

# אחר"ת - אחוות חוקרים רב-תרבותית

משה רייך<sup>1</sup>, ד"ר עמוס כהן<sup>2</sup>, יותם הוכשטר<sup>3</sup> - מרכז יהודי-ערבי לעבודות חקר בפיסיקה בגליל המערבי

מן הנעשה  
בבית הספר



בגליל המערבי מתקיים זה מספר שנים שיתוף פעולה אזורי בתחום עבודות החקר בפיסיקה. שיתוף פעולה זה מהווה מודל המדגים הלכה למעשה כיצד ניתן למזג שאיפה למצוינות אגב הקניית תפיסות למידה המתאימות למאה ה-21, עידן רווי מידע, עם תהליכים של שיתופי פעולה אזוריים (מחקרים משותפים של תלמידים מבתי ספר שונים, פעילות חברתית משותפת לתלמידים המגשרת בין המגזרים, צוות מנחים אזורי, שיתופי פעולה בין הנהלות בתי הספר). מודל זה מיושם כעת בארבעה בתי ספר השייכים למועצה האזורית מטה אשר: "מנור-כברי", "אזורי גליל מערבי", "השלום" (שייח דנון) ו"אופק" (עברון).  
סך כל התלמידים במרכז הלומדים בדרך החקר הוא מעל 200, ואותם מנחים כ-20 מנחים.

במסגרת אחר"ת מתבצע תהליך של חיזוק למידת החקר בכל בית ספר לחוד, ובה בעת מתקיים תהליך של בניית קבוצות אזוריות סביב נושא מאחד.

כיום אנו נמצאים במצב שבו בכל בית ספר קיימת תשתית פיזית (ציוד, מרחב חקר קטן) המאפשרת חקר ברמה טובה, וכן מתקיימת הכשרת מורים ולבורנטים, כך שיוכלו להנחות את התלמידים בעבודת החקר שלהם. כך אנו בונים דרך הוראה אחר"ת.

על המורים המנחים אנו מטילים משימה כפולה: מחד, המורים מחויבים להכין את התלמידים כך שהידע התאורטי בפיסיקה ובמתמטיקה יאפשר להם לבחור נושא חדשני למחקר, לתכנן ניסויים, לערוך את הניסויים ואף להסיק מהם תובנות חדשות. באמצעות ידע זה התלמידים בונים להם תפיסה - מודל - לגבי המציאות הפיסיקלית שבה מתרחש הניסוי.

מאידך, על המורים ליצור עימות בין הידע הבנוי (הקונספציה) של התלמידים - לבין המציאות הפיסיקלית המתגלה בניסוי. מציאות זו 'מסרבת' לא פעם להיכנע למודלים המולבשים עליה באופן אוטומטי.

בתהליך מרתק זה התלמידים והמורים שותפים מול אתגר אמתי: עליהם ליישב פער בין תוצאות הניסוי לבין המודל הראשוני שבחרו בו להסבר התופעה.

התלמידים והמורים מחדדים את החשיבה הפיסיקלית, מזהים את גבולות המודל, ממציינים ניסויים חדשים שסייעו בידיהם בפתרון החידה, וכך, בתהליך מדעי הנרכש אגב עשייה, הם שותפים ביצירת ידע.

1. מנהל מרכז אחר"ת ומורים בבית חינוך אופק ומנור כברי.

2. אורנים - המכללה האקדמית לחינוך ומרכז אחר"ת.

3. מנחה במרכז אחר"ת.

למידה כזו, חינוך כזה לחשיבה - מתרחשים בסביבה תומכת, בדרך של דוגמה אישית. סביבה תומכת, מנחה ומכוונת היא סביבה שבה שותפים: הלומדים החוקרים, מדענים, מורים, מנחים, לבורנטים ואף תלמידי שנת י"ג, בוגרי החינוך הזה לחשיבה ולחקה.

התלמידים נפגשים בסביבתם באדם הלומד בעצמו, בוחנים מחדש תפיסות קודמות ובונים לעצמם ידע וקונספציה מתאימים יותר, עדכניים יותר.

□ כאן אנו מגיעים לקו פרשת המים. אפשר שתלמידים או מורים ישאלו את עצמם: אם מורים נמצאים לומדים ליד תלמידים - שמא אין הם חכמים דיים? שמא אינם מקצועיים דיים?

□ כך הרי נתפסים הדברים בדרכי הלימוד המסורתיות. ואכן, יש להניח שמורים החוששים להגיע למחוזות שבהם הם מודים בטעות או בתפיסה חלופית (בפני תלמידיהם), לא יוכלו לתת לתלמידיהם חינוך פיסיקלי מלא. הם יהיו מורים המעבירים "ידע נכון", תלמידיהם יצליחו בבחינת הבגרות, וזה חשוב מאוד, אך עדיין לא יזכו לתלמידיהם לחינוך פיסיקלי מלא.

□ אנו מאמינים כי רק כאשר התלמידים נחשפים למורים חושבים - הבוחנים את תפיסותיהם בכל פעם מחדש, ומעמתים את גישתם מול תוצאות הניסוי העדכני - רק אז לומדים התלמידים בדרך של דוגמה אישית מה היא חקירה פיסיקלית עמוקה ואמתית. זהו קו פרשת המים בלמידה בגישת הפרויקט והחקר!

## למידה דרך חקר לכל התלמידים:

לפי הגישה שלנו, למידה דרך חקר אינה נחלתם הבלעדית של התלמידים המצטיינים/ המבריקים/ המצליחים במבחנים. לעתים קרובות אנו נתקלים בתלמידים הנראים לכאורה תלמידים רגילים לגמרי - המצליחים מאוד בלמידה בדרך החקה, מגיעים להעמקה ורמת הבנה גבוהה מהנדרש בקצב אישי שלהם, בתהליך למידה רצוף, נחוש. מסתבר למשל, שבדרך למידה זו בנות מגיעות להישגים גבוהים, והן אף נוטות יותר מבנים לבחור בעבודות חקר צמודות בהיקף של 5 יחידות! אנו מאמינים שכל התלמידים הלומדים פיסיקה בהיקף של 5 יחידות מחויבים לחוות טעמו של תהליך מחקרי במהלך לימודיהם.

החל מכיתה ט' ועד י"ב "זוכים" התלמידים באחר"ת ללמידה המדגישה מיומנות חקר ודרישות הגדלות בהדרגה. כך למשל, בכיתות ט' ו-י' מטלות החקר קטנות בהיקפן, מובנות יותר, מכילות מיומנויות בסיסיות יותר ומושגות פחות על מרכיב ידע החדש למנחה. בכיתות י"א וי"ב המחקרים מכילים התעמקות סביב שאלות מחקר. התעמקות זו מחייבת למידה משמעותית גם אצל המנחים עצמם. מיומנויות החקר, כמו ביצוע סימולציות, נעשות מורכבות יותר.

## שרשרת הנחייה

אנו יודעים שבני האדם לומדים ללכת, להתנהג בכביש, להשתמש במחשב וכו' בדרך של חיקוי - מעין דוגמה אישית. יש מקום להאמין שערך הלמידה העצמית יחלחל לתלמידים הנמצאים במחיצתם של בוגרים הלומדים בעצמם. באחר"ת יש מספר מדענים ואנשי אקדמיה (פרופ' סטיב ליפסון, ד"ר עמוס כהן, ד"ר זינה פוליאק), מנחים מנוסים מאוד (חלקם מורים מבתי הספר), מנחים, מורים ולבורנטים "צעירים" בהנחיה, ואפילו בוגרי בתי הספר תלמידי פיסיקה מסיימי י"ב המסייעים בחקר לתלמידים צעירים יותר. שרשרת הנחיה זו מאפשרת לתלמידים הצעירים להזדהות עם חוקרים בוגרים מהם. התלמידים הפועלים במחיצת

1 **עבודות בהיקף של 5 יחידות** או עבודות צמודות הן עבודות המחליפות את כל בחינות הבגרות; קיימת אפשרות להוסיף את עבודת הגמר הצמודה לבחינות הבגרות, ואז העבודה שקולה ל-4 יחידות לימוד, ובסך הכול 9 יחידות. **פרויקט בהיקף של 2 יחידות** - מחליף שתי יחידות של בחינות הבגרות: בחינות הבגרות בקרינה וחומר והמעבדה.

מנחים אשר עדיין לומדים ו'שוברים את הראש' - נחשפים לתהליכי חשיבה, חקירה ולמידה שהמנחים הבוגרים עוברים. חלק מהתלמידים שסיימו י"ב עסקו קודם לכן בחקר מתקדם (עבודות בהיקף של 5 יחידות), והם יכולים להנחות היטב בנושאים הקרובים לנושא מחקרם. בנוסף, תלמידים אלה יכולים לסייע מאוד בלימודי המדעים (ביצוע מעבדות, מיני פרויקטים, מיומנויות חקר) בעיקר בכיתות ט', י'.

חשוב מאוד לציין את תפקידם של ה"לברנטים ב"אחר"ת": ה"לברנטים מסייעים בבעיות טכניות וטכנולוגיות במספר מחקרים, שותפים בתכנון ובבנייה של מערכי המחקר ומנחים בעצמם תלמידים. שתי הדוגמאות שתוצגנה להלן הן מתוך מחקרים שהמנחים בהם היו לברנטים.

## דוגמאות: "חינוך לחשיבה פיסיקלית"

להלן שתי דוגמאות לחינוך פיסיקלי שהתרחש אצלנו בשנה האחרונה: בשני המקרים המנחה למד רבות לצד תלמידיו.

### 1. דוגמא ראשונה - "סדרה הנדסית של כדור מנתר"

- ידע קודם של התלמידים - חוקי ניוטון וקינמטיקה, שימור אנרגיה, מתקף ותנע.
- ניסוי ראשון - מציאת הקשר בין גובה קפיצה לגובה הנפילה של כדור גומי.
- הגדרת המושג: מקדם תקומה.
- ניסוי שני - מדידות זמן של  $n$  קפיצות ושל זמן כולל עד לעצירת הכדור.
- פיתוח מודל מתמטי (על-ידי התלמידים) לזמן הקפיצות של הכדור עד עצירה.
- חישוב הזמן ובחינת הפער בין התוצאה המתקבלת בניסוי לבין תוצאת המודל. התוצאה שהתקבלה - זמן הקפיצות בניסוי גדול בהרבה מהזמן המחושב.
- השערות שונות של התלמידים בדבר הסיבות האפשריות לפער בין התוצאות.
- התלמידים העלו מספר השערות כמו חיכוך עם האוויר, זמן שהייה של הכדור על האריח אינו זניח, הטכנולוגיה שבה השתמשו למדידת מקדם התקומה אינה טובה מספיק (מקדם התקומה המחושב אינו מדויק).

### תהליכי העמקה

- על התלמידים והמנחה למצוא מודל תאורטי שניתן להעריך באמצעותו את סדר הגודל של זמן שהיית הכדור במגע עם האריח, הרצפה.
- על התלמידים והמנחה היה לחפש טכנולוגיה המאפשרת למדוד את זמן שהייה של הכדור על האריח.
- היכרות עם חיכוך התלוי במהירות:  $f = -bv^n$  מהו  $n$ ?
- התלמידים בנו סימולציה לתנועת הכדור המנתר בה. בנוסף לכוח הכובד הכניסו גם כוח חיכוך מְעַכֵּב בשל התנגדות האוויר לתנועת הכדור.
- התלמידים חוו במקום זה הפתעה מעניינת. הססמה הקבועה: הכול בגלל כוח החיכוך - הוכחה כשגויה.

### חזרות על ניסויים

- בדרך ישירה עוד פעם ועוד פעם.
- באמצעות חיישן כוח.
- באמצעות מצלמה מהירה.
- באמצעות גלי קול.
- הפלה מגבהים קטנים מאוד.
- דיון על שיטות המדידה והשפעתן על התוצאות - מקדם התקומה.

## הגדרת שאלת מחקר אותנטית: מהי השפעת גובה הנפילה על מקדם התקומה?

התלמידים קיבלו יותר מרמז במהלך המדידות שלהם לכך שמקדם התקומה אינו מספר קבוע, והוא הולך וגדל ככל שהנפילה מתרחשת מגבהים קטנים יותר. האם זו התשובה לשאלה? האם אין זו בעיה הקשורה בטכנולוגיית המדידה (שנעשתה על-ידי גלי קול)?

אולי בשנה הבאה ייבחר זוג תלמידים אחר לבחון שאלות אלו ולהתעמק בהן.



בסדנת המנחים חושבים ומתלבטים בצוותא בסוגיות באלקטרוסטטיקה



חוקרים בקבוצת עבודה

## 2. דוגמה שנייה - "שיטות שונות למדידת גודלה של טיפת מים":

□ ידע קודם של התלמידים: אופטיקה גאומטרית (החזרה, שבירה, נפיצה), התאבכות ועקיפה של אור (סדקים ומחסומים), עקיפה ממחסום עגול:  $\sin \theta = \frac{1.22\lambda}{d}$ , קשת בענן, תופעת 'בנות הקשת' (תופעת התאבכות התלויה בגודל הטיפה).

□ התלמידים מעלים מספר רב של רעיונות המאפשרים למדוד קוטר של טיפת מים:

— מדידת נפח או שקילה של 100 טיפות, מדידה ישירה על-ידי צילום והשוואה לגודל קטן ידוע (רקע נייר מילימטרי, מחט דקה מאוד, שערה שנמדדה קודם על-ידי עקיפה ובמיקרוסקופ וכו').

— מדידת גודל טיפה באמצעות תופעת בנות הקשת (ראו בהמשך המאמר).

— מדידה דרך נפילה בשני שערי אור - חישובים בקינמטיקה (מודל נפילה חופשית).

— מדידת גודל טיפה מתוך נפילתה בתווך (אוויר) - הגעה למהירות הגבול - מהירות הצניחה.

— מדידת גודל טיפה באמצעות תמונה עקיפה של קרן לייזר (בהסתמך על המודל המתמטי של סדק עגול).

□ חישוב קוטר הטיפה על פי תוצאות הניסוי בעקיפה, **הראה קוטר כפול מהתוצאות שהתקבלו בדרכים אחרות.**

□ התלמידים והמנחה היו צריכים לחפש פתרון לבעיה שנולדה.

□ השערות שהתלמידים העלו על מנת להסביר את הפער:

— הטיפה אינה עגולה, אינה משמשת כמחסום עגול.

— הטיפה שקופה, אינה משמשת כמחסום מלא.

— הטיפות בניסוי היו גדולות מדיי ביחס לרוחב האלומה של הלייזר.

- כדי לבחון את השערות א' ו-ב' הם ביצעו מדידות בתבנית עקיפה (לייזר) על כדורי ברזל (קטנים) בקטרים ידועים של 1 מ"מ, 2 מ"מ וכדומה.
- תוצאות המחקר העלו גם כן טעות של 100% בחישוב קוטר הכדורים באמצעות תבנית העקיפה. כמו כן לא נמצא הבדל באחוזי השגיאה בין הכדור הקטן לגדול.
- למידה מעמיקה נוספת של התלמידים והמנחה העלתה שהשימוש בנוסחה  $\sin \theta = \frac{1.22\lambda}{d}$  הוא שימוש מוצדק רק עבור דיסקה עגולה (דו־ממדית) או עבור חור, אך אינו נכון לכדור, או לגליל. הם למדו גם שעקיפה מכדורים העשויים מחומרים שונים תהיה שונה.
- הנה כי כן, עולות שאלות מחקר נוספות לשנה הבאה, שאלות שגם המנחה אינו יודע מראש את התשובה עליהן. בשנה הבאה יוכלו תלמידים חדשים להתמודד עם שאלות אלו ואף לבחון מחדש את התוצאות שהתקבלו בחקר השנה:
  - בחינת סוג החומר והשפעתו על תופעת העקיפה בכדורים.
  - השפעת הגאומטריה (חתכים עגולים שונים) על תופעת העקיפה.
  - השפעת רוחב האלומה על תהליך העקיפה של אור מכדורים בעלי קוטר ידוע.
 דרך אפשרית לכך היא לתת לתלמידים לקרוא את העבודה שנכתבה בשנים קודמות, לנסות להעמיק בה, לבחון, לחזק או להפריך משהו ממנה.

### פעילויות אזוריות באחר"ת - קבוצות אזוריות



מונא מוגרבי ועמרי בן זכרי חוקרים את תופעת הקשת ו"בנות הקשת", עבודת גמר בהנחייתו של ד"ר עמוס כהן

חלק מפעילויות החקר נעשה במסגרת של קבוצות אזוריות, כלומר, תלמידים המשתייכים למספר בתי ספר (רקעים שונים ותרבויות שונות) לומדים ביחד ומשתפים פעולה בתהליכי החקר

א. מצטיינים ט' - קבוצה משותפת של 40 תלמידים מצטיינים מכיתות ט' מבתי הספר "אופק" ו"השלום" המבצעים מחקרים משותפים בנושאי מדע ומתמטיקה. בפעילויות מושם דגש על שיתוף פעולה מדעי וחברתי.

ב. קבוצות עבודות גמר - קבוצות של כ-12-15 תלמידים מכל בתי הספר בשכבות י"א וי"ב המבצעים עבודות בהיקף של 5 יחידות פיסיקה במסגרת סדנה עם הנחיה הניתנת ברובה על ידי מנחי אחר"ת. אנו מקווים להגיע בעתיד לקבוצות בנות 20 תלמידים.

ג. קבוצות אסטרונומיה: שליטה מהמחשב האישי על טלסקופים רובוטיים (הכפולים בגודלם מהטלסקופ שבמצפה רמון) המאפשרים לתלמידי תיכון לבצע מחקר מעשי באסטרונומיה. נושא זה נמצא כרגע בשלבי פיתוח בהובלתו של בועז זוהר (מורה באולפנת צביה ובאחר"ת) ונעשה בקבוצות של כ-10 תלמידים (חלקם מבצעים או מגישים עבודות של 5 יחידות וחלקם - עבודות בהיקף של 2 יחידות). אנו מצפים בעתיד להגיע לקבוצות של 15 תלמידים.

ד. למידה בקבוצות קטנות בנושאים שונים בפיסיקה כמו: כאוס, גלי קול (כלי נגינה), גלי אור ועוד.

**הערה:** בשנת הלימודים תשס"ט התנהלה הלמידה המשותפת והמחקר המשותף של תלמידים יהודים וערבים על רקע פורענות בעכו ומלחמת עזה. למרות הקשיים שעלו, שיתוף הפעולה בין המנהלים, המנחים והתלמידים התעמק. הייתה זו תשובה שלנו שאפשר גם אחר"ת.

## שנת שירות י"ג - סיוע בחקר על ידי בוגרי אחר"ת:

בשנת תשס"ט סייעו לתלמידים במחקרם שלושה בוגרי המגמה לפסיקה 5 יחידות (שני בוגרים מבית הספר ה"שלום" משייח דנון ואחד מכברי). בוגרים אלו סייעו בפעילויות של מצטיינים ט', במיני פרויקטים בכיתות י' ואפילו בעבודות שנעשו עם תלמידי י"א.

בשנה הבאה תגדל הקבוצה לשש בנות: חמש מ"השלום" (שייח דנון) ובוגרת אחת מ"אופק" (עברון).

בשנה האחרונה למדנו והבנו יותר כיצד ניתן להסתייע בבוגרים אלה במשימות החקר השונות, ואנו מקווים להיעזר בבוגרים משנת י"ג גם בחטיבת הביניים כתמיכה למורים המלמדים בכיתות גדולות יחסית. סיוע זה יאפשר למורים בחט"ב לבצע מעבודות בכיתה ולא רק הדגמות.

בשנים הבאות אנו מצפים לגידול במספר הבוגרים שיבחרו להדריך במרכז במסגרת שנת שירות, ואנו מקווים להיעזר בהם יותר בהנחיה ובסיוע לתלמידים רבים יותר.

## הכשרת מנחים וסדנת מנחים

פעם בשבוע, מתקיימת סדנה של 3 שעות למנחי אחר"ת בהנחייתו של ד"ר עמוס כהן. במסגרת הסדנה מתעמקים המנחים בסוגיות פסיקליות, בבחינת ייתכנות של פרויקטים חדשניים ובוחנים גישות דידקטיות שונות להוראת נושאים מורכבים. בנוסף על אלו, אנו מקיימים הליך של ליווי והתמחות (סֵטֶז) למנחים צעירים, מורים ולבורנטים חסרי ניסיון, המסייעים לתלמידים בחקר - כשלצדם מנחה מנוסה. אנו מקווים להגיע למצב שבו בכל בית ספר יהיו מספיק מנחים, כך שמלאכת ההנחיה לא תעיק אלא תיעשה מתוך חדווה.

בתקופה האחרונה אנו עדים לרצונם של מדענים (חלקם בתהליך יציאה לפנסיה) לתרום ולהתנדב באחר"ת. בשנה הקרובה יצטרפו אלינו פרופ' סטיב ליפסון מהטכניון (בנושאים מגוונים מתחום אופטיקה, גלים, פסיקה מודרנית), ד"ר עובד דהרי וד"ר נתן נצר (שניהם מתחום האסטרונומיה). להתנדבות זו חשיבות עצומה גם בהיבט המקצועי (היא מרימה את כולנו למעלה), גם בהיבט המורלי (היא מוכיחה לנו פעם נוספת שאנו עושים דבר חשוב) וגם בהיבט הכלכלי.

להלן דוגמה לעבודת חקר בפסיקה בנושא: **החצוצרה - איזה מין צינור זה?** חקרו עודד רויטבלט ורועי שמלצר בהנחיית יותם הוכשטטר.

כשזוחנים גלים סומדים בטר צינור, אנו מוסיפים להפוך את המידה השימושית ולהזין איך נצטר צליל בכאי נשימה. לצורך כך אנו מצוינים בין שני מקרים שונים של גלוי שמה המוצאים כאן:

א. צינור "פתוח-פתוח" (שני קצותיו פתוחים)

גלוי השפה אומרים של הקו מוחזר מן הקצה הצינור אליו היפוך באזה. כדי שטיוצר תהודה או גל סומד יציב, כשהגל המוחזר חוזר למקור ההפרעה, עליו להיות באזה שווה אלל הנצטר באומה הרלס. הדרך שסובר הגל היא  $2L$  ( $L$  הוא אורך הצינור). בשפה ממטית:  $L = \frac{nv}{2f} \Rightarrow L = \frac{n\lambda}{2} \Rightarrow 2L = n \times \lambda$

כאשר  $\lambda$  הוא אורך הגל,  $v$  מהירות הקול,  $f$  הצירות הגל ו- $n$  מספר שלם. קיבלנו ביטוי עבור הצירות של הגלים הסומדים שיכולים להיות צינור פתוח-פתוח:  $f = \frac{nv}{2L}$

ב. צינור "פתוח-סגור" (קצה פתוח וקצה סגור)

צמקרה של קצה סגור, ישנן היפוך באזה של הגל בהחזרה. ומכאן באופן צומה:

$$f = \frac{(2n+1)v}{4L} \quad 2L = \left(n + \frac{1}{2}\right) \times \lambda \Rightarrow L = \frac{(2n+1)\lambda}{4} \Rightarrow L = \frac{(2n+1)}{4} \times \frac{v}{f}$$

או מצוינים אחרות, סדרת הצירות של צינור פתוח פתוח היא של כפולות צליות של  $\frac{v}{4L}$ , סדרת הצירות של צינור סגור פתוח היא של כפולות אי צליות של  $\frac{v}{4L}$

גל הקול המופק הוא סכום של גלי סיננס בצירות אלו, שהוא בצצם טור פורייה. האופן האנושי "יודעת לעשות בצצמה" התמרת פורייה, ולפרק את הגל הכולל אסיננסים המרכיבים אותו. אנו בצצם שומעים הרבה צלילים צבת אחת בכאי נשימה בכאי הנשימה.

נהוג לאמר את החצוצרה כצינור סגור פתוח, כאשר הפיה נחשבת הקצה הסגור שבו יש נקודת טבור אחר.

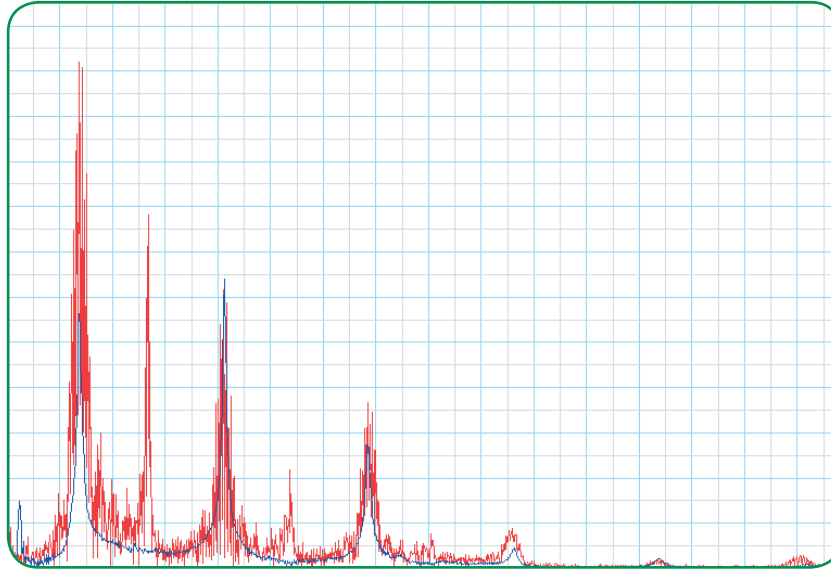
כך חשבנו גם אנו.

את הניסוי שנאמר כאן ערכנו חצוצרת פאסטיק פשוטה (המכבב במשחקי כדורגל וזכה לכינוי "צמורה"). השתמשנו בה כמודל בסיסי של חצוצרה - כמו חצוצרה אלל אחרנים (המשנים את אורך הצינור) ופיתולים (שהופכים את הכאי לקומפקטי):

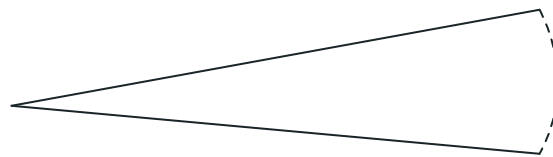


הקלטנו את צלילי המזמורה ואת הצליל הנוצר בצ'ינר לזילי רליו באותו אורך בדיוק. ביצענו התמרת פורייה לשני הארפים (צ'ינר רליו - כחול, מזמורה - אדום), הציר האופקי מציינ גזירות, והאנכי מציינ סוצמה?<sup>2</sup>

אחרי חיפוש רבים, נקלנו למאמר על החצוצרה שכתב פרופסור ל'ו וול (eflow eoJ) מאוניברסיטת דרום ווילס החזשה שבאוסטרליה. בתקשורת קצרה את דרך הדבור האלקטרוני נראה לנו שהחצוצרה אינה סונה על האפיונים (או על הקריטריונים) של סוגי הצ'ינרות הרליויים שמיננו למעלה, אלא היא צ'ינר קוני.



הצ'ינר הקוני ממחיל כרוח אפס ומתרחב בצורה אינארית משום שהאנליה שנושא הל נשמרת בסך הכול (בהלנחה של בליעה), במקרה של צ'ינר קוני גרסר עוצמת הל (אנליה) (למאןאסטח), בכל נקודה כמו המרחק כריבוס, משום שהשטח שעליו מקולרת האנליה לצל כמו כיפה של מעטפת כדור.



אמפליטודת הלחץ של הל ממנהלת ביחס ישר לשורש הסוצמה.

אם כר, לכל איבר בטור הפורייה, או לכל ל' סינוס, נוסל פקטור של  $\frac{1}{r}$ , כאשר  $r$  הוא המרחק מהפיה:

$$y = a \cdot \frac{1}{r} \sin(k_1 r) + b \cdot \frac{1}{r} \sin(k_2 r) + c \cdot \frac{1}{r} \sin(k_3 r) \dots$$

2 גרף זה היורה הפתעה גמורה לתלמידים וגם למנחה. נראה לפי הגרף שהזמבורה היא צינור פתוח-פתוח באורך גדול פי שניים מאורך הצינור.

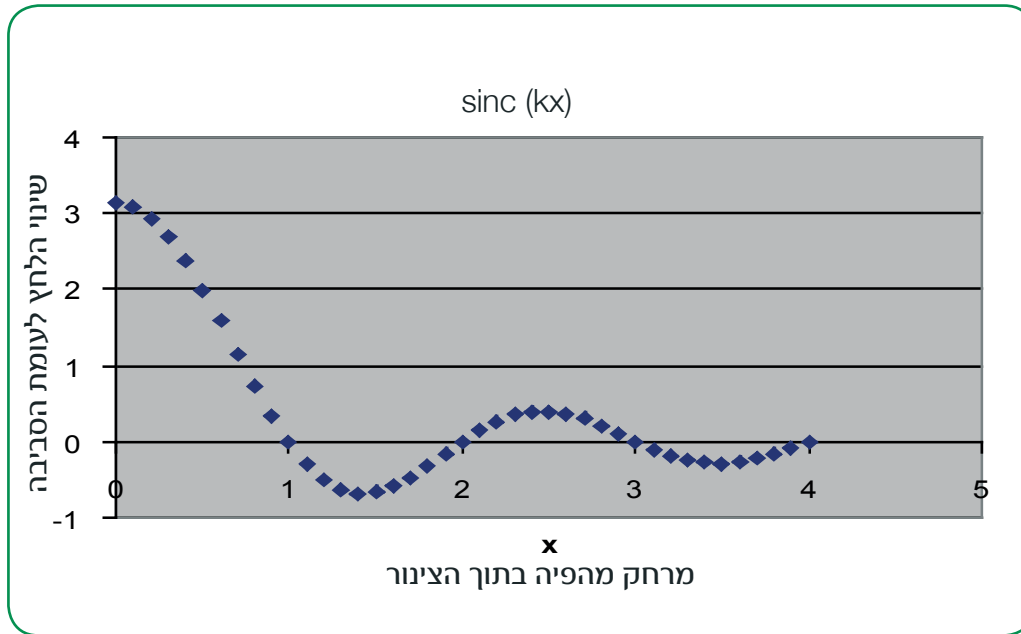


מה המשמעות של איבר הנראה כמו  $\frac{1}{r} \sin(k_i r)$ ?

זוהי פונקציית sinc(x). היא עונה לתנאי השקפה של צינור סגור פתוח - שינוי הלחץ z-x=0 הוא מקסימלי (נקודת טבור), ונקודה הפתוח הוא אפס - הלחץ קבוע ושווה לזוהי אטמוספרי (נקודת צומת).

עם זאת, סדרת אורכי הלחץ שמה, ולכן גם סדרת הגבירות שמה, זהה לסדרה של צינור פתוח-פתוח!

כמו שראינו בלחץ התמרת הפורייה, הלחץ האדום המאמר את הגבירות הלמזורה נראה כמו לחץ של צינור פתוח-פתוח שאורכו גדול פי שניים מאורך הצינור הלחיצתי הרגיל.



ההסבר שאנו למופעה הזאת מתבסס על התצפית הזאת - אפשר לראות שככל שהגבירות עולה, דו-סככות ונפלאות בסופו של דבר הגבירות הזוליות, עד שהארפים נעשים חופפים. אם כך, יש כאן שני מנגנונים: האחד - של צינור סגור פתוח רגיל, היוצר את הגבירות האלו, והשני - של צינור קונן היוצר את הגבירות הזוליות, והוא מנגנון חלש יותר המורשט בעיקר בגבירות הנמוכות. שילובם יוצר מרווח קטן פי שניים בין הגבירות של הלמזורה, ולכן הלחץ נראה כמו לחץ מצינור קצר פי שניים.

## מראי מקום

אקסלרוד, גנאדי ואלון, בת שבע (2007). שילוב עבודות חקר בהוראת הפיסיקה ברמה מוגברת בהיקף של 1-2.5 מתוך 5 יח"ל עם הערכה חלופית.

רחובות: המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.

גבאי, יבגניה ופלטקוב, אלכסנדר (2008). התאבכות ועקיפה משני מקורות: היבטים מתודיים ושבח למתמטיקה. תהודה, עיתון מורי הפיסיקה כרך 27, גיליון 1, עמ' 19-27.

גלוק, פאול (2008). פיסיקה ניסויית: הדגמות, פרויקטים, מודלים, היי-טק, אסטרונומיה. ירושלים: הוצאת המחבר.

זהר, ענת (עורכת) (2006). למידה בדרך החקר: אתגר מתמשך. ירושלים: מאגנס.

כהן, עמוס (2001). טוב מעשה במחשבה תחילה: מדריך ללמידה באמצעות פרויקטים מדעיים יצירתיים. תל אביב: מכון מופ"ת.

כהן, עמוס (1987). קשת בענן - ים של טיפות ואור. מדע, כרך ל"א חוברת 2. דצמבר 1987, עמ' 74-79. ירושלים: מוסד ויצמן לפרסומים במדעי הטבע ובטכנולוגיה.

[http://www.oranim.ac.il/personal/amos\\_c/Shared%20Documents/rainbow1.pdf](http://www.oranim.ac.il/personal/amos_c/Shared%20Documents/rainbow1.pdf)

כהן, עמוס (2005). המְשָׁגָה והעברה (טרנספר) בהוראת מדעים על דרך STES בגישת הפרויקט.

עבודת מחקר דוקטורט - אוניברסיטת חיפה.

<http://portal.macam.ac.il/ArticlePage.aspx?id=727>

מוגרבי, מונא; בן זכרי, עמרי - בהנחיית עמוס כהן (2009). עבודות חקר על בנות קשת: תלות הצבעים של בנות הקשת בגודל הטיפה.

קרקובר, זאב (1994). פעילויות חקר בבית הספר.

תהודה - עיתון מורי הפיסיקה. 16 (3) עמ' 19-23.

רויטבלט, עודד ושמלצר, רועי - בהנחיית יותם הוכשטטר (2009). החצוצרה - איזה מן צינור זה

רייך, משה; כהן, עמוס; פורת, גילית; הוכשטטר, יותם (2008). על מרכז אחר"ת בגליל במסגרת הכנס השנתי של מורי הפיסיקה - תשס"ח:

[http://stwww.weizmann.ac.il/g-phys/new\\_site/kenes08/kenes.htm](http://stwww.weizmann.ac.il/g-phys/new_site/kenes08/kenes.htm)

[http://stwww.weizmann.ac.il/g-phys/new\\_site/kenes08/galil.ppt#276,8](http://stwww.weizmann.ac.il/g-phys/new_site/kenes08/galil.ppt#276,8)



צוות מורי הפיסיקה בבית הספר מגור כברי במעמד קבלת הפרס לצוות מורים מצטיין על שם עמוס דה-שליט, תש"ס