نشریه علمی(فصلنامه) انرژی ایران
دوره ۲۷، شماره۴، زمستان ۱۴۰۴، صفحه ۵۹-۷۱

بررسی بهینه سازی انرژی در ساختمان با استفاده از بام و دیوار سبز در اقلیم نیمه خشک ایران

دکتر وحید صادقی
استادیار دانشگاه هنر اسلامی تبریز
V-sadeghi@tabrizu.ac.ir

محیا قلی زاده
دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه هنر اسلامی تبریز
ma.gholizade@tabriziau.ac.ir

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۴/۰۵
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۶/۲۳
کلمات کلیدی:
سقف/بام سبز
دیوار سبز
بهینه‌سازی انرژی
اثر جزیره گرمایی

این پژوهش به تحلیل تأثیر بام سبز، دیوار سبز و ترکیب این دو فناوری بر بهینه‌سازی انرژی یک ساختمان چهارطبقه مسکونی در اقلیم نیمه‌خشک ایران می‌پردازد. مدل‌سازی ساختمان با استفاده از نرم‌افزار DesignBuilder انجام شد و چهار سناریو شامل حالت عادی، بام سبز، دیوار سبز و سیستم ترکیبی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد اجرای بام سبز موجب کاهش حدود ۱۲.۱ درصدی مصرف انرژی سالانه، دیوار سبز حدود ۸.۷ درصدی و سیستم ترکیبی حدود ۳۰.۱ درصدی می‌شود. همچنین دمای سطح نما در دیوار سبز تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته و بام سبز موجب تعدیل دمای داخلی فضاهای زیر سقف شد.

از جنبه زیست‌محیطی، این سیستم‌ها به‌طور میانگین قادر به جذب ۲۰ درصد ذرات معلق و دی‌اکسیدکربن و کاهش اثر جزیره حرارتی شهری تا ۵ درجه سانتی‌گراد هستند. تحلیل مصرف آب نشان داد که روش آبیاری قطره‌ای می‌تواند نیاز آبی را نسبت به روش معمولی تا ۳۰ درصد کاهش دهد .ارزیابی اقتصادی نشان داد با تعرفه فعلی انرژی در ایران، زمان بازگشت سرمایه طولانی است، اما مزایای غیرمستقیم شامل بهبود عملکرد حرارتی، افزایش طول عمر مصالح و ارتقای کیفیت زیست‌محیطی، استفاده از این فناوری را توجیه‌پذیر می‌سازد. این مطالعه می‌تواند مبنایی برای توسعه راهکارهای پایدار در ساختمان‌های مناطق نیمه‌خشک کشور باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]

۱ مقدمه

رشد سریع شهرنشینی در کلان شهرهای ایران با نرخ سالانه ۱.۸٪ و توسعه ساختمان‌های ناکارآمد، مصرف انرژی بخش ساختمان را به ۴۰٪ از کل مصرف کشور رسانده است. این روند علاوه بر تشدید اثر جزیره گرمایی شهری(UHI) ، سالانه موجب انتشار ۲۵ میلیون تن CO2می‌شود.

فناوری‌های پایدار مانند بام و دیوار سبز به عنوان راهکارهای مبتنی بر طبیعت (NbS) در شهرهای پیشرویی چون سنگاپور و برلین موفقیت‌آمیز بوده‌اند. مطالعات داخلی نیز نشان می‌دهد استفاده از این سیستم‌ها در اقلیم نیمه خشک (مانند تهران و اصفهان) تا ۲۵٪ صرفه‌جویی انرژی داشته است

این پژوهش با ترکیب دو روش شبیه‌سازی دینامیکی در DesignBuilder و تحلیل میدانی در ۵ ساختمان نمونه ، نخستین مدل بهینه‌سازی انرژی ترکیبی برای اقلیم نیمه‌خشک ایران را ارائه می‌دهد.

بر اساس آمار وزارت نیرو (۱۴۰۲)، بخش ساختمان‌های تهران مسئول ۴۰٪ از کل مصرف انرژی کشور است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به سیاست‌گذاران در تدوین ضوابط بام‌های سبز در مقررات ملی ساختمان ایران کمک کند.

مشخصات فنی و زیست‌محیطی سیستم‌های سبز در اقلیم نیمه خشک ایران

۲ .مشخصات فنی و زیست‌محیطی سیستم‌های سبز در اقلیم نیمه خشک

۲.۱ .ضرورت استفاده از سیستم‌های سبز

ایران، به‌ویژه کلان‌شهر تهران، با چالش‌های محیط‌زیستی قابل‌توجهی نظیر کاهش پوشش گیاهی، آلودگی شدید هوا، تشدید اثر جزیره گرمایی شهری (UHI) و افزایش مصرف انرژی در ساختمان‌ها مواجه است [۸]. توسعه بی‌رویه شهری و کاهش فضای سبز طبیعی، منجر به کاهش ظرفیت اکولوژیکی شهر و افزایش نیاز سرمایشی و گرمایشی ساختمان‌ها شده است. مطالعات نشان می‌دهند که جایگزینی سطوح مصنوعی با پوشش گیاهی در قالب فناوری‌های بام و دیوار سبز می‌تواند به کاهش ۳۰ درصدی بار سرمایشی ساختمان‌ها و تعدیل اثرات UHIکمک کند [۸،۹]. این فناوری‌ها علاوه بر بهبود عملکرد حرارتی، قادر به جذب بخشی از ذرات معلق و دی‌اکسیدکربن نیز هستند و کیفیت هوای شهری را ارتقا می‌دهند] ۴.[در اقلیم نیمه‌خشک که محدودیت منابع آبی یک چالش اساسی محسوب می‌شود، استفاده از گیاهان بومی مقاوم به خشکی همچون گونه‌های سدوم و بهره‌گیری از سیستم‌های آبیاری هوشمند می‌تواند پایداری این فناوری‌ها را تضمین کند] ۵،۳.[

شکل ۱: گل سدوم (Sedum)

۲.۲- انواع سیستم‌های سبز

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]

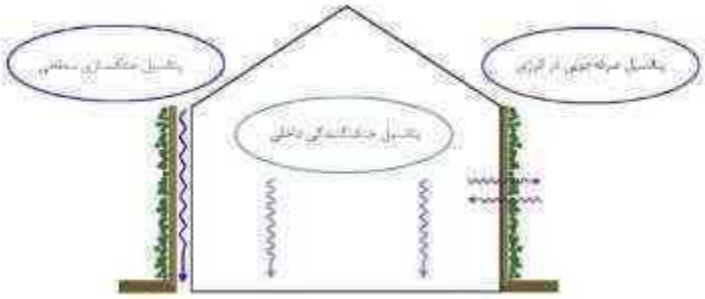
بام‌های سبز به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

- سیستم‌های گسترده(Extensive) :این نوع بام‌ها با عمق کم (کمتر از ۱۵ سانتی‌متر) و وزن سبک (کمتر از ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع) طراحی می‌شوند و به گیاهان کم‌نیاز به آب نظیر سدوم محدود هستند [۶]. این سیستم برای اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک توصیه می‌شود] ۳.[
- سیستم‌های متمرکز (Intensive) :این سیستم‌ها با عمق بیشتر (بیش از ۲۰ سانتی‌متر) و وزن بالاتر (بیش از ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع) امکان کشت گیاهان بزرگ‌تر و متنوع‌تر را فراهم می‌کنند، اما نیاز آبی و نگهداری بیشتری دارند] ۵.[

دیوارهای سبز نیز در دو نوع اصلی طراحی می‌شوند:

- نمای سبز(Green Façade) :گیاهان رونده بر روی سازه‌های نگهدارنده رشد کرده و سطح نما را می‌پوشانند. این روش کم‌هزینه‌تر و با نگهداری ساده‌تر است] ۴.[
- دیوار زنده(Living Wall) :شامل پانل‌های پیش‌ساخته با قابلیت کشت عمودی گیاهان است که انعطاف‌پذیری بیشتری در طراحی شهری دارد، هرچند هزینه اجرا و نگهداری آن بالاتر است] ۸،۱.[

انتخاب نوع سیستم به شرایط اقلیمی، منابع آب، و اهداف طراحی وابسته است. در مناطق کم‌آب مانند تهران، سیستم‌های گسترده و نمای سبز گزینه‌های بهینه‌تری محسوب می‌شوند] ۹،۳.[



شکل ۲: اثر حرارتی دیوار سبز

۳-۲ .ساختار و مکانیسم عملکرد فنی

عملکرد بام‌ها و دیوارهای سبز بر پایه سه مکانیسم اصلی استوار است:

۱. (تبخیر–تعرق گیاهان که منجر به کاهش دمای سطحی و تعدیل دمای هوای اطراف ساختمان می‌شود.

۲. (عایق حرارتی لایه‌های بستر کاشت و پوشش گیاهی که انتقال حرارت از طریق سقف و دیوار را کاهش می‌دهد و می‌تواند مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی را بین ۲۵ تا ۳۰ درصد کاهش دهد]۶.[

۳. (جذب آلاینده‌ها و کاهش نویز شهری که از طریق تثبیت ذرات معلق و جذب گازهای آلاینده انجام می‌گیرد] ۱،۴.[

در مقیاس خرد، این سیستم‌ها شرایط میکروکلیمایی اطراف ساختمان را بهبود می‌بخشند [۷] و در مقیاس کلان، کاهش اثر جزیره حرارتی شهری را به دنبال دارند] ۹.[

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]

شکل۳. انواع اصلی دیوار سبز (A) :نمای سبز مستقیم، (B)نمای سبز دوپوسته، (C)دیوار زنده ماژولار با پانل‌های کشت عمودی.

شکل۴. اجزای اصلی ساختاری بام سبز شامل پوشش گیاهی، بستر کاشت، لایه‌های زهکشی، عایق ضدآب و سازه بام

٤-۲ .اثرات زیست‌محیطی و انرژی

مطالعات تطبیقی نشان داده‌اند که در اقلیم‌های گرم و خشک، تأثیر خنک‌کنندگی این سیستم‌ها به‌مراتب بیشتر از مناطق معتدل است [۱۰].
اجرای بام و دیوار سبز می‌تواند:

- دمای سطح نما را تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد.
- مصرف انرژی سرمایشی تابستانه را حدود ۳۰ درصد و گرمایشی زمستانه را حدود ۲۵ درصد کاهش دهد] ۸.[

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]

- حدود ۲۰ درصد ذرات معلق PM10) و (PM2.5 و دی‌اکسیدکربن هوا را جذب کند] ۴.[
- رواناب باران را مدیریت کرده و از سیلاب‌های شهری بکاهد] ۹.[

۲-۵ .چالش‌ها و محدودیت‌ها

با وجود مزایای متعدد، چالش‌های فنی و اجرایی همچنان وجود دارد:

- هزینه اولیه بالا برای نصب و اجرای لایه‌های بام و دیوار سبز] ۸،۶[
- نیاز به نگهداری مستمر به‌ویژه در اقلیم خشک] ۷،۴[
- محدودیت ظرفیت باربری سازه‌های موجود برای تحمل وزن اضافی بام و دیوار سبز] ۶،۲[
- وابستگی عملکرد سیستم‌ها به انتخاب صحیح گیاهان و طراحی سیستم آبیاری هوشمند]۹،۵،۳[

با این حال، مطالعات نشان می‌دهند که با انتخاب گونه‌های بومی مقاوم، استفاده از آبیاری قطره‌ای، و طراحی سازگار با اقلیم، می‌توان بهره‌وری این سیستم‌ها را در مناطق نیمه‌خشک بهینه کرد] ۹،۷،۵،۳.[

.

۳. روش تحقیق

این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر بام سبز، دیوار سبز و سیستم ترکیبی آن‌ها بر عملکرد انرژی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم نیمه‌خشک ایران انجام شده است. رویکرد مورد استفاده شامل مدل‌سازی رایانه‌ای، شبیه‌سازی انرژی و تحلیل مقایسه‌ای سناریوها است.

مدل‌سازی ساختمان مورد مطالعه در نرم‌افزار DesignBuilder 7.0 بر پایه موتور محاسباتی EnergyPlus انجام شد. ساختمان نمونه، یک بلوک مسکونی چهارطبقه با زیربنای ۱۶۰ مترمربع در اقلیم نیمه خشک ایران است که دارای جهت‌گیری شمالی–جنوبی بوده و مشخصات فنی آن مطابق مصالح رایج شهری تعریف شده است.

لازم به ذکر است که کلیه نتایج این پژوهش بر مبنای انرژی نهایی حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزار DesignBuilder و موتور EnergyPlusگزارش شده‌اند.

مفروضات مدل‌سازی:

مصالح بام :بتن مسلح با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و لایه عایق حرارتی ۵ سانتی‌متر (ضریب هدایت حرارتی ۰.۰۸ W/mK)

مصالح دیوار خارجی :آجر فشاری به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر با اندود سیمانی و عایق پلی‌استایرن ۵ سانتی‌متر.

پنجره‌ها :شیشه دوجداره با ضریب انتقال حرارت ۲.۸ W/m^2K و ضریب عبور خورشیدی ۰.۶.

نفوذ هوا :۰.۷ ACH برای شرایط عادی ساختمان‌های مسکونی اقلیم نیمه خشک.

داده‌های اقلیمی :فایل آب‌وهوایی از پایگاه IWEC استخراج شد که شامل میانگین دمای سالانه ۱۷.۸ درجه و تابش خورشیدی سالانه ۱۸۵۰ kWh/m^2.

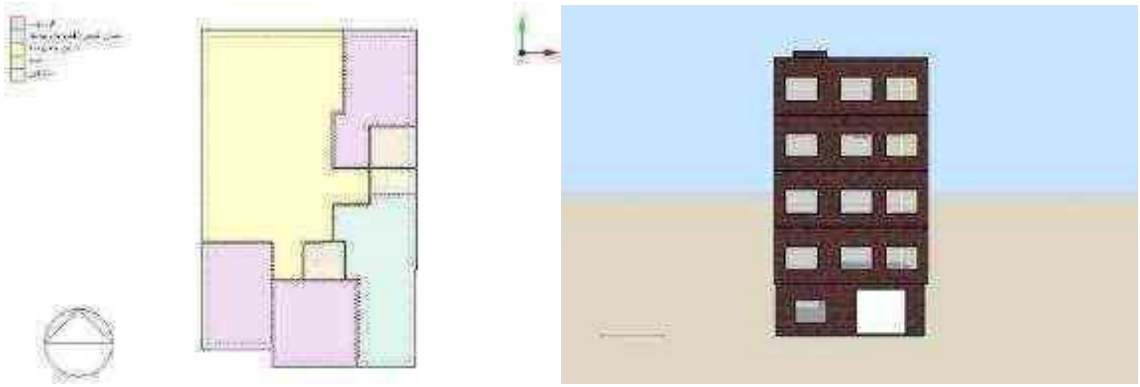
پروفایل بهره‌برداری :بر اساس استاندارد ASHRAE 90.1 برای کاربری مسکونی با ۴ نفر ساکن، بار داخلی گرمایشی ۴ وات بر مترمربع.

در این مطالعه چهار سناریوی پایه، دیوار سبز، بام سبز و ترکیبی تعریف شده که در بخش بعدی تشریح می‌شوند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]

مدل‌سازی و شبیه‌سازی:

پس از تعریف مفروضات ساختمان و اقلیم، مدل پایه در نرم‌افزار DesignBuilder ایجاد و بر اساس داده‌های واقعی مصرف انرژی ساختمان‌های مشابه در منطقه اعتبارسنجی شد. برای شبیه‌سازی سیستم‌های سبز، از ماژول‌های تخصصی Green Roofو Vertical Greeneryاستفاده شد که قابلیت مدل‌سازی رفتار حرارتی و هیدرولوژیکی این سیستم‌ها را فراهم می‌کنند.



شکل ۵: ساختمان مدلسازی شده در نرم افزارDesignBuilder

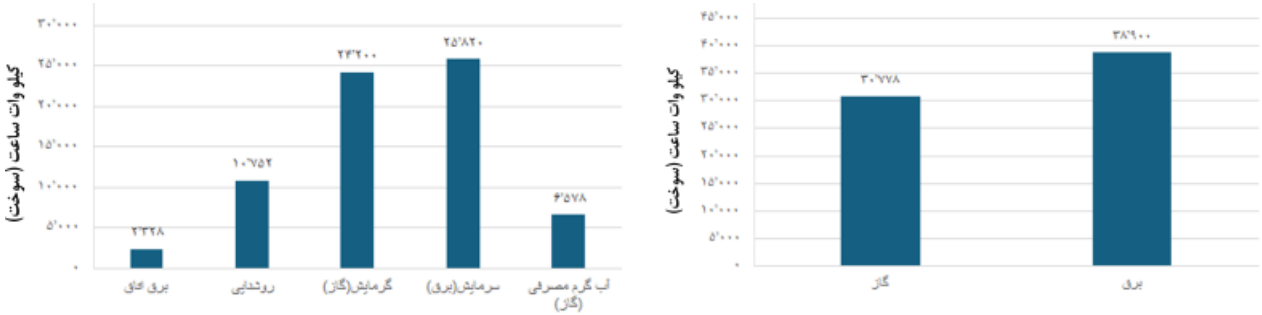
سناریوهای مورد بررسی:

در این تحقیق ۴ سناریوی اصلی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند:

سناریو	توضیحات
۱ .پایه	بدون سیستم سبز
۲ .دیوار سبز	نمای دوپوسته با پانل پیش‌ساخته و آبیاری قطره‌ای
۳ .بام سبز	سیستم گسترده با گیاه سدوم و بستر ۱۵ سانتی‌متری
۴ .ترکیبی	اجرای همزمان دیوار و بام سبز

ساختمان مرجع بدون هیچ سیستم سبزی:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]



شکل ۶. الگوی مصرف انرژی سالانه ساختمان مرجع (بدون سیستم‌های سبز)

(نمودار سمت چپ: سهم اجزای مختلف مصرف انرژی. نمودار سمت راست: ترکیب منابع انرژی نهایی بر حسب حامل‌های سوخت و برق)

این اختلاف ناشی از مفروضات نرم‌افزاری است و هدف پژوهش، مقایسه سناریوها تحت شرایط مرجع یکسان می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین بار حرارتی سالانه مربوط به گرمایش گازی با ۲۵,۸۲۰ کیلووات‌ساعت (معادل ۳۷٪ از کل انرژی مصرفی ساختمان) است. پس از آن، آب‌گرم مصرفی با ۲۴,۲۰۰ کیلووات‌ساعت (۳۴.۷٪)، سرمایش با ۱۰,۷۵۲ کیلووات‌ساعت (۱۵.۴٪) و تجهیزات الکتریکی با ۸,۹۰۶ کیلووات‌ساعت (۱۲.۹٪) بیشترین سهم را دارند. در ترکیب حامل‌های انرژی (نمودار سمت راست)، مشاهده می‌شود که حدود ۳۸,۹۰۰ کیلووات‌ساعت (۵۶٪) از کل مصرف سالانه ساختمان به برق و ۳۰,۷۷۸ کیلووات‌ساعت (۴۴٪) به گاز طبیعی وابسته است. این الگو بیانگر ناکارآمدی طراحی حرارتی ساختمان در برابر تابش مستقیم خورشید و ضرورت بهره‌گیری از فناوری‌های سبز برای کاهش بار سرمایشی در اقلیم تهران است.

شایان ذکر است که نتایج ارائه‌شده در این بخش بر مبنای انرژی نهایی حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزار DesignBuilder و موتور محاسباتی EnergyPlus می‌باشند. مقادیر به‌دست‌آمده براساس پروفایل‌های استاندارد تعریف‌شده در دستورالعمل ASHRAE 90.1 محاسبه شده‌اند؛ از این‌رو ممکن است با الگوهای واقعی مصرف در ساختمان‌های مسکونی در این اقلیم تفاوت‌هایی داشته باشند. این اختلاف ناشی از مفروضات نرم‌افزاری است و هدف پژوهش، مقایسه سناریوها تحت شرایط مرجع یکسان می‌باشد.

ساختمان دارای دیوار سبز:

شکل ۷: الگوی مصرف انرژی سالانه سناریو دوم (دیوار سبز)

(نمودار سمت چپ: سهم اجزای مختلف مصرف انرژی. نمودار سمت راست: ترکیب منابع انرژی نهایی بر حسب حامل‌های سوخت و برق)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]

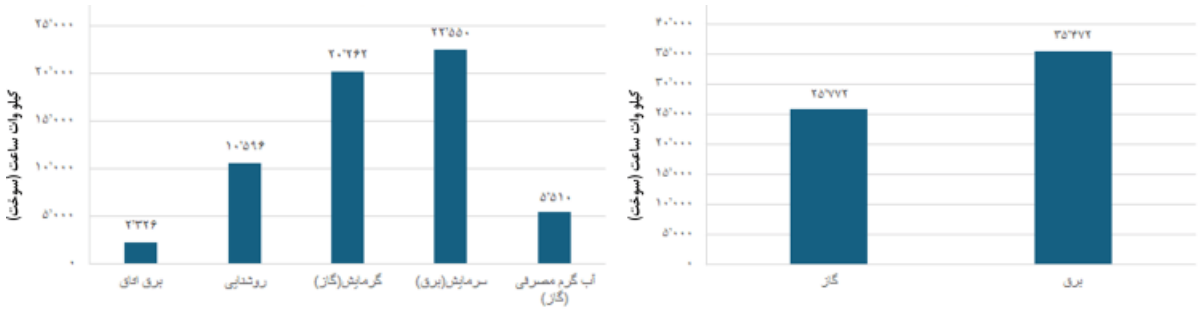
شکل ۷ تأثیر اجرای دیوار سبز بر مصرف انرژی ساختمان را نشان می‌دهد. در مقایسه با ساختمان مرجع، نصب دیوار سبز منجر به کاهش ۹.۱٪ در مصرف کل انرژی الکتریکی شد، به‌طوری‌که بار سرمایشی از ۲۵,۸۲۰ کیلووات ساعت به ۲۲,۵۵۱ کیلووات ساعت کاهش یافته است. همچنین، گرمایش گازی حدود ۸.۵٪ افزایش داشته و از ۲۴,۲۰۰ کیلووات ساعت به ۲۲,۱۴۳ کیلووات ساعت تغییر یافته است.

در ترکیب منابع انرژی، سهم برق از ۳۸,۹۰۰ به ۳۵,۴۷۵ کیلووات ساعت کاهش یافته، درحالی‌که مصرف گاز از ۳۰,۷۷۸ به ۲۸,۱۶۳ کیلووات ساعت تغییر داشته است. این ارقام نشان می‌دهد که دیوار سبز بیشتر بر کاهش بار سرمایشی و تاحدود زیادی بر بار گرمایشی اثرگذار است تا آب گرم مصرفی، زیرا با ایجاد سایه و تبخیر و تعرق، دمای سطح نما را کاهش می‌دهد و از انتقال حرارت خورشیدی جلوگیری می‌کند.

بر اساس این نتایج، شدت مصرف انرژی (EUI) در سناریوی دیوار سبز حدود ۸٪ بهبود یافته و انتشار دی‌اکسیدکربن سالانه ساختمان حدود ۳.۳ تن کاهش پیدا کرده است، معادل جذب کربن توسط حدود ۱۵۱ درخت بالغ.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که دیوار سبز در اقلیم نیمه خشک یک راهکار مؤثر برای کاهش بار سرمایشی و بهبود آسایش حرارتی تابستانه است، اگرچه تأثیر آن بر بار گرمایشی محدودتر است.

ساختمان دارای بام سبز:



شکل ۸: الگوی مصرف انرژی سالانه سناریو سوم (بام سبز)

(نمودار سمت چپ: سهم اجزای مختلف مصرف انرژی. نمودار سمت راست: ترکیب منابع انرژی نهایی بر حسب حامل‌های سوخت و برق)

شکل ۸ تأثیر اجرای بام سبز بر مصرف انرژی ساختمان را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که نصب بام سبز باعث کاهش ۸.۷٪ در مصرف کل انرژی سالانه شد، به‌طوری‌که بار گرمایشی از ۲۴,۲۰۰ کیلووات‌ساعت به حدود ۲۰,۲۰۰ کیلووات‌ساعت کاهش یافته و بار سرمایشی نیز حدود ۱۲.۷٪ کمتر شده است.

در ترکیب منابع انرژی، وابستگی به برق ثابت نمانده (حدود ۳۵,۴۷۲ کیلووات‌ساعت) و نیاز به گاز طبیعی تغییر مطلوب تری داشته است (۲۵,۷۷۲ کیلووات‌ساعت). این الگو نشان می‌دهد که بام سبز بیشتر بر کاهش بار گرمایشی زمستانه اثرگذار است تا سرمایش تابستانه، زیرا با ایجاد لایه عایق حرارتی، انتقال حرارت از سقف را کاهش می‌دهد.

این عملکرد ناشی از چهار مکانیسم اصلی است:

عایق‌کاری حرارتی چندلایه که U-value سقف را به حدود ۰.۸۳ W/m^2K کاهش می‌دهد،

کاهش جذب تابش خورشیدی با افزایش آلبدو سقف،

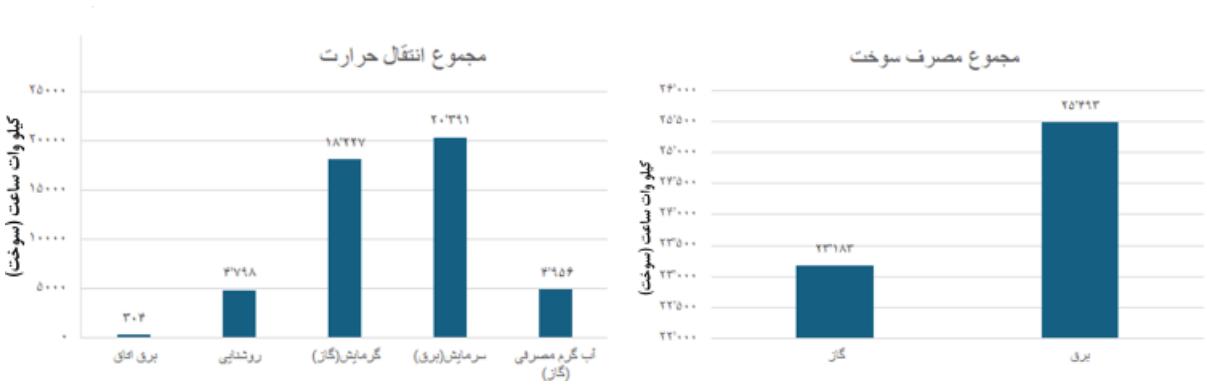
تبخیر–تعرق پوشش گیاهی که رطوبت نسبی محیط را بهبود می‌دهد،

تعدیل میکروکلیمای سقف و کاهش نوسانات دمایی روزانه.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]

از نظر محیطزیستی، اجرای بام سبز موجب کاهش حدود ۴.۶ تن انتشار سالانه CO_2 (معادل جذب کربن توسط ۲۱۱ درخت بالغ) و افزایش نفوذ آب باران تا ۲۰٪ می‌شود. هرچند اثر بام سبز بر سرمایش محدودتر از دیوار سبز است، اما کاهش ۱۶.۳٪ بار گرمایشی در اقلیم نیمه خشک مزیت مهمی برای فصول سرد محسوب می‌شود.

ساختمان دارای ترکیب همزمان بام و دیوار سبز:



شکل ۹: الگوی مصرف انرژی سالانه سناریو چهارم (سیستم ترکیبی)

(نمودار سمت چپ: سهم اجزای مختلف مصرف انرژی. نمودار سمت راست: ترکیب منابع انرژی نهایی بر حسب حامل‌های سوخت و برق)

شکل ۹ نشان می‌دهد که اجرای همزمان بام و دیوار سبز بهترین عملکرد را در کاهش مصرف انرژی دارد. در مقایسه با ساختمان مرجع، سیستم ترکیبی منجر به کاهش ۲۴.۷٪ مصرف کل انرژی سالانه شد، به‌طوری‌که بار گرمایشی از ۲۴,۲۰۰ کیلووات‌ساعت به ۱۸,۲۲۷ کیلووات‌ساعت و بار سرمایشی از ۲۵,۸۲۰ کیلووات‌ساعت به ۲۰,۳۹۱ کیلووات‌ساعت کاهش یافته است.

این بهبود ناشی از اثر هم‌افزایی دو فناوری است؛ دیوار سبز عمدتاً با کاهش ۱۲.۶٪ بار سرمایشی تابستانه و بام سبز با کاهش ۱۶.۳٪ بار گرمایشی زمستانه عمل می‌کنند، و ترکیب این دو سیستم توانسته است نقاط قوت هر دو را یکجا جمع کند.

از نظر شرایط محیطی، سیستم ترکیبی دمای سطح ساختمان را تا ۳.۲ درجه سانتی‌گراد کاهش داده و رطوبت نسبی را ۱۸٪ افزایش داده است که از هر دو سیستم منفرد بهتر است (دیوار سبز: ۲.۵ °C و ۱۵٪، بام سبز: ۱.۸ °C و ۱۰٪).

این نتایج نشان می‌دهد که سیستم ترکیبی یک راهکار جامع برای بهینه‌سازی انرژی در تمام فصول سال است؛ درحالی‌که دیوار سبز بیشتر برای تابستان و بام سبز برای زمستان مؤثر بودند، ترکیب آن‌ها بهبود همزمان سرمایش و گرمایش را فراهم کرده است. هرچند هزینه اولیه و نگهداری آن بالاتر است، اما صرفه‌جویی انرژی و بهبود آسایش حرارتی این سرمایه‌گذاری را توجیه می‌کند.

محدودیت‌های تحقیق:

اگرچه این مطالعه سعی در ارائه تحلیلی جامع داشته، اما محدودیت‌هایی نیز داشته است:

۱) مدل‌سازی فقط برای ساختمان‌های مسکونی متوسط انجام شده است

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]

۲) شرایط نگهداری ایده‌آل برای سیستم‌های سبز در نظر گرفته شده
۳) اثرات بلندمدت مانند فرسایش مصالح در دوره‌های طولانی‌مدت شبیه‌سازی نشده‌اند
۴) تأثیر سایه‌اندازی ساختمان‌های مجاور در نظر گرفته نشده است

توصیف داده‌ها

در این مطالعه، چهار سناریوی متفاوت شامل: (۱) ساختمان مرجع فاقد سیستم‌های سبز (بدون گرین‌روف و گرین‌وال)، (۲) ساختمان مجهز به سیستم دیوار سبز، (۳) ساختمان مجهز به سیستم بام سبز، و (۴) ساختمان با ترکیب همزمان دیوار سبز و بام سبز، با استفاده از شبیه‌سازی‌های انرژی مبتنی بر مدل‌های دینامیک حرارتی مورد ارزیابی کمی قرار گرفتند. هدف اصلی، تحلیل اثر مداخلات پوشش‌های گیاهی در نما و بام بر پارامترهای کلیدی انرژی شامل بارهای سرمایشی و گرمایشی، مصرف انرژی الکتریکی و میزان اتکا به منابع انرژی غیرتجدیدپذیر بود.

شکل۱۰. نمودار تحلیل و مقایسه مصرف انرژی در هر ۴ سناریو

سناریو	مصرف کل انرژی (KWH/YEAR)	کاهش نسبت به مرجع	کاهش بار سرمایشی	کاهش بار گرمایشی	کاهش انتشار CO_2(تن/سال)
مرجع	۶۹,۶۷۸	-	-	-	-
دیوارسبز	۶۳,۶۳۵	۸.۷٪-	۱۲.۶٪	۸.۵٪	~۳.۳ تن معادل ۱۵۱درخت
بام سبز	۶۱,۲۴۴	۱۲.۱٪-	۱۲.۷٪	۱۶.۳٪	~۴.۶ تن معادل ۲۱۱ درخت
ترکیبی	۴۸,۶۷۶	۳۰.۱٪-	۲۴.۶٪	۲۱٪	~۱۱.۵ تن معادل ۵۲۵درخت

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سناریوی مرجع، به‌دلیل فقدان هرگونه پوشش گیاهی یا عایق‌سازی طبیعی، بالاترین میزان بار حرارتی و مصرف انرژی را دارد. این امر ناشی از انتقال حرارت مستقیم و جذب بالای تابش خورشیدی در سطوح سخت و بدون پوشش است.

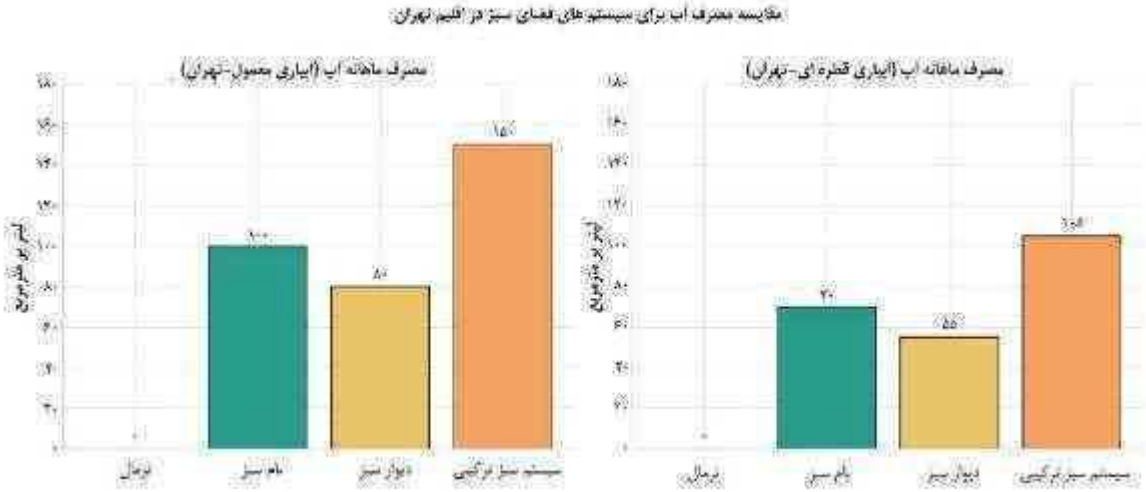
اجرای دیوار سبز موجب کاهش معنادار بار سرمایشی تابستانه و بخشی از بار گرمایشی زمستانه شد. این اثر به‌واسطه بهبود ضریب مقاومت حرارتی نمای ساختمان، کاهش انتقال حرارت تشعشی و جابجایی و همچنین ایجاد سایه و تبخیر–تعرق محقق شد. از سوی دیگر،

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]

بام سبز عمدتاً با ایجاد یک لایه عایق طبیعی و افزایش ظرفیت ذخیره حرارتی سقف، موجب کاهش تقاضای گرمایش زمستانه و بهبود عملکرد سرمایشی در فصول گرم شد.

نکته برجسته این پژوهش، اثر هم‌افزایی سیستم ترکیبی بام و دیوار سبز بود که منجر به بیشترین کاهش در بارهای حرارتی و مصرف کل انرژی (۳۰.۱٪ کاهش نسبت به مرجع) شد. این عملکرد ناشی از ارتقای همزمان عملکرد حرارتی پوسته ساختمان و کنترل تابش مستقیم خورشید است که موجب بهینه‌سازی شرایط دمایی داخلی و کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی HVAC گردید.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که تلفیق راهکارهای معماری زیست‌محیطی با فناوری‌های مدیریت انرژی می‌تواند رویکردی مؤثر برای ارتقاء بهره‌وری انرژی، کاهش ردپای کربنی و بهبود آسایش حرارتی در ساختمان‌های شهری باشد. در ادامه، ادغام این فناوری‌ها با سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و شبکه‌های هوشمند می‌تواند چارچوبی جامع برای توسعه ساختمان‌های پایدار در مقیاس شهری فراهم آورد.



شکل ۱۱.نمودار میزان مصرف آب هر سیستم به صورت عادی و قطره ای

شکل ۱۱ مقایسه مصرف آب ماهانه سیستم‌های سبز در اقلیم نیمه خشک را نشان می‌دهد. در روش آبیاری معمولی، بام سبز حدود ۱۰۰ لیتر بر مترمربع، دیوار سبز ۸۰ لیتر بر مترمربع و سیستم ترکیبی بیشترین میزان یعنی ۱۵۰ لیتر بر مترمربع آب نیاز دارد. اما استفاده از آبیاری قطره‌ای این مقدار را به ترتیب به ۷۰، ۵۵ و ۱۰۵ لیتر بر مترمربع کاهش می‌دهد؛ معادل صرفه‌جویی حدود ۳۰ تا ۴۰ درصدی.

نتایج نشان می‌دهد که دیوار سبز کمترین نیاز آبی را دارد، درحالی‌که ترکیب بام و دیوار سبز بیشترین تقاضا را ایجاد می‌کند. با این حال، در اقلیم نیمه‌خشک ، استفاده از سیستم‌های آبیاری کم‌مصرف و بازیافت آب خاکستری می‌تواند فشار بر منابع آبی را کاهش دهد.

در جمع‌بندی، اگرچه سیستم‌های سبز مستلزم مصرف آب هستند، اما مزایای آن‌ها در کاهش مصرف انرژی، بهبود کیفیت هوا و افزایش طول عمر مصالح می‌تواند این هزینه آبی را توجیه‌پذیر کند. ترکیب فناوری‌های سبز با مدیریت هوشمند آب راهکاری پایدار و قابل اجرا در تهران خواهد بود.

نتایج اقتصادی و بازگشت سرمایه

به‌منظور ارزیابی جنبه‌های اقتصادی، هزینه‌های اولیه نصب سیستم‌های سبز برای ساختمان چهارطبقه مورد مطالعه در اقلیم نیمه خشک ایران برآورد شد. نتایج نشان داد که اجرای بام سبز حدود ۴۸۰ میلیون تومان، اجرای دیوار سبز حدود ۱٬۰۸۰ میلیون تومان و اجرای سیستم

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]

ترکیبی بام و دیوار سبز حدود ۱٬۶۰۰ میلیون تومان هزینه خواهد داشت. این اعداد شامل هزینه‌های طراحی، آماده‌سازی سازه، خرید و نصب پوشش گیاهی، سیستم‌های آبیاری و نگهداری اولیه هستند.

بر اساس داده‌های شبیه‌سازی مصرف انرژی، بام سبز حدود ۸.۵ درصد، دیوار سبز حدود ۱۶.۲ درصد و سیستم ترکیبی حدود ۲۴.۷ درصد کاهش مصرف انرژی سالانه را فراهم می‌کند. این کاهش معادل صرفه‌جویی ۳ تا ۶ میلیون تومان در سال بر اساس تعرفه فعلی برق و گاز در ایران است. بنابراین، دوره بازگشت سرمایه مستقیم این فناوری‌ها در شرایط فعلی بسیار طولانی (در حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ سال) است و از منظر صرفه‌جویی انرژی به تنهایی، توجیه اقتصادی کوتاه‌مدت ندارد.

با این حال، تحلیل اقتصادی نباید صرفاً به صرفه‌جویی مستقیم انرژی محدود شود، زیرا سیستم‌های سبز مزایای غیرمستقیم و بلندمدتی دارند که می‌تواند این سرمایه‌گذاری را توجیه‌پذیر کند:

کاهش اثر جزیره حرارتی شهری (UHI) و در نتیجه کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های اطراف،

افزایش طول عمر مصالح نما و سقف به دلیل محافظت در برابر اشعه UV و نوسانات شدید دمایی،

بهبود شرایط آسایش حرارتی داخلی که می‌تواند بهره‌وری ساکنین را ارتقا دهد،

ارتقای ارزش ملک و جذابیت بازار املاک، به‌ویژه در مناطق شهری پرتراکم،

جذب CO_2 و ذرات معلق که منجر به بهبود کیفیت هوای شهری و کاهش هزینه‌های سلامت عمومی می‌شود.

از این رو، اگرچه با ساختار تعرفه فعلی انرژی، این سیستم‌ها از نظر اقتصادی صرف کوتاه‌مدت قابل رقابت با سایر روش‌های بهینه‌سازی نیستند، اما در چارچوب توسعه پایدار، سیاست‌های تشویقی دولتی، یارانه‌های انرژی و اعتبارهای زیست‌محیطی می‌توانند توجیه‌پذیر باشند. همچنین در بلندمدت، با افزایش تعرفه واقعی انرژی و تشدید الزامات زیست‌محیطی، دوره بازگشت سرمایه این فناوری‌ها می‌تواند به‌طور قابل توجهی کوتاه‌تر شود.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که به‌کارگیری سیستم‌های سبز در ساختمان‌ها، به‌ویژه در اقلیم نیمه‌خشک مشابه تهران و اصفهان، می‌تواند تأثیر چشمگیری بر بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود کیفیت محیط زیست شهری داشته باشد. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که سیستم ترکیبی دیوار و بام سبز با کاهش ۳۰.۱ درصدی مصرف انرژی کل سالانه (از ۶۹٬۶۷۸ به ۴۸٬۶۷۶ کیلووات‌ساعت)، عملکردی فراتر از مجموع اثرات منفرد دیوار سبز (۸.۷٪ کاهش) و بام سبز (۱۲.۱٪ کاهش) ارائه می‌دهد. این اثر سینرژیک ناشی از مکانیسم‌های تکمیلی دو سیستم است، به‌طوری که دیوار سبز موجب کاهش ۱۲.۶ درصدی بار سرمایشی تابستانه و بام سبز باعث کاهش ۱۶.۳ درصدی بار گرمایشی زمستانه می‌شود. همچنین، سیستم ترکیبی توانسته است با ایجاد مقاومت حرارتی مؤثر ۱.۸ m^2K/W و کاهش دمای سطحی تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد، بهبود چشمگیری در شاخص‌های انرژی ساختمان ایجاد کند.

از منظر زیست‌محیطی، پیاده‌سازی این فناوری‌ها به کاهش سالانه حدود ۱۱.۵ تن انتشار CO_2 به ازای هر ساختمان منجر می‌شود که معادل جذب کربن توسط ۵۲۵ درخت بالغ است. علاوه بر این، افزایش ۱۸ درصدی رطوبت نسبی محیط و بهبود ۳۰ درصدی جذب ذرات معلق، نقش این سیستم‌ها در بهبود میکروکلیمای شهری را تقویت می‌کند.

با این حال، چالش‌هایی مانند نیاز آبی روزانه ۳۵ لیتر بر مترمربع و هزینه اولیه نصب حدود ۶ تا ۱۵ میلیون تومان بر مترمربع باید در طراحی و برنامه‌ریزی مورد توجه قرار گیرد. این پژوهش نشان داد که ترکیب بام و دیوار سبز به‌عنوان یک راهکار عملی برای کاهش ۳۰.۱٪ مصرف انرژی در ساختمان‌های این اقلیم قابل توصیه است. در نهایت، پیشنهاد می‌شود:

ادغام سیستم‌های سبز با فناوری‌های فتوولتائیک برای بهبود بهره‌وری انرژی؛

تدوین دستورالعمل‌های بومی‌سازی‌شده با تأکید بر گیاهان مقاوم به خشکی و سیستم‌های آبیاری هوشمند؛

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]

ایجاد مشوق‌های مالی و سیاست‌های حمایتی برای نوسازی و اجرای این فناوری در ساختمان‌های موجود.

منابع

[۱] بدری، م. (۱۴۰۳). تحلیل نقش دیوارهای سبز در توسعه فضاهای شهری. نشریه معماری سبز، ۳۸(۱)، ۱۳.

[۲] مدیر، ح.، &رضایانه، م. ح .(1400) .نقش دیوار سبز در آسایش حرارتی فضاهای چند منظوره شهر تهران .فصلنامه پژوهش‌های نوین علوم جغرافیایی، معماری و شهرسازی، ۴(31)، 37-27.

[۳] مولایی، م. م.، پیله‌چی‌ها، پ.، و افشار، آ. (۱۳۹۷). ارزیابی انرژی کارایی بام سبز در ایران: نمونه موردی شهرهای تهران، تبریز، رامسر، بندرعباس .فصلنامه مدیریت شهری و روستایی، ۵۲، ۲۱-۳۴.

[۴] لطفی، غ.، &شاهکار، ع .(1395) .دیوار سبز؛ راهکاری برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی شهرها .در پنجمین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در عمران، معماری و شهرسازی، ۲۵ آذر، سنگاپور.

[۵] حکیم‌آذری، م.، جوادی‌پور، س. م.، &میرحسینی، پ .(1394) .بررسی و امکان‌سنجی چگونگی استفاده از بام سبز در اقلیم اصفهان .در دومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی، ۲۴ اسفند، استانبول، ترکیه.

[۶] پاکاری، ن.، &محمودی زرندی، م. (۱۳۹۲). کاهش مصرف انرژی ساختمان با طراحی جزئیات مناسب بام سبز .آرمانشهر شهرسازی و معماری، 11، ۱۴۱–151.

[۷] محمودی، م.، باکاری، ن.، و بهرامی، ح. (۱۳۹۱). ارزیابی چگونگی تأثیرگذاری بام سبز در کاهش دمای محیط. فصلنامه علمی-پژوهشی مرکز پژوهشی هنر معماری و شهرسازی نظر، *۹*(۲۰)، ۷۳-۸۲.

[8] Medl, A., Stangl, R., & Florineth, F. (2017). Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement. Building and Environment, 125, 227–239. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.054

[9] Razzaghmanesh, M., Beecham, S., & Salemi, T. (2016). The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. Urban Forestry & Urban Greening, 15, 89–102. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.11.013

[10] Nouvel, J., & Beissel, B. (2014). Case study: One Central Park, Sydney. CTBUH Journal, 2014(IV), [Pages if available]. Council on Tall Buildings and Urban Habitat.

[11] SIPA, DCC, GIZ, & IKI. (n.d.). Guideline to implement green walls and green roofs in Viet Nam: Urban ecosystem-based adaptation to climate change. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Visionary image of Dong Hoi city.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-08]