



הפרש פוטנציאלים וזרם במעגלים חשמליים פשוטים מחקר על מושגי תלמידים

כהן, ר., אלון, ב., וגניאל, א., המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות

Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts

R. Cohen, B. Eylon, and U. Ganiel

American Journal of Physics, Volume 51, No. 5, May 1983 (407-412)

תורגם ע"י ש. עוזרי

במאמר זה מדווח על מחקר שתוכנן כדי לזהות מושגי תלמידים במעגלים חשמליים פשוטים. שאלון המבחן הועבר למדגם של 145 תלמידי תיכון ו-21 מורי פיזיקה. השאלון כלל בעיקר שאלות איכותיות שמטרתן לבחון את הבנת התלמידים לגבי הקשרים הפונקציונליים בין המשתנים במעגל חשמלי.

הממצאים העיקריים שהתקבלו מניתוח התשובות היו: זרם הוא המושג הראשוני בו משתמשים התלמידים, בעוד שהפרש פוטנציאלים נחשב כתוצאה של מעבר זרם, ולא כסיבה שלו. כתוצאה מכך תלמידים משתמשים לעיתים ב- $V=IR$ בצורה שגויה. הסוללה נחשבת כמקור של זרם קבוע. המושגים של כ.א.מ. והתנגדות פנימית אינם מובנים כראוי.

לתלמידים יש קשיים בניתוח ההשפעה שיש לשינוי במרכיב אחד של המעגל על שאר המעגל. זה קרוב לודאי נובע מקושי יותר כללי שיש לתלמידים בטיפול בשינוי סימולטני של מספר משתנים.

הקדמה

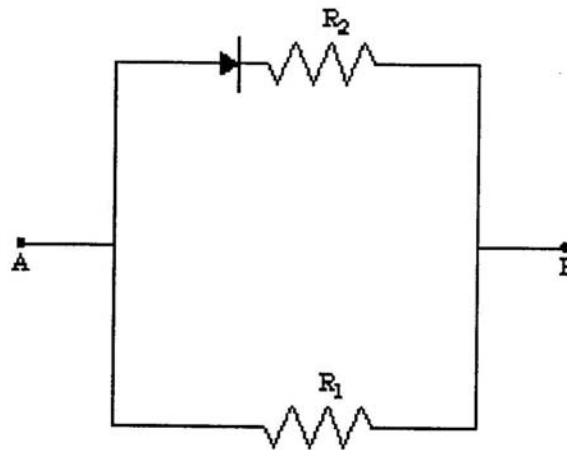
נושא החשמל מוצג לתלמידים מספר פעמים במהלך לימודיהם. תוכניות מדעיות רבות לבתי הספר היסודיים^{1,2} ולחטיבות הביניים^{3,4} מציגות מושגים בחשמל, כבר בשלבים די מוקדמים. נושא זה מספק הזדמנויות לפעילויות קלות יחסית לביצוע, והוא גם מרתק את דמיונם של ילדים צעירים. אולם ניסיוננו בלימוד החשמל מראה, שאפילו לאחר לימוד שיטתי ודי מתקדם של נושא זה בכיתות הגבוהות של בית הספר התיכון, שבמהלכו התלמידים רוכשים מיומנות די טובה בטיפול באלגוריתמים מסובכים, (כגון, שימוש בחוקי קירכהוף), הם אינם מסוגלים עדיין לנתח איכותית מעגלים פשוטים. ממצאים דומים דווחו לאחרונה ע"י ארונס⁵. מחקרים נוספים הצביעו על קשיים שיש לתלמידים עם מושגים, כגון התנגדות⁶, מעגל מקוצר⁷, וכו'. לדוגמא, תלמידים רבים מתייחסים לנגד כ"מכשול" למעבר זרם ולא למשהו ש"מושך" זרם⁸. תיאור זה עובד טוב לחיבור בטור של נגדים, אבל לא לחיבור במקביל. העובדה, שהוספת נגד (במקביל) מקטינה את ההתנגדות הכללית, מתקבלת בהפתעה אצל תלמידים רבים ונשארת בגדר תוצאה מתימטית מלאכותית. מטרתו של המחקר הנוכחי הייתה לתאר כיצד תלמידים תופשים את התפקידים היחסיים של הפרש פוטנציאלים וזרם, וכיצד תפישה זו משפיעה על הדרך בה הם מנתחים מעגלים פשוטים.



הפרש פוטנציאלים וזרם הם מושגי מפתח הכרחיים להבנת מעגלים חשמליים. אנו מאמינים שהפרש פוטנציאלים הוא מושג ראשוני מכיוון שהוא גורם למעבר זרם. אף כי זמן רב מוקדש ללימוד המושג של הפרש פוטנציאלים, אנו טוענים שתלמידים רבים אינם רואים את תפקידו המרכזי ומתייחסים לזרם כנושא הראשוני. הם מתייחסים לסוללה פשוטה כמקור זרם במקום כמקור מתח בעל כח"מ אופייני. בנוסף לכך, הפרש פוטנציאלים נותר כמושג מופשט, אשר התלמידים יכולים להתייחס אליו או ע"י שימוש ב- $V=IR$ (חוק אוהם), או באופן ניסיוני ע"י קריאת הוולטמטר. לכן, הם אינם מבחינים בכך שהפרש פוטנציאלים יכול להתקיים בין שתי מנותקות של מעגל חשמלי. המנגנון המקשר בין הפרש פוטנציאלים וזרם (שיקולי אנרגיה או שדה חשמלי) אינו מובן כראוי והקשר בין השניים הוא בעיקר מתמטי. כל עוד הבעיות המוצגות לתלמידים הן מספריות, הם יכולים להשתמש בחוקי קירכהוף באופן מכני. אולם, כאשר מוצגת בפניהם בעיה איכותית, הדורשת ראייה פיזיקלית במקום מניפולציות מתמטיות, יש להם בעיות רציניות. במסגרת זו, התלמידים נוטים לעיתים לסגל לעצמם נקודת ראייה "מקומית": הם אינם מבחינים ששינוי בחלק אחד של המעגל יגרום לשינויים בכל החלקים האחרים.

במהלך השנים האחרונות ראינו תלמידים רבים ברמות שונות ומצאנו שאי ההבנות והקשיים האלו הם מאוד שכיחים.

כהדגמה, נביא ציטוט בראיון, עם תלמיד תיכון, שנעשה במהלך בחינה מעשית. תלמיד זה למד פיזיקה ברמה גבוהה. במהלך עבודה עם מעגל המתואר בתרשים 1, התלמיד מצא כי חיבור של מקור מתח ישר (בעל התנגדות זניחה) בין הנקודות A ו-B בשני הכיוונים האפשריים (A חיובי, B שלילי, או להיפך) הוביל לקבלת זרמים שונים.



תרשים 1. תיאור סכמטי של המעגל אשר דנו בו בראיון.



מערך הדיון שנערך נתון להלן:

ש. כיצד זה (כלומר המערך של המרכיבים) מסביר את ההבדל בזרמים?
ת. כאשר הדיודה מעבירה, יש להתייחס אל שני הנגדים במקביל. ההתנגדות השקולה נתונה ע"י המשוואה:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

אם מחשבים זאת, מקבלים שההתנגדות R קטנה מ- R_1 .

ש. האם תוכל לשכנע אותי, ללא שיקולים מתמטיים, שהזרם חייב להיות גדול יותר, כאשר הדיודה מוליכה?
ת. לא. זו עובדה מתמטית.

ש. אם כן, כאשר A מחובר להדק השלילי, הזרם עובר רק דרך R_1 . כאשר A מחובר להדק החיובי, הזרם עובר גם ב- R_2 . האם זה יכול להסביר את הזרם הגדול יותר?

ת. לא. כאשר הדיודה מוליכה, הזרם ב- R_2 הוא על חשבון הזרם ב- R_1 , מכיוון שהזרם הכללי אינו משתנה.

ש. איני מבין זאת, התוכל להסביר?

ת. בחיבור במקביל, החוק הוא שהזרם הכללי מתפצל בין הענפים המקבילים ביחס הפוך להתנגדויות שלהם.

ש. נכון. עתה מה בקשר לזרם הכללי?

ת. הוא אינו משתנה.

ש. מה יקרה אם נוסיף ענף שלישי בין A ל- B ?

ת. הזרם בסעיף הנוסף יהיה על חשבון הזרמים בשני הסעיפים האחרים.

ש. שים לב: גודלו של הפרש הפוטנציאלים בין A ו- B אינו תלוי בצורה בה מקור המתח מחובר!

ת. בודאי, זהו המתח של המקור!

ש. לכן, האם זה אפשרי שהזרם בענף התחתון יהיה תלוי בכך, שהענף העליון מחובר או לא מחובר?

ת. כן, מכיוון שחיבור של הענף העליון מקטין את ההתנגדות הכוללת בין A ו- B.

ש. אבל זה אינו משנה את ההתנגדות של הענף התחתון, נכון?

ת. אוי, אני מבולבל ...

יש לציין, שכאשר התלמיד מדד זרם כללי גדול יותר, הוא יכול היה לתת הסבר פורמלי המבוסס על נוסחה מתמטית. בכל זאת, כאשר הוא נתבקש להסביר את ממצאיו, הוא עמד בתוקף כל כך שהזרם הכללי צריך להישאר קבוע, למרות שזה סתר את התצפיות שלו. נדגיש בזאת, כי תלמיד זה לא נחשב על ידי המורה שלו לתלמיד חלש בפיזיקה. בנוסף לכך, ראיון זה אינו מציג דוגמא בודדת. מטבעם, ראיונות כאלה מוגבלים בהיקפם ובמספר התלמידים שניתן לחקור אותם. כדי לבדוק מספר רב של תלמידים במצבים פיזיקליים מגוונים, ולכן להיות מסוגלים לאפיין אי-הבנות נפוצות, תכננו שאלון כתוב. השאלון, הבנוי רובו משאלות איכותיות, הועבר בקבוצות שונות של תלמידי תיכון וגם בקבוצה של מורים. המסיחים נבנו כך שכל אחד מהם (או צרוף של מסיחים בחלק מהבעיות) יצביע על תפישה מסוימת לתלמיד. כל תפישה (נכונה או שגויה) הופיעה יותר מפעם אחת במערכים פיזיקליים שונים.

שיטה

המדגם כלל 145 תלמידים ו-12 מורים. קבוצת התלמידים כללה 6 כיתות י"ב (69 תלמידים בגילאים 18 – 17) שלמדו פיזיקה כמקצוע מוגבר. תלמידים אלו הוכנו לבחינת הבגרות שלהם בפיזיקה וסיימו את לימוד החשמל והמגנטיות. הרמה הנדרשת בכיתות אלה היא בערך הרמה הנדרשת בשנה ראשונה בקולג' בארה"ב, או רמה A באנגליה. בנוסף לכך, היו שתי כיתות (49 תלמידים) שלמדו כבר מעגלי זרם ישר, אבל טרם למדו אלקטרוסטטיקה. אחת מהכיתות האלה הייתה כיתת י"א (גיל ממוצע 17) והכיתה השנייה הייתה כיתת ט' של תלמידים מחוננים (גיל ממוצע 15), אשר נכללו במדגם, בגלל יכולתם המוכרת לתת נימוקים איכותיים. כל הכיתות היו בבתי ספק תיכוניים טובים, בהם מורים מנוסים לימדו פיזיקה. לכן המדגם ייצג רמה גבוהה של אוכלוסייה. שאלון כתוב הועבר לתלמידים במשך שיעור אחד (כ-45 דקות). המורים במדגם היו משתתפי קורס רגיל בהוראת החשמל. מורים אלה לימדו פיזיקה בכיתות גבוהות בבית ספר תיכון והיו בעלי לפחות תואר B.Sc. בפיזיקה. הם ענו על השאלון בתחילת הקורס.

השאלון כלל 10 שאלות רב-בחירתיות ו-4 שאלות פתוחות. רוב השאלות היו איכותיות וכללו הקשר "דינמי": הוצג מעגל מסוים ואז בוצע בו שינוי (כגון חיבור של נגד נוסף). התלמיד (או המורה) התבקש להתייחס לערך החדש של הזרם, המתח וכו', לעומת ערכו הקודם, בצורה השוואתית (גדול יותר, שווה, קטן יותר). רוב השאלות לא כללו ערכים מספריים ולכן ניתן היה להסיק מהתשובות, אם התלמיד הבין את הקשר הפונקציונלי בין המשתנים השונים. כדי לקבל הבנה טובה יותר מדוע תלמיד בחר במסויימים, ובמיוחד מדוע דחה את המסויימים האלטרנטיביים, השלמנו את המבחן הכתוב, בראיון של 14 תלמידים, שנערך לאחר שענו על השאלון. בדיון בתוצאות אנו נצטט מתוך הראיונות האלה, כדי להדגים נקודות מסויימות. ברור שלא נוכל לכלול את כל הציטוטים המלאים, אבל תוכנם יבוא לידי ביטוי בטיעונים שלנו. השאלות הפתוחות שהופיעו בסוף השאלון היו ברובן כמותיות ושימשו לזיהוי שיטות של פתרון שבהן השתמשו התלמידים.

ממצאים ודיון

בטבלה I (בעמוד הבא) נתונות התוצאות הממוצעות של הקבוצות השונות של המדגם עבור השאלות הרב-בחירתיות. באופן כללי, חלק זה היה קשה לכל הקבוצות, כולל המורים. מעניין לציין כי לתלמידים מחוננים היו הישגים גבוהים יחסית, למרות הרקע הנמוך יותר שלהם. זה מראה שיש להם יכולת נימוק איכותית טובה יותר, מאשר לתלמידים הממוצעים, למרות שחסר להם הרקע הדרוש. אולם הפיזור של השגיאות שלהם היה דומה לזה של תלמידים רגילים.

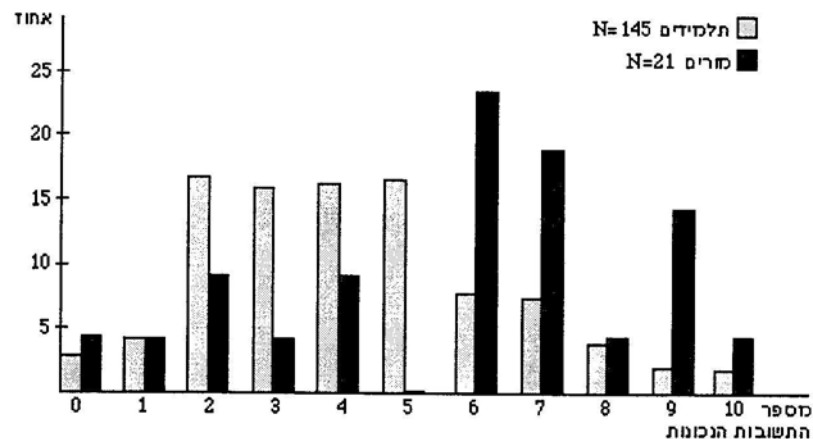


טבלה I: פיזור הניקוד הכולל של השאלות ה-בחירתיות

קבוצה	מספר משתתפים	ניקוד ממוצע %	סטיית תקן
תלמידים (כולם)	145	38.2	20.9
תלמידי י"ב	69	39.4	22.3
תלמידי י"א	22	26.0	17.9
מחוננים	27	43.8	14.5
מורים	21	51.5	25.6

למרות שהתוצאות הממוצעות של המורים היו די נמוכות, הפיזור של התשובות הנכונות המובא בתרשים 2 היה די שונה מזה של התלמידים. בעוד שבין התלמידים רק 25% ענו על 6 או יותר תשובות נכונות, הרי 67% מהמורים עשו זאת. אולם עדיין שליש מהמורים לא ענה על יותר מ-4 שאלות בצורה נכונה.

תרשים 2. פיזור של התשובות הנכונות לשאלות הרב-בחירתיות



אחוז התלמידים שבחר בכל אחד מן המסיחים בשאלות הרב-בחירתיות נתון בשאלון שבהמשך. מידע זה הוא בעל חשיבות מרכזית במחקר הנוכחי, מכיוון שכל תשובה לשאלות הרב-בחירתיות מייצגת תפישה מיוחדת של המעגל החשמלי. כדי להדגים נקודה זו, נתבונן בשאלה 1 (ראה שאלון). כרבע מהתלמידים בחרו (א) (הזרם קבוע במעגל, מקור זרם). רבע נוסף בחר (ב) או (ד) המצביעים על גישה "מקומית". (ההתנגדות בין M ו-N יכולה להשתנות, אבל המתח נשאר אותו מתח). חצי מהתלמידים בחר ג' או ה' – הזרם הכללי גדל, מכיוון שההתנגדות הכוללת קטנה (עד כאן זה בסדר), אבל שליש מתלמידים אלה בחרו (ה), דבר המצביע על שימוש שגוי בקשר $V=IR$. הפרשנויות שהצענו כאן לבחירה של המסיחים השונים קיבלו חיזוק בראיונות שערכנו לחלק מהתלמידים.



לדוגמא, אנו מצטטים כאן מראיון עם תלמיד (ת) אשר בחר (ב) בשאלה 1, אמר:

ת. ... זה נכון.

ש. מדוע?

ת. מכיוון שהפרש הפוטנציאלים על R' שווה לזה שעל R , וכל אחד מהם שווה להפרש הפוטנציאלים ההתחלתי.

ש. מה בקשר לשאר האפשרויות?

ת. הזרם דרך האמפרמטר יכול לגדול, מכיוון ששני נגדים במקביל הם פחות מאחד. לכן (א) שגוי. אולם הפרש

הפוטנציאלים בין M ו- N אינו קטן, ולכן אני לא בוחר ב (ג). הוא אינו גדל, לכן (ה) שגוי. עצה (ד) שגוי בגלל

שהזרם דרך R משתנה.

ש. מדוע זה משתנה?

ת. בגלל שהזרם מתחלק ביחס הפוך בין R ו- R' .

ש. איזה זרם?

ת. הזרם דרך האמפרמטר.

ברור שתלמיד זה מציג את מה שאנו מכנים: הגישה "המקומית", באי-יכולתו להתייחס לשינוי ביותר מפרמטר אחד באותו זמן.

אנו נתייחס לתפישות השונות, כפי שהוזכרו קודם, כפי שהן משתקפות בתשובות התלמידים.

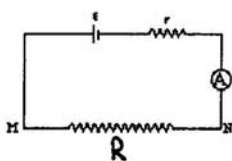
השאלון שהועבר במחקר

בחלק א' מצוין אחוז התלמידים (המורים) שבחרו בכל אחת מהתשובות. התשובות הנכונות נתונות בהערות שוליים 15.

חלק א'

חלק זה כולל 10 שאלות רב-בחירתיות. לאחר כל שאלה נתונות מספר תשובות, אבל רק אחת מהן נכונה. סמן את התשובה הנכונה.

1. במעגל המתואר בתרשים קריאת האמפרמטר היא I . מחברים נגד נוסף R' , במקביל לנגד R , בין הנקודות M ו- N . כתוצאה מכך:



26(5) א. הזרם I אינו משתנה, והזרמים ב- R וב- R' הם ביחס הפוך להתנגדויות.

20(24) ב. הפרש הפוטנציאלים בין M ו- N אינו משתנה.

30(52) ג. הזרם I גדל והפרש הפוטנציאלים בין M ו- N קטן.

7(5) ד. כמות החום המתפתחת ב- R אינה משתנה.

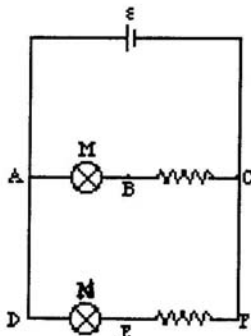
17(14) ה. הזרם I גדל והפרש הפוטנציאלים בין M ו- N גדל.



2. המתח של רשת החשמל הביתית הוא $220V$. מחברים שתי נורות בטור לרשת הביתית. שתי הנורות מיועדות לשימוש במתח הביתי, אחת בת $15W$ והשניה בת $150W$. כתוצאה מכך:

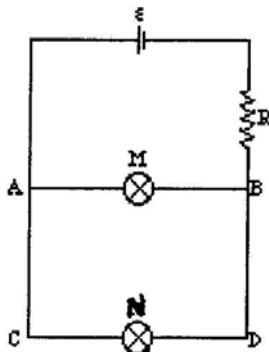
- 0)13 א. הנורה בת $15W$ תישרף.
29)38 ב. הנורה בת $15W$ תאיר במעומעם, והנורה בת $150W$ תאיר בעוצמה גדולה.
25)20 ג. שתי הנורות תארנה במעומעם.
33)42 ד. הנורה בת $15W$ תאיר כמעט באורה הנורמלי, בעוד שהנורה בת $150W$ תאיר בקושי.

3. מקור המתח ε שבתרשים הוא חסר התנגדות פנימית. שתי הנורות M ו-N דולקות. מוציאים את הנורה N מבית הנורה שלה. כתוצאה מכך:



- 25)9 א. הנורה M תאיר בעוצמה גדולה יותר.
45)29 ב. הפרש הפוטנציאלים בין D ו-E יתאפס.
20)48 ג. הפרש הפוטנציאלים בין D ו-E לא ישתנה.
10)4 ד. הפרש הפוטנציאלים בין D ו-E יגדל.

4. מקור המתח ε שבתרשים הוא חסר התנגדות פנימית. שתי הנורות M ו-N דולקות.

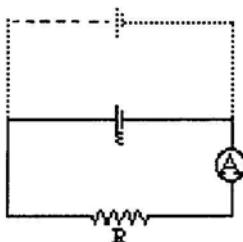


- מוציאים את הנורה N מבית הנורה שלה. כתוצאה מכך:
- 35)2 א. הנורה M תאיר בעוצמה גדולה יותר.
35)10 ב. הפרש הפוטנציאלים בין C ו-D יתאפס.
24)47 ג. הפרש הפוטנציאלים בין C ו-D לא ישתנה.
6)22 ד. הפרש הפוטנציאלים בין C ו-D יקטן.

5. הפרש הפוטנציאלים בין קצות נגד אשר בו עובר זרם נקבע ע"י:

22)10 א. הזרם שעובר דרכו.
6)14 ב. החום המשתחרר בו.
72)76 ג. ההפרש באנרגיה של המטענים העוברים בין קצותיו.

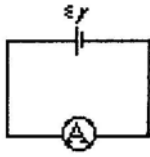
6. האמפרמטר שבתרשים מורה על זרם מסויים. הסוללה חסרת התנגדות פנימית. מחברים במקביל סוללה שניה, זהה לראשונה. כמתואר בתרשים. כתוצאה מכך:



- 25)28 א. הזרם באמפרמטר יגדל.
15)0 ב. הפרש הפוטנציאלים בין קצות הנגד יגדל.
31)43 ג. הזרם העובר דרך הסוללה הראשונה יקטן.
29)29 ד. הזרם העובר דרך הסוללה הראשונה לא ישתנה.



7. לאמפרמטר שבתרשים הנתון אין התנגדות. לסוללה יש כא"מ ε והתנגדות פנימית r .



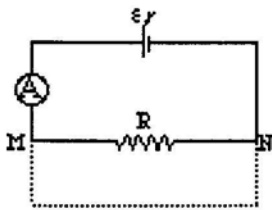
איזה משפט מבין הבאים הוא הנכון?

- 9(5) א. הזרם העובר דרך האמפרמטר הוא אפס.
56(80) ב. הפרש הפוטנציאלים בין קצות האמפרמטר הוא אפס.
11(5) ג. מפל הפוטנציאל בתוך הסוללה הוא אפס.
24(10) ד. האנרגיה המתבזבזת בכל המעגל היא אפס.

8. נגד R מחובר בטור למקור שהתנגדותו הפנימית זניחה. נגד נוסף, הזהה לראשון, מחובר אליו בטור. כתוצאה מכך:

- 18(5) א. הפרש הפוטנציאלים בין הדקי הסוללה יגדל.
9(0) ב. הפרש הפוטנציאלים בין הדקי הסוללה יקטן.
35(24) ג. קצב שחרור החום בשני הנגדים ביחד, כפול מקצב שחרור החום שהיה קודם בנגד הבודד.
38(71) ד. קצב שחרור החום בשני הנגדים ביחד, הוא חצי מקצב שחרור החום שהיה קודם בנגד הבודד.

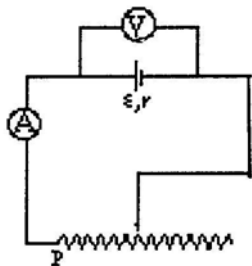
9. נגד R מחובר באמצעות אמפרמטר לסוללה בעלת כא"מ ε והתנגדות פנימית r (כמתואר בתרשים).



עתה מחברים את הנקודות M ו- N באמצעות תייל נחושת קצר ועבה. כתוצאה מכך:

- 9(5) א. הזרם העובר דרך R אינו משתנה בצורה משמעותית.
4(5) ב. הזרם העובר דרך התייל קטן מאד, מכיוון שהפרש הפוטנציאלים בין קצותיו קטן מאד.
32(28) ג. הזרם העובר דרך האמפרמטר אינו משתנה, אבל הזרם במעגל עובר בעיקר דרך תייל הנחושת.
55(62) ד. הזרם העובר דרך האמפרמטר גדל, ורוב הזרם במעגל עובר דרך תייל הנחושת.

10. וולטמטר מחובר להדקי סוללה בעלת כא"מ ε והתנגדות פנימית r , כמתואר בתרשים.



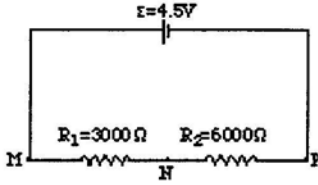
האמפרמטר חסר התנגדות והוא מורה על זרם I . הוולטמטר מורה על מתח V . המגע הנייד של הראוסטט מוזז לעבר הנקודה P . עתה מורה האמפרמטר על זרם I_1 , והוולטמטר מורה על מתח V_1 . איזה קשר מבין הקשרים הבאים הוא קשר נכון?

- 50(28) א. $V_1 > V$ $I_1 > I$
32(48) ב. $V_1 = 0$ $I_1 > I$
18(24) ג. $V_1 = \varepsilon$ $I_1 = 0$

חלק ב'

חלק זה כולל 4 שאלות. פתור כל אחת מהן והסבר את פתרונוך.

11. שני נגדים R_1 ו- R_2 מחוברים בטור לסוללה חסרת התנגדות פנימית ובעלת כ"מ



$\varepsilon = 4.5V$ כמתואר בתרשים.

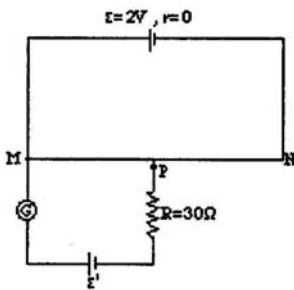
א. מהו הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות M ו-N, ומהו הפרש

הפוטנציאלים בין הנקודות N ו-P?

ב. וולטמטר בעל תחום מדידה של 3V, מחובר בין M ו-N והוא מורה

0.9V. מהו עתה הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות N ו-P? מדוע

ערכים אלה שונים מהערכים שחישבת בסעיף א?



12. בתרשים המתואר, MN הוא תייל אחיד בעל התנגדות 20Ω ובעל אורך של

מטר אחד.

כאשר המגע הנייד P נמצא במרחק 60 ס"מ מ-M, מורה הגלוונומטר על זרם

אפס. מהו הכ"מ ε , ומהו המתח בקצות הנגד R?

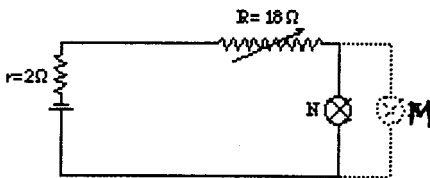
13. בתרשים המתואר נורה N מחוברת דרך ראוסטט R לסוללה בעלת התנגדות

פנימית $r = 2\Omega$. כאשר הראוסטט מכוון ל- 18Ω , הנורה דולקת בעוצמה

רגילה. עתה מחברים במקביל ל-N נורה נוספת M, זהה לנורה N.

מכוונים את הראוסטט, כך ששתי הנורות (M ו-N) יאירו באותה

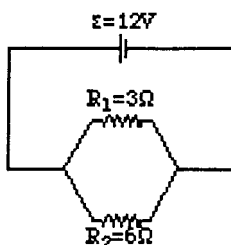
עוצמה שבה האירה קודם N. לאיזו התנגדות יש לכוון את הראוסטט?



14. שני נגדים R_1 ו- R_2 בעלי התנגדויות 3Ω ו-6Ω בהתאמה, מחוברים במקביל

למקור חסר התנגדות בעל כ"מ $\varepsilon = 12V$, כמתואר בתרשים.

מהי עוצמת הזרם דרך כל אחד מהנגדים?





מושגי תלמידים על מעגלים חשמליים

1. "מהו הפרש פוטנציאלים? $V=IR$?"

כ- 70% מהתלמידים בחרו את התשובה הנכונה לשאלה 5, דבר המצביע על כך, שהם יודעים את ההגדרה הפורמלית של הפרש פוטנציאלים. בנוסף לכך, במצב פשוט (שאלה 7), כ- 60% ענו נכון (ב- $V=RI$, $R=0$ מוביל ל- $V=0$). אולם, במצבים קצת פחות ברורים, תלמידים רבים ענו בצורה שגויה, תוך שימוש בלתי נכון ב- $V=IR$. בשאלה 4, 35% מהתלמידים בחרו (ב) ($I=0$ מוביל ל- $V=0$). מעניין שכ- 8% מתלמידים אלה בחרו (ב) גם בשאלה 3, ייתכן שמאותה הסיבה. תפישות שגויות דומות נמצאו על ידי אידר וגניאל⁹ עבור תלמידים צעירים יותר. תלמידים השתמשו בצורה שגויה ב- $V=RI$ גם במצבים "דינמיים", כלומר כאשר מרכיב הוכנס או הוצא מהמעגל. בשאלה 1 עסקנו כבר קודם. באופן דומה, בשאלה 10, חצי מהתלמידים (ו- 28% מהמורים) בחרו (א) (מכיוון שאם $I_1 > I$, זה חייב להיות נכון שגם $V_1 > V$). תלמידים שנימקו בדרך זאת, או שהתעלמו מהשינוי בהתנגדות החיצונית, או שלא הבינו את המושג של התנגדות פנימית. במקרה מיוחד זה, הצורה בה הוצג החיבור של הוולטמטר בתרשים היוותה מקור נוסף לשגיאות, וייתכן והיא מסבירה את הבחירה של (ג) ע"י 18% מהתלמידים. שגיאות הנובעות מהצורה בה מוצגים המעגלים בתרשים תוארו ע"י Beeson¹⁰.

2. "זרם הוא מושג ראשוני; סוללה מספקת זרם קבוע."

כשליש מהתלמידים ענו בהתאם לתפישה שהזרם שהסוללה מספקת אינו משתנה כאשר משנים את המעגל החיצוני. הזכרנו כבר את הבחירה (א) בשאלה 1. חשיבה דומה מסבירה את הבחירה (א) בשאלה 3 על-ידי כרבע מהתלמידים. בשאלה 4 מתואר מצב די דומה למצב המתואר בשאלה 3. כאן שליש מהתלמידים בחר ב- (א) שהיא התשובה הנכונה. אולם, יותר ממחצית התלמידים הגיעו, קרוב לוודאי, לתשובה הנכונה משיקולים מוטעים, מכיוון שהם גם בחרו ב (א) בשאלה 3. כדוגמא לכך נביא קטע מראיון עם תלמיד. תוך כדי דיון בשאלה 3, הוא אמר: " (א) הוא נכון. כאשר מוציאים את N , מה שקורה הוא שכל הזרם, שעבר קודם בענף הראשי, עתה עובר דרך M , ולכן M מאירה בעוצמה גדולה יותר". כאשר עבר תלמיד זה לשאלה 4, הוא בחר (א), תוך חזרה על אותו נימוק. תופעה זו של נימוק זהה (ושגוי) לשאלות 3 ו- 4 חזרה על עצמה אצל תלמידים אחרים. כדי לחזק את נימוקו לבחירה של (א) בשתי השאלות 3 ו- 4, אחד התלמידים המרואיינים אמר: "אני יודע מניסיון, שכאשר שתי נורות מחוברות במקביל לסוללה, הן מאירות בעוצמה קטנה יותר מאשר העוצמה של נורה אחת בלבד המחוברת לאותה סוללה". ברור, כי תלמיד זה פירש בצורה מוטעית את התצפיות הניסיוניות. בשאלה 6 אותה תבנית חשיבה הובילה שוב יותר מחצי מהתלמידים לבחור (א') או (ד'). יתר כל כן, אפילו בין אלה שענו נכון על שאלה 1, (ולכן אינם שבויים בתפישה של "זרם קבוע"), 40% בחרו (א) או (ד) בשאלה 6. אי-עקביות כזאת בניתוח מצבים שונים מצביעה על העובדה שחלק מהתפישות מושרש בצורה חזקה במוחם של התלמידים ואפילו תשובה נכונה למצב אחד אינה הוכחה חותכת להבנה ברורה. תמונה דומה מתקבלת משאלה 9, שעבורה שליש מהתלמידים בחרו ב (ג). בזה כלולים חצי מהתלמידים שענו (א) בשאלה 1 (אותה תפישת "זרם קבוע"), אבל גם 20% מאלה שענו לשאלה 1 נכון – ושוב זה מצביע על חשיבה לא עקבית. אותה תפישה ("זרם קבוע"), הובילה שליש מהתלמידים לבחור (ג) בשאלה 8. 18% נוספים, יתכן וצרפו נקודת השקפה זו עפ התפישה הקודמת (I קבוע ו- $V=RI$) ובחרו (א) כתוצאה.



3. מה זה "הספק" במעגל חשמלי?

רק שליש מהתלמידים ענה נכון על שאלה 2. 29% בחרו (ב), דבר שניתן לפרשו כ"משהו" (הספק?) ש"מצוי", ונורת ה-150 וואט תנצל את רובו, כיוון שהיא "צורכת" פי 10 מאשר נורת ה-15 וואט. 25% בחרו (ג), קרוב לוודאי בגלל התפישה של ההתנגדות כמכשול. התלמידים למדו שכל המכשירים החשמליים הביתיים מחוברים במקביל; ולכן חלק מהתלמידים יסיק שחיבור שתי נורות בטור יגרום להקטנה משמעותית של הזרם בשתי הנורות.

4. המושג של התנגדות פנימית אף הוא מושג בעייתי נוסף.

שליש מהתלמידים בחר (ג) או (ד) בשאלה 7, שזה שקול להתעלמות מקיומה של התנגדות פנימית בכלל. יתר על כן, כמעט חצי מהתלמידים בחר א' בשאלה 10, כפי שכבר הוזכר קודם. במקרה מיוחד זה, התפישה " $V=RI$ ", בצרון עם אי ההבנה, של היכן ההתנגדות הפנימית נמצאת במעגל, מובילה בוודאות לבחירה של (א).

שיטות לפתרון מעגלי זרם ישר

הדגש הבולט על זרם ולא על הפרש פוטנציאלים בא לידי ביטוי בדרך בה התלמידים טיפלו בשאלות השונות. להלן ציטוט בתשובת תלמיד לשאלה 4, המדגים קו טיעון אופייני של תלמידים:

"... כאשר מוציאים את N ההתנגדות של המעגל גדלה (מסביר מדוע). המקור לא השתנה, לכן הזרם במעגל קטן, אבל כולו עובר דרך M ... לכן איני יודע אם עתה יש יותר או פחות זרם דרך M ...".

נימוקים דומים המדגישים זרם ולא הפרש פוטנציאלים הופיעו בצורה ברורה בפתרונות שהתלמידים נתנו לשאלות הפתוחות. לדוגמא, בשאלה 11, רק 16% מהתלמידים (19% מהמורים) פתרו חלק (א) של הבעיה ע"י פרופורציות של הפרשי פוטנציאלים. רוב המורים והתלמידים חישובו תחילה את הזרם ורק אחר כך את הפרשי הפוטנציאלים. העובדה שסכום הפרשי הפוטנציאלים חייב להיות קבוע אינה מושרשת מספיק עמוק. בחלק (ב), אשר ניתן לפותרו בקלות תוך התייחסות למתח המשלים, רק 52% מהתלמידים (62% מהמורים) פתרו בדרך זו. גם בבעיה 14, רק 22% מהתלמידים חישובו את הזרם ישירות על ידי חילוק הפרש הפוטנציאלים בהתנגדות, בעוד שכל השאר חישובו קודם את ההתנגדות השקולה, שבכלל לא היתה נחוצה. בבעיות 12 ו-13, תוארו מצבים קצת יותר מורכבים. כשליש מהתלמידים לא ניסה כלל לפתור שאלות אלו. שתי הבעיות האלה ניתנות לפתרון, כמעט במלואן, על ידי חקירה בלבד, בתנאי שהמושגים של זרם, כא"מ והפרש פוטנציאלים הובנו ויושמו בצורה נכונה. לכן בבעיה 12 זה ברור ש- $\varepsilon^2 = V_{mp}$ כאשר לא עובר זרם דרך הגליונומטר, אבל רק רבע מהתלמידים (40% מהמורים) נימקו בדרך זו. יותר מחצי מהתלמידים השתמשו בשיטות טכניות שונות (חוקי קירכהוף או חישובים מורכבים אחרים), ורובם נכשלו. נטייה זו, לגשת לבעיות בצורה טכנית, נראתה גם בבעיה 13, שבה רק 8% הגיעו לתשובה הנכונה באמצעות חישובים איכותיים. 20% נוספים פתרו את הבעיה בצורה נכונה, לאחר מניפולציות אלגבראיות ארוכות, וכ-40% נכשלו.

סיכום ומסקנות

כפי שצינו כבר בקטע הקודם, תלמידים אינם תמיד עקביים בנימוקיהם, כאשר הם מנתחים מצבים פיזיקליים שונים. ניסינו להמשיך ולבדוק בעיה זו במהלך הראיונות ומצאנו שחשיבה בלתי עקבית מתרחשת אפילו במהלך ניתוח שאלה אחת. לכן, תלמיד יכול במסיח אחד על סמך אי הבנה ספציפית המושרשת אצלו בצורה החזקה ביותר (לדוגמא, בחירת (א) בשאלה 3 – בהתאם לתפישה של "זרם קבוע"). ולאחר מכן, כאשר הוא מתבקש לנתח את האפשרויות האחרות, הוא בוחר במסיח אחר (לדוגמא, הוא יכול לטעון ש 3 (ד) הוא גם נכון על סמך שיקולי הפרש פוטנציאלים), בסתירה ברורה לבחירה ההתחלתית שלו. לכן, לא ניסינו לאפיין צורות חשיבה של תלמידים לקטגוריות ברורות, כפי שהדבר נעשה, לדוגמא, בטפול במכניקה ע"י Viennot¹¹. אולם, ניתן לזהות מספר סיבות פשוטות להרבה שגיאות שונות.

ראשית, התוצאות מצביעות בבירור שהתלמידים שמים דגש על זרם ולא על הפרש פוטנציאלים בבואם לנתח מעגלים חשמליים. ישנם מספר הסברים לתופעה זו. סיבה אחת יכולה להיות העובדה שרוב התלמידים למדו מעגלים חשמליים כבר בגיל צעיר, באיזושהי תוכנית לימודים. המשותף לכל התוכניות האלה הוא הדגש על הזרם, שהוא מושג יותר קונקרטי ואינטואיטיבי מאשר הפרש פוטנציאלים. תוכניות לימוד אלה אינן מדגישות בדרך כלל את חשיבות הפרש הפוטנציאלים כסיבה למעבר זרם.

Evans¹² תיאר לאחרונה גישה מעניינת ללימוד ראשוני של חשמל "עם סוללות ונורות". נקודה ראויה לציון בגישה זו היא הצגת הפרש פוטנציאלים בשלב מאוחר, והגדרתו ע"י $V=RI$. בעוד שגישה זו יכולה להצליח, במסגרת המצומצמת של קורס מבוא כפי ש-Evans תאר, היא יכולה באותו זמן להכיל את הזרעים לאי ההבנות מהסוג שדנו בהן כאן. רשמים ראשוניים הם חזקים ויכולים להפריע מאוחר יותר, בלימוד מדויק של החשמל. לדוגמא, במחקר על ההתפתחות של תפישת מושגים בכימיה, שנעשה ע"י Garforth¹³ ועמיתיו, הם מצאו שההישגים של תלמידים שהתוודעו למושג מסוים בגילאים 15, 16 ו-17 היו גרועים יותר, בצורה משמעותית, מההישגים של קבוצה אחרת של תלמידים שהתוודעה למושג, שעליו נבחנו, בפעם הראשונה רק בגיל 17. סיבה נוספת לדגש על זרם ולא על הפרש פוטנציאלים נעוצה באופייה של תוכנית הלימודים הנלמדת ברמות הגבוהות, שלא תמיד מבהירה בצורה ברורה את הקשר של סיבה ותוצאה בין הפרש פוטנציאלים וזרם. פתרון אחד אפשרי יכול להיות הצגה של מודלים חצי כמותיים ואנלוגיות¹⁴, שתסביר את תפקידו של המקור לא רק כספק אנרגיה, אלא גם כגורם ה"דוחף" את המטענים ב"לחץ" מסוים.

נשאלת השאלה, האם הסדר בו מוצגים המושגים של זרם והפרש פוטנציאלים בתוכנית הלימודים, יכול להסביר את ההעדפה של השימוש במושג הראשון. לדוגמא, בתכניות לימודים כמו Introduction Physical Science³ ותוכנית רחובות הישראלית⁴, מוצג הזרם ראשון, ויתכן והוא נשאר המושג הראשוני בעיני התלמידים. מחקר זה לא נועד לבדוק את ההשפעה של הסדר בו נלמדים המושגים, אבל הוא יכול לספק מספר רמזים.

במדגם שלנו היתה קבוצת תלמידים שלמדה קודם אלקטרוסטטיקה ורק אחר-כך מעגלי זרם ישר, בעוד שהקבוצה השנייה למדה נושאים אלה בסדר ההפוך. לא נמצאו הבדלים בין שתי הקבוצות בציונים הממוצעים ובסוגים של השגיאות. אולם, יתכן כי לכל התלמידים היה רקע קודם בחשמל, שהיתה לו השפעה חזקה יותר מאשר ללימוד המאוחר יותר.

ממצא מרכזי נוסף של מחקר זה קשור למאפיין הבא של המעגל החשמלי: כאשר מבצעים שינוי בחלק מסויים של מעגל חשמלי, יש שינוי "גלובלי" במעגל. כלומר, יתכן ותהיה חלוקה חדשה של הפרשי הפוטנציאלים, שינוי בזרם הכללי, וכו'. יש גם שינוי "מקומי" בחלק שבו התבצע השינוי. לדוגמא, אם מוסיפים נגד במקביל לנגד נתון, הזרם הכללי הנכנס לצומת יתחלק עתה בין השניים, אבל זרם כללי זה אינו בהכרח שווה לזרם שעבר קודם בנגד המקורי. התוצאות מצביעות על כך שתלמידים רבים אינם מסוגלים להתייחס לשינויים "הגלובליים" והמקומיים גם יחד, והם נצמדים לניתוח מקומי. בהקשר פורמלי, ניתן לציין שתופעה זו נובעת מהקושי הכללי של תלמידים לטפל בפונקציות של יותר ממשתנה אחד. דרישה זו נעשית קשה במיוחד כאשר מתבצע שינוי סימולטני של מספר משתנים. קשיים כאלה ניתן לגלות רק במצבים דינמיים כמו אלה שהופיעו במחקר הזה. השימוש בשאלות איכותיות מכריח את התלמיד להתייחס לקשר הפונקציונלי בין המשתנים, והם אינם יכולים להשתמש באופן אוטומטי באלגוריתמים.

למעשה, במהלך הראיונות מצאנו שוב ושוב שהתלמידים רצו להשתמש באלגוריתמים מתמטיים, לרשום נוסחאות ולטפל במצבים המוצגים להם באמצעות חישובים. כדי לפתח את היכולת של התלמיד לנמק איכותית בהקשר זה, יש צורך לדון עם התלמידים בבעיות השונות, במה יכול לקרות כאשר משנים חלקים של מעגל נתון. דבר זה יכול להתבצע בשלבים: ניתן להתחיל בחישובים כמותיים עבור ערכים שונים של הפרמטרים הרלוונטים במעגל נתון, ואחר-כך להציג את התבנית ולבסוף להציע מנגנון שיסביר את תבנית התוצאות שהתקבלה.

הזכרנו קודם את התופעה של חשיבה בלתי עקבית של התלמידים. מצאנו במהלך הראיונות שלנו, שמצבים כאלה יכולים לשמש, באמצעות דו-שיח סוקרטי, להובלת תלמידים לאנליזה נכונה ועקבית. לכן, כאשר תלמיד טוען ששני מסיחים יכולים להיות נכונים, בהסתמכו על אי הבנות מסוימות, אנו מאלצים אותו (או אותה) להתבונן בצורות אלטרנטיביות של ניתוח, שיובילו אותו לבסוף להסבר הנכון. בעוד שטכניקה זו מוצלחת מאד עבור מצבים של אחד (מראיין או מדריך) לאחד (תלמיד), זה לא ברור בכלל, כיצד תחקור ודו-שיח כזה יכולים להצליח בתנאים של כיתה רגילה. זאת שאלה שראויה למחקר, בו יש לבדוק שיטה או שיטות אחרות שנועדו לפתח את ההבנה של הקשרים הפונקציונליים בין המשתנים שמאפיינים מעגלים חשמליים.

לבסוף, הממצאים שלנו בקרב המורים, אשר כולם היו בעלי תואר בפיזיקה, מצביעים על כך שלא מתגברים על הקשיים בתפישת מושגים שהוצגו במחקר זה, אפילו ע"י לימודים מתקדמים בפיזיקה. לכן, נראה שיש צורך להתייחס לקשיים אלה גם בקורסים באוניברסיטה.



ביבליוגרפיה והערות שוליים

1. Elementary Science Study, Batteries and Bulbs, (Webster Division, McGraw-Hill, New York).
2. Science Curriculum Improvement Study, Models: Electric and Magnetic Interactions, (Rand McNally, Skokie, Illinois).
3. Introductory Physical Science, Physical Science II (Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey).
4. המחלקה להוראת המדעים, חשמל ואנרגיה, מכון ויצמן למדע, רחובות.
5. A.B. Aarons, Am J. Phys. 50(1), 13 (1982).
6. A. H. Johnstone and A.R. Mughol, Phys. Ed. 13, 46 (1978).
7. M.H. Fredette and J.J. Clement, J. Coll. Sc. Teach. 10(5), 280 (1981).
8. M. Iona, Phys. Teach. 17(5), 299 (1979).
9. J. Idar and U. Ganiel, in: Proceedings of the NARST conference (Chicago, 1982).
10. G.W. Beeson, J. Res. Sci. Teach. 14, 117 (1977).
11. L. Viennot, Eur. J. Sci. Educ. 1(2), 205 (1979).
12. J. Evans, Phys. Teach. 16(1). 15 (1978).
13. F. Garforth, A.h. Johnstone and J. Lazonby, Educ. Chem. 13, 41 (1976).
14. R.P. Bauman, Pys. Teach. 18(5), 378 (1980).

15. תשובות לשאלות שבשאלון :

$$; \lambda-1 ; \tau-2 ; \tau-3 ; \alpha-4 ; \lambda-5 ; \lambda-6 ; \beta-7 ; \tau-8 ; \tau-9 ; \beta-10 ;$$

$$.11 \quad \alpha : V_{NP} = 3V, \quad V_{MN} = 1.5V \quad \beta : 3.6V$$

$$.12 \quad \varepsilon' = 1.2V, \quad V_R = 0$$

$$.13 \quad 8\Omega$$

$$.14 \quad I_1 = 4A, \quad I_2 = 2A$$