

מדידת מהירות גלי קול באוויר החדר

ומדידת מהירות גלי קול באוויר, בהליום ובפחמן דו חמצני

בצינור

שם: נתיב מאור | ת"ז: 319002911 | דוא"ל: nativ.maor@campus.technion.ac.il

שם: דור חי שחם | ת"ז: 318258555 | דוא"ל: dor-hay.sha@campus.technion.ac.il

August 27, 2022

תקציר

בדוח זה נתאר מדידות של מהירות גלי קול בתווכים שונים - באוויר, בגז הליום ובפחמן דו-חמצני. נערכו שני ניסויים, בראשון נמדדה מהירות הקול באוויר ובשני נמדדה מהירות הקול באוויר, בהליום ובפחמן דו-חמצני. בניסוי הראשון הסקנו את מהירות הקול באוויר בעזרת מדידת הפרש הפאזה כתלות במרחק שבין זמזם למיקרופון הנמצאים באוויר החדר. בניסוי השני, מילאנו צינור כל פעם בגז אחר ויצרנו פולס בעזרת זמזם בקצה אחד של הצינור ומדדנו כמה זמן לקח לפולס להגיע למיקרופון שמוקם בקצהו השני. בעזרת אורך הצינור והפרש הזמנים הסקנו את מהירות הקול בכל גז. לבסוף השונו את מהירויות הקול שמצאנו בשני הניסויים עם הערכים המתקבלים לפי התיאוריה - המנבאת את מהירות הקול כתלות בטמפרטורה וסוג הגז המהווה את התווך. מצאנו שמהירות הקול באוויר ותחום השגיאה שלה המתקבל מהניסוי הראשון מכילים את תחום השגיאה של מהירות הקול המתקבלת מהניסוי השני אך שני אלה לא חופפים לערך התיאורטי אם כי קרובים אליו באופן יחסי. כמו כן, גם מהירות הקול בגזים השונים דרך הצינור נמצאו לא חופפים לערכים הצפויים מהתיאוריה אך קרובים באופן יחסי גם הם.

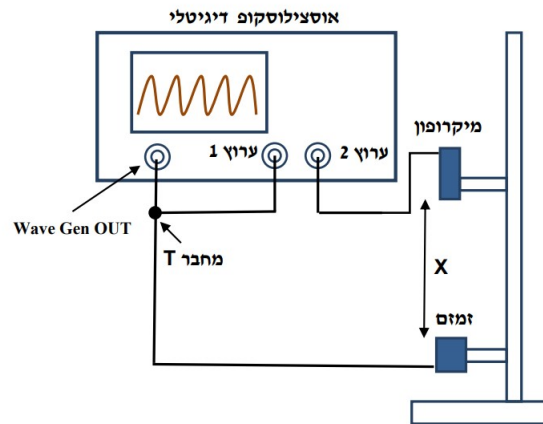
מבוא

מערכות הניסוי הורכבו שתייהן ממיקרופון, זמזם, אוסצילוסקופ ומחולל גלים. הזמזם וערוץ 1 של האוסצילוסקופ חוברו למחולל גלים וערוץ 2 אל המיקרופון. הגל מהמחולל מגיע אל הזמזם וערוץ 1, כשהוא מגיע אל הזמזם יוצר גל קול באותה תדירות ובאותה פאזה של גל המחולל. אנו מניחים שגל המחולל מגיע אל ערוץ 1 והזמזם בו-זמנית. בנוסף אנו מניחים שלגל קול מהירות מוגדרת המקיימת:

(1)

$$v = \lambda f$$

כאשר v - מהירות הקול ב $\frac{m}{s}$, λ - אורך גל הקול ב m ו f - תדירות גל הקול ב Hz .
בניסוי הראשון מערכת הניסוי סודרה כפי שמתואר באיור 1:



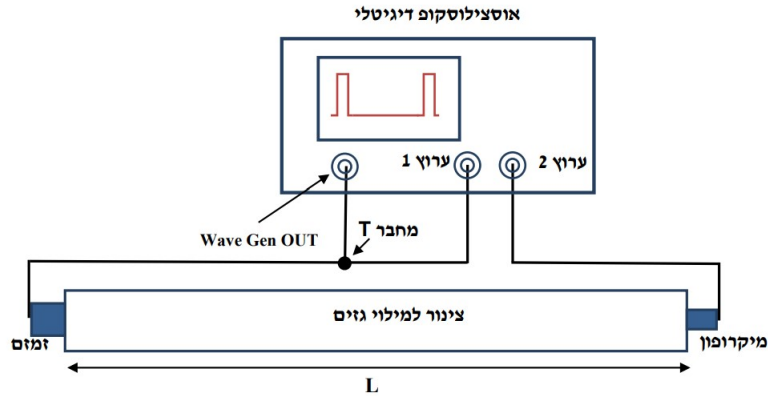
איור 1: מערכת ניסוי עבור הניסוי הראשון בו נמדדה מהירות הקול באוויר בעזרת הפרש פאזה.
האיור נלקח מתדריך הניסוי.

בניסוי זה נמדד הפרש הפאזה בין הגל המתקבל במיקרופון לגל היוצא מהזמזם (בעזרת אוסילוסקופ) כתלות במרחק בין המיקרופון לזמזם. כשהמרחק נמדד על ידי סרגל עם דיוק של 1 mm מתקיים הקשר הבא:

(2)

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta x} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

כאשר $\Delta\phi$ - הפרש הפאזה בין הפאזה של הגל המתקבל על ידי המיקרופון לפאזה של הגל היוצא מהזמזם ב rad , Δx - המרחק בין המיקרופון לזמזם ב m ו λ - אורך גל הקול שמייצר הזמזם ב m .
בניסוי השני, המיקרופון והזמזם חוברו לשתי קצוות צינור המכיל את הגז שרצינו למדוד את מהירות הקול דרכו.



איור 2: מערכת ניסוי עבור הניסוי השני בו נמדדו מהירויות הקול באוויר, בהליום ובפחמן דו-חמצני בעזרת הפרש זמנים. האיור נלקח מתדריך הניסוי.

בשביל להסיק את מהירות הקול בעזרת פולס בצינור. ניתן בעזרת קינמטיקה לקבל:

$$(3) \quad \Delta t = \frac{L}{v}$$

כאשר Δt - הפרש הזמנים ב s , L - אורך הצינור ב m ו v - מהירות הקול בגז (הנמצא בצינור) ב $\frac{m}{s}$. תדירות הפולסים צריכה לאפשר פגיעה של גל הקול במיקרופון וחזרה (לפי התדריך שני מחזורים) ולכן נדרוש שתדירות הסף תקיים:

$$(4) \quad f = \frac{v}{2L}$$

כאשר v - היא מהירות הקול התיאורטית ב $\frac{m}{s}$ ו L - אורך הצינור ב m . מהירות הקול בתווכים שונים תלויה בטמפרטורה (אשר נמדדה בעזרת מד טמפ' עם דיוק של $0.1^\circ K$) וסוג התווך לפי הקשר:

$$(5) \quad v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

כאשר v - מהירות הקול בגז (הנמצא בצינור) ב $\frac{m}{s}$, γ - היחס בין החום הסגולי בלחץ קבוע לחום הסגולי בנפח קבוע של הגז (חסר יחידות), T - טמפ' הגז ב K , M - המסה המולרית של הגז ב $\frac{kg}{mol}$ ו R - קבוע הגזים המקיים $R = 8.31 \frac{J}{mol \cdot K}$. כמו כן, נתון בתדריך שמהירות הקול באוויר בטמפ' $T = 0^\circ C = 273.15^\circ K$ היא $331.7 \pm 0.1 \frac{m}{s}$ ולכן מנוסחא 5 נקבל את מהירות הקול באוויר כתלות בטמפ'.

$$(6) \quad v_{air}(T) = (331.7 \pm 0.1) \sqrt{\frac{T}{273.15}}$$

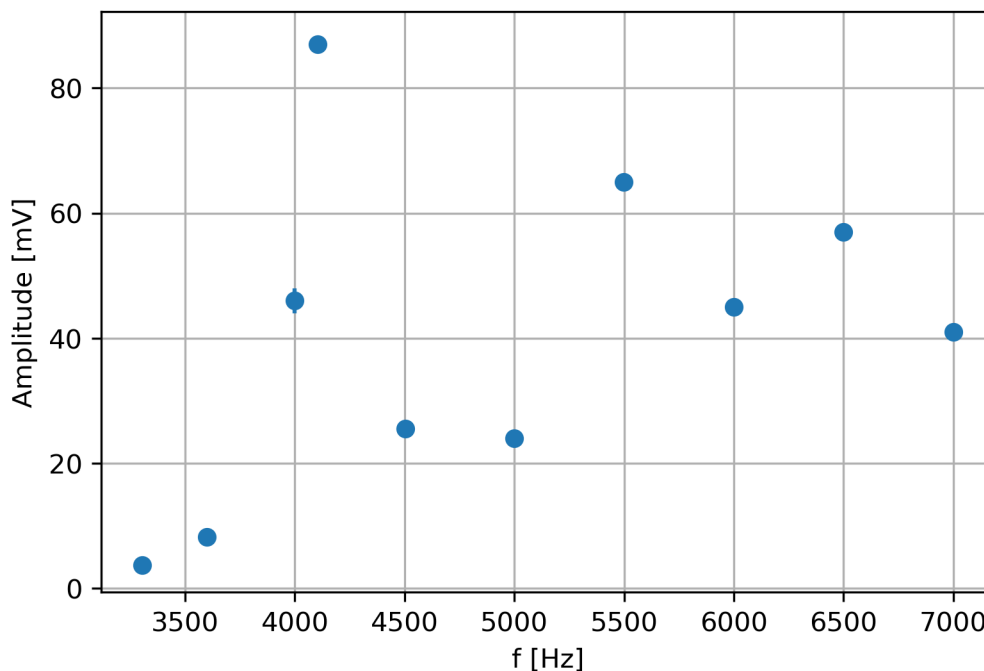
כאשר T - טמפ' האוויר במעלות K .

תוצאות הניסוי

ניסוי זה מורכב משני חלקים, נתאר תחילה את תוצאות הניסוי הראשון - מדידת מהירות גלי קול באוויר החדר ולאחר מכן את תוצאות הניסוי השני - מדידת מהירות גלי קול בגזים שונים דרך צינור.

ניסוי 1 - גלי קול באוויר החדר בעזרת הפרשי פאזה

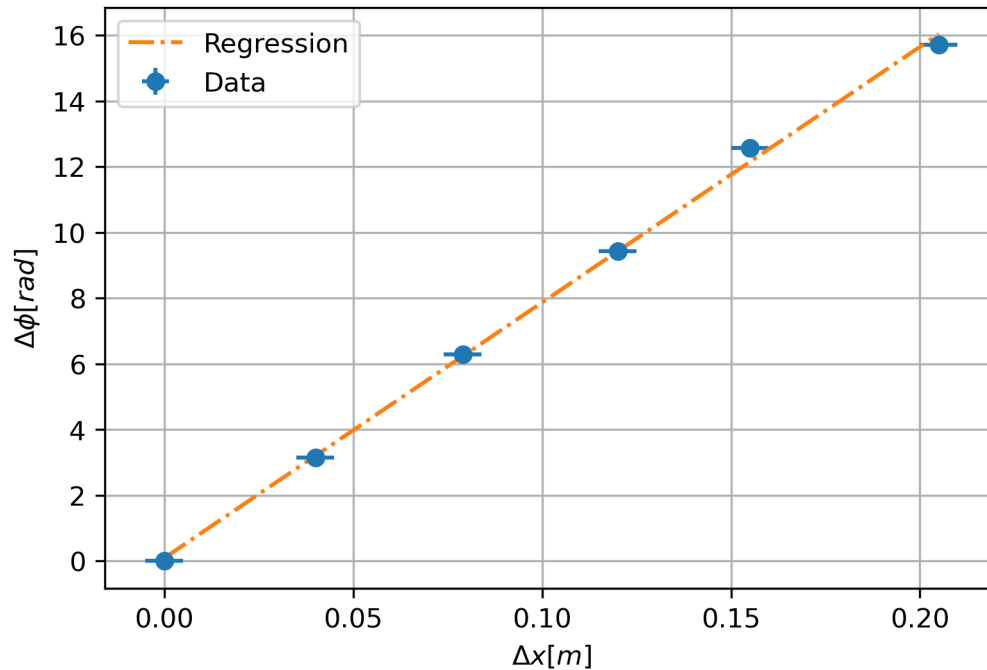
תחילה, חברנו את המיקרופון לערוץ 2 של האוסצילוסקופ בעזרת כבל קואקסיאלי ואת האות ממחולל הגלים שבאוסילוסקופ לערוץ 1 והזמזם במקביל. על מנת למצוא תדירות שבה היענות המערכת היא גבוהה, קבענו את אות המחולל להיות גל סינוס ובדקנו את השפעת תדירות הגל היוצא על אמפליטודת הגל המתקבל במיקרופון. גרף ההיענות:



גרף 1: אמפליטודת האות בערוץ 2 כתלות בתדר הגל מהמחולל

הנקודות הכחולות מייצגות את המדידות עם קווי השגיאה שלהן (קווי השגיאה קטנים מכדי להבחין בהם).

לפי מדידות אלו הסקנו שתדירות עבורה יש היענות טובה של המערכת היא $f = 4103 \text{ Hz}$ ובה השתמשנו בהמשך הניסוי. כעת, קבענו את תדירות המחולל ל $f = 4103 \text{ Hz}$, הזזנו את המיקרופון לאורך הסרגל ולקחנו מדידות של המרחקים עבורם מתקבל הפרש פאזה שהוא כפולה שלמה של 180° . הפרשי פאזה הם בין האות שהתקבל במיקרופון ומוצג בערוץ 2 של הסקופ והאות שיצא מהמחולל ומוצג בערוץ 1 של הסקופ. כיוון שהסביבה בה נעשה הניסוי הייתה רועשת (ניסויים דומים נערכו במקביל בעמדות קרובות והזמזמים שלהם יצרו רעשים, אנשים דיברו וכו') לקחנו מדידת הפרש הפאזה כמיצוע לאורך זמן - מתוך הנחה שמיצוע לאורך זמן יצמצם את השפעת רעשים אקראיים ולא מתמשכים על המדידה. לקחנו מדידה רק כשהפרש הפאזה בין האותות התייצב לאורך זמן של כ-10 שניות על טווח של $\pm 5^\circ$ מהפאזה הרצויה וכך נקבעה הערכת שגיאת המדידה. הערכת שגיאת המדידה של המיקום נקבעה לפי רזולוציית ההבחנה של הנסיין המתבונן בסרגל $\pm 5 \text{ mm}$. כדי להגדיר את המרחק $x = 0$ ו פאזה $\phi = 0$ הזזנו את המיקרופון עד לנקודה בה מקסימום של האות בערוץ 2 התלכד בקירוב עם מקסימום של אות המחולל - נקודה זו הוגדרה להיות $x = 0$ והפאזה הוגדרה כ $\phi = 0$.



גרף 2: הפרש הפאזה $\Delta\phi$ כתלות במרחק Δx

הנקודות הכחולות מייצגות את המדידות עם קווי השגיאה שלהן. הקו המקווקו הכתום מתאר את הרגרסיה הליניארית שבוצעה $y = (78 \pm 3)x + (0.1 \pm 0.4)$ כאשר תחום השגיאה הוא תחום 95% בר סמך שנקלח מנתוני הרגרסיה.

יש התאמה טובה של הרגרסיה לנתונים הן מבחינה כמותית - מפני ש $R^2 = 0.998$ והן מבחינה איכותית שכן גרף הרגרסיה נמצא בתחום קווי השגיאה של כל המדידות.

משיפוע הגרף ומנוסחא 2 הסקנו ש $\lambda_{air} = 0.080 \pm 0.003m$ (שגיאה חושבה לפי חישוב 7 בנספח) ולכן מנוסחא 1 נקבל ש

$$v_{air}^{measured} = 331.4 \pm 13.8 \frac{m}{s}$$

(השגיאה חושבה לפי חישוב 8 בנספח)

מדידת הטמפרטורה במעבדה בזמן עריכת הניסוי הייתה (לאחר המרה לקלווין) $296.1^\circ \pm 0.1^\circ K$, לכן מנוסחא 6 ניתן לגזור את ערך מהירות הקול התיאורטית באוויר להיות:

$$v_{air}^{theory} = 345.4 \pm 0.1 \frac{m}{s}$$

(השגיאה חושבה לפי חישוב 9 בנספח)

ערך מהירות הקול הנמדד ותחום השגיאה שלו לא חופפים עם ערך מהירות הקול הצפוי ותחום השגיאה שלו. על פערם אלו נדון בהרחבה בדיון בתוצאות.

ניסוי 2 - מהירות הקול בגזים שונים דרך צינור

חיברנו את המיקרופון והזמזם לצדדים שונים של צינור באורך $L = 0.980 \pm 0.001m$ בהתאם לאיור 2. בנוסף חיברנו את הזמזם לערוץ 1 ולמחולל הגלים באוסצילוסקופ ואת המיקרופון לערוץ 2 באוסצילוסקופ. לאחר מכן מדדנו את הטמפרטורה בעזרת מד הטמפרטורה וקיבלנו (לאחר המרה לקלווין) $T = 295.5^\circ \pm 0.1^\circ K$. על פי הטמפרטורה ונוסחא 6, נקבל שמהירות הקול באוויר התיאורטית היא:

$$v_{air}^{theory} = 345.0 \pm 0.1 \frac{m}{s}$$

(השגיאה חושבה לפי חישוב 9 בנספח)

על פי נוסחא 4, נקבל שתדירות הסף היא:

$$f_{air}^{pulse} = 176.0 \pm 0.2 \text{ Hz}$$

(השגיאה חושבה לפי חישוב 10 בנספח)

תדירות זו היא גבול עליון ולכן בעזרת מחולל הגלים יצרנו פולסים תדירות קטנה מ-175.8 Hz (החסם התחתון על תדירות הסף). זיהנו בעזרת ערוץ 2 באוסצילוסקופ (אשר מחובר למיקרופון) את הפולסים המתקבלים. בעזרת פונקציית הcursor של האוסצילוסקופ מדדנו את הפרש הזמנים בין תחילת הפולס הנשלח לתחילת הפולס המתקבל וקיבלנו $\Delta t_{air} = 2.96 \pm 0.01ms$ (כשהערכת שגיאת המדידה נקבעה לפי הערכה באיזה חלון זמן מתרחשת פגיעת חזית הפולס במיקרופון תוך התעלמות מגלים חוזרים - כך גם עבור המדידות בהליום ובפחמן דו חמצני).

בעזרת הפרש הזמנים, נוסחא 3 ואורך הצינור קיבלנו שמהירות הקול באוויר היא:

$$v_{air}^{measured} = 332.6 \pm 1.1 \frac{m}{s}$$

(השגיאה חושבה לפי חישוב 11 בנספח)

ניתן לראות כי אין התאמה בין הערך הנמדד לתאורטי, נדון על כך בדיון.

לאחר מכן, מילאנו את הצינור בהליום וחזרנו על הניסוי - על ידי הצפת הצינור בהליום בעזרת בלון שמולא בהליום מפתח יעודי ושחרור האוויר מהצינור מפתח אחר, ביצענו תהליך זה 3 פעמים בשביל שהגז בצינור יהיה בעיקרו הליום. עבור הליום $\gamma = 1.66$ ומספר מסה $4 \frac{g}{mol}$ (על פי הנתונים בתדריך), הטמפרטורה הנמדדה ונוסחא 5, נקבל שמהירות הקול בהליום התיאורטית היא:

$$v_{He}^{theory} = 1009.3 \pm 0.2 \frac{m}{s}$$

(השגיאה חושבה לפי חישוב 12 בנספח)

על פי נוסחא 4, נקבל שתדירות הסף היא:

$$f_{He}^{pulse} = 514.9 \pm 0.5 \text{ Hz}$$

(השגיאה חושבה לפי חישוב 9 בנספח)

תדירות זו היא גבול עליון ולכן בעזרת מחולל הגלים יצרנו פולסים תדירות קטנה מ-514.4 Hz (החסם התחתון על תדירות הסף). קיבלנו שהפרש הזמנים בין תחילת הפולס בזמזם לתחילת קליטת הפולס במיקרופון הוא $\Delta t_{He} = 1.00 \pm 0.01 \text{ ms}$ ועל פי נוסחא 3 קיבלנו שמהירות הקול בהליום היא:

$$v_{He}^{measured} = 971.2 \pm 9.7 \frac{m}{s}$$

(השגיאה חושבה לפי חישוב 11 בנספח)

גם כן ניתן לראות כי אין התאמה בין הערך הנמדד לתאורטי, נדון על כך בדיון.

באופן דומה, מילאנו את הצינור בפחמן דו-חמצני וחזרנו על הניסוי - על ידי הצפת הצינור בפחמן דו-חמצני מפתח יעודי ושחרור האוויר מהצינור מפתח אחר, ביצענו תהליך זה 3 פעמים בשביל להבטיח שהגז בצינור יהיה בעיקרו פחמן דו-חמצני. עבור פחמן דו-חמצני $\gamma = 1.304$ ומספר מסה $44 \frac{g}{mol}$ (על פי הנתונים בתדריך), הטמפ' הנמדדה ונוסחא 5, נקבל שמהירות הקול בפחמן דו-חמצני התיאורטית היא:

$$v_{CO2}^{theory} = 269.72 \pm 0.04 \frac{m}{s}$$

(השגיאה חושבה לפי חישוב 12 בנספח)

על פי נוסחא 4, נקבל שתדירות הסף היא:

$$f_{He}^{pulse} = 137.6 \pm 0.1 \text{ Hz}$$

(השגיאה חושבה לפי חישוב 9 בנספח)

תדירות זו היא גבול עליון ולכן בעזרת מחולל הגלים יצרנו פולסים תדירות קטנה מ-137.5 Hz (החסם התחתון על תדירות הסף). קיבלנו שהפרש הזמנים בין תחילת הפולס בזמזם לתחילת קליטת הפולס במיקרופון הוא $\Delta t_{CO2} = 3.7 \pm 0.1 \text{ ms}$ (נציין שבמדידה זו היה קושי בהבחנה בזמן הפגיעה של הפולס לכן נלקחה הערכת שגיאה גדולה מבשאר הגזים) ועל פי נוסחא 3 קיבלנו שמהירות הקול בפחמן דו-חמצני היא:

$$v_{CO2}^{measured} = 262.0 \pm 7.0 \frac{m}{s}$$

(השגיאה חושבה לפי חישוב 11 בנספח)

גם כאן, בדומה לגזים הקודמים, ניתן לראות כי אין התאמה בין הערך הנמדד לתאורטי, נדון על פער זה בדיון.

דיון בתוצאות

נדון בתוצאות כל אחד מהניסויים בנפרד.

ניסוי 1 - גלי קול באוויר החדר בעזרת הפרש פאזה

מהירות הקול שהתקבלה מהמדדות היא

$$v_{air}^{measured} = 331.4 \pm 13.8 \frac{m}{s}$$

בעוד שמהירות הקול התיאורטית בטמפרטורה שנמדדה בחדר היא

$$v_{air}^{theory} = 345.4 \pm 0.1 \frac{m}{s}$$

תחומי השגיאה של הערכים אומנם לא חופפים אך השגיאה היחסית בין הערך התיאורטי לערך המדוד של מהירות הקול חסומה על ידי 8% (כל חישובי השגיאות היחסיות חושבו לפי חישוב 13 בנספח), כשהחישוב נקבע לפי החסם התחתון של תחום השגיאה מהערך המדוד והחסם העליון של תחום השגיאה מהערך התיאורטי. עבור מרכזי התחומים נקבל תחום שגיאה של כ 4%. נציין גם שהתחומים קרובים לחפיפה, כפי שניתן לראות מחישוב שגיאה יחסית כשהערך הנמדד נקבע להיות החסם העליון של תחום השגיאה שלו והערך התיאורטי נקבע להיות החסם התחתון, אז נקבל שגיאה יחסית של 0.09%. ואומנם, המדידות מהן הסקנו את מהירות הקול מוצגות בגרף 2, לפי התיאוריה מדידות אלה צריכות להתאים לגרף לינארי שעובר בראשית, ואכן רגרסיה לינארית לנתונים נותנת גרף לינארי שעובר קרוב לראשית בהתאמה טובה של $R^2 = 0.998$. כלומר מבחינה איכותית יש התאמה לתיאוריה - היחס בין הפרש הפאזה והפרש המיקום הוא לינארי.

נציין מספר סיבות אפשריות לפערים שהתקבלו בין הערך התיאורטי של מהירות הקול לערך המדוד.

סיבה אפשרית אחת היא שהסביבה בה נערך הניסוי הייתה רועשת, הסביבה הייתה רועשת כי נערכו מספר ניסויים דומים במקביל שגרמו לרעש, הרעש בא לידי ביטוי במדידות בכך שהפרש הפאזה בין גל המחולל לאות הנמדד על ידי המיקרופון לא נשאר קבוע עבור מרחק קבוע. כדי לצמצם את השפעת הרעש על המדידות נלקחה מדידת הפרש הפאזה במוד של מיצוע - מתוך הנחה שמיצוע על מדידות גורם לרעשים אקראיים להיות זניחים. עם זאת, חלק מהרעשים בסביבה לא היו אקראיים והתמידו לאורך הניסוי, למשל רעשים מהמזגן שפעל קרוב לעמדת המדידה לא יבוטלו במיצוע אך עלולים להשפיע על המדידה בכך שיגרמו להסחה שהשפעתה לא נלקחת בחשבון בהערכת השגיאה.

סיבה אפשרית נוספת היא שיתכן שהייתה השפעה של אוויר נע בכיוון מנוגד למהירות גל הקול. אנו חושדים שזו סיבה אפשרית כי מיקום עמדת המדידה היה מתחת למזגן המוציא אוויר בכיוון מטה, כלומר אוויר נע בכיוון מנוגד לכיוון התקדמות גל הקול אל המיקרופון. מבדיקה במרשתת מהירות אופיינית לתעלות מיזוג סטנדרטית היא בסדר גודל של $10 \frac{m}{s}$. אם נניח מודל פשטני מאוד של מהירות אוויר קבועה בחדר ושמהירות הקול היא המהירות של התפשטות הגל ביחס לאוויר בו הוא נע. נקבל שמהירות אוויר של כ $10 \frac{m}{s}$ הייתה יכולה לגשר על הפערים בין התיאוריה לנמדד. זאת מפני שלפי מודל זה מהירות האוויר שאמורה להימדד בחדר היא

$$v \approx v_{air}^{theory} - 10 = 345.4 - 10 = 335.5 \frac{m}{s}$$

אולם יש לציין שהמודל המוצע לעיל פשטני ביותר, שכן ברור שמהירות האוויר בחדר בכיוון שבין המיקרופון לזמזם קטנה מ $10 \frac{m}{s}$ ושהאפקט במציאות מסובך יותר. לכן, כדי לבדוק את האם אכן יש השפעה של האוויר היוצא מהמזגן על המדידות יש לערוך את ניסוי בשנית כאשר המזגן לא מופעל, שעמדת המדידה מרוחקת ממנו או מבודדת מהסביבה.

ניסוי 2 - מהירות הקול בגזים שונים דרך צינור

כשמדדנו את מהירות הקול באוויר, קיבלנו את הערך

$$v_{air}^{measured} = 332.6 \pm 1.1 \frac{m}{s}$$

בעוד שלפי התאוריה הערך המתאים לטמפ' בחדר באותו הזמן הוא

$$v_{air}^{theory} = 345.0 \pm 0.1 \frac{m}{s}$$

למרות שאין חפיפה בין התחומים נשים לב שהשגיאה היחסית המקסימלית בין הערכים היא 3.94% אשר מעידה על כך שהפער בין המדידה לתאוריה קטן.

במהלך הניסוי לקחנו את הפרש הזמנים בין הפולס היוצא לפולס המגיע, בדרך זו הניסוי חשוף לשגיאות אקראיות בהגעת הפולס וייתכן שאלו גרמו לפער בין התאוריה לניסוי. דרך שבה יכלנו להגדיל את הדיוק היה לחשב את הזמן הדרוש עבור אחד הפולסים החוזרים להגיע אל המיקרופון (ולחלק במרחק הכולל שהפולס עבר) ובכך להקטין את השגיאות האקראיות.

כשמדדנו את מהירות הקול בהליום, קיבלנו את הערך

$$v_{He}^{measured} = 971.2 \pm 9.7 \frac{m}{s}$$

בעוד שלפי התאוריה הערך המתאים לטמפ' בחדר באותו הזמן הוא

$$v_{He}^{theory} = 1009.3 \pm 0.2 \frac{m}{s}$$

למרות שאין חפיפה בין התחומים נשים לב שהשגיאה היחסית המקסימלית בין הערכים היא 4.75%, שגיאה המעידה על כך שהפער בין התוצאות לתאוריה קטן.

בנוסף לסיבה לפער שצוינה קודם לכן עבור המדידה של המהירות באוויר, סיבה אפשרית נוספת לפער היא שייתכן שהצינור לא הכיל רק הליום אלא גם אוויר. היות ולא הייתה לנו דרך לבדוק בצורה איכותית או כמותית שהצינור אכן מלא בהליום ייתכן שנשארה כמות כלשהי של אוויר בצינור. משום שמהירות הקול באוויר נמוכה מבהליום, התערובת של אוויר והליום תהיה בעלת מהירות קול קטנה משל הליום בלבד, דבר המתיישב עם תוצאות הניסוי. כדי לשפר את הניסוי ניתן להוסיף אינדקציה לכמות ההליום בצינור.

בחלק השלישי מדדנו את מהירות הקול בפחמן דו-חמצני, קיבלנו את הערך

$$v_{CO_2}^{measured} = 262.0 \pm 7.0 \frac{m}{s}$$

בעוד שלפי התאוריה הערך המתאים לטמפ' בחדר באותו הזמן הוא

$$v_{CO_2}^{theory} = 269.72 \pm 0.04 \frac{m}{s}$$

למרות שאין חפיפה יש כמעט השקה בין התחומים. נשים לב שהשגיאה היחסית המקסימלית (כאשר הערכים נלקחים בקצוות טווח השגיאה להיות רחוקים ככל האפשר) בין הערכים היא 5.40% אשר מעידה על כך שהפער בין המדידה לתאוריה קטן. נשים לב שעבור השגיאה היחסית המינמלית (כאשר הערכים נלקחים בקצוות טווח השגיאה להיות קרובים ככל האפשר) בין הערכים היא 0.25%.

נשים לב שבניגוד למדידה עם ההליום, אילו היה נשאר בצינור הליום ו/או היה חודר אוויר לצינור כך שהצינור לא היה מלא בפחמן דו-חמצני מהירות הקול הייתה אמורה להיות גדולה מהמהירות התיאורטית (מהסיבות שהסברנו מקודם והיות שמהירות הקול באוויר ובהליום גדולות ממהירות הקול בפחמן דו-חמצני). ואילו התוצאות שקיבלנו מעידות על כך שמהירות הקול הנמדדת קטנה ממהירות הקול התיאורטית. לכן, סיבה זו אינה יכול להיות הסיבה המרכזית שגרמה לפער זה. אנו סבורים שבדומה למדידה של האוויר, ייתכן ושגיאה במדידה השפיעה על התוצאות ושבמידה והיינו מבצעים את המדידה על פולס חוזר היינו יכולים להקטין את השגיאה.

מסקנות

בשני הניסויים נמדדה מהירות הקול בתווכים שונים ובשיטות שונות.

בניסוי 1, בו נמדדה מהירות גל קול באוויר החדר בעזרת הפרשי פאזה, מצאנו שמהירות הקול היא $331.4 \pm 13.8 \frac{m}{s}$ בעוד שמהירות הקול התיאורטית בטמפרטורה שנמדדה בחדר היא $345.4 \pm 0.1 \frac{m}{s}$. תחומי הערכים לא חופפים. את הסיבה לפערים אנו מייחסים לשיטת המדידה, שכן היא פגיעה לרעשים מהסביבה והשפעות חיצוניות כמו אוויר זורם בחדר. כדי להמנע מהפרעות אלו יש לחזור על הניסוי בסביבה מבודדת מרעשים ומבודדת ממקורות זרימת אוויר.

בניסוי 2 בו נמדדו מהירות הקול בגזים שונים דרך צינור קיבלנו שמהירות הקול באוויר היא $332.6 \pm 1.1 \frac{m}{s}$ עם פער של עד 3.94% מהערך התיאורטי, מהירות הקול בהליום היא $971.2 \pm 9.7 \frac{m}{s}$ עם פער של עד 4.75% מהערך התיאורטי ומהירות הקול בפחמן דו-חמצני היא $262.0 \pm 7.0 \frac{m}{s}$ פעם פער של עד 5.4% מהערך התיאורטי. מתוצאות אלו ניתן להסיק שדרך מדידה זו מביאה לדיוק יחסי טוב של עד 6% מגודל הערך הנמדד אך מכילה פערים למרות זאת. כפי שצינו בדיון, ניתן לשפר את דיוק התוצאות על ידי שימוש בפולסים החוזרים כמה פעמים בתוך הצינור ולחלק את הזמן שבו הפולס נע במרחק הכולל שהוא עבר. בצורה זו מתבצע מעין מיצוע ולכן שגיאות אקראיות יקטנו. כמו כן, ניתן להוסיף אינדקציה כלשהי על כמות האוויר, הליום ופחמן דו-חמצני בצינור בכדי להגדיל את הסיכוי שהצינור אכן מלא בגז המבוקש בתחילת המדידה. נציין שבשני הניסויים נמדדה מהירות הקול באוויר והתקבלה מהירות דומה, $331 \pm 13.9 \frac{m}{s}$ בניסוי 1 ו $332.6 \pm 1.1 \frac{m}{s}$ בניסוי השני כשתחום השגיאה של המהירות מהניסוי השני מוכל בתחום של הניסוי הראשון. ייתכן ויש סיבה לקשר זה אך לעת זו אנו חושדים שקירבת הערכים היא מיקרית בלבד. אילו היו נערכים ניסויים נוספים למדידת מהירות הקול בשיטות שונות והערכים היו דומים גם בהם היינו חושדים בקשר עמוק יותר. נציין גם שתחום הערכת שגיאת המדידה של הניסוי השני קטן בסדרי גודל משל הניסוי הראשון - כלומר באופן כללי הניסוי השני מאפשר מדידה מדויקת יותר.

רשימת מקורות

(1) תדריך גלי קול.

נספח

חישובי שגיאות מדידה נגררות ושגיאה יחסית

$$(7) \quad \delta\lambda = \frac{2\pi}{m^2} \delta m$$

כאשר m הוא השיפוע שהתקבל מהרגרסיה הלינארית בגרף 2 ו δm היא תחום השגיאה שהתקבל מהרגרסיה.

$$(8) \quad \delta v = v \sqrt{\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{f}\right)^2}$$

$$(9) \quad \delta v = \sqrt{\left(0.1 \sqrt{\frac{T}{273.15}}\right)^2 \left(331.7 \frac{\delta T}{2\sqrt{T \cdot 273.15}}\right)^2}$$

$$(10) \quad \delta f = \frac{f}{2} \sqrt{\left(\frac{\delta v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2}$$

$$(11) \quad \delta v = v \sqrt{\left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta t}{t}\right)^2}$$

$$(12) \quad \delta v = \sqrt{\frac{\gamma R}{M}} \delta T$$

$$(13) \quad Relative\ error = \frac{|v_{theory} - v_{measured}|}{v_{theory}}$$