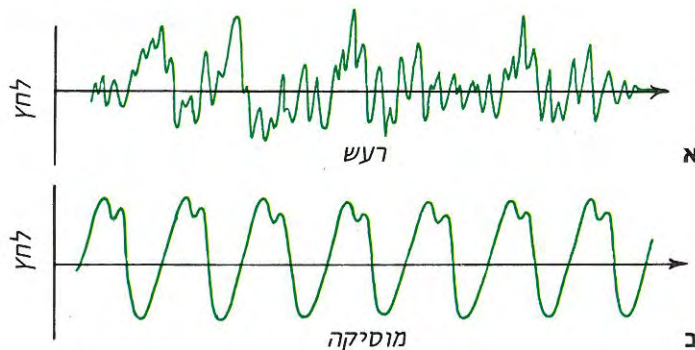


צלילי המוסיקה



רוב הקולות שאנו שומעים הם רעשים. קול פגיעתו בקרקע של חפץ שנשמט מידנו, טריקת דלת, טרטור אופנוע רועם וכמוהם מרבית קולות התנועה ברחובות העיר הם רעשים. הרעש הוא, למעשה, תנודה לא סדירה באוזן הפנימית שלנו, הנובעת מתנודה לא סדירה כלשהי המחוללת אותה. אם נשרטט תרשים שיתאר את ההשתנות בזמן של לחץ האוויר על עור התוף בשעה שאוזנינו נחשפות לרעש, הגרף שיתקבל עשוי להיראות כבאיור 20.1א. אופיים של קולות המוסיקה שונה בתכלית; הם בנויים מצלילים (טונים) מחזוריים פחות או יותר - "תווים" מוסיקליים. (אך כלי נגינה בהחלט מסוגלים להשמיע גם רעשים!) לגרף המתאר צליל מוסיקלי צורה החוזרת על עצמה שוב ושוב (איור 20.1ב). ניתן להציג גרפים כאלה על צג מחשב המצויד בממשק מתאים או על צג המכשיר המיוחד למטרות כאלה - האוסצילוסקופ, אם יזינו אותם באותות שמפיק מיקרופון הממיר צלילים באותות חשמליים.



איור 20.1
הצגה גרפית של רעש ושל
מוסיקה.

קו הגבול המפריד בין רעש למוסיקה אינו חד, ותלוי בטעמו האישי של כל אחד ואחד. יש מלחינים בני ימינו שעבורם הגבול אינו קיים כלל. לעומתם, יש אנשים שלטעמם מוסיקה בת זמננו, ולעיתים מוסיקה מתרבויות הזרות להם, אינה אלא רעש. ההבחנה בין סוגי מוסיקה כאלה לבין רעש היא הבחנה אסתטית, שאלה של טעם. ועם זאת אין כל קושי להבחין בין מוסיקה מקובלת - כלומר, מוסיקה קלאסית מערבית כמו גם רוב סוגי המוסיקה העממית - לבין רעש. אדם שאיבד לחלוטין את כושר השמיעה יוכל להבחין בין הסוגים הללו אם יצפה בצג המחשב או האוסצילוסקופ.

המוסיקאים נוהגים לאפיין את צלילי המוסיקה באמצעות שלוש תכונות עיקריות: גובה הצליל, רום הקול (התלוי בעוצמתו) וגון הקול או איכותו.

גובה הצליל של קול כלשהו תלוי בתדירותו. תנודות מהירות של מקור הקול יוצרות טון חד וגבוה. אנו מאפיינים את גובה הצליל במונחים של מקומו בסולם הצלילים (הטונים). כשמקשים בקליד לה אמצעי בפסנתר, פטיש קטן מכה בשניים או בשלושה מיתרים שכל אחד מהם מתנדנד בקצב של 440 פעמים בשנייה. גובה הצליל של הטון לה אמצעי הוא איפוא 440 הרץ*.

טונים מוסיקליים שונים יתקבלו אם נשנה את תדירותו של מקור הקול המתנדנד. זאת עושים לרוב על ידי שינוי הגודל, המתיחות או המסה של הגוף המתנדנד. נגן הגיטרה או הכנר משנים את מתיחותם של מיתרי הכלי כשהם מכוונים אותו. אחר כך ניתן להפיק צלילים שונים על ידי שינוי אורך המיתר בלחיצת אצבע במקום המתאים לאורכו.

בכלי נשיפה אפשר לשנות את אורכו של עמוד האוויר המתנדנד (כמו בטרומבון או בחצוצרה) או לפתוח ולסגור נקבים בצירופים שונים בדופן השפופרת (למשל בסקסופון, בקלרנית או בחליל) כדי לשנות את גובה הצליל המופק.

תדירותם של צלילים גבוהים המשמשים במוסיקה אינה עולה לרוב על 4000 הרץ, אך אדם צעיר ממוצע מסוגל לשמוע קולות שתדירותם מגיעה עד 18,000 הרץ. יש אנשים המסוגלים לשמוע צלילים גבוהים עוד יותר, ולכך מסוגלים גם רוב הכלבים. לרוב יורד הגבול העליון של התדירויות שאנו מסוגלים לשמוע עם הזדקנותנו. תכופות ישנו צליל גבוה שאדם זקן אינו שומע ואילו אדם צעיר מבחין בו בבירור. וכך, ייתכן שכאשר יגיע היום שבו תוכלו להרשות לעצמכם לרכוש מערכת סטריאו באיכות גבוהה, כבר לא תוכלו לנצל את תכונותיה במלואן . . .

עוצמת הקול תלויה בשינויי הלחץ המתרחשים בגל הקול או במילים אחרות - במשרעת. (ליתר דיוק, כבכל סוגי הגלים, העוצמה נמצאת ביחס ישר לריבוע המשרעת.) עוצמת הקול היא תכונה פיסיקלית אובייקטיבית לחלוטין של גל הקול, שניתן למדדה במגוון מכשירים אקוסטיים (ובסיוע אוסצילוסקופ, כמתואר באיור 20.2, או מחשב). לעומת זאת, **רום הקול** הוא עניין של תחושה; הוא תלוי בעוצמה, אך באופן שאינו פשוט כל עיקר. אילו הגברתם את קולו של מכשיר הרדיו עד שנדמה היה לכם כי קולו רם כפליים מכפי שהיה, היה עליכם להגדיל את ההספק המשודר, ולכן גם את עוצמת הקול, פי שמונה בקירוב.

* מעניין לציין כי הטון לה אמצעי משתנה מתדר נמוך של 436 הרץ ועד תדר גבוה של 448 הרץ בתזמורות סימפוניות שונות.

גובה הצליל



מייקל ג'קסון

רום הקול

אף שאנו יכולים להבחין בדיוק רב בגובה הצליל, אוזנינו אינן כה יעילות בהבחנה ברום הקול. עוצמתם של הקולות הרמים ביותר שאנו מסוגלים לסבול גדולה פי מיליון מיליונים מעוצמתו של הקול הרפה ביותר שאנו מסוגלים לשמוע. ההבדל ברום הקול, לעומת זאת, קטן בהרבה.

רום הקול היחסי שהאוזן שומעת נקרא רמת הקול, וזו נמדדת ביחידות דציבל, הקרויות כך על שם ממציא הטלפון אלכסנדר גראהם בל. השוואה בין כמה קולות מוכרים ובין רמות הקול שלהם מובאת בטבלה 20.1.

הדירוג ביחידות דציבל הוא לוגריתמי: רום הקול של קול בן 10 דציבל גדול פי 10 מזה של קול בן 0 דציבל, שהוא סף השמיעות; אולם, קול בן 20 דציבל אינו רם כפליים מקול בן 10 דציבל; קול של 20 דציבל רם פי 10 מזה של 10 דציבל או פי 100 מזה של סף השמיעות. באותו אופן, 30 דציבל הם פי 1000 מסף השמיעות ו-40 דציבל - פי 10,000 ממנו. וכך, 60 דציבל מייצגים רמת קול גדולה פי מיליון מ-0 דציבל; 80 דציבל מציינים רמת קול גדולה פי 100 מזו של 60 דציבל. אם נחשפים לקולות ברמה של 85 דציבל ומעלה, נגרם נזק פיסיוולוגי למערכת השמיעה, שדרגתו תלויה במשך החשיפה לקולות ובמאפייני התדירויות שלהם. הנזקים שגורמים קולות רמים עשויים להיות זמניים או קבועים - תלוי במידה שבה ניזוקו או נהרסו איברי קורטי, האיברים באוזן הפנימית שבהם מצויים קולטני השמיעה. פרץ רב עוצמה יחיד של קול מסוגל ליצור באיבר כזה תנודות שעוצמתן כה גדולה, שהן מסוגלות לקרוע את האיבר. קול שעוצמתו קטנה במעט אך עדיין גבוהה מדי, עלול לשבש תהליכים שונים בתאים של איברי קורטי, נזק שבסופו של דבר יגרום להפסקת תפקודם. לרוע המזל, אם נהרסים תאי האיברים הללו, הם אינם מתחדשים.



איור 20.2

הדגמה של הצגת אות קול על צג האוסצילוסקופ.

טבלה 20.1

מקורות קול שכיחים ורמותיהם

מקור הקול	רמת הקול (דציבל)
מטוס סילון במרחק 30 מ'	140
צופר אזעקה, קרוב	125
מוסיקת דיסקו מוגברת	115
מכונת סמור	95
מתחיל נזק לאוזן	85
רעש של רחוב סואן	70
שיחה בבית	65
רדיו שקט בבית	40
לחישה	20
רשרוש עלים	10
סף השמיעות	0

האם עקב הימצאות בקונצרטים או במועדוני לילה ובמסיבות שבהם מושמעת מוסיקה רעשנית נגרם נזק בלתי הפיך לשמיעה?

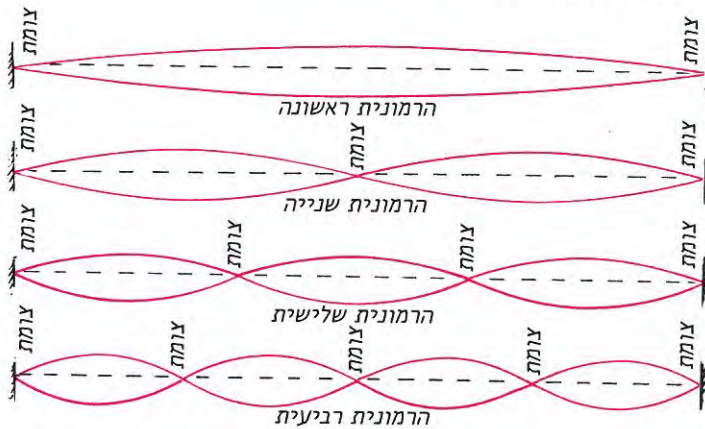
שאלה

תשובה:

כן, הנזק תלוי בעוצמת הקול, במשך הזמן, במידת הקרבה למקור המוסיקה ובתכיפות שבה מבלים במקומות אלה. יש להקות ששמות את הדגש על עוצמת המוסיקה ולאווזקא על איכותה. תופעה שכיחה היא שככל שהשמיעה נפגעת, חברי הלהקות (ואוהדיותן) זקוקים למוסיקה בעוצמות גדולות והולכות כדי להגיע לסיפוקם. שכיחים במיוחד הם נזקים לשמיעה הנגרמים עקב שמיעת קולות בתחום התדירויות 2000-5000 הרץ. שיא הרגישות של השמיעה האנושית היא בדרך כלל לקולות בתחום התדירות של 3000 הרץ.

גוון

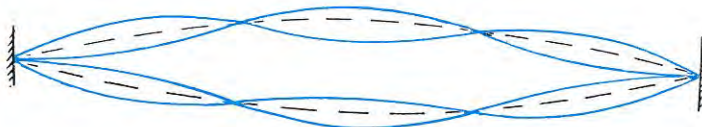
איננו מתקשים כלל להבחין בין צליל של פסנתר לבין צליל באותו גובה שמקורו בקלרנית. לכל צליל כזה מאפיינים ייחודיים הנבדלים זה מזה בתכונה הנקראת **איכות הקול** או **גוון הקול**. רובם הגדול של צלילי המוסיקה בנויים מהרכבה (סופרפוזיציה) של תדירויות רבות המכונות **רכיבי קול** או פשוט רכיבים. התדירות הנמוכה ביותר, המכונה **תדירות יסודית**, קובעת את גובה הצליל. רכיבי קול שתדירותם היא כפולה שלמה של התדירות היסודית נקראים **הרמוניות**. טון שתדירותו כפולה מזו של התדירות היסודית הוא ההרמונית השנייה, טון שתדירותו גדולה פי שלושה מהתדירות היסודית הוא ההרמונית השלישית, וכן הלאה (איור 20.3)*. מגוון הרכיבים הוא המעניק לצליל מוסיקלי את איכותו ואת גונו האופייניים.



איור 20.3

אופני תנודה של מיתר גיטרה.

כך למשל, אם נקיש בקליד דו האמצעי בפסנתר, ניצור טון יסודי בתדירות של כ-262 הרץ וכן תמוזיג של רכיבי קול בעלי תדירות גדולה פי שניים, פי שלושה, פי ארבעה, פי חמישה - וכן הלאה - מתדירותו של דו האמצעי. מספר הרכיבים ועוצמותיהם היחסיות הם שקובעים את איכות הקול של הפסנתר. למעשה, כל כלי מוסיקלי מפיק צלילים המורכבים מטון יסודי ומרכיבי קול. טונים טהורים, המורכבים מתדירות אחת בלבד, אפשר ליצור באמצעים אלקטרוניים. סינתסיזרים אלקטרוניים מייצרים טונים טהורים ותערובות של טונים כאלה, המהווים מגוון עצום של צלילים מוסיקליים.



איור 20.4

תנודה מורכבת הכוללת את אופן התנודה היסודי ואת ההרמונית השלישית.

* במינוח המשמש במוסיקה, ההרמונית השנייה נקראת טון עילי ראשון או עלית ראשונה, ההרמונית השלישית נקראת עלית שנייה, וכך הלאה.

לא כל רכיבי הקול הקיימים בצליל מורכב הם כפולות שלמות של התדירות היסודית. שלא כהרמוניות של כלי הנשיפה, בכלי מיתר כמו הפסנתר נוצרים רכיבי קול "מתוחים" שהם בקירוב הרמוניות, אך לא בדיוק. עובדה זו היא גורם חשוב בכיוון פסנתרים ומקורה בכך שאשיות (stiffness) המיתרים תורמת מעט לכוח המחזיר של המתיחות.

את גון הצליל קובעים קיומם של רכיבי הקול השונים ועוצמותיהם היחסיות. צליל בתדירות (יסודית) מסוימת של טון מסוים שנוצר בפסנתר וצליל בעל אותה תדירות שנוצר בקלרנית, למשל, הם בעלי גוון שונה, שהאוזן מסוגלת לזהות בקלות בשל רכיבי הקול השונים שמרכיבים אותם. שני צלילים בגובה שווה, שגונייהם שונים, נבדלים זה מזה בהרכב של רכיבי הקול שלהם או בעוצמותיהם היחסיות השונות.

דו בפסנתר



דו בקלרנית



איור 20.5

צלילי הפסנתר והקלרנית
נבדלים בגונם.

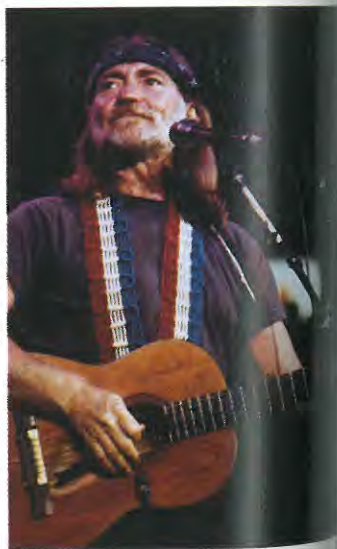
כלי נגינה

את כלי הנגינה המקובלים אפשר לסווג באחת משלוש מחלקות: כלים שבהם הקול נוצר במיתרים מתנודדים, כלים שבהם הקול נוצר באמצעות עמודי אוויר מתנודדים וכאלה שבהם הקול נוצר בהקשה - היוצרת תנודה של משטח דו-ממדי.

בכלי קשת, תנודות המיתרים מועברות ללוח תהודה וממנו לאוויר, זאת תוך כדי איבוד ניכר של אנרגיה. כלי מיתר מייצרים קול ביעילות נמוכה, וכדי לפצות על כך מצויות בתזמורות קבוצות גדולות יחסית של כלי קשת. מספר קטן יותר של כלי נשיפה, שיעילותם גבוהה, די בהם כדי לאזן מספר גדול בהרבה של כינורות.

בכלי נשיפה, הקול נוצר בתנודה של עמוד אוויר בתוך הכלי. את התנודה בעמודי האוויר ניתן לחולל באופנים שונים. בכלי נשיפה ממתכת, כדוגמת החצוצרה, קרן היער (קרן צרפתית) והטרומבון, תנודות של שפתי הנגן מגיבות עם גלים עומדים, שיוצרת אנרגיה אקוסטית המוחזרת בתוך הכלי מן השפה דמוית הפעמון. את אורכם של עמודי האוויר המתנודדים משנים באמצעות שסתומים המוסיפים, או מפחיתים, קטעים בצינור. בכלי נשיפה מעץ, כמו הקלרנית, האבוב והסקסופון, זרם של אוויר שיוצר הנגן גורם לתנודה בלשונית שבכלי, ואילו בחליל צד, בחלילון או בפיקולו הנגן נושף מול דפנותיו של נקב ויוצר זרם אוויר מרפרף הגורם לעמוד האוויר להתנודד.

בכלי נקישא, כדוגמת התופים למיניהם והמצילתיים, מכים בקרום או במשטח גמיש דו-ממדי לשם יצירת הקול. הטון היסודי שנוצר תלוי בצורתו הגיאומטרית של המשטח, בגמישותו, ולעיתים במתיחותו. שינויים בגובה הצליל נובעים משינויים במתיחות המשטח המתנודד. לחיצה ביד על יריעת התיפוף היא אחת הדרכים להשגת המטרה. אפשר לעורר אופני תנודה שונים באמצעות הקשה בחלקים שונים של המשטח. בתוף הדוד, צורת הדוד משפיעה על תדירות התוף. וככלל הצלילים המוסיקליים, גם במקרה זה תלוי גון הקול במספרם של רכיבי הקול ובעוצמותיהם היחסיות.



ווילי נלסון



ווינטון מרסאליס

סולמות מוסיקליים

כלי נגינה אלקטרוניים נבדלים הבדל ניכר מכלי הנגינה הרגילים. במקום מיתרים שיש להעביר עליהם קשת, לפרוט עליהם או להקיש בהם, ובמקום לשוניות שיש לנשוף עליהן או יריעות שיש להקיש עליהן, זרמי אלקטרונים הם המחוללים את האותות שמרכיבים את צלילי המוסיקה. במקרים אחרים המקור הראשוני הוא קול הנוצר בכלים אקוסטיים, שעובר שינוי אלקטרוני. הדרישות שהמוסיקה האלקטרונית מציבה בפני המלחין והנגן הן למומחיות שמעל ומעבר לידע במוסיקה. היא נותנת כלי חדש ורב עוצמה בידי המוסיקאי.

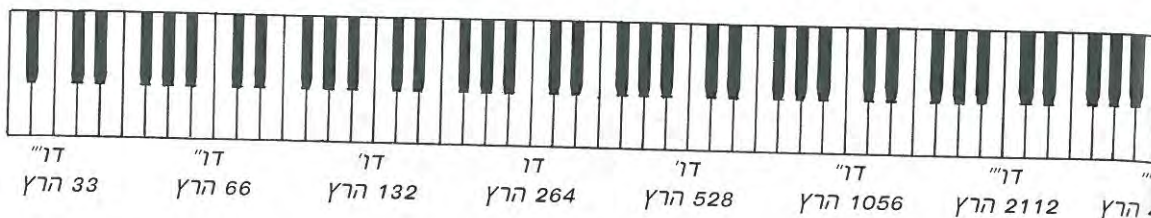
כבר בשנת 530 לפנה"ס גילה הפילוסוף והמתמטיקאי היווני פיתגורס כי אם מנגנים בבת אחת תווים שונים על כלי מיתר, ציורף הצלילים נעים לאוזן אם היחס בין אורכי המיתרים הוא יחס של מספרים שלמים, אך הוא צורם אם היחסים ביניהם אינם יחסים של מספרים שלמים (בין השאר עקב הפעילות שנוצרות אז). גלילאו, שסייע בידי אביו, וינסנצו גלילאי (מוסיקאי ותיאורטיקן של המוסיקה), בסדרה של ניסויים בבסיס הפיסיקלי של ההרמוניה, הוא שהגה את רעיון התדירות. סדרה של תווים בתדירויות עולות מהווים **סולם מוסיקלי**. קיימים סולמות רבים שנוצרו בתרבויות שונות במהלך הדורות. הסולם הפשוט ביותר בתרבות המערבית הוא הסולם המז'ורי הדיאטוני המוכר: "דו רה מי פה סול לה סי דו" (בארצות שבהן דוברים אנגלית וגרמנית מוכר הסולם על פי האותיות A, B, C, D, E, F, G). בסולם זה, גובהם (או תדירויותיהם) של תווים עוקבים עולה בהתאם ליחסים המובאים בטבלה 20.2. היחס בין התדירויות של שני צלילים קשור למרווחים המוסיקליים של שני התווים. היחסים המצוינים בטבלה הם של התדירויות הסמוכות. אם היחס בין שני תווים הוא 2:1, כיחס שבין דו' (C) לדו האמצעי, המרווח קרוי אוקטבה, שהיא המילה הלטינית המלמדת שיש שמונה תווים במרווח זה. בסולם זה, תדירותו המקובלת של דו האמצעי היא 264 הרץ, ותדירות דו' שמעליו כפולה מערך זה - 528 הרץ. בתווים גבוהים מאלה שבטבלה, לכל תו דו תדירות כפולה מתדירותו של התו דו שלפניו, לכל תו רה תדירות כפולה מתדירותו של התו רה שלפניו, וכך הלאה. עם העלייה באוקטבה אחת, תדירותו של כל תו מוכפלת (איור 20.6).

לא כל המרווחים שבין התווים בסולם, גם אלה שבין הטונים השלמים, שווים זה לזה. ההפרשים בגובה בין התווים מי ופה ובין התווים סי ודו

טבלה 20.2

הסולם המז'ורי הדיאטוני

התו	הסימון באות	התדירות	יחס התדירות	המרווח
דו	C	264	$\frac{9}{8}$	שלם
רה	D	297	$\frac{10}{9}$	שלם
מי	E	330	$\frac{16}{15}$	חצי
פה	F	352	$\frac{9}{8}$	שלם
סול	G	396	$\frac{10}{9}$	שלם
לה	A	440	$\frac{9}{8}$	שלם
סי	B	495	$\frac{16}{15}$	חצי
דו	C'	528		



איור 20.6

מקלדת הפסנתר. לדו נמוך (דו¹) תדירות של 33 הרץ, ולכל הרמונית תדירות כפולה מקודמתה. הטון שתדירותו 264 הרץ נקרא דו אמצעי.

הם בקירוב מחצית משיעור המרווחים האחרים. מרווחים אלה קרויים חצאי טונים (אין קלידים שחורים במקלדת הפסנתר בין קלידי הטונים האלה). כדי לקבל חצאי טונים כאלה כשמנגנים מוסיקה בסולמות שאינם סולם דו, דרושים צלילי היתק מיוחדים, הנמצאים חצי טון מעל לתווים אחרים וסימנם "דיאז" (#), או חצי טון מתחת לתווים אחרים ואז סימנם "במול" (b). בסולם דו אלה הם הקלידים השחורים במקלדת הפסנתר.

בשל השינויים במרווחים המוסיקליים, אם יכוונו פסנתר לסולם דיאטוני במפתח מסוים כלשהו, התדירויות לא תהיינה מדויקות במפתחות אחרים. זו הסיבה לכך שלרוב אין מכוונים פסנתרים לסולם דיאטוני, אלא לסולם הכרומאטי. בסולם זה שלושה עשר תווים ושנים עשר מרווחים באוקטבה אחת, והיחסים בין כל זוג תווים עוקבים שווים בדיוק זה לזה (שורש שנים-עשר של 2, או 1.05946). לפיכך, בסולם זה תדירויותיהם של דו-דיאז ורה-במול שוות בדיוק, כך גם תדירויותיהם של רה-דיאז ומי-במול, וכן הלאה, מה שאין כן בדרך כלל בסולם הדיאטוני. התדירות התקנית לסולם הכרומאטי היא לה = 440 הרץ - התו היחיד באוקטבה שתדירותו שווה לזו של התו המקביל בסולם הדיאטוני. כל שאר התווים נבדלים מעט בתדירויותיהם בשני הסולמות, כפי שניתן לראות מהשוואת טבלה 20.2 לטבלה 20.3. הסולם הכרומאטי הוא המשמש כיום ברוב המקרים לכתיבת מוסיקה בעולם המערבי.

טבלה 20.3

הסולם הכרומאטי

התו	הסימון באות	התדירות	יחס התדירויות	המרווח
דו	C	262	$\sqrt[12]{2}$	חצי
דו-דיאז (רה-במול)	C# (Db)	277	$\sqrt[12]{2}$	חצי
רה	D	294	$\sqrt[12]{2}$	חצי
רה-דיאז (מי-במול)	D# (Eb)	311	$\sqrt[12]{2}$	חצי
מי	E	330	$\sqrt[12]{2}$	חצי
פה	F	349	$\sqrt[12]{2}$	חצי
פה-דיאז (סול-במול)	F# (Gb)	370	$\sqrt[12]{2}$	חצי
סול	G	392	$\sqrt[12]{2}$	חצי
סול-דיאז (לה-במול)	G# (Ab)	415	$\sqrt[12]{2}$	חצי
לה	A	440	$\sqrt[12]{2}$	חצי
לה-דיאז (סי-במול)	A# (Bb)	466	$\sqrt[12]{2}$	חצי
סי	B	494	$\sqrt[12]{2}$	חצי
דו'	C'	524	$\sqrt[12]{2}$	חצי



איור 20.7

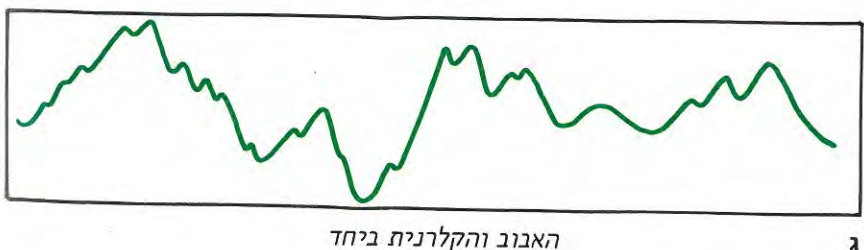
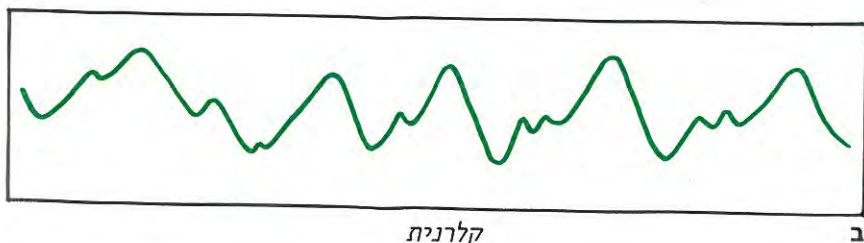
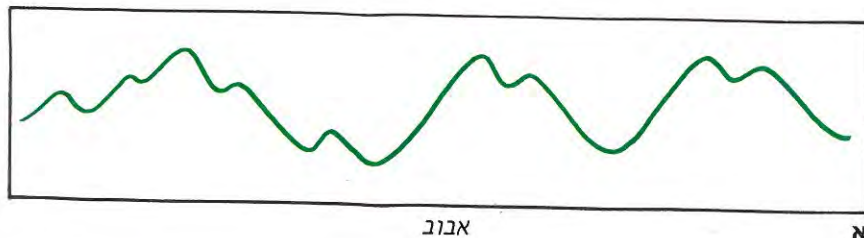
חריציו של תקליט פטיפון
כפי שהם נראים מבעד
למיקרוסקופ.

אנליזת פוריה

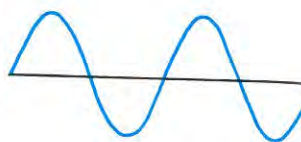
האם הזדמן לכם אי-פעם להציץ מקרוב בחריצים שבתקליט שחור מן הסוג הישן, שנהגו לנגן בפטיפון (איור 20.7)? האם הבחנתם בשינויים ברוחב החריצים - שינויים הגורמים למחט הפטיפון הנעה בהם להתנדנד? והאם תמהתם אי-פעם כיצד נשמרות כל התנודות המגוונות שמייצרים כלי התזמורת השונים בחריץ התקליט שעליו נראה, לכאורה, גל אחד בלבד? קולו של האבוב כפי שנקלט בחריציו של תקליט הפטיפון והוצג אחר כך על צג האוסצילוסקופ או על צג המחשב נראה דומה לאיור 20.8א. גל זה מתקבל מן האות האלקטרוני שיוצרת המחט המתנוודת. כך נראים גם האות המוגבר המפעיל את הרמקולים של מערכת הקול ומשרעת התנודות של האוויר הפוגע בעור התוף שבאוזן. איור 20.8ב מתאר גל הנוצר בקלרנית, ובאיור 20.8ג מתואר הגל שנוצר כאשר אבוב וקלרנית מנגנים יחד.

איור 20.8

צורות הגל של
(א) אבוב,
(ב) קלרנית,
(ג) האבוב
והקלרנית ביחד.

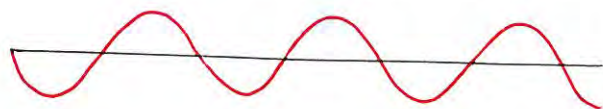


צורת הגל שבאיור 20.8 היא התוצאה המתקבלת מחיבור הצורות א ו-ב כשהן מתאבכות ומתרכבות זו עם זו. אם ידועים א ו-ב הרי זו משימה קלה למדי ליצור את ג. בעיה שונה בתכלית היא להסיק את צורתם של א ושל ב מתוך ג שאותו הם מרכיבים. אם נתבונן ב-ג בלבד לא נוכל להפריד את האבוב מן הקלרנית. ואולם, אם נגנן את התקליט בפטיפון, מיד יבחינו אוזנינו אילו הם הכלים המנגנים, אילו תווים הם מנגנים ומה הן עוצמותיהם היחסיות. אוזנינו מפרקות את האות הכולל לרכיביו באורח אוטומטי. האין זה נאה?



איור 20.9
גל סינוס.

בשנת 1822 גילה המתמטיקאי הצרפתי ז'וזף פורייה חוקיות מתמטית המתקיימת ברכיביה של תנועה גלית מחזורית. הוא גילה כי כל תנועה גלית מחזורית, גם המסובכת ביותר, ניתנת לפירוק לגלי סינוס פשוטים. לגל סינוס, שהוא הפשוט שבגלים, תדירות אחת מדויקת (איור 20.9). תגליתו של פוריה היתה כי ניתן לפרק כל גל מחזורי לגלי סינוס פשוטים בעלי משרעות ותדירויות שונות זו מזו. התהליך המתמטי של פירוק זה נקרא **אנליזה פוריה**. לא נרחיב כאן את דיוננו כאן לעניין הפרטים המתמטיים, אך נדגיש כי באמצעות אנליזה כזאת ניתן לגלות את גלי הסינוס הטהורים שמרכיבים את צליל הכינור, למשל. אם משמיעים את הטונים הטהורים הללו יחד, למשל בהקשה על סדרה של קולנים מתאימים או בנגינה על הקלידים המתאימים באורגן חשמלי, הם יתרכבו וייצרו צליל זהה לצליל הכינור. גל הסינוס בעל התדירות הנמוכה ביותר הוא התדירות היסודית והוא שקובע את גובה הצליל. גלי הסינוס בעלי התדירויות הגבוהות יותר הם רכיבי הקול המעניקים לצליל את גונו האופייני. צורת הגל של כל צליל מוסיקלי היא, איפוא, סכום של גלי סינוס פשוטים.



תדירות יסודית



הרמונית שנייה



הרמונית שלישית



הגל המורכב

איור 20.10
התדירות היסודית
וההרמוניות יוצרות יחד
גל מורכב.

היות שצורת הגלים של מנגינה כלשהי אינה אלא אוסף גדול של גלי סינוס שונים, הרי שלצורך שחזור מהימן של הצלילים באמצעות מכשיר רדיו, רשמקול או מקול תקליטורים, דרוש טווח רחב ככל האפשר של תדירויות זמינות. תחום תדירויות התווים במקלדת הפסנתר משתרע מ-27 הרץ ועד 4200 הרץ, אך כדי לשחזר במדויק את צליליה של יצירה המנוגנת בפסנתר, טווח התדירויות של



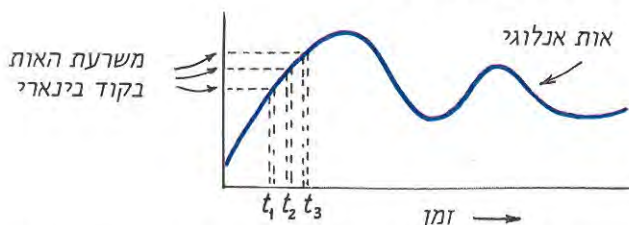
איור 20.11

האם כולם שומעים אותה מוסיקה?

תקליטורים

איור 20.12

משרעת גל הקול האנלוגי נדגמת במרווחים של שברירי שנייה ונרשמת בקוד בינארי על המשטח המחזיר של התקליטור.

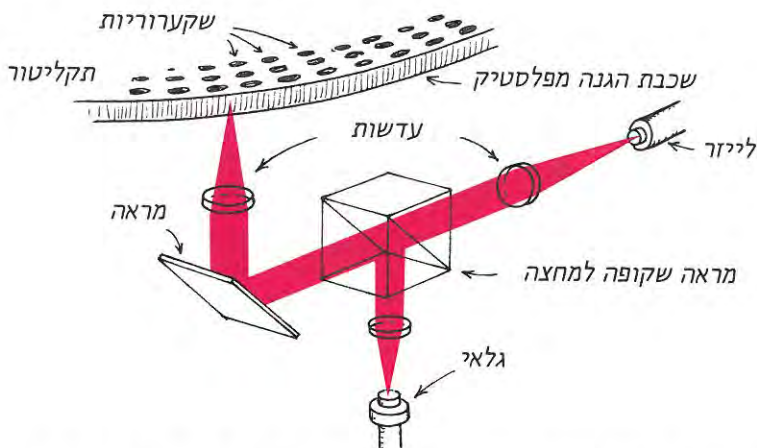


בפטיפונים של האתמול נוצרו תנודות המחט עקב תנועתה בחריץ הגלי שבתקליט. התוצאה היתה אות כדוגמת אלה המתוארים באיור 20.8. סוג כזה של גל רציף נקרא אות אנלוגי. אפשר לתאר את צורת הגל באמצעות ערכה המספרי של המשרעת בכל שבריר שנייה (איור 20.12). את הערכים האלה אפשר לבטא במערכת מספרים הנוחה לשימוש במחשבים, המערכת הבינארית. בשיטה הבינארית כל מספר נכתב כסדרה של ספרות אפס ואחת. כך למשל, המספר 1 יכתב 1, 2 יכתב 10, 3 הוא 11, 4 הוא 100, 5 הוא 101, 17 הוא 10001, וכך הלאה. באופן כזה ניתן לייצג את צורתה של תבנית הגל באמצעות סדרה של דופקי "גע" ו-"תוק" (on-off) המתאימים לסדרה של ספרות 1 ו-0 שבייצוג הבינארי. וכאן נכנס לתמונה תקליט הלייזר - התקליטור.

במקום החריץ הגלי שבתקליט הפטיפון, בתקליטור צרובה סדרה של שקעוריות מיקרוסקופיות שכל אחת מהן דקה פי שלושים לערך מעובי שיער אדם (איור 20.13). כאשר קרן הלייזר פוגעת בקטע שטוח של המשטח המחזיר, היא מוחזרת ישירות אל תוך המערכת האופטית של המכשיר ומתקבל דופק

איור 20.13

השקעוריות של משטח התקליטור כפי שהן נראות מבעד למיקרוסקופ.



איור 20.14

קרן לייזר ממוקדת היטב קוראת מידע ספרתי המיוצג בסדרה של שקערויות על התקליטור.

"גע" (on). כאשר הקרן נופלת על שקערויות חולפת, רק חלק זעיר ממנה מוחזר אל החישן האופטי ומתקבל דופק "תוק" (off). הבהוב דופקי "גע" ו"תוק" יוצר את סדרת הספרות 1 ו-0 המהוות את הקוד הבינארי.

הקצב שבו נקראות השקערויות הזעירות מן התקליטור הוא 44,100 פעמים בשנייה. תקליטור מוסיקלי רגיל מכיל מאות מיליוני ספרות בינאריות כאלה של מידע מוסיקלי. כל המידע מוצפן על המשטח המחזיר, המכוסה בשכבת מגן של פלסטיק שקוף. הואיל וקרן הלייזר ממוקדת על משטח האותות שמלמטה, היא אינה מושפעת, בדרך כלל, מאבק, מסריטות ומטביעות אצבע שעלולות להימצא על שכבת הפלסטיק. הפצפוצים והרשרושים שליוו את נגינתו של תקליט ישרן פגוע או מלוכלך הם נחלת העבר. ומאחר שקרן הלייזר מאירה את התקליטור אך אינה יוצרת עימו מגע מכני, הוא אינו אמור להתבלות גם אם נוגן שוב ושוב פעמים רבות (איור 20.14).

ואולם, תכונתו המדהימה ביותר של התקליטור היא איכות הצליל המופק ממנו. אכן, אפשר לשמוע את ההבדל!

תדירות יסודית תדירות התנודה הנמוכה ביותר, או ההרמונית הראשונה. במצב זה, מיתר מתנדד במקטע אחד.

הרמונית רכיב קול שתדירותו היא כפולה שלמה של התדירות היסודית. התנודה בתדירות היסודית היא ההרמונית הראשונה, התנודה בתדירות כפולה ממנה היא ההרמונית השנייה, וכך הלאה.

סולם מוסיקלי סדרה של תווים שתדירויותיהם מקיימות ביניהן יחס מספרי פשוט. בתרבות המערבית הסולמות העיקריים הם הסולם המזויזי הדיאטוני והסולם הכרומאטי.

אנליזת פוריה שיטה מתמטית המאפשרת הפרדה של צורת גל מחזורית מורכבת כלשהי לטור של גלי סינוס פשוטים.

תקציר מונחים

גובה העובדה שצליל הוא גבוה או נמוך, למשל בסולם מוסיקלי מסוים, תלויה בתדירות. מקור המתנדוד בתדירות גבוהה יוצר צליל גבוה; מקור המתנדוד בתדירות נמוכה יוצר צליל נמוך.

רום-הקול התחושה הפיסיולוגית הקשורה ישירות לעוצמת הקול. רוֹם הקול היחסי (או רמת הקול) נמדד לרוב בדציבלים.

גוון האיכות האופיינית לצליל מוסיקלי מסוים. קובעים אותו מספרם של רכיבי הקול ועוצמותיהם היחסיות.

רכיב קול אחת מקבוצת התדירויות שמהוות צליל מורכב. אם תדירותו של רכיב הקול היא כפולה שלמה של התדירות הנמוכה ביותר, הוא נקרא הרמונית.

שאלות חזרה

1. מהו ההבדל בין רעש לבין מוסיקה?
2. מהם שלושת המאפיינים העיקריים של צלילי המוסיקה?

גובה הצליל

3. כיצד ניתן להפיק צליל גבוה יותר ממיתר של גיטרה?
4. מהו תחום הצלילים הרגיל שאנו מסוגלים לשמוע? מה קורה לתחום זה עם ההזדקנות?

רום הקול

5. מהו היחס בין עוצמת הקול החזקה ביותר שאנו מסוגלים לסבול לבין עוצמת הקול החלשה ביותר שאנו מסוגלים לשמוע?
6. האם קול של 30 דציבל חזק פי 30 מסך השמיעות, או חזק ממנו פי 103 (פי אלף)?

גוון

7. מה בדיוק קובע את גובהו של צליל מוסיקלי?
8. אם תדירותו היסודית של צליל היא 200 הרץ, מהי תדירותה של ההרמונית השנייה? של ההרמונית השלישית?
9. מה בדיוק קובע את הגוון או האיכות של צליל מוסיקלי?
10. תו מסוים המנוגן בגיטרה נבדל בבירור מאותו תו המנוגן בכינור. מדוע?

כלים מוסיקליים

11. מהן שלוש הקבוצות העיקריות של כלי נגינה?
12. מדוע בדרך כלל גדול מספרם של כלי המיתר בתזמורת ממספרם של כלי הנשיפה?

סולם מוסיקלי

13. מהו הסולם המוסיקלי הפשוט ביותר בתרבות המערבית?
14. מהי אוקטבה?

15. האם שווים המרווחים בין כל שני תווים סמוכים בסולם הדיאטוני?
16. האם שווים המרווחים בין כל שני תווים סמוכים בסולם הכרומאטי?

אנליזת פוריה

17. מה גילה פוריה בנוגע לתבניות גל מחזוריות מורכבות?
18. תחום התדירויות שמפיקה מערכת קול מעולה עשוי להשתרע מעבר לתחום השמע האנושי. מה התועלת בתחום זה רחב?

תקליטורים

19. כיצד נשמרים הקולות בתקליט של פטיפון מן הסוג הישן? כיצד נשמרים אותות הקול בתקליטור (קומפקט-דיסק)?
20. מדוע אין התקליטורים מתבלים בעקבות שימוש מרובה בהם כפי שהתבלו תקליטים מהסוג הישן?

מטלות בית

1. נסו לבדוק באיזו אוזן שמיעתכם טובה יותר - כסו אוזן אחת ומידדו מאיזה מרחק אתם מסוגלים לשמוע רעש חלש מסוים, למשל תקתוק שעון, ואחר כך כסו את האוזן האחרת. שימו לב גם כיצד משתפרת השמיעה כשמסייעים לאפרכסת באמצעות כף היד.
2. התבוננו בחריצים של תקליט ישן באמצעות זכוכית מגדלת חזקה. אם במקרה יש ברישותכם תקליט עתיק של 78 סל"ד, השוו את החריצים לאלה של תקליט אריד-נגן של $33\frac{1}{3}$ סל"ד.
3. הפעילו את מנוע הפטיפון כשתקליט מונח עליו. הניחו את קצה הציפורן של האצבע או קצה של קלף קטן בחריץ והאזינו בקשב. שימו לב שאתם שומעים רק קולות בתדירות גבוהה. אם אינכם רוצים להסתכן בפגיעה בתקליט הניחו עליו, במקום זאת, את מחט הפטיפון, וכוונו את כפתור עוצמת הקול למינימום. קרבו את האוזן אל זרוע המחט. אכן, שחזור קול באיכות נמוכה?
4. השמיעו בקולכם את הצליל הנמוך ביותר שאתם מסוגלים; אחר כך הכפילו וחזרו והכפילו את גובה הצליל כמידת יכולתכם. מיצאו כמה אוקטבות נכללות במגדע קולכם.
5. על דף של נייר מילימטרי בנו את הגל המורכב שבאיור 20.10. עשו זאת באמצעות חיבור ההעתקים האנכיים של הטון היסודי ושל שני רכיבי הקול הראשונים בכמה נקודות. הסתייעו במורה. אחר כך מיצאו גלים מורכבים המתקבלים מרכיבי קול אחרים לפי בחירתכם.

תרגילים

1. הסבירו כיצד ניתן ליצור צליל נמוך בגיטרה על ידי שינוי (א) אורך המיתר, (ב) מתיחות המיתר, (ג) עובי המיתר או מסתו.
2. מדוע מיתרי הבס של הגיטרה עבים יותר?
3. האם היה מיתר הגיטרה מתנודד זמן רב יותר או מועט יותר אילו לא היה מצויד בתיבת תהודה?

- הרץ. מדוע הטלפון אינו מכשיר מתאים להעברת מוסיקה?
16. תדירותו היסודית של מיתר גיטרה היא 440 הרץ. מהי תדירות ההרמונית השנייה? השלישית?
17. האם יושפע גובה הצלילים המנוגנים בקונצרט המתקיים בחיק הטבע ביום שבו נושבת רוח? הסבירו.
18. כשמוזגים מים לכוס זכוכית, האם צליל המזיגה עולה או יורד עם התמלאות הכוס? (חישבו על כך, אחר כך נסו בעצמכם והאזינו).
19. תוך כדי מזיגת מים לכוס זכוכית הקישו קלות בכפית על דופן הכוס. האם צליל ההקשה עולה או יורד עם התמלאות הכוס? (חישבו גם על שאלה זו בטרם תערכו את הניסוי ותאשרו את מסקנתכם, ואולי תופתעו).
20. האם כל האנשים קבוצה המאזינים בקשב שומעים בדיוק אותה מוסיקה? (האם כולם רואים אותו מראה כשהם מתבוננים בתמונה: האם כולם טועמים אותו טעם כשהם לוגמים לגימת יין? האם כולם חשים אותו ריח כשהם מריחים אותו בושם? האם כולם מסיקים מסקנה כשהם ממששים אותו אריג? האם כולם מסיקים מסקנה אחת כשהם מאזינים להצגה הגיונית של רעיון?)

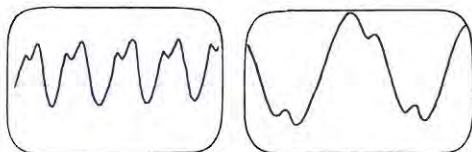
4. אם תגעו נגיעה קלה באמצעו של מיתר גיטרה, תוכלו לשמוע צליל גבוהה באוקטבה אחת מן הצליל היסודי של מיתר זה. הסבירו.

5. אם מיתר הגיטרה מתנווד בשני מקטעים, היכן ניתן להניח עליו פיסת נייר מבלי שתועף? כמה פיסות נייר ניתן היה להניח על המיתר אילו התנווד בשלושה מקטעים?

6. אם מקטינים את אורך הגל של מיתר מתנווד, כיצד יושפעו מכך תדירות התנודה וגובה הצליל?

7. המשרעת של גל רוחב במיתר מתוח היא ההעתק המרבי של המיתר ממצב שיווי המשקל. כיצד מתבטאת המשרעת של גל קול אורכי באוויר?

8. איזה משני הצלילים המוסיקליים המוצגים על צג האוסצילוסקופ או המחשב גבוה יותר? איזה מהם רם יותר?



9. מדוע גדול יותר הרמקול לצלילים נמוכים מהרמקול לצלילים גבוהים במערכת-קול ביתית?

10. סף השמיעות של אדם אחד הוא 5 דציבלים ושל אדם אחר 10 דציבלים. למי מהם שמיעה חדה יותר?

11. כמה אוקטבות מסוגל אדם ממוצע לשמוע? כמה אוקטבות יש על מקלדת הפסנתר?

12. כיצד מסוגל אורגן חשמלי לחקות את צליליהם של כלי נגינה שונים?

13. קולו של אדם המדבר לאחר ששאף לריאותיו גז הליום גבוה מן הרגיל. אחת הסיבות לכך היא שמהירות הקול בהליום גבוהה ממהירותו באוויר. מדוע בהליום נע הקול מהר יותר?

14. מדוע במקלחת נשמע קולכם מלא יותר?

15. תחום התדירויות של הטלפון משתרע מ-500 עד 4000

בעיות

1. חשבו פי כמה רמים יותר מסף השמיעות הם הקולות בעלי העוצמות הבאות: (א) 10 דציבל (ב) 30 דציבל (ג) 60 דציבל.
2. פי כמה רם יותר קול של 40 דציבל מקול של 30 דציבל?
3. לתו מסוים תדירות של 1000 הרץ. מהי תדירותו של תו הגבוה ממנו באוקטבה אחת? בשתי אוקטבות? של תו הנמוך ממנו באוקטבה אחת? בשתי אוקטבות?
4. תחום השמע של מחבר הספר הוא מ-20 הרץ עד 14,000 הרץ (יותר מדי קונצרטי רוק בשנות ה-70). כמה אוקטבות מסוגל המחבר לשמוע?
5. תדירותו היסודית של מיתר צ'לו שאורכו 0.75 מ' היא 220 הרץ. חשבו את מהירות הגל במיתר המתנווד.