את הנוסחאות?

התלמידה: כן, לפי הנוסחאות אתה צודק...

התלמיד המאולף בפתרון בעיות אינו בהכרח התלמיד המבין. לפעמים מסתבר כי דווקא "החלש" בודק, חוקר ומגלה הבנה פיסיקלית עמוקה יותר. היות שהזמן המוקצב להערכת הישגיו של תלמיד בודד מוגבל, נעשה עוול לתלמיד ה"חלש" - זה שאינו מיומן בכלים הסטנדרטיים המודגשים בכיתה. התלמיד ה"טוב" קבע בפסקנות ונימק בעזרת נוסחה. התלמידה תהתה, הטילה ספקות, אך לבסוף נכנעה.

שאלה 3

האם ייתכן שהנוסחה לחישוב האנרגיה הפוטנציאלית של קפיץ בעל קבוע  $k$  המתוח  $x$  מ' ממצבו הרפוי תהיה:

$$? \frac{1}{2} kx^2 + 5$$

כן לא הסבר

הנוסחה הנלמדת לחישוב האנרגיה האלסטית של קפיץ, היא  $\frac{1}{2} kx^2$ . זאת מתוך הנחה שהמצב הרפוי של הקפיץ נקבע כמצב הייחוס. הנחה זו נשכחת מתלמידים במשך הזמן, והם טוענים:

"לא, הנוסחה חייבת להיות  $\frac{1}{2} kx^2$ "

בטבלה 1 מסוכמים אחוזי התלמידים שטעו בשלש השאלות הקודמות.

דוגמה	א.פ. חשמלית	א.פ. כובדית	א.פ. אלסטית
% הטועים	44%	43%	56%

טבלה 1

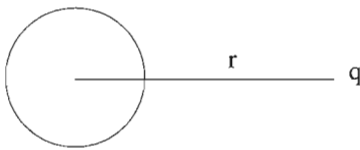
### 2.3 כוח המשתנה לפי $1/r^2$

שלש השאלות הבאות בדקו את מודעותם של התלמידים לעובדה, שכוחות משמרים המשתנים לפי  $1/r^2$  מקיימים את המסקנות הנובעות מחוק גאוס. שאלה באלקטרוסטטיקה, שאלה בגרביטציה ושאלה המתארת מצב שבו הכוח אינו משתנה לפי  $1/r^2$ .

שאלה 1

מטען נקודתי  $q$  נמצא מחוץ לקליפה כדורית מוליכה וטעונה במרחק  $r$  ממרכזה (ראה תרשים). אם הקליפה מצטמקת בצורה אחידה (כך שהיא נשארת כדור), ומרחק מרכזה אל המטען  $q$  אינו משתנה, הכוח שיפעל על המטען יקטן.

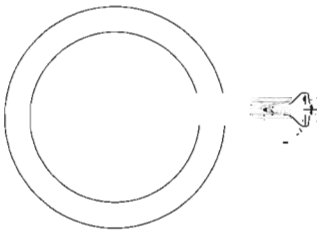
נכון לא נכון הסבר



שאלה 2

מנסים להכניס חללית לא מאוישת לתוך תחנת חלל ענקית הנמצאת בחלל שצורתה קליפה כדורית הומוגנית עם חור (ראה תרשים).

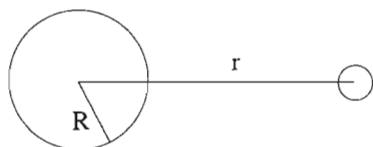
המנוע של החללית מפסיק לפעול כאשר היא נכנסת אל תוך תחנת החלל דרך החור.



שאלה 3

באחת הגלקסיות הרחוקות, דווח על גילוי חלקיקים לא מוכרים. נמצא שגודלו של כוח המשיכה הפועל בין כל זוג חלקיקים הוא  $F = A/r$ , כאשר  $r$  הוא המרחק בין מרכזי החלקיקים ו- $A$  גודל קבוע. מצבור של חלקיקים כאלה מפוזרים בצורה אחידה בתוך נפח כדורי שרדיוסו  $R$ . מחוץ למצבור זה נמצא חלקיק בודד (ראה תרשים). אם המצבור מצטמק בצורה אחידה (כך שהוא נשאר כדור), ומרחק מרכזו אל החלקיק הבודד אינו משתנה, הכוח שיפעל על החלקיק הבודד לא ישתנה.

נכון לא נכון הסבר



בעקבות הממצאים, הוחלט על פיתוח יחידות "המעוף", שהן שבע יחידות חזרה על נושאים רבים הנלמדים במכניקה, בחשמל ובמגנטיות ברמה של 5 י"ל. תכליתן - הכוונת התלמידים בארגון ידע בין-תחומי וסידור נכון של מבנה הידע מבחינת היחסים שבין המושג הכללי לבין דוגמותיו.

### 3 "מעוף" – מכלול ההוראה

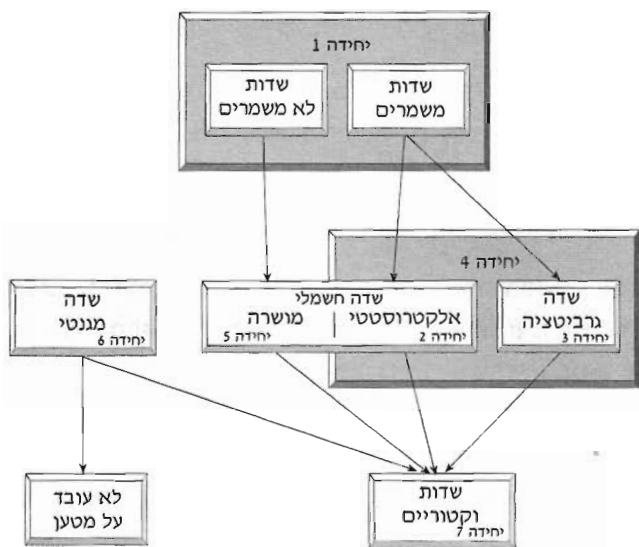
המושגים "שדה וקטור" ו"פוטנציאל" נבחרו כמושגי המפתח ביחידות הלימוד "מעוף". הדוגמות הנדונות ביחידות הן: השדה האלקטרוסטטי, שדה הגרביטציה, השדה החשמלי המושרה והשדה המגנטי.

השיקולים בבחירת המושגים "שדה" ו"פוטנציאל" היו:

א. "שדה" ו"פוטנציאל" הם מושגים מרכזיים בפיסיקה. מספר המושגים והעקרונות הפיסיקליים הקשורים אליהם הוא רב ביותר. יחידות לימוד הבנויות סביבם כוללות חלק ניכר מהנושאים הנלמדים בפיסיקה של בית הספר התיכון.

ב. "שדה" ו"פוטנציאל" הם מושגים מופשטים קשים להבנה. ליקויים בהבנתם גורמים ליקויים בהבנת מושגים נוספים חשובים הקשורים בהם. לדוגמה - מושג ה"פוטנציאל" קשור למושגים: הפרש פוטנציאליים (מתח), נקודת ייחוס, אנרגיה פוטנציאלית, שימור אנרגיה מכנית וכו'.

בתרשים 3 מתוארת מפה כללית למיון השדות הוקטוריים הנדונים ביחידות ה"מעוף". כמו כן מצויינים מספרי היחידות המתאימות הדנות בהם.



תרשים 3: שבע יחידות ה"מעוף"

ארבע היחידות הראשונות דנות באופן כללי בשדות המשמרים ובפרט בשתי הדוגמות: השדה האלקטרוסטטי

רוב התלמידים זיהו נכון את הקשר בין התלות הפונקציונלית של הכוח וחוק גאוס, במקרה האלקטרוסטטי שבשאלה 1. תשובתם לשאלה היתה: "לא, הרי הכוח שפועל על החלקיק הטעון על ידי הקליפה הכדורית, הוא כאילו כל מטען הקליפה מרוכז במרכזה". ריבוי התשובות הנכונות מוסבר על-ידי החשיבות הגדולה שמייחסים המורים למקרה המתואר בשאלה זו (הדוגמה הטיפוסית).

כמחצית מהתלמידים טעו בזיהוי התכונה הקריטית הנ"ל בגרביטציה (שאלה 2), ולא הצליחו להשליך את המסקנה מחשמל למכניקה. הם לא ידעו לומר שהחללית תנוע בתוך התחנה במהירות קבועה, כי שדה הגרביטציה בתוכה מתאפס, בדומה לשדה האלקטרוסטטי בתוך קליפה טעונה.

השאלה האחרונה מתארת מצב הדומה בתכונתו הלא קריטית למצב באינטראקציות אלקטרוסטטיות - קליפה ונקודה מחוצה לה, אולם הכוח אינו תלוי ב- $1/r^2$ , לפיכך, המסקנות הנובעות מחוק גאוס אינן מתקיימות. כשני שלישי מהתלמידים הלכו שולל אחר התרשים הדומה וטעו בתשובתם לשאלה זו. נשמעו משפטים כמו: "בדומה למקרה האלקטרוסטטי, גם כאן הכוח אינו משתנה" בטבלה 2 מסוממים אחוזי התלמידים שטעו בשלש השאלות הקודמות.

דוגמה	שאלה 1 חשמל	שאלה 2 גרביטציה	שאלה 3 כוח שאינו תלוי ב- $1/r^2$
% הטועים	21%	52%	60%

טבלה 2

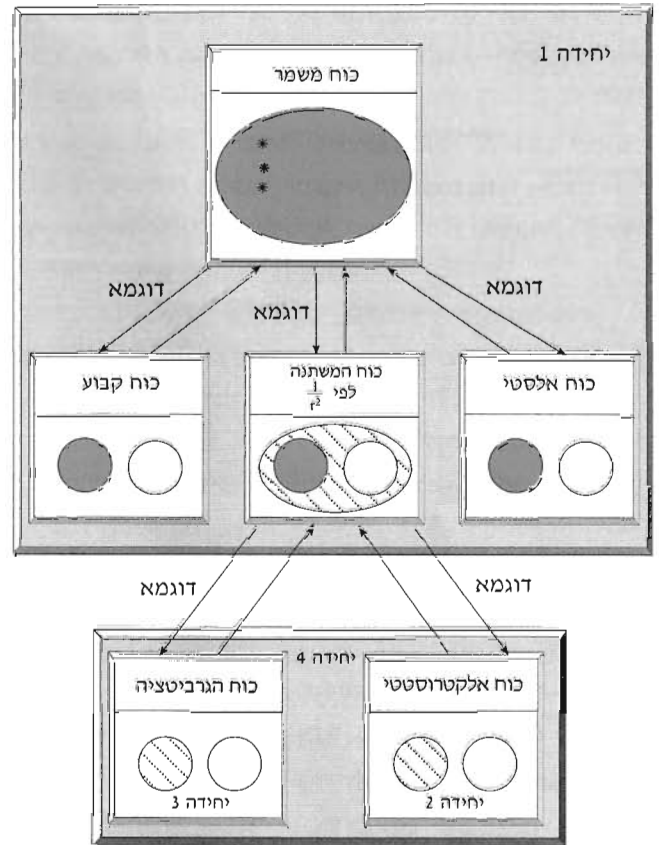
### סיכום

על סמך ממצאי השאלונים והראיונות ניתן לאמר שקיים אצל התלמידים בלבול ניכר בין תכונות המושגים ותכונות דוגמותיהם. הדבר מתבטא:

א. בתפישת המושג הכללי - חסרות תכונות קריטיות וקיימות תכונות לא קריטיות של דוגמות טיפוסיות.  
ב. בתפישת הדוגמות - לא קיימת הבחנה ברורה בין התכונות הקריטיות והלא קריטיות.

ג. הדוגמה הטיפוסית מובילה להכללה מוטעית: תלמידים המתבקשים לדבר על אנרגיה פוטנציאלית, אומרים משפטים כמו: "אנרגיה פוטנציאלית קשורה למסה", או, "אנרגיה פוטנציאלית קשורה למרחק מכדור הארץ" - תכונות של האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית.

ושדה הגרביטציה. יחידה 5 דנה בשדה החשמלי המושרה כדוגמה לשדה שאינו משמר. בתרשים 4 מתואר מהלך הנושאים המוצגים בארבע היחידות הראשונות.



תרשים 4: מהלך הנושאים בארבע היחידות הראשונות של חוברת ה"מעוף"

ברוח היחידה הראשונה, מודגשות גם כאן התכונות הקריטיות והלא קריטיות של דוגמות אלה. כמו כן, מוצג חוק גאוס כאקוויולנטי לתלות ב- $\frac{1}{r^2}$ . המסקנות מחוק גאוס נובעות למעשה מן התלות של הכוח (או השדה) ב- $\frac{1}{r^2}$ . ביחידה השנייה מנוסח חוק גאוס באלקטרוסטטיקה, וביחידה השלישית – חוק גאוס בגרביטציה, בליווי התופעות הנלוות. למשל, במצב עמיד (סטציונרי), השדה האלקטרוסטטי (או שדה הגרביטציה) בתוך קליפה של מטען (או קליפה של מסה), הוא אפס.

**יחידה ארבע** היא יחידה הדנה במושגים ובעקרונות המשותפים לשני השדות המשמרים – האלקטרוסטטי והגרביטציה, תוך כדי הדגשת הדומה בתכונותיהם הקריטיות והשונה בתכונות הלא קריטיות.

לדוגמה: שני השדות משמרים ולכן ניתן להגדיר עבורם פוטנציאל, ושניהם מקיימים את חוק גאוס. לעומת זאת כוח אלקטרוסטטי יכול להיות הן כוח משיכה והן כוח דחיה, בעוד שכוח הגרביטציה הוא כוח משיכה בלבד. כמו כן קיימת התייחסות לגודל היחסי של שני כוחות אלה, והשפעתם על תופעות מיקרוסקופיות ומקרוסקופיות.

יחידות חמש ושש דנות בשדות וקטוריים אחרים.

**יחידה חמש** מקבילה ליחידה הראשונה. בעוד זו מטפלת בכוחות משמרים, מטפלת היחידה החמישית בדוגמה, לא מוכרת, של כוחות לא משמרים. הנושא הוא השדה החשמלי המושרה. מוצגים שני מנגנונים ליצירת השדה החשמלי המושרה:

א. תנועת מוליך בתוך שדה מגנטי, הגורמת להפרדת מטענים ולשדה חשמלי אלקטרוסטטי-משמר. בשדה כזה ניתן להגדיר הפרש פוטנציאלים.

ב. שדה מגנטי המשתנה עם הזמן יוצר שדה חשמלי בלתי משמר – שלא ניתן להגדיר עבורו פוטנציאל, הפרש פוטנציאלים, שימור אנרגיה מכנית וכו'.

ביחידה זו דנים גם בחוק לנץ ובקשר בינו לבין חוק שימור האנרגיה.

**יחידה שש** מטפלת בשדה המגנטי שאינו מאובחן כמשמר או לא משמר (עבודתו על מטען נע היא אפס). מוצגים שני מנגנונים ליצירת השדה המגנטי:

א. זרם

ב. השדה החשמלי המשתנה עם הזמן – זרם ההעתק.

**יחידה שבע** היא יחידת סיכום הדנה בתכונות הכלליות של השדות הוקטוריים, מסכמת אותן בעזרת הנוסחאות המתאימות ודנה במשמעותן הפיסיקלית.

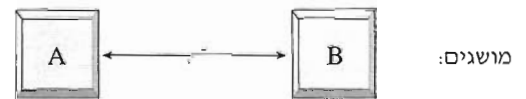
**היחידה הראשונה** מטפלת במושג הכללי "כוח משמר". (הכוכביות באליפסה הכהה מסמלות את התכונות הקריטיות של המושג הזה). אחרי ההגדרה מוצגות שלש דוגמות: כוח קבוע, כוח אלסטי וכוח המשתנה לפי  $\frac{1}{r^2}$ . בהקשר למושג הכללי מודגשות תכונותיו הקריטיות (המתוארות סכמטית על ידי העיגולים הכהים). למשל, הקשר שלו לעבודה ולאנרגיה פוטנציאלית. בהקשר לדוגמות, הדגש הוא על ההבחנה בין התכונות הקריטיות והלא - קריטיות. (העיגולים הכהים והלבנים בתרשים). למשל, תכונה לא קריטית של כוח קבוע מסוים (כוח המשיכה קרוב לפני כדור הארץ mg), היא התלות במסה.

**היחידה השנייה והיחידה השלישית** מטפלות בכוח (השדה) האלקטרוסטטי וכוח (שדה) הגרביטציה כשתי דוגמות של הכוח המשמר המשתנה לפי  $\frac{1}{r^2}$ . (העיגולים המקווקים מסמלים את התכונות הקריטיות של כוח זה).

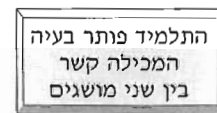
#### 4. עקרונות דידקטיים

ביחידות ה"מעוף" נבנים קשרים בין מושגים הנלמדים בתחומים שונים. העקרונות, שעליהם התבססנו בבניית הקשרים, נשענים על הגישה ה"קונסטרוקטיביסטית" ומנסחים ב"תאוריית הלמידה" של אוזובל (Ausubel, 1963). לפי גישה זו, ידע חדש נבנה על סמך ידע קודם, והלומד עצמו אחראי לבניית הידע שלו. תהליך הלמידה ביחידות ה"מעוף" כולל פתירת בעיות, הבנויות על מושגים הקשורים ביניהם בקשרים פיסיקליים. תוך כדי פתירת הבעיות, מובהרים הקשרים ומתנסחים מחדש.

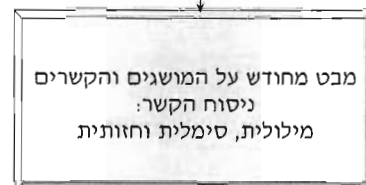
יחידת החזרה, "ארגון מושגים באלקטרומגנטיות", בנויה על עקרונות דידקטיים דומים (ראה בגנו 1989). בתרשים 5 מוצג השלד של פרק אופייני ב"מעוף", ובו פרוט השלבים הבונים את הקשר הפיסיקלי בין שני מושגים A ו-B. מבני הידע הנבנים מיוצגים באמצעות מפות מושגים, שיעילותם ככלי לארגון חומר מדווחת בפרוט בספרות כגון: Novak, 1987.



מושגים:



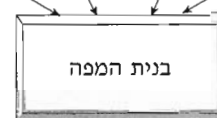
שלב 1:



שלב 2:



שלב 3:



שלב 4:

תרשים 5: השלד של פרק אופייני ביחידות ה"מעוף"

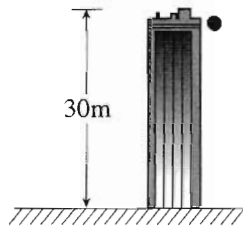
בהמשך מובאים מספר דפים מיחידת "המעוף" הראשונה, המדגימים את יצירת הקשר בין עבודת הכוח המשמר והשינוי באנרגיה הפוטנציאלית.

שלב 1 – התלמיד פותר בעיה מרכזית (או שתי בעיות מרכזיות), שבהן יש שימוש בקשר בין שני המושגים A ו-B. הבעיות בדרך כלל פשוטות מאד, כדי להימנע מחישובים מייגעים שהעיסוק בהם עלול להסתיר את המסר המרכזי – ניסוח הקשר בין שני מושגים.

לפניך שתי בעיות פשוטות. פתור אותן.

#### בעיה 1

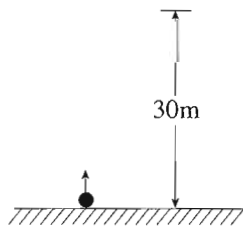
- גוף שמסתו 5kg נופל ממגדל שגובהו 30m. חשב את:
  - א. העבודה שעשה כוח הכובד בנפילה זו.
  - ב. השינוי באנרגיה הפוטנציאלית של הגוף.



שים לב: שינוי בגודל פיסיקלי מסוים מוגדר כערך הסופי של אותו גודל פחות הערך ההתחלתי שלו.

#### בעיה 2

- גוף שמסתו 5kg נורק כלפי מעלה. הוא עולה לגובה של 30m. חשב את:
  - א. העבודה שעשה כוח הכובד בזריקה זו.
  - ב. השינוי באנרגיה הפוטנציאלית של הגוף.



שלב 2 – דיון מילולי כתוב בעקבות פתרון הבעיה. במהלך הדיון מובהרים קשיים בהבנת המושגים. הקשר בין המושגים מנוסח באמצעות נוסחה, בצורה מילולית ובצורה סמלית.

מצאת, ודאי, בשתי הבעיות שפתרת, כי השינוי באנרגיה הפוטנציאלית תגדל ביטוינית של הגוף, שווה למינוס עבודת כוח הגרביטציה. אין זה מקרה.

שוויון זה נובע מקשר כללי יותר בין שני מושגים. שינוי באנרגיה הפוטנציאלית – השינוי באנרגיה הפוטנציאלית –



הגדרה:

השינוי באנרגיה הפוטנציאלית בין הנקודות A ו-B מוגדר כמינוס עבודת הכוח המשמר הפועל על הגוף בין הנקודה A לנקודה B.

$$\Delta U = U_B - U_A = - \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

משמעות הביטוי מצד שמאל: השינוי באנרגיה הפוטנציאלית בין הנקודות A ו-B.

משמעות הביטוי מצד ימין: מינוס עבודת הכוח המשמר בין הנקודות A ו-B.

נסכם אם כך את הממצאים של הבעיות הקודמות בטבלה הבאה:

שינוי באנרגיה הפוטנציאלית	עבודת כוח הכובד
-1500J	1500J
1500J	-1500J

כוח הגרביטציה, כזכור, הוא רק דוגמה אחת לכוח משמר. קיימים כוחות משמרים נוספים העובדים על גופים ורק בהקשר לכוחות משמרים ניתן להגדיר שינוי באנרגיה הפוטנציאלית של הגוף. עבודת כוח אלסטי, למשל, קשורה לשינוי באנרגיה הפוטנציאלית האלסטית.

בטבלה הבאה דוגמאות אחדות:

מינוס עבודת הכוח המשמר של הקפיץ	שינוי באנרגיה הפוטנציאלית הקפיצית
מינוס עבודת הכוח האלסטי	שינוי באנרגיה הפוטנציאלית הקפיצית
מינוס עבודת הכוח האלקטרוסטטי	שינוי באנרגיה הפוטנציאלית האלקטרוסטטית

שלב 3 – הפנמת הקשרים על ידי הלומד מתבצעת באמצעים אחדים: טבלאות משוות ומסכמות, דוגמות ובעיות לא שגרתיות. כמו כן, מתבקשים התלמידים, בשלב זה, לתאר תהליכים פיסיקליים אחדים באמצעות הקשרים המנוסחים.

מה משמעות הסימן השלילי בביטוי של השינוי באנרגיה הפוטנציאלית?

נסתכל על הדוגמות הבאות:

א. גוף נופל בהשפעת כוח המשיכה של כדור הארץ.

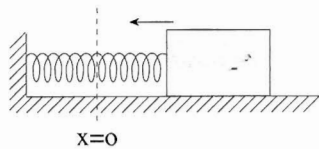
הגוף עובר בנפילתו ממצב של אנרגיה פוטנציאלית גבוהה למצב של אנרגיה פוטנציאלית נמוכה, כלומר השינוי באנרגיה הפוטנציאלית שלילי. הגוף נע בכיוון כוח הכובד, ולכן עבודת כוח הכובד חיובית.

מתקיים איפוא:  $\Delta U = -W$  כוח הכובד



ב. גוף מחובר לקפיץ מתוח. כאשר הגוף משוחרר, האנרגיה האלסטית של הקפיץ קטנה, כלומר, השינוי באנרגיה הפוטנציאלית האלסטית שלילי. הגוף נע בכיוון כוח הקפיץ ולכן עבודת כוח הקפיץ חיובית.

מתקיים איפוא:  $\Delta U = -W$  כוח אלסטי



לסיכום ניתן לומר שאם הכוח היחיד הפועל על גוף הוא כוח משמר, הגוף ינוע בכיוון הכוח המשמר ויעבור ממצב בו יש לו אנרגיה פוטנציאלית גבוהה למצב בו יש לו אנרגיה פוטנציאלית נמוכה.

יתכן כי במהלך לימודיך נתקלת גם בהגדרה אחרת הקשורה לשינוי באנרגיה הפוטנציאלית של גוף.

הגדרה:

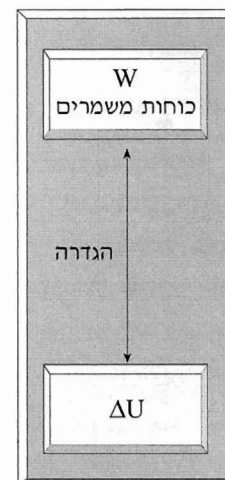
השינוי באנרגיה הפוטנציאלית של גוף בין הנקודות A ו-B מוגדר כעבודה הנעשית כנגד הכוח המשמר בהבאת הגוף מהנקודה A לנקודה B (מבלי לשנות את מהירותו).

שים לב!

בעוד שבהגדרה הראשונה הנושא הוא: "עבודת הכוח המשמר", הרי בהגדרה השנייה, הנושא הוא "העבודה הנעשית כנגד הכוח המשמר".

הבהר לעצמך כי שתי הגדרות אלה אמנם שקולות. הדוגמות הבאות נועדו להבהיר את שתי ההגדרות לשינוי באנרגיה הפוטנציאלית של גוף.

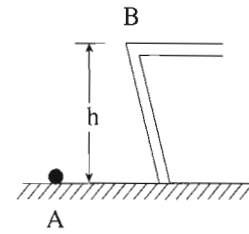
נוכל לסמן זאת כך:



משמעות החץ הדו-כיווני היא כי הקשר בין שני המושגים האלה נוצר על-ידי הגדרה כלומר, השינוי באנרגיה הפוטנציאלית של גוף מוגדר על-ידי עבודת הכוח המשמר הפועל עליו.

## דוגמה 1

כוח מסוים פועל על גוף שמסתו  $m$ , ומעלה אותו במהירות קבועה לגובה  $h$  מהנקודה  $A$  לנקודה  $B$ .



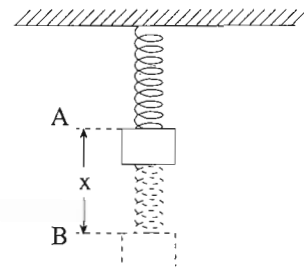
דוגמה 1

השלם את המשפטים הבאים:

- 1) הביטוי האלגברי לשינוי באנרגיה הפוטנציאלית הגרביטציונית של הגוף: \_\_\_\_\_
- 2) הביטוי האלגברי לעבודת הכוח הפועל עליו: \_\_\_\_\_
- 3) הביטוי האלגברי למינוס עבודת כוח הגרביטציה הפועל עליו: \_\_\_\_\_

## דוגמה 2

נקודה  $A$  בתרשים מתארת את מצבו של גוף המחובר לקפיץ רפוי. נקודה  $B$  מתארת את מצבו של גוף המחובר לקפיץ מתוח.



דוגמה 2

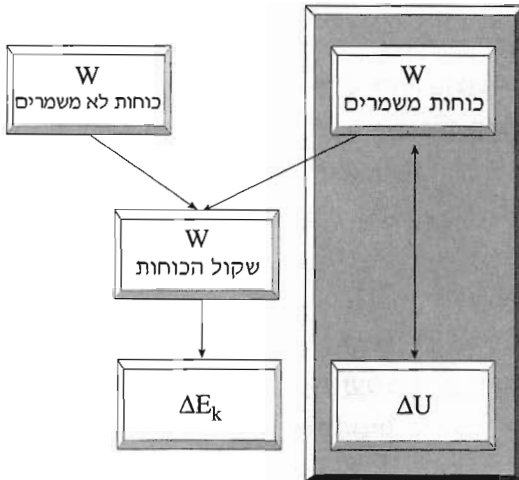
השלם את המשפטים הבאים:

- 1) עבודת כוח הגרביטציה על הגוף התלוי היא \_\_\_\_\_.
- 2) עבודה זו שווה \_\_\_\_\_ השינוי באנרגיה הפוטנציאלית הגרביטציונית של הגוף.
- 3) השינוי באנרגיה הפוטנציאלית הגרביטציונית של הגוף שווה גם ל \_\_\_\_\_.
- 4) השינוי באנרגיה הפוטנציאלית האלסטית של הגוף המחובר לקפיץ היא \_\_\_\_\_.
- 5) שינוי זה שווה גם ל \_\_\_\_\_ עבודת \_\_\_\_\_.
- 6) עבודת הכוח האלסטי של הקפיץ על הגוף התלוי היא \_\_\_\_\_.

## שלב 4 – הקשר החדש מתווסף למפת המושגים הנבנית.

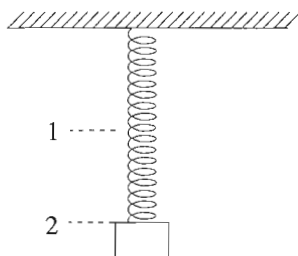
לסיכום, ניתן לאמור שהשינוי באנרגיה הפוטנציאלית של גוף בין הנקודות  $A$  ו- $B$ , מוגדר כמינוס עבודת הכוח המשמר. הגדרה אלטרנטיבית היא כי השינוי באנרגיה הפוטנציאלית של גוף בין הנקודות  $A$  ו- $B$  מוגדר כעבודה הנעשית בין הנקודות  $A$  ו- $B$  כנגד הכוח המשמר. אנחנו נשתמש בדרך כלל בהגדרה הראשונה.

הוספנו קשר חדש למפת המושגים, המפה הנבנית נראית כבר כך:



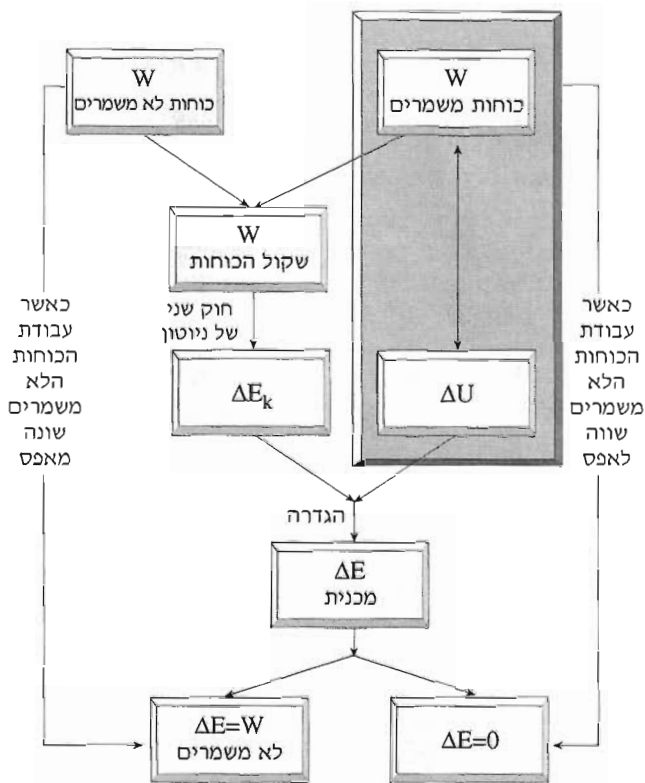
בדוק את עצמך!

1. האם ניתן, לדעתך, לחשב אנרגיה פוטנציאלית של כוח החיכוך? נמק. בשאלות 2-6 סמן את התשובה הנכונה.
2. אנרגיה פוטנציאלית גרביטציונית של גוף היא אפס:
  - א. על פני הקרקע
  - ב. בגובה פני הים
  - ג. במרכז כדור הארץ
  - ד. במקום שרירותי
3. אם כוח משמר יחיד עובד על גוף עבודה חיובית, אז האנרגיה הפוטנציאלית שלו:
  - א. גדלה
  - ב. קטנה
4. אם כוח משמר יחיד עובד על גוף עבודה שלילית, אז האנרגיה הפוטנציאלית שלו:
  - א. גדלה
  - ב. קטנה
5. אם האנרגיה הפוטנציאלית של גוף בנקודה היא אפס, גם הכוח הפועל עליו באותה נקודה הוא אפס. נכון לא נכון אפשרות אחרת
6. אם הכוח הפועל על גוף בנקודה הוא אפס, גם האנרגיה הפוטנציאלית שלו באותה נקודה היא אפס. נכון לא נכון אפשרות אחרת
7. גוף מחובר לקפיץ הקשור לתקרה. בנקודה 1 הקפיץ רפוי ובנקודה 2 הגוף נמצא במצב של שיווי משקל (ראה תרשים)
  - א. בדוק את השינוי באנרגיה הפוטנציאלית האלסטית בין הנקודות 1 ו-2, וקשור שינוי זה לעבודת הכוח האלסטי על הגוף.



בסיומו של תהליך ארוך ומפורט, מסוכם נושא שימור האנרגיה המכנית והקשר שלו לעבודת הכוחות המשמרים, באמצעות מפת המושגים שבתרשים 6: מפה זו מסכמת את יחידת המעוף הראשונה, זו המטפלת בכוחות משמרים ולא משמרים.

יחידות ה"מעוף" נכתבו בשתי רמות: מתמטית פורמלית (על רקע לבן) ואינטואיטיבית איכותית (על רקע אפור). ברמה הפורמלית נכתבו ההגדרות, הנוסחאות ותאורן הסמלי



תרשים 6: המפה המסכמת את יחידת ה"מעוף" הראשונה

במפת המושגים. דוגמות רבות ובעיות נוספות, איכותיות ברובן, נכתבו ברמה האיכותית. תפקיד הרמה האיכותית "לרכך" את הרמה הפורמלית ולספק לתלמיד עוגנים נוחים לזכרון. שתי הרמות שלויות זו בזו. עם זאת, יכולה הרמה הפורמלית לעמוד בזכות עצמה.

### 5. שעורי ה"מעוף" ומערך ההוראה

למורה חשיבות מכרעת בהפעלתו של כל נושא חדש.

התמודדות עם נושא בעל אופי בין-תחומי מתאפיינת בקשיים מיוחדים. קשיים אלה נובעים בעיקר מן העובדה שהכשרתם של רוב המורים היא ההכשרה המסורתית, שלפיה הפיסיקה מחולקת לתחומים נפרדים. בדיקת מבנה הידע הבין-תחומי של המורים גילתה שאפילו נסיון עשיר בהוראה אינו מוביל בהכרח, אצל חלקם, להיווצרותו של מבנה ידע מאורגן כהלכה. מבנה ידע שבו מושגים כלליים נתפשים כהכללה של דוגמותיהם, וקיימת הבחנה ברורה בין התכונות הקריטיות והלא-קריטיות של הדוגמות. במהלך ההערכה המעצבת נבדק מקומו של המורה בתהליך ארגון החומר. בעקבות הממצאים, החלטנו להחליף את הגירסה המקורית של מערך ההפעלה, שהיתה מיועדת לתלמידים בלבד, בגירסת ה"טיפול המשולב". בגירסה זו התיחסנו אל המורים כאל "לומדים", והצענו להם טיפול דומה לטיפול המוצע לתלמידים. המורים הונחו בבניית מבנה ידע בין-תחומי הסובב סביב מושגים מרכזיים בפיסיקה, וכך נתבקשו להנחות גם את תלמידיהם.

שעורי ה"מעוף" תוכננו כשעורים שבהם מתבצעת פעילות של ארגון בין-תחומי בסיוע ערכת שקפים שפותחה למטרה זו. הפעילות כוללת ששה שעורי "מעוף" למורים וששה שעורים שנערכים על-ידי המורים בכיתותיהם. הפגישות נבנות סביב יחידות ה"מעוף". כל יחידה מטופלת במהלך פגישת מורים בת כשלוש שעות, או שני שעורים רצופים בכיתות.

בהכשרת המורים בשעורי ה"מעוף" מתכוונים:

- להבהיר ולהדגיש את המטרות המיוחדות המאפיינות ארגון בין-תחומי.
- להכשיר את המורה "הלומד" להתנסות בארגון הידע שלו וכך להנחות את תלמידיו בכיתה.
- לספק המלצות דידקטיות, כמו: חלוקת השעות המומלצת, ציון הדגשים וקשיי למידה של מושגים מסויימים.

כל אחד מששה שעורי ה"מעוף" מתבצע בשלושה שלבים:

- עבודה בבית לפני השעור - פתירת כל הבעיות המרכזיות ביחידה.
- עבודה מונחית בשעור בעזרת ערכת השקפים. הלומדים מופעלים באיתור המושגים המרכזיים, בבעיות שפתרו, ומגדירים את הקשרים הפיסיקליים ביניהם.
- עבודה בבית לאחר השעור - פתירת הבעיות הנוספות ביחידה.

## 6. הפעלה

יחידות ה"מעוף" נוסו ב-22 כיתות י"ב במשך ארבע שנות: הלימודים: תשי"ן-תשנ"ג. כמו כן התקיימו בתקופה זו מספר השתלמויות מורים לקראת שעורי ה"מעוף" המעגניים את תהליך החזרה והארגון.

ההערכה מלמדת:

א. הטיפול משפר את מבנה הידע של הלומדים ומעגן אותו במושגים מרכזיים ובעקרונות בין-תחומיים המקשרים ביניהם.

ב. הטיפול משפר הבנת נושאים מרכזיים שעקרונותיהם מנוסחים באמצעות קשרים בין-תחומיים, כגון: שימור האנרגיה המכנית.

ג. היחידות הוערכו על ידי מורים ותלמידים כמועילות וחשובות.

ד. שעורי "מעוף", המשמשים שעורי סיכום של פרקים שנלמדו בכיתה ושזורים במערך ההוראה, משתלבים בתכנית הלימודים הקיימת ואינם דורשים תוספת זמן.

## 7. אחרית דבר

הנחה רווחת בין מורים היא, שתלמידים מסוגלים לזהות בקלות דמיון בין דוגמות שונות של מושג כללי. יתירה מזו, בהשוואה בין הדוגמות של מושג כללי, הם מסוגלים להבחין בין התכונות הקריטיות, המאפיינות את המושג הכללי, לבין התכונות הלא קריטיות המיוחדות לכל דוגמה. מעבודה זו עולה, שהנחה זו אינה מבוססת לגבי תלמידים, וגם לא לגבי רבים מהמורים. העובדה שגם מורים מתקשים בהבחנה בין התכונות הקריטיות והלא-קריטיות של הדוגמות מראה, שנסיון בהוראה בלבד אינו מוביל, בהכרח, לבניית המושגים

הכלליים כהכללה של דוגמותיהם הנלמדות בתחומים נפרדים.

בעבודה זו הראינו שבהשקעת זמן קטנה יחסית, ניתן לארגן מבנה ידע בין-תחומי, הבנוי על מושגים ועקרונות המשותפים לתחומים שונים.

מורים שהשתתפו בהשתלמויות ה"מעוף" טוענים שהם למדו לשלב היבטים של ארגון ידע במהלך השוטף של ההוראה ואינם נזקקים עוד לשעורי ה"מעוף" המתוכננים.

לאור החשיבות הגדולה של ארגון ידע, של ממצאי עבודה זו ושל הענין שגילו תלמידים ומורים בחומר, אנו ממליצים לבדוק דרכים להרחבת המסגרת, להוסיף מושגים ועקרונות מתחומי פיסיקה נוספים, ולשלב גם נושאים מתחומי ידע שונים.

## מראי מקום

1. בגנו, א. ואלון, בת-שבע (1989), ארגון מושגים באלקטרומגנטיות, תהודה, 13 (1), עמ' 19-28.
2. Ausubel, D.P., (1963). The Psychology of Meaningful Learning Grune & Stratton, New York.
3. Eylon, B. & Reif, F. (1984). Effects of knowledge based organization on task performance, Cognition and Instruction, 1, pp. 5-44.
4. Heller, J.I., & Reif, F. (1984). Prescribing effective human problem solving processes: problem description in physics. Cognition and Instruction 1, pp. 177-216.
5. Hershkowitz, R. (1989). Visualization in geometry - Two sides of the coin, Focus on Learning Problems in Mathematics, 11 (1), pp. 61-76.
7. Novak, J.D. (1987), Second International Seminar on Misconceptions in Science and Mathematics, Ithaca, N.Y.
8. Rosch, E., & Mervis, C.B. (1975), Family resemblances: Studies in the internal structure of categories, Cognitive Psychology, 7, pp. 573-605.

תהודה

המחלקה להוראת המדעים מברכת את רפי כהן,

מראשוני קבוצת הפיסיקה

וחבר מערכת "תהודה" בצאתו לגמלאות.