

---

## שם הניסוי: גלים אקוסטיים

---

### 1. מטרת הניסוי:

- מדידת מהירות הפאזה של גל אקוסטי בנוזלים ובאוויר
- מדידת מהירות החבורה של גל אקוסטי
- מדידת תלות מהירות הפאזה בטמפרטורה

### 2. תיאוריה

#### 2.1. גל אקוסטי

גל אקוסטי הוא גל אורכי היוצר הפרעה במידת הלחץ של התווך שבו הוא מתקדם, חלקיקי החומר של תווך ההתקדמות מעבירים את ההפרעה ולכן, בשונה מגל אלקטרומגנטי, גל אקוסטי לא יכול להתקיים בריק ומהירות התקדמותו תלויה בסוג החומר ובטמפרטורה שלו.

טווח התדירויות של גלים אקוסטיים מחולק לשלושה תחומים:

- תת שמע (Infrasonic waves) -  $f < 20\text{Hz}$

- תחום השמע -  $20\text{Hz} < f < 20,000\text{Hz}$

- על שמע (ultrasonic waves) -  $f > 20,000\text{Hz}$

במדע נעשה שימוש רב בתחום העל שמע על מנת לחקור סביבות מימיות כגון אוקיינוסים ורקמות (צילום ultrasound) שבהם לא ניתן להשתמש בגלים אלקטרומגנטיים עקב הבליעה החזקה שלהם.

#### 2.2. מהירות הפאזה ומהירות החבורה

בפיסיקה מבחינים בין שתי סוגים של מהירויות התקדמות הגל – מהירות הפאזה ומהירות החבורה.

מהירות הפאזה של גל היא הקצב שבו מופע הגל מתקדם במרחב.

גל מתואר בצורה מתמטית בצורה הבאה:

$$y = A \cdot \sin(\omega t - kx + \varphi)$$

על מנת שהפזה תישאר קבועה עם השתנות הזמן והמקום נדרש להתקיים

$$\omega t - kx = 0$$

התנאי מתקיים כאשר

$$\frac{x}{t} = \frac{\omega}{k}$$

ומכיוון ש

$$w = \frac{2\pi}{T}, k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{ו} \quad \frac{x}{t} = v$$

אנו מקבלים שמהירות הפאזה היא :

$$(1) \quad v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T}$$

מהירות זו יכולה לתאר גל בעל תדירות יחידה, אך כאשר ישנה חבילת גלים כלומר ההפרעה מורכבת מכמה תדירויות, ישנו צורך לתאר גם את מהירות התקדמות המעטפת של חבילת הגלים מהירות זאת קרויה **מהירות החבורה** (group velocity) מבחינה מתמטית ניתן לבטא את מהירות החבורה באמצעות חיבור של שני גלים עם הפרשי תדירות  $\Delta\omega$  והפרשי מספר גל  $\Delta k$  המתוארים ע"י (2) :

$$(2) \quad \begin{aligned} & A \sin(\omega t - kx) + A \sin((\omega + \Delta\omega)t - (k + \Delta k)x) = \\ & 2A \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}x\right) \sin\left(\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2}\right)t - \left(k + \frac{\Delta k}{2}\right)x\right) \end{aligned}$$

התוצאה המתקבלת מורכבת משני חלקים :

$$\sin\left(\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2}\right)t - \left(k + \frac{\Delta k}{2}\right)x\right)$$

**גל נושא** בעל תדירות ומספר גל השווים לממוצע התדירויות ומספרי הגל של הגלים המרכיבים את חבורת הגלים.

$$2A \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}x\right)$$

**מעטפת הגל** בעלת תדירות ומספר גל השווים למחצית ההפרש התדירויות ומספרי הגל של הגלים המרכיבים את חבורת הגלים. מעטפת הגל משנה את האמפליטודה של הגל הנושא ובכך משנה את ההספק המועבר באמצעות ההפרעה. מהירות החבורה היא למעשה מהירות הפאזה של מעטפת הגל, והיא קובעת באיזו מהירות ניתן להעביר הספק דרך התווך. לפי נוסחת מהירות הפאזה (1) ניתן לראות שמהירות הפאזה של מעטפת הגל נתונה ע"י :

$$(3) \quad v_g = \frac{\frac{\Delta\omega}{2}}{\frac{\Delta k}{2}} = \frac{\partial\omega}{\partial k}$$

וזאת למעשה מהירות החבורה.

כאשר במקום  $\omega$  בנוסחה (3) נציב  $v_p \cdot k$  (על פי (1)), נקבל :

$$(4) \quad v_g = v_p + k \frac{\partial v_p}{\partial k}$$

ניתן לראות שכאשר  $\frac{\partial v_p}{\partial k} = 0$ , כלומר מהירות הפאזה לא משתנה כתלות באורך הגל (אין דיספרציה), מהירות החבורה שווה למהירות הפאזה.

### 2.3 מדידת מהירות הגל כתלות בשינוי הפאזה

לאורך הגל כל נקודה קשורה עם נקודה אחרת בזמן נתון באמצעות שינוי פאזה היחסי למרחק בין הנקודות, כפי שמתואר בנוסחה (5).

$$(5) \quad \Delta\phi = \frac{\Delta l}{\lambda} \cdot 2\pi$$

ולכן מתוך מדידת מרחק בין שני נקודות לאורך הגל ומדידת הפרש המופע ביניהם ניתן למצוא את אורך הגל לפי :

$$(6) \quad \lambda = \frac{\Delta l}{\Delta\phi} \cdot 2\pi$$

וכאשר ידוע תדר הגל  $f$ , ניתן למצוא את מהירות הפאזה של הגל לפי :

$$(7) \quad v_p = \lambda \cdot f$$

### 2.4 מדידת מהירות הגל כתלות בשינוי תדירות

היחס בין המרחק בין המשדר לגלאי למהירות הגל  $\left(\frac{l}{v}\right)$  נותן לנו את הזמן שלקח להפרעה להגיע מהמשדר לגלאי, הכפלת הזמן בתדירות הזוויתית של הגל  $2\pi \cdot f_1 \left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}}\right]$  נותנת את הפרש המופע בין שתי הנקודות כפי שמתואר ב (8) :

$$(8) \quad \phi_{l,1} = \phi_0 + \frac{l \cdot f_1}{v} \cdot 2\pi$$

במידה ומשנים את התדירות ל  $2\pi \cdot f_2$  הפרש המופע במרחק  $l$  משתנה אף הוא :

$$(9) \quad \phi_{l,2} = \phi_0 + \frac{l \cdot f_2}{v} \cdot 2\pi$$

מתוך חיסור (8) מ (9) ניתן לבטא את מהירות הגל בצורה הבאה :

$$(10) \quad v = \frac{\Delta f \cdot l}{\Delta\phi} \cdot 2\pi$$

## 2.5 גלים עומדים<sup>1</sup>

כאשר שני גלים בעלי אותה תדירות ואותה אמפליטודה נעים בכיוונים הפוכים נוצרת התאבכות בין הגלים וכתוצאה מכך נוצר גל עומד שהוא גל שאינו מתקדם במרחב והמשרעת המקסימאלית שלו משתנה כתלות במיקום. ניתן לתאר בצורה מתמטית גל עומד באמצעות חיבור של שני גלים :  
נבטא את שני הגלים כ  $y_1, y_2$

$$y_1 = y_0 \cdot \sin(kx - \omega t)$$

$$y_2 = y_0 \cdot \sin(kx + \omega t)$$

את תוצאת ההתאבכות ביניהם ניתן לתאר כסכום שני הגלים :

$$(11) \quad \begin{aligned} y &= y_0 \cdot \sin(kx - \omega t) + y_0 \cdot \sin(kx + \omega t) \\ y &= 2y_0 \cos(\omega t) \sin(kx) \end{aligned}$$

בנוסחה (11) ניתן לראות שמשרעת הגל העומד היא  $2y_0 \sin(kx)$  והיא משתנה בצורה

מחזורית כתלות במיקום. עבור  $x = 0, \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \dots$  המשרעת תתאפס, נקודות אלו

קריות נקודות צומת (nodes) ואילו כאשר  $x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots$  המשרעת מקסימאלית

ותהיה שווה ל  $2y_0$  נקודות אלו קריות אנטי-צומת (antinodes) או נקודות טבור.

## 2.6 גלים עומדים בשפופרת ותדרי תהודה (רזוננס)

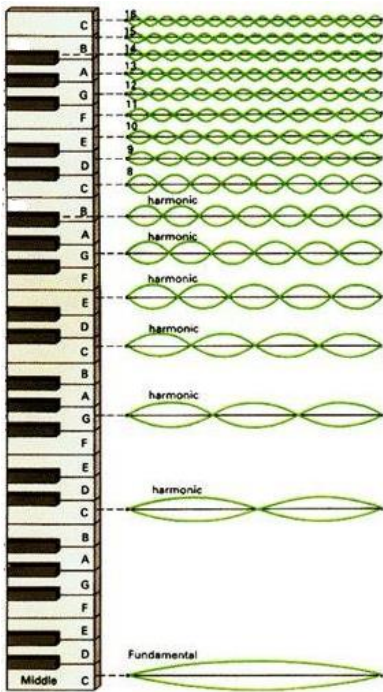
המחשה פשוטה ביותר לגל עומד מתקבלת במיתר ששני קצותיו מעוגנים בנקודות קבועות. כל גל שנוצר במיתר מוחזר משני הקצוות וכתוצאה מהתאבכות הגלים, נוצר גל עומד. גלים עומדים נוצרים גם בשפופרת אויר כשגלי קול אורכיים מוחזרים מקצות שפופרת אוויר.

למעשה גל הקול מוחזר פעמים רבות אחורה וקדימה מהקצוות של השפופרת וההחזרות הללו מתאבכות האחת עם השנייה.

בתדירויות תנודה ספציפיות, כל הגלים המוחזרים יהיו באותה פאזה והגל העומד הנוצר יהיה בעל משרעת מכסימלית. תדירויות אלו נקראות תדירויות תהודה (רזוננס), עבור תדירויות אחרות ההחזרות יבטלו אחת את השנייה והמשרעת תדעך (זאת הסיבה שבכלי נשיפה ומיתר מתקבל גל בתדר בודד).

<sup>1</sup> מומלץ מאוד להיכנס לשתי הסימולציות הבאות : [גלים במיתר](#), [גלים עומדים](#) לצורך המחשת הנושא.

החזרה של גלי הקול מתרחשת בשתי הקצוות של השפופרת: הפתוח והסגור (מכיוון שהלחץ בשפופרת גבוה מהלחץ בחדר). אם הקצה של השפופרת פתוח מולקולות האויר יכולות לצאת ולהיכנס באופן חופשי ולכן נקודות הקצוות של



שפופרת פתוחה הן נקודות טבור של העתקה (נקודות שבהם האמפליטודה של ויברציות האויר מכסימליות).

מצב שבו בשני קצוות השפופרת מתקיים טבור של העתקה מתאפשר רק בתנאי שאורך השפופרת הוא כפולה שלמה של חצי אורך הגל (כי המרחק בין שתי נקודות צומת הוא חצי אורך גל) ולכן עבור קצה פתוח, תהודה מתרחשת כאשר אורך הגל מקיים את משוואה 12.

$$(12) \quad L = n \frac{\lambda}{2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

כאשר: L אורך השפופרת ו-λ אורך הגל.

באורכי גל אלה מתאפשרת תבנית גלים עומדים שבהם נקודת התבור של ההעתקה יתקימו בצורה טבעית בכל קצה של השפופרת.

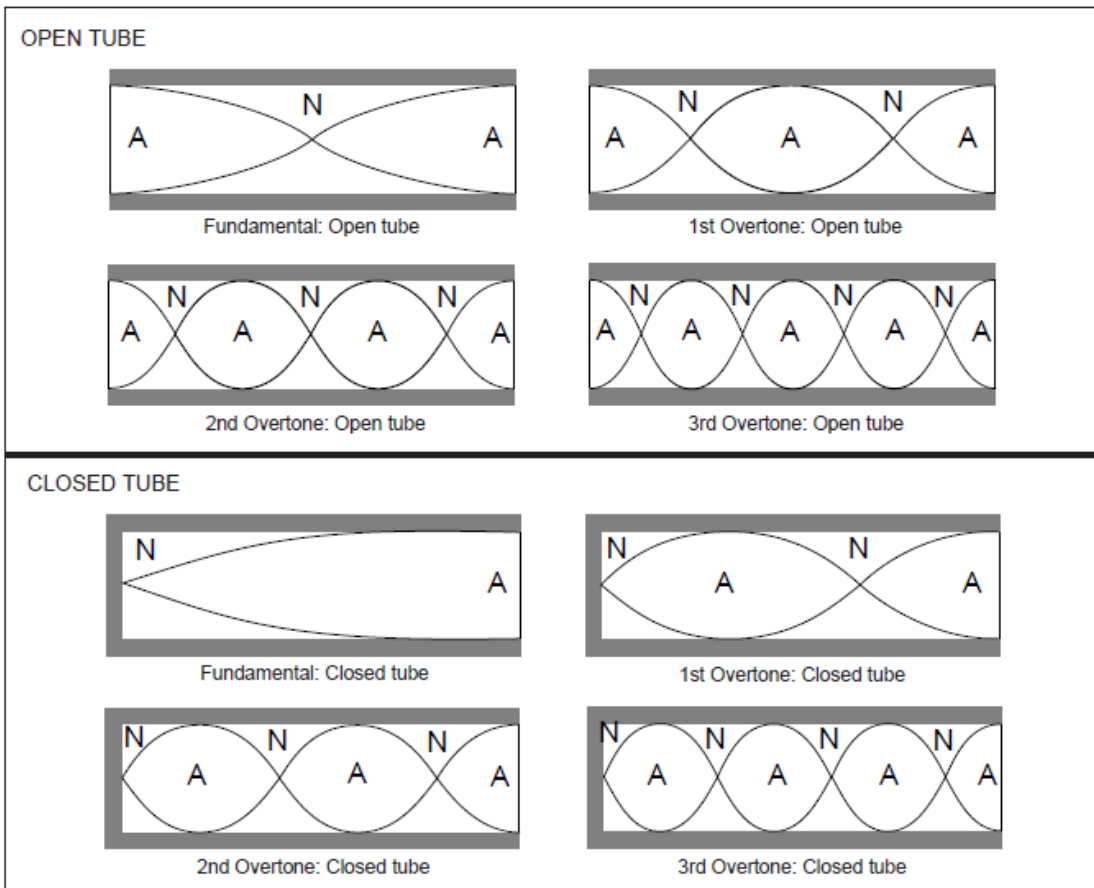
איור 1: גלים עומדים במיתרי פסנתר

במצב בו קצה השפופרת סגור המולקולות לא יכולת לנוע

אל המחסום או ממנו ולכן יתקיים נקודת צומת של העתקה ולצורך קיום גלים עומדים נדרש להתקיים התנאי הבא:

$$(13) \quad L = n \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{4} \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

באיור 2 מוצגות ארבעה מצבים ראשוניים אפשריים של תהודה בשפופרת פתוחה וסגורה מצד אחד. המצב הראשון של תהודה (n=1) נקרא בסיסי. מצבים גבוהים יותר (n>1) של תהודה נקראים צלילים הרמוניים (overtones).



**איור 2:** ארבעת המצבים הרזוננטיים הראשונים בשפופרת פתוחה וסגורה מצד אחד. A מתאר את נקודות טבור של העתקה ו N מתאר את נקודות צומת של העתקה.

הנוסחאות והדיאגרמות לעיל מהוות קירוב בלבד למצב האמיתי בעיקר בגלל שהתנהגות הגלים בקצוות השפופרת (במיוחד בקצה הפתוח) תלויה בגורמים כמו קוטר השפופרת ותדירות הגלים.

התיאור האמיתי עבור שפופרת פתוחה ניתן ע"י המשוואה הבאה:

$$(14) \quad L + 0.8d = n \frac{\lambda}{2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

כאשר: d הוא קוטר השפופרת.

$$(15) \quad L + 0.4d = n \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{4} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

ועבור שפופרת סגורה

## 2.7 מהירות גל אקוסטי בנוזל כתלות בטמפרטורה

ניתן להראות (ראה נספח) שהפרעת לחץ בנוזלים מתפשטת בצורת גל במהירות

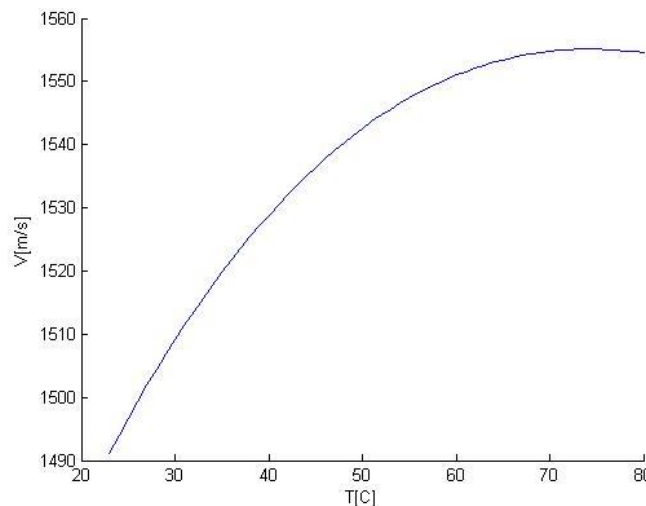
$$(16) \quad v = \sqrt{\frac{\beta}{\rho_0}}$$

כאשר  $\beta$  הוא מודול הנפח שמבטא את שינוי הלחץ כתוצאה משינוי הצפיפות

$$\beta = \rho_0 \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_{\rho_0}$$

הוא צפיפות הנוזל במצב שיווי משקל.

עבור כל הנוזלים מלבד מים מודול הנפח ( $\beta$ ) והצפיפות יורדים כתוצאה מעליית הטמפרטורה וכתוצאה מכך מהירות הקול יורדת בצורה כמעט ליניארית כתלות בעליית הטמפרטורה. המים מציגים תכונה ייחודית ביחס לשאר הנוזלים, מודול הנפח עולה כאשר הטמפרטורה עולה עד למקסימום באזור  $60^\circ C$  ורק אז מתחילה לרדת, כתוצאה מכך מהירות הקול במים מגיעה לשיא באזור  $74^\circ C$  (איור 3).



איור 3: מהירות הקול במים מזוקקים כתלות בטמפרטורה (Bilaniuk and Wong)

## 2.8 גביש פייזואלקטרי

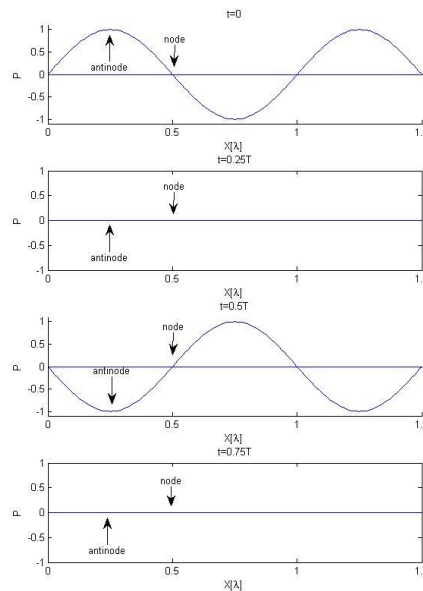
במהלך הניסוי ניצור גלים אקוסטיים אולטרא סוניים ( $850kHz < f < 1150kHz$ ) בנוזלים בעזרת משדר הפועל באמצעות גביש פייזואלקטרי, גביש פייזואלקטרי משנה את מימדיו כתוצאה מהפעלת מתח עליו, השינויים הם בסדר גודל של ננומטרים בודדים ותנודות אלו בגודל הגביש יוצרות תנודות מכאניות העוברות לתווך חיצוני וגורמים להתפשטות גל קול בתדר שבו מופעל על הגביש מתח חילופין.

### 3 מהלך הניסוי

#### חלק ראשון : מהירות הקול בנוזל

##### 3.1 חישוב מהירות הקול בנוזלים בצורה אופטית

בניסוי זה ניצור גלים אקוסטיים עומדים במיכל באמצעות שידור גל אקוסטי אשר יבצע התאבכות עם הגל המוחזר מתחתית המיכל. לאורך הגל העומד ישנם שינויים בלחץ הנוזל כתלות בזמן, השינויים יהיו מקסימאליים בנקודות האנטי-צומת (antinode) שבהם ישנה התאבכות בונה בין הגל האקוסטי המשודר והמוחזר ולא יהיו קיימים כלל בנקודות הצומת (node) שבהם ישנה התאבכות הורסת, כפי שמוצג באיור 4.



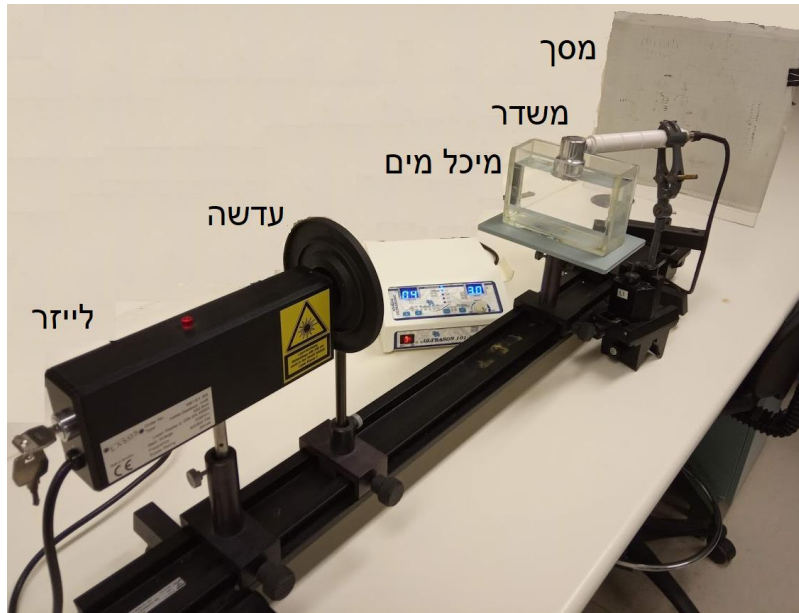
איור 4 : שינוי לחץ לאורך גל עומד במשך זמן מחזור.

ערך מקדם השבירה של הנוזל פרופורציוני לשינויי הלחץ וכך נוצרת מחזוריות של  $\frac{1}{2} \lambda_{ac}$  (המרחק בין שתי נקודות צומת בגל עומד) במקדם השבירה של הנוזל לאורך הגל העומד.

כדי להבחין בנקודות הצומת והאנטי צומת בגל העומד, נעביר קרן לייזר באורך גל נראה ( $632.8nm$ ), המפוזרת באמצעות עדשה, בניצב לגל העומד שיצרנו (איור 6). הקרניים יעברו באזורים שבהם מקדם השבירה גבוה, כלומר בנקודות האנטי-צומת ולפיכך ייווצרו פסי אור וחושך מחזוריים על המסך שעליו מוקרן הלייזר.



### 3.1.1 בניית מערכת הניסוי



איור 5: מערכת הניסוי

- התקן את לייזר ההליום-ניאון בקצה המעמד האופטי.

- הנח מסך לבן במרחק של כ-1.5 מטר מיציאת הלייזר, וודא שהלייזר פוגע במרכז המסך.

- התקן את העדשה המרכזת ( $f=20\text{mm}$ ) בצמוד ללייזר ובדוק שכתם הלייזר הנוצר על המסך לא סטה ממקום כתם הלייזר לפני הנחת העדשה.

- הנח את מיכל המים ( $150*55*100\text{mm}$ ) על המעמד הייעודי, במרחק של כ-50 ס"מ מהלייזר באופן שקרן הלייזר תעבור במרכז המיכל.

- מלא את מיכל המים במים מזוקקים, וקבע את המשדר מעל המיכל בצורה שיהיה טבול מילימטרים ספורים בתוך המים, המשדר משדר תדר קבוע של  $1\text{MHz}$ .

- הפעל את המשדר (באמצעות הדלקת המכשיר, קביעת זמן פעולה ולחיצה על הפעל), הגבר את האמפליטודה ושנה את גובה המשדר עד שיהיה ניתן לזהות פסים ברורים על המסך.

#### הרחבת רשות

במהלך הניסוי ניתן להבחין בבועות אוויר שנכלאות במים באזור הגל העומד. מדוע לדעתך הבועות נלכדות? הסתכל בהשתקפות הבועות על המסך, על אילו פסים הבועות נראות, האם זה תואם להסבר הקודם?

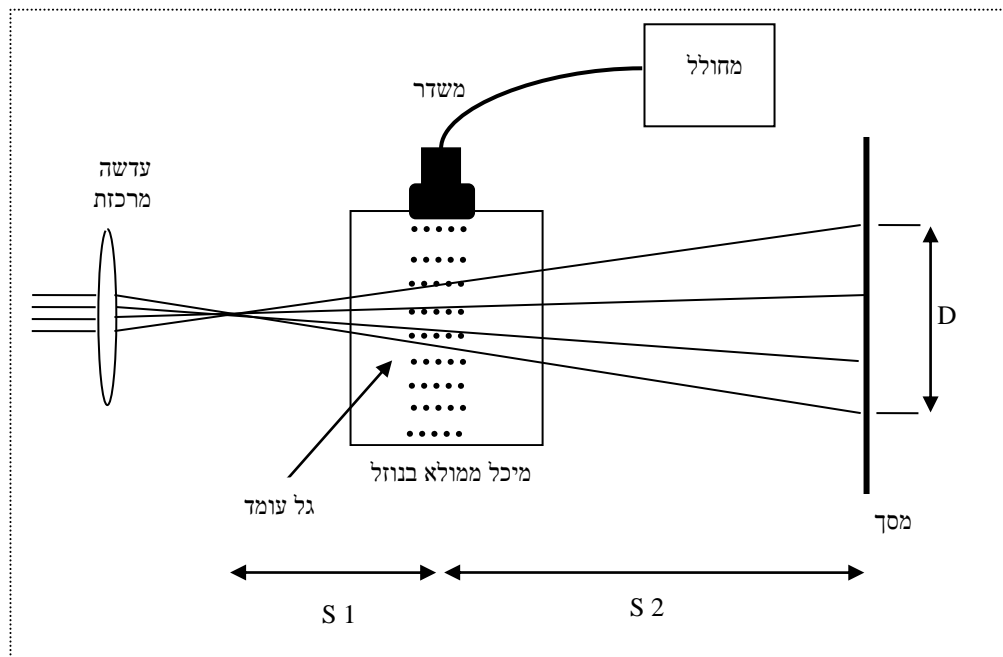
### 3.1.2 עיבוד תוצאות

כל מחזור של פס אור ופס חושך הנראה על המסך משקף למעשה הגדלה של מחזור צומת ואנטי-צומת בגל העומד, כדי למצוא את אורך מחזור פסי האור חושך, מדוד את קוטר כתם האור הנראה על המסך (D) וחלק במספר המחזורים (פס אור ופס חושך) המופיעים עליו.

היחס בין אורך מחזור פסי האור לאורך מחזור בגל העומד נובע מהתרחבות אלומת הלייזר עם ההתקדמות והוא פרופורציונאלי ליחס בין המרחק מנקודת הפוקוס של הקרן עד לגל העומד למרחק מנקודת הפוקוס עד למסך, יחס ההגדלה נתון ב(17).

$$(17) \quad M = \frac{S_1 + S_2}{S_1}$$

- באמצעות חישוב אורך מחזור של צומת ואנטי-צומת בגל העומד, מצא את אורך הגל האקוסטי ואת מהירות הגל במים.

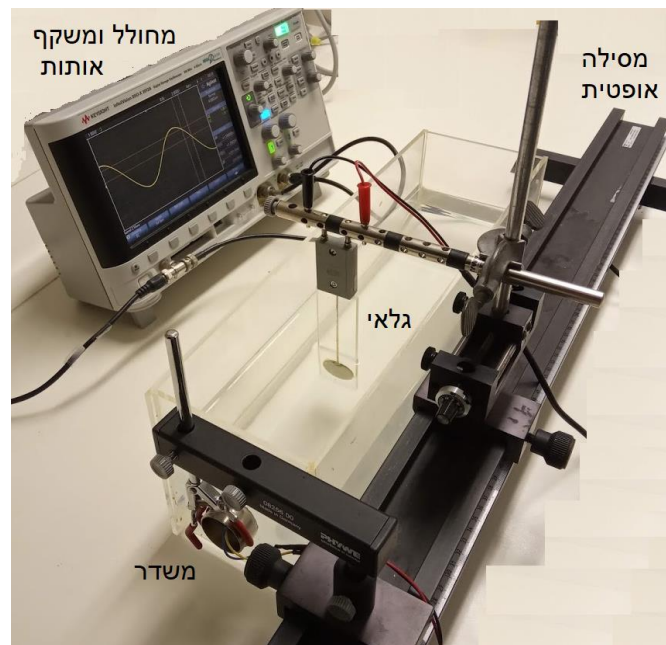


איור 6: תרשים סכמתי של מערכת הניסוי.

### 3.2 מדידת מהירות הפאזה של הגל

#### מערכת הניסוי

- הנח את מיכל הנוזלים הגדול במקביל למסילה האופטית (איור 7) .
- הצמד את המשדר לדופן המיכל כך שהגל המשודר יוכל להתקדם לאורך המיכל.
- לצורך צימוד יעיל של הגלים המשודרים מהמשדר למיכל, מרח שכבה של גיל אולטראסוני על כל אזור המגע של המשדר במיכל.
- מקם את הגלאי בתוך המיכל, כאשר הוא מונח על מעמד אופטי עם אפשרות הזזה עדינה, הגלאי צריך להיות מכוון כלפי המשדר .
- חבר את יציאת ה-MONITOR במחולל ל-CH1 בסקופ ואת הגלאי ל-CH2 .
- הפעל את המשדר במצב סינוסיאלי וכוון את אמפליטודת הגל לחצי מהעוצמה המקסימאלית.
- בשלב זה אמורים לראות על הסקופ את קריאת הגל מהמשודר מהגלאי.



איור 7 : מערכת הניסוי עבור 3.2 והלאה

### 3.2.1 מדידת מהירות הגל כתלות בשינויי מרחק

הצג על הסקופ את האות המשודר ואת האות מהגלאי ללא הפרש פאזה בניהם באמצעות הזזת הגלאי ושינוי המופע של האות המשודר (ע"י כפתור הפאזה במחולל).

את הגלאי ניתן להזיז בעזרת סיבוב בורג הזזה, סיבוב שלם של הבורג יוצר תזוזה של 0.5 מ"מ.

- קבע את התדר של המשדר.
- קבע את המיקום ההתחלתי של הגלאי ומדוד את המרחק בינו לבין המשדר.
- הזז את הגלאי ומדוד את השינוי בפאזה היחסית בין האות המשודר לבין האות מהגלאי.
- ערוך גרף של השינוי בפאזה נגד השינוי במיקום הגלאי.
- חשב את מהירות הקול.

### 3.2.2 מדידת מהירות הגל כתלות בשינוי התדר

הצג על הסקופ את האות מהמשדר והאות מהגלאי ללא הפרש פאזה בניהם, כעת שנה את תדירות הגל המשודר מהמינימום למקסימום והבחן בהפרשי הפאזה של האות בגלאי שהם יוצרים.

- קבע את המיקום של הגלאי.
- קבע את התדר ההתחלתי של המשדר.
- הזז את התדר ומדוד את השינוי בפאזה היחסית בין האות המשודר לבין האות מהגלאי.
- ערוך גרף של השינוי בפאזה נגד השינוי בתדר.
- חשב את מהירות הקול.

### 3.3 מדידת מהירות החבורה של הגל

חבר את יציאת הטריגר החיצוני בסקופ ליציאת ה *SYNCHR* במחולל וכוון אותו לטריגר חיצוני.

הפעל את המשדר במצב פולסי ונסה לראות בסקופ את הפולס המשודר ואת האות הנקלט בגלאי, רשום את הזמן שלקח הפולס להגיע לגלאי לפי הסקופ ואת מרחק

הגלאי מהמשדר, חוזר על המדידות עבור מרחקים שונים. הצג את התוצאות בגרף וחשב את מהירות החבורה.  
השווה את מהירות החבורה למהירות הפאזה שמדדת, מה ניתן להסיק מתוך ההשוואה ?

#### **3.4 מדידת תלות מהירות הגל בשינויי טמפרטורה**

החזר את המחולל למצב סינוסיאלי והצג את אות המשדר והגלאי על הסקופ. הפעל את התרמוסטט המותקן על המיכל (שים לב, גוף החימום של התרמוסטט חייב להיות טבול במים!), לאחר זמן קצר אמור להופיע עליו טמפרטורת המים. מדוד את מהירות הפאזה כתלות בשינויי מרחק כפי שמוסבר ב-3.2.1 ורשום את הטמפרטורה שעבורה מדדת.  
חזור על מדידת מהירות הפאזה, כאשר אתה מעלה את הטמפרטורה בקפיצות של  $10^{\circ}\text{C}$ , בטווח של

כדי להעלות את הטמפרטורה יש ללחוץ על הכפתור הצהוב ולאחר שמופיע הכיתוב SEE ללחוץ שנית, כעת ניתן להעלות ולהוריד את הטמפרטורה בעזרת החיצים.

שים לב ! התרמוסטט מסוגל להעלות את הטמפרטורה בלבד, אין דרך לקרר את המים אלה באמצעות המתנה מרובה, אל תעלה טמפרטורה ללא צורך !

- הצג את התוצאות בגרף, כולל חישובי שגיאות והשווה את תוצאותיך לספרות

(לדוגמה - [Underwater Acoustics - Speed of Sound in Pure Water](#))

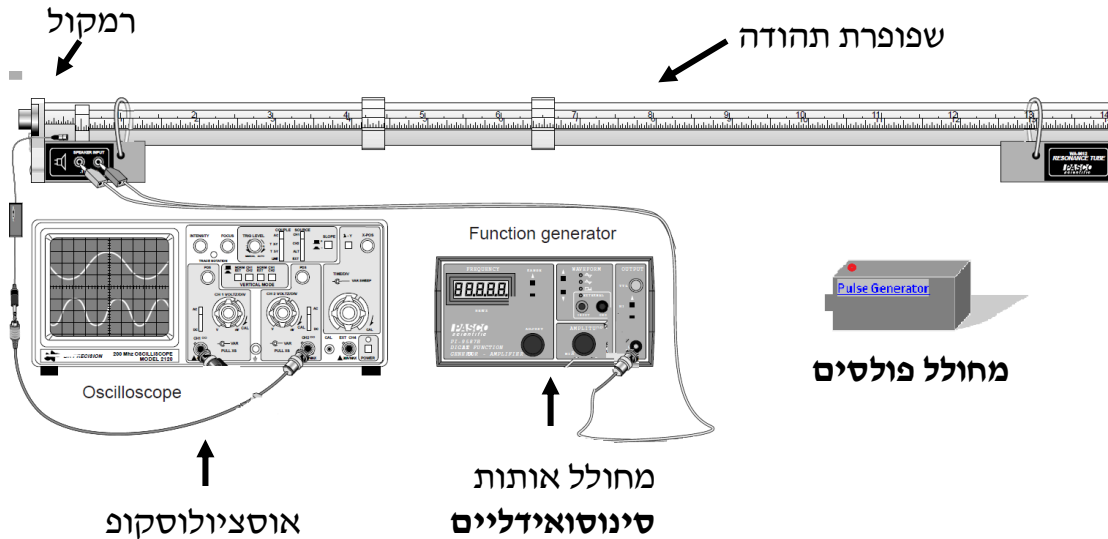
### 3.3 חלק שני : מהירות הקול באוויר

#### 3.3.1 תיאור המכשור בניסוי

- שפופרת באורך 90 ס"מ עם סקלה מטריית. שפופרת האוויר מאפשרת חקירה של התקדמות גלי קול באוויר במימד אחד וכן חקירת תבניות של גלים עומדים בשפופרת פתוחה או סגורה.
- שתי עמדות לקיבוע השפופרת, אחת מהן כוללת רמקול.
- מיקרופון זעיר עם מגבר וחיבור קואקסיאלי לאוסצילוסקופ.
- מחולל פולסים בתדר 10 Hz.
- מחולל אותות סינוסואידלי.
- אוסצילוסקופ.
- בוכנה.

#### 3.3.2 מדידת תדירויות רזוננס בשפופרת פתוחה

1. בנה את המערכת המתוארת באיור 8. מקם את המיקרופון בחריץ המתאים מתחת לרמקול. ניתן להסיט את המיקרופון לאורך השפופרת.



איור 8: המערכת הניסויית

**הערה חשובה:** אם המתח לרמקול יהיה גבוה מדי אתה תקלקל את הרמקול. לכן העלה את המתח בזהירות. הרמקול צריך להשמיע קול שניתן לשמוע אותו בברור, אבל לא בעוצמה רבה. שים לב לעובדה שמחולל האותות יעיל יותר בתדירות גבוהות, לכן ייתכן שאתה תצטרך להוריד את המתח בתדירויות גבוהות.

2. הפעל את האוסצילוסקופ, קבע את מהירות הסריקה ל-  $5 \text{ ms/div}$  וקבע את ההגברה (gain) של ערוץ 1 ל  $5 \text{ mV/div}$ . הפעל את המגבר של המיקרופון ואת מחולל האותות הסינוסיאדלי. מקם את המיקרופון באמצע השפופרת וכוון את תדירות המחולל ל-  $100 \text{ Hz}$ . העלה את העוצמה באיטיות עד שתשמע קול מהרמקול (אסור שהעוצמה תעבור את מחסום ה-5 וולט אחרת תקלקל את הרמקול). העלה את התדירות של גלי הקול והקשב בזהירות. באופן כללי עוצמת הקול תהיה גבוהה יותר עם העלאת התדירות מאחר והרמקול יעיל יותר בתדירויות גבוהות. עם זאת שים לב בסקופ (בתדירויות גבוהות גם בשמיעה) למכסימום יחסי ברמת הקול- כאשר תעלה את התדירות. בתדירות מסוימת תגיע למכסימום המצביע על מוד תהודה בשפופרת.
- שימו לב ! המיקרופון מודד לחץ ולא העתקה, נקודת טבור וצומת של העתקה היא נקודת צומת וטבור של לחץ בהתאמה.
3. מצא את תדירות התהודה הנמוכה ביותר, ורשום את הערך שלה.
4. התקדם עם המיקרופון מתחילת השפופרת עד סופה, ובדוק את מספר "נקודות הטבור" המתקבלות.
5. מדוד כמה תדירויות תהודה, ובכל תדירות מצא את מספר נקודות הטבור ע"י התקדמות עם המיקרופון לאורך השפופרת.
6. התנאי לתדירות תהודה בשפופרת פתוחה הנתון במשוואה 16 ניתן גם לניסוח בצורה הבאה :

$$v = f \lambda$$

$$L = n \frac{v}{2f}$$

$$n = \frac{2L}{v} f$$

(18)

כאשר:  $L$  - אורך השפופרת,  $\lambda$  - אורך הגל,  $f$  - התדירות,  $V$  מהירות הקול ומספר המוד.

צייר גרף המתאר את מספר נקודות הטבור כפונקציה של תדירות הרזוננס וחשב בעזרתו את מהירות הקול בשפופרת. בדוק אם התוצאה

$$v = 331.5 \frac{m}{sec} + 0.607 T$$

של הקול

כאשר  $T$  היא הטמפרטורה במעלות צלזיוס.

7. הצג את תדרי התהודה שמצאת כאשר הם מחולקים בתדר

הבסיס...  $\frac{f_3}{f_1}; \frac{f_2}{f_1}; \frac{f_1}{f_1}$  , במה ניתן להבחין ?

8. סגור את קצה השפופרת בעזרת הסוגר וחזור על התהליך עבור מצב בו קצה אחד סגור.

9. הפעל תדר גדול מ 800 Hz והקטן את אורך השפופרת בעזרת הזזת הסוגר, רשום את האורכים שעבורם נוצרים גלים עומדים וחשב בעזרתם את מהירות הקול. הצג את התוצאות בגרף.

### 3.3.3 מדידת מהירות הקול באמצעות הדים

1. עבור מדידה זו החלף את מחולל הפונקציות במחולל הפולסים. מקם את המיקרופון בתחילת השפופרת בצמוד לרמקול.

2. הפעל את האוסצילוסקופ, קבע את מהירות הסריקה ל- 5 ms/div ואת ההגברה (gain) של ערוץ 1 ל 5 mV/div. הפעל את המגבר ואת מחולל הפולסים (אותות צרים בתדירות קבועה של 10 Hz במדויק). על המסך תתקבל תמונה הדומה לאיור 9.

3. הגדל את מהירות הסריקה של האוסצילוסקופ עד שאתה רואה את ההדים בצורה ברורה על המסך. אתה תראה סדרה של הדים המוחזרים מספר פעמים מהקצה של שפופרת התהודה, בדומה לנראה באיור 9.

4. מדוד את הזמן בין ההד הראשון לשני ולשלישי.

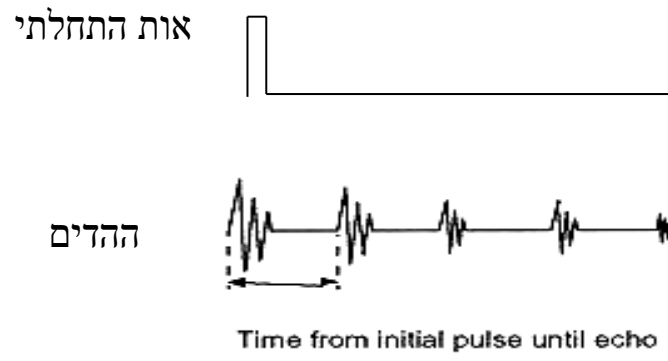
5. המרחק שעבר הקול מההד הראשון ועד להד השני הוא פעמיים אורך השפופרת. ולכן מהירות הקול היא:

$$v = \frac{2l}{t}$$

כאשר  $t$  הוא הזמן בין הדים עוקבים.

6. חשב את מהירות הקול לפי הנתונים שקיבלת בניסוי זה. הגדלת דיוק המדידה של מהירות הקול יכולה להתקבל כאשר אתה מודד את הזמן שבין הפולס הראשון לשלישי (4L).





**איור 9:** עקבה של האוסצילוסקופ המתארת את האות ההתחלתי (למעלה) ואת ההדים של הקול שהוחזרו מהקצה השני של השפופרת. המיקרופון מודד את השינוי בלחץ.

**הערה:** בתום הניסוי העבר את המתג של מגבר המיקרופון למצב off.

## נספח

### פיתוח משוואת הגלים עבור שינויי לחץ בתווך

שינויי לחץ בחומר מתפשטים בצורה של גלים כתוצאה משלושה קשרים פיסיקליים :

- **משוואת המצב** : במקרה שלנו משוואה זו מתארת את הקשר בין שינויי לחץ לשינויי צפיפות.  
באופן כללי ביותר המשוואה נתונה ע"י (1) :

$$(1) \quad p = Bs$$

כאשר  $p = P - P_0$  (לחץ -  $P_0$  לחץ במצב שיווי משקל),  $s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$

צפיפות בשיווי משקל,  $\rho$  - צפיפות,  $B$  הוא מודול הנפח שמבטא את שינוי

$$. B = \rho_0 \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_{\rho_0}$$

- **משוואת הרציפות** : מצינת את הקשר בין שינויים במהירות החלקיקים ( $\vec{u}$ ) במרחב לצפיפות מקומית ורגעית  $\rho(x, y, z, t)$

$$(2) \quad \frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = 0$$

- **משוואת אוילר** : משוואה אנלוגית לחוק השני של ניוטון, כאשר  $\nabla p$  מקביל לכוח  $\rho_0$  למסה.

$$(3) \quad \rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p$$

כדי להגיע למשוואת הגלים, נפעיל דיורגנס על (3)

$$\nabla \left( \rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) = -\nabla^2 p$$

נגזור לפי זמן את (2), ונכפיל ב  $\rho_0$

$$\rho_0 \cdot \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left( \rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) = 0$$

השוואה בין הביטויים נותנת :

$$\nabla^2 p = \rho_0 \cdot \frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$$

נציב את  $s$  מ(1), ובהנחה ש  $B$  לא משתנה בזמן נקבל :

$$(4) \quad \nabla^2 p = \frac{\rho_0}{B} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

זוהי למעשה משוואת הגלים המוכרת שהפתרונות שלה הם

$$, p_{(x,t)} = p \cdot \cos(\omega t - kx + \varphi) \quad \vee \quad p_{(x,t)} = p \cdot \sin(\omega t - kx + \varphi)$$

ומכאן שמהירות הגל היא :

$$(5) \quad v = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}}$$