صفحات ۵۹ - ۷۰ (علمی-پژوهشی)
نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی ● دوره ۲۶ ● شماره ۳ ● پاییز ۱۴۰۰

طراحی پنل‌های صوتی در جداره‌های فضای داخلی ساختمان با الگوبرداری از سازوکار سرخس‌ها*

ستاره باباخانی‌فرد[۱]، مهدیه آبروش[۲]، مصطفی قلی‌پور گشنیانی[۳]، آرمان محمودی اطاقوری[۴]**

[۱]کارشناس ارشد معماری بیونیک، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.
[۲]استادیار گروه معماری، دانشکده معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
[۳]استادیار گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.
[۴]دانشیار گروه علوم گیاهی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. .

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۳، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۴/۰۱)

چکیده

امروزه با استفاده از مواد مصنوع، سعی در بهبود عملکرد صوتی ساختمان‌ها شده است تا آسایش ساکنین فراهم شود. هدف از پژوهش حاضر، بررسی ویژگی آکوستیکی گیاهان و الگوبرداری از سرخس‌ها به‌منظور جذب و اُفت صوتی جداره‌های داخلی است. این پژوهش دارای رویکرد کمی است و راهبرد پژوهشی در آن آزمایشگاهی می‌باشد. با توجه به روش مسأله محور در فرآیند طراحی بیونیکی، پژوهش مبتنی بر شش گام عملیاتی گردید. با تعریف صورت‌مسأله و تجزیه‌وتحلیل آن، امکان تطبیق‌پذیری اصول آکوستیکی با بافت گیاهی سنجیده و گونه‌ی گیاهی مناسب مشخص شد. سپس، به‌صورت انتزاعی امکان تطبیق‌پذیری سنجیده و اصول استخراج‌شده وارد مهندسی شد. در نهایت، براساس پارامترهای به‌دست‌آمده از گونه گیاهی انتخابی پنل‌هایی ساخته شد که این پنل‌ها توسط نرم‌افزار Cool Edit و لوله امپدانس[۱] صوتی مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که سرخس غیربومی فوجر[۲] گیاهی تأثیرگذار در جذب و اُفت صوت است و گونه‌های غیربومی ایران عملکرد صوتی بهتری دارند. پنل دوجداره در فرکانس‌های ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ هرتز، اولویت اول را دارد و پس‌ازآن پنل به همراه لایه‌ی گیاهی قرار دارد. هم‌چنین میزان اُفت صوتی پنل تک‌جداره با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد و حداکثر میزان آن در بازه فرکانس ۳۶ تا ۱۶۰۰ هرتز به ۱۸/۲۹ دسی‌بل می‌رسد.

واژه‌های کلیدی
جداره داخلی، آکوستیک، اُفت صوتی، گیاهان، سرخس، فضای داخلی.

*مقاله حاضر برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده اول، با عنوان «الگوبرداری از مکانیسم سرخس‌ها در طراحی جداره‌های آکوستیک در فضای داخلی (طراحی آپارتمان مسکونی در تهران)» که با راهنمایی نگارنده دوم و مشاوره نگارندگان سوم و چهارم، در دانشکده هنر و معماری دانشگاه مازندران ارائه شده است.

**مسئول:تلفن: ۰۹۱۲۲۰۳۳۳۴۱، نمابر: ۶۶۹۷۲۰۸۳-۰۲۱، E-mail: abravesh@ut.ac.ir.

مقدمه

طراحی، ساخت و نگهداری ساختمان می‌تواند تأثیرات مخربی بر روی محیط‌زیست بگذارد، بنابراین اتخاذ تصمیم آگاهانه برای گزینش راه‌حل‌های پایدار ضروری است. دیوار سبز به‌عنوان یکی از راه‌حل پیشنهادی معاصر در جهت تحقق معماری پایدار و همساز با طبیعت، رویکردی واجد ارزش است. به‌کارگیری پوشش‌های سبز عمودی در ساختمان ایده جدیدی نیست و با در نظر گرفتن رابطه بین فواید محیط زیستی، فواید اقتصادی نظیر صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای ساختمان و ویژگی‌های سیستم‌های سبز عمودی، می‌تواند دیدگاهی پایدار برای معماری ساختمان‌های موجود یا نوساز باشد (کلیائی و دیگران، ۱۳۹۴).

تاریخچه شروع استفاده از دیوارهای سبز مدرن به استنلی هارت وایت در سال ۱۹۸۴ مربوط می‌شود. در گذشته، راه‌حل پیشنهادی برای دیوارهای سبز، یک راه‌حل زینتی برای معماران بوده است. برخلاف بام‌های سبز که تأثیرات مثبت محیطی و بهداشتی آن در نیمه اول قرن بیستم توسط معماران مشهور همچون آلوار آلتو، فرانک لوید رایت و لوکوربوزیه مورد تأکید قرارگرفته بود. پس‌ازآن، انقلاب دیوارهای سبز به لطف ایده‌های گیاه‌شناس فرانسوی پاتریک بلانک که ساختارهای سبک و مدولار قابل انطباق با نما را ایجاد کرد، به وقوع پیوست. سقف‌های سبز در دهه‌های گذشته به‌طور گسترده مورد بررسی قرارگرفته است، پژوهش‌ها نشان می‌دهد که جداره‌ها می‌توانند در کاهش اثر جزیره گرمایی، بهبود کیفیت هوا و محافظت بیشتر از ساختمان‌ها از شار گرما و امواج الکترومغناطیسی و عملکرد صوتی بسیار مؤثرباشند. در سال‌های گذشته، محققان توجه خود را به دیوارهای سبز معطوف کرده‌اند. این سیستم‌ها به دلیل اثرات زیبایی‌شناختی و پایداری، می‌توانند جایگزین جاذب‌های صوتی ساخته‌شده توسط انسان باشند (Asdrubali et al., 2014). تفاوت اساسی بین دیوارهای سبز داخلی و خارجی، در انتخاب نوع گونه‌های گیاهی است. گیاهانی می‌توانند در دیوارهای داخلی به کار روند که قادر به بقا در شرایط اقلیمی داخل ساختمان همچون: توانایی رشد در شرایط دما و رطوبت متداول برای فضاهای داخلی (دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد) و توانایی رشد ریشه در محور افقی و زندگی بدون نور مستقیم خورشید، باشند. دیوار عمودی سبز یک سیستم پرهزینه است و هزینه تعمیر و نگهداری آن نیز بالاست؛ با این‌حال، مزایای متعددی در کنار رفتار صوتی، مانند ارزش زیبایی‌شناختی، بهبود کیفیت هوا و اثرات روان‌پزشکی دارد (Alessandro et al., 2015). در این پژوهش به دلیل هزینه بالای نگهداری گیاهان در دیوار سبز، یک نمونه‌ی مصنوعی با الهام از گیاهان ساخته شده است، به عبارت دیگر، می‌توان با الگوبرداری از ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاهان و جذب صوت و اُفت صوتی آن‌ها، پنل‌های آکوستیکی‌ای را طراحی کرد که سازگاری بیشتری با محیط‌زیست داشته باشند و عملکرد صوتی بهتری را از خود نشان دهند.

روش پژوهش

پژوهش حاضر دارای رویکرد کمی است، راهبرد پژوهشی در آن آزمایشی می‌باشد و با توجه به رویکرد مسأله محور در فرآیند طراحی بیونیکی در شش گام انجام‌گرفته است. در مرحله اول صورت مسأله تعریف شد و در مرحله بعد مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. در مرحله سوم با توجه به مطالعات انجام‌شده در مورد مکانیسم بافت گیاهان، مشخص شد که گیاهان دارای قابلیت جذب و اُفت صوت می‌باشند و سپس گونه‌ی گیاهی مشخص شد. در مرحله چهارم به‌صورت انتزاعی امکان تطبیق‌پذیری اصول آکوستیک با بافت گیاهی سنجیده شد. در مرحله‌ی بعد اصول استخراج شده وارد مهندسی شد و در نهایت با روش محاسباتی و آزمایشگاهی با استفاده از ترازو، کولیس، نرم‌افزار اتوکد و فتوشاپ پارامترهای مؤثردر آن مورد بررسی قرار گرفتند، به‌طوری‌که از برگ موردنظر عکس گرفته شد و با انتقال به نرم‌افزار فتوشاپ و شمارش تعداد پیکسل‌های موردنظر و با توجه ابعاد هر پیکسل مساحت برگ محاسبه شد. زاویه غالب جهت‌گیری با استفاده از نرم‌افزار اتوکد و با انتقال عکس گیاه به نرم‌افزار و رسم زاویه‌ی هر برگ نسبت به خط عمود محاسبه شد سپس با الگوبرداری از ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاهان و خاصیت صوتی آن‌ها، پنل‌های آکوستیکی‌ای طراحی گردید که کارایی صوتی بهتری را از خود نشان دهند. بدین منظور با الهام از گیاهان و با استفاده از ساقه‌ی برنج و هم‌چنین خرده چوب صنوبر و گچ، جداره‌ای ساخته شد. سپس، پنل دیگری به این جداره متصل شد که با تحرک و انعطاف‌پذیری خود میزان کارایی صوتی را افزایش دهد؛ و در انتها، جهت ارزیابی آن، پنل موردنظر مورد آزمایش قرارگرفته و با استفاده از نرم‌افزار *Cool Edit* و استفاده از لوله امپدانس صوتی به‌عنوان نمونه، میزان تأثیر در اُفت صوتی جداره موردبررسی قرار گرفت.

پیشینه پژوهش

در جدول (۱) به‌طور خلاصه به مطالعات انجام‌شده در مورد جذب و اُفت صوت در گیاهان پرداخته شده است.

جدول ۱- پیشینه پژوهش. مأخذ: (باباخانی و دیگران، ۱۳۹۹)

نام پژوهشگر	سال	عنوان پژوهش و نتایج
ایلر	۱۹۷۰	مطالعه بر روی کمربند درختی. نتایج: افزایش تضعیف صدا در فرکانس‌های بالا توسط چگالی سطح برگ، غالب‌بودن اثر زمین در محدوده فرکانس ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز.
مارتنز	۱۹۸۱	ارتعاش برگ‌ها هنگام برخورد صوت. نتایج: توانایی برگ‌ها در تبدیل انرژی صوتی به حرارت توسط ارتعاش
سیمونوا و همکاران	۲۰۱۰	آزمایش بر روی بوته‌های همیشه‌سبز و با ارتفاع کم. نتایج: جذب صوت در فرکانس‌های زیر ۵۰۰ هرتز توسط خاک و جذب صوت در فرکانس‌های ۵۰۰ تا ۱۶۰۰ هرتز ناشی از پوشش گیاهی، تأثیرگذاری پارامترهای مورفولوژیکی مانند ضخامت برگ، چگالی برگ، مساحت برگ، تعداد برگ‌ها، بر ضریب جذب صوتی.

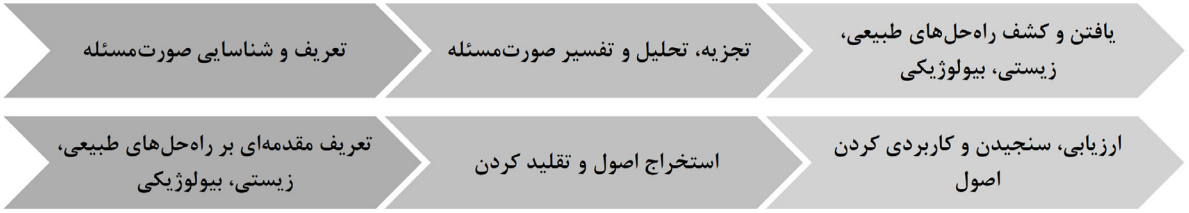
وانگ و همکاران	۲۰۱۰	آزمایش بر روی سرخس‌ها و تائید نتایج سیمونوا.
بانکیرا	۲۰۱۱	نتایج: خاک عامل اصلی جذب صوت.
هوروشنکو و همکاران	۲۰۱۲	بررسی خاک و گیاه سرخس، اشک بچه، پیچک و ...، پوشش گیاهی به‌عنوان جاذب صوت در فضای داخلی، پارامترهای مؤثر: مساحت برگ، تعداد برگ‌ها.
دینگ و همکاران	۲۰۱۳	عدم تأثیر برگ در فرکانس زیر ۲۵۰ هرتز، افزایش جذب صوت در ۵۰۰ تا بالای ۲۰۰۰ هرتز.
هوروشنکو و همکاران	۲۰۱۳	نتایج: عوامل مؤثردر جذب صوت: مساحت یک برگ، تعداد برگ‌ها، ارتفاع گیاه، زاویه غالب جهت‌گیری برگ‌ها، حجم معادل اشغال‌شده و چگالی سطح برگ.
اسدروبالی و همکاران	۲۰۱۴	بررسی خاک و گیاه سرخس، اشک بچه، پیچک و ...، پوشش گیاهی به‌عنوان جاذب صوت در فضای داخلی در محدوده فرکانس ۵۰ تا ۱۶۰۰ هرتز. نتایج: عدم تأثیر گیاهان در محدوده زیر ۲۵۰ هرتز و تأثیر آن‌ها در محدوده‌ی بالای ۵۰۰ هرتز، افزایش میزان جذب صوت خاک تا ۲۵٪ توسط سرخس‌ها
الساندرو و همکاران	۲۰۱۵	مدل‌سازی پوشش گیاهی در یک رستوران به‌عنوان جایگزینی برای آکوستیک‌های ساخته‌ی دست بشر، با خاک دارای ۳۰٪ پرلیت و ۷۰٪ الیاف نارگیل. سه مکانیسم اصلی در کاهش انتشار امواج صوتی: اثر زمین (ناشی از تداخل مخرب امواج ناشی از خاک، در فرکانس‌های پایین‌تر از ۵۰۰ هرتز)، انعکاس و پراکندگی برگ‌ها در فرکانس‌های بالا و متوسط، جذب صوت توسط شاخ و برگ. نتایج: نقش غالب خاک در جذب صوت به میزان ۸۰ درصد، بیشترین میزان جذب صوت مربوط به سرخس‌ها (۹۸ درصد به همراه خاک).
آزکورا و همکاران	۲۰۱۵	آزمایش میزان اُفت صوتی بر روی یک دیوار سبز. نتایج: میزان اُفت صوتی به‌طور میانگین ۱۵ دسی‌بل، پیشنهاد افزایش میزان اُفت صوتی با پر کردن حفره‌ها و عایق‌بندی بیشتر.

واژه‌ی «بیونیک»[۳] از ترکیب دو واژه «بیولوژی»[۴] و «فناوری»[۵] تشکیل‌شده است. علم بیونیک، علمی میان‌رشته‌ای میان علوم مواد، زیست‌شناسی و مهندسی است که در آن درس‌های آموخته‌شده از طبیعت، پایه و اساس علم مهندسی می‌شود. (قارونی، ۱۳۹۴). در فرآیند طراحی بیونیکی می‌توان سه روش مختلف (روش بالا به پایین، روش پایین به بالا و روش بالا به پایین توسعه یافته) و در واقع دو روش اساساً متفاوت را با توجه به توالی فرآیند آن‌ها مطرح کرد. در فرآیند پایین به بالا یا راه‌حل محور، تحقیقات بنیادی توسط زیست شناسان صورت می‌گیرد؛ یعنی در ابتدا ساختار زیستی بررسی می‌شود و سپس این موضوع مطرح می‌شود که در زندگی انسان‌ها چه کاربردی خواهد داشت. معمولاً بین شناسایی عملکرد یا ساختار بیولوژیکی برای ساخت یک محصول سه تا هفت سال طول می‌کشد. در فرآیند بالا به پایین یا مسأله محور، یک مهندس در می‌یابد که آیا طبیعت ممکن است برای حل مشکلات فنی در موضوعی خاص پیشنهاداتی داشته باشد یا خیر؛ بنابراین او با یک زیست‌شناس ارتباط برقرار می‌کند. نیاز به زمان در یک فرآیند بالا به پایین معمولاً از شش تا هجده ماه متغیر است. فرآیند توسعه‌یافته‌ی از بالا به پایین با چندین تکرار در چرخه‌های تحقیقاتی پس از اولین فرآیند مشخص می‌شود. گاهی اوقات پس از اولین چرخه، نتایج مناسب یافت می‌شود. بااین‌حال، ازآنجایی‌که زیست‌شناسی ممکن است راه‌حل بهتری را داشته باشد تحقیقات بنیادی بیشتری مورد نیاز است. معمولاً نیاز به زمان در این فرآیند بین یک تا پنج سال متغیر است (Speck et al., 2008). در این پژوهش الهام‌گیری از طبیعت با بررسی مکانیسم بافت گیاهان و با استفاده از روش مسأله‌محور محقق شده است؛ زیرا در ابتدا مسأله‌ی آلودگی صوتی مورد توجه واقع شده است و سپس جست‌وجو در طبیعت با هدف ارائه راه‌حلی برای آن صورت گرفته است.

مبانی نظری پژوهش

۱. مراحل طراحی پنل آکوستیکی بر اساس روش مسأله‌محور در معماری بیونیک

این پژوهش در نظر دارد تا با الگوبرداری و الهام از گیاهان، از آن‌ها در جداره‌های داخلی ساختمان به‌عنوان جاذب و کاهنده‌ی آلودگی‌های صوتی استفاده کند. در همین راستا به‌منظور دستیابی به راه‌حل‌های پایدار و هماهنگ با محیط‌زیست، الهام از طبیعت امری منطقی و ضروری است؛ پس از مطالعات و بررسی، شش مرحله پیشنهادی (تصویر ۱) برای طراحی معماری بیونیک با رویکرد مسأله محور ذکر می‌گردد و بر اساس فرآیند پیشنهادشده، مراحل طراحی پنل آکوستیکی موردبررسی قرار می‌گیرد. رویکرد مسأله‌محور دارای شش گام می‌باشد که شامل: تعریف صورت مسأله، تحلیل صورت مسأله با توجه به راه‌حل‌های زیستی، جست‌وجو و یافتن راه‌حل‌های زیستی، ایجاد راه‌حل‌های انتزاعی، استخراج اصول و انتقال راه‌حل‌ها به مهندسی و در نهایت ارزیابی و تکرار اصول یافت شده است (Cohen et al., 2016). در برخی از پژوهش‌ها رویکرد مسأله‌محور در چهار گام تشریح شده است که در این مقاله به دلیل بررسی دقیق‌تر و جزئی‌تر از منابع شش مرحله‌ای استفاده شده



تصویر ۱- فرآیند طراحی در روش مسأله‌محور.

است.

۱- ۱. مرحله اول: تعریف و شناسایی صورت‌مسأله

این مرحله مهم‌ترین قسمت از مراحل طراحی معماری بیونیک است و از سه قسمت فرض سؤال، تجزیه عملکرد و بهینه‌سازی عملکرد تشکیل‌شده است. طراح با نگاه عمیق به مفروضات و تفسیرهای ممکن صورت‌مسأله را تعریف می‌کند (قارونی، ۱۳۹۴). در حال حاضر شکل‌گیری فضاهای مسکونی در جوار بزرگراه‌ها و فضاهای پرتردد شهری، آسایش ساکنین را تحت تأثیر قرار داده است. هم‌چنین در مجتمع‌های مسکونی و داخل ساختمان‌ها ردوبدل‌شدن صوت از طریق واحدهای مجاور برای ساکنین آزاردهنده است. درنتیجه برای ایجاد بهره‌وری بهتر از فضاها باید تبادل صوتی یا نوفه به حداقل ممکن برسد. هم‌چنین در فضاهایی همچون آمفی‌تئاترها جذب صوت عاملی مؤثرمی‌باشد. کنترل نوفه در داخل یک فضا با افزایش جذب آن انجام‌پذیر است، درحالی‌که کنترل انتقال نوفه بین فضاهای مختلف بحث صدا بندی را مطرح می‌کند. گیاهان و خاک به‌واسطه مورفولوژی خاص خود آلودگی صوتی را کاهش می‌دهند، این فرض وجود دارد که با الگوبرداری از آن‌ها بتوان میزان صوت را کنترل کرد. در این پژوهش، هدف از الگوبرداری از طبیعت جذب اصوات نامناسب و هم‌چنین بحث صدا بندی می‌باشد. با توجه بر مطالعات صورت گرفته بر روی پژوهش‌های پیشین که در جدول (۱) به‌طور خلاصه مطرح شد، خاک و برگ گیاهان عاملی مؤثردر جذب صوت می‌باشد و نقش خاک در اُفت صوتی مشهود است. پس از بررسی اُفت صوتی و جذب صوت در گیاهان و مشاهده‌ی خلأ پژوهش‌های پیشین بر روی صدا بندی، به‌عنوان نمونه آزمایش اُفت صوتی بر روی پنل‌های ساخته‌شده انجام‌شده است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

۱- ۲. مرحله دوم: تجزیه، تحلیل و تفسیر صورت‌مسأله

مرحله دوم شامل مراحل مختلف نظیر پرسش از زیست‌شناسان و بیولوژیست‌ها درباره دیدگاه طبیعت درباره صورت‌مسأله، ترجمه عملکرد طراحی به عملکرد طبیعت، چگونگی غلبه طبیعت بر صورت‌مسأله، تعریف مجدد فرضیه و سؤال‌های ابتدایی با در نظر گرفتن یافته‌ها و اضافه کردن کلیدواژه‌هایی مجدد می‌باشد (قارونی، ۱۳۹۴). گیاهان به‌واسطه مورفولوژی و اندام خاص خود، دارای جذب بالای صوت می‌باشند. شاخ و برگ درختان به دلیل انعطاف، نرمش و صاف‌بودن، صدا را جذب می‌کنند. تنه‌ی درختان و شاخه‌های سنگین باعث انحراف صدا می‌شوند. پخش و شکستن صدا و جذب امواج صوتی به‌وسیله گیاهان کف جنگل‌ها می‌توانند باعث کاهش شدت صوتی شوند (عرفانی و دیگران، ۱۳۸۷). در حال حاضر در داخل کشور از عایق‌هایی از قبیل پشم‌شیشه، پشم سنگ و سایر الیاف‌ها، انواع فوم‌ها، تایل‌های گچی و مقوایی، انواع فیبر و ... به‌عنوان جاذب‌های صوتی استفاده می‌شود که دارای معایبی می‌باشند، به‌طور مثال، پشم‌شیشه و پشم سنگ عامل ایجاد حساسیت پوستی و آسیب به سیستم تنفسی و بروز بیماری‌های ناشی از کار، خاصیت پخش شوندگی سریع و آسان در محیط و ایجاد آلودگی زیست‌محیطی، بروز آلودگی هوای محیط کار در کارخانه‌های تولیدکننده، وجود اکسیدهای فلزی ($B_2O_3, Al_2O_3, SiO_2, MgO, TiO_2, CaO$) در ساختار شیمیایی آن‌ها، درصد جذب رطوبت بالا، ایجاد فشردگی بیش‌ازحد، کاهش تدریجی ضریب جذب صوت و ثابت نبودن خاصیت جذب صوتی در کل دوران بهره‌برداری می‌باشند (علمداری و دیگران، ۱۳۸۷).

۱- ۳. مرحله سوم: جست‌وجو برای یافتن و کشف راه‌حل‌های طبیعی، زیستی، بیولوژیکی

این مرحله به‌منظور جست‌وجو برای یافتن ارگانیسمی است که در طبیعت صورت‌مسأله را به‌خوبی پاسخ داده و حل کرده باشد. درختان برگ‌ریز با برگ‌های زیاد بسیار تأثیرپذیرتر از درختان همیشه‌سبز در جذب و انتشار صدا می‌باشد. هنگامی‌که برگ درختان ریخته می‌شود، میزان تأثیرپذیری آن‌ها در کنترل آلودگی صوتی کم‌تر است. هم‌چنین تراکم بالا در واحد فضا معمولاً با درختان همیشه‌سبز امکان‌پذیر است. چگالی، بزرگ‌بودن و عریض‌بودن درختان در کاهش آلودگی صوتی مهم می‌باشند. عواملی مانند اندازه برگ (پهن برگان) و تراکم شاخه‌ها، ارتفاع درختان، دیواره‌های متخلخل، انعطاف‌پذیری، انبوهی و تراکم، چرمی‌بودن برگ‌ها، خمش‌پذیری شاخه‌ها، سن گیاهان، قطر تنه و میزان صمغ در سوزنی‌برگان در میزان جذب صوت مؤثرند. هم‌چنین هرقدر زاویه قرارگرفتن برگ نسبت به شاخه و نسبت به ساقه تندتر باشد، کاهش آلودگی صدا بیشتر می‌باشد. بهترین گونه‌ها ازنظر جذب صوت افرا، اقاقیا، چنار، سرو شیراز، کاج تهران و کاج می‌باشند (عرفانی، ۱۳۸۷).

۱- ۴. مرحله چهارم: تعریف مقدمه‌ای بر راه‌حل‌ها و تبدیل به انتزاع

این مرحله راه‌حل‌های زیستی را موردبررسی قرار می‌دهد که شامل یافتن الگوهای تکراری و فرآیندهای موجود در طبیعت است. در این مرحله برحسب تعریف صورت‌مسأله، مناسب‌ترین راهبرد انتخاب می‌شود و خلاصه‌برداری برای به چالش کشیدن طراحی صورت می‌گیرد. هدف اصلی در این بخش، تبدیل پدیده‌ی مورد مطالعه در طبیعت به مکانیزمی ملموس و قابل درک است که با ابزار انسان‌ساخت قابل اجرا باشد. این بخش که مهم‌ترین مرحله‌ی فرایند مسأله‌محور است، با توجه به ماهیت هر موضوع، راه‌کاری خاص پیدا می‌کند (متینی، ۱۳۹۳). در جدول (۱) به‌طور خلاصه به مطالعات انجام‌شده در مورد جذب صوت در گیاهان پرداخته شد. طبق مطالعات انجام‌شده، جذب صوت در گیاهان، ابتدا در سال ۱۹۷۰ توسط کمربندهای گیاهی، سال ۱۹۸۱ توسط ارتعاش برگ‌ها، سال ۲۰۱۰ توسط بوته‌های همیشه‌سبز، سال ۲۰۱۱ توسط بررسی خاک و هم‌چنین تائید خاک به‌عنوان عامل اصلی جذب صوت، سال ۲۰۱۲ توسط بررسی پارامترهای مؤثردر جذب صوت، سال ۲۰۱۴ توسط تأثیر برگ در فرکانس‌های مختلف و هم‌چنین بررسی گیاه سرخس، در سال ۲۰۱۵ توسط مدل‌سازی پوشش گیاهی و آزمایش جذب صوت و در نهایت در سال ۲۰۱۵ آزمایش میزان اُفت صوتی بر روی یک دیوار سبز موردبررسی قرار گرفت.

سرخس‌ها و خویشاوندان آن‌ها بیشتر مخصوص مناطق مرطوب می‌باشند و به همین دلیل جنگل‌های شمال رویشگاه‌های مناسبی برای آن‌ها به شمار می‌روند. در مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی، این گیاهان بیشتر در شکاف صخره‌ها، مجاور آبشارها، حاشیه جویبارها، سواحل دریاچه‌ها و تالاب‌های شیرین دیده می‌شوند. درمجموع ۵۲ گونه متعلق به ۲۶ جنس در ۱۵ تیره به

شرح زیر شناخته‌شده است (آخانی و دیگران، ۱۳۸۸):
Ophioglossaceae, Psilotaceae, Equisetaceae, Osmundaceae, Marsileaceae, Salviniaceae, Dennstaedtiaceae, Pteridaceae, Aspleniaceae, Thelypteridaceae, Woodsiaceae, Blechnaceae, Onocleaceae, Dryopteridaceae and Polypodiaceae.

۱-۴-۱. گام‌های پژوهش

طبق مطالعات انجام‌شده (Alessandro et al., 2015)، (As-drubali et al, 2014) سرخس‌ها جذب صوت بهتری نسبت به سایر گیاهان از خود نشان داده‌اند. در این پژوهش، به‌عنوان نمونه چهار نوع سرخس (دو نمونه بومی و دو نمونه غیربومی) (تصویر ۲) با ابعاد نسبتاً برابر انتخاب‌شده‌اند.

سپس پارامترهای مؤثردر جذب صوت یعنی: میانگین ضخامت یک برگ (t_f)، میانگین وزن یک برگ (w_f)، میانگین مساحت یک برگ (a_f)، تعداد برگ‌ها (n_f)، ارتفاع معادل گیاه (h_p)، حجم معادل گیاه (v_p)، زاویه غالب جهت‌گیری برگ (θ_f)، چگالی یک برگ (A_f)، تراکم گیاه (A_v)، اندازه‌گیری شدند.

برای اندازه‌گیری وزن از ترازو (دقت ۰/۰۰۰۰۱) و برای اندازه‌گیری ضخامت از دستگاه کولیس (دقت ۰/۰۱) و برای به دست آوردن مساحت برگ از نرم‌افزار فتوشاپ استفاده شد (تصویر ۳). از برگ موردنظر عکس گرفته شد و با انتقال به نرم‌افزار فتوشاپ و شمارش تعداد پیکسل‌های موردنظر و با توجه ابعاد هر پیکسل مساحت برگ محاسبه شد. زاویه غالب جهت‌گیری با استفاده از نرم‌افزار اتوکد و با انتقال عکس گیاه به نرم‌افزار و رسم زاویه‌ی هر برگ نسبت به خط عمود، محاسبه شد. اندازه‌گیری‌های مستقیم قادر به استنباط حجم معادل اشغال‌شده توسط گیاه (V_p) و چگالی سطح برگ (A_v) نمی‌باشند. به همین منظور با استفاده از روابط زیر به دست می‌آیند: (Alessandro et al., 2015)

$$V_p = a_p.h_p \qquad (۱)$$

تصویر ۲- سرخس‌های موردپژوهش از راست به چپ: فوجر، پلیستیکوم[۶]، سرخس عقابی[۷]، فوجر فر[۸].

$$A_v = \frac{(n_f.a_f)}{V_p} \qquad (۲)$$

در این رابطه a_p مساحت سطح زیر کشت: $a_p = \pi.d^2/4$ و d قطر گلدان می‌باشد.

۱-۴-۲. تحلیل پارامترها

نتایج حاصل از پژوهش‌ها نشان داد که جذب صوت در گیاهان عمدتاً تحت تأثیر تعداد برگ، چگالی، مساحت برگ و زاویه جهت‌گیری برگ‌ها می‌باشد. هم‌چنین طبق نتایج حاصل از پژوهش اسدروبالی مشخص شد که سرخس فوجر به همراه یک‌لایه ۱۰ سانتی‌متری خاک متخلخل ساخته‌شده از پرلیت (۳۰٪) و الیاف نارگیل (۷۰٪) جذب صوت بیشتری را از خود نشان می‌دهد. طبق نتایج جدول (۲)، سرخس بومی پلیستیکوم با دارابودن مساحت بالای سطح برگ، تراکم بیشتر برگ‌ها و زاویه بیشتر، گیاه مناسب‌تری برای جذب صوت می‌باشد؛ و سرخس غیربومی فوجر در مرتبه‌ی دوم قرار دارد.

اما با توجه به مباحث مطرح‌شده در جذب صوت مشخص می‌گردد که برای ایزولاسیون آکوستیکی در درجه اول بزرگ‌بودن مقاومت نشت (عدم امکان عبور هوا از قشر آن) حائز اهمیت است (لیاقتی، ۱۳۵۶). در جدول (۳) نتایج چندگونه‌ی گیاهی از پژوهش‌های پیشین گردآوری‌شده‌اند. در تمامی گیاهان موردپژوهش از منابع مختلف، برگ‌ها نزدیک به سطح خاک می‌باشند. نوآوری پژوهش پیشرو در معرفی گونه‌های دارای ساقه بلند می‌باشد تا به این نکته توجه شود که در گیاه منتخب، علاوه بر پارامترهای نامبرده فاصله‌ی بین برگ‌ها و سطح خاک نیز مهم است.

درنتیجه با استناد به یافته‌های مباحث صوتی، یک فضای خالی که

تصویر ۳- محاسبه وزن برگ، محاسبه ضخامت برگ، محاسبه مساحت برگ، اندازه‌گیری زاویه برگ.

هوا از آن عبور کند صوت را نیز از خود عبور می‌دهد، سرخس‌های جنگلی نسبت به سرخ‌های زینتی دارای ساقه‌های بلندتری می‌باشند و بین سطح خاک و برگ‌ها فضای خالی به وجود می‌آید (تصویر ۴)، درنتیجه سرخس‌های زینتی که ساقه‌های کوتاه‌تری دارند و رویش برگ آن‌ها از سطح پایین‌تری آغاز می‌شود نمونه مناسب‌تری برای جذب صوت می‌باشند (باباخانی و دیگران، ۱۳۹۹). پس می‌توان نتیجه گرفت که سرخس فوجر نمونه بهتری برای جذب صوت است.

هم‌چنین گیاه فوجر در شرایط نامطلوب نگهداری، مثل عدم آبیاری به‌موقع و نور کم‌تر دوام بیشتری نسبت به سایر گونه‌ها دارد. در این پژوهش به‌منظور سنجش پایداری گیاهان در بازه‌های زمانی مختلف، شرایط نگهداری تغییر داده شد تا پایدارترین گونه مشخص شود.

سرخس‌ها به دلیل ساختار چتری‌مانند، پوشش نسبی سطح گلدان و محیط زیر کشت خود سبب به دام‌اُفتادن صوت و افزایش انعکاس و بازگشت مجدد صوت به خاک می‌شوند. هم‌چنین، هرکدام از برگ‌های گیاه سرخس، خود از برگ‌های کوچک‌تری تشکیل‌شده است که هر یک دارای زوایای جهت‌گیری مختلفی هستند و می‌توانند صوت را در جهات مختلف بازتاب دهد، بدین سبب نمونه‌ی مناسبی برای الهام‌گیری می‌باشند. با توجه به نتایج پژوهش، جاذب‌های مصنوعی، ساخته‌ی دست انسان، از سه ویژگی مهم گیاهان، یعنی ویژگی تحرک، زاویه‌ی جهت‌گیری و اثر زمین که از عوامل اُفت صوتی می‌باشند برخوردار نیستند، درواقع تمام جاذب‌های صوتی همانند لایه‌ی خاکی عمل کرده و فاقد لایه‌ی گیاهی می‌باشند. به‌طور خلاصه، مواد الیافی و همنواگرهای پوسته‌ای فاقد لایه‌ی گیاهی، اثر زمین و زاویه جهت‌گیری و همنواگرهای حجمی، فاقد زاویه‌ی جهت‌گیری و لایه‌ی گیاهی می‌باشند. در جدول (۴) به مقایسه‌ی بین گیاه و جاذب‌های صوتی پرداخته می‌شود.

تصویر ۴- ساقه‌های بلند گونه‌ی بومی نسبت به گونه‌های غیربومی.

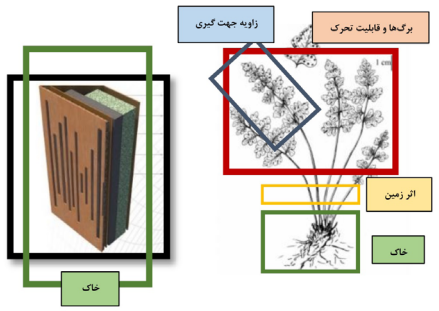
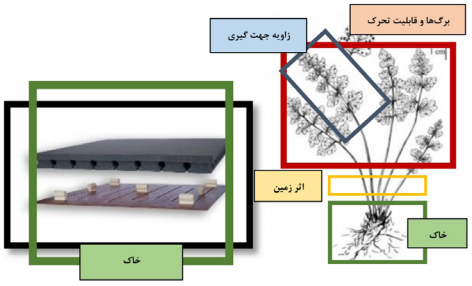
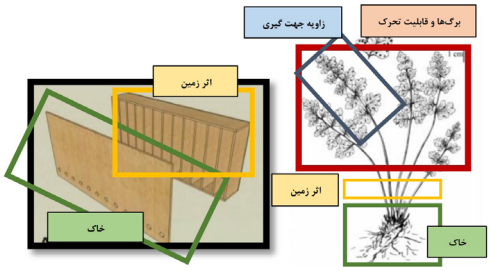
جدول ۲- اندازه‌گیری ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاه.

نمونه‌ها	میانگین مساحت برگ (a_f (m²)	میانگین ضخامت برگ (T_f (mm	تعداد برگ‌ها n_f	میانگین وزن برگ‌ها (W_f (g	زاویه غالب جهت‌گیری برگ‌ها	ارتفاع گیاه (h_p (m	حجم اشغال‌شده توسط گیاه (v_p (m³	سطح زیر کشت (a_p (m²	چگالی و تراکم گیاه (A_v (m⁻¹
پلیستیکوم (بومی)	۰/۰۰۷	۰/۲۱	۳۲	۵/۱۰	۳۱	۰/۳۳	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۹	۷۶/۱۳
سرخس عقابی (بومی)	۰/۰۵	۰/۱۴	۳	۱۰/۰۰	۱۰	۰/۴۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۹	۳۷/۵۰
فوجر (غیربومی)	۰/۰۰۴	۰/۱۶	۴۶	۱/۴۶	۲۱	۰/۴۰	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۹	۴۷/۲۷
فوجر فر (غیربومی)	۰/۰۱۱	۰/۱۷	۱۵	۴/۵۷	۱۸	۰/۴۰	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۹	۴۵/۰۰

جدول ۳- پارامترهای مورفولوژیکی گیاهان بر اساس پژوهش‌های پیشین.

نمونه‌ها	میانگین مساحت برگ (a_f m²)	میانگین ضخامت برگ (T_f mm)	تعداد برگ‌ها n_f	میانگین وزن برگ‌ها (W_f g)	زاویه غالب جهت‌گیری برگ‌ها	ارتفاع گیاه (h_p m)	حجم اشغال‌شده توسط گیاه (v_p m³)	چگالی و تراکم گیاه (Av m⁻¹)	منبع
سرخس فوجر	-	-	۱۵۵/۸	-	۴۸/۸	۰/۲۴۰	-	۱۴۱/۶۹	Alessandro et) (al., 2015
اشک بچه[۹]	-	-	۷۵۱۸	-	-	۰/۰۰۸	-	۶۷۸/۶۰	Alessandro et) (al., 2015
گل پامچال[۱۰]	۰/۰۰۶	۰/۴۹	۳۳	۲/۸۸	-	۰/۱۸	۰/۰۰۱۴	۰/۴۸	Horoshenkov) (et al., 2012
گل شمعدانی[۱۱]	۰/۰۰۴۴	۰/۵۵	۱۵	۲/۵۷	۸۵	۰/۲۰	۰/۰۰۱۶	۴۲	Horoshenkov) (et al., 2013
پیچک[۱۲]	۰/۰۰۰۶۲	۰/۳۶	۸۳	۰/۱۳	۳۶	۰/۲۷	۰/۰۰۲۱	۲۴	Horoshenkov) (et al., 2013
خلنگ ژاپنی[۱۳]	۰/۰۰۰۳۸	۰/۵۲	۳۶۲	۰/۱۷	۳۰	۰/۲۸	۰/۰۰۲۲	۶۳	Horoshenkov) (et al., 2013

جدول ۴- مقایسه‌ی مواد جاذب با عوامل جذب صوت در گیاهان.

مواد جاذب	تصویر	ویژگی‌های منطبق بر عوامل گیاهی
مواد الیافی (متخلخل)		- لایه‌ی الیافی به‌عنوان لایه‌ی خاک در گلدان می‌باشد. -لایه‌ی گیاهی که مانند برگ‌ها قابلیت تحرک و انعطافی را داشته باشد وجود ندارد. -زاویه‌ی موجود در برگ وجود ندارد. -فضای خالی بین خاک و برگ که سبب اثر زمین می‌شود وجود ندارد.
همنواگرهای پوسته‌ای		-لایه‌ی الیافی به‌عنوان لایه‌ی خاک در گلدان می‌باشد. -لایه‌ی گیاهی که مانند برگ‌ها قابلیت تحرک و انعطافی را داشته باشد وجود ندارد. -زاویه‌ی موجود در برگ وجود ندارد. -فضای خالی بین خاک و برگ که سبب اثر زمین می‌شود وجود ندارد.
همنواگرهای حجمی		-لایه‌ی الیافی به‌عنوان لایه‌ی خاک در گلدان می‌باشد. -لایه‌ی گیاهی که مانند برگ‌ها قابلیت تحرک و انعطافی را داشته باشد وجود ندارد. -زاویه‌ی موجود در برگ وجود ندارد. فضای خالی بین خاک و برگ که سبب اثر زمین می‌شود وجود دارد. ولی بین حفره‌های لایه‌ی برگ مانند وجود ندارد.

۱- ۵. مرحله‌ی پنجم و ششم: استخراج اصول و انتقال راه‌حل زیستی به مهندسی، ارزیابی و کاربردی کردن اصول و مبانی (بررسی اُفت صوتی جداره)

مرحله‌ی پنجم از رویکرد بیونیکی به‌منظور گسترش دادن ایده‌ها و راه‌حل‌ها، بر اساس مدل‌های طبیعی و الهام از فرم و عملکرد و اکوسیستم گیاهان شرح داده خواهد شد.

۱-۵-۱. ساخت پنل

با توجه به مطالعات فوق این نتیجه حاصل شد که اُفت صوتی توسط خاک، جذب صوت در گیاهان هم به‌وسیله‌ی خاک و هم توسط برگ‌های گیاه صورت می‌گیرد. هم‌چنین مشاهده شد که خاک برای فرکانس‌های پایین خوب عمل می‌کند درحالی‌که پوشش گیاهی در فرکانس‌های متوسط و بالا خوب عمل می‌کند. نتایج زمان واخنش بین فرکانس‌های ۲۵۰ تا ۱۶۰۰ هرتز نشان داد که: در فرکانس‌های زیر ۵۰۰ هرتز، اُفت فشار ناشی از جذب خاک می‌باشد، درحالی‌که برای فرکانس‌های بین ۵۰۰ تا ۱۶۰۰ هرتز، ناشی از جذب پوشش گیاهی است.

به‌منظور جلوگیری از سروصدای زیاد، مواد مختلفی برای جذب صوت و کاهش شدت امواج صوتی استفاده می‌شود؛ اما مسائلی از قبیل آلودگی زیست‌محیطی، حساسیت‌های انسانی و حساسیت این مواد به رطوبت باعث شده است که کاربرد این مواد محدود گردد و استفاده از موادی که دارای خاصیت لیگنوسلولزی هستند مانند چوب و ضایعات کشاورزی موردتوجه قرار گیرد. فراوانی، ارزانی نسبی قیمت، کوتاه‌بودن دوره برداشت و خصوصیات مثبت مواد لیگنوسلولزی در جذب صوت و حرارت، ماده اولیه مناسبی برای تهیه تخته‌های عایق صوت و حرارت ساخته است (پودینه‌پور و دیگران، ۱۳۸۵). ضایعات کشاورزی می‌توانند با ایجاد تخلخل در پنل‌های صوتی مؤثرواقع شوند، یکی از مواد لیگنوسلولزی که می‌توان از ضایعات آن در ساخت صفحات جاذب استفاده کرد ساقه گیاه برنج می‌باشد. برای ایجاد پیوستگی بین مواد لیگنوسلولزی نیاز به مصالحی است که همانند چسب عمل کند، هم‌چنین استفاده از چندسازه‌های چوب-گچ در مصارف داخلی ساختمان در قیاس با فرآورده‌های حاصل از چسب‌های شیمیایی به دلیل عدم انتشار گاز فرمالدئید ترجیح داده می‌شود. علاوه بر آن پانل‌های چوب_گچ درعین‌حالی که مقاومت در برابر آتش و عوامل بیولوژیک بالایی دارند، از خصوصیات عایق صوت و حرارت مناسبی

برخوردارند. (رنگ‌آور و دیگران، ۱۳۹۳)

۱ -۵- ۲. مواد و روش‌ها

مواد اولیه لیگنوسلولزی مورداستفاده در ساخت تخته‌های چوب-گچ، ساقه برنج و خرده چوب صنوبر می‌باشد. ساقه‌های برنج به خرده‌های ریز جهت استفاده در تخته‌ها و چوب صنوبر توسط دستگاه رنده به تراشه‌های موردنیاز تبدیل و سپس هرکدام از مصالح به‌طور جداگانه، در محیط مناسب به‌منظور کاهش رطوبت قرار گرفتند.

۱- ۵- ۳. ساخت تخته‌های آزمونی

برای ساخت پنل‌ها، مقدار گچ مصرفی در ساخت تخته‌ها به نسبت ۳/۵ برابر وزن خشک مواد، مقدار آب مصرفی ۴۰ درصد وزن گچ و مقدار ضایعات برنج به میزان ۶۰ درصد نسبت به جرم خرده چوب‌های صنوبر مورداستفاده قرارگرفته‌اند. برای ساخت تخته‌ها، مواد لیگنوسلولزی با آب ترکیب و سپس پودر گچ روی آن پاشیده شد. کیک حاصله در یک قالب چوبی به ابعاد ۵۰ در ۵۰ سانتی‌متر فرم دهی شد و تا دستیابی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر به‌وسیله پرس سرد هیدرولیکی با فشار ۳۰ بار فشرده گردید. به‌منظور یکنواخت سازی رطوبت و متعادل‌سازی تنش‌های داخلی تخته‌ها، تخته‌های ساخته‌شده در محیط آزمایشگاه تا رسیدن به رطوبت مناسب قرار داده شد. (تصویر ۵)

به‌منظور ساخت لایه‌ی گیاهی تیوپ‌های لاستیک اتومبیل غیرقابل استفاده، از آپاراتی‌ها جمع‌آوری شد و توسط سیم مفتول و توری مرغی (تصویر ۶) به‌طور متراکم بر روی لایه‌ی گچی جایگذاری شد. به علت لایه‌لایه‌بودن برگ‌های سرخس، شیارهایی در سطح تیوپ ایجاد شد.

با توجه به جدول ۳ و ویژگی‌های سرخس فوجر مساحت هر برگ تیوپی، زاویه جهت‌گیری برگ‌ها، ارتفاع لایه، حجم اشغال‌شده و تراکم گیاه به نسبت لایه‌ی خاکی در نظر گرفته‌شده است. پس با توجه به جدول ۵ اگر ضخامت لایه‌ی خاکی ۲ سانتی‌متر باشد، باید ارتفاع لایه‌ی گیاهی چهار برابر شود. هرچه زاویه‌ی جهت‌گیری گیاه بیشتر و متفاوت‌تر باشد میزان اُفت صوتی بیشتر است، درنتیجه میزان تغییر زاویه بین ۲۰ تا ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. هم‌چنین هرچه تراکم سطح برگ و مساحت برگ به نسبت ارتفاع بیشتر باشد میزان کاهش صوت بیشتر است.

۱- ۵-۴. آزمایش اُفت صوتی جداره

پس از بررسی ویژگی گیاهان و تأثیر آن‌ها در اُفت صوتی و جذب صوت، به‌عنوان نمونه، آزمایش اُفت صوتی بر روی پنل‌های ساخته شده انجام شده است. برای مقایسه میزان اُفت صوتی نمونه‌ها، از یک عدد میکروفن، یک اسپیکر، دو رایانه و نرم‌افزار *Cool Edit pro2*-1 استفاده شد. ابتدا با استفاده از اسپیکر و توسط نرم‌افزار، نویز مشخص در فرکانس‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ هرتز تولید می‌شود، این نویزها پس از عبور از نمونه‌ها به میکروفون می‌رسد و سپس با استفاده از نرم‌افزار، امواج صدا قابل‌مشاهده می‌باشند. با مقایسه‌ی تغییر شدت صوت در نمونه‌ها، میزان اُفت صوتی جداره بررسی می‌شود.

ابتدا جداره‌های ساخته‌شده به‌صورت تک‌جدار، سپس همراه با لایه‌ی گیاهی و درنهایت به‌صورت دوجداره مورد آزمایش قرار گرفتند (تصویر ۷). صداهای ایجادشده توسط میکروفون ضبط‌شده و مجدداً به نرم‌افزار منتقل می‌شوند، با پخش صوت در هر فرکانس قله‌ای به وجود می‌آید، سپس نقطه تلاقی نمودار در فرکانس مشخص، موردبررسی قرار می‌گیرد.

۲. بحث و جمع‌بندی

با توجه به جدول (۵) چند نمونه از پنل‌های بحث شده مورد آزمایش قرار گرفت و با تحلیل سه نمونه از پنل‌های ساخته‌شده به‌صورت تک پنل، پنل به همراه لایه‌ی گیاهی و پنل دوجداره با لایه‌ی گیاهی نمودار (۱) حاصل می‌شود:

با توجه به نمودار فرکانس برحسب شدت صوت، در فرکانس‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز، پنل دوجداره از سایر پنل‌ها اُفت صوتی بیشتری داشته و در مرتبه‌ی دوم پنل به همراه لایه‌ی گیاهی قرار دارد.

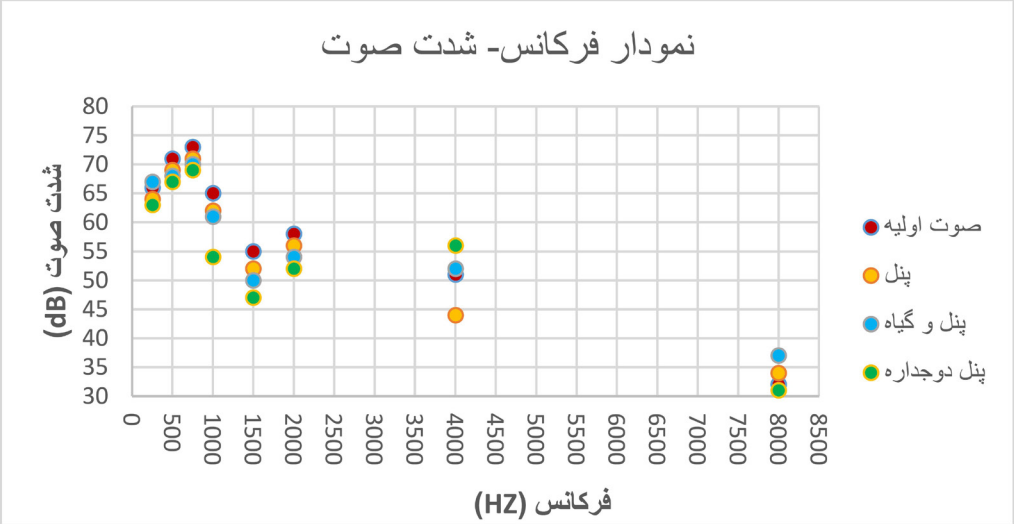
جدول ۵- تطبیق لایه‌ی مصنوع با سرخس فوجر.

	ارتفاع لایه‌ی خاکی	مساحت هر برگ	زاویه جهت‌گیری	ارتفاع گیاه	حجم اشغال‌شده	تراکم سطح برگ
گیاه	۰/۱۰	۰/۰۰۴	۲۱	۰/۴۰	۰/۰۰۳۶۰۰	۴۷/۲۷
تیوپ	۰/۰۲	۰/۰۰۱۲	۴۵-۲۱	۰/۰۸	۰/۰۰۰۰۵۶	۱۰۷/۱۴

تصویر ۵- نمونه‌ها پس از خشک‌شدن.

تصویر ۶- اتصال سیم‌ها برای ساخت لایه‌ی گیاهی.

نتایج نشان داد که ضایعات کشاورزی در فرکانس‌های زیر ۸۰۰۰ هرتز، تأثیر قابل‌توجهی بر میزان اُفت صوتی جداره داشته است؛ بنابراین توانایی چوب صنوبر و ساقه‌های برنج در میزان اُفت صوتی مؤثرواقع‌شده‌اند. با افزایش فرکانس، امواج دارای انرژی بیشتر و قدرت نفوذ بالاتری شده که این امر موجب پررنگ‌شدن نقش ساقه‌های برنج در به دام انداختن امواج صوتی شده است. در فرکانس ۱۵۰۰ هرتز میزان کاهش اُفت صوتی به بیشترین مقدار خود رسید. امواج با فرکانس ۴۰۰۰ هرتز نیز مانند امواج با فرکانس ۱۵۰۰ هرتز دارای طول‌موج کوتاه و قدرت نفوذ بالایی هستند، این امواج به‌راحتی در پانل نفوذ کرده و به راحت جذب می‌شوند. معمولاً با افزایش فرکانس امواج میزان جذب صوت افزایش می‌یابد اما در فرکانس ۴۰۰۰ هرتز، یک اُفت شدید در میزان اُفت صوت مشاهده گردید. محققین این اُفت را ناشی از خصوصیات ذاتی ماده می‌دانند. یک ماده ممکن است چند فرکانس را جذب کند و یک فرکانس را منعکس کند. هم‌چنین با توجه به نتایج آزمایش اضافه کردن لایه‌ای همانند لایه‌ی گیاهی در فرکانس‌های ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز مؤثرواقع‌شده است و پنل دوجداره که دارای لایه‌ی گیاهی است بیشترین تأثیر را در همه‌ی فرکانس‌ها به‌جز فرکانس ۴۰۰۰ هرتز داشته است.

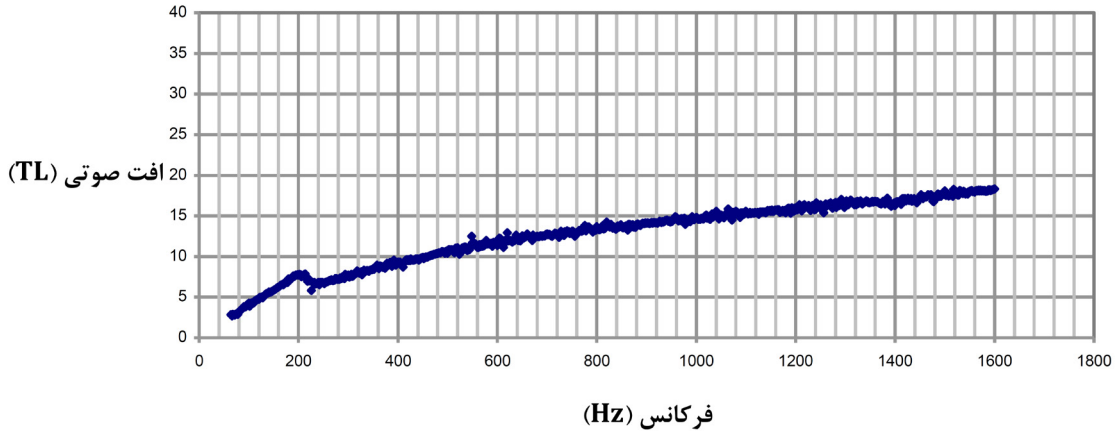


نمودار ۱- نمودار فرکانس برحسب شدت صوت.

تصویر ۷- پنل‌ها. الف) اتصال پنل گیاهی به لایه‌ی خاکی. ب) پنل دوجداره.

تصویر ۸- (الف) برش نمونه‌ها ب) نمونه نهایی.

تصویر ۹- فرآیند طراحی در روش مسأله محور (روش بالا به پایین).



نمودار ۲- میزان اُفت صوتی برحسب فرکانس.

درنهایت لایه‌ی یک جداره، توسط دستگاه امپدانس تیوپ مدل BSWA, SW477+SW422 شرکت سازنده BSWA Technology CO، در بازه‌ی فرکانس ۶۳ تا ۱۶۰۰ هرتز در شرایط دمای هوا ۲۳ درجه سانتی‌گراد، فشار ۸۸۸۲۰ پاسکال، میزان رطوبت ۲۷ درصد، میزان چگالی هوا ۱ کیلوگرم بر مترمکعب، سرعت صوت ۳۴۴/۹۵۳ و مشخصات امپدانس هوا ۳۵۴/۹۸۸ پاسکال بر متر بر اساس استاندارد بین‌المللی *ASTM-2611-09*، موردبررسی قرار گرفت. سه نمونه از پنل به قطر ۳ و ۱۰ سانتی‌متر و عمق ۲ سانتی‌متر لایه خاکی و ۲ سانتی‌متر لایه گیاهی (به دلیل محدودیت در ابعاد آزمایشگاهی) تهیه شد و لایه‌ی گیاهی روی آن قرار گرفت (تصویر ۸). طبق نتایج آزمایش، میزان اُفت صوتی با افزایش فرکانس افزایش‌یافته است و میزان آن در فرکانس ۱۶۰۰ هرتز به ۱۸/۲۹ می‌رسد (نمودار ۲).

بر اساس فرآیند پیشنهادشده یعنی رویکرد مسأله‌محور در طراحی بیونیکی شش گام وجود دارد که شامل تعریف صورت مسأله، تحلیل صورت مسأله با توجه به راه‌حل‌های زیستی، جست‌وجو و یافتن راه‌حل‌های زیستی، ایجاد راه‌حل‌های انتزاعی، استخراج اصول و انتقال راه‌حل‌ها به مهندسی و در نهایت ارزیابی و تکرار اصول می‌باشد و در تصویر ۹ این شش گام نشان داده شده است.

نتیجه

آلودگی صوتی یکی از عوامل تأثیرگذار در آسایش انسان‌ها و فضای زندگی آن‌ها است، بدین منظور با انواع مواد و مصالح همچون پشم‌شیشه، پشم سنگ، انواع فوم، تایل‌های آکوستیکی و غیره سعی بر یافتن راهی برای کنترل آلودگی صوتی شده است. اغلب این مصالح عاملی برای تخریب محیط‌زیست و غیرقابل بازیافت می‌باشند. کنترل نوفه در داخل یک فضا با افزایش جذب آن انجام‌پذیر است، درحالی‌که کنترل انتقال نوفه بین فضاهای مختلف بحث صدابندی را مطرح می‌کند. گیاهان با ویژگی جذب صوت خود می‌توانند تأثیر بسزایی در میزان جذب صوت داشته باشند، هم‌چنین خاک عاملی مؤثردر اُفت صوتی می‌باشد. در این پژوهش دو نمونه سرخس جنگلی و دو نمونه سرخس زینتی موردبررسی قرارگرفته‌اند، با توجه به نتایج آزمایش مشخص شد که سرخس زینتی فوجر گیاه مناسبی برای کاشت در جداره‌ی داخلی به‌منظور کنترل آلودگی صوتی است. در این پژوهش با استدلال منطقی می‌توان به این فرضیه رسید، گونه‌هایی که ساقه‌های بلندی دارند و رویش برگ در آن‌ها از قسمت بالاتری آغاز می‌شود نسبت به گونه‌هایی که رویش برگ آن‌ها نزدیک به سطح خاک می‌باشد جذب صوت بهتری را از خود نشان می‌دهد. دیوار عمودی سبز یک سیستم پرهزینه است و هزینه تعمیر و نگهداری آن نیز بالاست است، بااین‌حال، مزایای متعددی

جدای از رفتار صوتی، مانند ارزش زیبایی‌شناختی، بهبود کیفیت هوا و اثرات روان‌پزشکی ارائه می‌دهد. پس می‌توان گفت که یکی از نتایج پژوهش این می‌باشد که می‌توان از گیاهان به‌طور مستقیم به‌منظور اُفت صوتی جداره استفاده کرد و هم‌چنین می‌توان با الگوبرداری از ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاهان و جذب و اُفت صوت آن‌ها، پنل‌های آکوستیکی‌ای را طراحی کرد که سازگاری بیشتری با محیط‌زیست داشته باشند و کارایی صوتی بهتری را از خود نشان دهند. پس از بررسی اُفت صوتی و جذب صوت در گیاهان به‌عنوان نمونه، آزمایش اُفت صوتی بر روی پنل‌های ساخته‌شده انجام‌شده است. بدین منظور هرکدام از جداره‌ها موردبررسی قرار گرفتند، مزایا و معایب هرکدام مطرح شد و درنهایت به‌منظور سازگاری با محیط‌زیست از ساقه‌ی برنج که از ضایعات محصولات کشاورزی می‌باشد و به‌وفور در ایران یافت می‌شود، هم‌چنین با استفاده از خُرده‌چوب صنوبر و گچ، جداره‌ای ساخته شد که با توجه به نتایج پژوهش دارای اُفت صوتی می‌باشد، سپس با الهام از گیاهان، پنل دیگری به این جداره متصل شد که با تحرک و انعطاف‌پذیری خود میزان جذب صوتی را افزایش دهد. با توجه به نتایج پژوهش، در فرکانس‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز، پنل دوجداره از سایر پنل‌ها، اُفت صوتی بیشتری داشته و سپس در مرتبه‌ی دوم، پنل به همراه لایه‌ی گیاهی، قرار دارد؛ یعنی طبق فرضیه‌های اولیه‌ی پژوهش، با الگو گیری از گیاهان می‌توان میزان جذب و اُفت صوتی را افزایش داد. در نهایت پنل یک جداره توسط لوله امپدانس صوتی در بازه فرکانس ۶۳ تا ۱۶۰۰ هرتز مورد آزمایش قرار گرفت. طبق نتایج آزمایش، میزان اُفت صوتی با افزایش فرکانس افزایش‌یافته است و میزان آن در فرکانس ۱۶۰۰ هرتز به ۱۸/۲۹ می‌رسد که در مقایسه با سایر جدارهای موجود این عدد قابل‌قبول است؛ به‌طور مثال میزان اُفت صوتی دیوار آجر سفالی همراه با دولایه اندود گچ‌وخاک و گچ پرداختی، به ضخامت ۲۱ سانتی‌متر، ۴۶ دسی‌بل می‌باشد. هم‌چنین میزان اُفت صوتی دیوار با صفحات روکش‌دار گچی همراه با الیاف معدنی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر، ۴۵ دسی‌بل می‌باشد؛ درحالی‌که پنل طراحی‌شده باضخامت ۴ سانتی‌متر (۲ سانتی‌متر لایه خاکی و ۲ سانتی‌متر لایه متحرک گیاهی) حدود ۱۸ دسی‌بل میزان صوت را کاهش می‌دهد و با بهینه‌سازی و افزایش ضخامت پنل می‌توان میزان اُفت صوتی را افزایش داد. برای مورد استفاده قرار گرفتن جداره‌های طراحی‌شده در آپارتمان‌ها و سایر فضاها همچون آمفی‌تئاترها، باید پنل‌ها با ضخامت‌های مختلف، درصدهای مختلف ترکیب میزان ساقه‌ی برنج و چوب صنوبر و بررسی چگالی‌های مختلف، آزمایش سختی بر روی جداره، بررسی زیبایی‌شناختی در پنل‌هایی که بر روی دیوار نصب می‌شوند و جلوه‌ی خارجی دارند، نحوه‌ی نظافت پنل‌ها، دیرسوز کردن پنل‌هایی که جلوه‌ی خارجی دارند و میزان دقیق اُفت صوتی ضریب جذب هر جداره موردبررسی و آزمایش قرار بگیرند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت‌های آقایان مهندس مجید حق‌پناه، مهندس علیرضا احمدپور و خانوم‌ها دکتر ماریا کردجمشیدی، مائده واخیده و مؤسسه فنی فرم‌آفرین (آقای محمدی) کمال تشکر و قدردانی را داریم.

پی‌نوشت‌ها

1. Impedance Tube.
2. Nephrolepis Exaltata.
3. Bionic.
4. Biology.
5. Technology.
6. Polysticom SP.
7. Pteridium aquilinum.
8. Norwoodi.
9. Helxine Soleirolii (Baby Tears).
10. Primrose.
11. Geranium zonale.
12. Hedera Helix (Green Ivy).
13. Pieris japonica.

فهرست منابع

آخانی، حسین؛ خوش‌روش، رکسانا؛ اسکندری، مجید، و گروتر، ورنر (۱۳۸۸)، سرخس‌ها و خویشاوندان آن‌ها در ایران، مجله *رستنی‌ها*، دوره ۹۴، شماره ۱، صص ۱-۱۴۱.

باباخانی، ستاره؛ آبروش، مهدیه؛ قلی‌پور گشنیانی، مصطفی، و محمودی اطاقوری، آرمان (۱۳۹۹). طرح پیشنهادی پنل صوتی با الهام گیری از ساختار مورفولوژیکی گیاهان، *دومین کنفرانس ملی مدیریت شهری، شهرسازی و معماری با رویکرد اقتصاد و عمران شهری*، تبریز.

باباخانی، ستاره؛ آبروش، مهدیه؛ قلی‌پور گشنیانی، مصطفی، و محمودی اطاقوری، آرمان (۱۳۹۹)، بررسی و تحلیل آکوستیکی سرخس‌های بومی و غیربومی بر اساس ساختار مورفولوژیکی آن‌ها، *دومین کنفرانس ملی مدیریت شهری، شهرسازی و معماری با رویکرد اقتصاد و عمران شهری*، تبریز.

پودینه‌پور محمدعلی؛ ابراهیمی، قنب؛، تجویدی، مهدی؛ چهارمحالی، مجید، و رامتین، علی اکبر (۱۳۸۵)، اثر ترکیب ضایعات کشاورزی (ساقه گندم و جو) و چوب صنوبر بر خواص صوتی تخته خرده چوب عایق، دو فصلنامه علمی- پژوهشی *تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران*،دوره ۲۱، شماره ۲، صص ۶۱-۶۹.

رنگ‌آور، حسین؛ پایان، محمدحسن (۱۳۹۳)، بررسی خاصیت جذب صوت تخته خُرده‌چوب-گچ‌ساخته‌شده با ساقه کنف و نانورس، دو فصلنامه علمی- پژوهشی *تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران*، دوره ۲۹، شماره ۳، صص ۴۳۴-۴۴۲.

عرفانی، محمد (۱۳۸۷)، *آلودگی صوتی و روش‌های کنترل آن با تأکید بر طراحی فضای سبز*، اداره کل محیط‌زیست خراسان شمالی.

علمداری، زین‌العابدین؛ خوانین، علی، و کوکبی، علی (۱۳۸۷)، ساخت جاذب‌های صوتی فرکانس‌های پایین و میانی بر پایه بازیافت ترکیبی پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌استایرن، مجله *شنوایی‌سنجی*، دوره ۱۷، شماره ۱، صص ۱-۱۰.

قارونی اصفهانی، فاطمه (۱۳۹۴)، طراحی طبیعت معماری بایونیک، ناشر مؤلف، تهران.

کلیائی، مهیار، حمزه‌نژاد؛ مهدی؛ بهرامی، پیام، و لیتکوهی، ساناز (۱۳۹۴)، مقایسه انواع مختلف دیوار سبز جهت دستیابی به پایداری، *دومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در عمران، معماری و شهرسازی*،استانبول.

لیاقتی، غلامعلی (۱۳۵۶)، *آکوستیک در معماری*، نشر دانشگاه ملی

ایران، تهران.

متینی، محمدرضا (۱۳۹۳)، بهره‌گیری از الگوهای طبیعت برای ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو در معماری، نشریه *هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی*، دوره ۲۰، شماره ۱، صص ۶۷-۸۰.

مظفری، وجیهه؛ اسلامی، حمیده، و پیوندی، پدرام (۱۳۹۱)، تولید جاذب صوتی با استفاده از ضایعات منسوجات بی‌بافت، *هشتمین کنفرانس ملی مهندسی نساجی ایران*، یزد.

Asdrubali, F., Horoshenkov, K., Mencarelli, N. & D'Alessandro, F. (2014), Sound absorption properties of tropical plants for indoor applications, *The 21st international congress on sound and vibration*, pp. 1-13.

Alessandro, F., Asdrubali, F. & Mencarelli, N. (2015), Experimental evaluation and modelling of the sound absorption properties of plants for indoor acoustic applications, *Building and environment*, 94(2), pp. 913-923.

Azkorra, Z., Perez, G., Coma, J., Cabeza, L., Bures, S., Alvaro, J., Erkoreka, A. & Urrestarazu, M. (2015), Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings, *Applied acoustics*, 89 (1), pp. 46-56.

Cohen, Y.H. &Reich, Y., (2016), The biomimicry design process: Characteristics, stages and main challenge, *Biomimetic design method for innovationand sustainability*, pp. 19-29.

Speck, T. & Speck, O. (2008), Process sequences in biomimetic research, *Design and nature IV*, pp. 3-11.

Design of Acoustic Panels in the Walls in Interior Spaces of Building by Imitating the Mechanism of Ferns*

*Setareh Babakhani Fard[1], Mahdieh Abravesh**[2], Mostafa Gholipour Gashniani[3], Arman Mahmoudi Otaghvari[4]*

[1]Master of Bionic Architecture, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

[2]Assistant Professor, Department of Architecture, School of Architecture, College of Fine Arts,University of Tehran, Tehran, Iran.

[3]Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

[4]Associate Professor, Department of Botany, Biology, Faculty of Basic Sciences,University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

(Received: 13 Sep 2020, Accepted: 22 Jun 2021)

Noise pollution is one of the most important factors in architectural spaces that has a great impact on the comfort of residents. Today, man-made materials are used for improving the sound performance of buildings. For this purpose, it has been tried to find a way to control noise pollution with different materials such as glass wool, rock wool, foam types and acoustic tiles. Most of these materials are factors of environmental degradation and are not recyclable. The purpose of this study is to investigate the acoustic properties of plants and finding a suitable species to reduce noise pollution between two adjacent spaces, also imitating the ferns in order to improve sound reduction of interior walls between residential units. This research is based on six stages. In the first stage, according to studies on the mechanism of plant texture, it is shown that plants have the ability to absorb sound. By using bionic methods, plants have been identified and their morphology has been done to determine the plant species that has this property. The second part of the research involves identifying the factors affecting sound absorption. At this stage, the possibility of adapting the acoustic principles to the plant texture has been measured. Then the effective parameters in its sound absorption have been investigated by computational and laboratory methods (using scales, calipers, AutoCAD software and Photoshop). Finally, the effect of the sound reduction on the wall is investigated by testing the panel via Cool Edit software and using the impedance tube. According to the results, the non-native fern "Nephrolepis exaltata" is an effective plant in sound absorption. Generally, non-native species of Iran have better sound absorption. According to the research results, all sound absorbers are like a soil layer and don't have plant layer. Double-wall at frequencies of 250, 500, 1500, 1000 and 2000 Hz has the first priority and then the panel with the vegetable layer. The single-wall panel was tested by an impedance tube in the frequency range of 63 to 1600 Hz and the amount of sound reduction increased by increasing the frequency. The amount of sound reduction reached 18.29db at the frequency of 1600 Hz. This number is acceptable compared to other existing walls, for example, the amount of sound reduction of a wall with gypsum coated panels with mineral fibers with a thickness of 10 cm is 45 dB, while the designed panel with a thickness of 4 cm reduces the sound about 18 dB And by optimizing and increasing the thickness of the panel, the amount of sound reduction can be increased. To use the proposed walls in apartments and other spaces, panels with different characteristics as various thicknesses, different percentages of rice stem and poplar wood and different densities, hardness test on the wall, the aesthetics, the cleanliness of the panels, the late burning of the panels and the exact amount of sound reduction of each wall should be examined and tested.

Keywords
Interior Wall, Acoustics, Noise Reduction, Plants, Ferns, Interior Space.

* This article is extracted from the first author's master thesis, entitled: "Imitation of the ferns mechanism in the design of the acoustic walls in the interior space (Case design: Residential design in Tehran)" under the supervision of second and the advisory of third and fourth authors at University of Mazandaran.

** Corresponding Author: Tel: (+98-912) 2033341,Fax: (+98-21) 66972083, E-mail: abravesh@ut.ac.ir