

به نام خداوند بخشنده و مهربان

ریاضیات پشته‌واره موسیقی

نوشته:

لئون هارکلرُد

مترجم:

دکتر علی سرباز جانفدا

دانشیار دانشگاه ارومیه

عنوان: ریاضیات پشٲوانهٲ موسیقی

مولف: لئون هارکلرڈ

مترجم: علی سرباز جانفدا

ناشر: دانشگاه ارومیه

سال نشر: 1396

شابک: 978-600-8681-20-5

سری انتشارات: 229

ریاضیات پشتیبان موسیقی

ریاضیات قرن‌هاست که برای تشریح، تجزیه و تحلیل و خلق موسیقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این کتاب، لئون هارکلرد^۱ جنبه‌های مربوط به ریاضیات را از مبانی زیبایی-شناسانه تا روش‌های آهنگسازانه آن در نقد موسیقی، با دست یازیدن به مفاهیمی نظیر

- اورتن‌ها، گام‌ها، نظام‌های کوک،
- بازی‌های تاسی موسیقی منسوب به موزارت^۲ و هایدن^۳،
- روش ناقوس‌نوازی چند صد ساله به نام ناقوس‌نوازی دوره‌ای (جایگشت‌نوازی)،
- مکتب سرایش دوازده نغمه‌ای، که به‌طور گسترده‌ای موسیقی قرن بیستم را تحت تأثیر خود قرار داده،

و بسیاری مفاهیم دیگر مربوط به نظریه‌های ریاضی از نظریه احتمال گرفته تا سری‌های فوریه تا نظریه گروه، واریسی نموده است. او همچنین برخی داستان‌های هشدار آمیز را بازگو می‌کند که تلاش‌های گمراه‌کننده‌ای برای درهم آمیختن موسیقی و ریاضیات داشته‌اند.

هم مفاهیم ریاضی و هم مفاهیم موسیقی طوری به‌سبک مقدماتی توضیح داده شده-اند که کتاب حاضر را قابل استفاده برای خواننده‌های عمومی و همچنین ریاضیدانان و موسیقیدانان در تمام سطوح کرده است. این کتاب همراه با یک CD شامل مثال‌های موسیقایی می‌باشد.

هارکلرد گاه‌گاهی سخنرانی‌هایی در مورد ریاضیات و موسیقی برای اتحادیه ریاضی آمریکا (MMA) و دیگر گروه‌ها ارائه کرده است. وی در بسیاری مجلات مقالاتی منتشر ساخته و به‌خاطر یکی از مقاله‌هایش نشان جرج پولیا^۴ را از MMA دریافت نموده است.

¹ Leon Harklerod

² Mozart

³ Hayden

⁴ George Polya

فهرست مطالب

ج	پیشگفتار مترجم
ه	پیشگفتار مؤلف
1	1 ریاضیات و موسیقی، یک دونوازی
5	2 زیروبی صدا: اساس موسیقی
23	3 کوک کردن
37	4 چگونه یک زمینه موسیقایی را به طور ریاضی تنوع دهیم
62	5 ناقوس ها و گروه ها
77	6 موسیقی شانسی
100	7 الگو، الگو، الگو
112	8 برخورد بینایی با صدا
125	9 چگونه ریاضیات و موسیقی را درهم نیامیزیم
137	منابع
143	محتویات CD
145	اعتبار تصاویر
146	فهرست راهنما
150	فهرست راهنمای اثرها
151	واژه نامه انگلیسی به فارسی
152	واژه نامه فارسی به انگلیسی

پیشگفتار مترجم

مدتها بود که دنبال کتابی بودم که کاربردی عینی از ریاضیات را در علم موسیقی به دانش‌آموزان، دانشجویان، معلمان دبیرستان، و اساتید دانشگاه نمایان سازد تا این‌که این کتاب به دستم رسید. با توجه به اینکه خودم تا اندازه‌ای مقدماتی موسیقی می‌نواختم، به خودم این جرأت را دادم که به ترجمه این کتاب بپردازم. ترجمه این کتاب در دو دوره تکمیل گردید. در دوره اول تقریباً نصف کتاب را ترجمه کرده و به علت عدم توانایی کافی در برگردان شایسته واژه‌های موسیقی و عدم دسترسی به واژه‌نامه مناسب موسیقی، کار ترجمه را کنار گذاشتم.

پس از چندین سال، به خاطر علاقه زیاد به تکمیل این ترجمه، اخیراً ترجمه قبلی را ویرایش و ادامه آن را تکمیل نمودم. شاید اگر به ترجمه یک کتاب ریاضی محض مبادرت می‌ورزیدم خیلی سریع و خوب می‌توانستم آن را به اتمام برسانم. برای برخی از واژه‌ها و عبارتها وقت زیادی در اینترنت و پرس‌وجو از صاحب‌نظران می‌گذاشتم. بعضی مواقع مجبور می‌شدم تا مفهوم واژه‌ای را خود از نقطه نظر موسیقی یاد بگیرم سپس برگردان آن را از برداشت‌های خودم بیرون بکشم. برخی مواقع نیز مناسب می‌دیدم که تصنیف‌ها و اثرهایی را گوش دهم. مثلاً کنجکاو بودم که به *اورتور 1812* اثر چایکوفسکی گوش دهم تا صدای توپ‌های استفاده شده در آن را تشخیص دهم. یا پای اثر موسیقی *طنزآمیز پی.دی.کیو* از باخ بنشینم تا ببینم در آن آژیرهای سوار شده روی ترامپت‌ها و روی دوچرخه‌ها چه صدایی دارند. گاهی نیز مجبور می‌شدم که قطعه‌های کوتاهی را نت‌نوازی کنم تا به برخی از تعریف‌ها اشراف یابم.

با وجود تمام تلاشی که مترجم در این راه کشیده، به یقین برخی از واژه‌ها، بیشتر از دیدگاه موسیقایی، شاید خوب ادا نشده‌اند که از این بابت از موسیقیدانان گرامی عذرخواهی نموده و درخواست می‌نماید که بر مترجم منت نهاده و برگردان صحیح آنها را اطلاع دهند تا، در صورت علاقه خوانندگان و تجدید چاپ کتاب، آنها را مورد استفاده قرار دهد.

بی‌شک در هر کار ترجمه افرادی مترجم را یاری می‌نمایند. افتخار دارم که کمک من در این ترجمه پسر ارجمندم عرفان بوده و به‌خاطر تسلط خوب به انگلیسی، و همچنین مهارت نسبتاً حرفه‌ای ایشان در نواختن ویلون، با حوصله تمام وقت زیادی در خواندن ویرایش اولیه گذاشته و اصلاحاتی را که از توجه من دور مانده بود انجام داده و پیشنهادهای مفیدی را در واژه‌های موسیقی نمودند. ایشان همچنین کار ظریف آماده-سازی شکل‌ها در محیط فتوشاپ و الصاق آنها به متن را با حوصله و دقت تمام انجام دادند. در واقع، می‌توانم بگویم که اگر همکاری ایشان نبود به‌یقین این ترجمه با این کیفیت و به این زودی به مرحله چاپ نمی‌رسید. از این رو شایسته است که از ایشان به‌خاطر این کمک قابل توجهی که نمودند کمال تشکر را از صمیم قلب ابراز دارم.

هرچند این مجموعه یک کتاب درسی نمی‌تواند باشد ولی مدرسین ریاضی به صلاحدید خود می‌توانند بخشهایی از آن را در دروسی مثل مباحثی در ریاضیات استفاده نمایند. همچنین مدرسین موسیقی می‌توانند آن را در پیشرفت روش‌های موسیقی به‌کار ببندند.

در عددنویسی، برخی نکاتی لازم به توضیح است. با توجه به اصول ادبیات فارسی، تقسیم دوعدد را با نماد / نشان داده‌ایم. مثلاً $\frac{4}{3}$ یعنی 4 بر 3. برای ممیز اعشار حرف ر را به‌کار برده‌ایم. مثلاً $2\frac{3}{4}$ یعنی دو و سه‌دهم.

زمستان 96، علی سرباز جانفدا

پیشگفتار مؤلف

قرن هاست که بشر رابطه بین ریاضیات و موسیقی را کنکاش کرده است. اما، وقتی من شروع به نوشتن این کتاب کردم، افراد معدودی وسعت این رابطه‌ها را در چهارچوب کتاب‌ها به تحریر درآورده بودند. شما می‌توانید رساله‌های زیادی در قفسه‌های اختصاصی کتابخانه‌ها، و همچنین هر تعداد مقاله در مجلات پیدا کنید. اما به زحمت می‌توانید منبع معتبری را بیابید که چند موضوع مهم را در یک‌جا جمع کرده و به‌طور وسیع آنها را در دسترس عموم به نمایش گذاشته باشد. خوشبختانه، آن وضعیت اخیراً تغییر کرده است. امیدوارم این کتاب به چنین تغییری کمک کند. در فصل اول یک تشریح از مطالب فصل‌های بعدی ارائه داده‌ام. لازم است این را بگویم که من برای آمیختن مفاهیم بنیادی استاندارد با مفاهیم کم آشنا تلاش نموده‌ام. به‌ویژه، برخی از کارهای اخیر در مورد ریاضیات و موسیقی را از بقیه مشخص کرده‌ام، که می‌تواند حتی برای دوستداران این موضوع نیز جدید باشد.

خوانندگان بالقوه کتاب‌های میان‌رشته‌ای مثل این کتاب باید دارای تنوع وسیعی از معلومات قبلی باشند. بر این اساس، من فرض را بر کمترین حد ممکن از تجربه قبلی شما، هم در ریاضیات و هم در موسیقی، بنا نهاده‌ام. این کتاب، تا حدی، از سخنرانی‌های ارائه شده در درسی که هیچ پیش‌نیازی نداشت، سرچشمه گرفته است. کم و بیش، دانشجویان این درس از هر نوعی بودند، از بزرگان ریاضی که موسیقیدان‌های متخصصی بودند گرفته تا آنهایی که از ریاضیات می‌ترسند و کسانی که در عمرشان نه موسیقی خوانده و نه نواخته‌اند. من به‌طور کامل از پیش‌نویس‌های این درس شروع نکرده‌ام، بلکه طیفی از مخاطبان نسبتاً عمومی در ذهنم بوده است. به‌علاوه، آنهایی که قبلاً با ریاضیات و (یا) موسیقی آشنا هستند نیز موضوعات تازه زیادی در این کتاب خواهند یافت. علی‌رغم سرچشمه‌های این کتاب، من آن را به‌عنوان یک کتاب درسی ننوشته‌ام. با وجود این، اگر

کسی تمایل به کسب مهارت لذت‌بخش تدریس درس ریاضیات و موسیقی داشته باشد، به‌طور یقین می‌تواند از این کتاب در همگامی با کلاس استفاده کند.

این کتاب به‌پشتوانه سه تا از پروژه‌های ریاضی-موسیقی من تدوین گردیده است: درسی در دانشگاه کرنل^۱ که اخیراً ارائه داده‌ام، سمیناری که در کرنل داشته‌ایم، و کارگاهی که با همکاری و کمک مالی اتحادیه ریاضی امریکا (MMA) برگزار کرده‌ام. از دانشگاه کرنل و MMA به‌خاطر فراهم نمودن فرصت این فعالیت‌ها و به‌ویژه از شرکت کنندگان به‌خاطر شرکت و علاقه‌شان در ریاضیات و موسیقی تشکر می‌نمایم.

تشکر مخصوص از کیوین هاملن^۲ دارم که به من این اجازه را داد که کار اخیر انتشار نیافته‌اش را در اینجا عرضه بدارم.

سپاس فراوان دارم از موسیقیدان کنسرت و مهندس صمعی-بصری، گرایبرت بیچمن^۳، به‌خاطر وقت و مهارتشان که صرف تهیه CD کتاب نمودند. ایشان کار استادانه‌ای در بررسی منابع، ضبط اجراهای موسیقی متن، نواختن ویولون، و گردآوری همه اینها انجام داده‌اند.

از تمام کارکنان انتشارات دانشگاه کمبریج و MMA تشکر می‌کنم که کمک کردند تا این کتاب با وضع موجود منتشر شود: پوجا جین^۴، کتی هیو^۵، لارا زوبل^۶، کایتلن دوگارت^۷، راجر آستلی^۸، دون آلبرس^۹، جان بارو^{۱۰}، و دون زاگیر^{۱۱}. باید منفرد کنم جسیکا فاريس^{۱۲} را، که کار فوق‌العاده‌ای در کسب مجوز چاپ کردند؛ دیوید ترانا^{۱۳} را، که پیشنهاد اولویت این کتاب را داد، و ویراستار خودم لارن کاولز^{۱۴}، که از توصیه‌های مفید و شکیبایی فراوان ایشان باید بسیار قدردانی نمایم.

¹ Cronell

² Keven Hamlen

³ Graybert Beachman

⁴ Pooja Jain

⁵ Katie Hew

⁶ Lara Zoble

⁷ Caitlin Doggart

⁸ Rager Astley

⁹ Don Albers

¹⁰ John Barrow

¹¹ Don Zagier

¹² Jessica Farris

¹³ David Tranah

¹⁴ Lauren Cawles

بالتر از همه، از همسر سینتیا^۱ به‌خاطر غلط‌گیری‌های متن، پیشنهادات، تشویق‌ها و حمایت‌هایش نهایت قدردانی را دارم. این کتاب به‌میزان زیادی به ایشان مدیون است، اما وی به‌وضوح مسئولیتی در قبال هرگونه ابهام موجود در آن ندارد.

¹ Cynthia

فصل 1

ریاضیات و موسیقی، یک دونوازی

وقتی به کسی در مورد نوشتن کتابی درباره ریاضیات و موسیقی سخن می‌گویم، انتظار دارم یکی از دو جواب زیر را بشنوم:

”بله، آنها واقعاً خیلی به هم شبیه‌اند، مگه نه؟“

”هر یک از این دو چه ارتباطی ممکن است با دیگری داشته باشد؟“

ریاضیات و موسیقی وجه اشتراک فراوانی با هم دارند. اساساً، الگوهای مجردی پیکره درونی هردو را تشکیل می‌دهند. برای بیان این الگوها، هریک از این دو شاخه زبان نمادین خودش را پرورش داده و این زبان در سرتاسر دنیا، بدون توجه به ملیت، مورد استفاده قرار می‌گیرد. و این دو شاخه، هرچند به‌روش‌های متفاوت، مفاهیم فکرت و زیبایی را با آمیزه‌ای شگفت‌آور با هم ترکیب داده‌اند. متأسفانه، آنهایی که موسیقیدان نبودند اغلب از توانمندی جنبه فکری موسیقی، و آنهایی که ریاضیدان نبوده‌اند به‌طور مشابه از توانمندی جنبه زیبایی ریاضیات غافل مانده‌اند. این توجیهی برای بسیاری از عکس‌العمل‌های مشکوکی است که در بالا ذکر شد. حکایتی از ریموند¹ و اسمولیان² دیدگاه‌های متفاوتی از این بد تعبیری‌ها در اختیار می‌گذارند. اسمولیان در کتاب خود، 5000 سال قبل از میلاد، از ریاضیدانی سخن به میان می‌آورد که به سخنان مردمی که در مورد رابطه‌های بین ریاضیات و موسیقی صحبت می‌کردند گوش می‌داد. این ریاضیدان بعد از آنکه آشفته می‌شود فریاد می‌کشد ”اما من شباهتی نمی‌بینم؛ با این حال، ریاضیات زیباست!“ با همه این داستان‌های مشکوک، ریاضیات و موسیقی به‌روش‌هایی مشابه برای کاربران خود

¹ Raymond

² Smullyan

جذاب هستند. به نقل از ریاضیدان قرن نوزدهم، سیلوستر^۱، ”آیا نمی‌توان موسیقی را به‌عنوان ریاضیات احساس، و ریاضیات را به‌عنوان موسیقی علت توصیف کرد، روح هر دو یکی است!“

اما فراتر از عمومیت‌های صفات مشترک، این دو شاخه دارای پیوندهای مستقیم و مشخصی هستند. در طول سال‌های متمادی، بشر ریاضیات را برای تشریح، تجزیه و تحلیل، و خلق موسیقی مورد استفاده قرار داده است. این کتاب اطلاعاتی را در برمی‌گیرد که شامل تعدادی کاربردهای متنوع مشابه در موسیقی است.

جمع‌بندی

یکی از تلاقی‌های خیلی آشکار بین این دو شاخه به‌واسطهٔ فیزیک صورت می‌گیرد. وجه شنیداری موسیقی، خودش را به‌خوبی به‌سمت تحلیل ریاضی معطوف می‌دارد. فصل 2 برخی رابطه‌های اساسی ریاضی ماورای صوت، طنین، و اورتن‌ها را توضیح می‌دهد. به‌ویژه، من تحقیق کرده‌ام که چرا برخی از نت‌ها با نت‌های دیگر بخوبی هم‌خوانی دارند. تلاش‌ها برای یکپارچه‌سازی چنین هم‌خوانی‌هایی رضایت‌بخش به طرح‌هایی برای کوک گام‌های موسیقی منجر شده است. سومین فصل برخی از این شیوه‌های تنظیم را باهم مقایسه می‌کند.

این بررسی‌های آکوستیکی، با مواد خام موسیقی سروکار دارد. در هنرهای بصری، مطالعات موازی عبارت از فیزیک نور و رنگ می‌باشد. اما با هنر بصری، ریاضیات در جنبه‌های آهنگسازی نیز وارد می‌شود. به نظریهٔ ترسیم پرسپکتیو یا کارهای اشرف^۲ فکر کنید. به‌طور مشابه، ریاضیات نقشی مشابه در آهنگسازی موسیقی ایفا می‌کند. گاهی مواقع آهنگسازان به‌طور شفاف فنون ریاضی را در کارهایشان به‌کار برده‌اند. گاهی مواقع نیز آهنگسازان قطعه‌هایی را ساخته‌اند که، هرچند به‌طور محض با ملاحظات موسیقی طراحی شده، می‌توانند به‌طور مفید با جملات ریاضی توصیف شوند. ریاضیات، در موسیقی، ممکن است خودش را به‌روشنی هندسه در ترسیم نشان ندهد، اما می‌تواند به همان اندازه حیاتی باشد.

¹ J. J. Sylvester

² M. C. Escher

فصل‌های چهارم و پنجم هردو به حوزه نظریه گروه در ریاضیات، هرچند از دیدهای متفاوت، نزدیک شده‌اند. فصل چهارم نظریه گروه را ماورای برخی فوت و فن‌های حرفه آهنگسازی، مثل مقدم مؤخر کردن ملودی یا نواختن وارونه آن، مورد بررسی قرار می‌دهد. در فصل 5، من روی سنت جایگشت‌نوازی انگلیسی در برج کلیساها تمرکز داشته‌ام. جایگشت‌نوازان عملاً بسیاری ایده‌های نظریه گروهی را در این زمینه مشخص مدت‌ها قبل از آنکه ریاضیدانان آن موضوع را بپرورانند استفاده می‌کرده‌اند. برای فصل بعدی، مرکز توجه به انتخاب تصادفی و احتمالات، همان‌گونه که توسط آهنگسازان مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد، انتقال پیدا می‌کند. از تاس موسیقی در زمان موزارت تا کارهای کامپیوتری اخیر، موسیقیدانان شیفته احتمالات هنری شانس بوده‌اند. فصل 7 برخی خصوصیات ساختاری موسیقی را مورد بررسی قرار می‌دهد. به‌ویژه بحث می‌شود که چطور یک الگوی مشابه می‌تواند در سطوح متفاوت در داخل یک قطعه ظاهر شود. اخیراً من موسیقی را با هنر بصری مقایسه نموده‌ام. البته، این دو گاه‌گاهی اثر متقابل به همدیگر دارند، و ریاضیات می‌تواند کمک کند که آنها به همدیگر بپیوندند. فصل 8 جزئیات راهکارهای متنوع ریاضی برای ساختن موسیقی به‌روایت تصویر را شرح می‌دهد. همچنین نگاهی خواهیم داشت به رقص، که اینجا نظریه گروه دوباره به صحنه باز می‌گردد.

با همه این فصل مشترک‌های بین ریاضیات و موسیقی، به‌راحتی ممکن است دستپاچه شده و شروع به یافتن ارتباط‌هایی شد که وجود ندارند. این کار به‌ویژه وقتی بزرگ جلوه می‌کند که یک تحلیل ریاضی به یک تصنیف موسیقی پس از این واقعیت تحمیل می‌شود. فصل آخر شامل برخی حکایت‌های پندآمیز از تلاش‌های مشکوکی است که سعی کرده‌اند این دو شاخه را به‌طور نامناسب به هم بیامیزند.

همپایی ریاضیات و موسیقی به مدت‌ها قبل برمی‌گردد. در روایت‌های سنتی غربی، مشارکت آنها به 2500 سال قبل می‌رسد، زمانی که فیثاغورثیان ارتباط ریاضیات-موسیقی را بررسی کردند. هنرهای هفت گانه لیبرال قرون وسطی عبارت بودند از: علوم چهارگانه (حساب، هندسه، نجوم، و موسیقی)، در مسیر دانش و معرفت، و علوم سه‌گانه (دستور زبان، منطق، و معانی بیان)، در مسیر شیوایی و بلاغت. همان‌طوری‌که در ابتدا اشاره کردم، خیلی از مردم این روزها ماهیت موسیقی را با دسته دوم هم‌خوان می‌دانند تا با دسته اول. اما برای دانش‌پژوهان قرون وسطی، موسیقی از موقعیت خوبی به‌عنوان بخشی از علوم چهارگانه برخوردار بود. رشته‌های دیگر هم‌گروه موسیقی عبارت بودند از

حساب، هندسه و نجوم. تعامل بین ریاضیات و موسیقی امروز هم ادامه دارد. در واقع، اخیراً دیده شده که تعداد کثیری سمینارهای تخصصی و حتی سمینارهای سراسری به حلقه‌هایی اختصاص می‌یابند که ریاضیات و موسیقی را به هم پیوند می‌دهند. امیدوارم این کتاب حداقل یک چاشنی از نتایج شگفت‌انگیزی که هنگام ترکیب قوای موسیقی و ریاضی فراهم می‌شود را ارائه کرده باشد. کنترل کرده و به‌سادگی با تنظیم شدت فوت کردن خود در سوت، آهنگ‌هایی دلنشین ایجاد کنید. اثر 1 از CD گواهی بر این موضوع اس

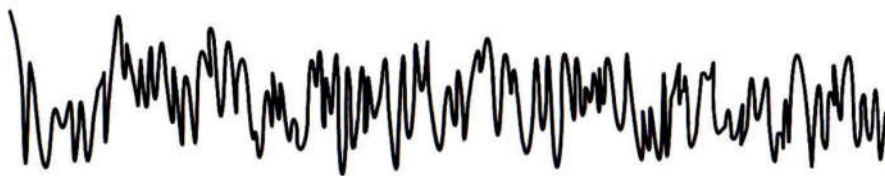
فصل 2

زیروبمی صدا: اساس موسیقی

چه چیزی از یک نت، یک نت می‌سازد؟ به‌طور یقین، موسیقی اغلب، صداهایی را شامل می‌شود که نت‌هایی با زیروبمی (ارتفاع) مشخص ندارند. از طبل مخصوص دستهٔ موزیک مارش گرفته تا قاشقگ [رقص تند م.]^{۲۴} فلامنکو^{۲۴}، تا توپهای استفاده شده در *اورتور 1812*^{۲۵} اثر چایکوفسکی، موسیقی می‌تواند از صداهای بدون زیروبمی مورد استفاده‌های زیادی را ایجاد کند. اما معمولاً وقتی به موسیقی می‌اندیشیم، دربارهٔ صداهایی با زیروبمی‌های متنوع، برخی بالاتر برخی پایین‌تر، فکر می‌کنیم. ملودی و هارمونی، هر دو به چنین صداهایی وابسته‌اند. اما آنها واقعاً چگونه با بقیه صداها فرق می‌کنند؟ کلید این سؤال در تکرار نهفته است؛ تکرار خیلی سریع.

تورهای سیمی پنجره و سوت‌های آژیر

صداهایی که می‌شنویم، خواه زیروبمی داشته باشند یا نه، در اثر تغییرات در فشار هوا تولید می‌شوند. برای مثال، نمودار واقع در شکل 1 صدای ”پارازیت سفید“ یک تلویزیون تنظیم نشده را نشان می‌دهد. به‌طور خیلی دقیق، این نمودار نوعی تغییرات در فشار هوا را نشان می‌دهد که ما به‌عنوان صدا، در حال تماشا به ”برفک“ تلویزیون، دریافت می‌کنیم. دنبال کردن نمودار شکل 1 به‌طور افقی از چپ به راست به‌مدت معینی ادامه می‌یابد. در این مدت معین فشار هوا، که در گام عمودی نشان داده شده، تغییر پیدا



شکل 1

دامنه

می‌کند. هر قدر

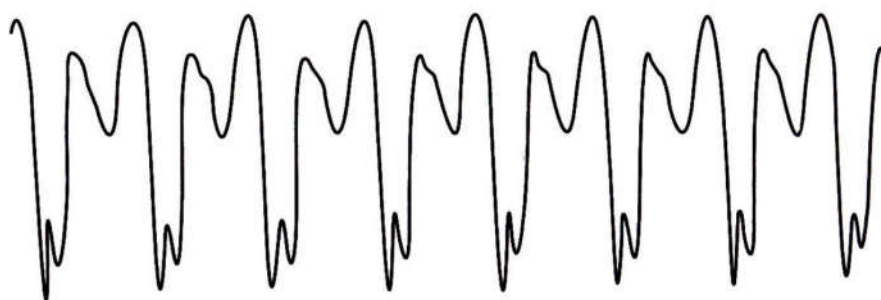
²⁴ flamenco castanet

²⁵ Overture 1812

تغییرات بیشتر باشد، صدا بلندتر خواهد بود. در واقع، بشر می‌تواند به صداهای ناشی از انحراف‌هایی به کوچکی 0,00000002 درصد فشار استاندارد پایه واکنش نشان دهد!

حال آن نمودار را با نمودار شکل 2، که صدای یک قره‌نی را نمایش می‌دهد، مقایسه کنید. بلافاصله تفاوت آشکار می‌شود. از یک طرف، نمودار پارازیت سفید حرکتی نامنظم رو به بالا و پایین دارد بدون آنکه الگویی قابل توجه داشته باشد. از طرفی دیگر، نمودار قره‌نی یک الگوی معینی دارد که به‌طور مرتب تکرار می‌شود. آن نظم دقیقاً چیزی است که به صدا زیروبی داده و از آن یک نت می‌سازد. در این حالت این الگو در حدود $1/750$ ثانیه دوام یافته، همین‌طور در هر ثانیه 750 بار تکرار می‌شود. به‌طور عادی، می‌گوییم که آن با سرعت 750 هرتز، به‌طور خلاصه 750Hz، تکرار می‌شود.

به‌طور کلی، سرعتی که با آن یک الگوی فشار هوا تکرار می‌شود، و معمولاً از آن به‌عنوان فرکانس یاد می‌کنیم، تعیین می‌کند که زیروبی متناظر با آن تا چه حد بالا یا پایین خواهد بود. نت میانی معروف C، نتی با زیروبی متوسط، متناظر با یک فرکانس در



شکل 2

ستون فرعی 1	برای سادگی، من زیروبی یک نت را به‌عنوان آنچه که توسط فرکانس تغییرات فشار هوا تعیین می‌شود تلقی خواهم کرد. بیان صحیح مطلب مشکل‌تر است. بنابه تعریف، زیروبی صدا یک احساس ذهنی در واکنش به یک نت می‌باشد. عواملی غیر از فرکانس می‌توانند در زیروبی صدایی که می‌شنویم تأثیر بگذارند. برای مثال، وقتی که شدت صدای یک نت تغییر می‌کند، برخی افراد ممکن است احساس کنند در زیروبی صدا نیز تغییر ایجاد شده، حتی اگر فرکانس ثابت بماند.
---	--

حدود 262Hz است. افزایش فرکانس، یعنی، سرعت بخشیدن به تکرار الگو، زیروبمی را بالا می‌برد (با این حال ستون فرعی 1 را ببینید).	حس بینایی نیز وضعیتی مشابه از خود نشان می‌دهد. عواملی متنوع، از خطای چشمی گرفته تا وضعیت‌های جسمانی، بر ادراک رنگ اثر می‌گذارند، ولی باز هم گفته می‌شود که فرکانس‌های معینی از موج‌های نوری، با رنگ‌های مشخصی متناظرند.
--	---

شما می‌توانید این پدیده را با کشیدن ناخنتان روی یک تور سیمی پنجره ملاحظه نمایید. به‌خاطر مشبک بودن توری، شما به‌نحوی یک الگوی تکراری از ارتعاش را در هوای احاطه‌کننده آن ایجاد می‌کنید. این منجر به نوعی صدا می‌شود. تور سیمی به‌اندازه کافی ناهم‌ریختی دارد که صدا نمی‌تواند خوش‌آهنگ شود، اما وقتی تور سیمی را به‌سرعت خراش می‌دهید، می‌توانید انتظار شنیدن “صدایی” را داشته باشید که بلندتر می‌شود. با استفاده از یک شانه، یا زیپ لباس، می‌توانید اثری مشابه (و با دلخراشی کمتر) ایجاد کنید.

برای داشتن صدایی کمی دلنوازتر، یک سوت آژیر (شکل 3) از یک مغازه اسباب بازی فروشی خریداری نمایید. وقتی در سوت می‌دمید، یک پره فرفره دور خود می‌چرخد. در پره سوراخ‌هایی تعبیه شده، صفحه ثابت پشت آن نیز دارای سوراخ می‌باشد. پس وقتی شما فوت می‌کنید، نتیجه‌اش جریانی متناوب از دمیدن‌های هواست که یک صدا ایجاد می‌کند. هر قدر محکم‌تر فوت کنید، به همان قدر پره سریع‌تر چرخیده و تکرار این دمیدن‌ها بیشتر خواهد شد. در نتیجه، زیروبمی صدا بالا می‌رود. بنابراین، شما می‌توانید نت‌ها را

سوت آژیر اقتباسی از آژیر بزرگی است که با چرخش همدل کار می‌کند. (البته، وسایل نقلیهٔ اورژانسی جدید آژیرهای الکترونیکی ایجاد می‌کنند). آژیر نامش را از پریان دریایی اسطوره‌ای گرفته، که ملوانان را با آواز دلنشینی بی‌اختیار به طرف خود جذب می‌کردند. اکنون خیلی حرف‌ها درمورد کیفیت صوتی یک ساز آژیر گفته می‌شود، اما واژهٔ “دلنشین” به‌طور یقین در فهرست این حرف‌ها نمی‌گنجد. در عوض، این اسم از توانایی این ابزار برای ایجاد صداها در زیر آب نشأت گرفته است. تعدادی از موسیقیدانان برجستهٔ قرن بیستم مثل ساتیه ^{۲۶} ، هیند میث ^{۲۷} ، و وریسه ^{۲۸} ، بعضی مواقع از آژیر در آهنگ‌های خود استفاده کرده‌اند. پیترو شیکل ^{۲۹} نیز در اثر موسیقی طنزآمیز (با	ستون فرعی ۲
--	-------------

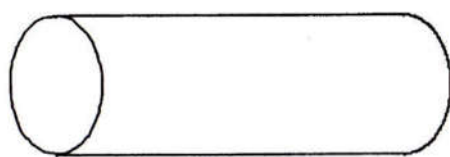
²⁶ Satie

²⁷ Hindemith

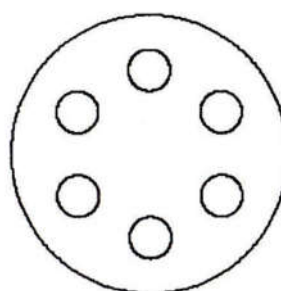
²⁸ Varèse

²⁹ Peter Schickele

تخلص) پی.دی.کیو باخ ^{۳۰} خود از آن استفاده کرده است، که در آن آژیرها روی ترامپت‌ها و روی دوچرخه‌ها سوار شده‌اند.	
---	--



دید از کنار



دید از انتها

شکل 3

کنترل کرده و به-
سادگی با تنظیم
شدت فوت کردن
خود در سوت،
آهنگ‌هایی دلنشین
ایجاد کنید. اثر 1 از
CD گواهی بر این
موضوع است.

³⁰ tongue-in-cheek P.D.Q. Bach