

پارامتر قدرت صدای G و اهمیت آن در طراحی و ارزیابی سالن‌های موسیقی

لئو برانک^۱

دکتری فیزیک کاربردی و آکوستیک

استاد دانشگاه ام آی تی، آمریکا

beranekleo@ieee.org

علی احمدی*

کارشناس ارشد معماری

مدرس دانشگاه غیرانتفاعی لامعی گرگانی (مترجم)

invtw@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴

چکیده

پارامتر "قدرت صدا" G ارتباط دقیقی با بلندی صدا^۲ دارد. مقدار این پارامتر همچنین به صورت معکوس به جذب صدای کلی^۴ در یک فضا بستگی دارد. در یک مقایسه، زمان واخنش^۵ (RT) هم به طور معکوس با شاخص جذب صدای کل در سالن و هم به طور مستقیم با حجم آن مرتبط است. از این رو، بررسی پارامتر G و RT به صورت هم‌زمان در طراحی آکوستیک سالن‌های کنسرت نقش حیاتی دارند. "شاخص باس"^۶ که اخیراً پیشنهاد شده نیز با میزان بلندی صدای باس ارتباط داشته و حاصل تفریق مقادیر G در فرکانس ۱۲۵ هرتز (G_{125}) و فرکانس‌های میانی^۷ (G_{mid}) برحسب دسی‌بل است. نشان داده می‌شود که پوشش صدای شنوندگان (LEV)^۸ برای اکثر سالن‌ها به طور مستقیم با مقدار G در فرکانس‌های میانی مرتبط است. گستردگی صدا، یعنی پهنای ظاهری منبع^۹ (ASW)، به وسیله درجه گستردگی منبع^{۱۰} (DSB) که از اثر ترکیبی بازتاب‌های جانبی اولیه، آن گونه که توسط شاخص کیفیت کیفیت دوگوشی^{۱۱} (BQI) و شاخص قدرت G اندازه‌گیری شده است، تعیین می‌گردد. در این مقاله مقادیر بهینه و محدوده‌ی این پارامترها مورد بحث قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: آکوستیک معماری، سالن موسیقی، شاخص آکوستیکی، شاخص G ، طراحی آکوستیکی

۱. مقدمه

تقریباً یک تغییر ۱۰ دسی‌بلی در SPL در هر فرکانس موجب یک تغییر دو برابری در بلندی صدای ادراک شده می‌شود [۱-۲]. بنابراین، SPL و از این رو G ، می‌توانند به عنوان شاخصی جایگزین برای بلندی صدا مورد استفاده قرار گیرند. از لحاظ تاریخی، در طراحی سالن‌های کنسرت، زمان واخنش (RT) به عنوان مهم‌ترین اولویت در نظر

شاخص قدرت صدای G به عنوان یک پارامتر آکوستیکی برای ارزیابی عملکرد سالن‌های کنسرت کمتر مورد توجه قرار گرفته است، تاحدی به این دلیل که این پارامتر معیاری شبیه تراز فشار صدا^{۱۲} (SPL) است، با این تفاوت که فشار مرجع در آن نسبت به فشار معمول متفاوت و معادل ۰/۰۰۰۲ میکروبار^{۱۳} است. تحقیقات اولیه نشان می‌دهد که

گرفته شده است، زیرا صدای موسیقی به طور مستقیم تحت تأثیر RT و کمتر از آن تحت تأثیر ترازوی است که آن موسیقی شنیده می‌شود و تغییرات در جذب صدای کل $S\alpha$ منجر به تغییرات مستقیم در RT می‌شود، درست به همان طریقی که در مورد G انجام می‌شود. اما همان‌طور که در قسمت سوم این مقاله می‌آید، تغییرات زیاد در RT با G ثابت تقریباً باعث هیچ تغییری در صدا نمی‌شود، واقعیتی که در بین اکثر مهندسين آکوستیک ناشناخته مانده بود و یا به آن بی‌توجهی می‌شد. هدف اصلی این مقاله بررسی میزان ضرورت ورود پارامتر G به طراحی‌ها و ارزیابی آکوستیکی یک سالن کنسرت است. همان‌طور که نشان داده خواهد شد، G در درجه اول به وسیله مساحت کل تمامی سطوح در سالن و میانگین ضریب جذب صدای آن سطوح تعیین می‌شود. از آنجایی که جایگاه تماشاچیان تعیین کننده حدود نیمی از جذب صدای کل سالن است، همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، انتخاب نوع صندلی تماشاچیان بسیار حائز اهمیت است. نیمه‌ی دیگر جذب صدا، به‌ویژه در فرکانس‌های پایین، توسط چگالی دیوار، از دیوار، کف، سقف، و به عبارتی کل جداره‌های سالن، با واحد کیلوگرم بر متر مربع تعیین می‌شود. بنابراین، استفاده از G در محاسبات، اثر متقابل سطوح جاذب سالن و سطوح جذب صدا توسط تماشاچیان را نشان می‌دهد. همچنین استفاده از G، به ما می‌گوید که پوشش صدا چگونه است و پاسخ باس^{۱۴} چگونه ادراک می‌شود.

۲. شاخص قدرت صدای G

قدرت صدای G که برحسب دسی‌بل بیان می‌شود، نسبت انرژی صدای رسیده از یک منبع بدون جهت است در یکی از صندلی‌های جایگاه تماشاگران (یا اجراکنندگان موسیقی) به همان انرژی صدا از همان منبع در یک میدان باز به فاصله ۱۰ متری است. این شاخص رابطه نزدیکی با پارامتر

ذهنی "بلندی صدا" دارد. دامنه این شاخص در فرکانس‌های میانی^{۱۵} تقریباً در تمام سالن‌های بزرگ با فرض استفاده از روش کالیبراسیون اتاق بازآوایی^{۱۶} و اعمال میانگین بر روی تمام صندلی‌های سالن کنسرت، فقط ۲ تا ۹ دسی‌بل است و مقدار بهینه آن، هنگام قیاس با رده‌بندی کیفیت آکوستیکی سالن‌های کنسرت، بین ۴ و ۷/۵ دسی‌بل است [۳-۴]. به طور کلی شاخص G در یک نقطه تحت تأثیر چهار ویژگی معماری است:

- ۱- منطقه آکوستیکی حصار به‌علاوه گروه ارکستر؛
- ۲- فاصله‌ای که نقطه مفروض از صحنه دارد؛
- ۳- تعداد و قدرت بازتاب‌های جانبی اولیه از دیواره‌های جانبی؛
- ۴- تمام مصالح دیگری که صدا را جذب می‌کنند: از جمله جاذب‌های دیوارپوش، پوشش کف و نوع صندلی‌ها.

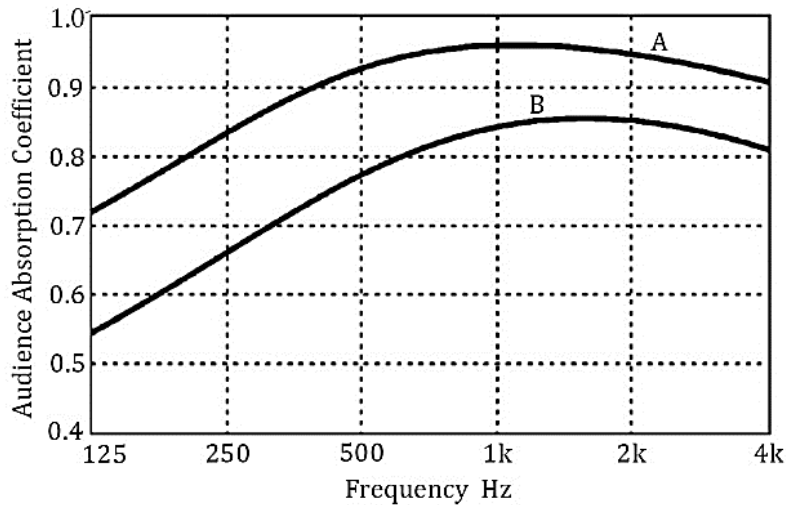
در ادامه مطالب، مقادیر G و RT میانگین اعدادی هستند که از تعدادی جایگاه‌های واقع در هر سالن به‌دست آمده‌اند.

۲-۱. فرمول‌هایی برای G و RT

فرمول G برای یک فضای محصور بزرگ با فرض اینکه ضریب جذب میانگین α بسیار بزرگ نباشد و مسیر آزاد میانگین تقریباً برابر با $4V/S$ باشد، به‌دست می‌آید. در اینجا، V برابر با حجم و S مجموع مساحت‌های تمام سطوح در فضای مفروض است که شامل حصار و گروه ارکستر است [۵].

$$p^2 = W\rho_0c\left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\alpha)}{S\alpha}\right) \quad (1)$$

در این رابطه r فاصله منبع روی صحنه تا صندلی است و α برابر با ضریب جذب میانگین برای مساحت کل S است.



شکل ۱. ضریب جذب صندلی تماشاگران در حالت اشغال شده (α) برای منحنی (A) صندلی‌های با پوشش متراکم و ضخیم - میانگین داده‌ها در سالن‌های مونیخ^{۱۷}، روتردام^{۱۸} و ساپورو^{۱۹}؛ و منحنی (B) صندلی‌های با پوشش نازک‌تر و با تراکم کمتر - میانگین داده‌ها در سالن‌های برلین کنزرتوس^{۲۰}، وین^{۲۱} GMVS، بوستون^{۲۲}، لناکس تنگل وود^{۲۳} و لوسرن^{۲۴}. [توجه: اگر آن دسته از صندلی‌ها با پوشش متراکم در سالن‌های جعبه کفشی^{۲۵} معمولی مورد استفاده قرار می‌گرفت، مقادیر اندازه‌گیری شده α در منحنی (A) با فرض همان مساحت جایگاه تماشاگران و زمان واخنش، حدود ۶٪ پایین‌تر خواهد بود. برعکس این رابطه هم صحیح است، یعنی، مقادیر منحنی (B) در سالن‌های غیر جعبه کفشی حدود ۶٪ بالاتر است.

رابطه مربع فشار مرجع برای G برابر است با:

$$p^2(\text{ref}) = W\rho_0c/(4\pi \times 100) \quad (2)$$

برای محاسبه برحسب دسی‌بل، معادله شماره ۱ را بر معادله شماره ۲ تقسیم نموده و از دو طرف لگاریتم گرفته و در ۱۰ ضرب می‌کنیم:

$$G = 10 \log\left(\frac{100}{r^2} + \frac{1600\pi(1-\alpha)}{S\alpha}\right) \text{dB} \quad (3)$$

(G_{mid} در این مقاله به صورت میانگین قدرت صدا در باندهای فرکانسی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز تعریف می‌شود). فرمول سابقین^{۲۶} برای زمان واخنش، برحسب ثانیه و حجم V سالن برحسب مترمکعب، برابر است با:

$$RT = \frac{0.161 V}{S\alpha} \quad (4)$$

عبارت دوم در معادله ۳ را می‌توان به دو بخش جداگانه تجزیه نمود، که هر دو بخش بستگی به فاصله r دارند [۶-۷].

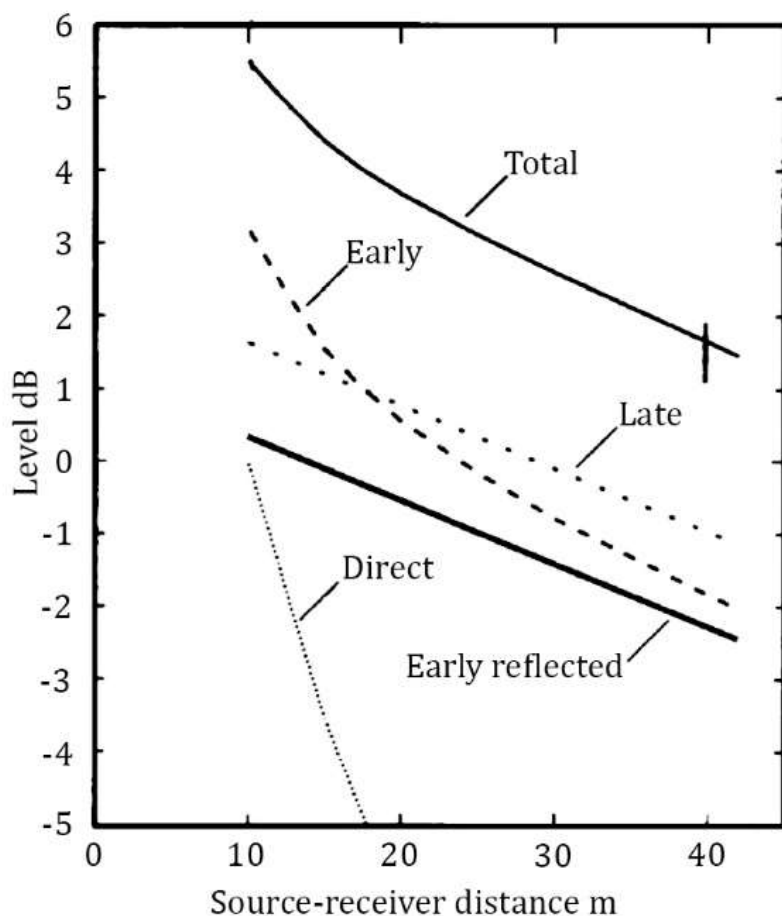
$$E_{\text{early}} = (K \times RT/V)e^{-0.04r/RT} (1 - e^{-1.11/RT}) \quad (5)$$

$$E_{\text{reverbrant}} = (K \times RT/V)e^{-0.04r/RT} (e^{-1.11/RT}) \quad (6)$$

که در این معادله K برابر با ۳۱۲۰۰ و V حجم سالن است. این معادلات با $V=20000$ مترمکعب و RT برابر ۲ ثانیه در شکل ۲ به عنوان نمونه نشان داده شده‌اند. برای مقادیر r بین ۱۰ و ۴۰ متر، منحنی بالایی پیش‌بینی می‌کند که تفاوت در G (کل) برابر با ۳/۸ دسی‌بل باشد. اندازه‌گیری‌های به عمل آمده در ۹ سالن کنسرت با فرم جعبه کفشی، با میانگین $V=16500$ متر مکعب و

می‌یابد. مقدار $3/8$ دسی‌بل برای $V=20000$ مترمکعب به درستی بین این دو عدد است.

$RT=2/5$ ثانیه، نشان می‌دهد که برای مقادیر r بین ۱۰ و ۴۰ متر، G (کل) حدود ۲ دسی‌بل افت می‌کند، درحالی‌که در ۱۱ سالن با فرم فراگیر^{۲۷} با میانگین $V=23000$ مترمکعب و $RT=2/2$ ثانیه، این مقدار ۵ دسی‌بل کاهش



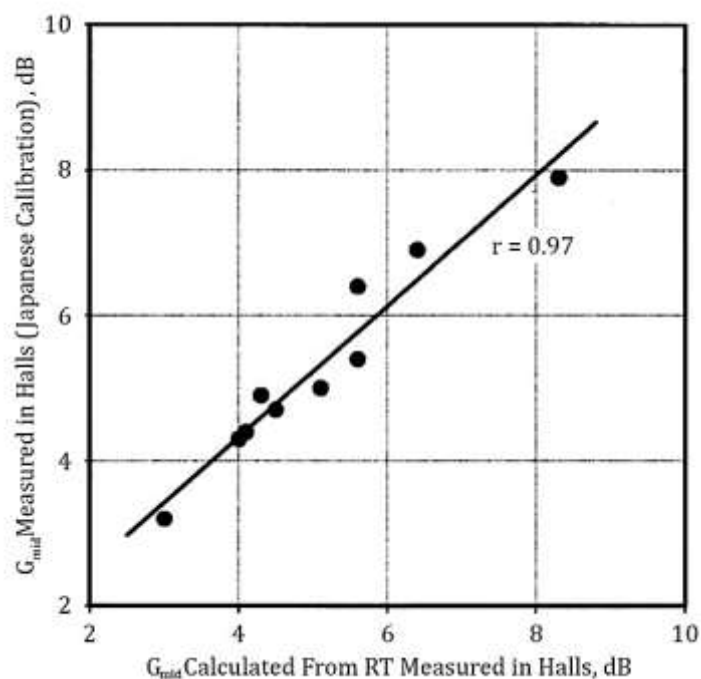
شکل ۲. محاسبه مقادیر جزئی G (تراز دسی‌بل) با استفاده از معادله‌های (۵) و (۶) با حجمی برابر با 20000 مترمربع و زمان واخش ۲ ثانیه [۱۸]. تراز صدای مرجع صفر دسی‌بلی، تراز صدای مستقیم در فاصله ۱۰ متری است. در اینجا، "بازتابش اولیه"^{۲۸} از معادله (۵)، و "بازتابش نهایی" از معادله (۶) محاسبه می‌شود. همچنین، "بازتابش کلی"^{۲۹} مجموع "بازتابش اولیه" و "بازتابش نهایی"^{۳۰} مستقیم است.

است (برای تأکید، آن نتایج در شکل ۳ ترسیم شده و ضریب همبستگی $r=0.97$ را نشان می‌دهند). پراکندگی نقاط می‌تواند به سادگی به این مرتبط باشد که دانش دقیقی در مورد ارقام V و S برای هر سالن موجود نیست، همچنین این امر که ناظران مختلف مقادیر متفاوتی را برای RT و G_{mid} به دست می‌آورند.^{۳۱}

در ادبیات تحقیق هیچ شاهدهی وجود ندارد که اگر $S\alpha$ از منجر فرمول RT محاسبه شود، مقادیری را برای G_{mid} به دست آید، که این مقادیر نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده در یک سالن باشند. برای تعیین اینکه آیا مقادیر G که از معادله ۴ با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود، تقریباً همان‌هایی هستند که در واقع اندازه‌گیری می‌شوند یا نه، مشخصات تعدادی سالن در جدول ۱ آمده

جدول ۱. محاسبه G_{mid} از RT_{mid} (سالن های خالی از جمعیت) با استفاده از مقادیر انتشار یافته V و S [۳-۱۹] در مقایسه با G_{mid} های اندازه گیری شده

سالن	اندازه به دست آمده RT_{mid}	محاسبات G_{mid} از RT	اندازه به دست آمده G_{mid} از اتاق باز آوایی
	s	dB	dB
سالن کنسرت آمستردام	۲/۶	۵/۶	۶/۴
سالن کنسرت بالتیمور	۲/۳	۴/۵	۴/۷
سالن سمفونی بوستون	۲/۵	۵/۶	۵/۴
سالن کنسرت برلین	۲/۵	۶/۴	۶/۹
سالن فیلارمونی برلین	۲/۲	۴/۳	۴/۹
سالن کلین هاس بوفالو	۱/۸	۴/۰	۴/۳
بریدج واتر منچستر	۲/۵	۴/۱	۴/۴
گاستینگ مونیخ	۲/۲	۳/۰	۲/۰
سالن کیتارا ساپورو	۲/۲	۳/۰	۳/۲
سالن توکیو	۲/۵	۵/۱	۵/۰
سالن وین	۳/۵	۸/۳	۷/۸



شکل ۳. ترسیم داده های واقع در جدول ۱، با تأکید بر ضریب همبستگی بالا

۳. تغییر بلندی صدای باس با G و RT (در فرکانس ۱۲۵Hz)

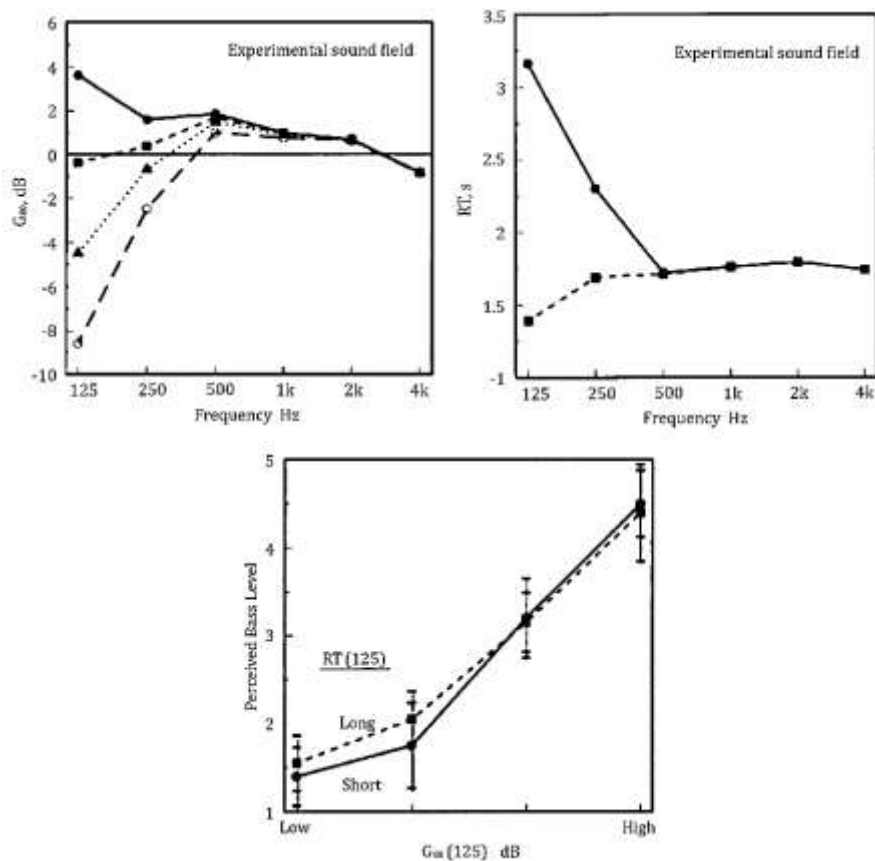
برادلی و سولودر [۸] و برادلی [۹] آغازگر تعیین اهمیت نسبی G و RT در تعیین بلندی صدای با فرکانس‌های پایین بودند.

این محققان یک نمودار نوع G را انتخاب کرده و مقدار G را به فرکانس ۱۲۵ هرتز، در بازه‌ای معادل آنچه در سالن‌های کنسرت یافت می‌شدند، تغییر دادند، که در سمت چپ بالای شکل ۴ مشاهده می‌شود. (توجه داشته باشید که در فرکانس ۲۵۰ هرتز تغییرات دسی‌بل کمتر بود). آنها

همچنین یک نمودار نوع RT را نیز انتخاب کرده و مقدار RT را در یک بازه حداکثری تغییر دادند که در سمت راست بالای شکل ۴ مشاهده می‌شود.

از سوژه‌های آنها خواسته شد که بلندی صدای باس (صدای با فرکانس پایین) را در یک مقیاس از یک تا پنج درجه‌بندی کنند.

در قسمت پایین شکل ۴، درمی‌یابیم که بلندی صدای ادراک شده در فرکانس‌های باس تقریباً به صورت خطی با افزایش G (در فرکانس ۱۲۵ هرتز) افزایش می‌یابد اما به سختی با تغییرات RT (فرکانس ۱۲۵ هرتز) تغییر می‌کند.



شکل ۴. نمودار سمت چپ بالا، نشان دهنده دامنه‌ای در G (۱۲۵ Hz) است که در این آزمایش استفاده شده است؛ سمت راست بالا، دامنه در RT (فرکانس ۱۲۵)؛ و نمودار پایینی، تراز باس دریافت شده در مقابل G_{80} (فرکانس ۱۲۵)، با دو نقطه با فواصل زیاد در RT (۱۲۵) که اضافه شده‌اند. در آزمون‌های بعدی نتایج مشابهی برای G (کل) کسب می‌شود که از صفر تا چند ثانیه به دست آمده‌اند.

۳-۱. شاخص باس

بارون^{۳۳} کمیت G_{mid} (Av 125-250 Hz) منهای G_{mid} را برای چندین سالن کنسرت در انگلستان ترسیم نموده و آن را "تبادل تراز باس"^{۳۴} نامید [۱۰]. از آنجایی که او در زمان ارائه این پیشنهاد، از نتایج مطالعه برادلی و سولودر اطلاع نداشت، بر اهمیت این مقدار تأکید نکرد. این نگارنده قصد دارد نام شاخصی برای این کمیت پیشنهاد دهد [با استفاده از $G(125)$ به جای $G(Av 125-250 Hz)$] و توصیه نماید که این شاخص به عنوان یک پارامتر آکوستیکی استاندارد پذیرفته شود.

$$\text{Bass Index} = G_{(125\text{Hz})} - G_{mid} \quad (7)$$

شاخص‌های باس تعیین شده برای تعدادی از سالن‌های کنسرت در جدول ۲ نشان داده شده است. اطلاعات منتشر

شده در این سالن‌ها [۳] نشان می‌دهد که سالن‌هایی با مقادیر مثبت در شاخص باس، دارای دیوارهای ضخیم (حدود ۱۵ سانتی‌متر یا بیشتر با جنسی معادل بتن) هستند درحالی‌که سالن‌های با مقادیر کمتر از ۱- دارای دیوارهایی هستند که از چندین لایه گچی یا چوبی یا صفحات نئوپان تشکیل شده‌اند. در این جدول، دامنه شاخص باس برای سالن‌هایی که مورد بازسازی قرار نگرفته‌اند تنها حدود ۴ دسی‌بل است، اما این همان چیزی است که انتظار می‌رود، زیرا هیچ یک از دیوارهای این گروه از فضاها با مواد جاذب صدا پوشانده نشده‌اند (۳ دسی‌بل حدوداً معادل دو برابر کردن بخش کنترباس یک ارکستر است). لازم به ذکر است که نتایج بالا برای صدای هواپرد^{۳۵} تابش یافته از یک منبع روی صحنه است.

جدول ۲. شاخص باس $[G_{125} - G_{mid}]$ (پارامتر پیشنهادی) برآوردهای حقیقی در سالن‌های خالی از جمعیت [۳]

Bass index	سالن	Bass index	سالن
-۰/۹	دیویس سانفرانسیسکو	*۳/۰	سالن کنسرت هاس برلین *
-۰/۹	سالن اشتوتگارت	۱/۸	بریدج واتر منچستر
-۱/۰	گاستیگ مونیخ	۱/۰	سالن کنسرت هاس برلین
-۱/۱	سنت دیویس کاردیف	۰/۵	سالن واترفرانٹ بلفست
-۱/۳	کیتارا ساپورو	۰/۴	تونهایل زوریخ
-۱/۷	سانتوری توکیو	۰/۴	کلاین هانس بوفالو
-۱/۹	بونکاکیکان توکیو	۰/۳	سالن کلوپ موسیقی وین
-۲/۰	شهرآپرا توکیو	-۰/۳	سالن کنسرت وین
-۲/۰	سگرتون کاستامیسا	-۰/۴	سالن بالتیمور
-۲/۲	سالن سالزبورگ	-۰/۵	سالن کنسرت آمستردام
*-۳/۳	باربیکن لندن *	-۰/۷	سالن سالت لیک
*-۴/۲	سالن فستیوال لندن *	-۰/۷	سالن فیلامونی برلین

* قبل از بازسازی

دیوارهای دو سالن انگلیسی، سالن رویال فستیوال^{۳۶} و سالن کنسرت باربیکن^{۳۷}، تحت بازسازی قرار گرفته‌اند، یعنی برای افزایش بلندی صدای باس سنگین‌تر شدند (برای رویال

صدای دوباره تابش یافته از طریق کف صحنه (و) از سازه‌های زهی با فرکانس پایین، پیانو و پرکاشن می‌تواند مقدار G را برای مخاطبین در طول کنسرت افزایش دهد.

فستیوال بیشتر). که باتوجه به مشخصات موجود در جدول ۲ که نشان دهنده این مطلباند مقدار شاخص باس کمتر از ۲/۵- نشانگر کمبود قابل توجهی در ادراک صدای باس است. باید تأکید کرد که چنانچه مقدار شاخص باس خیلی زیاد باشد نیز قابل قبول نیست. این امر به وضوح توسط تجربیات حاصله در سالن کنسرت برلین^{۳۸} تأکید می‌شود. این سالن در سال ۱۸۲۱ افتتاح شد. سالن دیوارهای جانبی و سقف‌هایی داشت و دارد که از دیوار بتنی (تا ۴۰ سانتی‌متر ضخامت) دارای پوشش گچی ساخته شده است. سالن در سال ۱۹۸۶ مجدداً بازگشایی شد (سالن موسیقی به جای سالن تئاتر)، با صندلی‌های طبقه اصلی واقع در یک تراز که با روکش نازکی پوشیده شده‌اند. شاخص قدرت G در فرکانس ۱۲۵ هرتز، با سالن پر برابر جمعیت، حدوداً برابر با ۳/۰ بود. نارضایتی‌هایی در خصوص شدت صدای باس به حدی بود که برای حل این مشکل تعداد زیادی از رزوناتورهای جاذب صدای با فرکانس پایین در سقف نصب شد تا RT₁₂₅ و G₁₂₅ را کاهش دهد. شاخص قدرت G در حال حاضر در فرکانس ۱۲۵ هرتز حدود ۱/۰ برآورد شده است. از این تجربه نتیجه‌گیری می‌شود که باید از به‌کار بردن دیوارها و سقف‌های بیش از حد ضخیم خودداری شود، به ویژه اگر ضریب جذب صندلی‌های پر، در فرکانس‌های پایین کم باشد. و مخالف این امر نیز صحیح است، اگر جذب صندلی‌های پر در فرکانس‌های پایین بالا باشد، دیوارها باید ضخیم باشند.

۳-۲. JND^{۳۹} های شاخص قدرت G

فهرست شاخص‌های باس در جدول ۲، برای بحث در مورد کمترین تفاوت محسوس در داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. اوکانو^{۴۰} برخی از مشاهدات دربردارنده‌ی G را به انجام رسانده است، به ویژه در مورد تغییرات شدت در بازتاب‌های اولیه [۱۱]. نتایج او نشان می‌دهد که "کمترین تفاوت محسوس G به عنوان بخشی از بلندی صدا، زمانی

که ΔG ^{۴۱} ها از ۸۰ میلی ثانیه اولیه واکنش‌های پالسی حاصل می‌شود" برابر با 0.5 ± 2.0 دسی‌بل است. امتیازدهی ذهنی ۵۸ سالن کنسرت توسط برانک^{۴۲} انجام شده است [۳-۴]. اگر این امتیازدهی‌ها به سه گروه A، A⁺، B⁺ و B تقسیم شوند، در مجموع میانه مقادیر G برای این گروه‌ها به ترتیب ۶، ۴/۵ و ۳ دسی‌بل است. همچنین از جدول ۳ درمی‌یابیم که برای بهترین سالن‌ها، دامنه شاخص باس محدوده ۲/۵ دسی‌بلی از ۰/۵ تا ۲/۰- است. از این نشانه‌ها، به نظر می‌رسد که "کمترین تفاوت محسوس" برای شاخص باس احتمالاً بین ۱/۰ تا ۲/۰ دسی‌بل باشد.

۳-۳. دیگر عوامل

شاخص G با استفاده از یک بلندگوی دوازده وجهی^{۴۳} به عنوان منبع صوت بر روی صحنه مورد سنجش واقع می‌شود [۲]. این رویه، نه تابش صداهای باس از کف صحنه (اگر به اندازه کافی نازک باشد) را لحاظ می‌کند، و نه بازتاب‌های ناشی از سقف معلق را. سقف معلق در حالت عادی برای از بین بردن اثرات منفی ناشی از زاویه برخورد با شیب کف سالن^{۴۴} مفید است. دربخش تماشاگران نیز ضخامت کم کف صحنه و سقف‌های معلق در سالن کنسرت اپرای شهر توکیو^{۴۵} به‌کار گرفته شده‌اند و باعث بهبود پاسخ باس ادراک شده ذهنی^{۴۶} شده‌اند [۱۲].

۴. پوشش شنوندگان (LEV)

در بهترین سالن‌ها، شنونده احساس می‌کند که با صدای بازآوای پسین احاطه می‌شود، صدایی که پس از حدود ۸۰ میلی‌ثانیه به دنبال صدای مستقیم، به گوش وی می‌رسد. صدای بازآوای زمانی بهترین حالت را دارد که احساس شود از همه‌ی بخش‌های بالای سالن به گوش می‌رسد؛ جلو، وسط و پشت (مورد توافق در مصاحبه‌های به عمل آمده از رهبران کنسرت و منتقدان موسیقی [۳]).

$$LEV_{calc} = 0.5G_{late,mid} + 10 \log[1 - IACC_{late,mid}] dB \quad (8)$$

که در آن :

$$G_{late,mid} = G_{mid,total} - 10 \log(1 + \log^{-1} C_{80,mid}/10) \quad (9)$$

در اینجا، G_{late} قدرت صدای بازآوا است (که پس از ۸۰ میلی‌ثانیه اندازه‌گیری می‌شود)؛ G قدرت کل است؛ mid به معنای اندازه‌گیری‌هایی است که در فرکانس‌های متوسط انجام شده است؛ C_{80}^{52} عامل وضوح گفتار است؛ و $[1 - IACC_{late,mid}]^{52}$ شاخص کیفیت دوگوشی (BQI) است. LEV های محاسبه شده برای ۲۲ سالن با استفاده از این فرمول‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. بلافاصله مشخص است که LEV محاسبه شده با G فرکانس-متوسط اندازه‌گیری شده همبستگی زیادی دارد.

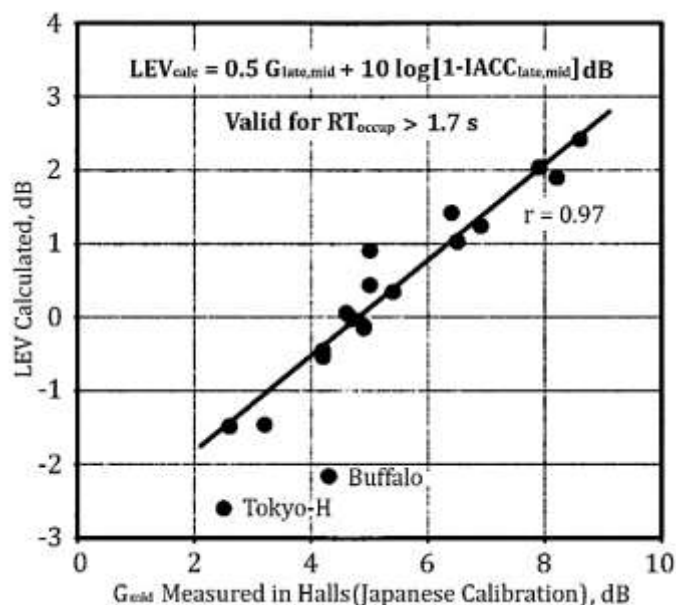
گیلبرت سولودر^{۴۷}، مایکل لاوویی^{۴۸} و اسکات نارکراس^{۴۹} از مرکز تحقیقات ارتباطات در اتاوا^{۵۰}، [۱۴] اندازه‌گیری‌هایی روی افراد انجام دادند تا مقدار LEV^{51} را به صورت عددی به‌دست بیاورند.

از شرکت‌کنندگان آنها خواسته شد که "فقط دریافت خود نسبت به پوشش یافتن یا احاطه شدن توسط صدا را امتیازدهی کنند"، در حین اینکه میدان‌های مختلف صدا از بلندگوهایی که در یک اتاق بدون پژواک به دور آنها قرار داده شده بود برای آنها پخش می‌شد. نتایج با فرمول زیر همبستگی بالایی داشت (که توسط نگارنده [۳] اصلاح شده است تا از داده‌های سالن کنسرت موجود استفاده نماید، اما با یافته‌های ایشان نیز سازگار است). توجه داشته باشید که این فرمول اصلاح شده تنها برای RT های ۱/۷ ثانیه یا بیشتر معتبر است.

جدول ۳. LEV محاسبه شده در قیاس با مقادیر اندازه‌گیری شده G در فرکانس‌های میانی. داده‌های اندازه‌گیری شده از مآخذ [۳].

(کالیبراسیون اتاق بازآوایی)

G_{mid} meas.	LEV calc.	سالن	G_{mid} meas.	LEV calc.	سالن
dB	dB		dB	dB	
۴/۷	۰/۰۲	سمفونی بالتیمور	۸/۶	۲/۴۲	تونزال زوریخ
۴/۹	-۰/۱۲	کاستا مسا	۷/۸	۲/۰۴	وین GMVS
۴/۹	-۰/۱۵	فیلهامونی برلین	۸/۲	۱/۹۰	باسل
۴/۲	-۰/۴۵	مت آرت توکیو	۶/۴	۱/۴۲	آمستردام
۴/۲	-۰/۵۴	بونکاکایکا توکیو	۶/۹	۱/۲۴	کنسرت هاس برلین
۳/۲	-۱/۴۶	کیتارا ساپورو	۶/۵	۱/۰۳	سالن کنسرت توکیو
۲/۶	-۱/۴۸	سالت لیک	۵/۰	۰/۹۱	کنسرت وین
۴/۳	-۲/۱۶	کلین هاس بوفالو	۵/۰	۰/۴۴	ساتوری توکیو
۲/۵	-۲/۶۰	تالار H توکیو	۵/۴	۰/۳۵	سمفونی بوستون
			۴/۶	۰/۰۶	تنگل وود لنوکس



شکل ۵. ترسیم داده‌ها در جدول ۳، تأکید بر ضریب همبستگی بالا

ارزشمند است، زیرا این ادراک را به وجود می‌آورد که صدای سازها و صدای سالن یکپارچه هستند و تمام سازها بخشی از یک آنسامبل^{۵۸} اند نه صرفاً نوازنده‌های منفرد. ASW با دو روش اندازه‌گیری می‌شود: $BQI = [1 - IACC_{late,mid}]$ و کسر انرژی جانبی (LF) $[3 - 14 - 16]$.

تعاریف: BQI به صورت $[1 - IACC_{E3}]$ تعریف می‌شود که در آن IACC ضریب همبستگی متقابل دو گوشی است. "E" به این معناست که اندازه‌گیری‌ها روی صدایی انجام شده است که قبل از ۸۰ میلی‌ثانیه بعد از ورود صدای مستقیم می‌رسد؛ و "۳" بدان معنی است که اندازه‌گیری‌ها مقادیر متوسط سالن هستند که در فرکانس‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز اندازه‌گیری شده‌اند. اندازه‌گیری IACC با استفاده از دو میکروفون واقع در ورودی گوش یک سر ماکت یا سر یک فرد واقعی انجام می‌شوند و خروجی‌ها به یک کامپیوتر هدایت می‌شوند که در آن ضریب همبستگی متقابل مشخص می‌شود. بدیهی است، اگر صداها از سمت جلو بیایند IACC برابر یک است، به طوری که BQI برابر با صفر است. LF یک سنجه است که در محل یک صندلی در

جهت تأکید، این نتیجه با $r=0.97$ در شکل ۵ نشان داده شده است، (البته) به استثنای سالن بوفالو کلین هانس^{۵۴} و سالن توکیو-اچ^{۵۵} هال. در این سالن‌ها، مقادیر $G_{late,mid}$ و $[1 - IACC_{late,mid}]$ به طور قابل توجهی کوچکتر از سالن‌های دیگر هستند.

در مطالعه سولودر تقریباً هیچ همبستگی‌ای بین LEV و RT به دست نیامد. این یکی دیگر از نمونه‌های اهمیت قدرت صدای G است. باید به این نکته توجه کرد کالیبراسیون اتاق بازآوایی که برای این داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت ۱/۲ دسی‌بل بالاتر از کالیبراسیون بین‌المللی است.

۵. پهنای ظاهری منبع^{۵۶} (ASW)

نشان داده شد که بسیاری از انعکاس‌های صوتی اولیه‌ای که به موقعیت شنونده در یک سالن کنسرت بین فاصله تأخیر زمان اولیه و ۸۰ میلی‌ثانیه می‌رسد، باید از جهت‌های جانبی برسند؛ چراکه این بازتاب‌ها پهنای منبع را افزایش داده (ASW) و صدای پرنگه^{۵۷} ای را ایجاد می‌کنند [۱۴]. همچنین بیان می‌شود پهنای مکفی ASW بسیار

سالن تعبیه می‌گردد و برابر است با نسبت انرژی بازتاب‌های جانبی به کل انرژی. اندازه‌گیری LF با دو میکروفون صورت می‌گیرد، یکی با الگوی دوجهتی (شبیبه عدد 8) با پاسخ صفر رو به منبع صوت و دیگری یک میکروفون همه جهتی. نمونه مقادیر اندازه‌گیری شده BQI برحسب LF در شکل ۶ (گردآوری شده از منبع [۳]) ترسیم شده است.

۶. درجه گستردگی منبع $(DSB)^{99}$

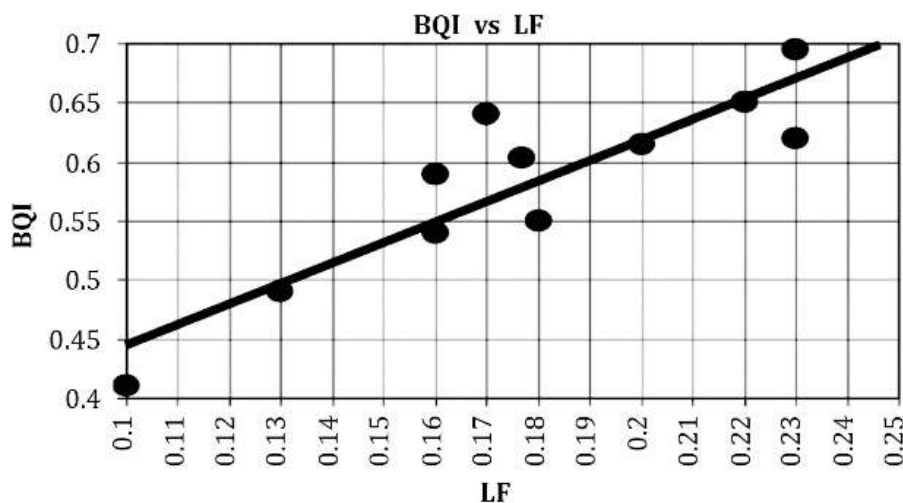
از سال ۱۹۷۱، از آزمون‌های آزمایشگاهی برآمده است که تصور ذهنی از "گستردگی منبع" نه تنها به مقادیر BQI (یا LF) بلکه به قدرت صدای آغازین G_{early} (اندازه‌گیری در ۸۰ میلی‌ثانیه پس از رسیدن صدای مستقیم) بستگی دارد. مطالعاتی که بیشتر به آنها ارجاع داده شده است، توسط موریموتو و ایداکا^۶ انجام شده است [۱۷]. بر طبق نتیجه‌گیری‌های آنها، فرمولی را برای تعیین گستردگی منبع

ارائه نمودند، یعنی $SB = LF + G_{early} / 60$ در دسی‌بل. G_{early} می‌تواند از C_{80} و G_{total} محاسبه شود. هیداکا^۶ و همکاران (۱۹۹۵) [۱۶] و اوکانو^{۶۲} و همکاران (۱۹۹۸) [۱۵] نشان داده‌اند که $BQI = [1 - IACC_{E3}]$ سنجه بهتری نسبت به LF برای بیان کیفیت آکوستیکی (فضا) است. از مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در سالن‌ها، BQI تقریباً برابر با $LF \times 3/2$ است که در شکل ۶ مشاهده می‌شود. به این ترتیب، می‌توانیم ۲ رابطه را به گستردگی منبع تبدیل کنیم که برابر است با:

$$(BQI)/3.2 + G_{early}/60$$

برای حذف نتایج اعشاری، این فرمول را در ۱۰۰ ضرب نموده و به آن DSB می‌گوییم، یعنی:

$$DSB = 31BQI + \left(\frac{5}{3}\right)(G_{early}) \quad (10)$$



شکل ۶. BQI به دست آمده که در مقابل LF ترسیم شده است [۴] در سوابق تحقیق نشان داده شد که در تصویر ۸ میکروفون به آسانی می‌توانند کالیبراسیون صحیح را از بین ببرند و بخشی از پراکندگی صدا باشند که ممکن است به این واقعیت مربوط شوند.

نتایج در ستون ۵ با امتیازدهی‌های کیفیت آکوستیکی که در منبع [۳] صفحه ۴۹۶ آورده شده، مقایسه شده است.

محاسبه DSB با استفاده از این فرمول برای تعدادی از سالن‌های معروف، با استفاده از داده‌های موجود در ادبیات منبع [۳] و روش کالیبراسیون اتاق بازآوایی برای کالیبره نمودن BQI [۳] در جدول ۴ ارائه شده است.

۷. نتیجه گیری

شاخص قدرت G در طراحی یک سالن جدید و ارزیابی سالن‌های موجود دارای اهمیت است. در حالت ایده‌آل، G_{mid} باید بین ۴ و ۷/۵ دسی‌بل باشد (در فرکانس‌های میانی و با استفاده از روش کالیبراسیون اتاق باز آوایی یک منبع صوتی) [۳] ص ۶۳۵. برای سالن‌هایی با گروه‌های کوچک اجرای موسیقی، G_{mid} می‌تواند بالاتر نیز باشد.

RT یکی از ملاحظات مهم برای نوازندگان و نیز برای گروه‌های سمفونیک امروزی است. اینکه این زمان بایستی بین ۱/۹ و ۲/۱ ثانیه باشد به‌طور کلی پذیرفته شده است. هنگام طراحی یک سالن، با به‌دست آوردن $S\alpha$ از محاسبات مربوطه و با انتخاب RT مورد نظر، حجم سالن را می‌توان با استفاده از معادله ۴ محاسبه کرد.

جدول ۴. مقادیر اندازه‌گیری شده از درجه گسترگی منبع (DSB) (ستون ۴) با استفاده از داده‌های جدول‌بندی شده در ستون‌های ۲ و ۳.

ارزش‌دهی کیفیت آکوستیکی این سالن‌ها از منبع [۳-۴] اخذ شده است.

ارزش‌گذاری کیفیت	DSB_{mid} dB	G_{early} dB	BQI -	سالن
A	۲۶/۲	۳/۶۰	۰/۶۵	بازل
A	۲۵/۳	۳/۲۰	۰/۶۲	کنسرت هاس برلین
A	۲۳/۴	۲/۱۴	۰/۶۴	سالن موسیقی وین
A	۲۳/۰	۱/۵۲	۰/۶۶	TOC توکیو
A	۲۱/۸	۱/۵۳	۰/۶۲	سگ‌ستورم کاستا مسا
A	۲۰/۹	۰/۴۷	۰/۶۵	سمفونی بوستون
A	۱۹/۶	۰/۷۷	۰/۵۹	بونکا کایکان توکیو
A	۱۹/۰	۱/۴۲	۰/۵۴	آمستردام ^۱
A	۱۸/۶	۱/۴۸	۰/۵۲	سانتوری توکیو ^۱
B	۱۸/۲	۰/۵۶	۰/۵۹	مت آرت توکیو ^۲
B	۱۷/۳	۱/۵۵	۰/۴۶	سمفونی بالتیمور
A	۱۶/۹	۰/۵۱	۰/۴۷	فیلارمونی برلین ^۱
C	۱۶/۵	۱/۱۹	۰/۳۷	کلین هاس بوفالو ^۲
فاقد ارزش‌گذاری	۱۵/۴	-۰/۴۴	۰/۴۴	کیتارا ساپورو ^۱
B	۱۳/۵	۱/۴۲	۰/۵۴	تنگل وود لنوکس ^۲
C	۱۲/۸	۲/۳۰	۰/۴۱	سانفرانسیسکو (قبل از بازسازی) ^۲

۱- فرم فراگیر

۲- فرم بادبزی

- [1] Zwicker, E., "Ein Verfahren zur Berechnung der Lautstärke", *Acta Acustica united with Acustica*, 1960, Vol.10, no.4, pp.304-308.
- [2] Stevens, S.S., "Perceived level of noise by Mark VII and decibels (E)", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1972, Vol.51, pp.575-599. (<https://doi.org/10.1121/1.1912880>)
- [3] Beranek, L., "One hundred concert halls and opera houses". In *Concert Halls and Opera Houses*, 2004, Springer, New York, NY, pp.37-489.
- [4] Beranek, Leo L., "Subjective rank-orderings and acoustical measurements for fifty-eight concert halls", *Acta Acustica united with Acustica*, 2003, Vol.89, no.3, pp.494-508.
- [5] Beranek, L.L., "Acoustics, American Institute of Physics", New York, 1986, p.314.
- [6] Barron, Mike, and L- J. Lee., "Energy relations in concert auditoriums. I." *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, Vol.84, no.2, pp.618-628.
- [7] L Beranek, *Acoustics*, [see Eqs. (10.14), (10.24), (10.29) and (10.32)], AIP, Maryland, 1986.
- [8] Bradley, J.S., Souloudre, G.A. and Norcross, S., "Factors influencing the perception of bass", Doctoral dissertation, Acoustical Society of America, 1997.
- [9] Bradley, J. S., "The sound field for listeners in concert halls and auditoria", *Computational Architectural Acoustics*, WIT Press, Southampton, 1999.
- [10] M. Barron, "Auditorium Acoustics and Architectural Design", 2nd ed., Spon Press, London, 2010, pp.128-129, 223.
- [11] T. Okano, "Judgments of noticeable differences in sound fields of concert halls caused by intensity variations in early reflections", *J. Acoust. Soc. Am.*, 2002, Vol.111, 217-229.
- [12] T. Hidaka, L Beranek, S. Masuda, N. Nishihara, and T. Okano, "Acoustical design of the Tokyo Opera City (TOC) concert hall, Japan," *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000, Vol.107, pp.340-354.
- [13] G. A. Souloudre, M. C. Lavoie, and S. G. Norcross, "Objective measures of listener envelopment in multi-channel surround systems", *J. Audio Eng. Soc.*, 2003, Vol.51, pp.826-841.
- [14] Marshall, Arthur Harold, and Michael Barron, "Spatial responsiveness in concert halls and the origins of spatial impression", *Applied Acoustics*, 2001, Vol.62, no.2, pp.91-108.
- [15] Hidaka, Takayuki, Leo L. Beranek, and Toshiyuki Okano, "Interaural cross- correlation, lateral fraction, and low- and high- frequency sound levels as measures of acoustical quality in concert halls", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, Vol.98, no.2, pp.988-1007.
- [16] Okano, T., Beranek, L.L. and Hidaka, T., "Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACC E), lateral fraction (LF E), and apparent source width (ASW) in concert halls", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, Vol.104, no.1, pp.255-265.
- [17] M. Morimoto and K. Ida, "A practical evaluation method of auditory source width in concert halls," *J. Acoust. Soc. Jpn.*, 1995, Vol.16, pp.59-69.
- [18] M. Barron, "Auditorium Acoustics and Architectural Design", Spon Press, London, 2009, p.69.
- [19] Beranek, Leo L., "Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, Vol.120, no.3, pp.1399-1410.
- [20] Long, Marshall, "Architectural acoustics", Elsevier, 2005.

پی نوشت

* تالار سمفونیک بوستون نیاز به بحث جداگانه‌ای دارد. هر داده‌ای که در آن سالن اندازه‌گیری شود وقتی که خالی از جمعیت است نمی‌تواند به عنوان نشانگر عملکرد آکوستیکی آن در زمانی که پر از جمعیت است مورد استفاده قرار بگیرد. دلیل آن این است که جایگاه تماشاچیان آن بر روی یک تخته چندلایی ضخیم ۲ سانتی‌متری و بر روی قاب‌های ۱۰×۱۰ سانتی‌متر سوار شده است - حجم هوای زیر آنها از صفر در جلوی کف اصلی تا ۱/۵۲ متر در قسمت عقبی متغیر است. در حالت خالی، این تخته چوبی چندلا به‌طور قابل توجهی صدای با فرکانس پایین را جذب می‌کند. با این‌حال، زمانی که سالن پر است، افراد ۱۷۰ کیلوگرم به ازای هر متر مربع به وزن تخته چوبی چند لا اضافه می‌کنند. این بدان معنی است که، از نظر آکوستیکی، فضای جایگاه تماشاچیان بوستون وقتی مملو از جمعیت است، مانند بسیاری از سالن‌های دیگر نظیر تالارهای وین GMVS، کانزرتوس برلین، لوسرن و لنوکس اوزاوا رفتار می‌کند، که جایگاه‌هایی دارند با رویه‌کوبی‌های نازک روی صندلی‌های تماشاچیان (ن.ک به شکل ۱).

1. Leo Beranek
2. The sound strength parameter G
3. Loudness

4. Total sound absorption

5. Reverberation time

6. Bass Index شاخص صدای با فرکانس پایین (مترجم)

۷. فرکانس‌های ۲۵۰ تا ۲ کیلوهرتز را فرکانس میانی می‌نامند (مترجم)

8. Listener envelopment

9. Apparent Source Width

10. Degree of Source Broadening

11. Binaural Quality Index

12. Sound Pressure Level

۱۳. μBar نام یکایی برای کمیت فیزیکی فشار است که معادل ۱۰۰ کیلوپاسکال و تقریباً معادل فشار یک جو است (مترجم).

14. Bass Response

15. Mid-Frequency

۱۶. Reverberation-chamber method of calibration اتاق بازآوایی محفظه‌ای که همه سطوح آن تا حد ممکن بازتابنده صدا هستند، اندازه‌گیری‌های آکوستیکی در این نوع اتاق‌ها انجام می‌شود (مترجم). روش اتاقک بازآوایی کالیبراسیون منبع صوتی دوازده وجهی تقریباً و منحصرأ از مؤسسه R&G تاکناکا در چیبای ژاپن به کارگرفته شده است. آزمایشگاه‌های دیگر ظاهراً منبع را از طریق اندازه‌گیری تراز فشار صدا در فاصله ۱ متری از مرکز آن در سن یک سالن کنسرت کالیبره نمودند و خروجی قدرت آکوستیکی را از آن مقدار تعیین کردند. تجزیه و تحلیل کامل این تفاوت در منبع [۳] ص. ۶۳۴-۶۳۸ آمده است. این نشان می‌دهد که اندازه‌های G به‌دست آمده از دو روش در حدود ۱/۲ دسی‌بل متفاوت است، با مقدار بالاتر مرتبط با روش کالیبراسیون اتاق آوایی (که گاهی اوقات به نام "روش ژاپنی" نامیده می‌شود). مهم است که توجه داشته باشیم برای سالن‌های جدول ۱، روش اتاق بازآوایی مقدار مناسب‌تری را ارائه می‌دهد.

17. Munich

18. Rotterdam

19. Sapporo

20. Berlin Konzerthaus

21. Vienna GMVS

22. Boston

23. Lenox Tanglewood

24. Lucerne

25. shoebox

26. Sabine

27. Surround سالن‌های مدور که جایگاه تماشاچیان دایره‌وار دور تا دور سن قرار می‌گیرند. (مترجم)

28. Early Reflected

29. Total Reflected

30. Late Reflected

۳۱. با توجه به اینکه مقادیر بهینه RT و G_{mid} براساس سلاقی افراد و ناظرین مختلف، متفاوت است این اظهار نظر غیر علمی قابل قبول است (مترجم).

32. Barron

۳۳. متوسط روی بازه ۱۲۵ تا ۲۵۰ هرتز

34. Bass level balance

35. Airborne

36. Royal Festival Hall

37. Barbican

38. Berlin Konzerthaus

39. Just-Noticeable-Differences

40. Okano

41. Differences of G

42. Beranek

43. Dodecahedral

44. Seatdip

45. Tokyo Opera City

46. Subjective bass response

47. Gilbert Soulodre

48. Michael Lavoie

49. Scott Norcross

50. Communication Research Center in Ottawa, Canada

51. Listener envelopment

۵۲. $C(80)$ Clarity Index in 80 ms شاخص وضوح صدا، نسبتی از انرژی رسیده صوتی قبل از اولین ۸۰ میلی‌ثانیه از ورود صدای مستقیم تقسیم بر انرژی رسیده بعد از این زمان مشخص از همان صدای ورودی است که به عنوان یک تراز با واحد دسی‌بل یا دسی‌بل لا توصیف می‌شود $C_{80} = 10 \log \left[\frac{e_d + e_e}{e_l} \right]$ [۲۰] (مترجم).

۵۳. Interaural Cross Correlation همبستگی دو گوشی: اندازه‌ای از تشابه صدای رسیده در دو نقطه که این دو نقطه عموماً دو گوش شنونده یا مخاطب در نظر گرفته

می‌شود [۲۰] (مترجم)

54. Buffalo Kleinhans

55. Tokyo-H

-
56. Apparent Source Width
 57. Sound Fullness of tone
 58. Ansamble
 59. Degree of Source Broadening
 60. Morimoto and Iida
 61. Hidaka
 62. Okano