

מתודיקה

החוק השלישי של ניוטון - קשיי תלמידים ודידקטיקה (כולל מערכת ניסויית חדשה)

עדי רוזן, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות, משרד החינוך, ירושלים, ומכללת בית-ברל, כפר-סבא

תקציר: תלמידים רבים מתקשים בהפנמת החוק השלישי של ניוטון. הם אינם "מאמינים" בו, ומתקשים ליישם אותו. במאמר זה נצביע על מספר קשיים אופייניים של תלמידים, ונציע שיטות ואמצעים דידקטיים להוראתו. אחד מבין אמצעים אלה הוא מערכת ניסויית חדשה, שנבנתה במיוחד לצורך העניין.

מילות מפתח: אינטראקציה, החוק השלישי של ניוטון, תפיסות מוטעות.

מבוא

חוקים אינטואיטיביים שאינם תואמים את החוק הפיזיקלי, במצבים שבהם מתרחשת אינטראקציה בין גופים. נציג קשיים שונים בתפיסת החוק השלישי של ניוטון, וביישומו.

החוק השלישי של ניוטון, אחד החוקים הבסיסיים בפיזיקה הקלאסית, נלמד במסגרת לימודי מדע וטכנולוגיה בחטיבת הביניים, ובמסגרת לימודי הפיזיקה בחטיבה העליונה. מתברר כי הקשיים בהבנת החוק משותפים לתלמידים צעירים בחטיבות הביניים ולתלמידים בוגרים בחטיבות העליונות. מאמר זה נועד לשרת את מורי חטיבת הביניים ואת מורי החטיבה העליונה.

ניסוח החוק השלישי של ניוטון

החוק השלישי של ניוטון הוא לכאורה פשוט: אם גוף א מפעיל כוח \vec{F} על גוף ב, אזי גוף ב מפעיל כוח על גוף א, השווה ל- \vec{F} בגודל, ומנוגד לו בכיוון.

החוק השלישי - תפיסות מוטעות וקשיי יישום

על סמך התנסות בהוראה, ועל-סמך מחקרים, מתברר כי למרות "פשטות" החוק השלישי של ניוטון, רבים מיישמים

קושי 1 - תפיסה מוטעית האומרת:

כאשר שני גופים א ו-ב נמצאים באינטראקציה, ואם:

1. מסתו של גוף א גדולה מזו של גוף ב, ו/או
2. מהירותו של גוף א גדולה מזו של גוף ב, ו/או
3. גוף ב ניזוק כתוצאה מן האינטראקציה יותר מגוף א, ו/או
4. גוף א הוא אדם "יוזם" וגוף ב אדם "סביל" או עצם. אזי במהלך האינטראקציה הכוח שגוף א מפעיל על ב גדול מהכוח שגוף ב מפעיל על א.

דוגמאות:

תפיסה מוטעית	אינטראקציה	
המשאית מפעילה כוח גדול יותר על המכונית הקטנה, מאשר להפך. הארץ מפעילה על הירח כוח גדול מזה שהירח מפעיל על הארץ.	<ul style="list-style-type: none"> ◆ משאית ומכונית קטנה מתנגשות חזיתית; ◆ הארץ והירח מושכים זה את זה. 	1.
המכונית הנעה מפעילה כוח גדול יותר על המכונית הנייחת, מאשר הנייחת על הנעה.	<ul style="list-style-type: none"> ◆ מכונית נעה מתנגשת במכונית דומה נייחת; 	2.
האדם שכאב לו יותר "ספג" כוח גדול יותר, מהאדם שסטר לו. המכונית שנהרסה פחות הפעילה כוח גדול יותר על זו שנהרסה יותר.	<ul style="list-style-type: none"> ◆ אדם סוטר לחברו; ◆ שתי מכוניות מתנגשות, אחת נהרסת פחות מהאחרת. 	3.
הכוח שמפעיל ה"יוזם" על ה"סביל" (או על הקיר) גדול מהכוח שמפעיל ה"סביל" (או הקיר) על ה"יוזם".	<ul style="list-style-type: none"> ◆ אדם דוחף את חברו בגבו; ◆ אדם דוחף קיר. 	4.

הקשתי ושאלתי: "ונניח שלקיר יש גלגלים, הוא ניצב על רצפה די חלקה, ונע כתוצאה מן הדחיפה. האם הכוח שקיר היה מפעיל עליך היה בן עשרה ניוטון, קטן מעשרה ניוטון או גדול מעשרה ניוטון?"

תשובת הסטודנט: "כמובן קטן מעשרה ניוטון". תפיסה מוטעית דומה זיהיתי גם אצל מרצה באחת המכללות בארץ (בעל תואר דר.). אני מציין עובדה זו כדי להדגיש עד כמה השורשים של התפיסות האינטואיטיביות בהקשר לחוק השלישי של ניוטון הם עמוקים, אף בקרב מומחים.

קושי 3 - הסברים שגויים של הנעה רקטית. הסבר נפוץ: הנעה רקטית מבוססת על כך שגז הנהדף מן הרקטה דוחף את האוויר שבו נעה הרקטה, וכתגובה האוויר שבו נעה הרקטה מפעיל כוח על הרקטה, ומאפשר את תנועתה.

דוגמה:

הסבר לקוי	גוף מונע
הבלון נע כיוון שהאוויר הנפלט שוחררה. ממנו דוחף את האוויר שבחדר, והאוויר שבחדר דוחף את הבלון.	בלון מנופח שפייתו שוחררה.

לפני שנעמוד על סיבה אפשרית לקושי 3, נדון מעט בהנעת גופים: החוק השני של ניוטון שולל את האפשרות שגוף יניע את עצמו, כלומר יביא את עצמו ממנוחה לתנועה, ולאחר מכן יקזז כוחות המתנגדים לתנועה, כגון חיכוך, וכך תימשך התנועה. כדי שגוף יונע חייב לפעול עליו **כוח חיצוני**, כלומר כוח שיפעיל עליו **גוף אחר**.

הנעה מתקיימת בהתאם לחוק השלישי של ניוטון: כיוון שגוף אינו יכול להזיז את עצמו על-ידי הפעלת כוחות על עצמו (בדומה לברון מינכהאוזן שמשך את עצמו בשערותיו וכך חילץ את עצמו ואת סוסו מהבוץ), **הגוף דוחף לאחור גוף שני**. הגוף השני דוחף את הגוף הראשון, וכוח זה מאפשר את תנועתו של הגוף הראשון.

(ובחיוך: יש המשתמשים ברעיון זה גם בחיי היום-יום: הדרך להתקדם בחיים, הם גורסים, היא לדרוך על אחרים.) בדרך כלל "הגוף השני" הוא איזשהו גוף **חיצוני**, שאינו חלק מהגוף המונע: כך למשל אנשים, בעלי חיים ומכונות נעים על-ידי כך שהם דוחפים את הקרקע לאחור, והקרקע דוחפת אותם "קדימה". בדוגמאות אלה "הגוף השני" הוא הקרקע.

סיבה אפשרית לקושי 1: ניתן לראות בעליל את הגופים הנמצאים באינטראקציה את גודלם, מהירותם, ואת תוצאות הפעולה של הכוחות. **אם יש חוסר סימטריה בתכונות הגופים**

- הוא בולט לעין. לעומת זאת את הכוחות אין רואים. יש נטייה "טבעית" להשליך את חוסר הסימטריה הנראית בין גופים, על הכוחות שאותם **אין רואים**, ולקבוע שגם הכוחות אינם סימטריים.

סיבה אפשרית נוספת לקושי 1 היא לשונית: המונחים שבהם רבים משתמשים בהקשר לחוק השלישי של ניוטון - "פעולה" ו"תגובה", מצביעים לכאורה על חוסר סימטריה בין הכוחות. בחיי היום-יום תגובה עוקבת בזמן לפעולה; אולם כוחות ה"פעולה" וה"תגובה" פועלים **בו-זמנית**. אין כוח ראשון וכוח שני. השימוש במונחים "פעולה" ו"תגובה" עלול, אם כן, להתפרש כשוני במעמד של שני הכוחות.

קושי 2 - תפיסה מוטעית האומרת: באינטראקציה בין שני גופים נייחים, שבסיומה אחד הגופים נשאר במנוחה והגוף האחר נע (תרשים 1) - הכוח שהגוף הנייח מפעיל על הגוף הנע גדול מהכוח שהנע מפעיל על הנייח.



תרשים 1

את הניתוח הבא שמעתי מאחד הסטודנטים שלי לתעודת הוראה (בעל תואר ראשון בהנדסת מכונות ותואר שני במינהל עסקים): "החוק השלישי של ניוטון נכון רק לגופים סטטיים. אם אחד הגופים מתחיל לנוע כתוצאה מהאינטראקציה, אז החוק כבר אינו נכון. נניח למשל שאני דוחף עגלה בכוח בן עשרה ניוטון, אז שלושה ניוטון למשל, הולכים כדי להקנות תאוצה לעגלה, ושבעה ניוטון הולכים כדי להתגבר על החיכוך. לכן הכוח שהעגלה תפעיל עלי יהיה רק בן שבעה ניוטון". שאלתי את הסטודנט: "נניח כי הינך דוחף קיר בכוח בן עשרה ניוטון. מה גודלו של הכוח שהקיר יפעיל עליך?" תשובת הסטודנט: "עשרה ניוטון".

דוגמה:

תפיסה מוטעית	גוף והכוחות הפועלים עליו
כוח הכובד והכוח הנורמלי הם כוחות ה"פעולה" וה"תגובה".	ספר מונח על שולחן; הכוחות הפועלים עליו הם כוח הכובד והכוח הנורמלי.

סיבה אפשרית לקושי 4: העדר הבנה של המושג **אינטראקציה** בין שני גופים, שעל-פיה **כל אחד משני הגופים מפעיל כוח על הגוף האחר**, וכי החוק השלישי של ניוטון מתייחס לשני כוחות **אלה**. התודעה ממוקדת רק בעובדה שמדובר בכוחות שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.

קושי 5 - קושי בבחירת המערכת הנכונה, שביטוי: חוסר יכולת להסביר מדוע גוף מצליח להזיז גוף אחר, למרות ששני הגופים מפעילים זה על זה כוחות שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.

דוגמא:

מציבים	הקושי
סוס מושך עגלה.	להסביר מדוע הסוס מצליח למשוך את העגלה למרות שהכוח שבו הסוס מושך את העגלה שווה בגודלו לכוח שבו העגלה מושכת את הסוס, ומנוגד לו בכיוונו.
שתי קבוצות מתחרות ב"משיכת חבלי".	להסביר מדוע אחת הקבוצות יכולה לנצח.
שני ילדים מתחרים ב"הורדת ידיים".	להסביר מדוע אחד הילדים יכול לנצח.

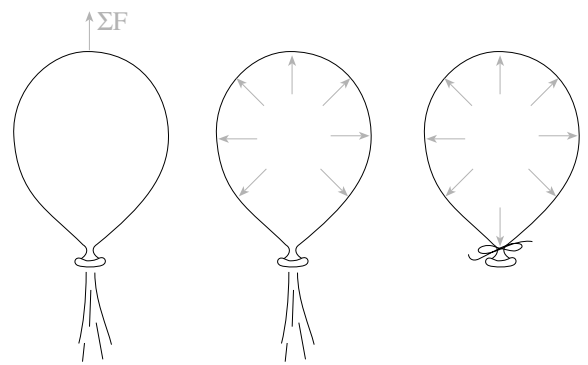
סיבה אפשרית לקושי זה: היעדר מודעות או יכולת לעבור מהתבוננות במערכת בת שני גופים הנמצאים באינטראקציה, למערכת של אחד משני הגופים, ולניתוח **כל** הכוחות **החיצוניים** הפועלים **עליו**.

דיקטיקה של הוראת החוק השלישי של ניוטון
אנו מציעים להורות את החוק השלישי של ניוטון בשני צעדים:

סירות ושחיינים מתקדמים על-ידי כך שהם דוחפים מים לאחור, והמים דוחפים אותם קדימה. "הגוף השני" הוא המים. ציפורים, מסוקים ומטוסים בעלי מדחפים, דוחפים אוויר לאחור, וכתגובה האוויר דוחף אותם "קדימה". כאן "הגוף השני" הוא האוויר.

כלומר, **אינטואיציה הניבנית על הכרת תנועות מחיי יום-יום, קושרת הנעה עם דחיפת גוף חיצוני, שהוא אינו חלק מהגוף המונע**. יתכן שזו תשובה לשאלה מדוע אנשים מפרשים בשגגה גם את התקדמות הרקטה על-ידי דחיפה של גוף חיצוני שאינו קשור לרקטה - האוויר שבו מתקדמת הרקטה.

הסבר שגוי אחר לתנועה רקטית המודגמת על ידי בלון מנופח שהאוויר נפלט ממנו, מעניין לא פחות, שמעתי ממורה מנוסה: "כאשר הפייה של בלון סגורה - האוויר שבתוך הבלון מפעיל על משטחו הפנימי כוחות הפועלים לכל הכיוונים (תרשים 2א) והשקול שלהם שווה לאפס. אולם, כאשר פותחים את הפייה, משטח הבלון באיזור הפייה "נעלם", לכן לכיוון זה האוויר אינו מפעיל כוח על הבלון (תרשים 2ב), לכן כיוון הכוח השקול שמפעיל האוויר שבתוך הבלון על המשטח הפנימי של הבלון מנוגד לכיוון זרימת האוויר דרך הפייה (תרשים 2ג). כוח שקול זה מניע את הבלון".



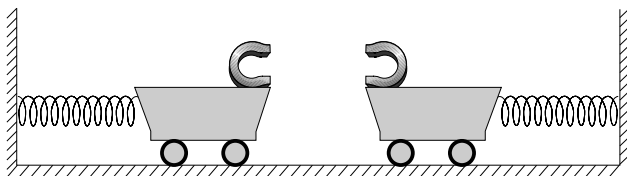
א. פייה סגורה. ב. פייה פתוחה. ג. הכוח השקול. תרשים 2

קושי 4 - אי הבנה של המושג "אינטראקציה" המתבטאת בקביעה שגויה:
שני כוחות הפועלים על **אותו גוף**, ואשר נמצאים על אותו קו פעולה, מנוגדים בכיוונם ושווים בגודלם, הם כוחות "פעולה" ו"תגובה".

ידי מדידת כוח העילוי הפועל על גוף הטבול במים, ומדידת הכוח שהגוף מפעיל על המים כלפי מטה⁽²⁾. יתרונו של ניסוי זה הוא בכך שמתקבלים ערכים קרובים מאוד זה לזה. הניסיון מראה כי ניסוי זה מתאים גם לתלמידי חטיבות הביניים.

ניסוי מתאים אחר הוא אינטראקציה בין שני מגנטים: מודדים באמצעות דינמומטרים את כוחות ה**דחייה** בין שני מגנטים המותקנים על קרוניות או על גלשנים (Gliders) שעל מסילת אוויר⁽²⁾.

הערה: במספר ספרי לימוד מוצע ניסוי שבו שני מגנטים המוצבים על שתי קרוניות נמשכים זה לזה. הקרוניות מוחזקות באמצעות שני קפיצים זהים, כמתואר בתרשים 3. כך ניתן, לכאורה, להוכיח כי הקפיצים מתארכים באותה מידה, ולהסיק ששני המגנטים נמשכים זה לזה בכוחות שווים גדול.



תרשים 3: ניסוי זה אינו עובד, כי שיווי המשקל של כל קרונית הוא **רופף**.

הניסוי נראה במבט ראשון מבטיח, אולם, לרוע המזל, הוא אינו "עובד"; הנקודה שבה מגנט נמשך לכיוון אחד על-ידי המגנט האחר, ולכיוון מנוגד על-ידי קפיץ היא נקודת שיווי משקל **רופף**, והיא בלתי מושגת באופן מעשי. כנראה שאיש מבין מחברי ספרים אלה לא ניסה לבצע את הניסוי בעצמו. בנוסף לניסויים סטטיים בהם נבחנים הגדלים של כוחות האינטראקציה, חשוב לבחון את הכוחות גם **בניסויים דינמיים**, כמתואר בסעיף הבא.

ניסוי חדש:

מדידת כוחות האינטראקציה בין שתי קרוניות נעות ומתנגשות

כאשר מדובר באינטראקציה בין **גופים נעים**, הקושי הוא כפול: ראשית, כפי שצינו לעיל, קשה יותר ל"האמין" בחוק השלישי של ניוטון **במצב הדינמי** (למשל בהתנגשות חזיתית בין משאית לבין מכונית קטנה, או כאשר אדם דוחף קרונית וגורם לתנועתה). שנית, משום שאין כמעט ניסויים להדגמת החוק השלישי במצבים דינמיים. לכן בנינו מערכת ניסויית שנועדה לטפל במצבים כאלה.

צעד ראשון: בניית המושג אינטראקציה⁽¹⁾. צעד זה נועד להקנות **הבנה איכותית של המושג "אינטראקציה"**, כלומר לאפשר לתלמיד להבין כי כאשר גוף א מפעיל כוח על גוף ב, אזי גם גוף ב מפעיל כוח על גוף א.

הבנה כזו ניתן לרכוש על-ידי בחינת אינטראקציות פשוטות, המוכרות לתלמיד מחיי היום-יום, ורצוי כאלה שהוא חווה על גופו; יש לזהות את הגופים המשתתפים באינטראקציה, את הכוחות, על איזה גוף פועל כל כוח, ואיזה גוף מפעיל כל כוח.

דוגמאות לאינטראקציות פשוטות:

- א. נער העומד על גלגילות דוחף קיר.
- ב. נער העומד על גלגילות זורק כדור בכיוון אופקי.
- ג. שני אנשים יושבים על קרוניות - כל אחד על קרונית אחרת, ואחד האנשים דוחף את חברו בגבו. (חברת Pasco מציעה למכירה קרוניות מתאימות לכך).
- ד. נער קופץ מסירה למזח.

את אינטראקציות א-ג המתוארות לעיל מומלץ להדגים בכיתה.

ניתוח איכותי מסוג זה עשוי להפחית את מספר הלומדים שלהם קושי 4.

מוצע לערוך גם דיון איכותי בדרכי התנועה של האדם, בעלי חיים וכלי תחבורה: הליכה של אדם, נסיעת מכונית, שחייה של אדם ושל דגים, טיסת מטוס בעל מדחפים, תנועת מסוק, מעוף ציפור, תנועת חללית בחלל, וכיו"ב.

אנו מציעים כי המונח "אינטראקציה" לא יצויין בתחילת ההוראה, אלא רק לקראת סוף הדיון האיכותי המתואר לעיל, בשלב שבו המושג 'מתבקש מעצמו'.

אנו גם ממליצים שלא להשתמש במונחים המקובלים "פעולה" - "Action" ו"תגובה" - "Reaction" (למרות שניוטון עצמו טבע אותם), אלא לדבר על "**כוחות האינטראקציה**". מורה יוכל להתבטא למשל כך: "אדם דוחף קיר בכוח מסוים. מהו הכוח האחר של האינטראקציה בין האדם לבין הקיר?", במקום לשאול: "אדם דוחף קיר בכוח מסוים. מה התגובה לכוח זה?".

לאחר בניית המושג "כוחות אינטראקציה" מוצע לבחון את כיווני הכוחות שפעלו בדוגמאות שנדונו, ולהיווכח כי הכוחות **מנוגדים בכיוונם**.

צעד שני: ביצוע ניסויים המצביעים על כך **שהכוחות המשתתפים באינטראקציה שווים בגודלם**.

ניתן להראות את השוויון בין גדלי כוחות אינטראקציה על-

בנינו שני מתקנים, שבחזיתו של כל אחד מהם מותקן דינמומטר שניבנה במיוחד למטרה זו (ראה תרשים 4).

לדינמומטרים שתי תכונות מיוחדות:

א. כל אחד משני הדינמומטרים מכווץ קפיץ (ולא מותח אותו).

ב. לאחר שהקפיץ מגיע לכיווץ מרבי, הוא נשאר מכווץ (הדבר נעשה באמצעות שיני מסורית. לאחר הניסוי, אפשר לשחרר את הקפיץ באופן יזום).

את כל אחד משני המתקנים ניתן להרכיב על קרונית. כאשר דוחפים את שתי הקרוניות זו לקראת זו, והן מתנגשות, הקפיצים מתכווצים, וניתן להשוות את קריאותיהם. בנינו את הדינמומטרים כך שהקפיצים יהיו זהים (באורך הקפיץ ובקבוע הקפיץ). לכן די להשוות את האורכים הסופיים של הקפיצים כדי לבחון האם פעלו עליהם כוחות שווים או כוחות שונים. לאחד משני המתקנים ניתן להוסיף משקולת, כך ששני המתקנים יהיו **שוני מסה**.

א. לפני ההתנגשות.

ב. אחרי ההתנגשות.

תרשים 5: התנגשות בין קרוניות **שוות מסה**, הנעות זו לקראת זו במהירויות **שוות גודל**.

בתרשים 6 מתוארת התנגשות בין הקרוניות, כאשר מסת הקרונית השמאלית **גדולה יותר**, והן נדחפו זו לקראת זו במהירויות **שוות גודל**.

כל 30 הילדים שהוזכרו לעיל, שיערו כי הקפיץ הקשור לקרונית הימנית (בעלת המסה הקטנה יותר), יתכווץ יותר מזה הקשור לקרונית השמאלית.

מבין 28 תלמידי כיתה י"א **שלמדו פיזיקה ברמה של 5 יחידות לימוד**, ענו **רק ארבעה** תלמידים כי שני הקפיצים יתכווצו באותה מידה. הפעם, רוב התלמידים השליכו כנראה את חוסר הסימטריה בין הקרוניות על הכוחות. ניתן להדגים בעזרת מערכת זו גם התנגשות בין שתי קרוניות שוות מסה אך שונות בגודל המהירות.

תרשים 4: מתקנים להדגמת החוק השלישי של ניוטון בתהליך דינמי.

בתרשים 5 מתוארת התנגשות בין קרוניות **שוות מסה** אשר נדחפו זו לקראת זו במהירויות **שוות גודל**.

ניתן לראות בתרשים 5 כי הקפיצים התכווצו באותה מידה. אין זה מפתיע; מבין 30 ילדים שלא למדו פיזיקה (גילאי 12), שיערו כולם (לפני שראו את ההתנגשות) את התוצאה הנכונה. הילדים השליכו כנראה מהסימטריה של הקרוניות על הכוחות.

סיכום

הניסוח של החוק השלישי של ניוטון הוא פשוט. לכן מורים רבים ומרצים מקדישים רק דקות אחדות להוראת החוק. אולם, בגלל תפיסות אינטואיטיביות שאינן תואמות את התפיסה המדעית, יש לרבים, החל מתלמידים שטרם למדו פיזיקה וכלה במומחים, תפיסות מוטעות הקשורות בחוק, וקשיי יישום שלו. התפיסות האינטואיטיביות אינן מעידות על "טיפשות" של התלמידים, אלא הן תולדה של תפיסת המציאות הסובבת אותנו, אשר ניבנית אצל כל ילד בריא ברוחו ובנפשו במשך שנים רבות.

חשוב שמורים ומרצים יהיו מודעים לקשיים שיש ללומדים, ויקצו את הזמן הדרוש לבניית החוק באמצעים דידקטיים מגוונים. יחד עם זאת, יש לזכור כי המרת התפיסה האינטואיטיבית בתפיסה מדעית הוא **תהליך איטי**, שבו התפיסה המדעית הולכת ו"מתגברת" **בהדרגה** על התפיסה האינטואיטיבית, ככל שמרבים לעסוק בפיזיקה.

א. לפני ההתנגשות.

תודות

אני מודה לעודד ירון ולבית המלאכה של מכון ויצמן שבנו את מערכת הניסוי.

מראי מקום

- (1) בן-צוק, מ., אינטראקציה וכוחות - פרק א., המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות (1998).
- (2) רוזן ע. וקרקובר ז. מכניקה ניוטונית - כרך א, עמ' 127, 128, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות (1997).

ב. אחרי ההתנגשות.

תרשים 6: התנגשות בין קרוניות **שוות מסה**, הנעות זו לקראת זו **במהירויות שוות גודל**.

הדגמות כאלה (יחד עם אמצעים דידקטיים נוספים, כמתואר לעיל) עשויות לדעתנו להקטין את מספר התלמידים שיש להם קשיים בהבנת וביישום החוק השלישי של ניוטון.