

یکپارچه‌سازی طراحی پارامتریک و مهندسی آکوستیک

(برای شکل دادن به سالن کنسرت)

عباس غفاری	حمیدرضا فرشچی	هانیه مجیدی*
استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز	استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده معماری و هنر دانشگاه کاشان	دانشجوی کارشناسی ارشد رشته فناوری معماری / بایونیک دانشگاه کاشان
ghaffari@tabriziau.ac.ir	farshchi46@kashanu.ac.ir	hanieh.majidi@rocketmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۹

چکیده

طراحی معماری بسیاری از سالن‌های اپرا و کنسرت به سرعت در حال تغییر از ترکیب‌های سنتی و بالکن‌ها، به مفاهیم پیچیده سه بعدی^۱ است که در این ایده‌های جدید تفکیک عناصر سنتی "صوتی" مثل بالکن‌های جلو آمده، فرم سقف و عناصر تزئینی و ... به عناصر مجزا قابل تشخیص نیستند. در نتیجه، مرز میان آکوستیک و معماری، باریک‌تر و ناگسستنی‌تر از قبل می‌شود. این پویایی و ارتباط منجر به ایجاد مشکلات در زمینه طراحی می‌شود تا زمانی که بررسی "صدا" (با استفاده از کامپیوتر و / یا مدل‌های مقیاسی) طراحی را به سرانجام برساند. در این پژوهش، با ذکر نمونه طراحی محاسباتی - پارامتریک و چند مورد تجزیه و تحلیل آکوستیک در زمان واقعی^۲ (یا نزدیک به زمان واقعی) و ترکیب با ابزارهای طراحی معماری مشخص می‌شود که چگونه هر دو (معمار و مشاور صوتی) می‌توانند روحیه خلاقیت یکدیگر را رو به جلو پیش ببرند. ابزارهای پارامتریک معماری، نظیر گرس هاپر، طراحی را تا حد زیادی تسهیل می‌کند که در آن هم فرایند معماری و هم تجزیه و تحلیل صوتی و بهینه‌سازی به‌طور هم‌زمان پیشرفت می‌کنند. نمونه‌های بررسی شده پروژه‌هایی را با بهینه‌سازی سه بعدی در زمان واقعی ارائه می‌کنند تا یکپارچه‌سازی طراحی پارامتریک و مهندسی آکوستیک را برای یافتن بهترین شکل هندسی سالن کنسرت نشان دهند.

واژگان کلیدی: آکوستیک، سالن کنسرت، ابزارهای پارامتریک، گرس هاپر، بهینه‌سازی صوتی

۱. مقدمه

طراحی یک سالن کنسرت که شامل مهندسی آکوستیک و طراحی معماری است عوامل مختلفی به عنوان "فضا" مورد بررسی قرار می‌گیرند که دارای عملکردهای پیچیده‌ای هستند که شامل فعالیت‌های کنسرت، مقررات ساختمانی،

در دهه‌های اخیر معماری به روش‌های گوناگونی در حال پیشرفت‌های پیچیده‌ای است. هرچند این پیچیدگی‌ها اغلب با اشکال هندسی ساده نمایان می‌شوند که به صورت بصری پیچیدگی را از چشم بینندگان پنهان می‌کند، با این وجود در

ساختار، فرایندهای ساخت و ساز، بودجه و غیره می‌شوند. محاسبات صورت گرفته در یک طرح برای تولید تمام هندسه‌های احتمالی طرح فضا که دارای محدودیت‌های زیباشناسی و عملکردی است توسط معمار نهایی می‌شود با این حال، سخت‌ترین بخش فرایند طراحی انتخاب بهترین شکل هندسی در میان گزینه‌های مختلف است [۱].

از طرف دیگر مهندسان باید دقیقاً نیازهای عملکردی و محاسباتی را با هندسه پیچیده سالن‌های معاصر ادغام کنند که این می‌تواند منجر به "رقابت برای کنترل آکوستیک" هر متر مربع سالن شود. همان‌طور که می‌دانیم، مواد و شکل بر کیفیت صدای سالن تأثیر می‌گذارد، صرف نظر از اینکه آیا برای آکوستیک، سیستم‌های فنی یا به دلایل معماری طراحی شده‌اند؟

در بخش اول این مقاله سعی بر نشان دادن توانایی ادغام آکوستیک در ابزارهای طراحی معماری است تا نشان دهد چگونه می‌توان مشاوره آکوستیک را قادر ساخت تا با زبان معمارها هم سخن شود. مشاور صوتی با انعطاف‌پذیری بیشتر برای کشف راه‌حل‌های خلاقانه‌تر و دقیق بر اساس بنیاد فنی جامعی که از طریق تجزیه و تحلیل زمان واقعی - طراحی و اجرای هم زمان با اجرا- ارائه می‌شود، آمادگی بیشتری داشته باشد.

برای مفید بودن، لازم است ابزارها دقیق، بصری و قابل درک باشند.

بخش دوم زمینه و وضعیت فعلی هنر را در رابطه با نسل آینده ابزارهای طراحی بررسی می‌کند. روش‌های ترکیب آکوستیک در نرم‌افزار معماری و انواع مختلف رویکردهایی که توسط مشاور صوتی دنبال می‌شود. در بخش آخر نیز، به بررسی پنج مطالعه موردی می‌پردازیم. در نمونه مورد مطالعه اول روش محاسباتی برای ادغام طراحی اریگامی-پارامتریک و مهندسی آکوستیک به منظور یافتن بهترین شکل هندسی سالن کنسرت پیشنهاد می‌شود، محدودیت‌های همکاری‌های متداول بین معماران و مهندسين صدا را مورد بحث قرار داده

و برای غلبه بر این محدودیت‌ها، یک روش طراحی تعاملی را توسعه می‌دهند و کاربرد آن را در یک پروژه طراحی سالن کنسرت در ژاپن نشان می‌دهند [۱۶]. چهار نمونه موردی بعدی که در آن این ابزارها با موفقیت توسط شرکت "کهل آکوستیک"^۳ در پروژه‌های واقعی مورد استفاده قرار گرفتند را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد.

۲. ترکیب آکوستیک با ابزار معماری

ادغام احتمالات آکوستیک به کمک Cad_ ابزار طراحی رایانه^۴ را می‌توان به روش‌های مختلفی به دست آورد. این کار می‌تواند تنها از طریق برنامه‌نویسی بر اساس معادله سابین تا تجزیه و تحلیل پیچیده (FDTD)_ روش تفاضل محدود در حوزه زمان^۵ در زمان واقعی متفاوت باشد [۲]. بسته به زمینه پروژه، روش‌های مختلف و نرم‌افزارهای متفاوتی ممکن است مورد استفاده قرار گیرد. در میان بسته‌های نرم‌افزار مدل‌سازی سه بعدی در بازار، نرم‌افزار (راینوسروس^۶) یکی از برنامه‌های شناخته شده برای ایجاد مدل‌های سه بعدی بر اساس منحنی‌ها و سطوح مدل ریاضی اسپلاین (NURBS)_ بی- اسپلاین نایکنواخت نسبی^۷ است [۳]. به ویژه طراحی با استفاده از نرم‌افزار راینوسروس برای دقت و صحت مدل‌های تولید شده و همچنین امکان انجام عملیات ریاضی، ارزیابی شرایط متغیر و هندسه‌های بسیار پیچیده‌ای که به سرعت در حال تغییر است بسیار آسان‌تر صورت می‌گیرد [۴]. درحالی‌که اسکریپت^۸ _ کد نوشته شده در علوم کامپیوتر و نرم‌افزار _ الگوریتم بصری (گرس هاپر^۹) به کاربر اجازه می‌دهد تا در زمان واقعی با منحنی‌ها و اسپلاین‌ها تعامل داشته باشد. توسعه کدنویسی در نرم‌افزارهای معماری به مشاوران آکوستیک اجازه می‌دهد تا اطلاعات ورودی مربوط به آکوستیک را به دست بیاورند و به نوعی توسعه در "ابزارهای صوتی" است.

دو دسته‌بندی اصلی برای ابزارهای صوتی وجود دارد که در ادامه به آنها خواهیم پرداخت:

۲-۱. تجزیه و تحلیل‌های آکوستیک

الف. تجزیه و تحلیل آکوستیک یک شکل استاتیک: فرمی که با فرایند آزمون و خطا شکل گرفته است و اگرچه سریع صورت می‌گیرد، اما زمان واقعی نیست. این فرایند می‌تواند به صورت خودکار با استفاده از AE - الگوریتم‌های تکاملی^{۱۰} - ایجاد شود. به این ترتیب یک دسته از راه‌حل‌های انتخاب شده شامل بسیاری از الگوهای بیش از حد تکامل یافته است و بقای الگوهای منتخب از یک ساختار به ساختار جدید بعدی در الگوریتم تکاملی توسط یک تابع پردازش بر اساس اهداف صوتی مورد نظر اداره می‌شود [۵]. با گذشت زمان، کیفیت راه‌حل‌ها در الگوهای منتخب بهبود می‌یابد. هنگامی که یک راه حل رضایت‌بخش پیدا شد تکامل زمانی به پایان رسیده است [۶-۷].

ب. تجزیه و تحلیل زمان واقعی: تجزیه و تحلیل‌های صوتی درحالی که هندسه مجسم شده دستی یا پارامتریک باشد اجرا می‌شود. این روش بازخورد زمان واقعی از تأثیر تغییرات آکوستیک را از هندسه ساخته شده است ارائه می‌دهد.

۲-۲. مهندسی معکوس^{۱۱} (طراحی مبتنی بر آکوستیک)

در این روش چندین هدف آکوستیکی تنظیم می‌شود که این اهداف در حین شکل دادن به سالن کنسرت به محدودیت‌های هندسی تبدیل و ترجمه می‌شوند. این روش هر شکل مجازی را که به اهداف آکوستیکی دست می‌یابد می‌تواند تولید کند. برای مثال همان‌طور که توسط باسوئت^{۱۲} و بونینگ^{۱۳} مورد بررسی قرار گرفته است می‌تواند از یک حداکثر ITDG - فاصله اولیه تأخیر زمانی^{۱۴} [۸] - برای بازتابنده‌های جانبی به سمت هدف آکوستیکی مؤثر دریک اتاق کاملا متغییر باشد [۹]. گاهی اوقات زمان واقعی و طراحی تعاملی تکرار شونده برای روند طراحی مهم است (مثلا در حین برگزاری کارگاه‌های آموزشی همراه با معماران). در سایر مراحل در طول فرایند طراحی، بهینه‌سازی

صوتی و تحلیل دقیق‌تر هندسه می‌تواند به صورت برون خطی^{۱۵} - زمان غیر واقعی - انجام شود تا محدوده آزاد برای طراحی توسط معمار را بررسی کند. حتی کار برون خطی هم باید سریع و کارآمد باشد به طوری که در همان زمان بررسی "فضا" به عنوان راه حل کامل تلقی شود.

۳. دامنه ابزارهای آکوستیک

استاندارد ISO-3382 معیارهای آکوستیک کاربردی را فراهم می‌کند که هر سالن کنسرت خوب باید نشان دهد. با این وجود، رابطه‌ای بین شکل سالن کنسرت و این معیارها ایجاد نمی‌شود. بنابراین، برای ایجاد این پیوند، مشاور صوتی باید پارامترهای خاصی را تعریف کند تا اثربخش بودن آکوستیک هر سطح را به صورت مجزا درک کند و از هر نوع ابزار صوتی برای ساده‌سازی رفتار آکوستیک واقعی استفاده کند، درک آنچه که در حال انجام است، از ساده‌سازی‌هایی که انجام می‌شود تا چگونگی تفسیر نتایج برای مشاوره صوتی امری ضروری است. ابزارها معمولا برای انجام ردیابی بین یک منبع و سطوح مورد مطالعه و همچنین مخاطبان مورد استفاده قرار می‌گیرند. این امر برای درک نقش هر سطح و توانایی تغییر آن (به صورت دستی یا پارامتریک) برای رسیدن به هدف صوتی مورد نظر صورت می‌گیرد. از آنجا که این روش بر اساس "آکوستیک هندسی" است، نمایش پارامترهای صوتی معمولی بسیار آسان است. مانند منطقه تحت پوشش، فاصله تأخیر زمان اولیه، زاویه مؤثر یا کاهش انرژی با توجه به صدای مستقیم. علاوه بر این، دیگر پارامترهای آکوستیک هندسی نیز وجود دارند که می‌توانند مورد توجه قرار گیرند:

۱. میانگین انرژی اولیه بر روی تمام مخاطبان بسته به زاویه فضایی کل منطقه اشغال شده توسط مخاطبان و یک مقدار متوسط خاص از زاویه بازتاب‌های اولیه در ناحیه مخاطبان، (بر اساس نظریه زاویه فضایی توسط جورکیویست^{۱۶} و همکاران) [۱۰].

۲. تکنیک منبع تصویر: این همان رویکردی است که روی صحنه با فاصله ۱ متر بین منبع و گیرنده اعمال شده است و می‌تواند برای ارائه مقدار برآورد STI_ نسبت انرژی صدای مستقیم به انرژی اولین بازتاب^{۱۷} _ مورد استفاده قرار گیرد.

۳. قدرت یک اشعه منعکس شده از یک سطح منحنی بر اساس رویکرد هندسی (پیشنهاد شده توسط ریندل^{۱۸} [۱۱])، سازگار شده با اسپالین توسط وول فرنک^{۱۹} و همکاران [۱۲].

۴. برآورد محدودیت‌های فرکانس مربوط به اندازه بازتابنده و پانل‌های ردیفی بر اساس سطح بازتابی نسبت به منطقه فرنل^{۲۰} (ریندل [۱۳]) یا ملاحظات مربوط به حد مجاز فرکانس پانل‌های ردیفی (اسکالویک^{۲۱} [۱۴]). هدف استفاده از چنین ابزارهای صوتی لزوماً محاسبه برای معیارهای ایزو نیست بلکه به صورت مشخص می‌تواند بسیار مناسب و صحیح با هندسه‌ی شبیه‌سازی شده باشد و همچنین می‌تواند پارامترهای صوتی را با سالن‌های

ساخته شده که در آن کیفیت صوتی شناخته شده است مقایسه کرد.

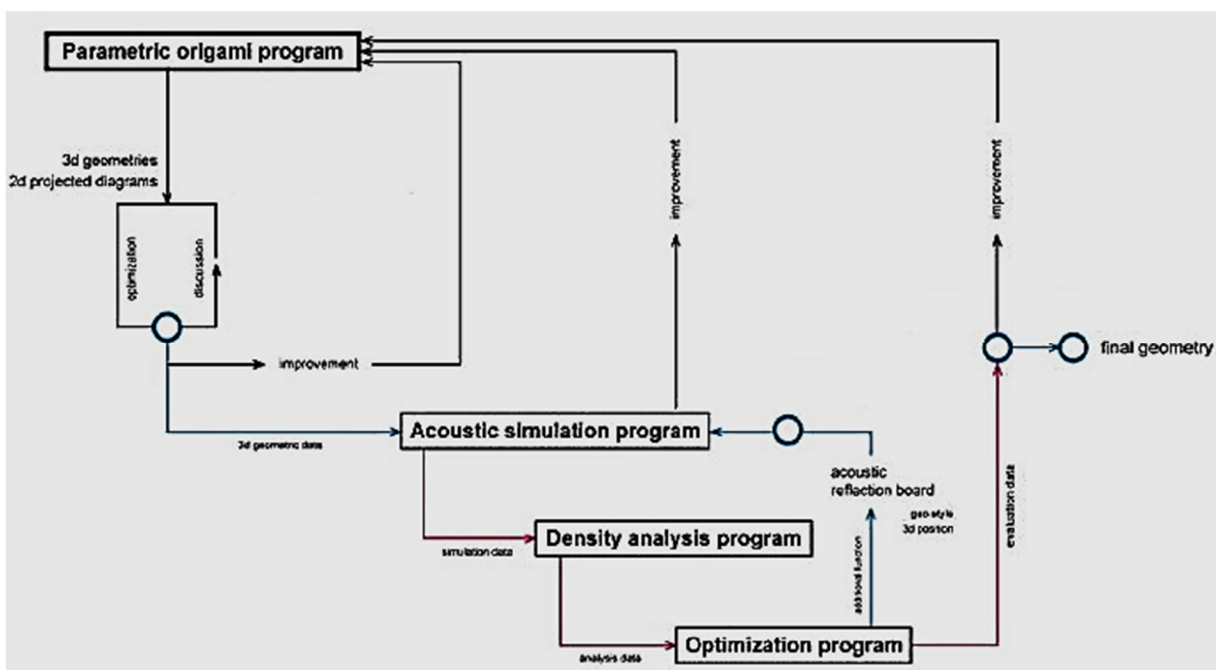
۴. پروژه طراحی سالن کنسرت ژاپن:

با پیشرفت‌های اخیر عملکرد کامپیوتر، تکنولوژی شبیه‌سازی به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است. در نتیجه، تبدیل حالت‌های بصری به حالت پارامترهای صوتی بسیار آسان شده است. آن چیزی که باعث جذابیت این روش می‌شود این است که پارامترها می‌توانند فرم‌های غیرقابل پیش‌بینی را پیدا کنند که با شرایط صوتی و اهداف طراحی مناسب باشند. در این بخش، روش طراحی تعاملی برای یک پروژه طراحی سالن کنسرت با همکاری معماران سوئپ^{۲۲} (یک دفتر معماری) و ناگاتا آکوستیک^{۲۳} (شرکت مشاوره آکوستیک) مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش طراحی شامل سه زیر برنامه تعاملی است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

۱. برنامه تولید شکل هندسی

۲. برنامه شبیه‌سازی صوتی

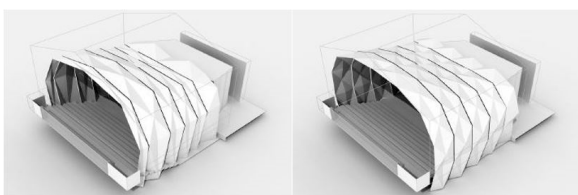
۳. برنامه بهینه‌سازی



شکل ۱. دیاگرام روش طراحی تعاملی [۱۵].

۴-۱. برنامه تولید شکل هندسی: برنامه اریگامی پارامتری^{۲۴}

زیر مجموعه اول، برنامه اریگامی - پارامتریک است، این ایده که توسط گروه معماران سوئپ پیشنهاد شد این گونه به تصویب رسید که یک فرم توسط یک ورق کاغذ که "اریگامی" - هنر سنتی ژاپنی - نام دارد تولید شود. این برنامه می تواند هر سطح را به یک شکل هندسی تبدیل کند. پارامترهای پایه سیستم تاشو اریگامی شامل: خطوط تاشو، قطر تاشو، عرض تاشو، زاویه های تاشو و غیره است که در شکل ۲ نمایش داده شده است.

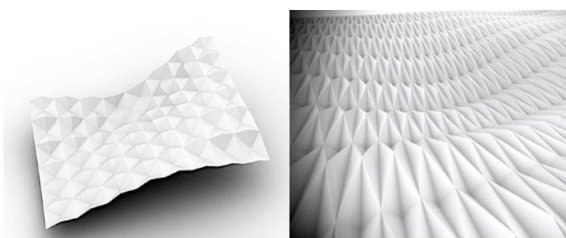


شکل ۴. تغییرات در فرم های احتمالی [۱۵]

یکی دیگر از ویژگی های این برنامه این است که در صورت عدم ترکیب هر کدام از پارامترها، این برنامه یک ترکیب جایگزین را فراهم می کند. در ادبیات موضوعی، مطالعات متعددی با روش های اریگامی - محاسباتی برای طراحی معماری در ارتباط است. اکثر آنها قوانین اریگامی دشواری را دنبال می کنند، به طوری که یک ورق کاغذ را بدون هرگونه "برش" در سطح چند وجهی آن خم کنند. با این حال، در فرایندهای طراحی معماری، این قانون گاهی اوقات هدف نهایی طراحی یا عملکردهای دیگر معماری را مختل می کند. برای غلبه بر این محدودیت، روش به کار برده شده در پروژه تحقیقاتی ناگاتا آکوستیک طراحان را قادر به تعادل وزن پارامترها (یکی از محدودیت های طراحی) در فرایند بهینه سازی می کند. به این معنی که این روش اجازه می دهد یک ورق کاغذ برخلاف مطالعات مشابه دیگر "برش" داده شود یا محدودیت های معماری را از قبیل طراحی بر اساس اندازه سالن از بین ببرد که در واقع در فرایند تعادل بین قوانین اریگامی، عملکرد صوتی و طراحی صورت می گیرد.

۴-۲. برنامه شبیه سازی صوتی^{۲۵}

زیر مجموعه دوم یک برنامه شبیه سازی صوتی است که با آکوستیک هندسی، یعنی انتشار صوت از نظر پرتوهای



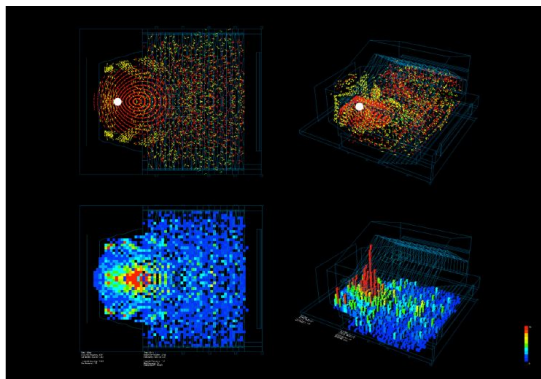
شکل ۲. برنامه اریگامی - پارامتریک می تواند ورق صاف کاغذ را از طریق تکنیک های مختلف تاشو به شکل هندسی تبدیل کند [۱۵].

این پارامترها غیرمستقل هستند. در واقع، هدف برنامه اریگامی - پارامتریک، ایجاد یک روش برای یافتن پارامترهای مرتبط با یکدیگر بر اساس هندسه اریگامی است، یعنی ایجاد هندسه هایی است که قابلیت ترکیب شدن با محدودیت های پیچیده معماری را بدون تفکیک پارامترها از یکدیگر دارا باشند که در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳. ایجاد فرم معماری برای برآورد محدودیت های پیچیده معماری [۱۵].

این دو زیر مجموعه از برنامه؛ یعنی برنامه شبیه‌سازی صوتی و برنامه اریگامی- پارامتریک، به این صورت که در ادامه اشاره شده و در شکل ۶ آمده است، عمل می‌کنند.



شکل ۶. توضیح چگالی صدا [۱۵]

۴-۳. برنامه بهینه‌سازی^{۲۶} با روش شمارشی

کوادرات

برنامه اریگامی-پارامتریک ارائه شده می‌تواند تمام هندسه‌های احتمالی را با توجه به پارامترهای مشتق شده از شرایط معماری موجود (نتیجه‌ای از مقررات معماری، ساختار، فرایندهای ساخت و ساز، بودجه‌ها و غیره) برای سالن تولید کند.

پارامترهای تاشویی که در واقع مورد قبول معمار و همچنین قابل مجاز برای هر کدام از مقادیر پارامترهای مشتق شده از سیستم تاشو اریگامی هستند. سپس، برای هر شکل هندسی احتمالی، برنامه گرافیکی از شبیه‌سازی آکوستیکی پخش صدا و توزیع صدای دریافتی توسط هر شنونده و یا بیننده در صندلی‌ها نشان داده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۷ آمده است.

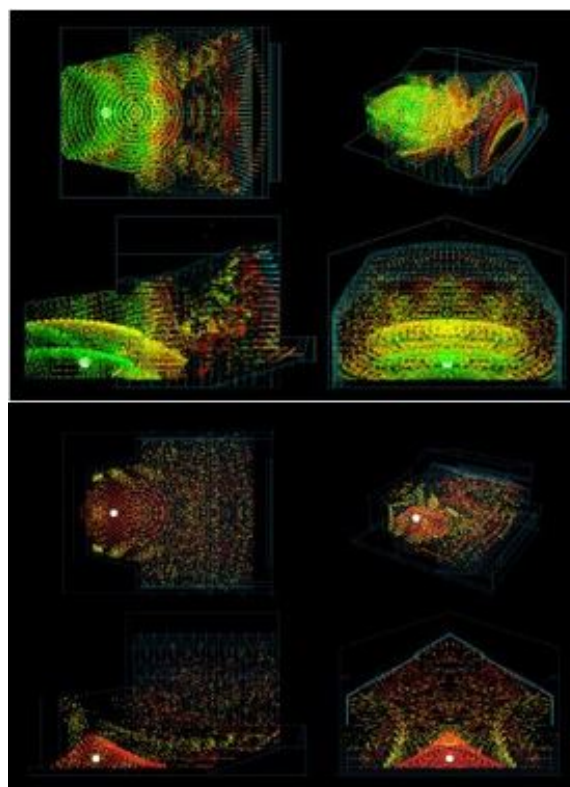
مستقیم، در ارتباط است. برخی از نرم‌افزارهای موجود این قابلیت را دارند که می‌توانند به‌طور تعاملی پخش صدا و فرم‌های هندسی را شبیه‌سازی کنند.

با این حال می‌توان توزیع صدای مستقیم (که به تنهایی برای بهینه‌سازی صدای یک سالن کنسرت کافی نیست) را شبیه‌سازی کرد. به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های این پروژه، یک برنامه شبیه‌سازی صوتی که در ۳ بعد یک فضای سه بعدی پخش صدا را به سه شکل زیر تجسم می‌کند، ایجاد کردند:

۱. توسط پرتوهای صوتی که منشاء آن از یک منبع صوتی، در یک نقطه دلخواه در سالن است.

۲. توزیع صدا منعکس شده

۳. توزیع صدای پخش شده که در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵. (بالا): بازتاب صدای شبیه‌سازی شده. (پایین): واکنش

صدای شبیه‌سازی شده [۱۵]

۱. صدا به طور مساوی در کل سالن و همچنین صندلی مخاطبان در ۳۰ تا ۹۰ میلی ثانیه توزیع می شود.
۲. هیچ گونه پژواک (انعکاس) و یا پژواک های موازی که از سطوح صاف بازتاب می شوند وجود ندارد.
۳. هیچ تمرکز صدایی وجود نخواهد داشت.

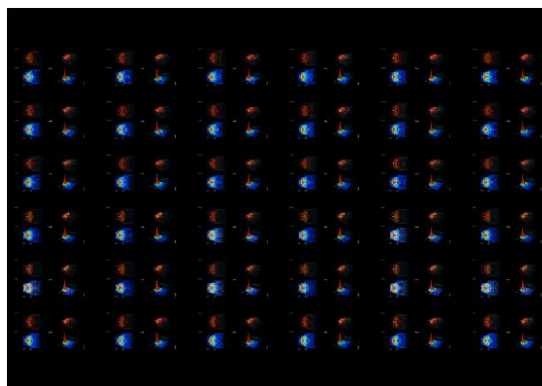
برای بررسی اینکه آیا صدای یکنواخت درون سالن توزیع شده است یا خیر، روش شمارش کوادرات^{۲۷} روش مطالعه چند نمونه استاندارد برای رسیدن به جواب کل مشترک_ روش توزیع پواسون^{۲۸} اعمال شده است. این برنامه به طور خودکار مقدار هر متر مربع را برای تست یکنواختی در هر فرم محاسبه می کند که فرمول آن در رابطه ۱ آورده شده است به طوری که O نشان دهنده مقادیر مشاهده شده و E نشان دهنده مقادیر مورد انتظار است.

$$\chi^2 = \sum (O-E)^2 / E \quad (1)$$

یکی دیگر از جنبه های قابل توجه برنامه بهینه سازی این است که می تواند به راحتی شرایط لازم آکوستیکی (با توجه به پارامترهای متفاوت) را تغییر دهد. چنین انعطاف پذیری امکان خلق طرح های مختلف معماری را مطابق با فاکتورهای شرکت کننده ایجاد می کند. این امکان در شکل ۸ قابل مشاهده است [۱۵].

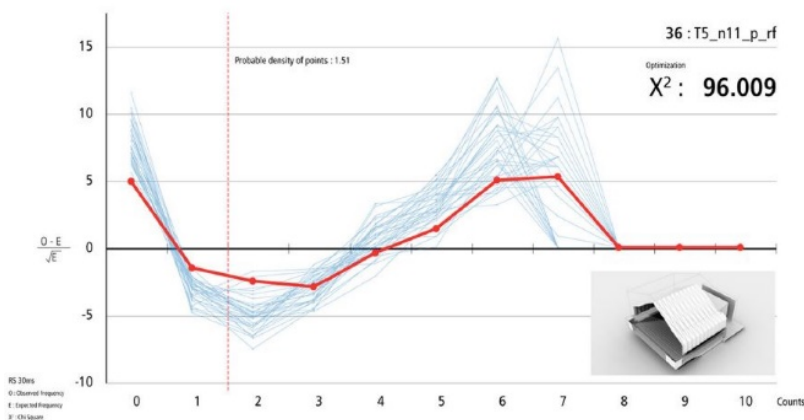


شکل ۷. (الف): بخشی از هندسه های مختلف احتمالی از یک سالن با توجه به پارامترهای مشتق شده از شرایط معماری [۱۵].



شکل ۷. (ب): نتایج حاصل از برنامه شبیه سازی صوتی [۱۵].

با توجه به نتایج به دست آمده از هر یک از هندسه های احتمالی، برنامه بهینه سازی، بهترین ترکیب از پارامترهایی که از نظر طراحی معماری و الزامات صوتی رضایت بخش است را انتخاب می کند. الزامات آکوستیک (پیشنهاد شده توسط شرکت ناگاتا آکوستیک) شامل ۳ مورد است:



شکل ۸. نتایج حاصل از روش کوادرات [۱۵]

۴-۴. نتایج پروژه

در طراحی پروژه مجتمع فرهنگی هنری ژاپن با عنوان "طراحی مفهوم سقف تاشو" هر سه شرایط زیر رضایت‌مندانده بود:

۱. کوتاه کردن زمان پردازش برای پیدا کردن تغییرات الگوهای تاشو اریگامی برای برآورده ساختن محدودیت‌های معماری.
۲. پیدا کردن یک فرم هندسی راضی‌کننده نه تنها برای عملکرد صوتی، بلکه برای هدف نهایی طراحان معمار.
۳. کشف هندسه‌های غیرمنتظره‌ای که برای هر دو شرایط _آکوستیک و معماری_ بهینه‌سازی شده و با روش محاسباتی پیشنهادی که حدود دویست هندسه ممکن تولید شده، در میان هندسه‌های نهایی سالن کنسرت از طریق فرایند بهینه‌سازی انتخاب شدند.

الگوی تاشو متشکل از سطوح چند وجهی مقعر است. در نگاه اول، هندسه نهایی به نظر ساده می‌رسد، اما در واقع بسیار پیچیده است. به این معنی که عمق و زاویه تاشو به وضوح کنترل می‌شود تا پارامترهای صوتی را به عنوان یکی از مواد اولیه طراحی و همچنین حس طراح مورد توجه قرار دهد. تکنولوژی محاسباتی نه تنها برای بهبود و یا بهینه‌سازی فرایندهای طراحی مفید است، بلکه فرصتی برای ایجاد خلق فرم‌های جدید معماری با تغییر از فرایند شکل‌گیری به یک فرایند یافتن فرمول ارزشمند است [۱۵].

۵. نمونه‌های کار شده در زمان واقعی

چهار نمونه موردی در بخش بعدی از این مقاله ارائه شده است. تمام موارد ارائه شده توسط شرکت "کهیل آکوستیک" با استفاده از ابزارهای طراحی (در زمان واقعی) طراحی شده است، هر کدام دارای ویژگی‌های خاص خود هستند:

۱. راه‌حل نهایی برای "اپرا ملی ژنو"^{۳۹} در زمان بسیار کوتاه که در آن زمان، بسیاری از تصمیمات طراحی در زمان واقعی گرفته و اجرا شد.

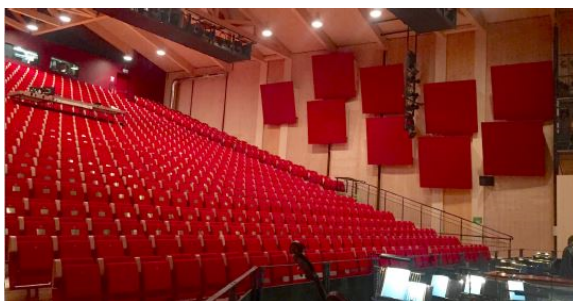
۲. "تالار اپرای فوجو"^{۳۰} با توجه به تعداد زیادی از امکانات صوتی و گزینه‌های طراحی متفاوت، یک چالش جدید را به نمایش گذاشت. برای این پروژه، روش‌های مهندسی معکوس برای شکل دادن به پوسته متوالی کناری سالن استفاده شده است.

۳. بهینه‌سازی صوتی بازتابنده‌های جانبی در "سالن تئاتر کروژو"^{۳۱} هم‌زمان با طراحی معماری این عناصر انجام شد.

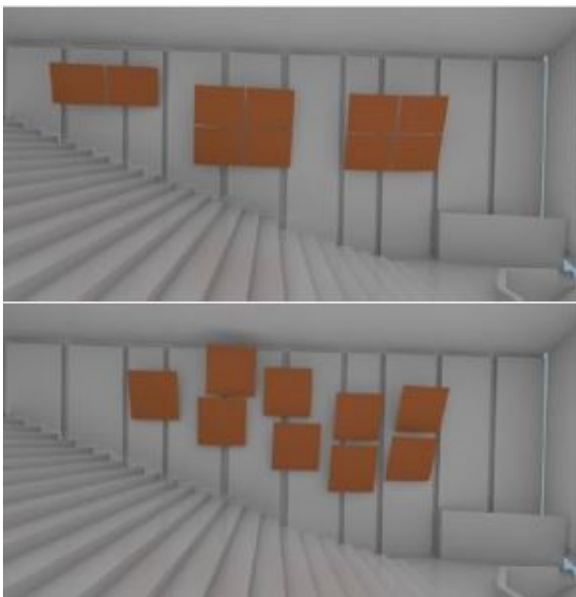
۴. سالن اصلی کنسرت پروژه "انجمن اسپو"^{۳۲} که سطح بالایی از پیچیدگی را به صورت دستی بهینه‌سازی کرد، طراحی و بهینه‌سازی بازتابنده‌های صوتی به صورت پارامتریک انجام شد.

۵-۱. اپرا ملی، ژنو، سوئیس

ال-اپرا در فوریه سال ۲۰۱۶ در شهر ژنو افتتاح شد، این سالن یک اپرا موقت است که به‌طور کامل از چوب ساخته شده است، (طراحی شده توسط معماران سوئدی که با تغییراتی از سالن تئاتر به یک سالن اپرا با افزایش عرض سالن، اضافه کردن یک جایگاه ارکستر، ایجاد یک توزیع‌کننده جدید برای بازتابنده‌های قدیمی سقف و افزایش حجم صوتی برای استفاده از اجراهای اپرا به‌وجود آمد که در شکل ۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۹. سالن جدید اپرا ملی در ژنو [۹].



شکل ۱۰. (بالا): پیشنهاد طرح اول، سه دسته چهارتایی، پانل‌های چهار و دو. (پایین) طرح انتخاب شده، هشت پانل جداگانه که به طور تصادفی توزیع شده‌اند [۹].

پس از انتخاب طرح اولیه، یک استراتژی صوتی تعریف شد. برای نیمه اول مخاطبان سالن، هر شخص باید یک انعکاس از پانل‌ها را با برخی از موقعیت‌های فوق‌العاده در خط مرکزی برای جبران فاصله بیشتر به بازتابنده دریافت کند. نیمه دوم مخاطبان سالن برای جبران کاهش انرژی صوتی انتهای سالن، باید دو برابر پوشش بگیرند. زاویه تند بیشتری برای پانل هشتم جهت ارسال انرژی به طرف مقابل پانل‌های عقب برای گسترش تصویر آکوستیک برای چند ردیف آخر قرار گرفته است. معیارهای انرژی با استفاده از تکنیک منبع تصویر به این ۳ ترتیب تحلیل شد که در شکل ۱۱ آمده است:

۱. هر سطحی که به اندازه کافی بزرگ باشد (به این معنی که در فرکانس‌های متوسط کمک کند) گنجانده شده است.

۲. انحناى سطوح نیز مورد محاسبه قرار گرفت.

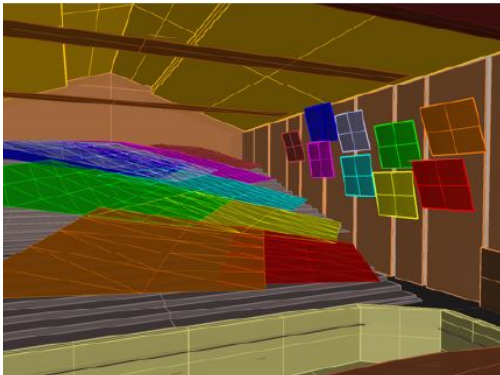
۳. زمان تمام بازتاب‌هایی که بین منبع و گیرنده وجود دارد بر اساس زمان رسیدن، مرتب شده‌اند [۱۱].

یکی از چالش‌های اصلی طراحی مجدد برای این سالن، طراحی یک استراتژی صوتی برای غلبه بر عرض ۲۸ متری این سالن بود.

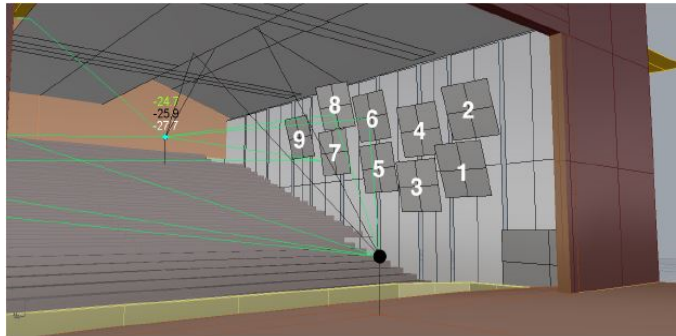
به این صورت که باید در تئاتر قدیمی بازتابنده‌های $2 \times 2/5$ متر و با ضخامت ۲۰ میلی‌متر خم شده را که بر روی سقف کار گذاشته شده بودند به دیوارهای جانبی خالی منتقل کرد. بر اساس این فرض انعکاس‌هایی که از قسمت پایین اتاق می‌آیند، می‌توانند در مقایسه با انعکاس عمودی با افزایش شدت صدا و حضور منبع بهتر، افزایش ارتفاع سقف را برای اپرا بهینه‌تر کند. بنابراین تصمیم گرفتند این ۱۸ بازتابنده را منتقل کنند. در دیوارهای جانبی ۱۲ بازتابنده دیگر بیش از جایگاه ارکستر برای پیش‌بینی پیشرفته کنترل صدا تنظیم شده است. بر اساس این فرضیه که انعکاس‌هایی که از قسمت پایین سالن می‌آیند می‌توانند صدای بلندتری را ایجاد کنند و همچنین باعث حضور بهتر منبع صدا در مقایسه با انعکاس عمودی صدا باشند [۹]. برای این سالن موقت، معمار تصمیم گرفت که عناصر صوتی را به وضوح در معرض دید قرار دهد، در عوض آنکه آنها را بیش از حد با معماری ترکیب کند. نکته قابل توجه این است که برخی از نوازندگان و مخاطبان، حتی قبل از گوش دادن، کارایی "آکوستیکی" سالن را متوجه می‌شدند. طرح‌های متعددی به معماران برای پانل‌ها در دیوارهای جانبی پیشنهاد شده بود. اولین ایده به شکلی بود که پانل‌ها را به سه دسته در هر دیوار جانبی متصل کنند که در شکل ۱۰ بالا، مشاهده می‌شود. اما این راه‌حل به دلیل ترس از این که از نظر تجسمی برای مخاطبان ناراحت‌کننده باشد، که چنین دسته‌هایی از پانل‌های سنگین بالای سرشان در حال حرکت است پذیرفته نشد. گزینه بعدی راه‌حلی بود برای مخفی کردن یک کانال تهویه، با راه‌حل نهایی، تجزیه دسته‌ها و ایجاد یک طرح از پانل‌های فردی. که در شکل ۱۰ پایین قابل مشاهده است.

موقعیت هر پانل در طی یک کارگاه تحقیقاتی توسط معمار مشخص شد. معمار، آزادی عمل برای ایجاد یک طرح بصری جذاب را (درحالی که یک کدنویسی گرس هاپر در حال اجرا در پس زمینه به طور خودکار پانل‌ها را جهت حفظ استراتژی صوتی مورد نظر قرار می‌داد) داشت. تجسمی که ممکن است به صورت ساده‌تر درک شود، به صورتی که اطلاعات بین

بازتابنده‌ها و پوشش بازتابی را نشان می‌دهد. منطقه‌ای که تحت انعکاس قرار گرفته است به همان رنگی است که منعکس کننده مسئول بازتاب آن به همان رنگ است که یک توصیف بسیار بصری از عملکرد هر عنصر صوتی ایجاد می‌کند که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲. صفحه نمایش همراه معمار در طول کارگاه. منطقه تحت پوشش هر بازتابنده همان رنگی است که منعکس شده است [۹].



شکل ۱۱. روش منبع تصویر بین یک منبع و گیرنده، محاسبه شده تا مرتبه سوم. این برآورد انرژی مستقیم (در سفید)، انرژی بسیار زود (۲۰-۰ میلی ثانیه در سیاه) و انرژی اولیه (۱۰۰-۲۰ در سبز) همه بر اساس دسی بل_واحد اندازه گیری صدا _ است [۹].

۲-۵. سالن اپرا فوجو، چین

سالن اپرا فوجو، که در سال ۲۰۱۷ افتتاح شد، بخشی از تئاتر بزرگ فوجی است. سالن با همکاری پسا رک ۳، هلسینکی ۳۴، به عنوان برنده رقابت معماری بین‌المللی در سال ۲۰۱۴ طراحی شده است. خانه اپرا با ۱۶۶۰ صندلی بر اساس سنت (نعل اسب سواری) ایتالیایی، میزبان اپرای غربی کلاسیک و چینی خواهد بود. ویژگی این سالن اپرا یک پوسته پیوسته در اطراف کل جایگاه شنوندگان است. این پوسته جهشی (تغییر مسیر) از دیوارها به سمت جلوی بالکن‌ها و از آنجا به سمت سقف دارد.

همان‌طور که در تصاویر دیده می‌شود، بهینه‌سازی آکوستیک کلاسیک (سنتی) عناصر معماری مجزا برای این سالن امکان‌پذیر نبوده است به این دلیل که عناصر معماری دیگر به عنوان نهادهای مجزا وجود ندارند و در عوض، به صورت

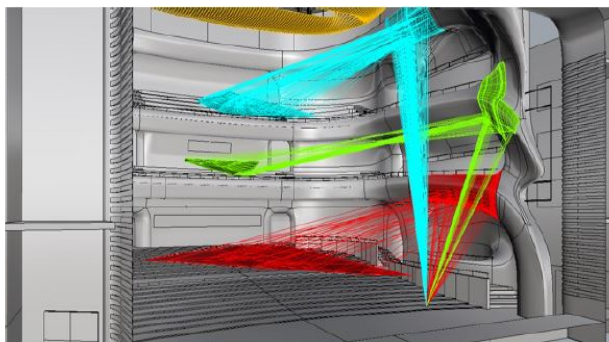
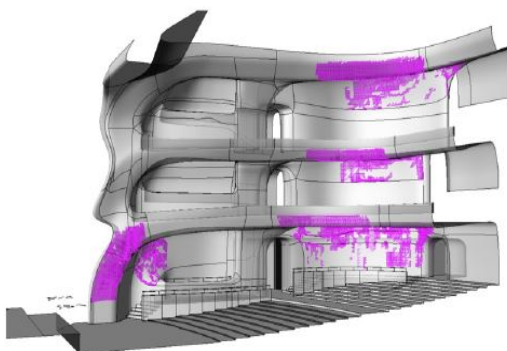
معمارگونه و پارامتریک به یکدیگر مرتبط هستند، به این معنی که هرگونه تغییر در یک عنصر بر سایر عناصر مرتبط تأثیر می‌گذارد. برای مقابله با چالش بهینه‌سازی کل پوسته آتریوم از مهندسی معکوس استفاده شد. تقریباً هر متر مربع از سالن هدف آکوستیکی قرار گرفت که می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان مثال، با ایجاد بازتاب‌های اولیه برای تحریک طنین دیرنگام. هر سطح سالن بسته به هدف صوتی آن قسمت به صورت خودکار تنظیم می‌شود (گاهی اوقات اهداف مختلف به عنوان گزینه‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرند). ترکیبی از جهت‌های مجزا از هر بخش، شکلی کلی برای جایگاه تماشاچیان ایجاد می‌کند که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است [۱].

با ادغام همه‌ی این قسمت‌ها، معماران قادر به ایجاد یک پوسته صاف و مداوم برای این سالن شدند. یک سطح صاف

که جهش (تغییر شکل) دارد، عامل بالقوه از پیش آمدگی‌های پوسته است که می‌تواند عامل تمرکز صدای نامطلوب بر روی حضار باشد.

بنابراین، بعد از آنکه شکل کلی سالن طراحی شد بررسی تمرکز صدا در کل سالن صورت گرفت که در شکل ۱۴ نشان

داده شده است. این تحلیل چندین مورد از تمرکز صدا را نشان داد که با تغییر شکل دقیق پوسته سالن در طی یک کارگاه آنلاین_زمان واقعی_ توسط معماران حل شد [۱۱].



شکل ۱۴. بررسی تمرکز صدا در کل شکل سالن اپرا. در مناطق مشخص شده مشکل ساز که توسط تغییر شکل و یا اضافه کردن شکل‌گیری در مقیاس میکرو حل شده است [۱۱].

شکل ۱۳. استفاده از مهندسی معکوس هنگام شکل دادن به سالن اپرا [۱۱].

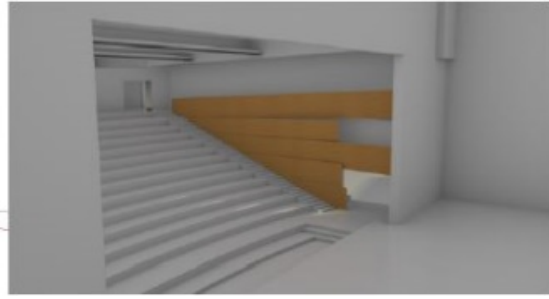
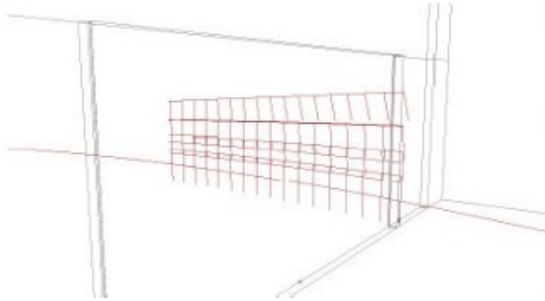
۳. پیش آمدگی و خم شدن مجزا برای هر کدام از پانل‌های بازتابنده.

همان‌طور که از تجربه به‌دست آمده است، برای یک مخاطب که در شیب است، بازتابنده‌های خمیده شده با زاویه عمودی ثابت، پوشش درستی را ایجاد نمی‌کنند. بنابراین در چنین مواردی یک تغییر در پیش آمدگی همراه با زاویه نیاز است. به همین دلیل است که پانل‌های بازتابنده از یک شیب تند غیر عمودی نزدیک جلوی صحنه به پانل‌های تقریباً (شیب ملایم) عمودی در انتهای صحنه تغییر می‌کنند. طراحی پارامتری در پلاگین گرس هاپر اجرا شد، که برای بهینه‌سازی آکوستیک موقعیت و شیب پانل‌های بازتابنده متوالی مورد استفاده قرار گرفت که در شکل ۱۵ قابل مشاهده است.

۳-۵. سالن تئاتر کروژ، ژنو، سوئیس

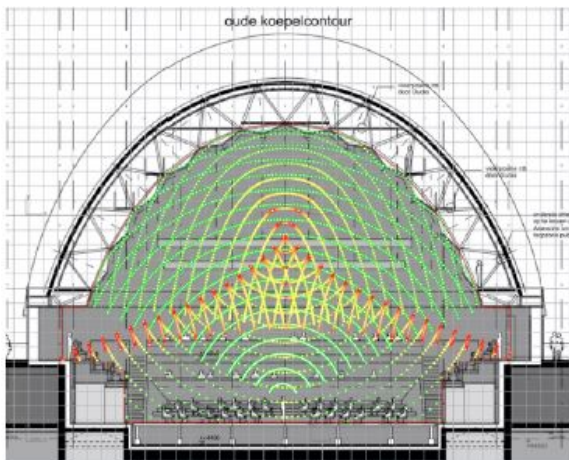
فضای اصلی سالن تئاتر کروژ یک جایگاه منحصر به فرد با یک شیب نسبتاً زیاد با ۴۸۰ صندلی رو به صحنه نمایش است. این سالن توسط (معماران ۱۲ پونت^{۳۵}) طراحی شد. در این سالن، بازتاب‌های اصلی اولیه توسط دیوارهای جانبی فراهم می‌شد. پس از چندین پیشنهاد، گزینه طراحی مورد نظر برای آن دیوارها، یک طراحی پارامتریک بر اساس یک سری از نوارهای چوبی شیب‌دار عمودی، یا "سدهای آکوستیکی"^{۳۶} بود. سه پارامتر اصلی برای این پانل‌های متوالی عبارت بودند از:

۱. انحنا در طرح.
۲. کاهش ارتفاع بسته به اینکه تا چه حد پانل‌ها دور از سالن و نزدیک به حضار است.



شکل ۱۵. طراحی پارامتریک دیوار جانبی (چپ): ساختار پارامتری چوب توسط چوب‌های شعاعی. (راست): ارائه دیوار جانبی بهینه شده [۱۱].

با این حال، نکته قابل توجه این سالن کنسرت این است که طراحی با استفاده از الگوریتم بصری گرس هاپر نهایی و بهینه‌سازی شد. ویژگی اصلی معماری این سالن گنبد بزرگ آن یعنی "گنبد کاپولا"^{۴۱} بود. هدف طراحی در این سالن ضرورت اجتناب از اثرات تمرکز و میدان صوتی همگن (از لحاظ آکوستیکی) بود. در حالی که بهینه‌سازی بازتاب‌های اولیه و استفاده از زبان معماری عناصر تزئینی روکش‌دار فلزی در مقابل دیوارهای جانبی منحنی بزرگ قرار دارند. سطح پایین‌تر از عناصر روکش شده باید به عنوان بالکن مخاطبان مورد استفاده قرار گیرد که در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۷. تجزیه و تحلیل هندسی دو بعدی از تمرکز صدا ایجاد شده توسط کاپولا (کوپلزال) این تحلیل عناصر روکش‌دار فلزی را در نظر نمی‌گیرد [۱].

پیش آمدگی تدریجی یک سطح از عمودی به افقی مورد بررسی قرار گرفت تا اطمینان حاصل شود که هیچ تأثیر زیان‌بار تمرکز صوت بر حضار ایجاد نمی‌شود. نواحی مستعد پژواک برای هر پانل بسته به زمان ورود (صدا) مشخص شد تا یک صدای واضح و قابل تشخیص خوب برای تئاتر ایجاد شود. انرژی و تعداد بازتاب‌های جانبی به اندازه کافی پایین است تا یک منبع خوب که تمرکز صدا در آنجا واقع شده است را حفظ کند [۱].

۵-۴. انجمن اسپینو، لاهه، هلند

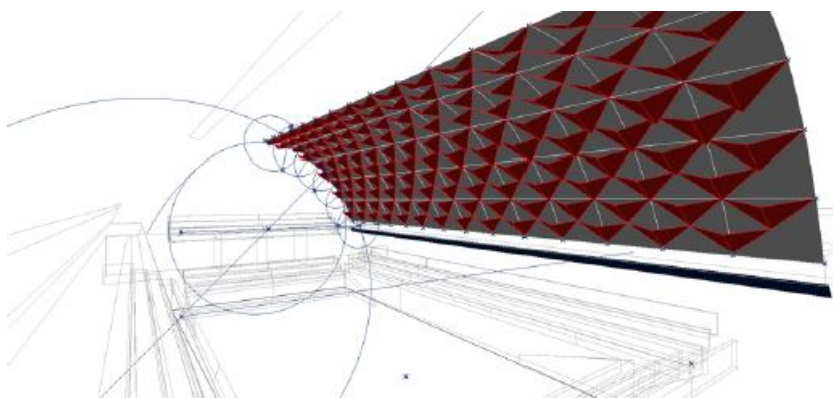
سالن کنسرت ۱۵۰۰ صندلی طراحی شده توسط (معماران نیو تلینگز-ریدجیک^{۳۷})، خانه‌ای برای تئاتر رقص‌های ندرلنز^{۳۸}، ارکستر رزیدنت^{۳۹} (ارکستر مسکونی) و کنسرواتور کینکلجیک^{۴۰} (کنسرواتوار سلطنتی) با استودیو و کلاس‌های آموزشی است [۱۷]. این پروژه (طبقه بالای پروژه انجمن اسپینو) در مرحله طراحی به علت جایگزینی با یک پروژه که هم اکنون در حال توسعه است، متوقف شد را می‌توان در شکل ۱۶ مشاهده کرد.



شکل ۱۶. (چپ): ارائه مدل نرم افزاری انجمن اسپینو. سالن کوپلزال در بالای ساختمان قرار دارد. (راست): ارائه سالن کنسرت [۱].

عناصر روکش دار نه تنها برای شکستن تمرکز صدا استفاده می‌شود، بلکه برای ایجاد بازتاب‌های اولیه در مرتبه اول و دوم به مخاطبان نیز استفاده می‌شود. از آنجایی که فرایند دستیابی به ابعاد و جهت‌گیری درست برای هر عنصر روکش دار در بالکن، بسیار زمان‌بر بوده است، مدل پارامتریک کل گنبد (کاپولا) در الگوریتم بصری گرس هاپر ساخته شده است.

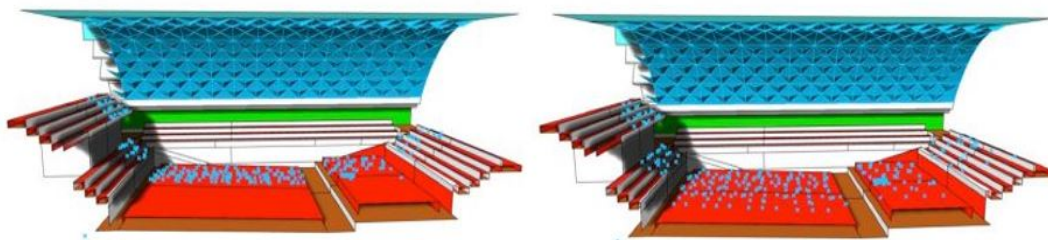
طراحی پارامتریک با اصول هندسی کاپولا در برشی کوتاه آغاز شده است. در این برش کوتاه کاپولا برای شکل دادن به پوسته بیرونی سالن به صورت نمایان ارتفاع داده شده و این پوسته روکش دار فلزی طراحی شده است. عناصر دیگر، تعداد ردیف‌ها و ستون‌ها، ارتفاع و نوع روکش‌ها به عنوان دیگر گزینه‌های پارامتریک هستند که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۸. طراحی پارامترهای عناصر روکش دار فلزی [۱]

با این مجموعه از عناصر فردی، ایجاد یک پوشش صوتی همگن از پارکر - جایگاه اصلی در سالن‌های موسیقی و تئاتر که در پشت ارکستر و یا بازیگران قرار دارد ^{۴۲} - چالش برانگیز بود. هر عنصر روکش دار می‌تواند تنها بازتاب‌های صوتی را به یک منطقه محدود از مخاطبان ایجاد کند. منطقه تحت

پوشش دو عنصر متوالی پیوسته نبود، بنابراین لازم بود که عناصر را از ترکیب چندین ردیف ایجاد کنند. پارامترهای مورد استفاده برای این بهینه‌سازی ارتفاع و شیب رو به پایین از هر عنصر روکش دار بود که در شکل ۱۹ قابل مشاهده است.



شکل ۱۹. بهینه‌سازی سه بعدی عناصر روکش دار فلزی در سطوح قرمز رنگ مخاطبان و نقاط آبی، اثرات تشعشعات آکوستیک بر مخاطب است. (چپ): پوشش صوتی غیرمتضاد قبل از بهینه‌سازی. (راست): پوشش آکوستیک همگن، پس از بهینه‌سازی [۱].

بهینه‌سازی آکوستیک بیشتر در سالن انجام شد. برای مثال؛ جلو بردن بالکن‌های افقی شیبدار و دیوارهای زاویه‌دار صحنه توسط آکوستیک‌های CATT_ نرم‌افزار مشاوره آکوستیک اتاق و واقعیت مجازی صوتی^{۳۳} _ به عنوان یک اعتبار کلی از مجموعه بهینه‌سازی‌های صوتی استفاده شد [۱].

۶. نتیجه‌گیری

ترکیب آکوستیک در نرم‌افزار معماری راه جدیدی برای مشاوران آکوستیک برای پیشروی بسیار فراتر از یک تحلیل در طرح‌های آنها است. این مشاوره صوتی با «صحبت کردن بسیار مشابه به زبان معماران» می‌تواند به یک موقعیت خلاقانه‌تر و فعال‌تر در مورد فرایند طراحی بیانجامد. برای انجام این کار، مشاور صوتی می‌تواند و باید ابزار طراحی و تحلیل خاصی را برای مواجهه و غلبه بر مشکلات خاص هر پروژه ایجاد کند علاوه بر این، "فضای راه حل" برای هر مشکلی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد، یا به‌طور خاص برای هر پروژه و یا به‌طور کلی برای اضافه کردن راه حل‌های جدید با استفاده از زبان‌های معماری مختلف باشد. به گونه‌ای می‌توان گفت این ارتباط تعاملی ما را قادر می‌سازد بهترین ترکیب از پارامترهای مورد نیاز برای طراحی معماری و الزامات صوتی را در میان انواع مختلف ممکن انتخاب کنیم. طراحی پارامتریک اغلب برای کشف هندسه‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما در این روش (برای مثال طراحی پروژه ژاپن) برای ترویج تعاملات پیچیده دو حوزه (معماری و آکوستیک) استفاده می‌شود.

فرایند شکل‌گیری محاسباتی به ما امکان می‌دهد که پارامترهای صوتی را به عنوان یکی از مواد طراحی اولیه و همچنین حس طراح مورد توجه قرار دهیم. تکنولوژی محاسباتی نه تنها برای بهبود و یا بهینه‌سازی فرایندهای طراحی مفید است، بلکه برای ایجاد فرصت‌های جدید از فرم معماری با تغییر از فرایند شکل‌گیری به فرایند یافتن فرمول ارزشمند است.

در نمونه‌های بررسی شده در زمان واقعی دیده شد چطور طراحی پارامتریک، فرایند طراحی بر مبنای اندیشه الگوریتمی است که رابطه بین هدف طراحی و پاسخ طراحی را تعریف می‌کند. فرایندهای طراحی سنتی همواره از نوع خطی بوده‌اند که در آن توصیف رابطه بین متغیرهای چندگانه توسط تابع خطی ساده در ریاضی بررسی می‌شود و در نقطه متقابل آن‌ها فرایندهای غیرخطی مانند طراحی پارامتریک قرار دارند که شامل فرایند طراحی خطی می‌باشند که با تغییر هر یک از پارامترهای مؤثر بر طرح، سایر پارامترها به صورت پی در پی و در نتیجه آن محصول طراحی تغییر می‌کند. یک فرایند شکل‌گیری به این شرح بوده است: "معماران و طراحان معتقد بودند که فرایند ذهنی طراحی درک شده، پیش‌بینی شده و کاملاً در ذهن انسانی پردازش شده و رایانه صرفاً یک ابزار برای سازماندهی، بهره‌وری یا ارائه است." می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که اغلب استفاده از ابزارهای موجود است که منجر به راه‌حل‌های فعلی و تکراری می‌شود. بنابراین با ایجاد ابزارهای جدید و تفکری نو می‌توان به روش‌های متنوع و راه‌حل‌های جدید خلاقانه‌تر دست یافت.

- [1] H. Reza Hajibagheri, A. Heidari, and R. Amini, "An experimental investigation of the nature of longitudinal cracks in oil and gas transmission pipelines," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 741, 2018, pp.1121-1129.
- [2] "API 5L, Specification for Line Pipe," in *Edition FORTY-FOURTH EDITION*, ed. API Standard: American Petroleum Institute, 2008.
- [3] Liu, Z. Y., X. G. Li, C. W. Du, and Y. F. Cheng, "Local additional potential model for effect of strain rate on SCC of pipeline steel in an acidic soil solution." *Corrosion science*, Vol.51, No.12, 2009, pp.2863-2871.
- [4] Mostafapour, A., and S. Davoudi., "Analysis of leakage in high pressure pipe using acoustic emission method." *Applied Acoustics* Vol.74, No.3, 2013, pp.335-342.
- [5] Xu, Changhang, Piao Gong, Jing Xie, Huandi Shi, Guoming Chen, and Gangbing Song, "An acoustic emission based multi-level approach to buried gas pipeline leakage localization." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.44, 2016, pp.397-404.
- [6] Murvay, Pal-Stefan, and Ioan Silea., "A survey on gas leak detection and localization techniques." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.25, No.6, 2012, pp.966-973.
- [7] Lay-Ekuakille, Aimé, Giuseppe Vendramin, and Amerigo Trotta., "Spectral analysis of leak detection in a zigzag pipeline: A filter diagonalization method-based algorithm application." *Measurement*, Vol.42, No.3, 2009, pp. 358-367.
- [8] Buerck, J., S. Roth, K. Kraemer, and H. Mathieu., "OTDR fiber-optical chemical sensor system for detection and location of hydrocarbon leakage." *Journal of hazardous materials*, Vol.102, No.1, 2003, pp.13-28.
- [9] "ASTM E1211 / E1211M – 17, Standard Practice for Leak Detection and Location Using Surface-Mounted Acoustic Emission Sensors", *American Society for Testing and Materials*, 2017.
- [10] "ASME Section V, Article 10, Leak testing, Appendix X, Ultrasonic leak detector test," *American Society of Mechanical Engineers*.
- [11] Miller, Ronnie K., Adrian A. Pollock, Peter Finkel, Daniel J. Watts, John M. Carlyle, Anthony N. Tafuri, and J. J. Yezzi, "The development of acoustic emission for leak detection and location in liquid-filled, buried pipelines." *Acoustic Emission: Standards and Technology Update*. ASTM International, 1999.
- [12] J. Spanner, "Advances in acoustic emission," *Dunhart, USA*, p.1, 1981.
- [13] Anastasopoulos, Athanasios, Dimitrios Kourousis, and Konstantinos Bollas., "ACOUSTIC EMISSION LEAK DETECTION OF LIQUID FILLED BURIED PIPELINE." *Journal of Acoustic Emission*, vol.27, 2009.
- [14] Thompson, G., and G. Zolkiewski., "An experimental investigation into the detection of internal leakage of gases through valves by vibration analysis." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol.211 No.3, 1997, pp.195-207.
- [15] Pollock, Adrian A., and Calvin E. Pepper., "Quantitative Analysis of Acoustic Emission from Gas Leaks in a Model Piping System." *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Springer, Boston, MA, 1999, pp. 427-434.
- [16] Kovacevich, James J., Michael O. Robertson, Darryl P. Sanders, and Steven P. Nuspl., "Recent advances in the application of acoustic leak detection to process recovery boilers." *Tappi journal*, 1996.
- [17] Le Floc'h, C., "Acoustic emission monitoring of composite high-pressure fluid storage tanks." *NDT international*, Vol.19, No.4, 1986, pp.259-262.

- [18] Park, Sungho, Seokgoo Kim, and Joo-Ho Choi., "Gear fault diagnosis using transmission error and ensemble empirical mode decomposition." *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.108, 2018, pp.262-275.
- [19] Toutountzakis, Tim, Chee Keong Tan, and David Mba., "Application of acoustic emission to seeded gear fault detection." *NDT & E International*, Vol.38, No.1, 2005, pp.27-36.
- [20] Caesarendra, Wahyu, Buyung Kosasih, Anh Kiet Tieu, Hongtao Zhu, Craig AS Moodie, and Qiang Zhu., "Acoustic emission-based condition monitoring methods: Review and application for low speed slew bearing." *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.72, 2016, pp.134-159.
- [21] Ni, Qing-Qing, and Masaharu Iwamoto., "Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites." *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.69, No.6, 2002, pp.717-728.
- [22] Droubi Mohamad G, Faisal Nadimul H, Orr Fraser, "Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints." *Journal of constructional steel research*, Vol.134, 2017, pp.28-37.
- [23] Cao, Menglong, and Libin Huo., "Natural gas pipeline valve leakage rate estimation via factor and cluster analysis of acoustic emissions." *Measurement*, Vol.125, 2018, pp.48-55.
- [24] Husin, S., A. Addali, and D. Mba., "Sensitivity of acoustic emission (AE) technology in monitoring oxide formation on an aluminium surface." *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol.53, No.12, 2011, pp.677-681.
- [25] Kourousis, Dimitrios, Konstantinos Bollas, Athanasios Anastasopoulos, ENVIROCOUSTICS ABEE, and G. R. E. E. C. E. Athens., "Acoustic Emission Leak Detection of Buried Oil Pipelines, River and Road Crossings." *Envirocoustics ABEE*, 2010.
- [26] Inaba, Hidehiro. "AE Sensor (AE Transducer)," *Practical Acoustic Emission Testing*. Springer, Tokyo, 2016, pp.35-43.
- [27] "ASTM E650-97 Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors," *American Society for Testing and Materials*, 2007.
- [28] Bouchard, P. J., "Validated residual stress profiles for fracture assessments of stainless steel pipe girth welds." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.84, No.4, 2007, pp.195-222.
- [29] Kim, C. D., "Hydrogen-damage failures." *ASM Handbook*, Vol.11, 1986, pp. 245-251.

1. Three Dimensional (3D)
2. Real Time
3. Kahle Acoustic
4. Computer-aided Design (CAD)
5. Finite-Difference Time-Domain (FDTD)
6. Rhinoceros
7. Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS)
8. Script
9. Grasshopper
10. Evolutionary Algorithms (AE)
11. Reverse Engineering
12. Bassuet
13. Bonning
14. Initial Time Delay Gap (ITDG)
15. Offline
16. Jurkiewicz
17. Defined to Assess the Energy of Reflections between 20-100 ms (STI /STearly)
18. Rindel
19. Wulfrank
20. Fresnel-Zone

-
21. Skalevik
 22. SUEP
 23. Nagata Acoustics
 24. The parametric origami program
 25. Acoustic simulation program
 26. Optimization Program
 27. Quadrat count method
 28. Poisson
 29. L'Opéra des Nations
 30. Fuzhou Opera Hall
 31. Théâtre de Carouge
 32. Spuiforum project
 33. PESark
 34. Helsinki
 35. Pont 12 Architects
 36. Acoustiques Bandes
 37. Neutelings Riedjik Architecten
 38. Nederlands Dans Theater
 39. Residentie Orkest
 40. Koninklijk Conservatorium
 41. Cupola dome
 42. Parterre
 43. (Software for Room acoustic consulting and audio virtual reality) CATT