

معماری بیوفیلیک و فناوری‌های هوشمند در آپارتمان‌های میان‌مرتبه شهر مشهد

^۱ الهام مقیمی شهری^{*}، محسن وفامهر^۲

^۱ پژوهشگر دکتری، گروه معماری، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران. نویسنده مسئول.

^۲ استاد تمام گروه معماری، عضو هیات علمی دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی و دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

چکیده

تکامل سریع الگوهای معماری، رشد شهرنشینی و گسترش فناوری‌های هوشمند، ضرورت ادغام اصول بیوفیلیک در محیط‌های مسکونی را برجسته ساخته است. هدف این پژوهش ارزیابی میزان حمایت فناوری‌های هوشمند بیوفیلیک‌محور از اصول بیوفیلیک در آپارتمان‌های میان‌مرتبه شهر مشهد است. پرسش اصلی پژوهش این است وضعیت کنونی ادغام این فناوری‌ها چگونه بوده و کدامیک از آن‌ها از اولویت بالاتری برخوردارند. این مطالعه با رویکرد کمی-کاربردی و روش تحلیلی-توصیفی، بر پایه پرسشنامه‌ای شامل ۱۰ اصل بیوفیلیک و ۲۹ فناوری هوشمند انجام شد که روایی آن با نظر خبرگان و پایایی آن با ضریب آلفای کرونباخ تأیید گردید. داده‌ها از ۱۰۰ معمار، مهندس و برنامه‌ریز شهری به روش هدفمند-گلوله‌برفی گردآوری و با مقیاس لیکرت ۵ و ۷ امتیازی سنجیده شد. تحلیل با آنالوژی شانون و رتبه‌بندی با تکنیک تاپسیس انجام گرفت. نتایج نشان داد اصول تقویت حس سرزندگی، ارتباط با نظام‌های طبیعی، ارتباط بصری با طبیعت و جذابیت زیبایی‌شناختی بیشترین وزن و اهمیت را در ارزیابی‌های فناوری‌های هوشمند داشتند. ادغام فناوری‌ها نامتوازن بوده و تمرکز بر گزینه‌های کم‌هزینه‌تر و اجرایی‌تر است؛ سامانه مدیریت ساختمان، دیوار سبز جمع‌شونده هوشمند، کنترل رطوبت هوشمند، بصری‌سازی بلادرنگ و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، پنجره‌های هوشمند و گرمایش تطبیقی بیشترین همسویی را با اصول بیوفیلیک داشتند. در مقابل، کشاورزی عمودی، باغ هیدروپونیک داخلی، فضاهای مدیتیشن مرتفع و جلوه‌های صوتی-بصری طبیعت‌الهام کمترین ادغام را تجربه کرده‌اند که ناشی از هزینه بالا، نبود استاندارد بومی و محدودیت‌های فنی است. نتیجه‌گیری حاکی از آن است با وجود ظرفیت کالبدی مطلوب، برخی حوزه‌ها به‌ویژه فناوری‌های مرتبط با حضور فیزیکی و تجربیات چندحسی طبیعت نیازمند سیاست‌گذاری هدفمند، آموزش تخصصی، مشوق‌های مالی و توسعه استانداردهای سبز بومی هستند. این رویکرد ضمن ارتقای کیفیت زیست و سلامت ساکنان، به الگویی قابل تعمیم برای سایر شهرها و کاربری‌های ساختمانی می‌تواند تبدیل شود.

واژگان کلیدی: آپارتمان میان‌مرتبه، فناوری هوشمند، معماری بیوفیلیک، معماری مسکونی، طراحی پایدار، مشهد.

^{*} نویسنده مسئول: E-mail: elhammoqimi@yahoo.com

^۱ این مقاله برگرفته از پژوهشی مستقل از نویسنده اول با عنوان "معماری بیوفیلیک و فناوری‌های هوشمند در آپارتمان‌های میان‌مرتبه شهر مشهد" می‌باشد که به راهنمایی نویسنده دوم در دانشکده معماری و هنر دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد انجام شده است.

اصول طراحی بیوفیلیک که بر ادغام عناصر، فرآیندها و فرم‌های طبیعی در محیط ساخته شده تأکید دارند، به طور فزاینده‌ای به عنوان پاسخی به شهرنشینی سریع و چالش‌های مرتبط با آن در مسکن شهری به کار می‌روند. این رویکرد با واردسازی عناصر طبیعی به فضاهای ساختمانی، پاسخی به چالش‌های شهرنشینی سریع و افزایش رفاه انسان است. از سوی دیگر، فناوری‌های هوشمند امکان بهینه‌سازی شرایط داخلی (روش‌های خودکار آبیاری، نورپردازی و تهویه) را فراهم می‌کنند که می‌تواند اثربخشی طراحی بیوفیلیک را تقویت کند. آپارتمان‌های میان‌مرتبه، ساختمان‌هایی با ۴ تا ۱۲ طبقه که محیط زندگی بهینه‌ای را با تعادل میان مقرون‌به‌صرفه بودن، دسترسی و امکانات فراهم می‌کنند. ویژگی‌هایی مانند ارتفاع متوسط (که امکان بهره‌گیری بهتر از نور طبیعی، تهویه موثر و ادغام باغ‌های عمودی و روف‌گاردن‌ها را می‌دهد)، استفاده از مصالح هوشمند و وجود فضاهای مشترک مانند لابی‌ها و حیاط‌های سبز، این ساختمان‌ها را به بستری مناسب برای پیاده‌سازی اصول بیوفیلیک و فناوری‌های هوشمند بدل کرده است. این ترکیب علاوه بر ارتقای سلامت ساکنان و پایداری محیطی، به ایجاد شهرهای انسانی‌تر کمک می‌کند. هرچند هزینه نخستین مصالح هوشمند و سامانه‌های اینترنت اشیا بالا است، اما کاهش مصرف انرژی و افزایش سکونت‌پذیری، در بلندمدت آن را مقرون‌به‌صرفه می‌سازد. شهر مشهد نیز با تراکم بالای آپارتمان‌های میان‌مرتبه، اقلیم گرم و خشک و هویت فرهنگی غنی، بستر چالش‌برانگیزی برای تحقق همزمان اهداف رفاهی و پایداری است. نیاز به تحلیل دقیق فرصت‌ها و موانع ادغام فناوری‌های هوشمند در چارچوب اصول بیوفیلیک در این بافت، انگیزه اصلی پژوهش حاضر است. بنابراین، اهداف اصلی پژوهش عبارتند از: سنجش اهمیت نسبی کارکردهای بیوفیلیک‌محور در بهبود کیفیت سکونت از طریق فناوری‌های هوشمند، شناسایی اصول کلیدی طراحی بیوفیلیک در مجتمع‌های میان‌مرتبه مشهد، رتبه‌بندی سطح ادغام فناوری‌های هوشمند با استفاده از روش تاپسیس، ارائه راهکارهای عملی به معماران و توسعه‌دهندگان برای تقویت کاربرد فناوری‌های هوشمند پشتیبان بیوفیلیک. در مقایسه با پژوهش قبلی این مطالعه ضمن بهره‌گیری اولین رویکرد جامع تلفیق سامانه‌های هوشمند در چارچوب اصول بیوفیلیک ویژه آپارتمان‌های میان‌مرتبه مشهد نوآوری موضوعی خود را اثبات نموده، روش ارزیابی دوسویه‌ای را معرفی می‌کند که اهمیت اصول طراحی بیوفیلیک را با طیف پنج‌درجه و انطباق فناوری‌ها را با طیف هفت‌درجه می‌سنجد و با ادغام و اعمال نتایج اهمیت اصول طراحی بیوفیلیک و رتبه میزان ادغام فناوری‌های هوشمند بیوفیلیک‌محور، دقت تصمیم‌گیری را افزایش داده و امکان اولویت‌بندی راهبردی فناوری‌های هوشمند را فراهم می‌آورد تا چارچوب عملیاتی کاربردی نوین، سیاست‌گذاری و دستورالعمل‌های اجرایی جدیدی برای معماران و توسعه‌دهندگان شهری تدوین شود. پژوهش حاضر با توسعه پرسشنامه‌ای جامع بر پایه اصول طراحی بیوفیلیک و فناوری‌های هوشمند، و توزیع آن در میان کارشناسان معماری آپارتمان‌های میان‌مرتبه مشهد انجام می‌پذیرد. داده‌ها با استفاده از طیف لیکرت و روش رتبه‌بندی تاپسیس تحلیل می‌شوند. محدودیت اصلی مطالعه به تمرکز جغرافیایی بر مشهد (منطقه ۱۲ شهری) و نوع خاص ساختمان‌های میان‌مرتبه مربوط است. با اجرای این تحقیق، علاوه بر پر کردن خلأهای موجود در ادبیات، چشم‌اندازی بومی-محلی از نحوه پذیرش و ادغام فناوری‌های هوشمند در راستای تحقق اهداف بیوفیلیک در معماری مسکونی ارائه خواهد شد. بنابراین این مطالعه به دنبال پاسخ‌گویی به این پرسش مهم و اساسی است وضعیت کنونی ادغام فناوری در معماری مسکونی مشهد چگونه بوده است. همچنین چه جنبه‌هایی از اصول طراحی بیوفیلیک برای فناوری‌های هوشمند بکارگرفته شده در معماری آپارتمان‌های میان‌مرتبه مشهد اهمیت دارند و چه توصیه‌هایی در راستای بهبودهای آینده و کاربردهای گسترده‌تر فناوری‌های هوشمند در میان آپارتمان‌های میان‌مرتبه مشهد می‌توان ارائه داد تا از این رهگذر ساختمان‌های مقاوم‌تر، پایداری‌تر و هماهنگ‌تر با طبیعت حاصل آید. بر این اساس، پرسش‌های پژوهش به شرح زیر است:

- وضعیت کنونی ادغام فناوری‌های هوشمند بیوفیلیک‌محور در آپارتمان‌های میان‌مرتبه شهر مشهد چگونه است؟

سؤالات فرعی:

- کدام اصول بیوفیلیک بیشترین ارتباط و همسویی را با فناوری‌های هوشمند ادغام‌شده در این آپارتمان‌ها دارند؟
- کدام فناوری‌های هوشمند در حمایت از اصول بیوفیلیک کارآمدترند و دلایل این کارآمدی چیست؟

■ مبانی نظری

■ طراحی بیوفیلیک

طراحی بیوفیلیک شیوه آمیختگی مولفه‌های طبیعی در معماری است تا گرایش ذاتی انسان به طبیعت را پاسخ داده و سلامت روانی و جسمانی او را ارتقا بخشد (Kellert & Wilson, 1995, 67). این رویکرد با اصولی نظیر پیوند مستقیم با طبیعت، بیشینه نور روز، بهره‌گیری مصالح بوم‌سازگار و الهام‌گیری فرم‌ها و الگوهای طبیعی عمل می‌کند؛ اصولی که با سنجه‌هایی چون بهبود نورگیری، ارتقای کیفیت هوا و کاربرد مواد پایدار ارزیابی می‌شوند (Browning et al., 2014, 12). سازمان‌دهی فضایی الهام گرفته از اکوسامانه‌ها تحت طراحی بیوفیلیک، همراه با عناصر عینی مانند نور و پوشش گیاهی و نشانه‌های غیرمستقیم نظیر بافت و الگو، احساس امنیت، آرامش و تعامل اجتماعی را افزایش می‌دهد (Kaplan & Kaplan, 1989, 272). حضور این عناصر، عملکرد شناختی را تقویت، استرس را کاهش و رضایت زندگی را بالا می‌برد (Marcus & Sachs, 2013, 298-300)، در عین حال بهره‌وری انرژی و پایداری اکولوژیک ساختمان را بهبود می‌بخشد. از منظر نظری، ویژگی‌های محیطی، فرم‌ها و فرآیندهای طبیعی، نور و فضا، حس مکان و رابطه انسان-طبیعت ستون‌های اصلی این تفکر را تشکیل می‌دهند (Zhong et al., 2022, 147; Agboola et al., 2024, 130). در عرصه اجرا نیز به مدد طراحی کم‌مصرف، مصالح دوست‌دار محیط و فضاهای منعطف، دوام سازه، جذابیت بصری و تجربه حسی کاربران افزایش یافته و سکونت‌گاه با نیازهای متغیر انطباق می‌یابد (Kellert & Calabrese, 2015, 18). اصول طراحی بیوفیلیک و فناوری‌های هوشمند کلیدی دو حوزه کلیدی در معماری معاصر هستند که در ترکیب با یکدیگر می‌توانند محیط‌های مسکونی پایدار و سلامت‌محوری خلق نمایند. مبانی نظری این دو حوزه در قالب جدول ۱ و جدول ۲ به صورت مجزا ارائه شده است.

جدول ۱. اصول طراحی بیوفیلیک (Kellert & Calabrese, 2015, 18)

اصول	معیار	کارکرد در بافت معماری
ارتباط بصری با طبیعت	بهینه‌سازی نور طبیعی	افزایش رضایت بصری ساکنان از طریق پنجره‌های گسترده و طراحی کریدورهای نوری برای هدایت نور خورشید
تقلیدگری از طبیعت	بکارگیری الگوها و اشکال طبیعی	ایجاد حس آشناپنداری با استفاده از فرم‌های ارگانیک (مانند دیوارهای موجی یا سقف‌های فراکتالی) در نما و پلان
حضور آب	عناصر آبی	کاهش استرس ساکنان با طراحی آب‌نماهای تعاملی در حیاط مرکزی یا لابی مجتمع‌های مسکونی
حضور طبیعت در فضا	فضای سبز/گیاهان داخلی	بهبود کیفیت هوا و کاهش آلاینده‌ها از طریق دیوارهای سبز عمودی و گلدان‌های هوشمند در بالکن‌ها
چشم‌انداز و پناهگاه	احساس محافظت ناشی از منطقه راحتی	طراحی سایبان‌های طبیعی با پوشش گیاهی رونده برای ایجاد فضاهای نیمه‌خصوصی در تراس‌ها
نور طبیعی و فضا	پویایی نور طبیعی	تنظیم خودکار پرده‌ها و نورگیرها بر اساس زاویه خورشید برای ایجاد سایه‌روشن‌های طبیعی در فضاهای نشیمن
استفاده گسترده مصالح طبیعی	بکارگیری مصالح طبیعی	افزایش حس تعلق به مکان با استفاده از سنگ‌های بومی و چوب‌های بازبافتی در کفپوش و نما
احساس سرزندگی	جذابیت زیبایی‌شناختی	طراحی عناصر تعاملی مانند آبشارهای داخلی یا دیوارهای صوتی با الگوی برگ درختان برای تحریک حواس
رعایت الگوهای سازماندهی فضایی	عوامل طراحی	چیدمان فضاها حول یک حیاط مرکزی با الگوی حلزونی برای تقلید از سازماندهی طبیعی اکوسامانه‌ها

■ فناوری‌های هوشمند

فناوری‌های هوشمند مجموعه سامانه‌ها و حسگرهایی هستند که با خودکارسازی، جمع‌آوری داده و اتصال، کارایی و آسایش ساکنان ساختمان را ارتقا می‌دهند (Abioye et al., 2021, 1). از جمله آن‌ها به تهویه مطبوع هوشمند، کنترل نور پویا، حسگرهای اینترنت اشیا برای پایش کیفیت هوا و سامانه‌های مدیریت ساختمان می‌توان اشاره کرد که مصرف انرژی و شرایط

محیط داخلی را بهینه می‌سازند (Kibert, 2016, 312). فناوری‌های تطبیقی مانند روشنایی و سایه‌زنی خودکار و کنترل اقلیم هوشمند، هم راحتی گرمایی و کیفیت هوا را تضمین می‌کنند و هم بازده انرژی را افزایش می‌دهند. مصالح نوین جلبک‌پایه و دیوارهای سبز هوشمند در ارتقای جاذبه زیباشناختی و پایداری بیوفیلیک نقش دارند، در حالی که نماهای تعاملی یا واقعیت افزوده تجربه‌های غوطه‌ور طبیعی را خلق می‌کنند. بهینه‌سازی نور طبیعی با پنجره‌های هوشمند (Lantonio & Krarti, 2022, 1)، آبیاری خودکار گیاهان داخلی (Okul, 2024, 31) و روشنایی پویا (URL 1) کیفیت محیط را بهبود می‌بخشند. ادغام این سامانه‌ها در آپارتمان‌ها، حس سکوت و آرامش طبیعت را با راحتی فناوری مدرن پیوند زده و سکونتی پایدار و پویا فراهم می‌آورد (Kumar et al., 2021, 207; Benavente-Peces, 2019, 12). جدول ۲ برخی فناوری‌های هوشمند و کارکردهای بیوفیلیک‌محور آن‌ها در بافت معماری مسکونی در راستای اهداف پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۲. فناوری‌های هوشمند و کارکردهای بیوفیلیک‌محور

منبع	کاربرد بیوفیلیک‌محور	فناوری
Aziz et al., 2024, 325	افزایش کیفیت محیط داخلی و راحتی ساکنان (سنسورهای اینترنت اشیا و سامانه‌های خودکار)	فناوری‌های طراحی داخلی
Şahin & Mengüç, 2018, 145	بازسازی سه‌بعدی فضا جهت تشخیص انرژی در داخل ساختمان‌ها	کاغذ دیواری سه‌بعدی
Yoshimura & Sakashita, 2006, 227	ترویج تعادل اکولوژیکی و رفاه انسان در چارچوب معماری بیوفیلیک‌محور	تجارب و پخش رایحه بیوفیلیک
Aziz et al., 2024, 320	ادغام عناصر اکوسیستم در راستای پشتیبانی از حفاظت منابع و طراحی بر محوریت ساکنان آپارتمان	طراحی مولد عناصر بیوفیلیک و فضاهای بیرونی
Roudbari, 2025, 1	با انرژی کارآمد برای ارتقای پایداری محیطی	مصالح ساختمانی جلبک‌پایه
Wood et al., 2012, 212	پیاده‌سازی برای بهبود کارایی انرژی و کیفیت محیط داخلی	دیوارهای جمع‌شونده سبز
Bakirel et al., 2023, 203	ادغام المان طبیعی و بهبود زیبایی ساختمان	سامانه‌های نمای طبیعت-الهامی
Aziz et al., 2024, 326	ارتقای ادغام اکوسیستم و حفاظت از منابع در طراحی ساختمان پایدار	روف گاردن (بام سبز)
Aziz et al., 2024, 326	استفاده جهت کارایی انرژی و بهبود کیفیت محیط داخلی	پنجره‌های هوشمند
Aziz et al., 2024, 318	جهت افزایش کارایی انرژی و راحتی ساکنان	سامانه‌های گرمایش تطبیقی
Kim et al., 2022, 59	بهبود نور طبیعی و کاهش مصرف انرژی با تنظیم به سطوح نور خورشید	نورگیرهای جمع‌شونده
Farzaneh et al., 2021, 19	بهبود کیفیت هوای داخلی و کارایی انرژی از طریق سامانه‌های تهویه سفارشی	تهویه و تصفیه هوای شخصی‌سازی شده هوشمند
&Ambroziak, Borkowski, 2025, 16	حفظ سطوح رطوبت بهینه، ارتقای راحتی و کاهش رشد قارچ کپک در آپارتمان	کنترل رطوبت هوشمند
Kindangen et al., 2024, 78-79	تنظیم خودکار جهت حداکثرسازی نور روز و حداقل‌سازی خیرگی (نور شدید نامناسب مانع دید واضح) و افزایش گرما	پرده‌های هوشمند و خودکار در بهینه‌سازی نور طبیعی
آصفی و واسعی، ۱۳۹۷، ۱۱؛ Dietz, 2006, 30	ایجاد فضاهای بیرونی جذاب که از عناصر و امکانات آبی جهت خنک کردن و زیبایی استفاده می‌کنند	فناوری آب‌نماهای تعاملی
&Pacek, Pomerville, 1988, 1	تسهیل حرکت عابر پیاده در حالی که سنسورهای محیطی را برای ایمنی و راحتی ادغام می‌کند	فناوری هوشمند پیاده‌رو مرتفع
Reipschläger et al., 2020, 1	ارتقای تجربه ساکنان آپارتمان با ارائه شبیه‌سازی‌های طبیعت فراگیر در محیط‌های شهری	نمایشگرهای طبیعت واقعیت‌افزوده
Fineberg et al., 2022, 6-8	ایجاد محیط‌های پویا که می‌توانند بر روحیه تأثیر بگذارند و تعامل ساکنان آپارتمان را در فضاهای عمومی افزایش دهند	جلوه‌های صوتی‌بصری شبیه‌سازی ردوبرق
Takeuchi, 2012, 45	استفاده از منابع نور طبیعی برای کاهش مصرف انرژی و ایجاد تجربیات زیبایی‌شناختی منحصر به فرد	نورپردازی بیولومینسانس

منبع	کاربرد بیوفیلیک محور	فناوری
Prasertseree & Tuaycharoen, 2025, 21	بهینه سازی نور طبیعی برای بهبود کارایی انرژی و رفاه ساکنان	روشنایی شبانه روزی
Virmani et al., 2024, 50; Porter et al., 2017, 205	ارتقای رفاه ساکنان از طریق مناطق استراحت اختصاصی ادغام شده با کنترل های محیطی هوشمند	فضاهای مدیتیشن مرتفع
Chien & Wang, 2014, 376	ارائه فضاهای شخصی برای کاهش استرس، با استفاده از فناوری هوشمند برای راحتی بهینه	اتاقک های آرامش بخش مجزا
Sivakumar et al., 2022, 1	پیاده سازی هشدارهای بلادرنگ به منظور ارتقای ایمنی در مناطق زلزله خیز، با ادغام اینترنت اشیا برای نظارت	سامانه های هوشمند هشدار زلزله
Agrawal & Shrikhande, 2006, 246-248	استفاده از مواد و تکنیک های طراحی پیشرفته برای بهبود مقاومت در برابر فعالیت های لرزه ای	سازه های مقاوم زلزله
Heidari et al., 2024, 313	بهینه سازی بکارگیری انرژی و ارتقای کارایی عملیاتی از طریق کنترلرهای خودکار و ادغام اینترنت اشیا	سامانه مدیریت ساختمان
Almusaed et al. 2024, 26	تسهیل مدیریت پویای پروژه و تنظیمات طراحی از طریق تجسم داده های بلادرنگ	بصری سازی بلادرنگ و مدل سازی اطلاعات ساختمان
Tiwari & Vij, 2024, 17	ترویج تولید غذای پایدار در داخل ساختمان ها، با استفاده از سامانه های آبیاری و نظارت هوشمند	باغ های داخلی هیدروپونیک
Akintuyi, 2024, 114	ادغام فناوری های هوشمند برای استفاده کارآمد از منابع در کشاورزی شهری، ارتقای امنیت غذایی	کشاورزی عمودی
Hadidi et al., 2022, 171	بهینه سازی استفاده از آب در مناظر طبیعی و کشاورزی از طریق نظارت بر رطوبت خاک در زمان واقعی	آبیاری هوشمند با سنسورهای رطوبت سنج

■ آپارتمان های مسکونی میان مرتبه

آپارتمان های مسکونی میان مرتبه به ساختمان هایی ۴ تا ۱۲ طبقه دارای راه پله گفته می شود که تعادلی میان تراکم متوسط شهری و دسترسی به سطح زمین برقرار می کنند. سازه های بیش از ۱۲ طبقه معمولاً تا ۲۵ و حتی ۴۰ طبقه به بالا که ممکن است ترکیبی از کاربری مسکونی، اداری و خدماتی باشند. در تبیین اصول معماری بیوفیلیک در هر نوع ساختمان لازم است اصول بیوفیلیک مستقیم و غیرمستقیم بیان گردد. حضور فیزیکی عناصر زنده طبیعت (گیاهان، آبنا) که بیشترین تأثیر مثبت را بر سلامت روان و فیزیولوژی ساکنان دارد، به اصول بیوفیلیک مستقیم و به کارگیری مصالح طبیعی، فرم ها، الگوها و نمادهای طبیعی برای القای حس طبیعت در فضاهای بسته به اصول بیوفیلیک غیرمستقیم مربوط می شود. در آپارتمان های میان مرتبه، تعامل هم زمان با فضای خارجی (تراس و پنجره ها) و داخلی (نمای نیمه باز) امکان پذیر است، در حالی که در آپارتمان های بلندمرتبه بیشتر به فضاهای داخلی مانند آتریوم و دیوارهای سبز وابسته است. ویژگی های کلیدی آپارتمان های میان مرتبه برای پیاده سازی بیوفیلیک به قرار زیر است:

- ارتفاع متوسط (۴-۱۲ طبقه) که دید شهری مناسب و دسترسی به فضای سبز محدود را ترکیب می کند.
 - پنجره و تهویه طبیعی در تمامی واحدها و فضاهای مشترک به دلیل فاصله نه چندان زیاد از زمین.
 - تراس ها و بالکن های نیمه باز برای استقرار گیاهان و ارتباط مستقیم با طبیعت.
 - انعطاف در طراحی داخلی و توانایی تغییر چیدمان واحدها با هزینه و زمان کمتر.
 - نگهداری ساده تر و هزینه عملیاتی پایین تر نسبت به ساختمان های بلندمرتبه (Liu & Guo, 2024, 7).
- در ادامه، در جدول ۳ مقایسه ای بین دو نمونه آپارتمان میان مرتبه و بلندمرتبه ارائه شده است.

جدول ۳. مقایسه خصوصیات آپارتمان میان مرتبه و بلندمرتبه (نگارندگان)

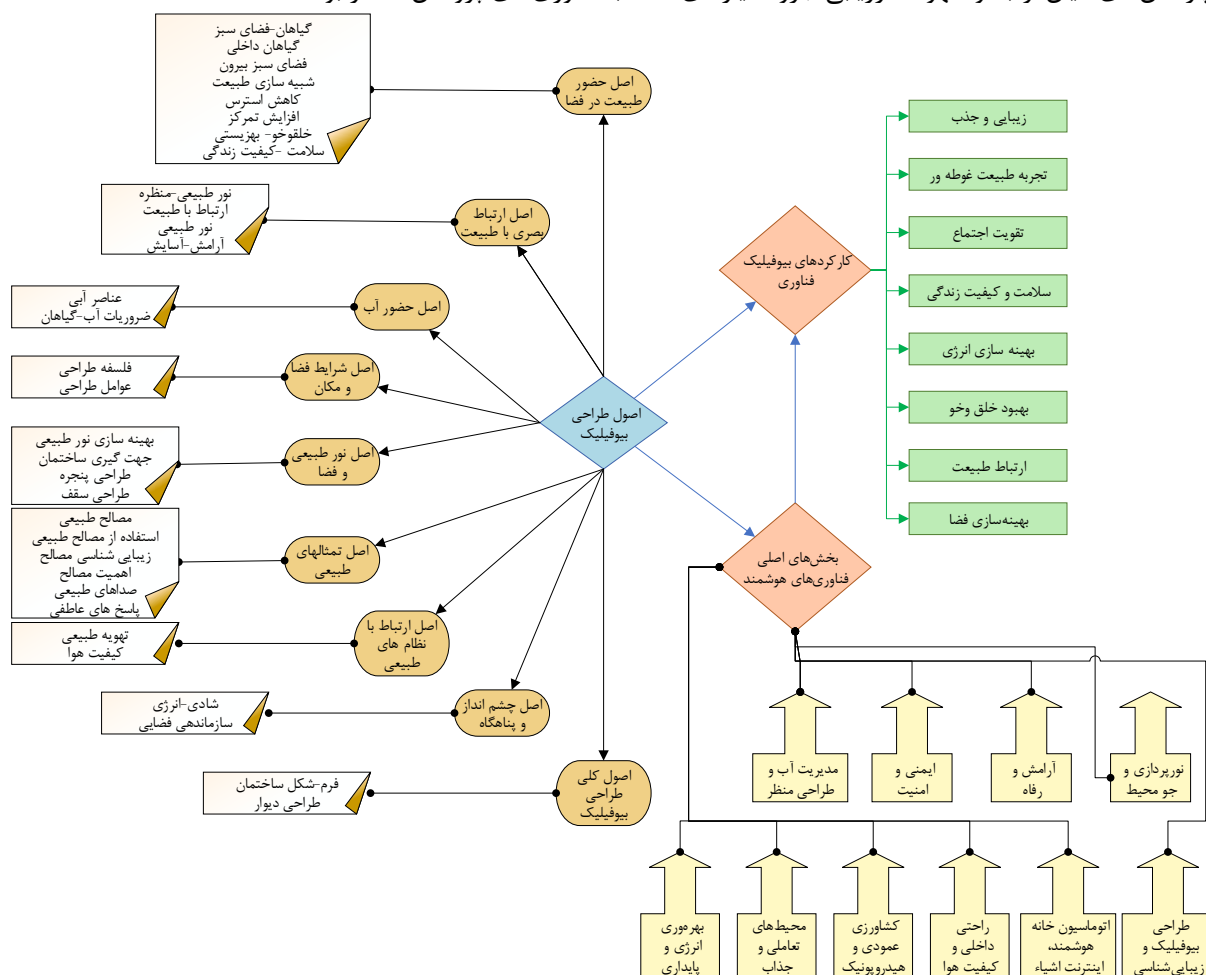
ویژگی	آپارتمان میان مرتبه	آپارتمان بلندمرتبه
ارتفاع	۴-۱۲ طبقه	بیش از ۱۲ طبقه
عناصر بیوفیلیک مستقیم	بالکن ها و تراس های نیمه باز با گیاهان گلدانی	نمای سبز عمودی و باغ های میانی طبقه (آتریوم)
عناصر بیوفیلیک غیرمستقیم	مصالح طبیعی (چوب، سنگ)، نقوش و تصاویر طبیعت	دیوارهای سبز و سازه های پوشیده از خز و فضاهای مشبک
فضاهای مشترک	تراس ها و فضای نیمه باز مشترک	آتریوم ها و اسکای گاردن های داخلی
نور و تهویه طبیعی	پنجره های باز شو و تهویه متقاطع به دلیل ارتفاع معقول	استفاده از چاه نوری و سامانه های مکانیکی تهویه
چالش های نگهداری	هزینه نگهداری کمتر و دسترسی آسان به گیاهان	هزینه بالا، نیاز به تیم تخصصی گیاهشناسی، مسائل وزنی و باد
انعطاف پذیری طراحی	تغییرات داخلی ساده به دلیل ساختار سبک تر	هسته سخت بتنی- فولادی با محدودیت تغییرات
تأثیر بر سلامت و رفاه	بهبود رفاه ساکنان از طریق دسترسی به نور و گیاهان	مزایای روانی آتریوم و اسکای گاردن اما گاهی کیفیت ضعیف هوا

روش تحقیق

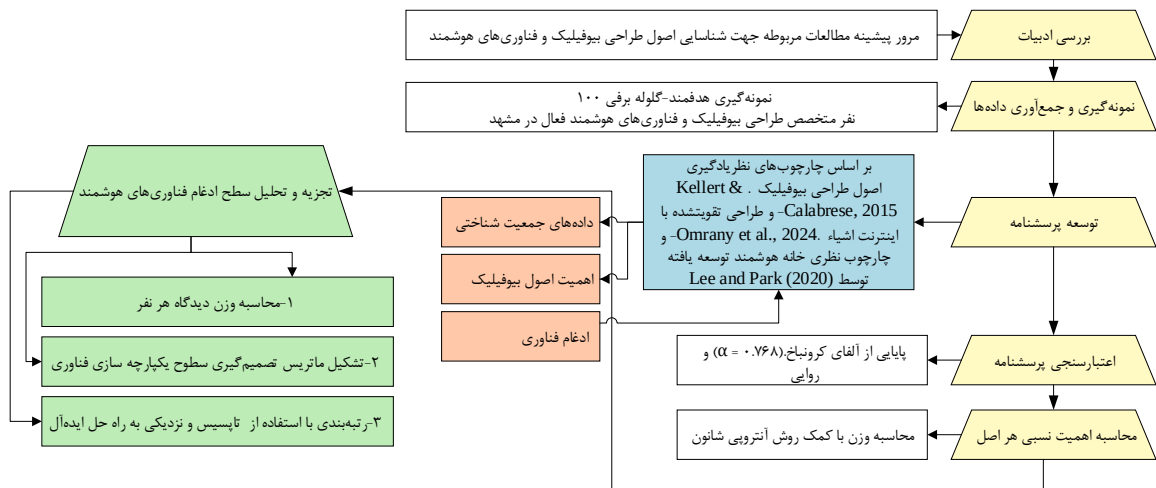
در این پژوهش، به منظور تدوین پرسشنامه ای جامع ارزیابی وضعیت ادغام فناوری های هوشمند بیوفیلیک محور در آپارتمان های مسکونی میان مرتبه مشهد، از یک رویکرد نظام مند و تلفیقی بهره برده شد. ابتدا با مرور ادبیات جامع بر مبنای اصول طراحی بیوفیلیک (Kellert & Calabrese, 2015, 10)، طراحی تقویت شده با اینترنت اشیا (Omran et al., 2024, 13) و مدل خانه هوشمند (Lee & Park, 2020, 2) چارچوب نظری تحقیق مستقر گردید. سپس با توجه به چهار راهبرد کلیدی (وضوح و قابلیت سنجش عملکرد بیوفیلیک فناوری ها، تناسب با اقلیم و فرهنگ محلی، ارتباط مستقیم با ساختار و مصالح معماری و امکان پایش کمی شاخص ها) گویه های اولیه استخراج شدند تا به صورت دقیق میزان حضور و اثربخشی فناوری ها در محیط های مسکونی بتواند مورد ارزیابی و تحلیل قرار گیرد.

منطقه ۱۲ شهرداری مشهد، به دلیل وسعت زیاد، رشد سریع جمعیت، تنوع فرهنگی، تراکم چشمگیر ساخت و سازهای مسکونی و روند فزاینده به کارگیری فناوری های هوشمند با رویکرد بیوفیلیک، به عنوان مطالعه موردی برگزیده شد. مجتمع های مسکونی میان مرتبه این منطقه که با محدودیت نور طبیعی، تهویه ناکارآمد و نیاز به ارتقای کیفیت زندگی در بافت متراکم روبه رو هستند، نمونه های تحلیلی پژوهش بودند. به سبب فقدان بانک اطلاعاتی یکپارچه از متخصصان بیوفیلیک و فناوری هوشمند در مشهد، از روش نمونه گیری هدفمند گلوله برفی استفاده شد. ابتدا فهرست اولیه ۲۰ نفره معماران، شهرسازان و مهندسان عمران دارای سابقه کار در پروژه های بیوفیلیک یا فناوری های هوشمند ساختمانی منطقه ۱۲ با شبکه های حرفه ای، دانشگاهی و نهادهای مرتبط با توسعه شهری شناسایی شد؛ سپس افراد معرفی شده، متخصصان واجد شرایط دیگر را پیشنهاد کردند و این فرآیند تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافت. معیارهای ورود به نمونه شامل حداقل ۵ سال سابقه حرفه ای در معماری، شهرسازی یا فناوری ساختمان هوشمند؛ مدرک دانشگاهی مرتبط؛ آشنایی با اصول بیوفیلیک و کاربرد فناوری هوشمند در پروژه های مسکونی؛ تجربه مستقیم در منطقه ۱۲؛ تمایل به مشارکت در پرسشنامه ساختاریافته بود. از جامعه تخمینی کل ۱۵۰ نفره، ۱۰۰ متخصص (اعضای هیئت علمی، معماران، مهندسان طراحی پایدار و برنامه ریزان شهری) انتخاب شد. این حجم، علاوه بر تأمین اشباع کیفی، برای تحلیل های چندمعیاره (آنتروپی شانون و تاپسیس) کفایت داشت و تنوع دیدگاه ها را تضمین کرد. پرسشنامه دوبخشی پژوهش شامل ارزیابی اهمیت اصول بیوفیلیک در مقیاس لیکرت ۵ درجه ای و ارزیابی میزان ادغام فناوری های هوشمند در مقیاس لیکرت ۷ درجه ای بود. ابتدا ۱۴ اصل بیوفیلیک و ۱۵ بخش فناوری هوشمند استخراج شد. پس از داوری خبرگان و تحلیل میانگین ها (آستانه ۲ برای اصول و ۳ برای فناوری ها)، ۹ اصل و ۱۰ بخش فناوری در مدل نهایی (تصویر ۱) باقی ماند. روایی صوری و محتوایی با قضاوت استادان دانشگاهی و پایایی با آلفای کرونباخ ۰/۷۶۸ تأیید شد. گام های کامل روش شناختی در تصویر ۲ ارائه شده است. این رویکرد، ضمن کاهش سوگیری روش هدفمند، تنوع تخصصی و اعتبار نتایج را ارتقا داد و زمینه تلفیق اصول طراحی بیوفیلیک با فناوری های هوشمند در ارتقای کیفیت سکونت منطقه ۱۲ مشهد را فراهم ساخت.

وزندهی اصول بیوفیلیک با تکنیک آنتروپی شانون صورت گرفت تا بر اساس آرا خبرگان، اهمیت نسبی هر اصل تعیین شود و عدم اطمینان نیز کاهش یابد. با اتکال به این اوزان، میزان ادغام ۱۰ فناوری هوشمند محاسبه و ماتریس تصمیم تدوین شد؛ سپس الگوریتم تاپسیس در اکسل ۲۰۲۴ برای رتبه‌بندی وضعیت ادغام فناوری‌ها به کار رفت. این رویکرد چندمعیاره، بیشترین سطح ادغام فناوری‌های همسو با اهداف بیوفیلیک را آشکار ساخت. گزینش فناوری‌ها بر مبنای انطباق با شرایط زیست‌محیطی، فرهنگی و معماری مشهد، سازگاری با روش ساخت آپارتمان‌های مسکونی میان‌مرتبه و سهولت ارزیابی انجام گرفت. از روش آنتروپی شانون برای محاسبه وزن‌ها برای هر اصل بیوفیلیک بر اساس نظرات متخصصان استفاده گردید. این روش اهمیت نسبی اصول را تعیین کرده و عدم اطمینان در تصمیم‌گیری را کاهش داد. سطوح ادغام فناوری‌های هوشمند با استفاده از پاسخ‌های وزنی حاصله تحلیل گردید و بعد از آن یک ماتریس تصمیم ساخته و بر اساس تکنیک تاپسیس برای رتبه‌بندی فناوری‌ها با استفاده از نرم‌افزار اکسل مایکروسافت نسخه ۲۰۲۴ استفاده شد. این روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، شناسایی فناوری‌هایی را که بیشتر با اهداف طراحی بیوفیلیک همسو بودند، تسهیل کرد. چارچوب تحقیق بر کاربرد خاص زمینه تأکید داشته و همسویی فناوری‌ها با ویژگی‌های زیست‌محیطی، فرهنگی و معماری مشهد و همچنین از نظر سازگاری با روش‌های ساخت و ساز آپارتمان‌های میان‌مرتبه و سهولت ارزیابی جزو معیارهای انتخاب فناوری‌های پژوهش حاضر بود.



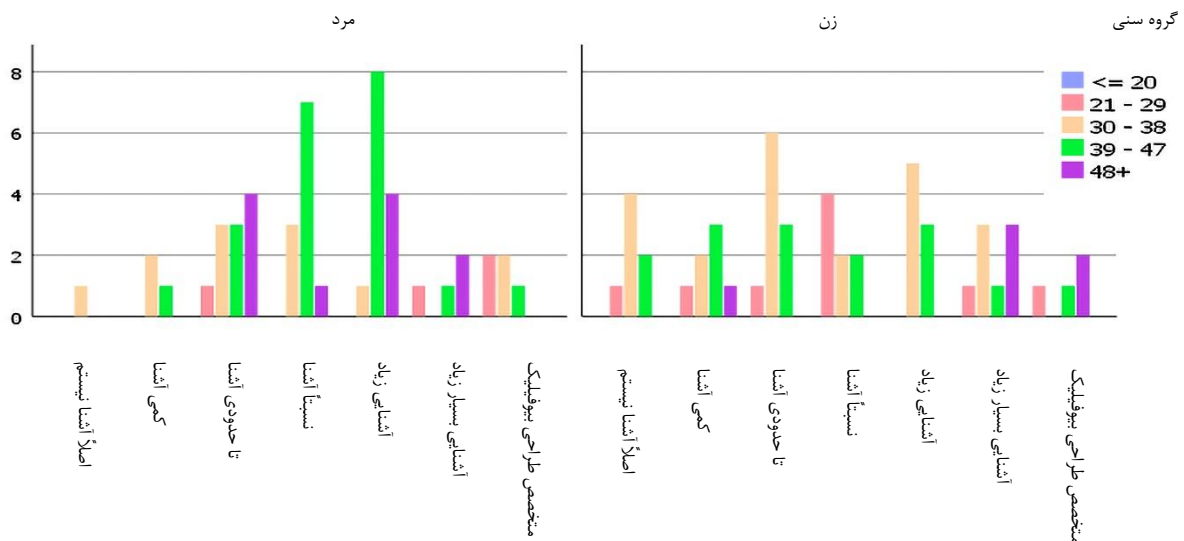
تصویر ۱. مدل مفهومی پژوهش حاضر (برگرفته از خروجی نرم‌افزار مایکروسافت ویزیو نسخه ۲۰۲۴)



تصویر ۲. مراحل روش شناختی اجرای پژوهش (برگرفته از خروجی نرم‌افزار میکروسافت ویزیو نسخه ۲۰۲۴)

یافته‌ها

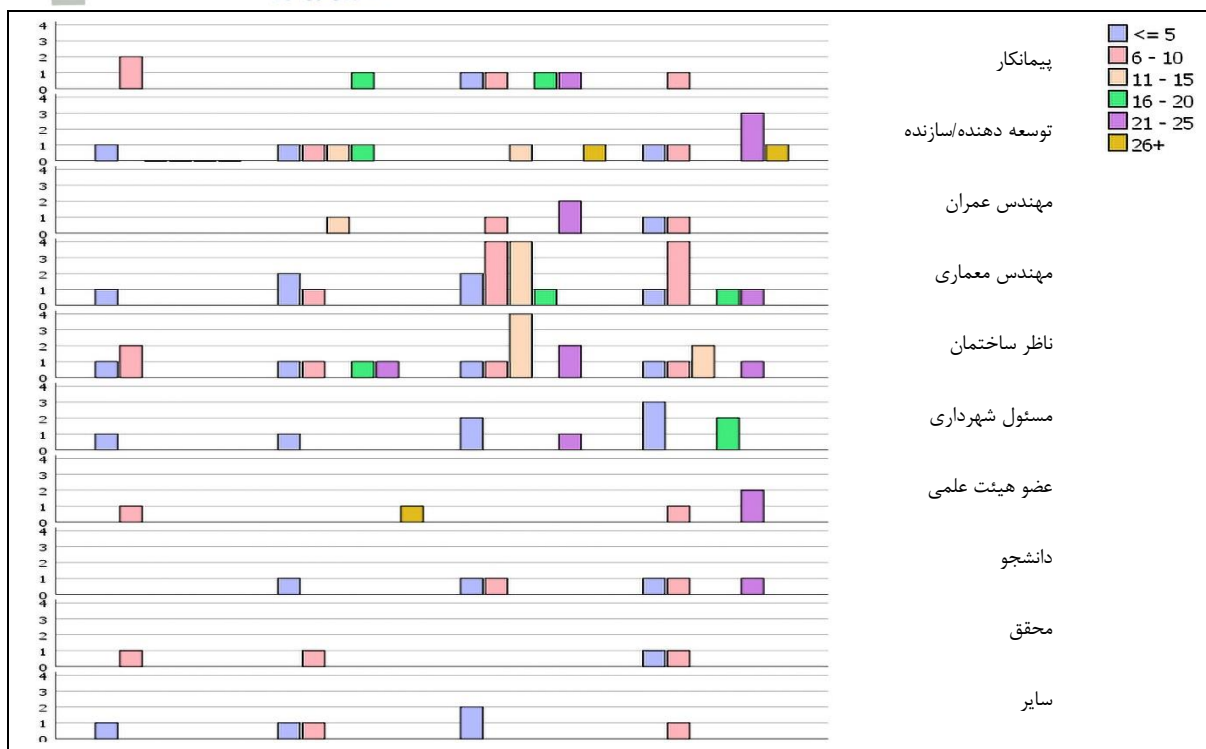
مشخصات جمعیت‌شناختی نمونه پژوهش به شرح تصویر ۳ و تصویر ۴ آورده شده است.



تصویر ۳. سطح آشنایی نمونه پژوهش حاضر با اصول طراحی بیوفیلیک (برگرفته از خروجی نرم‌افزار میکروسافت اکسل نسخه ۲۰۲۴)

بر اساس تصویر ۳، مشخص می‌شود غالب شرک کنندگان پژوهش حاضر با آشنایی زیاد و نسبتاً آشنا از اصول طراحی بیوفیلیک در میان مردان در رده سنی ۳۹ تا ۴۷ سال و در میان زنان در رده سنی ۳۰ الی ۳۸ سال قرار گرفتند.

سابقه خدمت	پست شغلی	سطح تحصیلات
------------	----------	-------------



تصویر ۴. سطح تحصیلات، سابقه و تجربه کاری نمونه پژوهش حاضر (برگرفته از خروجی نرم افزار مایکروسافت اکسل نسخه ۲۰۲۴)

طبق تصویر ۴، غالب شرکت کنندگان در این پژوهش از میان مهندسان معماری، ناظر ساختمان و توسعه دهندگان صنعت ساخت و ساز مشهود با سطح تحصیلات غالباً کارشناسی ارشد و دکتری سابقه ۶-۱۰ سال، ۱۱-۱۵ انتخاب گردیدند. روند کار بدین صورت بود ابتدا داده‌های معیارهای کمی پاسخ‌ها در یک صفحه گسترده اکسل (ستون: معیارهای طراحی بیوفیلیک) ثبت و طبق رابطه ۱ (Sadeghitabar et al., 2025, 9) بی‌مقدارسازی هر پاسخ محاسبه شد. از آنجا که مقیاس لیکرت از نوع مثبت (اهمیت کم به بالا) می‌باشد، بنابراین بیشینه هر معیار در میان پاسخ‌ها در مخرج کسر ظاهر گردیده است.

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{kj})} \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, m, k = 1, \dots, 100 \quad (1)$$

که در آن n تعداد پاسخ‌دهندگان، m تعداد معیارهای معماری بیوفیلیک، x_{ij} نشان‌دهنده امتیاز خام پاسخ‌دهنده i ام به معیار طراحی بیوفیلیک j ، y_{ij} نشان‌دهنده امتیاز بی‌مقدارسازی شده برای پاسخ‌دهنده i ام در رابطه با تأثیرات فناوری‌های هوشمند بر معیار طراحی بیوفیلیک می‌باشد. بعد، نرمال‌سازی پاسخ‌های کمی طبق رابطه ۲ (Sadeghitabar et al., 2025, 9) نرمات بی‌مقدارسازی شده y_{ij} نرمال‌سازی شدند.

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{k=1}^n y_{kj}} \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

بعد از آن، آنتروپی H_j برای هر معیار طراحی بیوفیلیک با استفاده از رابطه ۳ (Sadeghitabar et al., 2025, 9) محاسبه گردید.

$$H_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (3)$$

که در آن H_j آنتروپی معیار طراحی بیوفیلیک j ام را نشان می‌دهد. وزن برای هر معیار طراحی بیوفیلیک از مقادیر آنتروپی طبق رابطه ۴ (Sadeghitabar et al., 2025, 9) مشتق شده است:

$$w_j = \frac{1-H_j}{\sum_{k=1}^m (1-H_k)} \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

که در آن w_j وزن معیار ژام معماری بیوفیلیک و $1-H_j$ عدم قطعیت مربوط به توزیع نمرات برای هر اصل طراحی بیوفیلیک را نشان می‌دهند. رابطه ۴ تضمین می‌کند مجموع وزن‌ها برابر با عدد یک باشد و به طور صریح اهمیت و وزن نسبی هر معیار طراحی بیوفیلیک ناشی از فناوری‌های هوشمند در معماری مسکونی نسبت به بقیه معیارها نشان می‌دهد. نتایج اهمیت هر یک از معیارها و کارکردهای بیوفیلیک فناوری‌های هوشمند در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. وزن محاسبه شده و اهمیت نسبی هر معیار و کارکرد طراحی بیوفیلیک (نگارندگان)

اصول طراحی بیوفیلیک	معیار طراحی بیوفیلیک	کارکردهای بیوفیلیک فناوری	وزن محاسبه شده	رتبه
ارتباط بصری با طبیعت	بهینه‌سازی نور طبیعی	بهینه‌سازی انرژی	۰/۰۳۶	۱۲
	ارتباط با طبیعت	ارتباط طبیعت	۰/۰۱۵	۲۲
اصول کلی طراحی بیوفیلیک	استفاده گسترده مصالح طبیعی	سلامت و کیفیت زندگی	۰/۰۱۰	۲۵
	پاسخ‌های عاطفی	زیبایی و جذب	۰/۰۷۳	۳
	فلسفه طراحی	سلامت و کیفیت زندگی	۰/۰۲۹	۱۶
	بکارگیری مصالح طبیعی	زیبایی و جذب	۰/۰۶۰	۵
تقلیدگری از طبیعت	بکارگیری الگوها و اشکال طبیعی	زیبایی و جذب	۰/۰۴۱	۹
تکامل ارتباط با نظام‌های طبیعی	کیفیت هوا	سلامت و کیفیت زندگی	۰/۰۴۳	۸
	راحتی و آسایش گرمایی	سلامت و کیفیت زندگی	۰/۰۱۲	۲۴
	شرایط فضا و مکان	بهینه‌سازی فضا	۰/۰۲۴	۱۹
چشم‌انداز و پناهگاه	احساس محافظت ناشی از منطقه راحتی	تقویت اجتماع	۰/۰۲۸	۱۷
احساس سرزندگی	جذابیت زیبایی‌شناختی	زیبایی و جذب	۰/۰۱۲	۱
	تعاملات اجتماعی	تقویت اجتماع	۰/۰۳۱	۱۵
	واکنش احساسی شادابی	بهبود خلق و خو	۰/۰۲۱	۲۱
	تجربه کاربر	ارتباط طبیعت	۰/۰۲۲	۲۰
حضور آب	عنصر آبی	سلامت و کیفیت زندگی	۰/۰۲۴	۱۸
حضور طبیعت در فضا	فضای سبز/گیاهان داخلی	ارتباط طبیعت	۰/۰۱۴	۲۳
	راحتی، سلامت و کیفیت زندگی کاربر	بهبود خلق و خو	۰/۰۷۲	۴
	فضای سبز بیرونی/گیاهان	ارتباط طبیعت	۰/۰۳۳	۱۴
	صداها طبیعی	بهبود خلق و خو	۰/۰۴۷	۷
	شبیه‌سازی طبیعت	تجربه طبیعت غوطه‌ور	۰/۱۰۰	۲
	فضای سبز/گیاهان داخلی	سلامت و کیفیت زندگی	۰/۰۳۷	۱۰
رعایت الگوهای سازماندهی فضایی	عوامل طراحی	تقویت اجتماع	۰/۰۳۷	۱۱
نور طبیعی و فضا	نور طبیعی	بهینه‌سازی انرژی	۰/۰۳۴	۱۳
	پویایی نور طبیعی	بهینه‌سازی انرژی	۰/۰۵۶	۶

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد هر چه وزن محاسبه شده با استفاده از روش آنتروپی شانون بزرگ‌تر باشد، رتبه حاصله از لحاظ اهمیت نسبی آن معیار کمتر خواهد بود و به نوعی بیانگر اهمیت نسبی بسیار بالاتر آن جنبه، تأثیر و کارکرد بهبوددهنده اصول معماری بیوفیلیک آن فناوری هوشمند مدنظر در مشهود می‌باشد. بر این اساس شش جنبه مهم-برتر اصول طراحی بیوفیلیک در مشهود به قرار زیر است:

۱. جذابیت زیبایی‌شناختی (کارکرد زیبایی و جذب‌کنندگی فناوری‌های هوشمند) - وزن ۰/۱۰۲
۲. شبیه‌سازی طبیعی (تجربه غوطه‌وری در طبیعت) - وزن ۰/۱
۳. پاسخ عاطفی مثبت (زیبایی و جذابیت) - وزن ۰/۰۷۳
۴. راحتی، سلامت و کیفیت زندگی (ارتقای خلق و خو) - وزن ۰/۰۷۲
۵. به‌کارگیری مصالح طبیعی (زیبایی و جذب)
۶. پویایی نور طبیعی (بهینه‌سازی انرژی)

معیارهای صداها، کیفیت هوا، بکارگیری الگوها و اشکال طبیعی، فضای سبز/گیاهان داخلی، عوامل طراحی، بهینه‌سازی نور طبیعی، نور طبیعی، فضای سبز بیرونی/گیاهان، تعاملات اجتماعی، فلسفه طراحی، احساس محافظت ناشی از منطقه راحتی، عناصر آبی، شرایط فضا و مکان، تجربه کاربر در جایگاه اهمیت متوسط-میانه قرار گرفتند. کمترین اهمیت نیز به معیارهایی چون واکنش احساس شادابی، ارتباط با طبیعت، آسایش گرمایی و استفاده گسترده مصالح طبیعی اختصاص یافت. در نهایت، رتبه‌های نهایی هر اصل و کارکرد بیوفیلیک بعدِ میانگین‌گیری در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. رتبه میانگین اصول و کارکردهای بیوفیلیک فناوری‌های هوشمند (نگارندگان)

رتبه	وزن میانگین	اصول طراحی بیوفیلیک	رتبه	وزن میانگین کارکرد	کارکردهای بیوفیلیک فناوری
۱	۰/۱۰۱۶۰۲	احساس سرزندگی	۱	۰/۱۰۰	تجربه طبیعت غوطه‌ور
۲	۰/۰۴۳۲۲۷	تکامل ارتباط با نظام‌های طبیعی	۲	۰/۰۷۳	زیبایی و جذب
۳	۰/۰۴۰۶۱۵	تقلیدگری از طبیعت	۳	۰/۰۳۶	بهینه‌سازی انرژی
۴	۰/۰۳۶۵۳۵	رعایت الگوهای سازماندهی فضایی	۴	۰/۰۲۸	تقویت اجتماع
۵	۰/۰۳۶۲۱۹	ارتباط بصری با طبیعت	۵	۰/۰۲۴	بهینه‌سازی فضا
۶	۰/۰۳۳۷۱۵	نور طبیعی و فضا	۶	۰/۰۲۱	بهبود خلق و خو
۷	۰/۰۲۷۵۶۴	چشم‌انداز و پناهگاه	۷	۰/۰۱۵	ارتباط طبیعت
۸	۰/۰۲۳۹۱۸	حضور آب	۸	۰/۰۱۰	ارتقای سلامت و کیفیت زندگی
۹	۰/۰۱۴۱۶۱	حضور طبیعت در فضا			
۱۰	۰/۰۱۰۲۲۶	اصول کلی طراحی بیوفیلیک			

سوال فرعی اول - کدام اصول بیوفیلیک بیشترین ارتباط را با فناوری‌های هوشمند ادغام شده دارند؟

در پاسخ به سوال فرعی اول مطابق جدول ۵، سه اصل سرزندگی و شادابی حاصل از فناوری (رتبه ۱)، تکامل ارتباط با نظام‌های طبیعی (رتبه ۲) و «تقلیدگری از طبیعت» (رتبه ۳) بالاترین رتبه‌ها را کسب کردند؛ درحالی‌که حضور آب (رتبه ۸)، طبیعت در فضا (رتبه ۹) و اصول کلی طراحی بیوفیلیک (رتبه ۱۰) کمترین وزن را داشتند. از منظر کارکردی نیز تجربه طبیعت غوطه‌ور، جذابیت بصری، بهینه‌سازی انرژی، تقویت اجتماع، بهینه‌سازی فضا، بهبود خلق و خو، ارتباط با طبیعت و ارتقای سلامت و کیفیت زندگی به‌عنوان مهم‌ترین کارکردهای بیوفیلیک فناوری‌های هوشمند شناخته شدند. بنابراین تحلیل‌ها نشان داد اصول مرتبط با تقویت حس سرزندگی، تکامل ارتباط با نظام‌های طبیعی و تقلیدگری از طبیعت بیشترین سهم را در ادغام موثر فناوری‌های هوشمند داشته‌اند.

در گام دوم تحلیل، داده‌های معیارهای کمی پاسخ‌ها در یک صفحه گسترده جدید اکسل بصورت وارونه (ستون‌ها: ۱۰۰ پاسخ‌دهنده) ثبت شدند. محاسبات رویکرد سیستماتیک این بخش پایه‌ای مستحکم برای مرحله رتبه‌بندی تاپسیس عمل می‌نماید. به منظور تعیین نزدیکی نسبی هر فناوری به یک راهکار ایده‌آل، ابتدا در صفحه گسترده جدید اکسل داده‌های پاسخ ۱۰۰ نفر (ستون) و ردیف‌ها (فناوری هوشمند) ثبت شد تا تشکیل ماتریس تصمیم صورت پذیرد. توان دوم هر داده محاسبه و از طریق تقسیم بر جمع کل توان دوم فناوری‌های هوشمند طبق رابطه ۵ (Sadeghitabar et al., 2025, 9) پاسخ‌ها بی‌مقدارسازی شد.

$$R_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m X_{kj}^2}} \text{ for } i = 1, \dots, n \quad (5)$$

که در آن n تعداد فناوری‌های هوشمند، m تعداد پاسخ‌دهندگان ۱۰۰ نفر، X_{ij} پاسخ i امین فرد به سطح ادغام فناوری j ام (۷- امتیازی)، R_{ij} پاسخ بی‌مقدار فرد j ام به هر فناوری می‌باشد. مقدار وزن‌دار شده هر فناوری طبق رابطه ۶ (Sadeghitabar et al., 2025, 9) محاسبه گردید.

$$V_{ij} = R_{ij} \cdot W_j \quad (6)$$

که در آن w_j وزن محاسبه شده دیدگاه نفر حاصله و V_{ij} مقدار وزن دار شده سطح ادغام هر فناوری می باشند. برای تعیین راهکارهای ایده آل و ضدایده آل منظور مطابق روابط ۷ و ۸ (Sadeghitabar et al., 2025, 9) عمل گردید.

$$A^+ = (\max(V_{1j}), \max(V_{2j}), \dots, \max(V_{nj})) \quad (7)$$

$$A^- = (\min(V_{1j}), \min(V_{2j}), \dots, \min(V_{nj})) \quad (8)$$

که در آن راهکارهای ایده آل A^+ و ضدایده آل A^- به ترتیب با محاسبه بیشینه و کمینه پاسخ وزن دار شده سطح ادغام کل فناوری های هوشمند برای هر نفر انجام پذیرفت. سپس، فاصله از راهکار ایده آل و ضدایده آل با روابط ۹ و ۱۰ (Sadeghitabar et al., 2025, 9) محاسبه گردید.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - A_j^+)^2} \quad (9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - A_j^-)^2} \quad (10)$$

که در آن فاصله از راهکار ایده آل و ضدایده آل با D^+ و D^- برای هر فناوری نمایش یافت. راهکار ایده آل و ضدایده آل به ترتیب بهترین و بدترین سطح ادغام فناوری بر طبق دیدگاه فرد مورد نظر نشان می دهد. به منظور محاسبه نزدیکی نسبی (شاخص شباهت) فناوری نام نسبت به راهکار ایده آل از رابطه ۱۱ (Sadeghitabar et al., 2025, 9) استفاده گردید.

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (11)$$

که در آن C_i شاخص شباهت هر فناوری هوشمند به راهکار ایده آل می باشد که نتایج در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶. وضعیت موجود آپارتمان ها از لحاظ میزان ادغام فناوری های هوشمند (نگارندگان)

رتبه	شاخص شباهت	فاصله از حد		کارکرد	نام	بخش
		ضدایده آل	ایده آل			
۲۹	۰/۳۱۲۳۷	۰/۰۰۰۴۹	۰/۰۰۱۰۸	ترویج پایداری	فناوری های طراحی داخلی	طراحی بیوفیلیک و زیبایی شناسی
۱۰	۰/۵۷۶۹۸	۰/۰۰۰۹۴	۰/۰۰۰۶۹	بهبود زیبایی	کاغذ دیواری سه بعدی	
۱۶	۰/۴۰۲۳۶	۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۰۰۹۸	بهبود تجربه حسی	تجارب و پخش رایحه بیوفیلیک	
۲۳	۰/۳۴۲۴۸	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۰۱۰۰	بهبود جذابیت بصری	طراحی مولد عناصر بیوفیلیک و فضاهای بیرونی	
۱۹	۰/۳۷۲۸۷	۰/۰۰۰۶۰	۰/۰۰۱۰۱	ترویج پایداری	مصالح ساختمانی جلبک پایه	بهره وری انرژی و پایداری
۲	۰/۶۸۴۱۱	۰/۰۰۱۰۵	۰/۰۰۰۴۹	بهینه سازی انعطاف پذیری فضا	دیوارهای جمع شونده سبز	
۷	۰/۶۱۱۴۷	۰/۰۰۰۹۲	۰/۰۰۰۵۸	بهبود کارایی انرژی	سامانه های نمای الهام گرفته از طبیعت	
۱۲	۰/۵۶۹۹۶	۰/۰۰۱۰۰	۰/۰۰۰۷۵	بهبود پایداری ساختمان	روف گاردن (بام سبز)	
۵	۰/۶۴۰۴۳	۰/۰۰۱۰۴	۰/۰۰۰۵۸	بهبود راحتی	پنجره های هوشمند	راحتی داخلی و کیفیت هوا
۶	۰/۶۲۸۶۶	۰/۰۰۱۰۴	۰/۰۰۰۶۱	حفظ راحتی	سامانه های گرمایش تطبیقی	
۱۱	۰/۵۷۴۰۵	۰/۰۰۰۹۵	۰/۰۰۰۷۰	بهبود نور طبیعی	نورگیرهای جمع شونده	
۱۳	۰/۵۰۹۲۱	۰/۰۰۰۸۴	۰/۰۰۰۸۱	اطمینان از کیفیت هوا	تهویه و تصفیه هوای شخصی سازی شده هوشمند	
۳	۰/۶۵۲۴۸	۰/۰۰۱۰۱	۰/۰۰۰۵۴	اطمینان از کیفیت هوا	کنترل رطوبت هوشمند	محیط های تعاملی و جذاب
۱۴	۰/۴۹۲۳۱	۰/۰۰۰۷۸	۰/۰۰۰۸۰	بهبود راحتی و زیبایی	پرده های هوشمند و خودکار در بهینه سازی نور طبیعی	
۱۷	۰/۳۸۸۹۳	۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۰۰۹۸	بهبود زیبایی	فناوری آب نماهای تعاملی	
۲۱	۰/۳۵۲۶۶	۰/۰۰۰۶۱	۰/۰۰۱۱۲	بهبود جذابیت بصری	فناوری هوشمند پیاده رو مرتفع	
۲۲	۰/۳۴۲۶۵	۰/۰۰۰۵۳	۰/۰۰۱۰۱	بهبود تجارب یادگیری	نمایشگرهای طبیعت واقعیت افزوده	

رتبه	شاخص شباهت	فاصله از حد		کارکرد	نام	بخش
		ضدایده آل	ایده آل			
۲۶	۰/۳۳۳۷۹	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۰۱۰۳	ایجاد تجربیات غوطه‌ور	جلوه‌های صوتی-بصری شبیه‌سازی رعدوبرق	
۱۵	۰/۴۸۳۵۱	۰/۰۰۰۷۴	۰/۰۰۰۷۹	ایجاد تجربیات بصری منحصر به فرد	نورپردازی بیولومینسانس	
۲۷	۰/۳۳۲۷۲	۰/۰۰۰۵۳	۰/۰۰۱۰۷	بهبود کیفیت خواب	روشنایی شبانه‌روزی	نورپردازی و جو
۲۵	۰/۳۳۴۱۳	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۰۱۰۳	فراهم کردن آرامش	فضاهای مدیتیشن مرتفع	آرامش و رفاه
۱۸	۰/۳۸۵۵۹	۰/۰۰۰۶۰	۰/۰۰۰۹۵	فراهم کردن آرامش	اتاقک‌های آرامش‌بخش مجزا	
۹	۰/۵۷۷۸۸	۰/۰۰۰۹۲	۰/۰۰۰۶۷	بهبود ایمنی	سامانه‌های هوشمند هشدار زلزله	ایمنی و امنیت
۸	۰/۵۸۰۴۴	۰/۰۰۰۹۱	۰/۰۰۰۶۵	بهبود ایمنی	سازه‌های مقاوم زلزله	
۱	۰/۷۴۴۸۲	۰/۰۰۱۱۸	۰/۰۰۰۴۰	بهبود مدیریت ساختمان	سامانه مدیریت ساختمان	اتوماسیون خانه هوشمند
۴	۰/۶۴۹۲۰	۰/۰۰۱۰۷	۰/۰۰۰۵۸	ادغام عناصر بیوفیلیک	بصری‌سازی بلادرنگ و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان	
۲۸	۰/۳۱۷۱۹	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۱۰۴	منبع غذایی پایدار	باغ‌های داخلی هیدروپونیک	کشاورزی عمودی و هیدروپونیک
۲۴	۰/۳۳۵۶۱	۰/۰۰۰۵۳	۰/۰۰۱۰۵	منبع غذایی پایدار	کشاورزی عمودی	
۲۰	۰/۳۶۵۰۹	۰/۰۰۰۵۸	۰/۰۰۱۰۰	استفاده بهینه از آب	آبیاری هوشمند با سنسورهای رطوبت‌سنج	مدیریت آب و طراحی منظر

سوال اصلی پژوهش - وضعیت ادغام فناوری‌های هوشمند بیوفیلیک‌محور در میان آپارتمان‌های میان‌مرتبه مشهد چگونه است؟

در پاسخ به سوال اصلی پژوهش، مطابق نتایج جدول ۶ نتایج تحلیل با روش تاپسیس نشان داد سطح ادغام فناوری‌ها نامتوازن است و بیشترین سهم ادغام مربوط به گروه اتوماسیون خانه هوشمند شامل سامانه مدیریت ساختمان (رتبه ۱، شاخص شباهت ۰/۷۴۵) و بصری‌سازی بلادرنگ و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (رتبه ۴) می‌باشد. پس از آن، دیوار سبز جمع‌شونده هوشمند (رتبه ۲، شاخص ۰/۶۸۴)، کنترل رطوبت هوشمند (رتبه ۳)، پنجره‌های هوشمند (رتبه ۵) و گرمایش تطبیقی (رتبه ۶) بیشترین ادغام را داشته‌اند. در مقابل، فناوری‌هایی چون کشاورزی عمودی، باغ هیدروپونیک داخلی، فضاهای مدیتیشن مرتفع و برخی فناوری‌های نورپردازی و آرامش، کمترین میزان ادغام را تجربه کرده‌اند که نشان‌دهنده وجود شکاف جدی در بهره‌گیری از پتانسیل بیوفیلیک آن‌هاست. در راستای کسب تصویر کلی بیشترین سطح ادغام انواع فناوری‌های هوشمند، میانگین گیری شاخص شباهت هر نوع (بخش) و رتبه‌بندی آن انجام و نتایج در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. رتبه نهایی سطح ادغام انواع فناوری‌های هوشمند (نگارندگان)

رتبه	میانگین شاخص شباهت	بخش فناوری
۱	۰/۶۹۷۰۱	اتوماسیون خانه هوشمند
۲	۰/۵۸۲۸۶	راحتی داخلی و کیفیت هوا
۳	۰/۵۷۹۱۶	ایمنی و امنیت
۴	۰/۵۵۹۶۰	بهره‌وری انرژی و پایداری
۵	۰/۴۰۸۵۵	طراحی بیوفیلیک و زیبایی‌شناسی
۶	۰/۳۸۰۳۱	محیط‌های تعاملی و جذاب
۷	۰/۳۶۵۰۹	مدیریت آب و طراحی منظر
۸	۰/۳۵۹۸۶	آرامش و رفاه
۹	۰/۳۳۲۷۲	نورپردازی و جو
۱۰	۰/۳۲۶۴۰	کشاورزی عمودی و هیدروپونیک

سوال فرعی دوم - کدام فناوری‌ها در حمایت از اصول بیوفیلیک کارآمدترند و چرا؟

در پاسخ به سوال فرعی دوم، مطابق جدول ۷ یافته‌ها تأیید می‌کند بیشترین سطح حمایت و پشتیبانی اصول بیوفیلیک به فناوری‌های اتوماسیون خانه هوشمند، راحتی داخلی و کیفیت هوا، ایمنی و کمترین سطح ادغام به کشاورزی عمودی و هیدروپونیک تعلق داشت. اتوماسیون خانه هوشمند با میانگین شاخص شباهت ۰,۶۹۷۰۱ و رتبه ۱، کارآمدترین بخش در حمایت از اصول بیوفیلیک محسوب می‌شود. در این گروه، سامانه‌های مدیریت ساختمان به واسطه قابلیت‌هایی همچون پایش بلادرنگ شرایط محیطی، کنترل خودکار تجهیزات، بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارتقای کیفیت هوای داخلی، بیشترین همسویی را با اهداف بیوفیلیک دارند. ادغام فناوری‌های اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی (AI) در این سامانه‌ها، امکان سازگاری مداوم محیط با شرایط اقلیمی و نیازهای ساکنان را فراهم کرده و تجربه‌ای پویا و طبیعت‌محور ایجاد می‌کند. پس از آن، بخش راحتی داخلی و کیفیت هوا با شاخص ۰,۵۸۲۸۶ (رتبه ۲) و ایمنی و امنیت با شاخص ۰,۵۷۹۱۶ (رتبه ۳) نیز نقش مهمی در پشتیبانی از اصول بیوفیلیک ایفا می‌کنند، هرچند تمرکز آن‌ها بیشتر بر بهبود آسایش حرارتی، کیفیت هوا و ایجاد محیطی ایمن است تا بر حضور مستقیم عناصر طبیعی. این نتایج نشان می‌دهد فناوری‌های مدیریتی و کنترلی، به‌ویژه سامانه‌های مدیریت ساختمان، ستون اصلی تحقق طراحی بیوفیلیک هوشمند در آپارتمان‌های میان‌رتبه مشهد هستند.

بحث

آپارتمان‌های میان‌رتبه معمولاً ساختمانی با چهار تا دوازده طبقه بوده و محیط زندگی بهینه‌ای را ایجاد می‌کنند که از مزایای هر دو سازه‌های کم‌ارتفاع و بلندمرتبه توأمان با یکدیگر برخوردار بوده و اغلب دارای فضاهای مشترکی است که تعامل بین ساکنان را تقویت می‌کند. این آپارتمان‌ها تعادلی بین مقرون‌به‌صرفه بودن، دسترسی و امکانات ارائه داده که این چنین توازنی برای جمعیت متنوع ساکنان خود جذابیت بسیاری دارد. این رویکرد طراحی، ارتباط اجتماعی و حس تعلق را تشویق می‌کند که در محیط‌های زندگی شهری ضروری هستند (Khodadadi, 2019, 2). بررسی اصول بیوفیلیک نشان داد «احساس سرزندگی» و «تکامل ارتباط با نظام‌های طبیعی» از مهم‌ترین اصول-غیربحرانی هستند؛ در حالی که اصولی مانند «تقلیدگری از طبیعت»، «الگوهای سازماندهی فضایی»، «ارتباط بصری با طبیعت»، «نور طبیعی»، «چشم‌انداز و پناهگاه» و «حضور آب» جایگاه متوسطی دارند. از سوی دیگر، «حضور طبیعت در فضا» و «اصول کلی طراحی بیوفیلیک» کمترین اهمیت-بحرانی را کسب کرده‌اند. یافته‌های مقیمی شهری و وفامهر (۱۴۰۳) و تندرو صالح و همکاران (۱۴۰۳) نیز اولویت مشابهی برای «ارتباط بصری با طبیعت» و «الگوهای فضایی» گزارش کرده‌اند.

در بررسی کارکردهای فناوری‌های هوشمند، «تجربه طبیعت فراگیر» و جذابیت زیبایی‌شناختی در صدر قرار دارند، در حالی که عملکردهایی نظیر «بهینه‌سازی انرژی»، «تقویت جامعه»، «کارایی فضا» و «ارتقا خلق‌وخو» با وزن کمتری ارزیابی شده‌اند. این گرایش ناشی از تمرکز بیش از حد بر صرفه‌جویی انرژی ممکن است باشد؛ به عنوان مثال، در سامانه‌های روشنایی هوشمند اولویت کاهش مصرف مشخص شده به جای تأثیرگذاری بر سلامت روان. همچنین، معیارهایی مانند کیفیت هوا و راحتی مطابق با رویکردهای جهانی و تأکیدات Ulrich (1984, 420) و اخیراً موسسه وضع استانداردهای ساختمان WELL (URL 2) از اهمیت بالایی برخوردارند. مطالعات جهانی (Al Khatib et al., 2024, 1; Yin et al., 2024, 1; Turki et al., 2023, 118) نیز نشان داده‌اند طراحی بیوفیلیک در زمینه‌های درمانی به کاهش استرس و بهبود توان شناختی و رفاه عاطفی کمک می‌کند. به علاوه، پاسخ‌های زیبایی‌شناختی و عاطفی به عناصر طراحی، رضایت و رفاه کلی ساکنان را افزایش می‌دهد که با یافته‌های Yi (2013; 2003) و Xu (2023, 9-10), & Ramadhan & Gandha (2024, 83) و Hassan et al. (2023, 201) همسو است. Heerwagen (2003; 2013) نیز به نقش زیبایی‌شناسی طبیعت‌الهامی در ایجاد فضاهای فراگیر و احساسی اشاره کرده است. علاوه بر این، استفاده از پنجره‌های هوشمند، سامانه‌های گرمایشی تطبیقی، تهویه و تصفیه هوای شخصی به همراه فناوری‌های پایداری مانند مصالح جلبک‌پایه و نماهای الهام‌گرفته از طبیعت، توانایی بهبود سلامت و آسایش ساکنان را افزایش می‌دهد. اگرچه روشنایی طبیعی و فناوری‌های صرفه‌جو توسط Kellert et al. (2011) و Beatley (2016) برجسته شده‌اند، اما در نمونه مشهد به دلیل شرایط اقلیمی، اقتصادی و قوانین ساخت، اولویت کمتری دارند. نهایتاً، یافته‌های پژوهش حاضر بر لزوم توجه جامع به منافع سلامت، رفاه عاطفی و کارایی فضایی در ادغام فناوری‌های هوشمند با اهداف بیوفیلیک تأکید می‌کند.

در گام دوم تحلیل با تکنیک تاپسیس، بیشترین ادغام فناوری‌های هوشمند مربوط به سامانه مدیریت ساختمان (رتبه ۱) بود؛ پس از آن دیوارهای سبز جمع‌شونده (رتبه ۲)، سامانه‌های کنترل رطوبت هوشمند، بصری‌سازی بلادرنج/مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (رتبه ۴)، پنجره‌های هوشمند (رتبه ۵) و سامانه‌های گرمایش تطبیقی (رتبه ۶) قرار گرفتند. سامانه مدیریت ساختمان از طریق یکپارچه‌سازی اینترنت اشیا، بهینه‌سازی فرایندهای ساختمانی، بهبود کیفیت هوای داخلی و بهره‌وری انرژی را تضمین می‌کند؛ یافته‌ای که با گزارش‌های (Pistore et al., 2023, 14-15) همسو است. فناوری‌های هوشمند دیوارهای سبز از طریق سامانه‌های آبیاری، ارتباط بصری با طبیعت و نگهداری پوشش گیاهی داخلی را فراهم می‌آورد و بر رفاه روان‌شناختی ساکنان تأثیر مثبت می‌گذارد (Küller et al., 2006, 1501). همچنین، سامانه‌های کنترل رطوبت با حفظ سطح مطلوب رطوبت، از بروز مشکلات سلامتی و ناراحتی فیزیولوژیکی جلوگیری کرده و بهبود کیفیت محیط را به ارمغان می‌آورند (Yang et al., 2023, 1). فناوری‌های مرتبط با پنجره‌ها، از جمله سامانه‌های خودکار رنگ‌آمیزی و سایه‌زنی، با افزایش بهره‌برداری نور طبیعی و راحتی حرارتی، مصرف انرژی را کاهش داده و عملکرد بهینه تهویه مطبوع را تسهیل می‌کنند (Ghamari & Sundaram, 2024, 25). در نهایت، ایجاد آب و هوای داخلی پایدار با کاهش استرس و افزایش راحتی کلی، نقش مهمی در ارتقای سلامت روان و همسویی با اصول طراحی بیوفیلیک ایفا می‌نماید (Milliken et al., 2023, 176).

در پژوهش حاضر ادغام فناوری‌های مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و هوش مصنوعی در آپارتمان‌های میان‌مرتبه مشهد، از مرحله طراحی تا اجرا، امکان شبیه‌سازی و بهینه‌سازی نور، تهویه و چیدمان فضایی را فراهم آورده و به ایجاد محیط‌هایی با کارایی بالا و افزایش رفاه ساکنان کمک می‌کند (Contreras & Fernandez, 2023, 65). ترکیب این فناوری‌ها با اصول بیوفیلیک، منجر به شیوه‌های ساختمانی پایدارتر و مدیریت بهینه منابع انرژی شده و در کاهش استرس و بهبود سلامت روان نیز موثر است (Yadav et al., 2024, 186; Narula, 2024, 1-2; Shaikh & Sava-Segal, 2024, 2). علاوه بر این، استفاده از سامانه‌های هوشمند مانند آبیاری خودکار مبتنی بر حسگرهای رطوبت، سیستم‌های روشنایی و تهویه بهینه، همراه با سامانه‌های طراحی مولد هوش مصنوعی، امکان خلق فرم‌ها و الگوهای طبیعی و بهبود شرایط محیطی را فراهم آورده‌اند (Ching, 2020, 2; Zhong et al., 2024, 148). به‌طور کلی، کاربرد اینترنت اشیا در پنجره‌های هوشمند، سیستم‌های تهویه و تصفیه هوا، کنترل رطوبت و سامانه‌های مدیریت یکپارچه ساختمان، با کمک هوش مصنوعی و قابلیت‌های بصری‌سازی بلادرنج، زمینه اقتباس، بومی‌سازی و تنظیم مقررات لازم را فراهم می‌کنند که ادغام موثر فناوری‌های هوشمند در طراحی بیوفیلیک را تقویت می‌کند.

در مورد تبیین این موضوع که معماری بیوفیلیک در پژوهش حاضر چگونه برای مجموعه مسکونی بکار رفته است، می‌توان این‌طور بحث نمود، اگر این مجموعه به‌جای مسکونی، یک موزه یا کتابخانه بود، اصول بیوفیلیک ثابت می‌ماند؛ اما اولویت‌ها و شیوه‌های پیاده‌سازی تغییر می‌یافت. در فضاهای فرهنگی، تأکید بر «تجربه غوطه‌ور طبیعت» از طریق نورپردازی پویا، صداهای طبیعی و رایحه‌های کنترل شده بیشتر است تا بازدیدکننده در مسیر کاوش فرو رفته و تعامل حسی قوی‌تری داشته باشد (Joye, 2007, 305; Alvarsson, Wiens, & Nilsson, 2010, 1036). به‌علاوه، استفاده از آتریوم‌های شیشه‌ای با نور طبیعی متغیر، دیوارهای سبز در مسیرهای نمایش و صحنه‌سازی صوتی-بصری، امکان ارائه روایت‌های چندحسی و ارتقای حافظه بازدیدکنندگان را فراهم می‌آورد (Söderlund & Newman, 2015, 950; Moslehian et al., 2023, 6-8). در نتیجه، در ساختمان‌های فرهنگی الگوهایی مانند احساس شگفتی و تنوع حسی نسبت به فضاهای مسکونی برجسته‌تر شده و فناوری‌های هوشمند در خلق سکانس‌های نمایش نور، صدا و حرکت گیاهان زنده نقش اساسی خواهند داشت (Browning et al., 2014, 12). از طرف دیگر، تفاوت معماری بیوفیلیک در مجموعه‌های مسکونی و فرهنگی: در مجموعه‌های مسکونی، تمرکز روی راحتی فیزیکی (نظیر کیفیت هوا و آسایش حرارتی) و تعاملات اجتماعی است، در حالی که در فضاهای فرهنگی، جذابیت زیباشناختی و تجربه حسی (مانند شبیه‌سازی چشم‌اندازهای طبیعی) اولویت دارد (رهارد و احسانی، ۱۴۰۴، ۴).

در پژوهش حاضر مشخص شد در آپارتمان‌های میان‌مرتبه مشهد، فناوری‌های هوشمند بحرانی مانند کشاورزی عمودی، فضاهای مدیتیشن مرتفع، جلوه‌های صوتی-بصری، روشنایی شبانه‌روزی و باغ‌های داخلی هیدروپونیک، از نظر ادغام با رویکرد بیوفیلیک از وضعیت بحرانی برخوردارند. یافته‌ها نشان داد، موفقیت ادغام فناوری‌های هوشمند و اصول بیوفیلیک مستلزم تطبیق با شرایط

محلی، اقلیمی و اقتصادی است. از این رو توصیه می‌شود معماران و توسعه‌دهندگان با همکاری برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران، استانداردها و مشوق‌های لازم را برای غلبه بر موانعی چون هزینه و محدودیت فضایی ایجاد کنند؛ همچنین رفع چالش‌هایی نظیر نبود استانداردها، کمبود شرکت‌های دانش‌بنیان در حوزه هوش مصنوعی و اینترنت اشیا، و نیاز به تطبیق سازه‌ای برای کشاورزی عمودی و طراحی هوشمند داخلی از اولویت‌های مهم مطرح شده است. راهبردهای پیشنهادی برای ارتقا کاربرد فناوری‌های هوشمند در طراحی بیوفیلیک عبارتند از:

- تقویت ارتباط بصری و حضور طبیعت با شبیه‌سازی‌های صوتی-بصری و استفاده از حسگرهای هوشمند جهت تنظیم خودکار دما و رطوبت.
- مدیریت هوشمند آب و منابع از طریق سامانه‌های آبیاری خودکار و استفاده از مصالح طبیعی همراه با مدل‌سازی اطلاعات ساختمان.
- بهینه‌سازی انرژی با هوش مصنوعی بدون کاهش جنبه‌های بیوفیلیک.
- بهره‌گیری از نماهای طبیعی و دیوارهای سه‌بعدی جهت ارتقای انرژی و محیط داخلی.
- نورپردازی طبیعی-بیولوومینسانت با همکاری نهادهای محلی برای تدوین استانداردهای نوین.
- افزایش آموزش و آگاهی با برگزاری کارگاه‌ها و ارائه منابع آموزشی فارسی در زمینه فناوری‌های کم‌ادغام (مانند کشاورزی عمودی و باغ‌های هیدروپونیک).

• ارائه مشوق‌های مالی و معرفی مطالعات موردی موفق به منظور ترغیب معماران و توسعه‌دهندگان.

این راهکارها می‌تواند به بهبود وضعیت بحرانی ادغام فناوری‌های هوشمند و افزایش کیفیت زندگی ساکنان کمک کند. گرچه تمرکز پژوهش بر آپارتمان‌های میان‌مرتبه مشهد و استفاده از عناصر طبیعی چون نور، گیاهان و مصالح بومی است، این اصول قابلیت اجرا در سایر کاربری‌ها (فرهنگی، اداری، آموزشی و درمانی) را نیز دارند. انتخاب مشهد به دلیل چالش‌هایی مانند کمبود نور طبیعی و تهویه در مناطق متراکم نشان داد طراحی بیوفیلیک کیفیت زندگی را می‌تواند بهبود بخشد. شواهد پژوهشی قبل نشان داد بکارگیری عناصر طبیعی در ساختمان‌های درمانی موجب کاهش استرس و بهبود روند درمان (Al Khatib et al., 2024, 1) و در فضاهای آموزشی و فرهنگی به ارتقای کیفیت هوای داخلی و افزایش رضایت کاربران منجر می‌شود (Asojo, 2024, 2; Hazazi, 2025, 17; Ding et al., 2024, 2). همچنین، استفاده از آتریوم‌های سبز و حیاط‌های گیاهپوش فضای دلپذیری برای فعالیت‌های اجتماعی فراهم می‌آورد. تجربیات جهانی بیانگر این است طراحی بیوفیلیک، علاوه بر ارتقای سلامت روان و رضایت کاربران، اثرات زیست‌محیطی مثبتی نیز دارد. اجرای اصول بیوفیلیک در ساختمان‌ها بسته به نوع و مقیاس آن متفاوت است: در ساختمان‌های بلندمرتبه به علت محدودیت‌های نور و تهویه، نماهای سبز و سامانه‌های تهویه پیشرفته ضروری‌اند، در حالی که ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه با پنجره‌های بزرگ و بالکن‌های طبیعی امکان ادغام بهتر عناصر طبیعی را فراهم می‌کنند (Browning et al., 2014, 12).

نتیجه‌گیری

این پژوهش با رویکرد کمی-کاربردی و روش تحلیلی-توصیفی، به بررسی میزان ادغام فناوری‌های هوشمند بیوفیلیک‌محور و ارتباط آن با اهمیت کارکردهای طراحی بیوفیلیک در آپارتمان‌های میان‌مرتبه شهر مشهد پرداخت. داده‌ها از طریق پرسشنامه‌ای جامع شامل ۱۰ اصل بیوفیلیک و ۲۹ فناوری هوشمند گردآوری و روایی و پایایی آن با نظر خبرگان و ضریب آلفای کرونباخ تأیید شد. تحلیل با روش آنتروپی شانون و تکنیک TOPSIS انجام گرفت. یافته‌ها نشان داد اگرچه ارتفاع متوسط بناها، دسترسی مطلوب به نور و تهویه طبیعی و وجود فضاهای نیمه‌باز، بستری ایده‌آل برای ادغام اصول بیوفیلیک مستقیم (مانند احساس سرزندگی و ارتباط با طبیعت) و غیرمستقیم (نقش‌مایه‌ها و مصالح طبیعی) با فناوری‌های نوین ایجاد کرده است، اما وضعیت ادغام فناوری‌ها نامتوازن است. فناوری‌هایی همچون سامانه مدیریت ساختمان، دیوار سبز تطبیقی یا جمع‌شونده، کنترل رطوبت هوشمند، پنجره‌های هوشمند، گرمایش تطبیقی و بصری‌سازی بلادرنگ در صدر قرار دارند و بیشترین پشتیبانی را از کارکردهای کلیدی بیوفیلیک، شامل بهبود کیفیت هوا، آسایش حرارتی، جذابیت بصری و تجربه غوطه‌ور در طبیعت، ارائه می‌کنند.

در مقابل، فناوری‌های مرتبط با کشاورزی عمودی، باغ‌های هیدروپونیک، فضاهای مدیتیشن مرتفع و برخی سامانه‌های نورپردازی و آرامش، در وضعیت کم‌ادغام یا بحرانی هستند. همچنین، بهینه‌سازی مصرف انرژی و تقویت ارتباط مستقیم با طبیعت، نسبت به سایر کارکردها از اولویت پایین‌تری برخوردار بوده و این امر با روندهای بین‌المللی طراحی پایدار همخوان نیست؛ علی‌مانند شرایط اقلیمی، الگوهای ساخت‌وساز، یارانه‌های انرژی و تفاوت در اولویت‌دهی عملکردها بر این موضوع اثرگذار بوده است. با وجود این، انعطاف‌پذیری اصول بیوفیلیک در انطباق با اقلیم‌ها، فرهنگ‌ها و کاربری‌های مختلف، ظرفیت تعمیم نتایج به دیگر شهرها و بناهای مسکونی و غیرمسکونی را فراهم می‌کند. نمونه‌هایی مانند به‌کارگیری سامانه سرمایش تبخیری هوشمند در اقلیم گرم و مرطوب یا تلفیق شبیه‌سازی‌های صوتی-تصویری طبیعت در طراحی داخلی، پتانسیل بالایی برای ارتقای کیفیت روانی-جسمی ساکنان و تعامل اجتماعی دارند.

برای بهبود وضعیت، راهبردهایی شامل ارتقای دانش معماران و سازندگان از طریق آموزش و کارگاه‌های تخصصی، تدوین منابع بومی‌سازی‌شده، مشوق‌های مالیاتی و یارانه‌ای برای فناوری‌های کم‌ادغام، توسعه استانداردهای سبز محلی، ترویج نمونه‌های موفق داخلی و خارجی و حمایت‌های نهادی پیشنهاد می‌شود. تحقق این اهداف نیازمند برنامه‌ریزی بومی، اصلاح سیاست‌های محلی و همکاری میان‌بخشی است تا موانع فنی، اقتصادی و فرهنگی برطرف و بهره‌برداری بهینه از ظرفیت‌های موجود امکان‌پذیر شود. به طور کلی، ادغام آگاهانه فناوری‌های هوشمند با الگوهای بیوفیلیک در آپارتمان‌های میان‌مرتبه، رویکردی کارآمد برای افزایش پایداری، ارتقای سلامت و رفاه ساکنان و بهبود زیبایی‌شناسی محیط است و می‌تواند در صورت بومی‌سازی، در اقلیم‌ها و کاربری‌های متنوع گسترش یابد.

پی‌نوشت

^۱Internet of Things

^۲Artificial Intelligence

^۳Building Information Modeling

فهرست منابع

- اسدی، شایان و خطیبی، سیدمحمد رضا. (۱۴۰۰). تدوین معیارهای طراحی شهری بیوفیلیک برای ساماندهی بافت مرکزی شهرها. دو فصلنامه فضای زیست، ۱۱(۱)، ۹۱-۱۱۵.
- امینی، صبا و حسینی، سیدباقر و نوروزیان ملکی، سعید. (۱۳۹۲). بررسی تطبیقی میزان رضایت مندی ساکنان بین دو نمونه از مجتمع های مسکونی میان مرتبه و بلندمرتبه، نمونه های موردی: مجتمع های مسکونی شهید محلاتی و سبحان. معماری و شهرسازی آرمان شهر، ۱۱(۶)، ۱-۱۳.
- آصفی، مازیار، واسعی، نازنین. (۱۳۹۷). اصول و نقش معماری تعاملی در ارتقا کیفیت فضاهای جمعی. سومین کنفرانس بین المللی عمران، معماری و طراحی شهری، تبریز.
- تندرو صالح، ندا و حجتی، وحیده و موحد، خسرو. (۱۴۰۳). مقایسه تطبیقی مولفه های تأثیرگذار معماری بیوفیلیک در طراحی مجتمع های مسکونی معاصر و مسکن سنتی (نمونه مطالعاتی: شهر شیراز). دو فصلنامه فضای زیست، ۴(۱)، ۲۱-۴۶.
- رهدار، فرشته و احسانی، امیر هوشنگ. (۱۴۰۴). نقش فن آوری های نوین در طراحی بیوفیلیک فضاهای سبز شهری: مطالعه موردی باغ های حاشیه خلیج سنگاپور. کنفرانس سالانه معماری، شهرسازی، هنر، طراحی صنعتی، ساخت و فناوری حکمت بنیان، ۱-۱۶.
- مقیمی شهری، الهام و وفامهر، محسن. (۱۴۰۳). ارزیابی و رتبه بندی اصول طراحی بیوفیلیک در معماری مسکونی مشهد. معماری و محیط پایدار، ۲(۱)، ۷۹-۹۲.
- Abioye, Sofiat O. & Oyedele, Lukumon O. & Akanbi, Lukman. & Ajayi, Anuoluwapo. & Delgado, Juan Manuel Davila. & Bilal, Muhammad. & Akinade, Olugbenga O. & Ahmed, Ashraf. (2021). **Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Review of Present Status, Opportunities and Future Challenges**. *Journal of Building Engineering*, 44, 1-13.
- Agboola, Oluwagbemiga Paul. & Nia, Hourakhsh Ahmad. & Findikgil, Meryem Müzeyyen. & Yildirim, Semih Goksel. (2024). **Assessing the Effectiveness of Biophilic Design Approach in Contribution to Sustainable Architectural Goals**. *New Design Ideas*, 8(1), 144-169.
- Agrawal, Pankaj. & Shrikhande, Manish. (2006). **Earthquake resistant design of structures**. India: PHI Learning Pvt. Ltd.
- Akintuyi, Olabimpe Banke. (2024). **Vertical farming in urban environments: A review of architectural integration and food security**. *Open Access Research Journal of Biology and Pharmacy*, 10(2), 114-126.
- Al Khatib, Inas. & Samara, Fatin. & Ndiaye, Malick. (2024). **A Systematic Review of the Impact of Therapeutic Biophilic Design on Health and Wellbeing of Patients and Care Providers in Healthcare Services Settings**. *Frontiers in Built Environment*, 10(1), 1-16.
- Almusaed, Amjad. & Yitmen, Ibrahim. & Almssad, Asaad. & Jonn Are. (2024). **Construction 5.0 and sustainable neuro-responsive habitats: Integrating the brain-computer interface and building information modeling in smart residential spaces**. *Sustainability*, 16(21), 1-30.
- Alvarsson, Jesper J. & Wiens, Stefan., & Nilsson, Mats E. (2010). **Stress recovery during exposure to nature sound and environmental noise**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(3), 1036-1046.
- Ambroziak, Arkadiusz. & Borkowski, Piotr. (2025). **Temperature and humidity model for predictive control of smart buildings**. *Journal of Building Engineering*, 100, 1-18.
- Asojo, Ahmad. & Hazazi, Fahad. (2025). **Biophilic Design Strategies and Indoor Environmental Quality: A Case Study**. *Sustainability*, 17(5), 1-21.
- Aziz, Salmiah. & Sharun, Siti Maryam. & Wagiman, Khairul Rijal. & Remli, Muhammad Akmal. & Ibrahim, Taib. & Mohd Amin, Nur 'Izzati. & , Mohd Nasir, Siti Nuratirah. & Maharimi, Mohammed Fadzli. & Mohd Razali, Noorul Huda. & Nik Hassin, Nik Siti Fatimah. & Rahma, Miranti Sari. (2024). **Advancing biocentric architecture through smart building application**. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 54(1), 313-330.
- Bakirel, Hatice Tuğçe. & Selçuk, Semra Arslan. & Güneş, Mutlu Avinç. (2023). **Nature-Inspired Kinetic Facades For Daylight Architecture: Research Trends and Potential Research Gaps**. V. *Baskent International Conference on Multidisciplinary Studies*, 203-221.
- Beatley, Timothy. (2016). **Biophilic Cities: Integrating Nature into Urban Design and Planning**. USA: Island Press.
- Benavente-Peces, César. (2019). **On the Energy Efficiency in the Next Generation of Smart Buildings—Supporting Technologies and Techniques**. *Energies*, 12(22), 1-25.

- Browning, William D. & Ryan, Catherine O. & Clancy, Jennifer O. (2014). **14 Patterns of Biophilic Design**. USA: Terrapin Bright Green.
- Chien, Sheng-Fen. & Wang, Hung-Jen. (2014). **Smart partition system–A room level support system for integrating smart technologies into existing buildings**. *Frontiers of Architectural Research*, 3(4), 376–385.
- Ching, Francis D.K. (2019). **Building Construction Illustrated**. USA: John Wiley. & Sons.
- Contreras, Gastón Sanglier. & Lezcano, Roberto A. González. & Fernández, Eduardo J. López. & Gutiérrez, María Pérez Concepción. (2023). **Architecture Learns from Nature. The Influence of Biomimicry and Biophilic Design in Building**. *Modern Applied Science*, 17(1), 1-58.
- Dietz, Paul. & Westhues, Jonathan. & Barnwell, John. & Han, Jefferson. & Yerazunis, William. (2006). **Submerging technologies**. In *SIGGRAPH '06 Emerging Technologies*, 30-31.
- Ding, Xin. & Cui, Yanqiu. & Chen, Zhengshu. & Zhang, Hangyue. (2024). **Energy Efficiency in Biophilic Architecture: A Systematic Literature Review and Visual Analysis Using CiteSpace and VOSviewer**. *Buildings*, 14(12), 1-26.
- Farzaneh, Hooman. & Malehmirchegini, Ladan. & Bejan, Adrian. & Afolabi, Taofeek. & Mulumba, Alphonse. & Daka, Precious. (2021). **Artificial intelligence evolution in smart buildings for energy efficiency**. *Applied Sciences*, 11(2), 1-25.
- Fineberg, Eva. & Walters, Jack. & Reiss, Joshua. (2022). **Advances in thunder sound synthesis**. *152nd Convention (Preprint) of Audio Engineering Society*, 1-9.
- Ghamari, Mehrdad. & Sundaram, Senthilarasu. (2024). **Solar Window Innovations: Enhancing Building Performance through Advanced Technologies**. *Energies*, 17(14), 1-31.
- Hadidi, Abdelkader. & Saba, Djamel. & Sahli, Youcef. (2022). **Smart irrigation system for smart agricultural using IoT: Concepts, architecture, and applications**. In *The digital agricultural revolution: Innovations and challenges in agriculture through technology disruptions*, 171–198.
- Hassan, Mohammad Mujaheed. & Tedong, Peter Aning. & Khir, Azlina Mohd. & Shari, Zalina. & Ponrahono, Zakiah. & Sharifudin, Muhammad Phaizal. (2023). **Exploring the Effects of the Built Environment on Urban Community Wellbeing**. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 13(10): 189-208.
- Heerwagen, Judith H. (2003). **Bio-inspired Design: What Can We Learn from Nature**. *BioInspire*, 1(121), 1-9.
- Heerwagen, Judith H. (2013). **Biophilic Design: A path to Sustainability**. *Environmental Design Research Association Conference Proceedings*, 1-10.
- Heidari, Milad. & Thangavel, Sivasakthivel. & Al Naamani, Eman. & Khashehchi, Morteza. (2024). **Emerging trends in smart green building technologies**. In *Sustainable technologies for energy efficient buildings*, 313-336.
- Joye, Yannick. (2007). **Architectural lessons from environmental psychology: The case of biophilic architecture**. *Review of General Psychology*, 11(4), 305–328.
- Kaplan, Rachel. & Kaplan, Stephen. (1989). **The Experience of Nature: A psychological perspective**. UK: Cambridge University Press.
- Kellert, Stephen R. & Calabrese, Elizabeth F. (2015). **The Practice of Biophilic Design**. USA: Island Press.
- Kellert, Stephen R. & Heerwagen, Judith H. & Mador, Martin. (2011). **Biophilic design: The theory, science, and practice of bringing buildings to life**. USA: John Wiley. & Sons.
- Kellert, Stephen R. & Wilson, Edward O. (1995). **The Biophilia Hypothesis**. USA: Island Press.
- Kellert, Stephen R. (2008). **Dimensions, Elements, and Attributes of Biophilic Design**. USA: Yale University Press.
- Khodadadi, Anahita. (2019). **Eco-friendly Mid-Rise Apartments Using CLT Panels**. *Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures Annual Symposia*, 2019(20), 1-8.
- Kibert, Charles J. (2016). **Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery**. USA: John Wiley. & Sons.
- Kim, Jin-Mo. & Lee, Ji-Young. & Yoon, Sung-Hoon. (2022). **Theoretical review for setting the direction of architectural planning in response to smart technologies**. *Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, 22(4), 55–61.
- Kindangen, Jeffrey. & Rompas, Leidy. & Mandey, Johansen. (2024). **An automatic curtain system for indoor daylight control**. *International Journal of Engineering and Science*, 17(1), 76–83.
- Küller, Rikard. & Ballal, Seifeddin. & Laike, Thorbjörn. & Mikellides, Byron. & Tonello, Graciela. (2006). **The Impact of Light and Colour on Psychological Mood: a Cross-Cultural Study of Indoor Work Environments**. *Ergonomics*, 49(14), 1496-1507.

- Kumar, Arun. & Sharma, Sharad. & Goyal, Nitin. & Singh, Aman. & Cheng, Xiaochun. & Singh, Parminder. (2021). **Secure and Energy-Efficient Smart Building Architecture with Emerging Technology IoT**. *Computer Communications*, 176, 207-217.
- Lantonio, Nicole A. & Krarti, Moncef. (2022). **Simultaneous Design and Control Optimization of Smart Glazed Windows**. *Applied Energy*, 328, 120239.
- Lee, Eun Ji,. & Park, Sung Jun. (2020). **A Framework of Smart-Home Service for Elderly's Biophilic Experience**. *Sustainability*, 12(20), 1-26.
- Liu, Yue, & Guo, Xiangmin (2024). **Online Public Feedback on Mid- to High-Rise Biophilic Buildings: A Study of the Asia-Pacific Region over the Past Decade**. *Buildings*, 14(8), 1-17.
- Marcus, Clare Cooper. & Sachs, Naomi A. (2013). **Therapeutic Landscapes: An Evidence-Based Approach to Designing Healing Gardens and Restorative Outdoor Spaces**. USA: John Wiley. & Sons.
- Milliken, Sarah. & Kotzen, Benz. & Walimbe, Sonali. & Coutts, Christopher. & Beatley, Timothy. (2023). **Biophilic Cities and Health**. *Cities. & Health*, 7(2), 175-188.
- Moslehian, Anahita Sal. & Roös, Phillip B. & Gaekwad, Jason S., & Van Galen, Lana. (2023). **Potential risks and beneficial impacts of using indoor plants in the biophilic design of healthcare facilities: A scoping review**. *Building and Environment*, 233, 1-15.
- Narula, Rehet Kaur. (2024). **The Effectiveness of Biophilic Design as an Architectural and Design Approach to Enhance Mental Well-Being**. *Research Archive of Rising Scholars*, preprint, 1-7.
- Okul, Elif Sude. (2024). **Design Solutions for Green Walls in Interior Spaces**. Bachelor's thesis in Visual Design and Communication, Department of Architecture and Design, Politecnico di Torino, Retrieved January 28, 2025, from <https://webthesis.biblio.polito.it/secure/30130/1/tesi.pdf>.
- Omrany, Hossein. & Al-Obaidi, Karam M. & Hossain, Mohataz. & Alduais, Nayef A. M. & Al-Duais, Husam S. & Ghaffarianhoseini, Amirhosein. (2024). **IoT-enabled Smart Cities: a Hybrid Systematic Analysis of Key Research Areas, Challenges, and Recommendations for Future Direction**. *Discover Cities*, 1(2), 1-34.
- Pacek, Mathew. & Pomerville, Thomas. (1988). **Process and apparatus for producing hollow plastic balls (United States Patent No. 4,787,111)**. *United States Patent and Trademark Office*, 1-10 .
- Pistore, Lorenza. & Konstantinou, Thaleia. & Pasut, Wilmer. & Naboni, Emanuele. (2023). **A Framework to Support the Design of a Regenerative Indoor Environment**. *Frontiers in Built Environment*, 9(1), 1-17.
- Porter, Nicole. & Bramham, Johanna. & Thomas, Martin. (2017). **Mindfulness and design: Creating spaces for well-being**. In F. J. Saavedra Macías, A. Español Nogueiro, S. Arias Sánchez, & M. Calderón García (Eds.), *Creative practices for improving health and social inclusion: 5th International Health Humanities Conference, Sevilla 2016*, 199-209.
- Prasertseree, Lattasit. & Tuaycharoen, Nuanwan. (2025). **The effect of curved light shelves, ceiling and window characteristics on daylighting in Thai classrooms**. *Journal of Daylighting*, 12(1), 21–39.
- Ramadhan, Rizqi. & Gandha, Maria Veronica. (2024). **Exploring the Influence of Building Design on Mental Well-being and Depression Prevention**. *Jurnal Sains, Teknologi Urban Perancangan Arsitektur*, 6(1), 83-96.
- Reipschläger, Patrick. & Engert, Severin. & Dachselt, Raimund. (2020). **Augmented displays: Seamlessly extending interactive surfaces with head-mounted augmented reality**. *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–4.
- Roudbari, Milad Semyari. (2025). **Algae-based building materials: Applications, challenges, and prospects**. *International Conference on Recent Advances in Business, Engineering, Innovation & Technology*, Brussels, Belgium, 1–17.
- Sadeghitabar, Erfan. & Ghasempour, Roghayeh. & Vaziri Rad, Mohamad Amin. & Toopshekan, Ashkan. (2025). **Optimization and Shannon entropy multi-criteria decision-making method for implementing modern renewable energies in stand-alone greenhouses**. *Energy Conversion and Management*, : 27(1), 1-20.
- Şahin, Cem Doğan. & Mengüç, Pinar. (2018). **3D spatial reconstruction and non-destructive energy diagnostics of building interiors with smart devices**. In *The 3rd International Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings (EEHB2018)*, Uppsala University, 145–153.
- Shaikh, Humaira. & Sava-Segal, Clara. (2024). **Biophilic Architecture: Using Cognitive Science Principles to Understand Impact on Well-Being**. *Journal of Student Research*, 13(1), 1-14.
- Sivakumar, Palaniswamy. & Sandhya Devi, Ramiah Subburaj. & Ashwin, Motagi. & Rajan Singaravel, M. M. & Buvanesswaran, A. D. (2022). **Protocol design for earthquake alert and evacuation in smart buildings**. In *IoT and WSN based smart cities: A machine learning perspective*, 1-4.

- Söderlund, Jana., & Newman, Peter. (2015). **Biophilic architecture: A review of the rationale and outcomes.** *AIMS Environmental Science*, 2(4), 950–969.
- Takeuchi, Jason. (2012). **Nocturnal light: Exploring the perceptual experience of bioluminescence.** *Journal of Environmental Science*, 12(4), 45–60.
- Tiwari, Santosh. & Vij, Meghna. (2024). **Sustainable futures: Principles of eco-friendly architecture.** India: Academic Guru Publishing House.
- Turki, Wouroud. & Bouaziz, Amal. & Taieb, Amine Hadj. & Gargouri, Chema. (2023). **Guidelines for Greening Healthcare Spaces.** *Journal of Salutogenic Architecture*, 2(1), 113-124.
- Ulrich, Roger S. (1984). **View through a Window May Influence Recovery from Surgery.** *Science*, 224(4647), 420-421.
- URL 1: Illustrarch. (2024). **Revolutionizing Architecture: The Impact of Smart Homes on Future Designs.** Illustrarch. Retrieved January 28, 2025, from <https://illustrarch.com/articles/architectural-technology/25274-impact-of-smart-homes-on-future-designs.html>.
- URL 2: WELL Building Standard. (2020). **WELL Building Standard V2.** Retrieved January 28, 2025, from <https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/concepts>.
- Virmani, Mehak. & Rana, Deepti Pande. & Naqvi, Ar Syed Mohammed Amin. (2024). **Innovative design for creative architect spaces.** *International Journal of Town Planning and Management*, 10(2), 48-58.
- Wood, Antony. & Bahrami, Payam. & Safarik, Daniel. (2014). **Green walls in high-rise buildings: An output of the CTBUH sustainability working group.** Australia: Images Publishing.
- Yadav, Uma. & Patel, Harsha. & Bhatia, Tanu. (2024). **Smart Solutions for Sustainable Development: a Case Study of Energy-Efficient Green Building with Intelligent Techniques.** 11th International Conference on Cutting-Edge Developments in Engineering Technology and Science, 185-190.
- Yang, Xianzhe. & Ozaki, Akihito. & Takatsuji, Ryo. & Nagase, Osamu. & Arima, Yusuke. & Choi, Younhee. (2023). **Effects of Biophilic Design on Hygrothermal Environment and Human Sensation in a Large Artificial Garden of a Public Building.** The 11th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation. & Energy Conservation in Buildings, 396(1), 1-8.
- Yi, Kai. & Xu, Zhihua. (2023). **Exploring the Aesthetic Principles of Traditional Lingnan Architecture in Guangzhou Influencing Economic Development and Socio-economic Perspective—a Notch from Public Well-being and Modernity.** *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 8(3), 1-14.
- Yin, Jie. & Zhu, Haoyue. & Yuan, Jing. (2024). **Health Impacts of Biophilic Design from a Multisensory Interaction Perspective: Empirical Evidence, Research Designs, and Future Directions.** *Land*, 13(9), 1-27.
- Yoshimura, Tadayosi. & Sakashita, Yoshitaka. (2006). **Development of a perfume emission system via internet.** *Journal of Computer Chemistry*, 5(4), 227-230.
- Zhong, Weijie. & Schröder, Torsten. & Bekkering, Juliette. (2022). **Biophilic Design in Architecture and Its Contributions to Health, Well-being, and Sustainability: a Critical Review.** *Frontiers of Architectural Research*, 11(1), 114-141.
- Zhong, Weijie. & Schröder, Torsten. & Bekkering, Juliette. (2024). **Implementing Biophilic Design in Architecture through Three-Dimensional Green Spaces: Guidelines for Building Technologies, Plant Selection, and Maintenance.** *Journal of Building Engineering*, 92(1), 1-20.