

תוכן העניינים

1	מבוא
5	פרק 1: אמצעי דיבור פשוטים: תהליך מעבר הקול בתווך
8	צינור דיבור
10	זמן לניסוי
11	טלפון מאהבים
12	זמן לניסוי
13	טבע הקול
13	זמן לניסוי
15	דיון במכשירים
17	שלוש נקודות לסיכום
19	איזה סוג תהליך הוא הקול?
19	זמן לחשוב
21	מאמרים להרחבה והעמקה
22	פרק 2: גיטרה, תקליט ורמקול: גלי קול
22	אפיון צלילים
22	זמן לניסוי
23	זמן לניסוי
24	גלי קול
25	אורך גל
26	זמן מחזור
27	תדירות
28	כיצד מפרשים צלילים?
28	זמן לניסוי
31	זמן לניסוי
32	הקשר בין אורך גל, תדירות ומהירות קול
33	פונקציית גל של צליל טהור
35	רדיאנים – יחידות טבעיות למדידת זוויות
39	התאמה בין תווים מוזיקליים לבין תדרים
40	תרגילים לפרק 2
42	פתרונות לתרגילים נבחרים

44	פרק 3: צינורות דיבור ופסי רכבת: מהירות הקול בחומרים שונים
50	שאלה למחשבה
51	מהירות הקול באוויר
57	השוט הצולף ובום על-קולי
58	זמן לניסוי
62	גלגל מתגלגל
62	תרגילים לפרק 3
64	פתרונות לתרגילים נבחרים

65	פרק 4: כיצד מודדים קול?
65	מהי עוצמת צליל
65	זמן לניסוי
67	לחץ הקול בפיקים
67	לחץ קול אפקטיבי
68	עוצמת הקול – אנרגיה ביחידת זמן
71	סולם הדציבלים
76	רמת השמע של מקהלה
78	שינוי עוצמת הקול עם המרחק – מה מונע צינור דיבור?
78	זמן לניסוי
81	מה לא מונע צינור דיבור?
81	זמן לניסוי
82	זמן לניסוי
87	תרגילים לפרק 4
89	פתרונות לתרגילים נבחרים

90	פרק 5: תעלומות בשני קולנים ובעוגב
90	תעלומת שני הקולנים – התאבכות בזמן
91	זמן לניסוי
92	זמן לניסוי
95	תעלומות בצינורות עוגב – התאבכות במרחב
96	זמן לניסוי
98	זמן לניסוי
100	גל קול עומד בצינור פתוח

105	.....	גל קול עומד בצינור סגור
109	.....	זמן לניסוי
111	.....	גל קול עומד בצינור עם קצה אחד סגור וקצה שני פתוח
113	.....	כלי נשיפה בחורף ובקיץ
113	.....	זמן לניסוי
115	.....	מיתרי גיטרה
115	.....	זמן לניסוי
117	.....	כיצד אנחנו מדברים?
118	.....	המטאלופון
118	.....	זמן לניסוי
119	.....	כוסות מזמרות
120	.....	זמן לניסוי
122	.....	תרגילים לפרק 5
125	.....	פתרונות לתרגילים נבחרים
126	.....	פרק 6: הסטטוסקופ
127	.....	כניסה של פולס בודד
129	.....	כניסה של אות גלי
130	.....	מדידת ההגברה
131	.....	תדרים מסתוריים
133	.....	מעבדה לחקר הסטטוסקופ
134	.....	מאמרים להרחבה והעמקה
135	.....	פרק 7: רמקול, מיקרופון ומערכות בקרה
136	.....	הרמקול
136	.....	רמקול פייה (שופר)
137	.....	רמקול מפזר
137	.....	רמקול אלקטרודינמי
138	.....	זמן לניסוי
139	.....	רמקול פייזואלקטרי
140	.....	רמקול אלקטרוסטטי
142	.....	התקנת רמקול
142	.....	זמן למחקר ומחשבה

145	פאזואינברטור – הופך פאזה
146	מונו וסטריאו
146	זמן לניסוי
147	מיקרופון
147	זמן לניסוי
150	מיקרופון פחמי
150	מיקרופון אלקטרודינמי (מיקרופון דינמי)
151	מיקרופון סרט
151	מיקרופון סליל
152	מיקרופון קיבולי (קונדנסר)
152	מיקרופון גבישי (פייזואלקטרי)
153	לוח בקרה במערכות הגברה
155	מאמרים להרחבה והעמקה

מבוא

אילו התמוטט סלע גדול בלב המדבר או עץ היה נופל בלב יער, במרחק של מאות קילומטרים מיצור חי כלשהו, האם היה משמיע קול בנפילתו? אנשים שונים ישיבו תשובות שונות לשאלה עתיקה זו. מבחינה אובייקטיבית יש שיאמרו כי הקול יישמע מכיוון שקול אינו מתקיים רק בראש המאזין. לעומת זאת, מבחינה סובייקטיבית יש שיאמרו כי קול מחייב מישהו שיאזין לו. מה נכון? האם התשובה לשאלה מורכבת זו קשורה למהות הקול? כדי לענות על שאלה זו, עלינו להבין מהו קול. למעשה, קול הוא גל הנוצר מתנודות של גופים שונים. הצלילים שאנו שומעים הם בתחום השמע שהאוזן יכולה לקלוט, בניגוד גמור לתחומים אחרים שהאוזן אינה יכולה לקלוט, כדוגמת על-שמע (אולטרה-סאונד) ותת-שמע (אינפרה-סאונד). למעשה, כשאנו שומעים קולות, אנו חשים גלים המתקדמים באוויר שתדירותם נמצאת בתחום השמע. קיימים בעלי חיים ויונקים כמונו המסוגלים לשמוע בתחומי העל-שמע, כדוגמת העטלף. בעל חיים זה תרומנוט אחר טרפו באמצעות פליטת גלים על-קוליים וגילוי ההדים החוזרים מהם. לאחר שהקול נפלט מנחיריו של העטלף, הוא יכול להיות מוחזר כהד מחרק כלשהו ולחזור לאוזני העטלף. התנועות של העטלף ושל החרק יחסית לאוויר גורמות לתדירות הנשמעת על ידי העטלף להיות שונה בכמה קילוהרץ מהתדירות שהוא עצמו פלט. העטלף מתרגם אוטומטית הבדל זה למהירות היחסית שבינו לבין החרק, וכך למעשה הוא יכול להתבית עליו. מבחינה פיזיולוגית, חוש השמיעה הדומיננטי המאפשר את קיומו היום-יומי של העטלף הוא תוצאה של חוש ראייה ירוד, כפי שמתבטא בסריקות מוחיות ועצביות בעטלפים. כלומר, החלקים האחראים על מערכת השמע בעטלף גדולים יותר מאלו הקיימים עבור מערכת הראייה. דוגמה לחיות השומעות בתת-שמע הם הפילים. הפילים משתמשים בגלי הקול התת-שמעיים לתקשורת בין בני מינם על פני טווחים של קילומטרים, בעיקר לצורך מציאת בני זוג.

אם כן, ראינו כי בעלי חיים משתמשים לצורך קיומם היום-יומי בגלי קול בטווחים שונים. גם בני האדם עושים זאת בטווחים שהם עצמם שומעים ובכאלה שלא. לדוגמה, צוותי חיפוש גאולוגיים משתמשים בגלי קול בתדירויות משתנות כדי לבחון הימצאות נפט בקרום כדור הארץ. אוניות וצוללות נושאות מתקנים פולטי קול לצורך גילוי מכשולים תת-ימיים. במקצועות הרפואה משתמשים בגלי קול בתדירות גבוהה כדי ליצור תמונות ממוחשבות של רקמות רכות. גם בטווחי השמע של האדם קיים שימוש בלתי תלוי בקול, וברבות השנים למד האדם לחקות את האופן שבו משתמשים בעלי חיים שונים בקול לצורך פיתוחם של מכשירים שונים. גם בתחום השמע ידע האדם לעשות שימוש משכיל ומיוחד במינו. דוגמה לכך, בשימוש במוזיקה לגוניה, שמהווה חלק בלתי נפרד מחיינו, עושים מעין "משחק" בצלילים אותם מסוגל האדם לשמוע. בכל כלי היוצר קול מוזיקלי, יהא זה כינור, עוגב או פסנתר, ההרמוניה היסודית ועוד

אחת או יותר מההרמוניות הגבוהות יותר נוצרות בו-זמנית. לפיכך, אנו שומעים אותן יחדיו – כלומר, הן משתלבות, מחסירות אחת את השנייה (מתאבכות) ויוצרות גל אחד משותף. כשכלים שונים מנגנים אותו התו, הם יוצרים תדירות יסודית זהה, אבל הרכב שונה בכל כלי וכלי, של עוצמת ההרמוניות הגבוהות. לדוגמה ההרמוניה הרביעית של הדו האמצעי (באמצע הפסנתר) עשויה להיות חזקה יחסית בכלי מסוים וחלשה או נעדרת בכלי אחר. לפיכך, כלים שונים נשמעים לנו באופן שונה גם אם מנגנים בהם אותו התו. זה מה שהיה קורה לגלים המשולבים של כינור וגיטרה, גם אם היו מנגנים אותו התו.

אם כן, ראינו את ההכרח הקיומי של גלי הקול, אך מהי ההגדרה הטובה והמדויקת ביותר לכל מה שתיארנו עד כה ומשותפת לכלל בעלי החיים, ולא משנה באיזו תדירות הם שומעים ומהו השימוש שהם עושים בו? כהגדרה רחבה יותר, **גל קול מוגדר כגל אורכי בתדירות כלשהי המתקדמת בתווך. התווך יכול להיות מוצק, נוזל או גז.** רוב הקולות שאנו שומעים מועברים באוויר. בהשוואה למוצקים ונוזלים, האוויר הוא מוליך קול גרוע. הדוגמה הטובה ביותר מתבטאת היטב בחוף הים. אם נצמיד את אוזנו לקרקע חולית יבשה לחלוטין ונכה בקרקע, לא נשמע דבר. אם נתקדם מרחק קצר לקרקע רטובה, נשמע את המכות היטב. הסיבה לכך נעוצה בכך שהקרקע היבשה מלאה באוויר העוטף את גרגרי החול, ולכן הולכת הקול נמוכה מאוד. לעומת זאת בקרקע רטובה, הקרקע נוזלית והולכת הקול בתווך נוזלי טובה מאוד. גורמים סביבתיים רבים משפיעים על התקדמות הקול בתווך. מהירות הקול בטמפרטורה של 0°C צלזיוס היא כ-330 מטרים בשנייה. כאשר האוויר מכיל אדי מים, מהירות זו גדלה. שינוי טמפרטורה יכול אף הוא להאט או להגביר את מהירות הקול. מערכת השמיעה היא מערכת החישה האחראית על חוש השמיעה ומאפשרת קליטת קולות. המערכת אחראית על התמרת הקלט הפיזיקלי השמיעתי אל אות חשמלי והעברתו למרכזי העיבוד המרכזיים במוח, על ניתוח מרכיביו והפקת מידע מכך ועל זיהוי מקורו. לשם פעולות הניתוח נעזרת מערכת השמע לעיתים במידע המגיע ממערכות חושים אחרות כגון מערכת הראייה, וכן בניבויים אשר הוכנו על בסיס ידע קדום מבעוד מועד. הגירוי שאותו מערכת השמע מנתחת כדי להפיק מידע הוא גלי קול. האוויר העשוי מחלקיקים שונים יכול להידחס ולהתרווח כתלות בגורמים פיזיקליים שונים כמו טמפרטורה. לעיתים קרובות דחיסות האוויר מופיעה במחזוריות מסוימת, אשר ניתנת לאפיון כגל ונהוג לקרוא לו גל קול. מערכת השמע בנויה כך שהיא מתמירה את תכונות הגלים הפיזיקליות – משרעת, תדר ורמת מורכבות – אל עבר הממד התפיסתי הכולל את עוצמת הצליל (Loudness), גובהו (Pitch) וגוונו (Timbre) בהתאמה.

הקול מופיע במקומות שונים במקרא, והבולט ביותר בהם הוא בפרשת יתרו בפסוק: "וכל העם רואים את הקולות ואת הלפידים ואת קול השופר ואת ההר עשן, וירא העם וינועו ויעמדו מרחוק". האם באמת ניתן לראות קול? האם התופעה שעם ישראל ראה את הקולות ניתנת

להסבר בכלים פיזיקליים ולא רק בפירושים שונים? האם מעמד הר סיני היה כה נשגב וגדול עד שהתיאור יצא מגדרו? האם מטרת התובנה היא לסחוף את הצופים וליטוע בהם את האמונה באל? בעיון בחלק מפרשנות המקרא כמעט כל התשובות אפשריות, ואף ההסברים המובאים חושפים את הראייה הפסיכולוגית. דוגמה לכך היא תופעה הידועה כסינסתזיה (ערבוב חושי) שמשמעותה מיזוג קוגניטיבי בין חושים שונים. שכיחות התופעה באוכלוסייה היא כ-4% (1 ל-23) ואין הבדל בשכיחות בין גברים לנשים. מתועדים יותר מ-50 סוגים שונים של סינסתזיה. למשל, בסינסתזיה גרפמה-צבע אותיות וספרות נתפסות כמלוות בחוויה של צבע (פוטזים); בסוג אחר של סינסתזיה מילים יכולות לגרום לתחושת טעם על הלשון; ובסוג אחר יחידות זמן, כגון שנים או חודשים, נחוות כממוקמות במיקום ספציפי וקבוע במרחב. אופן נוסף שבו ניתן להציג זאת הוא ההבנה שאולי הפועל "רואים" משמעותו איננה ראייה חושית אלא הבנה. בפרשת ראה לדוגמה התורה אומרת: "ראה אנכי נותן לפניכם היום ברכה וקללה". כאשר שם ברור שאין מדובר במשמעות של ראייה, אלא של הבנה, ואולי כך גם ביחס לקולות במעמד הר סיני, שבו הבין עם ישראל את משמעות הקולות ואת עוצמת ההתגלות שהייתה סביבו. ואולי אפשר להבין זאת גם בדרך נוספת. כידוע יש הבדל בין חוש השמיעה לחוש הראייה. חוש הראייה הוא חוש ממשי, מציאותי. כאשר אדם רואה משהו, הרי שיש בכך משהו ברור ומוחלט, למרות שיש בכך גם משהו מוגבל, כי הראייה היא ראיית המציאות. מנגד, כאשר אדם שומע דבר מסוים הרי שאין כאן בהכרח דבר מוחשי וברור. אדם שומע קולות, כאשר את המשמעות לקולות הוא מעניק על פי הבנתו. למשל, אדם יודע שקולות מסוימים משמעותם היא מילה מסוימת, ואם כך, כשהוא שומע קול זה, הוא מדמיין מילה זו. כשאדם שומע כיסא זו, ממילא הוא מדמיין לעצמו כיסא. כך גם לגבי קולות אחרים בטבע: כשאדם שומע ציוץ של ציפורים, הרי שהוא מדמיין ציפורים. בשמיעה אדם יכול לדמיין גם דברים שהם מעבר למציאות. אדם יכול לדמיין דברים גבוהים, עמוקים ועליונים, דברים שאינם קיימים במציאות אלא רק במחשבה ובהבנה הפנימית. אמנם דבר זה איננו מוחלט. הדמיון נותן עוצמה ומעוף, אך אינו מדויק כמו המציאות הנגלית לעיניים. אדם שלא ראה הר געש יכול לנסות לדמיין מהו הר געש, אבל לא יצליח לעולם להגיע לדמיון מוחלט. אדם שלא ראה עץ מסוים לא יכול לדמיין אותו בצורה מלאה. במעמד הר סיני עם ישראל הגיע למציאות שבה הוא היה מסוגל לראות את המציאות הפנימית. ה"שפת אמת" (תרל"ז, ד"ה פנים בפנים) מבאר שלמרגלות הר סיני קיבלנו את ההכנה, את הכוח הפנימי והנפשי לקבל את התורה.

האם ניתן בכל זאת להסביר תופעה עתיקת יומין זו בכלים מדעיים? בפיזיקה קיימת תופעה הקרויה אפקט אקוסטו-אופטי. תופעה זו מקורה באינטראקציות בין גלי קול לגלי אור (לדוגמה שבירה של לייזר אור על ידי אולטרה-סאונד). באופן כללי, השפעות אקוסטו-אופטיות מבוססות על השינוי של מדד שבירה של מדיום עקב הימצאות גלי קול במדיום זה. גלי קול מייצרים סריג אינדקס שבירה בחומר, וזה הסורג ש"נראה" על ידי גל האור.

לאור צורכי הסטודנטים והמורים, ומתוך רצון לעדכן את הוראת הפיזיקה, החלטנו לפתח סביבת לימוד מקורית בהוראת הקול (להלן נתייחס לסביבת הלימוד במילה "קורס"). הסיבה לכך נעוצה בעובדה כי נושא חשוב זה, המשוייך להוראת הגלים, אינו תופס מקום כלל בהוראת הפיזיקה, וגם אם כן, באופן המצומצם ביותר. בחיבור זה מובא לפניכם פיתוח הבנתי והדרגתי של מושג הקול תוך המחשה ניסויית מובנית של הקול ועד לביטויים המתמטיים המתארים תופעה מופלאה זו. ההמחשות נבחרו כך שקורא סקרן יוכל לחזור על רוב הניסויים בסביבה ביתית ללא צורך בציוד מעבדה מיוחד. גם לקוראים שאינם בקיאים ברזי המתמטיקה הפיזיקלית המתארת את הקול, חיבור זה מהווה חוויה ייחודית ובלתי תלויה בהבנת נושא זה, שיכולה לפתוח אשנב חדש להוראת הפיזיקה לרמות שונות. בסיומו של כל פרק נוסף תרגול מעשי, ולעיתים גם עיוני, המעמיק ומאפשר ראייה נוספת. בנוסף, למעוניינים קיימות הפניות בסיומו של כל פרק המאפשרות הרחבה והעמקה על ידי מאמרים הקשורים לנושאים הרלוונטיים המובאים בכל פרק. לסיום, תקווה בליבנו כי השימוש בחיבור זה ירחיב דעת ויגרום לאנשים ללמוד פיזיקה מתוך הבנה והנאה.