

## אפקט דופלר

### **מילות מפתח :**

דופלר, משדר, מקלט, שינויי תדירות.

**הציוד הדרוש :** מחשב ותוכנת Doppler המותקנת על המחשב, משדר, מקלט, מסילת הרצה, עגלה, קופסת בקרה, פלטה מתכתית.

### **מטרת הניסוי :**

- הכרת תופעת דופלר

### **1. תיאוריה**

במערכת המורכבת ממקור (Source) המשדר גלים אל המרחב ומקלט (Receiver) הקולט את הגלים, כל עוד אין תנועה יחסית בין המשדר למקלט, יקלוט המקלט את אותה התדירות של המשדר. אולם כאשר מקור הגלים (המשדר) והמקלט נעים אחד ביחס לשני במהירות מסוימת, התדירות הנקלטת תהיה שונה מהתדירות המשודרת.

כאשר המשדר והמקלט מתקרבים זה לזה התדירות הנקלטת תהיה גבוהה מזו שהמקור משדר; וכאשר הם מתרחקים אחד מהשני, התדירות הנקלטת קטנה מהתדירות המשודרת. תופעה זאת ידועה כ"אפקט דופלר" על שמו של המדען האוסטרי כריסטיאן דופלר (1803-1853).

ניתן בקלות להבחין בתופעה כאשר רכבת או מכונית צופרים חולפים לידך וממשיכים לצפור אנו קולטים שינוי בתדירות הצליל של הצופר. השינוי בתדירות גלי הקול תלוי אם המקור או המקלט נמצאים בתנועה יחסית לתווך שדרכו מתקדם הגל.

כיום, מכשור רב מבוסס על עיקרון תופעת דופלר, לדוגמא: מדי מהירות משטרתיים, מכשור אסטרונומי למדידת מהירותם של גלקסיות ומכשור רפואי לביצוע הדמיות של חלקי גוף נעים וכו'.

גלי קול הנעים בתווך יוצרים שינויים בלחץ האוויר עד הגיעם אל אוזננו. מהירות גלי הקול תלויה בתווך ולא במהירות המקור. אם אנו רוצים לשנות את מהירות הקול, צריך לשנות את התווך (חומר אחר), או להניע את התווך (למשל

רוח). כמו כן, מהירות התקדמות הקול באוויר איננה משתנה כתלות בתדר, אחרת לא היינו יכולים לשמוע לדוגמא, נגינה של תזמורת, אם כל צליל היה מגיע בזמן שונה אל אוזננו הייתה נוצרת דיס-הרמוניה וצרימות.

כאשר המקור או המקלט נעים אורך הגל משתנה והתדירות החדשה  $f'$

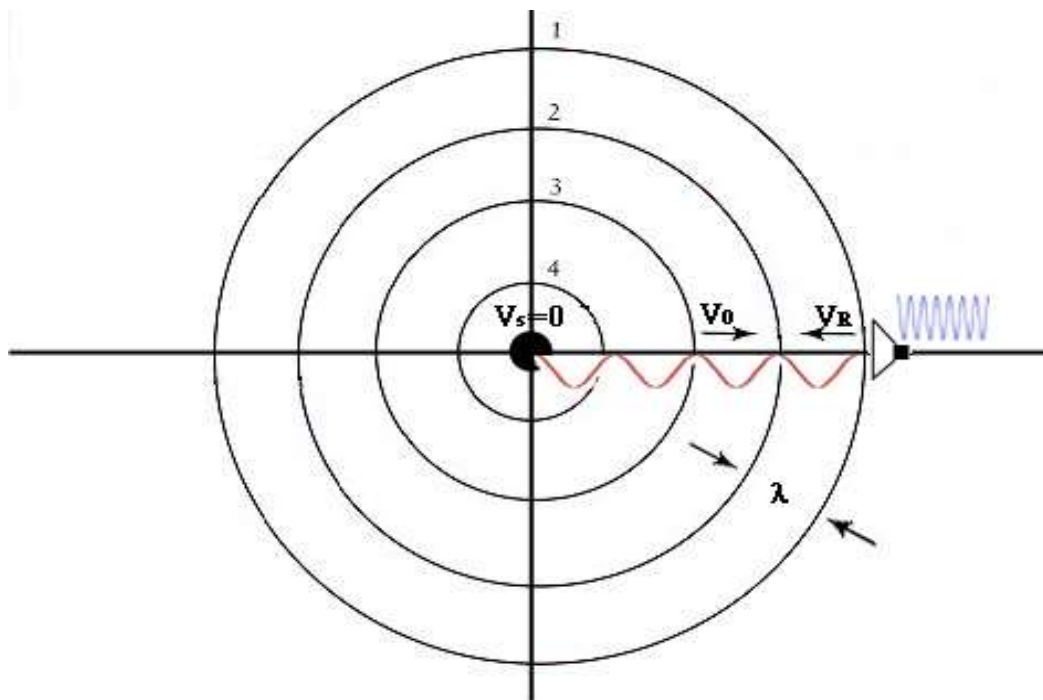
מחושבת ע"י מדידת אורך הגל  $\lambda'$  והמהירות היחסית  $V$  לפי הקשר בנוסחה 1:

$$(1) \quad f' = \frac{V}{\lambda'}$$

נבחין בין שלש מצבים, מצב ראשון כאשר מקור הגלים (המשדר) נמצא במנוחה והגלאי בתנועה, מצב שני בו מקור הגלים במנוחה והגלאי בתנועה, ומצב כללי יותר בו הגלאי והמקור נעים יחד.

### 1.1 משדר במנוחה, גלאי בתנועה

נניח כי במרכז מערכת צירים ישנו משדר ניח המשדר גלים בתדירות קבועה אל המרחב, גלים אלו נעים ומתקדמים במהירות קבועה  $V_0$ . במרחק מסוים מהמשדר ישנו גלאי הקולט את הגלים המשודרים, נניח כי גלאי זה נע לכיוון המשדר במהירות קבועה  $V_R$ . תיאור סכימתי של המערכת ניתן לראות באיור 1.



איור 1: מקור (משדר) במרכז ניח, ומקלט נע לעברו במהירות קבועה התדירות שיקלוט הגלאי תהיה גבוהה יותר מאחר שמהירות היחסית של הגלאי  $V_R$  ביחס למהירות התקדמות הגל  $V_0$  היא גדולה יותר כך שהזמן שלוקח לגלאי

לפגוש מקסימה הוא קצר יותר. כלומר הגלאי עובר את מרחק אורך הגל ( $\lambda$ ) במהירות יחסית שהיא  $V_0 + V_R$ . לכן ניתן לרשום את התדירות שימדוד הגלאי:

$$(2) \quad f' = \frac{V_0 + V_R}{\lambda}$$

במקום אורך הגל של המשדר ניתן לרשום את הגודל  $\left(\frac{V_0}{f_0}\right)$  כאשר  $V_0$  היא מהירות התקדמות הגלים ו-  $f_0$  תדירותם, ולקבל את הביטוי הבא:

$$(3) \quad f' = \frac{V_0 + V_R}{\left(\frac{V_0}{f_0}\right)} = \frac{f_0}{V_0}(V_0 + V_R) = f_0 \left(1 + \frac{V_R}{V_0}\right)$$

קשר זה פותח בהנחה שהמקלט מתקדם לכיוון המשדר הנייח לו היינו מניחים כי המקלט מתרחק מהמשדר השינוי יהיה במהירות היחסית ביניהם והמונה בנוסחא (2) ישתנה ל-  $V_0 - V_R$ . נוכל לסכם שבמקרה של מקור משדר נייח ומקלט נייח התדירות שתימדד על ידי המקלט ( $f'$ ) תהיה:

$$(4) \quad f' = f_0 \left(1 \pm \frac{V_R}{V_0}\right)$$

כאשר הסימן החיובי הוא עבור מקרה שבו המקלט מתקדם לכיוון המשדר והסימן והשלילי כאשר המקלט מתרחק מהמשדר.

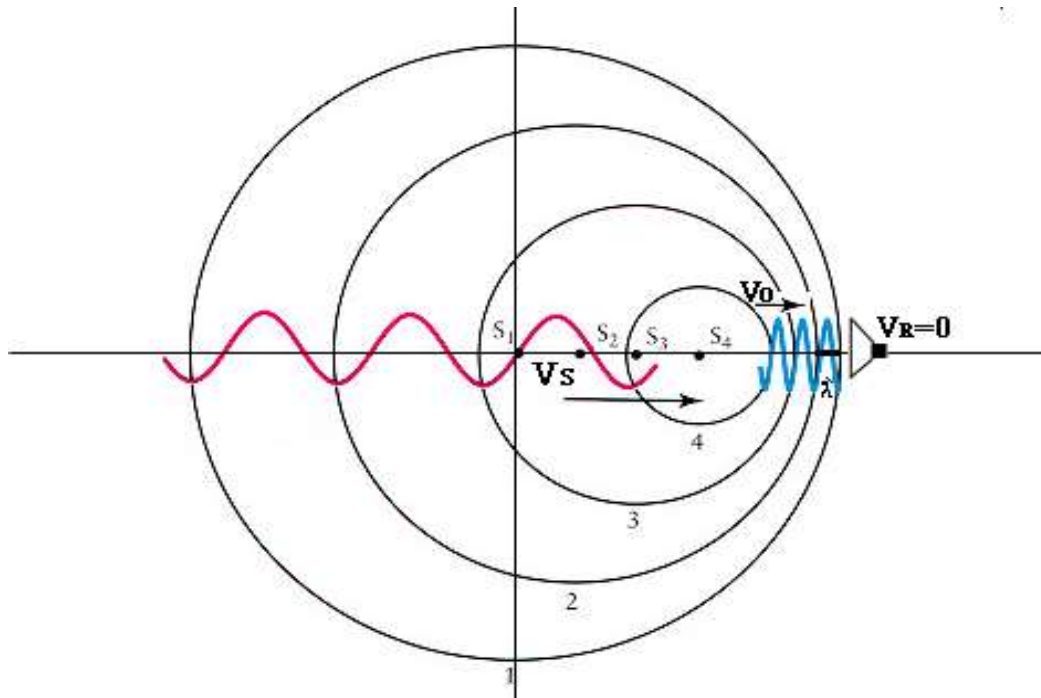
כאשר התווך בו נעים הגלים הוא אוויר (התווך בו יבוצע הניסוי) מהירות הקול באוויר

$$V_0 = 344 \frac{m}{sec} \quad \text{בטמפרטורת החדר היא:}$$

### 1.2 משדר בתנועה, גלאי במנוחה

נניח כי במרכז מערכת צירים ישנו משדר הנע במהירות קבועה  $V_s$  לאורך ציר ה-X. במרחק מסוים מהמשדר ישנו גלאי נייח הקולט את הגלים המשודרים. תיאור סיכמתי של המערכת ניתן לראות באיור 2. כפי שניתן לראות בתרשים הגלים בצד הקדמי של המקור "נדחסים", בעוד שהגלים בצד האחורי של המקור יהיו מרוחקים יותר אחד מהשני. כלומר התדירות שימדוד הגלאי בצד הימני תהיה גבוהה יותר מתדירותו הבסיסית של המשדר לו היה במנוחה ובצד השמאלי תימדד תדירות נמוכה יותר.

-אפקט דופלר-



איור 2 : מקלט במנוחה והמשדר נע לעברו במהירות קבועה

נתייחס לצדו הימני של התרשים, אורך הגל המסומן ב-  $\lambda'$  הוא קצר יותר ותלוי במהירות ההתקדמות של הגל-  $V_0$  ובמהירות ההתקדמות של המקור-  $V_s$ . ניתן לרשום את הקשר הבא :

$$(5) \quad \lambda' = \frac{V_0 - V_s}{f_0}$$

הגודל  $\frac{V_0}{f_0}$  הוא המרחק שמתקדם הגל המשודר בזמן מחזור אחד והגודל  $\frac{V_s}{f_0}$  הוא המרחק שמתקדם המקור באותו הזמן.

במקום  $\lambda'$  נוכל לרשום  $\frac{V_0}{f'}$  נחלף את  $f'$  מהנוסחה ונקבל :

$$(6) \quad f' = \frac{V_0 f_0}{V_0 - V_s} = f_0 \left( \frac{1}{1 - \frac{V_s}{V_0}} \right)$$

קשר זה פותח בהנחה שהמשדר מתקדם לכיוון המקלט הנייח. אם נניח שמשדר מתרחק מהמקלט השינוי באורך הגל-  $\lambda'$  גדל. נוכל לסכם כי במקרה של מקור (משדר) נע ומקלט נח התדירות שתימדד על ידי המקלט ( $f'$ ) תהיה :

-אפקט דופלר-

$$(7) \quad f' = \frac{V_0 f_0}{V_0 \mp V_s} = f_0 \frac{1}{\left(1 \mp \frac{V_s}{V_0}\right)}$$

כאשר הסימן (-) מציין כי המשדר מתקדם לכיוון המקלט והסימן (+) כאשר המשדר מתרחק מהמקלט.

### 1.3 משדר וגלאי בתנועה

במקרה כללי יותר כאשר גם המקור המשדר וגם המקלט נעים יחד נוכל לאחד את שתי המשוואות 4 ו 7 ולקבל את הקשר הבא :

$$(8) \quad f' = \frac{V_0 \pm V_R}{\lambda'} = \frac{V_0 \pm V_R}{\left(\frac{V_0 \mp V_s}{f_0}\right)} = \frac{1 \pm \left(\frac{V_R}{V_0}\right)}{1 \mp \left(\frac{V_s}{V_0}\right)} f_0$$

נוסחה זו מכילה בתוכה את שני המקרים הקודמים.

### 1.4 עקרון פעולה של המשדר והמקלט

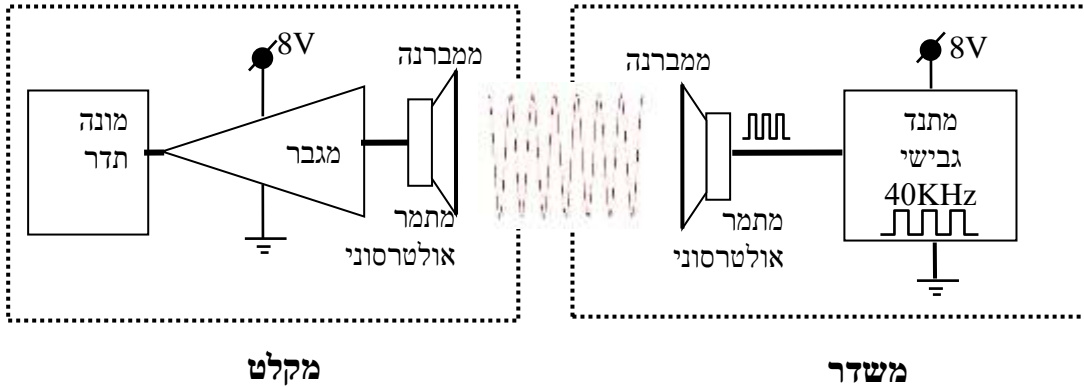
המשדר בו נשתמש בניסוי מבוסס על מתנד גבישי שתדירותו העצמית היא 40KHz. תפקידו של מתנד זה ליצור אות חשמלי ריבועי בתדירותו העצמית. הגל חשמלי שנוצר מחובר אל מתמר אולטרסוני עם תדירות תהודה המתאימה לתדירות המתנד. המתמר בנוי מגביש פיזיו-אלקטרי וממברנה. לגביש הפיזיו-אלקטרי ישנה יכולת להמיר שינויי מתח לתנודות מכניות בצורה פרופורציונלית וההיפך, תנודות מכניות לשינויי מתח.

הגל החשמלי גורם לגביש הפיזיו-אלקטרי להתנווד, תנודות אלו יוצרות שינוי בלחץ האוויר בסביבת הגביש וגורמים לממברנה להתנווד. תנודות הממברנה יוצרות גלים אקוסטיים בכיוון מוגדר שאליו פונה הגלאי. הגלים הנוצרים הינם אולטרסונים ואינם נשמעים באוזן האדם (אוזן אדם מסוגלת לשמוע עד כ- 20KHz). תיאור סכימתי של המערכת ניתן לראות באיור 3.

המקלט מורכב מיחידה דומה לזו של המשדר אולם, עיקרון הפעולה הפוך, המרת גל אקוסטי לאות חשמלי. תנודות הגל האקוסטי גורמים לשינויי לחץ האוויר בסביבתו של המתמר. הגביש הפיזיו-אלקטרי במתמר ממיר את שינויי הלחץ לאותות

## -אפקט דופלר-

חשמליים הפרופורציונליים לגל האקוסטי הפוגע. אותות אלו מוגברים ומועברים למונה תדירות. תיאור סכימתי של המקלט ניתן לראות באיור 3.



איור 3 : מבנה סכמתי של מערכת משדר/ מקלט

### 1.5 שאלות הכנה

1. הסבר מה קורה לתדירות ולאורך הגל שמודד הגלאי (יחסית למדידה במצב מנוחה) בכל אחד מהמקרים הבאים :

- הגלאי נח והמקור נע לעברו במהירות קבועה.
- המקור נח והגלאי נע לעברו במהירות קבועה.
- הגלאי נח והמקור מתרחק ממנו במהירות קבועה.
- המקור נח והגלאי מתרחק ממנו במהירות קבועה.
- כאשר המקור וגלאי נעים במהירויות קבועות אחד אל עבר השני.
- כאשר המקור וגלאי מתרחקים במהירויות קבועות אחד מהשני .

2. א. מכונת צופרת בתדר של  $10,000\text{Hz}$  נוסעת במהירות של  $90\text{ km/h}$  לכיוון המאזין, באיזה תדר תישמע הצפירה למאזין לפני שהמכונת חולפת על פניו, (מהירות

הקול באוויר היא  $344\frac{m}{s}$ ) ?

ב. באיזה תדר תישמע הצפירה למאזין לאחר שהמכונת חלפה על פניו ?

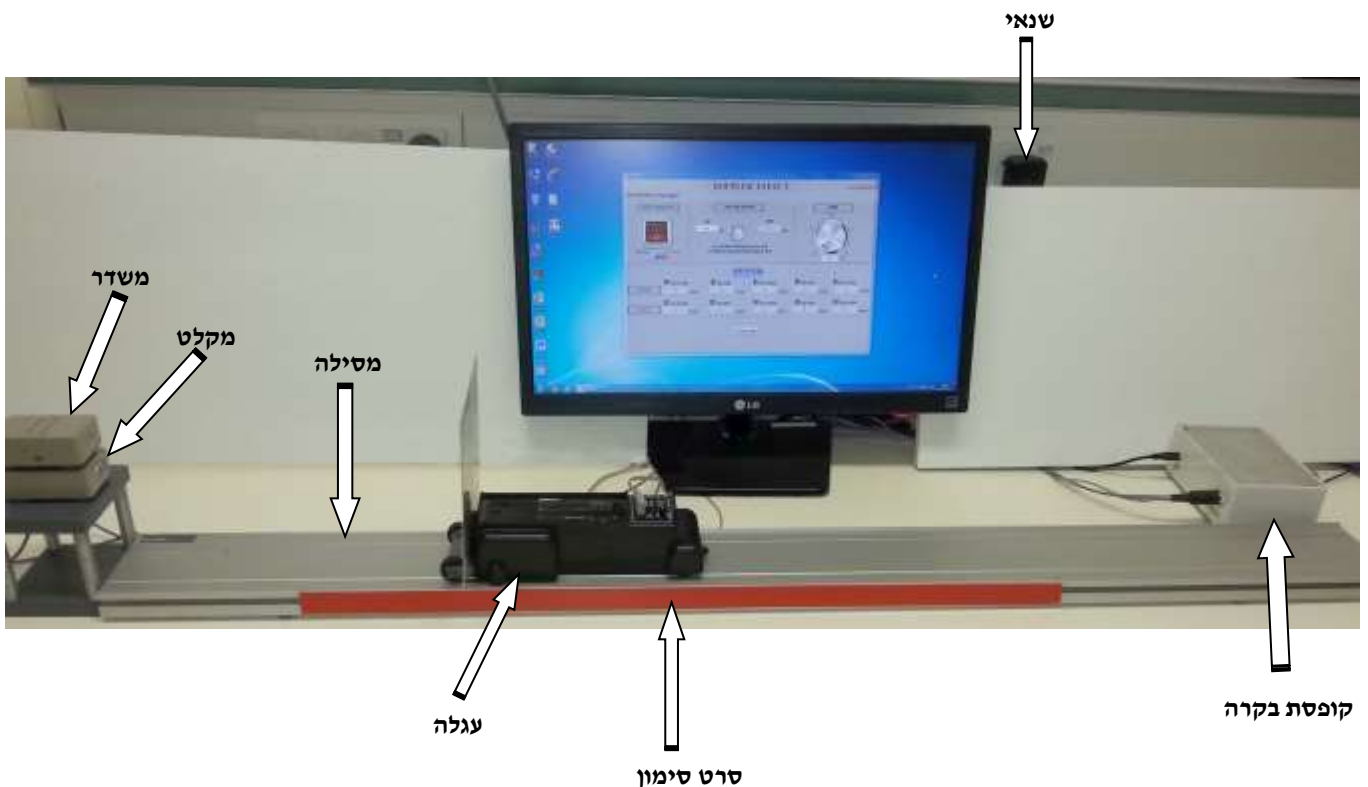
3. בדיקת אולטרסאונד עוברית עושה שימוש באפקט דופלר על מנת לבדוק את תקינות פעילות הלב של עובר.

בהנחה שאות האולטרסאונד משודר בתדירות של  $3 \cdot 10^6 \text{ Hz}$  לכיוון הלב הפועם והתקבל בגל החוזר הסחה מקסימאלית של  $800 \text{ Hz}$  מהאות המקורי, מהי המהירות המקסימאלית של פעימת הלב בהנחה שמהירות הקול ברקמות היא  $1500 \frac{m}{s}$  ? (שים לב שישנם שתי הסחות דופלר בתהליך, ראה סעיף 3 בעיבוד תוצאות).

## 2. מהלך הניסוי

### 2.1 מערכת הניסוי

במהלך הניסוי תצטרכו למדוד 2 גדלים פיזיקליים: מהירות ותדירות. לשם מדידת המהירות ותדר נשתמש במערכת הניסיונית Doppler. מערכת הניסוי כוללת: מסילה, עגלה, פלטה מתכתית, קופסת בקרה השולטת על תנועת העגלה ומונה תדר, משדר וגלאי תדר המחוברים לקופסת הבקרה, מחשב עם תוכנת Doppler Effect ששולטת על קופסת הבקרה.



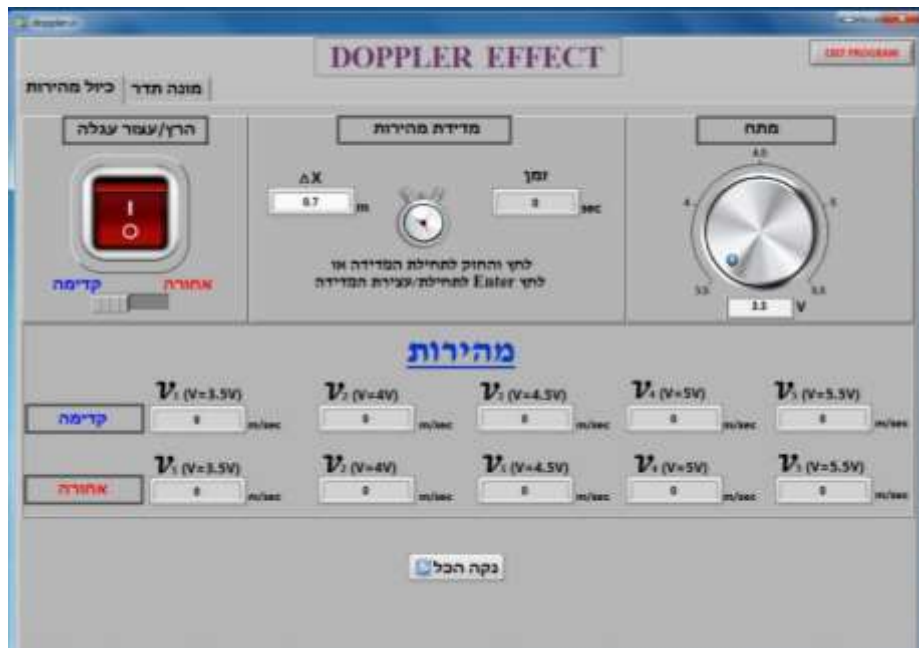
איור 4: המערכת הניסיונית למדידת מהירויות העגלה והסחת תדר

הפלטה המתכתית מתחברת לעגלה בעזרת סקוטשי. לחישוב מהירות העגלה התוכנה משתמשת בנוסחה  $v = \frac{\Delta X}{\Delta t}$ , כאשר קטע הדרך  $\Delta X$  מסומן בסרט סימון המודבק על המסילה. למדידת הסחת תדר משתמשים בגלאי (receiver) ומשדר (transmitter) שניתן למקם אותם על גבי העגלה.

## 2.2 מדידה וכיול מהירויות העגלה בעזרת תוכנת Doppler Effect

### 2.2.1 הפעלת המערכת הניסיונית

אם המחשב אינו מופעל חבר תחילה את קופסת הבקרה לחשמל בעזרת ספק, תפעילו את הקופסה וודאו שנורית חיווי ההדלקה דולקת. תפעילו את תוכנת Doppler Effect מקיצור הדרך שמופיע על שולחן העבודה. לאחר הפעלת התוכנה יופיע פנל בקרת תנועת העגלה. לשונית "כיול מהירות" נועדה להרצת העגלה קדימה ואחורה במהירויות שונות על גבי המסילה.



איור 5: לשונית "כיול מהירות" בתוכנת Doppler Effect

### 2.2.2 מדידה וכיול מהירויות העגלה

בחלק זה של הניסוי יש להריץ את העגלה קדימה ואחורה ולשלוט במהירותה בעזרת בורר מתחים המסופקים למנוע. התוכנה תמדוד את הזמן שלוקח לעגלה



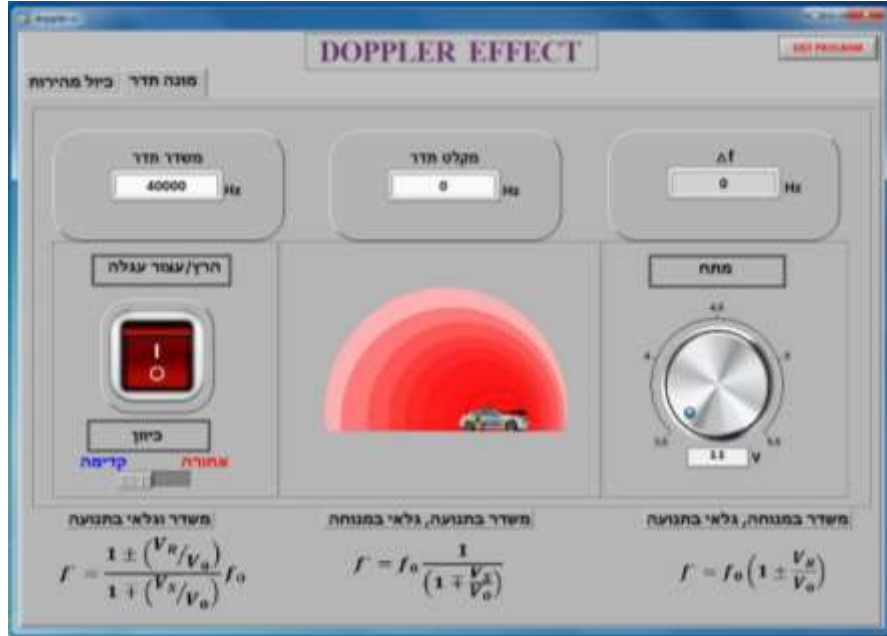
- לעבור את הקטע המסומן על המסילה וע"י חלוקת הדרך  $\Delta x$  בזמן  $t$  מתבצע חישוב המהירות.
- על מנת שנוכל להתחשב רק במהירות קבועה של העגלה, יש להתחיל להריץ את העגלה לפני סרט המדידה וכשתגיע למהירות קבועה בתחילת הסימון – להפעיל את השעון ולעצרו בסוף הקטע המסומן.
- א. תמדדו את הקטע המסומן בסרט והכניסו את הערך הנמדד לשדה " $\Delta x$ " (ברירת מחדל 0.7m).
- ב. תבחרו כיוון קדימה ע"י המתג מתחת לכפתור ההרצה.
- ג. תבחרו מתח הפעלה 3.5V ע"י בורר מתחים שנמצא בצד ימין.
- ד. מקמו את העגלה בתחילת המסילה, הדביקו את הפלטה המתכתית ותלחצו על כפתור ההפעלה. העגלה תתחיל לנוע קדימה.
- ה. ברגע שהעגלה תגיע לקטע המסומן תלחצו על לחצן השעון לתחילת ספירת הזמן. החזיקו את הלחצן לחוץ במהלך המדידה ושחררו אותו ברגע שהעגלה תגיע לקצה הסימון. (לחילופין ניתן ללחוץ על Enter לתחילת המדידה ופעם נוספת לסיום המדידה ועצירת העגלה).
- ו. המהירות המחושבת תופיע בתא  $U_1 (V = 3.5V)$  בשורה "קדימה". אפשר להסתפק בדיוק של 2 ספרות אחרי הנקודה.
- ז. המשיכו לבצע את המדידות עבור המתחים 3.5-5.5V עבור התנועה קדימה ואחורה. התוצאות יופיעו בתאים המתאימים.
- ח. תעתיקו את המהירויות למחברת ותבנו גרפים של המהירות כפונקציה של המתח  $v = f(V)$  עבור כל כיוון תנועה בנפרד. (גרף כיוול עבור תנועה קדימה וגרף עבור תנועה אחורה).
- ט. בצעו התאמה לינארית לגרף, קבלו משוואת קו ההתאמה ותעריכו את השגיאה בשיפועים.

#### הערה:

כרגע, מתוך משוואות קו ההתאמה, קיבלתם את הפונקציה של המהירות כתלות במתח המופעל על המנוע. הציבו את המתחים 3.5-5.5V של בורר המתחים במשוואות הישר שהתקבלו ותחשבו את המהירויות המתאימות עבור כל מתח. בהמשך הניסוי תשתמשו במהירויות שחישבתם מתוך משוואת הקו.

**2.3 מדידת תדירות הסחת דופלר**

בשלב זה של הניסוי, עברו ללשונית מונה תדר (איור 6). בניסוי זה יש להריץ את העגלה קדימה ואחורה באמצעות הפעלת מספר מתחים על מנוע העגלה.



איור 6: לשונית "מונה תדר" בתוכנת Doppler Effect

- המשדר משדר גלים בתדירות 40000Hz, המקלט קולט את התדר. מכיוון שישנה תנועה יחסית בין המשדר למקלט במהירות מסוימת, מתקבלים שינויים בתדר הנקלט.
- במהלך תנועת העגלה המקלט ידגום מספר פעמים את התדר הנקלט ובסוף, לאחר עצירת העגלה, בשדה "מקלט תדר" יופיע התדר הנקלט הממוצע.
- א. תבנו את המערכת המתוארת באיור 7, כאשר המקלט על העגלה בתחילת המסילה והמשדר בקצה השני של המסילה.
- ב. תפעילו את העגלה במהירות הנמוכה ביותר ( $V=3.5V$ ) ועצרו אותה בקצה השני של המסילה.
- ג. תרשמו את הערך שקלט המקלט.
- ד. בצעו את המדידה עוד פעמיים עבור המהירות הנמוכה ביותר וחשבו את הממוצע בין 3 המדידות של התדר. תעריכו את השגיאה בתדר הממוצע שחישבתם. (הניחו שגיאה של 2 הרץ עבור מדידה בודדת).
- ה. בצעו את המדידה וחישוב התדירות הממוצעת עבור כל המהירויות ובשני כיווני תנועת העגלה, קדימה ואחורה.

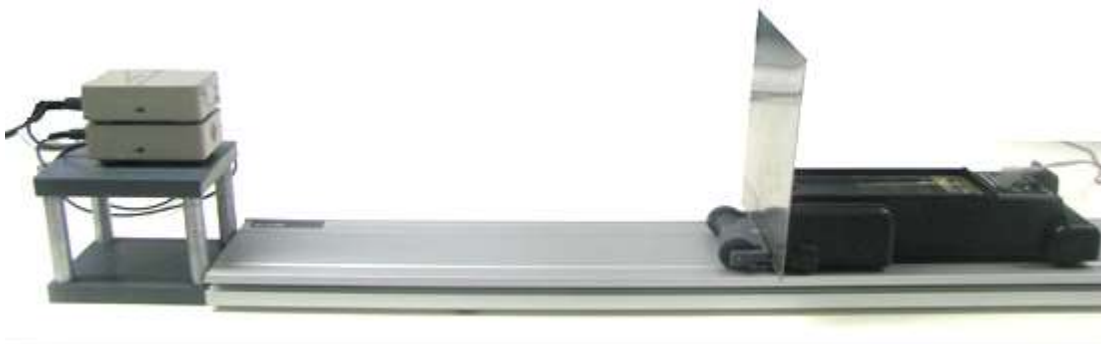
-אפקט דופלר-

ו. בצעו שוב את הסעיפים ב-ה, אך הפעם תחליפו בין המשדר והמקלט, כלומר המשדר על העגלה והמקלט בקצה המסילה.



איור 7: המקלט על העגלה והמשדר בקצה המסילה.

ז. שימו את המקלט והמשדר בקצה של המסילה אחד על השני והדביק את הפלטה מתכתית לפני העגלה (איור 8). תפעילו את העגלה ובצעו שוב את הסעיפים ב-ה.



איור 8 : מדידת הסחת דופלר כאשר המשדר והמקלט הם באותו צד במנוחה והעגלה בתנועה.

### 3. עיבוד תוצאות

#### 3.1. ניתוח תוצאות משדר במנוחה ומקלט על העגלה בתנועה

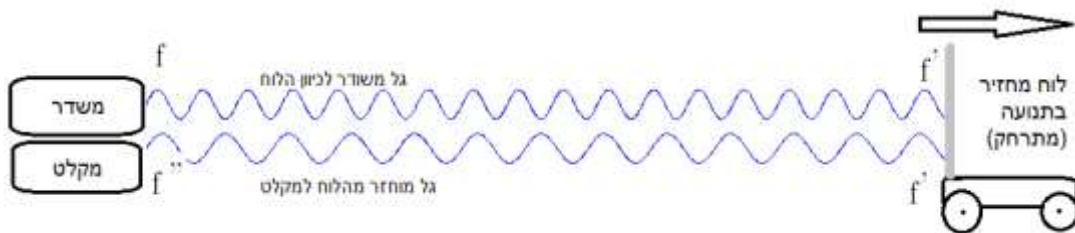
בהסתמך על משוואה 4, הציבו את ערכי ההסחה של התדירות (הממוצעת) שמדדתם בסעיף הקודם, כאשר מהירות התקדמות הגל באוויר  $V_0 = 344 \text{ m/sec}$ , וחשבו את מהירויות העגלה. תשוו את מהירויות העגלה שקיבלת עם המהירויות אותם חישובתם ממשוואת הקו של גרף כיוול המהירויות בחלק הראשון של הניסוי. תחשבו את השגיאות בערכי המהירות.

#### 3.2. ניתוח תוצאות משדר על העגלה בתנועה ומקלט במנוחה

בהסתמך על משוואה 7, תציבו את ערכי ההסחה של התדירות (הממוצעת) שמדדתם כאשר מהירות התקדמות הגל באוויר היא:  $V_0 = 344 \text{ m/sec}$ , ותחשבו את מהירויות העגלה. תשוו את מהירויות העגלה שקיבלתם עם המהירויות אותם חישובתם ממשוואת הקו של גרף כיוול המהירויות בחלק הראשון של הניסוי. תחשבו את השגיאות בערכי המהירות.

#### 3.3. ניתוח תוצאות עבור משדר ומקלט במנוחה ועגלה נעה

במקרה זה ניתן לראות את התופעה כשתי הסחות, הסחה ראשונה היא כאשר המשדר הנייח משדר לכיוון העגלה הנמצאת בתנועה (כלומר: משדר במנוחה ומקלט בתנועה) כך שהעגלה קולטת תדר מוסט. ההסחה השנייה מתרחשת כאשר העגלה משדרת את התדר המוסט לכיוון המקלט כאשר היא נמצאת בתנועה (משדר נע ומקלט במנוחה) (איור 9).



איור 9: משדר ומקלט במנוחה ועגלה נעה

הציבו את המהירויות שחישובתם בסעיפים 3.1 ו-3.2 בנוסחה 8, וחשבו את התדירות שצפויה להתקבל. תשוו את התדירות המחושבת לתדירות הממוצעת שמדדתם בסעיף 3.3.

### 3.4. מציאת מהירות הקול באוויר כאשר המקלט בתנועה

בהצבות דרך נוסחה 4 ניתן לחשב את מהירות הקול כאשר מדדנו את ההסחות והמהירויות. אם נפתח סוגרים במשוואה 4 נקבל:

$$(9) \quad f' = f_0 \pm \frac{f_0}{V_0} V_R$$

אם נתאר גרף של  $f'$  כפונקציה של  $V_R$ , נקבל גרף ליניארי ששיפועו  $\pm \frac{f_0}{V_0}$  (הסימן

תלוי בבחירת כיוון התנועה).

- תבחרו כיוון תנועה
- עבור  $V_R$  תשתמשו ב- 5 המהירויות שקיבלתם ממשוואת הקו בסעיף של כיוול המהירויות.
- עבור  $f'$  תבחרו 5 תדירויות הסחה ממוצעות המתאימות, מתוך סעיף "המקלט בתנועה והמשדר במנוחה".
- שרטטו את הגרף המתאר את המשוואה 9 ( $f'(V_R)$ ) וחישובו את מהירות הקול מתוך שיפוע הגרף. חישובו גם את השגיאה במהירות הקול.

### 4. קישורים לאינטרנט

השפעת אפקט דופלר על גוף הנמצא בתנועה ומשדר גלי קול.

1. <http://astro.unl.edu/classaction/animations/light/dopplershift.html>

2. [ממכון ויצמן](#)