

# **מעשה ומחשבה בחקר המדעי**

דיאלוגים על חקר וגילוי במדעים ובמתמטיקה  
בנייה ופיתוח של פרויקטים מדעיים יצירתיים

עמוס כהן ♦ אורית כהן שניר

**Action & Thought in Research-Based Science Education:  
Dialogues on research and discovery in science and mathematics  
Construction and development of creative scientific projects**

*Amos Cohn & Orit Cohn Snir*

כתיבה:

עמוס כהן

אורית כהן שניר

הוצאת הספרים של מכון מופ"ת:

עורך ראשי: דודו רוטמן

עורכת אקדמית: יהודית שטיימן

עורכת טקסט ולשון: אסיה שרון

מתקינה לדפוס: מירב כהן-דר

עורכת גרפית ומעצבת העטיפה: מאיה זמר-סמבול

חברי הוועדה האקדמית של הוצאת הספרים:

פרימה אלבז-לוביש, אילנה אלקד-להמן, חנוך בן-פזי, יעל דר, יורם הרפז,

נצה מובשוביץ-הדר, אייל נווה, דורון נידרלנד, יעל פישר, שי פרוגל

צילום העטיפה: בשער הספר שלושה מרכיבים המרמזים על תוכנו של הספר:

הקשת בענן, מתקני החקר של קרומי הסבון ושער ספרו של גלילאו גליליי משנת 1632 -

"דיאלוג על שתי מערכות העולם המרכזיות". בשער ספרו של גלילאו שלוש דמויות

המייצגות חוקרים מתקופות שונות - אריסטו, תלמי וקופרניקוס.

מסת"ב: 978-965-530-156-4

© כל הזכויות שמורות למחברים ולמכון מופ"ת, תשע"ט/2019

© הזכויות לשירים שמורות ליוצרים ולאקו"ם

טל': 03-6901406 <http://www.mofet.macam.ac.il>

דפוס: אופסט טל בע"מ

## **מוקדש באהבה**

להורינו - יהודית ואברהם כהן, חיה ודוד נתן

ולילדינו - איילון, לילך, יורם, דקלה ויובל



## תוכן העניינים

9.....	מבוא.....
23.....	פרק א': למידת חקר במדעים באמצעות פרויקטים יצירתיים.....
33....	פרק ב': נחפשה דרכינו ונחקרה - היבטים בפיתוח של פרויקט מדעי יצירתי.....
65.....	פרק ג': הנחיית חקר מעמיק במדעים - הלכה למעשה.....
	1ג: תפקיד המנחה בלמידת חקר באמצעות פרויקטים מדעיים
65.....	יצירתיים.....
82.....	2ג: סדנת חקר במדעים - בית היוצר.....
88.....	3ג: צביר גלילאו - שיתוף אזורי ללמידת חקר של מספר בתי ספר.....
96.....	פרק ד': חקר הקשת בענן.....
139.....	פרק ה': עבודה עיונית כתובה.....
145.....	פרק ו': קרומי סבון - ופתרון בעיות מתמטיות מהחיים.....
147.....	1ו: בעיות במישור הדו-ממדי.....
188.....	2ו: תבניות מרחביות של פאוני הסבון.....
218.....	3ו: יצירה לסבון ולצבע.....
241.....	פרק ז': בעיית הריצוף.....
	פרק ח': אנלוגיה וסימולציה: מכשירים מתקדמים המתאימים
255.....	לאסטרטגיות שונות של חקר.....
274.....	פרק ט': אִמְפִּירִי וְאִפְרִיורי.....
300.....	אחרית דבר.....
303.....	נספח א': נוסחת ניוטון לחישוב הזווית הגבולית של הקשת בענן.....
314.....	נספח ב': על הקשר בין הזוויות הקסומות של הטבע לבין ממדי המרחב.....
332.....	נספח ג': המלצות לנושאי חקר במדעים.....
338.....	נספח ד': ביבליוגרפיה מגוונת כבסיס לעבודות חקר.....
343.....	תקציר באנגלית.....



## דברי תודה

ספר זה עלה וצמח לאורך שנים של עבודה חינוכית עם קהל של תלמידים, סטודנטים ומורים במשעולי מערכות החינוך. הרבה מאוד למדנו והבנו תוך כדי חינוך ילדינו, בעת שפקחו עיניים סקרניות ושאלו שאלות ובחפשנו יחד אחר התשובות. הם אלו שנתנו את הטעם והאתגר לחיפושי הדרך: כיצד להתאים את חומר הלימוד לתחומי העניין וליכולות החקר של הלומד בכל גיל ובכל מסגרת; כיצד לחפש ולגשש אחר נושא לחקר וגילוי שיהא "מספיק פשוט ומספיק מעניין", נושא שידבר אל לבו של הנוער ויהיה רלוונטי לחיי היומיום - ועם זאת יהיה מאתגר ומרתק, כך שיהווה מנוף לפיתוח החשיבה ולשכלול יכולות ההתמודדות של הנוער עם בעיות של חקר וגילוי. העבודה המשותפת עם התלמידים - היא המניע והיא המטרה של כתיבת ספר זה. על כך בוודאי נאמר במקורותינו: הרבה למדתי מרבותי, ומחבריי - יותר מרבותי, ומתלמידיי - יותר מכולם. (תלמוד בבלי, סדר מועד, מסכת תענית, דף ז').

תודה מיוחדת לעמיתינו המורים והמנחים שסייעו בדרכים שונות, בשיחות, בהערות ובעצות טובות.

תודה לאנשי החינוך וההוראה, לאנשי המחקר והמדעים, שקראו את כתב היד והעירו הערות בונות ומלמדות. תודה מעומק לבנו לארנה מילוא, ותודה חמה לפרופ' עודד מילוא, לד"ר תמר גזית, לפרופ' סטיב ליפסון ולד"ר יורם אורעד, שקראו את כתב היד בעין בוחנת והציעו הצעות פוריות ומועילות מאוד. תודה מעומק ליבנו למשה רייך ולמרכז אחר"ת, לאביגדור וילנץ ולקרן גלילאו על תמיכתם בהוצאת הספר.

תודה גדולה להוצאת הספרים של מכון מופ"ת, לד"ר דודו רוטמן העורך הראשי, לד"ר יהודית שטיימן, ראשת ההוצאה לשעבר, לעורכת הטקסט והלשון ד"ר אסיה שרון, לעורכת הלשון האחראית מירב כהן-דר, לעורכת הגרפית ומעצבת העטיפה מאיה זמר-סמבול ולכל הצוות על שיתוף הפעולה והיחס החם.





## מבוא

השאיפה והנכונות ללמידה ולחקירה הן מרכיב מרכזי בדמותו של הלומד, האזרח בחברה של המחר. נעיין תחילה במילותיה של המשוררת ויסלבה שימבורסקה (2011) בשיר: "ילדה קטנה מושכת מפת-שולחן".

### ילדה קטנה מושכת מפת-שולחן

מאת: ויסלבה שימבורסקה

מתוך: רגע - מבחר שירים

מפולנית: דוד וינפלד

היא כאן, בעולם הזה, למעלה משנה.  
ובעולם הזה לא הכל נחקר,  
ולא הכל נמצא בשליטה.

עכשו הזמן לנסות את הדברים  
שאיןם יכולים לנוע בכח עצמם.

צריך לעזור להם בזה,  
להזיז, לדחוף,  
להעתיק אותם ממקומם.

לא כלם רוצים בזאת, למשל הארון,  
המזנון, הקירות העקשים, השלחן.

אבל כבר המפה על השלחן קשה הערף  
- אם תיטיב לאחז בשוליה -  
מגלה נטיה לנסע.

ועל המפה כוסות, צלוחיות,  
כד חלב קטן, כפיות, קערית  
והם רועדים מחשק.

מענין מאד,  
באיזו תנועה יבחרו,  
כשיאבד שווי משקלם בקצה:  
מסע על פני התקרה?  
מעוף סביב המנורה?  
קפיצה אל אדן החלון וממנו אל העץ?  
מר ניוטון לא שיך עדין כלל לענין.  
יביט לו מהשמים וינפנף בידיו.  
הנסוי הזה חייב להערך.  
והוא יערך.

אנחנו הננו מה שאנחנו יודעים ומה שאנחנו יכולים ומוכנים ללמוד ולחקור. יותר  
ממה שאנו כבר יודעים, משפיע עלינו מה שאנו מסוגלים לחקור ולגלות בעצמנו,  
ועד כמה אנו מוכנים להיכנס ללמידה ולחקירה בתחומים שבהם איננו מכירים  
את כללי המשחק.

פיתוח יכולתו האינטלקטואלית של הלומד דומה לזרוע המושטת להשיג  
דבר-מה: כל הנמצא כמטחני הזרוע - הוא בר השגה ⇔ כל הנמצא הרחק  
מאוד - אינו בהשג יד.

תפקידנו כמחנכים הוא להאריך במקצת את "היד האינטלקטואלית" של  
הלומד, לקרב את הלומד בכמה אצבעות נוספות אל תחום הלא נודע. כאן,  
במרחב הקרוב של הבלתי נודע - כאן, מתרחשת הלמידה המשמעותית. באזור  
מטפורי זה יש אפשרות להפוך את הבלתי נודע - לבר-השגה. כאשר הלומד  
מביא איתו יכולת ללמידה וגם נכונות ללמידה, חשוב שיימצא לצידו מנחה טוב  
על מנת שיכוון וידריך אותו, כך שהלמידה תהיה פורייה ומוצלחת. הצלחה כזו  
תעודד את הלומד לצאת שוב ושוב לעוד ועוד מסעות למידה.

## היום – יותר מאי-פעם בעבר

החינוך למדעים הוא מרכיב מרכזי בחינוך האדם המודרני לפתיחות ולצניעות כלפי העולם הסובב אותו. הכרת "כללי המשחק" הפועלים ביקום וחיפוש דרכים שבהן יכול האדם להשתלב ביקום ולהשפיע על הסובב אותו, תוך הערכה למעשה הבריאה והתחשבות בעולם הטבע - אלו הם חלק מהערכים החשובים ביותר שניתן להעניק לאדם תוך כדי חינוך למדעים. הכרת הטבע וחוקיו היא הבסיס המשותף ההכרחי לכל התרבויות האנושיות: לא בכדי פותח ספר הספרים בקביעה הזו: "בראשית ברא אלהים את השמים ואת הארץ". ללמדך שקודם כול וראש לכול המקצועות - חובה עלינו לספר בסיפור הטבע ולחוקרו!

**אפלטון** (427-347 לפני הספירה, אתונה, יוון) ייסד בשנת 388 לפני הספירה אקדמיה לפילוסופיה ולמדע באתונה, וחרט על שער הכניסה את האזהרה: "לא יתקבל כאן מי שלא חונך בגיאומטריה".

### ΑΓΕΩΜΕΤΡΗΤΟΣ ΜΗΔΕΙΣ ΕΙΣΙΤΩ

משמעות הכרזתו זו של אפלטון לימינו אנו היא זו: אין זכות קיום לחינוך המתעלם מחוקי המתמטיקה והלוגיקה ומעקרונות מדעי הטבע האמפיריים.

**גלילאו גליליי** (1564-1642) כתב: "הפילוסופיה כתובה בספר הגדול המונח תמיד לנגד עינינו - כוונתי ליקום - אך לא נוכל להבינו בלתי אם נלמד ראשית את הלשון ונתפוס את הסמלים שבהם הוא כתוב. ספר זה כתוב בלשון מתמטית." גלילאו ראה את שליחותו של המדען בכך שיצליח להביא את המדע אל כיכר השוק. כלומר, עליו לדאוג לכך שיצירות המדע ימצאו בהישג ידם וביכולת תפיסתם של בני אדם מן השורה.

ברוח מורשתם של "ענקי הדעת" הללו סוברים רבים כיום, ואנו בתוכם, כי החינוך למדעים הוא אבן הפינה לבניית תפיסת עולמו של כל אדם. חינוך למדעים בדרך נכונה מפתח התבוננות, חשיבה עצמאית, גישה ביקורתית ויכולת ניתוח. היום, יותר מתמיד, חשוב לדאוג לכך שהלומדים יצוידו בכל הכלים הדרושים על מנת לגשת בביטחון לחקירה מדעית יצירתית, תוך התלהבות וחדווה שבגילוי עולם הטבע.

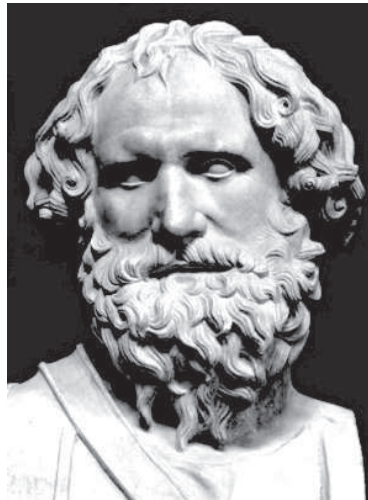
להלן מוצעים שלושה טעמים לדרך הלמידה לחקר מעמיק במדעים באמצעות פרויקטים יצירתיים:

א. כדי לשרוד בים המידע: לא לטבוע ולנווט לכיוון הרצוי!

הלומדים היום צומחים לתוך עולם מדעי-טכנולוגי מורכב יותר מאי פעם בעבר. משום כך חשוב מאוד כי יושם דגש על הקניית כלים ללימוד ולחקר

באופן עצמאי, בד בבד עם הקניית מושגי היסוד במדע. את היכולת הזו ללמוד ולחקור ולשרוד בים המידע - יש לבנות תוך כדי התנסות בחקירה מדעית יצירתית.

ב. משום היופי והחדווה שבגילוי - ההופך את הלימוד לחוויה משמעותית הלימוד נתפס אצל רבים כשינון של תקצירי הרצאה. מיד לאחר מבחני ההערכה - יישכח רוב רובו של חומר הלימוד שלא חדר ללבו של הלומד. אנו מעדיפים לימוד אחר: לימוד פעיל, חלקו בכיתה תוך כדי דיאלוג פעיל בין מורה ותלמידים, וחלקו על ידי ביצוע פרויקט שלם של חקירה וגילוי, שעיקרו עבודה עצמאית של הלומד תוך הדרכה מקצועית של מנחה-מורה. על פי גישה זו, הלומד חָדָל להיות מובל על ידי מורה הדרך, כעת הוא המוביל, האחראי לנווט עצמו ליעד שאותו הוא עצמו בחר מתוך עניין פנימי. בלימוד כזה אנו פוגשים לומד במצב חדש, לומד שענינו נפקחות בקריאת: אהה! ו... "מצאתי! מצאתי!" (אַאֹרִיקָה! εὕρηκα) - ממש כארכימדס!



ארכימדס, פסל רומי. המוזיאון הלאומי, נאפולי

ארכימדס (נולד סמוך לשנת 287 לפני הספירה ומת בסירקוז אשר בסיציליה בשנת 211 או 212 לפני הספירה) מגדולי המתמטיקאים והפיזיקאים בכל הדורות, אישיות מדעית מרתקת, תרם תרומה אדירה להתפתחות המתמטיקה והפיזיקה. היה מדען, פיזיקאי-מתמטיקאי בחצרו של הֶירוֹן מלך סירקוז (בסיציליה). ארכימדס עסק במתמטיקה טהורה, לצד מחקר פיזיקלי ואף פיתוח טכנולוגי. שימש בתפקיד "המדען הראשי" של הממלכה, והתגייס לפתח כלי טכנולוגיה משוכללים לבניית אוניות, לשאיבת מים ואף להגנת העיר.

יום אחד פנה הירון, מלך סירקוז, אל ארכימדס - וביקש בקשה מיוחדת: לברר, באמצעות 'בדיקה ללא הרס', אם הכתר שהכין לו הצורף המלכותי עשוי זהב טהור, או שהוא מזויף ובתוכו מילוי של מתכת זולה.

ארכימדס התלבט רבות בשאלה כיצד לבדוק את תוכו של הכתר מבלי לנסר אותו. יום אחד כשהתרחץ באמבטיה - גילה את הקשר בין משקלו של גוף לבין נפחו (קשר שהיום אנו מכנים: צפיפות החומר, משקל סגולי). ארכימדס התרגש מאוד מהגילוי החדש: פתאום נפתחה אפשרות לבחון את תכונות החומר "מבחוץ"!

כה רבה הייתה התרגשותו, עד שרץ ערום כולו אל המלך בקריאות: מצאתי! מצאתי!

- ניתן לערוך מחקרים ופרויקטים מדעיים רבים בנושאים הקשורים לגילוייו וליצירתו של ארכימדס. לדוגמה: חקר הצפיפות של חומרים שונים, איזה חומר צף באיזה נוזל; חקר משאבות; חקר נפחים של גופים מחודדים בהשוואה לגופים דמויי עמוד, כמו נפח חרוט לעומת גליל ועוד.

ג. "כשאני שומע - אני שוכח, כשאני רואה - אני זוכר, כשאני עושה - אני מבין." (פתגם סיני)

### הגישה הקונסטרוקטיביסטית

לומדים ובני אדם בכלל נבדלים זה מזה בדרך שבה הם מארגנים את סביבתם מבחינה מושגית ומקנים לה משמעות; בדרך שבה הם מסננים גירויים; ובדפוס העיבוד והארגון של המידע שקלטו. הלמידה מתבצעת על פי סגנונות נוירולוגיים קוגניטיביים שונים. סגנון קוגניטיבי הוא גם סגנון חשיבה וגם סגנון למידה של

אדם. ניתן לחלק את הלומדים בדרכים שונות על פי סגנונות למידה שונים. אחת הדרכים לכך היא זאת:  
הלומד החזותי (הוויזואלי) - לומד טוב יותר בדרך חזותית מחומר כתוב, תוך שהוא קורא וכותב.  
הלומד האודיטורי (שמיעתי) - לומד טוב יותר על ידי כך שהוא שומע את הרצאת הדברים הנלמדים.  
הלומד הקנטטטי (הלומד דרך עשייה) - לומד טוב יותר תוך שהוא עושה את הדברים במו ידיו וחש אותם באצבעותיו.  
והרי נאמר במקורותינו:  
"מראין את העין מה שיכולה לראות ומשמיעין את האוזן מה שיכולה לשמוע" (אבות דרבי נתן ב).

ניתן להכליל הבחנה זאת למודל משולב, הקובע כי בכל אדם ישנם מרכיבים שונים משלושת טיפוסים הלמידה הללו, ולכל אחד הרכב ייחודי ואופייני משלו. מקובלת כיום ההנחה כי אין שיטה אחת המתאימה לכל הלומדים (בכל שיטה ימצאו תלמידים שעבורם השיטה אינה מתאימה). משום כך נחוץ להתאים את שיטת הלימוד לצורכי הלומד, להתאים את שיטות החינוך ודרכי הלמידה לתכונות האינדיווידואליות של הלומד. כלומר, כל לומד זקוק למינון אופייני משלו ולהרכב ייחודי של דרכי הלמידה השונות הללו.

הנה, זו אחת הסיבות המרכזיות לצורך לגוון את מלאכת הלמידה (וההוראה) של המדעים ולכלול בה גם למידה באמצעות פרויקטים יצירתיים. בדרך זו הלומד בונה בעצמו את דרך הלימוד שלו ומעצב את החלוקה בין סגנונות הלמידה השונים במינון המתאים לצרכיו.

חשוב להבהיר היטב: החינוך למדעים, שחשיבותו רבה, אינו מספיק כשלעצמו. יש לבנות לצדו חינוך ערכי הומניסטי לחשיבה ביקורתית ואחראית. חינוך כזה מחייב לשים דגש על לימודי היסטוריה, ספרות, אזרחות ודמוקרטיה. שהרי המדע והטכנולוגיה יכולים להעניק כלים חזקים לביצוע משימות אדירות - אבל החלטה על אופי המשימות והיעדים שבני האדם שואפים אליהם היא החלטה ערכית, לא מדעית. את המטרות והיעדים של החברה האנושית (לצד מנגנוני הבקרה והריסון) יש לקבוע על פי מערכת ערכים הומניסטיים, מוסריים, דמוקרטיים, ברוח נביאי ישראל וברוח הצדק החברתי.

החינוך למדעים הוא רק מרכיב אחד בתוך המכלול של חינוך אדם חושב, ביקורתי, מוסרי ואחראי.

ספר זה מתמודד עם בנייה וחיזוק של היכולת והנכונות לחקור, לגלות וללמוד על עולמנו. לאורך הספר יובאו דוגמאות לסוגים שונים של פרויקטים, ישורטטו מגוון דרכי פעולה אפשריות ואסטרטגיות לפתרון בעיות וכן עקרונות דידקטיים מרכזיים לצד עקרונות מדעיים יסודיים - ויוצעו כיוונים אפשריים לשילוב אלו ואלו. בספר דוגמאות רבות מתחומי הפיזיקה והמתמטיקה. אין זה מקרה. הפיזיקה היא מדע הפְּשֵׁטוּת. עיקרה: החיפוש אחר הסבר פְּשוט ככל האפשר לתיאור הטבע. כלומר, בניית מודלים פשוטים ככל האפשר שיוכלו להסביר מגוון רחב של תופעות טבע. אנו מבקשים לבנות את לימודי הטבע על פיתוח ההבנה. אבני הבניין המרכזיות של דרך הלימוד המוצעת בספר זה הן: הניסוי או התצפית; הניתוח; ובניית מודל להסבר התופעה הנחקרת.

**בפרק א'** נראה כי למידת חקר במדעים באמצעות פרויקטים יצירתיים מעודדת את הלומד לחשיבה ביקורתית, לחקירה מעמיקה ותוך כך מאפשרת פיתוח אדם אחראי המתייחס בכבוד אל זולתו ואל הסביבה בה הוא חי.

**בפרק ב'** מוצגים עקרונות דידקטיים החיוניים, לדעתנו, להצלחת הלמידה בדרך הפרויקטים המדעיים יצירתיים:

- א. מספיק פשוט ⇔ מספיק מעניין
- ב. עקרון שביתת המסמרים
- ג. בְּעֵבֵי הַקּוֹרָה
- ד. אנו רואים את שאנו יודעים לראות
- ה. "וַיִּקְרָא הָאָדָם שְׁמוֹתַי" (בראשית, ב', 20)
- ו. כשאני עושה - אני מבין
- ז. שני צעדים קדימה

**פרק ג'** דן בתפקיד המנחה בלמידת חקר מעמיק במדעים באמצעות פרויקטים יצירתיים; בסביבת העבודה שבה אנו ממליצים ללמוד ולעבוד, זו סדנת החקר במדעים, שאנו מכנים אותה "בית היוצר"; בחלק השלישי של פרק זה אנו ממליצים להקים גוף לתיאום ושיתוף אזורי ללמידת חקר. אנו מכנים התארגנות זו "צביר גלילאו".

**בפרק ד'** מוצג פרויקט החקר: הקשת בענן. בפרויקט זה באות לידי ביטוי התרומות השונות של למידת החקר באמצעות פרויקטים מדעיים יצירתיים.

**פרק ה'** עניינו כתיבת העבודה העיונית המלווה את פרויקט החקר. כאן ננסה לסייע ולכוון את הלומד ואת המנחה לדגשים החשובים בדרך הפרויקט, שהם שילוב של היבטים חברתיים-היסטוריים ועדכניים לצד היבטים מדעיים טכנולוגיים.

**פרק ו' מדגים את השימוש בעקרונות הלמידה שהצגנו - על ידי חקר קרומי סבון ופתרון בעיות מתמטיות מן החיים: בבעיות במישור, שבהן אנו מחפשים את המסלול החסכוני ביותר המחבר כמה נקודות. כאן אנו נפגשים עם שני סוגים של אילוצים: אילוץ ה"איסור" ואילוץ ה"מחיר", ומחפשים את הפתרון המיטבי תוך התחשבות באילוצים; המשכו של הפרק עוסק בבעיות במרחב, בחיפוש יריעות ומשטחים חסכוניים במרחב התלת-ממדי. בפרק משולבים סיפורים מיתולוגיים ועדכניים המעלים את הבעיה המתמטית לסדר יומנו. מתוך הדיון בהתנהגות קרום הסבון במישור ובמרחב, אנו מוצאים את עצמנו מתבוננים בפליאה בפתרונות המתמטיים המשמשים את הדבורים בבניית חלת הדבש. אנו תוהים ושואלים על אודות הזוויות הקסומות של הטבע - מה הקשר בין הזוויות המיוחדות שמתגלות בקרומי הסבון לבין ממדי המרחב. מתוך שאלות אלו עולה גילוי מעניין (ראו נספח ב' בסוף הספר).**

**פרק ז' מטפל בבעיית הריצוף ובדרכים לכיסוי המישור באריחים משוכללים. פרק ח' מציג שני מכשירים מתקדמים המתאימים לאסטרטגיות שונות של חקר: האנלוגיה והסימולציה.**

**פרק ט' עוסק בהשוואה בין פיזיקה ומדעי הטבע האמפיריים, מצד אחד - לבין המתמטיקה והלוגיקה, האפריוריים, מן הצד האחר. נברר למה מותר לנו לצפות מ"חוקי הטבע" שהפיזיקה מנסחת, ונבהיר מה תוקף יש למשפטי המתמטיקה בעולמנו שלנו, ולאיזה עולם הם באמת מכוונים.**


**אחרית דבר, הפרק האחרון, מסכם את עיקרי גישת הלמידה של חקר מדעי באמצעות פרויקטים יצירתיים כפי שאנו תופסים אותה.**

**בנספח א' נפתח הלכה למעשה את נוסחת ניוטון לחישוב הזווית הגבולית של הקשת בענן.**

**בנספח ב' נציג גילוי שלנו המסביר את קיומן של הזוויות הקסומות של הטבע ואף מנבא זוויות נוספות.**

**בנספח ג' נציע נושאי חקר במדעים ונמליץ על כיוונים אפשריים לחקר.**

**בנספח ד' אנו מביאים רשימה של מקורות שניתן לשאוב מהם רעיונות לפרויקטים חדשים, וכמובן לאסוף מידע וכלים לחקר.**

**הערה 1: הסימון  פירושו: אנו ממליצים לקורא להרחיב את מקורותיו בנושא ולעיין ברשימת המקורות וההערות שבסוף הפרק ובסוף הספר.**

**הערה 2: בכל פרקי הספר ממוספרים האיורים והתמונות בסדר רץ. הספרור כולל את ציון הפרק וציון המספר הסידורי בתוך הפרק.**



## מקורות והערות למבוא

### המקורות וההערות על פי סדר הנושאים שנידונו בפרק:

1. על ויסלבה שימבורסקה
2. על חינוך באמצעות חקירה וגילוי
3. על ההבדל בין מודל המחשה לניסוי
4. על הגישה הקונסטרוקטיביסטית
5. על אפלטון
6. על ארכימדס
7. על גלילאו גליליי

### 1. על ויסלבה שימבורסקה

ויסלבה שימבורסקה (1923-2012), משוררת פולנייה. בשנת 1996 הוענק לה פרס נובל לספרות. שימבורסקה, ויסלבה (2011). רגע: מבחר שירים. השיר: ילדה קטנה מושכת מפת-שולחן. (דוד וינפלד, מתרגם). ירושלים: כרמל.

### 2. על חינוך באמצעות חקירה וגילוי

דרך הלימוד באמצעות חקירה וגילוי נסללה כבר לפני שנים רבות על ידי הוגי דעות וחינוכאים חשובים ביותר. דרך חינוכית זו הייתה הקו המנחה של בתי הספר הפרוגרסיביים שפעלו באירופה, בארצות הברית ובארץ ישראל המנדטורית. בתי ספר אלו הושפעו מתורותיהם של רוסו, פסטאלוצי ופרבל, ופעלו מאמצע המאה ה-19 ועד אמצע המאה ה-20. המחנכים שהנהיגו בתי ספר אלו היו: ברנפלד (אוסטריה); מונטסורי (איטליה); ניל (אנגליה); דיואי וקילפטריק (ארה"ב); דקרולי (בלגיה); קרשנשטיינר, גאודיג, וויניקן (גרמניה); קורצ'ק (פולין); להמן, רון-פולני, אידלסון, גולן, זוהר, סגל ושותפיהם בארץ ישראל ועוד.

### 3. על ההבדל בין מודל המחשה לניסוי

בלמידה באמצעות פרויקט של חקר מדעי אנו מנסים להבין את התנהגות הטבע בהקשר לתופעה מסוימת או לתהליך מסוים. תכונה מספר דרכים או אסטרטגיות להשגת מטרה זו. בדיון להלן נצביע על שתי גישות: בניית מודל המחשה וניסוי.

דרך אחת היא בניית מודל המחשה אשר מייצג את ההתרחשות המדעית באופן הולם וברור, כך שניתן לעקוב אחר פעילותו של מודל המחשה וממנה

ללמוד כהלכה על ההתרחשות הפיזיקלית עצמה. במודל ההמחשה ישנם לעיתים מרכיבים של אנלוגיה שעלינו לברר: עד כמה המשתנים במודל מייצגים נאמנה את המשתנים במציאות? האם המודל מייצג נאמנה את יחסי הגודל: אורך, שטח, נפח? האם מיוצגים נאמנה מרכיבי הכוחות הפועלים בין הגופים במודל - לעומת המציאות? האם האנרגיה המשפיעה במודל - מייצגת נאמנה את האנרגיה המשפיעה במציאות? [על אנלוגיה נרחיב בפרק ח'].

- היתרון בבניית מודל המחשה, שהוא מאפשר לנו לייצג את התהליך הטבעי באופן שיקל על הלומד לעקוב אחריו ולהבינו. מודל ההמחשה מציג אינטגרציה של מכלול הגורמים הפועלים בתופעה הנחקרת ואת השפעתם המשותפת.

- החיסרון בבניית מודל המחשה הוא בכך שלפעמים איננו יודעים מהו התהליך הטבעי הפועל בתופעה - והרי את זה בדיוק אנו מבקשים לחקור. דוגמה למודל המחשה: תיאור התנועות היחסיות במערכת השמש שלנו, או בתת מערכת הכוללת את השמש, כדור הארץ והירח. התנועות ידועות לנו כיום היטב, אך אנו והלומדים מתקשים בתפיסה הכוללת של תופעות הטבע הנובעות מהתנועות המורכבות הללו, לגבי צופה הנמצא במקומות שונים: צופה על כדור הארץ, על הירח, על השמש או צופה המתבונן מהחלל החיצון, למשל מכיוון כוכב הצפון. בעזרת מודל המחשה טוב נוכל לחקור ולהבין תופעות טבע, כמו: מחזוריות היממה, מופעי הירח, ליקוי חמה וליקוי לבנה ואף את עונות השנה ועוד.

דרך אחרת לקבלת הסבר והבנה טובה של תופעת הטבע היא הניסוי. הניסוי (experiment) או מערכת של ניסויים הם שורה של פעילויות הקשורות בתופעה הנחקרת ומאפשרות בידוד של המשתנים הרלוונטיים תוך בירור יחסי הגומלין וההשפעה ההדדית שבין המשתנים הללו. במקרים רבים מגדירים את הניסוי כבדיקה מדעית הנערכת בתנאים מבוקרים במטרה לאשש או להפריך תיאוריה מסוימת, או על מנת לגלות מה השפעתם של משתנים אחדים על משתנים אחרים. במקרים רבים אין לנו הבנה מספיק ברורה של ההתרחשות הטבעית. משום כך אין לנו אפשרות לבנות מודל המחשה, ולכן עלינו לנקוט בגישת הניסוי. לעיתים גם לאחר ביצוע הניסוי וקבלת קשרים מסוימים בין המשתנים - עדיין אין באפשרותנו לתת תיאור שלם המקיף את מכלול התהליכים המתרחשים בתוך אותה תופעת טבע. ייתכן שצריך להמשיך לחקור באמצעות ניסויים נוספים, וייתכן שצריך לחפש מודל המחשה אשר מציג אינטגרציה של מכלול הגורמים הפועלים והשפעתם המשותפת.

#### 4. על הגישה הקונסטרוקטיביסטית

ברוקס, ז"ג וברוקס, מ"ג (1997). לקראת הוראה קונסטרוקטיביסטית - בחיפוש אחר הבנה. ירושלים: משרד החינוך - מכון ברנקו וייס לטיפוח החשיבה במהדורה האנגלית:

Brooks, J. Grennon, & Brooks, M. G. (1999). *In Search of Understanding: The Case for Constructivist Classrooms*. Alexandria, VA.: Association for Supervision and Curriculum Development.

ליבמן, ציפי (2013) (עורכת). ללמוד, להבין, לדעת: מסע בנתיבי ההוראה הקונסטרוקטיביסטית. תל אביב: הקיבוץ המאוחד ומכון מופ"ת.

על סגנונות למידה שונים, שבכל אחד מהם יש צד חזק כלשהו שניתן לבסס עליו למידה יעילה:

Ausubel, D. P. (1968). *Educational Psychology – A cognitive view*. NY: Holt, Rinehart & Winston.

Rhetts, J. (1970). The Impact of Student Learning Style. *Education*. p. 248.

Riessman, F. (1964). The Strategy of Style. *Teaching College Record*. p. 484.

#### 5. על אפלטון, 427–347 לפני הספירה (Plato)

אפלטון היה אחד מן הגדולים והחשובים ביותר מבין הפילוסופים של יוון. ויליאמס, ברנרד (2001). אפלטון: המצאת הפילוסופיה. (א' צוקרמן, מתרגם). תל-אביב: ידיעות אחרונות, ספרי חמד, משכל, ספרי עליית הגג. במהדורה האנגלית:

Williams, B. (1998). *Plato*. London: Phoenix.

על אפלטון ושער האקדמיה שלו:

פרנקל, אברהם הלוי (1965). מבוא למתימטיקה. כרך שני: האינסוף והמרחב. חטיבה שניה: גיאומטריה (א), 159. ירושלים: מאגנס, האוניברסיטה העברית והוצאת מסדה. קלוזנר, י' (1961). אפלטון. האנציקלופדיה העברית (כרך ה, עמ' 223-236). ירושלים ותל אביב: חברה להוצאת אנציקלופדיות.

Katz, V. J. (1993). *A History of Mathematics: An introduction*. NY: HarperCollins College Publishers.

Chapter 2: The time of Plato. pp. 48-50.

## 6. על ארכימדס, 212–287 לפני הספירה (Archimedes)

נושאים שארכימדס טיפל בהם (וכל אחד מהם הוא שדה נרחב לפרויקטים של חקר):

- חוק המנוף. שיווי משקל ומרכז כובד של גופים.
- "בורג ארכימדס" - מתקן שאיבת מים קדום שהמציא ארכימדס לרווחת החקלאים.
- חוק ארכימדס (בדבר כוח העילוי הפועל על גוף הנתון בתוך נוזל).
- מושג הצפיפות. ציפה ושקיעה.
- חישוב נפחם ושטח המעטפת של גליל, כדור, פירמידה וחרוט.
- חישוב מקורב של המספר  $\pi$  (היחס בין היקף המעגל לקוטרו).
- פיתוח שיטת המיצוי (Method of exhaustion) בגיאומטריה - שיטה דומה מאוד לחשבון אינפיניטסימלי.
- פיתוח כלים מתמטיים לטיפול במספרים גדולים מאוד.
- ועוד.

Assis, A. K. T. (2008). *Archimedes, the Center of Gravity, and the First Law of Mechanics*. Montreal, Canada: Apeiron.

Fauvel, J. & Gray, J. (Eds.) (1987). *The History of Mathematics: A Reader*. London: Macmillan Press & The Open University.  
Archimedes. pp. 148-182.

Katz, V. J. (1993). *A History of Mathematics: An introduction*. NY: HarperCollins College Publishers.  
Chapter 3: Archimedes and Apollonius. pp. 95-126.

וראו גם בפרק ו', בספר זה, אזכור בדבר הגופים המשוכללים של ארכימדס.

## 7. על גלילאו גליליי, 1642–1564 (Galileo Galilei)

גלילאו גליליי הוא אחת הדמויות המרתקות, הססגוניות והמסעירות ביותר בתולדות המדע. רבים רואים בגלילאו את מייסד השיטה המדעית המבוססת על סמכותו של הניסוי מול סמכותם של אנשים ודתות. גלילאו הוא עד היום סמל המאבק על חופש המדע וחירות החשיבה האנושית.

דמותו של גלילאו קשורה לנושאים מדעיים רבים ומגוונים שעליהם ניתן לבסס פרויקטים, כמו:

- המאבק על חופש המדע. גלילאו מול ג'ורדנו ברוננו.
- מאבק המדען על חופש המדע - כנגד העריצות של האינקוויזיציה הקדושה והכנסייה הקתולית.

- המשפט, הכניעה של גלילאו, "ואף-על-פי-כן נוע תנוע". הזיכוי של גלילאו בסוף המאה העשרים.
- הגישה ההליוצנטרית (השמש במרכז) מול הגישה הגיאוצנטרית (הארץ במרכז).
- בניית הטלסקופ הראשון ותצפית בגרמי השמיים. גילוי הירחים של צדק.
- גלילאו היה הפיזיקאי הראשון שהבין כי יש הכרח למדוד זמן באופן מדויק על מנת לתאר באמצעותו את התנועה כהתרחשות פיזיקלית. לפני שיצר שעון מדויק - השתמש גלילאו בקצב פעימות לבו כשעון ראשוני למדידת זמנים קצרים. גלילאו בנה שעוני מים ושעוני מטוטלת.
- גלילאו גילה את חוק פעולתה של המטוטלת.
- גלילאו ערך סדרת ניסויים בנפילה חופשית, חקר תנועת גופים במדרון, גילה את חוק ההתמדה (החוק הראשון של ניוטון).
- גלילאו בנה מתקן ראשון למדידת טמפרטורה: תרמוסקופ.
- ועוד ועוד.

#### שחזור ניסוי היסטורי של גלילאו: המסלול הפרבולי

בספר הבא ניתן למצוא הפניה למקורות נוספים:  
מנדוזה, אריק ומשה, רון (1975). ניסויים במעבדה לתולדות הפיזיקה. ירושלים: המרכז להוראת המדעים, האוניברסיטה העברית.

#### מתח הפנים של המים

הניסוי של גלילאו: סיכת פלדה צפה על פני המים (בשל מתח הפנים של קרום המים), בניגוד לקביעתו של אריסטו כי תמיד הברזל ישקע במים. כך הראה גלילאו לתלמידיו שלא תמיד אריסטו צדק בהשערותיו.

בכלר, זאב (1996). גלילאו והמהפכה המדעית. גלילאו, 18, 16-24, 43.  
גיבסון, ר' א' (1965). מורשת גאליליי 400 שנה למותו. מדע, ט' (5), 226-230.  
מקלצ'לאן, ג' (1999). גלילאו גליליי: פיסיקאי ראשון. (עמוס כרמל, מתרגם). תל אביב: ידיעות אחרונות, ספרי חמד, משכל.  
סמבורסקי, ש' (1969). גלילאי, גלילאו. האנציקלופדיה העברית (כרך י, עמ' 867-872). ירושלים ותל אביב: חברה להוצאת אנציקלופדיות.  
Katz, V. J. (1993). *A History of Mathematics: An introduction*. NY: HarperCollins College Publishers.  
Chapter 10.5: Galileo Galilei. pp. 383-388.

Shamos, M. H. (Ed.) (1987). *Great Experiments in Physics: Firsthand Accounts from Galileo to Einstein*. NY: Dover Publications.

מומלץ לקרוא ואף להציג עם התלמידים את המחזה: "חיי גלילאו", מאת: ברטולט ברכט. תרגם והוסיף מבוא והערות: אברהם עוז, תל אביב: אור-עם, 1982. המחזה הופק בלונדון והוסרט בסרט יפהפה! משחקים בסרט "חיי גלילאו": חיים טופול, אדוארד פוקס, ג'ון גילגוד. בימוי: ג'וזף לוסי. המחזה הופק גם בארץ בתיאטרון חיפה.

כתבי יד של גלילאו ומחקרים אודותיהם (המוזיאון בפירנצה):  
<http://galileo.imss.firenze.it/ms72/INDEX.HTM>