



מן הנעשה
זכתה

שימוש במאמר פופולארי של אלברט איינשטיין על השקילות בין מסה ואנרגיה כמסגרת מארגנת לדיון באנרגיה

שולמית קפון, הפקולטה לחינוך, אוניברסיטת חיפה
עירית אהרון, ביה"ס הריאלי העברי, חיפה

מבוא

לימודי הפיסיקה בכיתה ט' מוקדשים בעיקר לאנרגיה. אנרגיה היא מושג מרכזי במדעי הטבע והיא מהווה סוגיה חשובה במהלכים גיאופוליטיים וחברתיים רבים. לדעתנו, תוכנית הלימודים בחטיבת הביניים אינה מציעה למורים כלים מתאימים לארגון הנשא ולהוראתו בצורה לכידה ושלמה, היכולה לעזור לתלמיד לבנות תמונת עולם במקום רשימת עובדות וחוקים. יתר על כן, עיקרון שימור האנרגיה המהווה יסוד מארגן בחשיבה המדעית מקבל בתוכנית התייחסות שולית. בחיבור זה אנו מציגות הצעה למהלך לימודי בן כ 11-13 שעות הוראה, בו חלק מהפעילויות והתכנים שממילא אמורים להילמד בחטה"ב נלמדים על רקע דיון במאמר פופולארי שנכתב ע"י אלברט איינשטיין [1]. בכוננתנו להדגים כיצד ניתן ללמד את נושא האנרגיה בחטה"ב באופן אינטגרלי, כלומר, כיצד ניתן לשלב התנסויות בהקשר של תכנים ספציפיים יחד עם תפיסת עולם מדעית ולקשור את אלה להיסטוריה של המדע ולנושאים אקטואליים במדע ובטכנולוגיה המשפיעים על חיינו.

בחיבור זה אנו מתארות בפרוטרוט את המהלך הלימודי שעיצבנו ומספרות בקצרה על חוויות מהכיתה. לדעתנו המאמר הפופולארי של איינשטיין שמהווה את הבסיס למהלך הלימודי המתואר להלן יכול גם להעשיר את הוראת אנרגיית הקשר הגרעינית בכיתה יב' (הרחבה בת שתיים). לפיכך אנו מציעות גם וריאציה על החלק האחרון של הפעילות שעיצבנו לצורך התאמתה לכיתה יב'.

תרגום לעברית של המאמר של איינשטיין מופיע במדור ההעשרה בגיליון זה. [חוברת הפעילויות](#) לתלמיד [המצגת](#) המלווה את שתי הפעילויות האחרונות. מופיעות כנספחים מקוונים.

רציונאל - מדוע בחרנו במאמר של איינשטיין?

לאורך כל הקריירה המדעית פורצת הדרך שלו אלברט איינשטיין מצא פנאי להסביר לקהל הרחב רעיונות מרכזיים במדע (ראו למשל [2-3]). ב 1946, שנה לאחר הפצצתן של הירושימה ונגסקי, איינשטיין פרסם מאמר שמתרתו: $E=MC^2$ - הבעיה הבערת בדורנו [1]. במאמר זה הוא מסביר לקהל הרחב את השקילות בין מסה ואנרגיה ומתייחס להשלכות של עקרון זה על חיינו.

איינשטיין אינו מנסה להסביר בחיבורו כיצד הוא הגיע לביטוי המתאר את האנרגיה הכמוסה במסה, שכן הסבר זה מסתמך על ידע מדעי ומתמטי נרחב שאין לקהל הרחב, כמו גם לתלמידים בחטיבת הביניים ובתיכון. הוא מנסח הסבר אלטרנטיבי שבא להצדיק את רעיון זה באופן איכותי. במקום לפתח את עיקרון השקילות בין מסה ואנרגיה באופן דדוקטיבי מהנחות מדעיות

מקובלות בדומה לדרך בה הוא הציג אותו במאמרים שכתב לקהילה המדעית (ראו למשל [4]), הוא מציע במאמר טיעון היסטורי על התפתחות עקרון שימור האנרגיה המתבסס על אופי החקירה המדעית [5]. הוא מספר לקוראיו שמהנחות היסוד של תורת היחסות הפרטית נובעת ההשערה שמסה אינה גודל נשמר בטבע. בדומה לקריאת התגר של השערה זו על חוק שימור המסה, הוא מספר כיצד לאורך ההיסטוריה של המדע עלו לא פעם קריאות המערערות על עקרונות שנתפסו בשלב כלשהו כחוקי טבע. לכל שלושת "חוקי השימור" עליהם הוא מדבר (שימור אנרגיה מכאנית, שימור חום ושימור מסה) איינשטיין מציג ראיות שבשלבן מדענים לאורך ההיסטוריה חשדו שמדובר בחוק טבע וראיות שבשלבן מדענים הבינו בסופו של דבר שלא כך הוא. הוא מסביר שהפרדוקס בכל אחד משלושת המקרים (שימור אנרגיה מכנית, שימור חום ושימור מסה) נפתר באופן תיאורטי ע"י הרחבת תחום הכיסוי של עקרון שימור האנרגיה. כלומר, האנרגיה המכאנית, החום והמסה אינם גדלים הנשמרים בזכות עצמם אלא צורות של אנרגיה שיכולות להיות מומרות לצורות אחרות של אנרגיה כל עוד האנרגיה הכוללת נשמרת. הוא מוסיף ומספר שתהליך הביקוע הגרעיני סיפק את הראיה האמפירית הראשונה לכך שמסה אינה גודל נשמר ושאינן האנרגיה הכמוסה במסה יכולה להיות מומרת לצורות אחרות של אנרגיה. הוא מסביר לקוראים עד כמה גדולה באופן יחסי האנרגיה המשתחררת בתהליך ביקוע כזה ומזהיר מפני ההשלכות הגלומות בניצולה.

בכיתה ט', 60 שעות מתוך 150 השעות המוקדשות באופן רשמי ללימודי המדע מוקדשות לפיסיקה, לנושא "אנרגיה ומערכות טכנולוגיות" [6]. כשני שליש משעות אלה, על פי התוכנית, מוקדשות ללימוד של (א) צורות מוגנות של אנרגיה - אנרגיה מכאנית, אנרגיה תרמית (כולל דיון במעבר חום וחום סגולי), אנרגיה כימית ואנרגיה גרעינית, (ב) המרות אנרגיה מצורה אחת לאחרת - כולל חישובים פשוטים של המרות אנרגיה בין אנרגיית גובה (לשון התוכנית) לאנרגיית תנועה, (ג) חוק שימור האנרגיה - כולל המושגים מערכת סגורה ופתוחה. הדגשים המוצהרים בתוכנית [7] אינם רק דגשים בתחום התוכן והמיומנויות (טיעון, איסוף ועיבוד נתונים וכד') - התלמיד מצופה גם להבין את קשרי הגומלין שבין מדע, טכנולוגיה וחברה.

מצאנו כי המאמר הפופולארי של איינשטיין מתאים לשילוב בהוראת נושא האנרגיה בחטיבת הביניים מכמה סיבות:

- **תוכן מדעי** - למעט העיסוק המפורש בשקילות בין המסה והאנרגיה, הנושאים בהם עוסק המאמר נמצאים בהלימה מלאה לנושאים אותם מכתובה תוכנית הלימודים.
- **מהו מדע ומהי עשייה מדעית** - המאמר מציע כר לדיון עם תלמידים על משמעות המדידה במדע, על התפקיד של תיאוריה מדעית ועל הדרכים בהן היא מתפתחת.
- **מיומנויות** - המאמר מזמן עיסוק בדרכי הטיעון המדעי ומספק הקשר אוטנטי לביצוע פעילויות רלוונטיות במעבדה.
- **ארגון ידע** - המאמר מציע מסגרת שמעגנת את אוסף הפרטים הנלמדים על אנרגיה בחטיבת הביניים לכדי תמונת עולם שמדגישה רעיונות מרכזיים - חשיבות חוקי שימור בכלל וחוק שימור האנרגיה בפרט.
- **רלוונטיות** - המאמר יוצר קשר מפורש ולא מלאכותי בין נושאי הלימוד הנלמדים בביה"ס לבין נושאים עדכניים במדע המשפיעים על חיינו.
- **הזדמנות לקרוא מאמר מקורי של אלברט איינשטיין בביה"ס** - המאמר של איינשטיין מחייב תיווך של מורה, אבל עם תיווך כזה הוא יכול להיות מובן ע"י תלמידים בכיתה ט'.

המהלך הלימודי המוצע

המהלך הלימודי שעיצבנו מורכב משש פעילויות הנמשכות יחד כ- 11-13 שעות לימוד. השיעורים תוכננו כשיעורים כפולים (90 דקות) אולם ניתן בהחלט לפצל את הפעילות לשיעורים בודדים. כל פעילות נבנתה במטרה להעמיק בנושא ספציפי בתוכנית הלימודים בזיקה לקטע בו הוא נידון בחיבורו של איינשטיין. רצף הפעילויות תואם את רצף הרעיונות המוצגים בטקסט הפופולארי (ראו טבלה מס' 1). [חוברת הפעילות והמצגת](#) המלווה אותה מצורפות כנספחים מקוונים למאמר זה.

שיעור כפול (90 דקות)	נושא	פסקות לקריאה במאמר	התנסות	מושגים	דפי עבודה
שיעור 1	שימור אנרגיה, אנרגיה מכאנית	1, 2-3	חקירת שימור אנרגיה מכאנית במטוטלת אידיאלית באמצעות סימולציית PhET	שימור, שקילות, אנרגיה מכנית, אנרגיה פוטנציאלית כובדית, אנרגיה קינטית	פעילות 1
שיעור 2	מעבר חום בין גופים הבאים במגע	4	ניסוי במעבדה - מדידה של מעבר חום בין גופים הבאים במגע	שימור, אנרגיה תרמית, מערכת סגורה, מערכת פתוחה, שיווי משקל תרמי	פעילות 2
שיעור 3	עקרון שימור האנרגיה, השקילות בין עבודה וחום	4, 5	חקירת מאזן האנרגיה בתנועה של מטוטלת עם חיכוך באמצעות סימולציית PhET צפייה מודרכת בסרטון על ניסוי ג'אול	עבודה, שימור אנרגיה, המרות (גלגולי) אנרגיה	פעילות 3
שיעור 4	עקרון שימור המסה	6, 7	ניסוי במעבדה - מדידת מסה בתהליכי שינוי פיסיקליים וכימיים יום יומיים	שינוי פסיקאלי, שינוי כימי, מערכת סגורה, מערכת פתוחה	פעילות 4
שיעור 5	האנרגיה הכמוסה במסה, ביקוע גרעיני	7-8, 9-10, 11-12	פעילות טיעון: שחזור הטיעון המוצג במאמר (דף עבודה מלווה מצגת)	ראיה תומכת, ראיה מפריכה, תיאוריה מדעית, השערה תיאורטית, ביקוע גרעיני	פעילות 5 מצגת (שקפים 1-8)
שיעור 6	אנרגיה גרעינית, השלכות חברתיות	13	פעילות על אנרגיה גרעינית (דף עבודה מלווה מצגת)	ביקוע גרעיני, קשר כימי	פעילות 6 מצגת (שקפים 9-14)

טבלה מס' 1: מבנה המהלך הלימודי

ארבע הפעילויות הראשונות נמשכות כ- 8 שעות לימוד ועוסקות בחוקי השימור ה"מצומצמים" (שימור האנרגיה המכאנית, שימור החום ושימור המסה) ובשקילות שבין חום ועבודה. כל פעילות מתחילה בבירור של מושגי המפתח המופיעים בטקסט, ממשיכה בהתנסות מעשית באמצעות סימולציה או ניסוי במעבדה ומסתיימת בדיון המחדד ומדגיש את עקרונות השימור על בסיס הראיות שנאספו ובזיקה למידע שבטקסט. ההתנסויות הבסיסיות שבפעילויות אלו מבוססות בחבר על ההמלצות המופיעות בתוכנית הלימודים במדעים לחטה"ב.

הפעילות החמישית נמשכת כשעתיים ועוסקת ברעיון השקילות שבין מסה ואנרגיה. בוחח חיבורו של איינשטיין אין כוונה להסביר את השיקולים התיאורטיים שמובילים למסקנה זו אלא למקד את ההסבר בהבנת המשמעות שלה ובראיות האמפיריות התומכות בה. מטרת הפעילות היא לשחזר עם התלמידים את הטיעון ההיסטורי שמוצג בטקסט כהסבר לרעיון השקילות שבין מסה ואנרגיה. בחלקה הראשון של הפעילות מסכמים התלמידים את שלמדו בארבע הפעילויות הראשונות. הם מארגנים בטבלה (ראו פעילות 5) את הראיות התומכות בעקרונות השימור של האנרגיה המכאנית ושל החום ואת הראיות המפריכות אותם ומסבירים כיצד הרחבת תחום הכיסוי של עקרון שימור האנרגיה פתרה את הבעייתיות שהציגו העקרונות המצומצמים. בחלקה השני של הפעילות נערך דיון בכיתה המלווה במצגת, באמצעותו נבנית האנלוגיה המשמשת לפתרון הסתירה בין מסקנות תורת היחסות הפרטית ועקרון שימור המסה. בחלק זה חשוב להדגיש בפני התלמידים שהראיה האמפירית הראשונה לכך שהמסה אינה גודל נשמר ושבמסה אכן כמוסה אנרגיה, גילוי הביקוע הגרעיני, הגיעה כ- 30 שנה לאחר שאיינשטיין הציע לראשונה את הרעיון התיאורטי המהפכני שלו. סיכום הפעילות מהווה הזדמנות לעיסוק בתהליך ההתפתחות של הידע המדעי ובתפקיד התיאוריה בעשייה המדעית.

הפעילות השישית מלווה אף היא במצגת ונמשכת בין שעה לשעתיים. הפעילות עוסקת בהיבט המדעי והאקטואלי של האנרגיה הגרעינית. המצגת המלווה את הפעילות מציעה שתי הרחבות: האחת (שקפים 14-11 במצגת) לוקחת כ-15 דקות לפחות ועוסקת בהקשרים ההיסטוריים של גילוי הביקוע הגרעיני, פרויקט מנהטן, וההתגייסות אחרי מלחמת העולם השנייה של איינשטיין ומדענים אחרים כנגד הפיתוח והשימוש בנשק גרעיני. על הרחבה זו אנו ממליצות לא לוותר כי היא נטעת את הדיון המדעי בהקשר חברתי רחב והיא מציעה סיפור אנושי מרתק. סעיף 3 של הפעילות מתייחס להרחבה זו. ההרחבה השנייה עוסקת בנושא של אנרגיית הקשר הגרעינית והיא מתאימה יותר לפעילות על המאמר בכיתה יב' (שקופיות 15-19).

שילוב הטקסט הפופולארי של איינשטיין בהוראת הפיסיקה בתיכון

המאמר הפופולארי של איינשטיין מאד מתאים גם לשילוב בהוראת הפיסיקה בתיכון [8]. הקשר ההוראה המתאים ביותר לדעתנו הוא בכיתה יב' כהקדמה לנושא אנרגיית הקשר הגרעינית. שילוב המאמר לא יוסיף יותר משעתיים לשעות המוקדשות ממילא להוראת השקילות בין המסה והאנרגיה ואנרגיית הקשר הגרעינית. אנו ממליצות שבכיתה יב' התלמידים יקראו את כל המאמר לבד לפני השיעור או מיד בתחילתו. התלמידים יעבדו על פעילות מספר 5 בכיתה והמורה יוכל להשתמש במצגת כאמצעי לדיון בחומר הנלמד ולסיכמו. הטיפול באנרגיה הגרעינית יעשה יחד עם ההרחבה שקיימת במצגת על אנרגיית הקשר הגרעינית (שקפים 15-19). לשם כך יצטרך המורה להוסיף לפעילות מספר 6 טיפול בהיבטים כמותיים של מאזני אנרגיה בריאקציות גרעיניות. גם כאן הסיפור האנושי שמציעה ההרחבה ההיסטורית מאפשר נקודת מבט נוספת לגבי תהליך ההתפתחות של הידע המדעי ולא היינו מוותרות עליו.

הכיתות בהן הפעלנו את המהלך הלימודי

סדרת הפעילויות והשיעורים שעיצבנו נוסתה בשתי כיתות ט' שמלמדת עיריית אהרון. בחטיבת הביניים בה הפעלנו את המהלך הלימודי הוראת לימודי הפיסיקה והביולוגיה מחולקת לסמסטרים. תלמיד כיתה ט' לומד כל מקצוע במשך סמסטר אחד בלבד במשך 7 שעות שבועיות. השיעורים מתקיימים בבלוקים של שיעורים ולמורה יש גישה למעבדה כמעט בכל השעות בהן היא מלמדת. תלמידיה של עיריית עושים ניסויים ופרויקטים כחלק משגרת הלמידה שלהם. עיריית הקדישה למהלך הלימודי המתואר במאמר ארבע מתוך שבע שעות ההוראה השבועיות במשך כשלושה שבועות. שלוש השעות האחרות בכל שבוע הוקדשו להמשך עבודה של התלמידים על הפרויקטים האישיים שלהם. התלמידים למדו על חוקי ניוטון בכיתה ח'. התחלנו את המהלך הלימודי באמצע הסמסטר. התלמידים כבר הכירו את המושגים עבודה, המרחב אנרגיה, שימור אנרגיה, קיבול חום סגול, מערכת פתוחה וסגורה, אבל לא דנו במושגים אלה באופן כמותי ועדיין לא שלטו בהם באופן מלא. עיריית שכפלה לתלמידים את המאמר ואת דפי העבודה לחוברת אחת, בנוסף הפעילות הופיעה גם בסביבת הלמידה של ביה"ס.

תובנות מהפעלת המהלך הלימודי בכיתה

ראשית חשוב לנו לציין שההתנסויות הבסיסיות בשמונה השעות הראשונות של הפעילות מבוססות ברובן על פעילויות שעיריית עושה ממילא בכיתה שלה כחלק מהוראת נושא האנרגיה ללא קשר לשימוש במאמר. תרומתו של המהלך הלימודי המוצג במאמר זה באה לידי ביטוי בהקשר הרחב שלתוכן שולבו הפעילויות הללו ובאופן שבו נוצר הקשר ביניהן. למעשה, גם הדיון באנרגיה גרעינית ובהשלכות החברתיות של השימוש באנרגיה זו הוא משהו שנעשה בחטיבת הביניים למרות שהוא מטופל בפחות העמקה והרחבה מאשר האופן בו טופל הנושא במהלך הלימודי המוצג.

שנית, בחלקו השני של המאמר העוסק בשקילות בין המסה והאנרגיה ראינו גם בכיתות ט' איתן עבדנו, וגם בהתנסויות אחרות עם פעילות זו עם תלמידי תיכון [8], שמילוי הטבלה שבפעילות 5 מוביל לתלמידים לחשוב ולהבחין בין טיעון, ראיה, השערה, הצדקה וכד' - מיומנות חשובה בטיפוח אוריינות מדעית וחשיבה ביקורתית.

שלישית, הדיון באנרגיה גרעינית ובהשלכות החברתיות של השימוש באנרגיה זו מטופל בחטיבת הביניים אך בפחות העמקה והרחבה מאשר האופן בו טופל הנושא במהלך הלימודי המוצג. נושא זה יחד עם סוגיית שקילות המסה והאנרגיה עוררו אצל התלמידים עניין ושאלות רבות. לדוגמה, התלמידים רצו להבין כיצד הטענה שמסה אינה גדול נשמר נובעת מתורת היחסות הפרטית. בעקבות ההפעלה בכיתות למדנו שהדיון בשאלה זו קשה לחלק ניכר מהתלמידים בכיתה ט' ומשום כך נמשך זמן רב, בעוד שהוא אינו מוסיף באופן משמעותי להבנת המאמר. לפיכך בהרצה הבאה של הפעילות כבר לא נתפתה לענות על שאלה כזו באופן מלא. נאמר לתלמידים שזוהי מסקנה הנובעת מתורת היחסות הפרטית, מסקנה אותה איינשטיין לא מסביר במאמר. נציין בהקשר זה שאנו נתמקד בהבנת המשמעות של השקילות בין מסה ואנרגיה ובראיות האמפיריות לשקילות זו. גם העיסוק באנרגיה הקשר הגרעינית התברר כמורכב מדי עבור תלמידים רבים בכיתה ט' במסגרת הזמן שעמדה לרשותנו. בהתאם לכך אנו ממליצים להשאיר את נושא אנרגיה הקשר כהרחבת רשות לתלמידים מתעניינים או לכיתות ט' חזקות במיוחד וגם אז לדון בו רק לאחר שהסתיים הדיון במאמר כולו.

לסיכום, נראה כי המהלך הלימודי שפיתחנו מזמן לתלמידים למידה מעוררת עניין של יחידת לימוד לכידה באחד הנושאים המהותיים ביותר במדע. במסגרת זמן סבירה עוסקים התלמידים בתכנים הנדרשים על פי תוכנית הלימודים באופן הקושר אותם להיסטוריה של המדע, לתהליך החשיבה המדעית ולנושאים אקטואליים במדע ובטכנולוגיה המשפיעים על חיינו.

1. חוברת פעילויות:

http://stwww.weizmann.ac.il/ptc/tehuda/31-2/Kapon_Aharon_Appendix_1.pdf

2. מצגת מלווה לפעילויות 5,6:

http://stwww.weizmann.ac.il/ptc/tehuda/31-2/Kapon_Aharon_Appendix_2.pptx

מקורות

1. Einstein, A. (1946). $E=mc^2$: The most urgent problem of our time. *Science Illustrated*, 1(1), 16-17.
כתב-היד המקורי, שנכתב בשפה הגרמנית, נמצא בארכיון אלברט איינשטיין, באוניברסיטה העברית, וזכויות היוצרים בבעלות האוניברסיטה. תרגום המאמר לעברית מופיע בגיליון זה.
2. Einstein, A. (1934). *The World As I See It* (A. Harris, Trans.). New York, NY: Covici Freide Inc.
3. Einstein, A., & Infeld, L. (1950). *The evolution of physics: the growth of ideas from early concepts to relativity and quanta*. New York, NY: Simon and Schuster.
4. Einstein, A. (1905). Does the inertia of a body depend upon its energy-content? (The English translation of the paper "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?" that was published in *Annalen der Physik* 18, 639-641). Retrieved from Fourmilab Switzerland website: http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/E_mc2/e_mc2.pdf
5. Kapon S. (in press). Bridging the knowledge gap – An analysis of Albert Einstein's' popularized presentation of the equivalence of mass and energy. *Public Understanding of Science* (iFirst doi: 10.1177/0963662512471617)
6. המרכז הארצי להוראת המדע והטכנולוגיה בחטה"ב, הצעה לפריסה שנתית של נושאי הלימוד במדע וטכנולוגיה בכיתות ט', תשע"ג
<http://www.motnet.proj.ac.il/Apps/Public/getfile.aspx?inline=yes&f=files/ba3c28fc-8c3e-46d9-b4f3-efda4c7e27b/5dd54bfd-f1b8-4c5d-834a-1ddec1c789b/e859b1e5-bc55-470c-9ee3-f1078f6d15f4/da68a3fe-26a0-40d4-951f-727e7bb3f925.doc>
7. המרכז הארצי להוראת המדע והטכנולוגיה בחטה"ב, תוכנית הלימודים לכיתה ט' במדעי החומר פיזיקה ומערכות טכנולוגיות: אנרגיה http://meyda.education.gov.il/files/Tochniyot_Limudim/Mada/Energia9.pdf
8. Kapon, S. (2013). Constructing Conceptual Meaning from a Popular Scientific Article – The Case of $E=mc^2$. *Physics Education*, 48, 90-95.