

کنترل مصرف انرژی توسط پوسته‌های زیست مبنا (دیواره های زنده) و پوسته‌های انطباق پذیر

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲

کد مقاله: ۹۱۵۱۰

فاطمه مظفری قادیکلائی^۱، مهدی الکایی بهجتی^۲
آروین توکلی نیا^۳، عالمه صالحی بالادهی^{۴*}

چکیده

بیان مسئله: اولین پارامتری که در مقابل با عوامل اقلیمی فضای بیرون به عنوان یک دیواره‌ی دفاعی عمل می‌کند، طراحی اقلیمی ساختمان است که هدف آن ایجاد آسایش حرارتی برای انسان‌هاست. از عوامل متعددی که در تأمین آسایش حرارتی و کاهش میزان اتلاف انرژی در ساختمان‌ها مؤثرند، می‌توان به میزان نفوذ هوای محیط خارج به فضای داخل اشاره کرد که یکی از راه‌های نفوذ، نمای ساختمان می‌باشد.

هدف پژوهش: هدف اصلی مقاله سنجش کارایی دیواره‌های زنده و انطباق پذیر در کاهش مصرف انرژی می‌باشد.
روش پژوهش: مطالعات به صورت اسنادی- کتابخانه‌ای انجام شده و شاخص‌های انرژی مصرف شده از این دو روش، از طریق مطالعات ادبیات موجود استخراج شده است.

نتیجه‌گیری: این پژوهش با در نظر گرفتن جایگاه پوسته‌ی خارجی بنا و اهمیت آن در انتقال حرارت در ساختمان، تلاش دارد تا با معرفی پوسته‌های زیست مبنا (دیواره‌های زنده) و پوسته‌های انطباق پذیر تأثیرات آن‌ها را در میزان تقاضای انرژی ساختمان مورد تحلیل قرار دهد در این مقاله سعی شد نماهای زیست مبنا به عنوان راهکار قدرتمندی که قادر به کاهش بیش از ۲۰٪ انرژی مصرفی ساختمان‌ها می‌شود مورد بررسی قرار گیرد و به عنوان بخشی از راه حل کاهش مصرف انرژی ساختمان معرفی گردد.

واژگان کلیدی: کنترل مصرف انرژی، پوسته خارجی، دیواره‌های زنده، دیواره‌های انطباق پذیر، آسایش حرارتی

۱- استادیار گروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

۲- دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

۳- دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

۴- دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

امروزه در عرصه علم و تکنولوژی تحقیقات و نظریه‌های متعددی در جهت بهبود شرایط معماری به ویژه کنترل از لحاظ مصرف انرژی، ارائه شده است. می‌توان در طراحی معماری، شرایط اقلیمی را از جنبه‌های مختلف مورد واکاوی قرار داد یکی از این جنبه‌ها مربوط به رفتار حرارتی ساختمان‌ها در برابر آسایش حرارتی انسان و نوع واکنش بدن اوست. تغییر در روند ساخت و ساز با هدف کاهش اتلاف انرژی در ساختمان‌های مسکونی، با توجه به رشد جمعیت و افزایش آلاینده‌های زیست محیطی امری بدیهی به نظر می‌رسد و با توجه به مصرف بی‌رویه انرژی در ساختمان‌های مسکونی که به دلیل اتلاف حرارت رخ می‌دهد، شناسایی علت‌های اتلاف انرژی و برنامه‌ریزی برای رفع یا بهبود این عوامل باید جز اولویت‌های طراحان قرار بگیرد (خان احمدلو و همکاران، ۱۳۹۵: ۴۳۴).

در کشور عزیز ما ایران، میزان مصرف انرژی در بخش ساختمان برای دستیابی به آسایش حرارتی، به نسبت استانداردهای جهانی، در حد بالایی قرار دارد هم‌چنین نسبت انرژی مصرفی ساختمان‌ها به انرژی سالانه‌ی کشور، یک سوم می‌باشد که گرمایش و سرمایش سهم بیشتری در این میان دارند. عواملی در بالا بودن این میزان مصرف تأثیرگذار است که در این میان نقش جداره‌ها و پوسته‌های خارجی قابل تأمل است، بنابراین ارائه‌ی راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان ضروری به نظر می‌رسد (پوردیهیمی و گسلی، ۱۳۹۳: ۵۴).

همان‌طور که بیان شد، برای رسیدن به الگو بهینه مصرف انرژی، بررسی خصیصه‌های پوسته‌های خارجی ضروری می‌باشد. در واقع جداره‌ها بخش اعظمی از اعضای حائل بین فضای داخل و خارج ساختمان را تشکیل می‌دهند که با استفاده‌ی مناسب از مصالح، می‌توان از هدر رفت انرژی جلوگیری کرد و در صورتی که برای کاهش انتقال حرارت از جداره‌های خارجی، تمهیدات لازم را در نظر گرفت می‌توان در مصرف انرژی به میزان قابل چشمگیری صرفه جویی کرد (مداحی و عباسی، ۱۳۹۸، ۱۶۸).

هدف این مقاله بررسی انواع سیستم‌های دیوار ارگانیک به منظور شناسایی و نظام‌بندی ویژگی‌های اصلی و فناوری‌های مربوط به آن‌ها است. بنابراین، درک تفاوت‌های اصلی بین سیستم‌ها از نظر ترکیب و روش‌های ساخت مهم است. در واقع، ادامه ارزیابی سهم سیستم‌های دیوارهای زنده و انطباق‌پذیر در بهبود عملکرد ساختمان‌ها و مقایسه اثرات زیست‌محیطی این دو سیستم می‌تواند منجر به افزایش کاربرد آن‌ها در ساختمان‌ها و در نتیجه کاهش هزینه‌های این سیستم‌ها شود. تصمیم‌گیری در مورد این‌که کدام سیستم دیوار ارگانیک، اعم از دیوار زنده یا انطباق‌پذیر برای یک پروژه خاص مناسب‌تر است به محدودیت‌های ساخت و ساز اقلیمی بستگی ندارد بلکه به تأثیر زیست محیطی اجزای آن و هزینه‌های مرتبط در طول چرخه عمر آن نیز مربوط است.

۲- پیشینه تحقیق

الریج نا و همکارانش در دانشگاه دلفت در کتابی با عنوان *Facades Principles of Construction* در سال ۲۰۰۷ نماه‌های مختلف و اجزای آن‌ها را بررسی کردند که نمای تطبیق‌پذیر نیز در قالب یک بخش این کتاب به طور مفصل بیان شده است. جولز مولونی در سال ۲۰۱۱ کتاب *Architectural Facades Designing Kinetics* را منتشر کرد که در آن به تشریح الگوهای نمای جنبشی و سیستم‌های آن می‌پردازد.

از آن جمله پایان‌نامه‌های مرتبط با موضوع که می‌توان به آن اشاره کرد: پایان‌نامه کارشناسی ارشد سیوا ادیو پوگانتی در سال ۲۰۱۳ از دانشگاه واشنگتن با عنوان *Dynamic shading: An Analysis* که در آن سیستم‌های تطبیق‌پذیر را دسته‌بندی کرده و نمونه‌های آن را معرفی می‌کند؛ و پایان‌نامه‌های دکتری مارسل بیلو در سال ۲۰۱۲ از دانشگاه دلف هلند با عنوان *International Facades- CROFT* که به بررسی تکنولوژی مربوط به نماه‌های مختلف و متناسب با اقلیم می‌پردازد (اسودی، ۱۳۹۶: ۷).

در سال ۲۰۱۵ اللوهی و همکاران، موضوع مصرف انرژی و بهره‌وری در ساختمان‌ها را از چند جنبه مورد بررسی قرار دادند. ابتدا، از طریق جمع‌آوری حداکثر داده‌های رسمی از چندین منبع، وضعیت واقعی و موجود مصرف انرژی را با گزارش اطلاعات به روز مصرف انرژی در بخش ساختمان، بررسی کردند. سپس عوامل اصلی مؤثر بر مصرف انرژی در ساختمان را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. ایشان اشاره می‌کنند، تجدید نظر در برآورد مصرف انرژی در بخش ساختمان برای فعالیت‌های مسکونی و تجاری، این امکان را فراهم می‌آورد تا تلاش‌های بعدی مورد نیاز در این زمینه، توسط سیاست‌گذاران در بخش‌های مختلف جهان، صورت گیرد. این اطلاعات هم‌چنین برای ارزیابی تأثیر سیاست‌های انرژی اتخاذ شده‌ی قبلی، نیز مفید است (Allouhi, A., 2015).

به دنبال آن، مطالعات با شرایط مختلفی در این زمینه ادامه یافت. در سال ۲۰۱۶ شیویلا و کروکسفورد، تأثیر تغییر اقلیم بر مصرف انرژی ساختمان‌های اداری در ژاپن را بررسی کردند. یافته‌های این مطالعه به طراحان ساختمان، مهندسان، برنامه‌ریزان شهری، سیاست‌گذاران انرژی و محیط‌زیست، شرکت‌های آب و برق و سایر ذینفعان کمک می‌کند تا تأثیر تغییرات آب و هوا بر تولید، توزیع و مصرف انرژی را در نظر بگیرند (Shibuya, T., & Croxford, B, 2016).

۳- ضرورت تحقیق

در پی به وجود آمدن بحران نفتی در دهه‌ی ۷۰ میلادی بهره‌مندی از انرژی تجدیدپذیر و راهکارهایی برای کاهش در مصرف انرژی پررنگ‌تر شد. کشور ایران نیز یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان و همچنین یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان در بحث انرژی می‌باشد. در بین مصارف، بخش مسکن و ساختمان با بیش از ۴۰٪ انرژی بزرگ‌ترین سهم را در مصرف این مهم دارد. در ایران میانگین مصرف انرژی ۲/۵ برابر متوسط مصرف جهانی است که این موضوع ضرورت کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان را جدی نشان می‌دهد و همچنین عوامل دیگری از جمله افزایش قیمت حامل‌های انرژی و حذف یارانه‌های انرژی بر اهمیت صرفه‌جویی انرژی در ساختمان‌ها افزوده است. بخش ساختمان و مسکونی پتانسیل بیشتر در کنترل مصرف انرژی را دارد چرا که با راه‌های ساده‌تر و با هزینه‌های کمتر می‌شود به این مهم دست یافت (نصراللهی، ۱۳۹۰: ۲).

مطالعات پراکنده زیادی در مورد جداره‌های سبز عمودی و جداره‌های انطباق‌پذیر، تاریخچه پیدایش آن‌ها و تأثیری که می‌تواند بر کاهش مصرف انرژی داشته باشد، انجام شده است. این مطالعات اغلب بر روی یکی از راه‌حل‌ها متمرکز شده‌اند یا رویکرد جغرافیایی و اقلیمی خاصی دارند یا به بررسی کارایی انرژی ساختمان‌های خاصی پرداخته‌اند که از یک یا چند مورد خاص استفاده می‌کنند.

بنابراین، هیچ تحقیق کلی برای بررسی و مقایسه‌ی دو جداره‌ی نام برده (صرف نظر از منطقه جغرافیایی یا آب و هوایی خاص) برای توصیف عملکرد آن‌ها در کاهش انرژی انجام نشده است. چنین مطالعات مروری برای دانشجویان معماری مبتدی ضروری به نظر می‌رسد تا به آن‌ها کمک کند تا دانش عمومی را در شناخت فناوری‌های جدید در معماری و تأثیر آن‌ها بر حفاظت از محیط زیست و همچنین ایجاد ساختمان‌های دوستدار طبیعت در عین رفع نیازهای مردم به دست آورند. داشتن دانش کلی از راه‌حل‌های مختلف معماری در مورد بهره‌وری انرژی در جهان که با فرسودگی ذخایر سوخت فسیلی مواجه است بسیار مهم به نظر می‌رسد. کاربرد چنین مطالعات مروری که به طور کلی به موضوع می‌پردازد را می‌توان از طریق توانایی آن در ارتقاء دانش عمومی و مطابق با شرایط منحصر به فرد جغرافیایی، اقلیمی، فرهنگی و غیره درک و تحقق بخشید. علاوه بر این، نتایج این تحقیق مروری که یک معرفی کلی از جداره‌های نامبرده و تأثیرات آن‌ها بر مصرف انرژی ارائه می‌کند، می‌تواند در مطالعات آتی برای ارزیابی عملی تأثیر هر راه‌حل بر عملکرد آن در ساختمان با توجه به کاهش مصرف انرژی استفاده شود. با توجه به موارد ذکر شده در بالا، ضرورت انجام تحقیقات در زمینه‌ی کاهش مصرف انرژی بسیار لازم می‌نماید.

۴- ادبیات موضوع

۴-۱ مفهوم پوسته

معانی نما در لغت‌نامه‌های مختلف، تعاریف متفاوتی دارد که در لغت‌نامه عمید به معنی غلاف، جلد، قشر و در مقابل مغز آمده است (عمید، ۱۳۸۹: ۴۹۰) اما در فرهنگ معین به این شکل تعریف شده که قسمتی از ساختمان گیاه و بیرونی‌ترین قسمت اندام گیاه را شکل می‌دهد و قسمت‌های دیگر گیاه را می‌پوشاند (معین، ۱۳۸۵: ۵۸۳).

در میان اجزای ساختمان، پوسته به عنوان مهم‌ترین منبع نور و انرژی خورشیدی و همچنین کنترل نوفه‌های صوتی و کیفیت طراحی در بحث زیبایی‌شناسی و برگرمایش و سرمایش و تهویه‌ی تعدمی تأثیر بسزایی دارد. همچنین نقش مهمی در رفتار حرارتی ساختمان به عنوان جداکننده فضای داخلی و محیط خارجی ساختمان دارد. به کلیه سطوح اطراف ساختمان، اعم از بازشوها، سطوح نورگذر، دیوارها، کف‌ها و سقف‌ها و نظایر آن‌ها که از یک طرف با فضای کنترل نشده‌ی خارج و از طرف دیگر با فضای کنترل شده داخل ساختمان در ارتباط هستند پوسته گفته می‌شوند و پوسته‌ی خارجی ساختمان، شامل عناصری که در وجه خارجی خود مجاور خاک و زمین هستند نیز می‌باشد (حریری و همکاران، ۱۳۸۱: ۳).

نمای ساختمان نقش مهمی در مصرف انرژی دارد. آن‌ها راحتی و تعامل کاربران را با شرایط خارجی فراهم می‌کنند و به طور فزاینده‌ای به عنوان مجموعه پیچیده‌ای از عناصر سازگار، ناشی از تغییرات آب و هوایی و بهره‌وری انرژی در حال رشد هستند. نماها نیازهای مختلف ساختمان از جمله تهویه، گرمایش، سرمایش و غیره را برآورده می‌کنند و راه حلی مؤثر برای به حداقل رساندن مصرف انرژی و افزایش کیفیت محیط داخلی هستند (Ahmed et al., 2015). بنابراین، قابلیت و کارکرد مؤثر سیستم‌های مورد استفاده در نماها یک چالش کلیدی برای ساختمان‌های پایدار است (Ahmed, Abdel-Rahman et al., 2016).

هارالد دایلمان و همکارانش به چهار عملکرد از پوسته پرداخته‌اند که عبارتند از حفاظت، ایجاد ارتباط، معرفی، جزیی از فضای شهری (پاکزاد، ۱۳۸۲: ۵۳).

معماری هم می‌تواند تاثیر مثبت و هم تأثیر منفی بر میزان مصرف انرژی در ساختمان داشته باشد. همچنین پوسته‌هایی که قابلیت کنترل مصرف انرژی را دارند، محدود به پوسته‌های زیستی و انطباق‌پذیر که هدف این نوشتار است نشده، ساختارهای دیگر و همچنین نمونه‌هایی از مصالح با فناوری نانو را نیز شامل می‌شوند. با این حال تمرکز در این نوشتار بر روی پوسته‌هایی بر پایه‌ی طبیعت است. در طی سالیان حل مسایل انسان توسط طبیعت ثابت شده و حفظ و تداوم تعادل جهان زیستی موجب بقای انسان و محیط انسانی وابسته به او شده است.

هدف تقلید از طبیعت نیست بلکه انتزاع، تبدیل و توسعه روش‌ها و مکانیسم‌های انجام شده توسط موجودات زنده و سیستم‌های طبیعی است تا بتوان راه‌حل‌های کارآمدی برای طراحی مثلاً پوشش ساختمان پیدا کرد. همگرایی چالش‌های پوسته‌ی ساختمان با مکانیسم‌های موجود در طبیعت، برای طراحی پوسته‌هایی است که به‌طور تعاملی با طبیعت در ارتباط بوده و بتوانند برای راحتی کاربران، شرایط محیط پیرامون را تنظیم کنند (Badarnah Kadri, 2012).

با پیشرفت‌های روز افزون در تخصص‌های عملی و شناخت قابلیت‌های طبیعت، دیدگاه‌های بسیار جدیدی در پیش روی محققان و طراحان گشوده شده است. در این نوشتار قابلیت‌های طبیعت در بحث کنترل مصرف انرژی، به‌جوزده معماری وارد و این راهکارها در عناوین دوگانه‌ی نماهای زیست مینا «دیوارهای زنده» و انطباق‌پذیر بررسی می‌شود.

۴-۲- دیوارهای زنده

دیوار سبز اصطلاح رایجی است که به تمام اشکال سطوح دیوارهای پوشش گیاهی اطلاق می‌شود. روش‌های سنتی دیوار سبز از زمان باغ‌های معلق بابل و امپراتوری‌های روم و یونان از نظر تاریخی شناخته شده‌اند. در آب و هوای مدیترانه‌ای، درخت انگور معمولاً برای پوشاندن آلاچیق، سایه انداختن پوشش ساختمان، یا روی دیوارهای ساختمان، برای خنک کردن در طول تابستان استفاده می‌شد. از قرن هفدهم و هجدهم، بیشتر در انگلستان و اروپای مرکزی، استفاده از گیاهان بالارونده برای پوشش دیوارهای ساختمان گسترش یافت (Newton, J., et al., 2007) اولین تحقیقات در مورد نماهای سبز بر اساس جنبه‌های گیاه‌شناسی بود (Köhler, M., 2008). با این حال، از دهه ۱۹۸۰ ایده جدیدی مبنی بر نماهای سبز به عنوان کمک کننده به ارتقای اکولوژیکی شهرها مطرح شد.

دیوارهای سبز که به عنوان سیستم‌های سبزی عمودی نیز شناخته می‌شوند (Medl, A et al., 2017). به تمام سیستم‌هایی اطلاق می‌شود که سطح عمودی یک ساختمان را با گونه‌های گیاهی سبز می‌کنند (مانند نماها، دیوارها، دیوارهای کور، دیوارهای جداکننده و...) (Manso, M et al., 2015). جداره‌های سبز را می‌توان به‌طور کلی به دو دسته اصلی، نمای سبز و دیوارهای زنده تقسیم کرد. نماهای سبز معمولاً مبتنی بر استفاده از گیاهان بالارونده هستند که مستقیماً در مقابل دیوار رشد می‌کنند یا دارای یک سیستم پشتیبانی غیرمستقیم (مانند سبیم، مش، داربست) می‌باشند (Vox, G et al., 2018). نماهای سبز معمولاً پوشش سطحی آهسته‌ای دارند و انتخاب گیاهان محدودی را شامل می‌شوند. در عوض، دیوارهای زنده، چه مدولاریا پیوسته، امکان رشد یکنواخت‌تر پوشش گیاهی را در امتداد سطح و همچنین کاربرد گونه‌های مختلف گیاهی را فراهم می‌کنند. با این حال، سیستم‌های دیوار زنده ممکن است به آبیاری مکرر و تأمین مواد مغذی نیاز داشته باشند که یکی از محدودیت‌های این نوع دیوار می‌باشد (Perini, K et al., 2013).

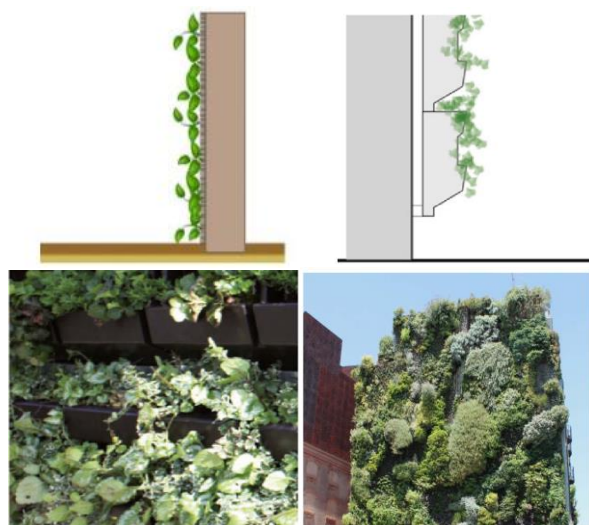
با معیار قرار دادن ویژگی‌ها و عوامل مختلف، می‌توان دسته بندی‌های متفاوتی را برای سیستم‌های جداره سبز عمودی قائل شد. از آنجا که در مباحث مربوط به گیاهان بستر رشد و تغذیه ریشه گیاه بسیار مهم و تأثیرگذار است، بر اساس آن، دو دسته کلی بنام‌های نماهای سبز و دیوارهای زنده تعریف می‌شود که مورد تأیید اکثر پژوهشگران می‌باشد (gaafar, et al., 2011). گرچه ممکن است نام این دو دسته در منابع مختلف با اسامی مختلف دیده شوند اما در ماهیت گویای این تقسیم‌بندی دوگانه هستند. تعاریف و واژه‌شناسی نمای سبز و نمای زنده در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- تعاریف و واژه شناسی دسته های مختلف جداره های سبز عمودی
(بهاروند، صفی خانی، ۱۳۹۷)

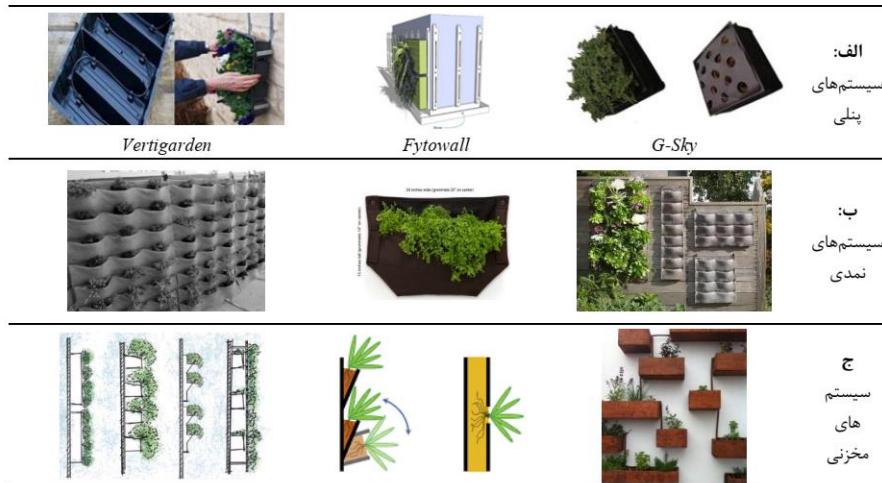
تعریف دیوار سبز:		تعریف دیوار زنده:	
قرارگیری بستر رشد و ریشه گیاه بر زمین و رشد گیاه به صورت عمودی بر سطح نما		قرارگیری بستر رشد و ریشه گیاه به صورت عمودی بر سطح یا در مقابل نما	
واژه شناسی دیوار سبز		واژه شناسی دیوار زنده	
اصطلاحات به کار رفته معادل دیوار سبز	منبع	اصطلاحات به کار رفته معادل دیوار زنده	منبع
Green Facade /Green Wall (نمای سبز / دیوار سبز)	(Kohler, 2009) (Jaafar, 2011) (Konotoleon. 2010) (Perini, 2011) (Perez, 2011)	Living Wall / Living Facade (دیوار زنده / نمای زنده)	(Jaafar, 2011) (Konotoleon. 2010) (Perini, 2011) (Perez, 2011)
Green Vertical System (سیستم عمودی سبز)	(Perez, 2011)	vertical Garden (باغ عمودی)	(Binabid. 2010)
Sponsored System (سیستم حمایت شونده)	(Jaafar, 2011)	Carrier System (سیستم حامل)	(Jaafar, 2011)
Facade Greening (نمای سبز شده)	(Perini, 2011)	Bio- Wall (دیوار زنده)	(Binabid. 2010)

اولین حق ثبت اختراع یک دیوار زنده (LW) نیز به آن دهه بر می گردد که استنلی هارت وایت، استاد دانشگاه ایلینویز (ایالات متحده آمریکا)، سیستمی به نام «آجر گیاهی» را اختراع کرد (Bosch, Sang, 2017).

دیوارهای زنده یک حوزه کاملاً جدید از نوآوری در زمینه روکش دیوار هستند. آن‌ها امکان ادغام دیوارهای سبز در ساختمان‌های مرتفع و همچنین پوشش سریع سطوح بزرگ و رشد یکنواخت‌تر در امتداد سطح عمودی را فراهم می کنند و به مناطق بالاتر می رسند و با انواع ساختمان‌ها سازگار می شوند. آن‌ها همچنین امکان ادغام انواع وسیع تری از گونه های گیاهی را فراهم می کنند. سیستم های دیوار زنده (LWS) را می توان با توجه به روش کاربردشان به دو دسته پیوسته یا مدولار طبقه بندی کرد. LWS پیوسته مبتنی بر کاربرد صفحات سبک وزن و نفوذپذیر است که گیاهان به صورت جداگانه در آن قرار می گیرند، LWS مدولار عناصری با ابعاد خاص هستند (Bribach, C. 2011). معمولاً یک دیوار زنده (LWS) بلافاصله پس از نصب امکان استفاده بیشتر انرژی و مزایای زیست محیطی را فراهم می کند، زیرا گیاهان قبلاً رشد کرده و در نتیجه نمای ساختمان کاملاً توسط ساختار گیاهی پوشیده شده است (Weinmaster, M. 2009).



شکل ۱- انواع دیوار زنده (Besir, A. B., & Cuce, E. 2018)



شکل ۲- انواع سیستم های دیوار زنده بر اساس نوع و مصالح محفظه (بهاروند، صفی خانی، ۹۷)

علاقه روزافزون به سیستم های سبز عمودی به چندین مزیت در مقیاس شهری و ساختمانی برمی گردد، برخی از فواید به طور مستقیم با رفاه انسان مرتبط است مانند کاهش اثر جزیره گرمایی شهری، افزایش کیفیت هوای شهر و بهبود زیبایی شهرها؛ کاهش نویز و بهبود بهره وری انرژی (Raji, B et al., 2015).

جداره های سبز عمودی (نمای سبز و دیوار زنده) به دلیل مزایای زیست محیطی فراوان، به عنوان راهکارهای پایدار برای احیای فضاهای شهری در نظر گرفته می شوند. ظهور پوشش گیاهی در بافت شهر می تواند اثرات درمانی داشته باشد. این اثرات بیشتر می تواند منجر به رفاه روانی، بهبود سیمای شهر، افزایش ارزش دارایی و جلوگیری از آلودگی صوتی شود. دیوارهای زنده پتانسیل کاهش آلودگی صوتی در محیط های شهری را دارد، زیرا این سیستم ها با جذب، پراکنده و تأثیر بر انعکاس صدای معلق در هوا، ویژگی های صوتی محیط اطراف را بهبود می بخشد. همچنین پتانسیل کاهش نویز دیوارهای زنده نه تنها بر نویز در محیط شهری اطراف، بلکه بر انتقال صدا به داخل ساختمان درسطوحی که سیستم اجرا شده است، تأثیر می گذارد. ویژگی های پوشش گیاهی و بستر (بعد و شکل شاخ و برگ، سیستم ریشه، تراکم بستر و غیره) به طور مداوم در طول سال در حال تغییر است و بر ظرفیت جذب و بازتاب صدا تأثیر می گذارد (Van Renterghem et al., 2013).

از مزایای دیگر جداره های سبز (دیوار زنده) می توان به صرفه جویی در انرژی، کاهش انتقال صدا به ساختمان ها، کمک به تصفیه آب خاکستری و افزایش طول عمر پوشش ساختمان اشاره کرد و همچنین اجرای آن ها ممکن است مزایای دیگری از جمله ارتقای زیبایی شناختی و به استفاده تفریحی از فضاهای عمومی کمک کند، به عنوان مثال امکان استفاده از آن ها برای کشاورزی شهری، تقویت تنوع زیستی وجود دارد و در عین حال ارتقای سلامت و رفاه شهروندان را فراهم می کند. دیوارهای زنده می توانند دیوارهای خالی را تحت الشعاع قرار دهند و از آنها محافظت کنند و به کاهش دمای سطح و هوا کمک کنند. در واقع دیوارهای زنده می توانند یکی از ویژگی های ساختمان های جدید و راه حل های جالبی برای مقاوم سازی ساختمان ها باشند (Ascione, F et al., 2020).

در مقیاس ساختمان، سیستم های دیوار زنده را می توان به عنوان یک راه حل طراحی غیرفعال استفاده کرد که به عملکرد پایداری ساختمان ها کمک می کند و پوشش گیاهی آن که در زمستان که به عنوان یک لایه عایق مکمل و در تابستان با ایجاد سایه و به عنوان یک اثر خنک کننده تبخیری عمل کرده و قابلیت بهبود ریز اقلیم را نیز دارد. پوشش گیاهی مقادیر زیادی از تشعشعات خورشیدی را جذب می کند در حالی که اثر تبخیر و تعرق گیاهان می تواند تأثیر تابش خورشیدی را بیشتر کاهش دهد و سطوح رطوبت را افزایش داده و دمای سطح را کمتر از سطوح سخت نشان دهد. مطالعات اخیر نشان می دهد که سیستم های دیوار زنده توانایی کنترل افزایش و تلفات گرما را دارند، که به بهبود آسایش حرارتی داخلی و کاهش تقاضای انرژی برای گرمایش یا سرمایش کمک می کنند (Koyama, T, et al., 2013).

باد می تواند بازده انرژی ساختمان را تا ۵۰ درصد کاهش دهد در حالی که یک لایه گیاهی با جلوگیری از حرکت باد در امتداد سطح ساختمان به عنوان یک حائل عمل می کند (Ottel  et al., 2014). علاوه بر این، نور مستقیم خورشید از طریق برگ ها فیلتر می شود و از تماس مستقیم با بدنه ساختمان جلوگیری می کند. چنین لایه پوشش طبیعی ساختمان ها را پایین می آورد.

درجه حرارت در طول تابستان در حالی که مانع خروج گرمای داخلی در زمستان می شود. از سوی دیگر، بام ها و نماهای سبز، هوای گرم شده را با تبخیر خنک می کنند. سبز کردن نمای ساختمان ها با استفاده از گیاهان دارای مزایای زیبایی شناختی و زیست محیطی نیز می باشد (Ottel  et al., 2014). این سیستم ها می توانند آلودگی هوا را کاهش داده و کیفیت هوا را با جذب گرد و

غبار ریز در هوا بهبود بخشند با استفاده از نماهای سبز در ساختمان، برخی از مزایای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی از جمله کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، سازگاری با تغییرات آب و هوا، کاهش تأثیر جزیره گرمایی بر محیط‌های شهری حاصل می‌شود (Manso, M., & Castro-Gomes, J. 2015). افزایش تنوع زیستی، عایق حرارتی، رفاه اجتماعی و روانی شهرنشینان. لازم به ذکر است که با کاهش دمای هوای داخلی به میزان ۰/۵ درجه سانتیگراد، تا ۸ درصد در مصرف برق برای تهویه مطبوع صرفه جویی می‌شود (Dunnett, N., & Kingsbury, N 2008). همچنین استفاده از این سیستم می‌تواند مصرف برق ساختمان را تا ۱۶ درصد در ماه‌های گرم تابستان کاهش دهد (Pan, L., & Chu, L. M. (2016). همچنین می‌توان از پوشش گیاهی برای کاهش انتقال صدا استفاده کرد (Wong et al., 2010).

در سال‌های اخیر، تنوع سیستم‌های دیوار سبز موجود در بازار به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از شرکت‌های نصب، Perini و Rosasco ساختار خود سیستم‌های دیوار سبز، که نماهای سبز یا دیوارهای زنده هستند، ۵۰ سال عمر مفید دارند. با این حال دیوارهای زنده اغلب نیاز به آبیاری گیاهان و جایگزینی ۵٪ تا ۱۰٪ گونه‌های گیاهی خود در هر سال را دارند و همچنین در سیستم‌های دارای آبیاری خودکار این‌گونه دیوارها، به دلیل کریستالیزه شدن نمک نیاز به تمویض لوله‌های آب هر ۵ تا ۷ سال یکبار داشته باشند (Lunain, D., & Perini, K., & Rosasco, P. 2013).
Gauvreau, B. 2016

هنگام بررسی چرخه حیات برخی از دیوار زنده ممکن است پایداری آن‌ها مورد توجه قرار گیرد. تفاوت در نوع مواد مورد استفاده، دوام آن‌ها، پتانسیل بازیافت، دوام پوشش گیاهی و مصرف آب می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کل بار محیطی داشته باشد (Perini, K., & Magliocco, A. 2012).

در بررسی‌های اخیر که در مورد سیاست‌های تشویقی برای ترویج اجرای بام‌های سبز و دیوارهای سبز انجام شد، ۱۴۳ مشوق مختلف را در ۱۱۳ شهر مختلف شناسایی کرد. از این تعداد، تنها ۲۲ مشوق از نصب دیوارهای سبز همراه با بام سبز حمایت کردند. بقیه فقط از تأسیسات بام سبز پشتیبانی می‌کنند. علاوه بر این، هیچ بودجه انحصاری یا سیاست‌های تشویقی به تنهایی به ترویج دیوارهای سبز اختصاص داده نشد (Liberalesso, et al., 2020).

۴-۳- پوسته‌های انطباق پذیر

با توجه به تغییرات اقلیمی و آلودگی محیط زیست، ارتباط و تعامل انسان با طبیعت خیلی بیشتر از قبل باید گردد. یکی از ویژگی‌های مهم طبیعت تغییر در ساختار خود برای سازگاری تحت شدیدترین شرایط زیستی و آب و هوایی است تا با کمترین مصرف انرژی به بهترین حالت ممکن بتواند به حیات خود ادامه دهد. این شیوه باعث به‌وجود آمدن گونه‌های مختلف معماری از جمله معماری انطباقی، معماری بیونیک، معماری بیومیمتیک، معماری واکنشی شده است (منصوریان، ۱۳۸۸).

تطبیق پذیری در معماری بحث جدیدی نیست و می‌توان آن را در معماری سنتی ایران و سایر نقاط دنیا مشاهده کرد. ساختمان‌های سازگار با اقلیم دارای پیشینه‌ای طولانی می‌باشند. به بیان دقیق از زمانی که انسان برای بقا به مبارزه جهت مقابله با شرایط آب و هوایی با استفاده از لباس و سرپناه پرداخت، وجود دارد (Behling & Schindler, 1996).

در چند دهه اخیر مهندسين و معماران به نماهای متحرکی که قابلیت وفق‌پذیری با تغییرات آب و هوایی و نیازمندی‌های ساکنین دارند، علاقمند شده‌اند و به دنبال نصب و طراحی این‌گونه نماها هستند که نه تنها ارزش زیبایی‌شناسی دارند بلکه موجب ارتقا عملکرد ساختمان در زمینه صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شوند (Sharaidin & Salim, 2012).

علاقه معماران و طراحان معماری واکنش‌گرا عبارات و سبک‌های مختلفی مانند «معماری پویا»، «معماری جنبشی»، «معماری سازگار و انعطاف‌پذیر»، «معماری هوشمند» و «معماری زیستی» را پوشش می‌دهد. این شامل جنبه‌هایی از همه این اصول طراحی است و به عنوان پاسخی به شرایط محیطی و رفتارهای کاربر تعریف می‌شود (Hensel, 2013; Werner, 2013).

در این راستا، سیستم‌های جنبشی و پاسخگو توسط معماران به کار گرفته شده است تا سیستم‌های موجود را با فضاهای معماری سازگار و منعطف که با شرایط محیطی و نیازهای کاربران سازگار بوده و به عنوان راه‌های مؤثر برای کاهش مصرف بالای انرژی شناخته می‌شوند، جایگزین کنند (Osório, Paio, & Oliveira, 2014) در شکل‌های ۳ و ۴ نمونه‌هایی از این‌گونه نماها را مشاهده می‌فرمایید.



شکل ۳ - برج‌های دوقلو البحر ابوظبی (Alotaibi, F. 2015)



شکل ۴ - ساختمان Q1 در آلمان (Alotaibi, F. 2015)

به گفته چاک هابرم (۲۰۰۸) سیستم‌های تطبیقی بهترین استراتژی برای ترکیب مصرف انرژی پایین در ساختمان‌ها و کنترل شرایط محیط در آن‌هاست. اگر طراحی یک ساختمان با نوسانات روزانه دما منطبق با هدف انرژی مورد نیاز یک ساختمان به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. سیستم انطباقی مدولار با کنترل حجم و جهت جریان گرما در پاسخ به شرایط داخلی و خارجی می‌تواند به راحتی عملکرد حرارتی ساختمان را بالا برد (Hansanuwat, 2010).

تمام نیروهایی که بر ساختمان‌ها تأثیر می‌گذارند مانند، اقلیم، انرژی، عوامل انسانی و ... ثابت نیستند بلکه متغیر و گذرا هستند. این تغییرات پیامدهای جدیدی برای اجزای ساختمان به ویژه نما ایجاد می‌کند و این بدان معنی است که طراحی این اجزا باید نقش بیشتری از یک پوشش محافظ کننده فضای داخلی و خارجی داشته باشد (Trubiano, 2013).

مولونی در کتاب «طراحی سینتیک برای نماهای معماری» به جزئیات حرکات مختلف در عناصر جنبشی می‌پردازد که برای نماهای واکنش‌پذیر و قابل تبدیل مناسب است و با کاهش مصرف انرژی و بهره‌مندی از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند نقش بسزایی در حفاظت از محیط طبیعی داشته باشد (Moloney, 2011). بسیاری از مطالعات دیگر نیز نشان می‌دهند که نماهای پاسخ‌گو می‌توانند اثرات محیطی را کاهش داده و وابستگی به سیستم‌های مکانیکی را کاهش دهند و در نتیجه مصرف انرژی کمتری داشته باشند (Hansanuwat & Kensek, 2011).

استرک که یکی از پیشگامان توصیف ساختمان‌های انطباق‌پذیر است، معماری انطباقی را «نوعی از معماری شامل اصلاحات و تغییرات در فرم به منظور داشتن حرکت و واکنش مستمر نسبت به شرایط محیطی پیرامون خود» می‌داند. در نمای ساختمان، سیستم پاسخ‌گو نحوه قرارگیری سازه‌های مکانیکی در کنار معماری است تا بتواند عمل متقابل و هوشمندانه را بر روی یکدیگر اعمال کند (Asefi & Ahmadnejad Karimi, 2016). سطوح می‌توانند حرکت کنند تا ظاهر را تغییر دهند یا ویژگی‌های خاصی را برای پخش و کنترل نور، افزایش گرما و حتی صدا تنظیم کنند (Kirkegaard & Parigi, 2012).

در سال‌های اخیر، نماهای تطبیقی - جنبشی به دلیل توانایی‌شان در دستیابی به معماری انعطاف‌پذیر و پویا، توجه معماران و طراحان را به خود جلب کرده‌اند. در طراحی پوسته جنبشی، ایده اصلی طراحی نمایی است که در عناصر معماری خود شکلی از دگرگونی فیزیکی و خودکار داشته باشد که بر اساس تغییرات محیطی و شرایط اقلیمی بهترین پاسخ را ارائه دهد و موجب آسایش کاربران از لحاظ کیفیت و کمیت دما، روشنایی، دید و کاهش مصرف انرژی ایجاد نماید. (Asefi & Ahmadnejad Karimi, 2016) به عبارت دیگر، این نماها با تغییر شکل اجزای خود، از طرق مختلف مانند چین خوردگی، انبساط و پوسته‌پوسته شدن با تغییرات محیطی تطبیق پیدا می‌کنند (Ghaffarian Hoseini, et al., 2012).

نماهای پاسخ‌گو می‌توانند بر اساس شرایط محیطی مختلف تغییر فاز داده و راه را برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها هموار کنند. نمونه‌های زیادی از این دست وجود دارد که علاوه بر کاهش مصرف، به تولید انرژی در ساختمان‌ها نیز کمک کرده است (Asefi & Ahmadnejad Karimi, 2016). نماهای چند منظوره، تطبیقی و جنبشی را می‌توان پیشرفت قابل توجهی در آینده در فناوری نما در نظر گرفت. نماهای ساختمان تطبیقی جنبشی می‌توانند با واکنش به شرایط بیرونی، عایق کاری صرفاً در صورت نیاز، تولید انرژی در صورت امکان، سایه اندازی یا تهویه هر زمان که برای افزایش راحتی داخلی و در نتیجه آشنایی با رفتار و عملکرد مورد نیاز باشد، همراه با اکوسیستم و کاربر عمل کنند (Yitmen, Al-Musaed, & Yücelgazi, 2021). طراحی ساختمان با استفاده از فناوری‌های پویا امکان بسیار خوبی برای طراحی محیط زندگی با کیفیت بالاتر و هم‌چنین راه‌حلی برای کاهش مصرف انرژی فراهم می‌کند (Lorenz, 2001).

از این رو استفاده از عناصر جنبشی در معماری به منظور کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها به دلیل سازگاری آن با شرایط مختلف محیطی پیشنهاد شده است. یکی از این عناصر مهم نمای متحرک سازگار و انطباق‌پذیر است. از آنجایی که نمای ساختمان واسطه بین نمای داخلی و خارجی است، می‌تواند نقش اصلی را در کنترل شرایط محیطی داشته باشد (Asefi & Ahmadnejad Karimi, 2016). بنابراین، استفاده از عناصر انطباق‌پذیر و پاسخ‌گو در سال‌های اخیر به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است.

۵- بحث پیرامون یافته‌ها

یکی از جریان‌های اصلی در معماری امروز، معماری بر مبنای شرایط اقلیمی و بوم‌شناختی است. یکی از اصلی‌ترین بخش‌های که در حوزه‌ی صرفه‌جویی مصرف انرژی می‌تواند اهمیت زیادی را داشته باشد پوسته‌های خارجی ساختمان‌ها هستند در این مقاله سعی شد شناخت جامعی نسبت به این موضوع کسب شود و در ادامه روی پوسته‌های و خصوصیات آن‌ها بحث شود.

انتقال حرارت توسط جداره‌های ساختمان به سه شکل صورت می‌پذیرد. بعضی از جداره‌ها در برابر انتقال حرارت، مقاومت کمی از خود نشان می‌دهند که هادی حرارت نامیده می‌شوند و از مصالحی که قابلیت هدایت حرارتی زیادی دارند، ساخته می‌شوند مانند شیشه و فلزات. بعضی از جداره‌ها از موادی با قابلیت هدایت حرارتی کم یا مقاومت زیاد ساخته می‌شوند، این نوع جداره‌ها به صورت عایق حرارت عمل می‌نمایند و مانع انتقال حرارت از یک سمت به سمت دیگر خویش می‌شوند. بنابراین بین هوای دو طرف آن‌ها، اختلاف چشم‌گیری وجود دارد. بعضی از مصالح تا حدی به شکل عایق عمل کرده و نقش خازن و ذخیره‌کننده حرارت را دارند، چون دارای خلل و فرج هوا در داخل خود هستند، حرارت دریافتی را در خودشان انبار کرده و با تأخیر زمانی منتقل می‌کنند. جداره‌هایی که از مصالح ساختمانی سنگین از جمله آجر، بتن، خشت و... ساخته شده‌اند، از جمله جداره‌هایی هستند که هوا در دو سمت آن‌ها متفاوت می‌باشد و پوسته‌های زیست‌منا و انطباق‌پذیر از نوع دوم می‌باشند.

با رشد چشم‌گیر شهرها و افزایش مناطق ساخته شده، کاهش اثرات جزیره گرمایی شهری به یکی از حیاتی‌ترین چالش‌ها در پایداری اجتماعی و زیست محیطی با تأثیرات قابل توجه بر سلامت عمومی تبدیل شده است. این امر منجر به توسعه روزافزون زیرساخت‌های سبز شهری شده است. در میان این راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت، سیستم‌های دیوارهای زیست‌منا (دیوار زنده) توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده‌اند، به عنوان یک فناوری غیرفعال با توانایی آن‌ها در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، سازگاری با تغییرات آب و هوا، بهبود کیفیت هوا و کاهش اثر جزیره گرمایی در محیط‌های شهری، اما در پوسته‌های انطباق‌پذیر علاوه بر کاهش مصرف انرژی و هدر رفت، مزایای دیگری نیز می‌توان نام برد که شامل افزایش عمر مفید ساختمان با سازگاری بیشتر و سازگاری بیشتر با کاربران و دستیابی به اهداف توسعه پایدار از آن جمله می‌باشند. با استفاده از سیستم‌های

پاسخ گو، تهویه طبیعی و کنترل شرایط محیطی امکان پذیر شده و منجر به کاهش مصرف انرژی در ساختمان می شود. راه حل های واکنش گرا در پوسته های ساختمان های مسکونی با عملکردهای مختلفی مانند کنترل دما، کنترل روشنایی، ذخیره انرژی، تولید انرژی و ... باعث کاهش مصرف انرژی می شود که عملکرد آن ها را می توان به طور دقیق تر به شرح زیر بیان کرد:

- میزان دریافتی انرژی خورشیدی را افزایش دهید
- کاهش اتلاف انرژی داخلی
- نور طبیعی بهینه روز را دریافت کنید
- ایجاد تهویه طبیعی
- میزان گرمای دریافتی اضافی را کنترل کنید
- به عنوان عایق حرارت عمل کنید
- تنظیم دما از طریق ذخیره انرژی (سرما و گرما)
- کاهش استفاده از سیستم های مکانیکی
- تولید برق

• به حداقل رساندن اثرات نامطلوب (Zolfagharpour, et al., 2022)

در تطبیق وضعیت هریک از پوسته های زیست مبنا و انطباق پذیر با شرایط فعلی کشور، آن چه مهم است دستیابی به راه حلی پربازده و زودبازده است. در مورد دو نمای نامبرده می توان عنوان داشت که نمای انطباق پذیر علی رغم قابلیت های بسیار مفید ذکر شده، به دلیل نوپا و ناآشنا بودن تکنولوژی، راه حل کنونی نیست، اگرچه مروری بر مقایسه های صورت گرفته نشان می دهد که دیوار زنده در همه ی زمینه ها گزینه ی اول نمای بهینه نیست، اما در تجمیع و با اشراف نسبت به قابلیت ها و امکانات موجود در کشور، در شرایط فعلی گزینه ی مطلوب بوده و بهره گیری از جداره های زنده در فضای شهری می تواند به طور محسوسی موجب کاهش مصرف انرژی در مقیاس خرد شود. هر چند هزینه های مستقیم نصب، اجرا و نگهداری این جداره ها بالا بوده اما در مقایسه با میزان صرفه جویی در هزینه ناشی از کاهش انرژی مصرفی در داخل به لحاظ کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی مقرون به صرفه به نظر می رسند، با در نظر گرفتن موارد بررسی شده در این پژوهش دیواره های زنده می توانند یکی از گزینه های مؤثر در بهبود مصرف انرژی باشد.

۶- نتیجه گیری

یک ساختمان کارآمد انرژی از فناوری های فعال و غیرفعال برای مقابله با اتلاف گرمای انتقالی استفاده می کند که بر مصرف انرژی تأثیر می گذارد. بیشترین انرژی ورودی در یک ساختمان در موادی است که به عنوان انرژی تجسم یافته شناخته می شوند. دیکسیت و همکاران (۲۰۱۲) انرژی تجسم یافته را مانند انرژی ذخیره شده در ساختمان ها و مصالح ساختمانی در طول کل چرخه زندگی تعریف می کند. بخش ساخت و ساز یکی از مهم ترین اثرات زیست محیطی بر شهرها را دارد و برای مواجهه با پیامدهای آن و کاهش مصرف انرژی لازم است راه حل هایی با عملکرد کارآمد در کل چرخه حیات آن ترویج شود. فن آوری های جدید و فرآیندهای ساخت و ساز ساختمان به منظور بهبود پایداری و کارایی پوشش های ساختمانی در حال توسعه هستند. تحقیقاتی برای توسعه نماهای زیست مبنا و نماهای سازگار و هوشمند جدید انجام شده است که رفتار حرارتی و سازگاری آن ها را با زمینه های مختلف آب و هوایی برجسته می کند در این میان، نماهای گیاهی به ویژه قابل توجه است. سبز کردن پوشش ساختمان مزایای مربوط به بهبود کارایی، کمک به زمینه فوری از طریق تنظیم دما و کاهش سرعت باد، و همچنین افزایش تنوع زیستی در محیط های شهری متراکم را فراهم می کند (Perini et al., 2011). سیستم های دیوار زنده (LWS) به عنوان بخشی از راه حل های سبز عمودی می تواند کیفیت زندگی شهری را بهبود بخشد و اثرات زیست محیطی جهانی ناشی از تغییرات آب و هوایی را کاهش دهد هر چند برخی معایب این نوع دیوارها که از جمله آن ها هزینه بالای راه اندازی و اجرای این دسته نماها می باشد، مطرح است اما از آن جا که نرخ بازگشت سرمایه در پروژه های ساختمانی بستگی به اختلاف مصرف انرژی در قبل و بعد از پیاده سازی ضربدر قیمت روز انرژی بعلاوه میزان کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری تأسیسات دارد. بنابراین هر قدر قیمت حامل های انرژی و یا هزینه نگهداری و تعمیرات بالاتر باشد، دوره بازگشت سرمایه اجرای پروژه کوتاه تر خواهد بود؛ که با توجه به حذف یارانه ها بازگشت سریع تری دارد.

منابع

۱. خان احمدلوس، فیضی م، مفیدی شمیرانی م، (۱۳۹۵)، «تأثیر بررسی رفتار حرارتی پوسته بنا در ساختمان های مسکونی»، مجله مدیریت شهری، ۴۷: ۴۴۶-۴۳۳.
۲. پوردیهمی ش، گسیلی ب، (۱۳۹۳)، «بررسی شناسه های حرارتی جداره های پوسته خارجی بنا (نمونه موردی مناطق روستایی اردبیل)»، مجله مسکن و محیط روستا، ۱۵۰: ۷۰-۵۳.

۳. مداحی، م، و عباسی، م، (۱۳۹۸)، «تحلیل رفتار حرارتی پوسته خارجی_ نمایی ساختمان با مصالح و تکنولوژی‌های اجرای سنتی و نوین با هدف بهینه سازی مصرف انرژی، مورد مطالعاتی: ساختمان های مسکونی شهر مشهد»، معماری و شهرسازی آرمان شهر، ۲۹: ۱۶۷-۱۸۳.
۴. عمید، ح، (۱۳۸۹)، «فرهنگ فارسی»، فرهنگستان فرهنگ و ادب فارسی، تهران، ۴۹۰.
۵. معین، م، (۱۳۸۵)، «فرهنگ واژگان فارسی»، انتشارات امیرکبیر، تهران، ۵۸۳.
۶. پاک زاد، ج، (۱۳۸۲)، «پدیدار شناسی نمای ساختمان های مسکونی و سیر تکوینی توقعات از آن». هنرهای زیبا، ۱۴: ۱۰۲-۹۱.
۷. حریری، م، حبیبی، م، خاکپور، م، فیاض، ر، (۱۳۸۱)، «مبحث ۱۹ صرفه جویی در مصرف انرژی»، تهران، نشر توسعه ایران: ۳.
۸. نصراللهی، ف، (۱۳۹۰)، «ضوابط معماری و شهرسازی کاهنده مصرف انرژی ساختمان‌ها»، نشست کمیته ملی انرژی ایران: ۲.
۹. بهاروند، م، و صفی خانی، ت، (۱۳۹۸)، «بهینه سازی عملکرد سیستم های سبز عمودی (نماهای سبز)»، شباک، ۴۴: ۴۲-۵۲.
۱۰. اسودی، ف، (۱۳۹۶)، «طراحی باهمستان با رویکرد نمای تطبیق پذیر به منظور کاهش اتلاف انرژی»، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی.
۱۱. منصوریان، علیرضا، (۱۳۸۸)، «بررسی وضعیت آموزشی مهندسی خلاقیت بیونیک»، آموزش مهندسی ایران، ۱۱(۴۱)، ۹۱-۶۹.
12. Behling, S., & Schindler, B. (1996). Sol power: the evolution of solar architecture. London: Prestel.
13. Sharaidin, K., & Salim, F. (2012). Design considerations for adopting kinetic facades in building practice. In the Proceedings of the 30th International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 2012) (Vol. 2, No. 30, pp. 619-628).
14. Hansanuwat, R. (2010). Kinetic facades as environmental control systems: using kinetic facades to increase energy efficiency and building performance in office buildings (Doctoral dissertation, University of Southern California).
15. Jaafar, B. and Said, I. and Rasidi, M. H. (2011). Evaluating the Impact of Vertical Greenery System on Cooling Effect on High Rise Buildings and Surroundings: A Review. The 12th International Conference on Sustainable Environment and Architecture (Senvar) 10th to 11th November 2011
16. Hensel, M. (2013). Performance-oriented architecture: rethinking architectural design and the built environment. John Wiley & Sons.
17. Asefi, M., & Ahmadnejad Karimi, M. (2016). Technology of Movable Architecture Theoretical and Functional Principles of Transformable Architecture.
18. Ahmed, M. M., Abel-Rahman, A. K., & Ali, A. H. H. (2015). Development of intelligent façade based on outdoor environment and indoor thermal comfort. Procedia technology, 19, 742-749.
19. Ahmed, M., Abdel-Rahman, A., Bady, M., Mahrous, E., & Suzuki, M. (2016). Optimum energy consumption by using kinetic shading system for residential buildings in hot arid areas. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 5(2), 2.
20. Moloney, J. (2011). Designing kinetics for architectural facades: state change. Taylor & Francis.
21. Kensek, K., & Hansanuwat, R. (2011). Environment control systems for sustainable design: a methodology for testing, simulating and comparing kinetic facade systems. Journal of Creative Sustainable Architecture & Built Environment, 1(11), 27-46.
22. Osório, F., Paio, A., & Oliveira, S. (2014). kinetic origami surface. KOS-kinetic origami surface, 201-210.
23. Kirkegaard, P. H., & Parigi, D. (2012). On control strategies for responsive architectural structures. In IASS-APCS 2012 Proceedings: from spatial structures to space structures. The International Association for Shell and Spatial Structures.
24. Yitmen, I., Al-Musaed, A., & Yücelgazi, F. (2021). ANP model for evaluating the performance of adaptive façade systems in complex commercial buildings. Engineering, Construction and Architectural Management, 29(1), 431-455.
25. Lorenz, W. (2001). A glazing unit for solar control, daylighting and energy conservation. Solar Energy, 70(2), 109-130.
26. Zolfagharpour, A., Shafaei, M., & Saeidi, P. (2022). Responsive Architecture Solutions to Reduce Energy Consumption of High-Rise Buildings. Iran University of Science & Technology, 32(3), 0-0.
27. Van Renterghem, T., Hornikx, M., Forssen, J., & Botteldooren, D. (2013). The potential of building envelope greening to achieve quietness. Building and Environment, 61, 34-44.

28. Medl, A., Stangl, R., & Florineth, F. (2017). Vertical greening systems—A review on recent technologies and research advancement. *Building and Environment*, 125, 227-239.
29. Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and sustainable energy reviews*, 41, 863-871.
30. Vox, G., Blanco, I., & Schettini, E. (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, 129, 154-166.
31. Perini, K., Ottel , M., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2013). Vertical greening systems, a process tree for green façades and living walls. *Urban Ecosystems*, 16, 265-277.
32. Raji, B., Tenpierik, M. J., & Van Den Dobbelssteen, A. (2015). The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 610-623.
33. Weinmaster, M. (2009). Are green walls as “green” as they look? An introduction to the various technologies and ecological benefits of green walls. *Journal of Green Building*, 4(4), 3-18.
34. Koyama, T., Yoshinaga, M., Hayashi, H., Maeda, K. I., & Yamauchi, A. (2013). Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. *Building and Environment*, 66, 96-103.
35. Newton, J., Gedge, D., Early, P., & Wilson, S. (2007). *Building Greener: Guidance on the Use of Green Roofs, Green Walls and Complementary Features on Buildings*.
36. Dunnett, N., & Kingsbury, N. (2008). *Planting green roofs and living walls*. Portland, OR: Timber press.
37. K hler, M. (2008). Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, 11, 423-436.
38. Bribach, C. (2011). Vertical garden panel. US, 59518, A1.
39. Ottel , M., Perini, K., & Haas, E. M. (2014). Life cycle assessment (LCA) of green façades and living wall systems. In *Eco-efficient construction and building materials* (pp. 457-483). Woodhead Publishing.
40. Perini, K., Ottel , M., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, 1(01), 1.
41. Pan, L., & Chu, L. M. (2016). Energy saving potential and life cycle environmental impacts of a vertical greenery system in Hong Kong: A case study. *Building and Environment*, 96, 293-300.
42. Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Tan, P. Y., Chiang, K., & Wong, N. C. (2010). Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and environment*, 45(2), 411-420.
43. Shibuya, T., & Croxford, B. (2016). The effect of climate change on office building energy consumption in Japan. *Energy and Buildings*, 117, 149-159.
44. Allouhi, A., El Fouih, Y., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraouli, Y., & Mourad, Y. (2015). Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends. *Journal of Cleaner production*, 109, 118-130.
45. Alotaibi, F. (2015). The role of kinetic envelopes to improve energy performance in buildings. *Journal of Architectural Engineering Technology*, 4(3), 149-153.
46. Badarnah Kadri, L. (2012). Towards the LIVING envelope: biomimetics for building envelope adaptation.
47. Van den Bosch, M., & Sang,  . O. (2017). Urban natural environments as nature-based solutions for improved public health—A systematic review of reviews. *Environmental research*, 158, 373-384.
48. Besir, A. B., & Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 915-939.
49. Ascione, F., De Masi, R. F., Mastellone, M., Ruggiero, S., & Vanoli, G. P. (2020). Green walls, a critical review: Knowledge gaps, design parameters, thermal performances and multi-criteria design approaches. *Energies*, 13(9), 2296.
50. Liberalesso, T., Cruz, C. O., Silva, C. M., & Manso, M. (2020). Green infrastructure and public policies: An international review of green roofs and green walls incentives. *Land use policy*, 96, 104693.
51. Trubiano, F. (2013). *Design and construction of high-performance homes: building envelopes, renewable energies and integrated practice*. Routledge.
52. Ghaffarian Hoseini, A., & Dahlan, N. D. (2012). The essence of Malay vernacular houses: towards understanding the socio-cultural and environmental values. *Journal of the International Society for the Study of Vernacular Settlements*, 2(2), 63.