ISSN: 2538-3019, EISSN: 2676-4806
DOI: 10.30479/AT.2021.13194.1505
دوفصلنامهٔ اندیشهٔ معماری، نشریهٔ علمی، سال ششم، شمارهٔ یازدهم، بهار و تابستان ۱۴۰۱، صص ۱۹۳-۲۱۲

میزان کاهش مصرف انرژی خانگی با اصلاح جزییات معماری بام سبز در منطقه گرم و نیمه خشک، دزفول*

مریم حسینی[۱]، محسن بینا[۲]**

تاریخ دریافت مقاله : ۱۳۹۹/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۱/۲۹

چکیده

بیان مسئله: در مبحث اقلیم و معماری تاثیر پذیرترین عنصر ساختمانی در برابر عوامل اقلیمی بام ساختمان‌هاست. انرژی دریافتی بام‌ها در تابستان بسیار بیشتر از سایر جداره‌های ساختمانی است که منجر به افزایش انرژی مصرفی سامانه خنک کننده در فضای زیر بام می‌گردد. از طرفی عمده مصرف انرژی در سرمایش، انرژی الکتریکی به عنوان انرژی گران‌تر می‌باشد که سهم زیادی در هزینه‌های مصرفی خانوار خواهد داشت. در زمستان‌ها نیز اتلاف حرارت بام از فضای داخل به محیط بیرون منجر به افزایش مصرف انرژی سامانه گرمایش می‌شود لذا تاثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی خانگی دارند. یکی از پیشنهادات قابل اجرا به منظور کاهش انتقال گرما از جداره سقف، استفاده از بام سبز می‌باشد. قابلیت بام‌سبز بسته به شرایط اقلیمی هر منطقه متفاوت است بنابراین می‌بایست تمامی شاخص‌های موثر بر عملکرد حرارتی بام سبز با شرایط آب و هوایی منطقه مطابقت داشته باشد.

سوال تحقیق: لایه‌های تشکیل‌دهنده بام سبز در بهسازی حرارتی ساختمان‌های مسکونی بر انرژی مصرفی و آسایش حرارتی ساکنان در شرایط اقلیمی شهرستان دزفول چه تاثیری دارند؟ و بهینه‌ترین جزییات بام سبز از بعد کاهش مصرف انرژی خانگی در موقعیت جغرافیایی شهر دزفول کدام است؟

اهداف تحقیق: بررسی عوامل تاثیرگذار بام سبز در جهت افزایش کارکرد حرارتی آن و پیشنهاد الگوی مناسب بام سبز در شرایط آب و هوایی شهرستان دزفول می‌باشد.

روش تحقیق: بدین منظور در مطالعات اولیه بام سبز ابتدا از روش تحقیق کیفی استفاده شده است؛ در ادامه با استفاده از روش تحقیق تجربی و انتقال داده‌های حاصل از بررسی منابع، آمار ایستگاه هواشناسی شهرستان دزفول و نرم‌افزارهای "کنسولتنت کلایمیت"و "دی ویو" به نرم‌افزار شبیه سازی "دیزاین بیلدر" تاثیر شاخصه‌ها و عوامل موثر بر عملکرد حرارتی بام سبز در شرایط اقلیمی شهرستان دزفول مورد بررسی قرار گرفت تا بهینه‌ترین حالت برای لایه‌های تشکیل دهنده بام سبز منطقه تعیین گردد.

مهم‌ترین یافته‌ها و نتیجه‌گیری تحقیق: اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که گونه‌های گیاهی دارای برگ‌های پهن، رشد پایین، عمق کم بستر، لایه زهکش از جنس خرده لاستیک بازیافت شده و ایجاد لایه هوا نقش موثری در عملکرد حرارتی بام سبز شهرستان دزفول ایفا می‌کند و به طور کلی اصلاح لایه‌های بام سبز موجب کاهش kWh/m^2 ۴۲/۸ معادل۲۹/۲ درصد از انرژی کل مصرفی ساختمان شبیه سازی شده می‌گردد.

کلمات کلیدی: بام سبز، بهینه‌سازی مصرف انرژی، دزفول، اقلیم و معماری

- * مقاله حاضر برگرفته از رساله کارشناسی ارشد نگارنده اول، با عنوان « طراحی بام سبز متناسب با اقلیم گرم و نیمه مرطوب (دزفول) در ساختمان های مسکونی » با راهنمایی دکتر محسن بینا در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول انجام شده است.

[۱]- کارشناسی ارشد معماری، گروه معماری، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران؛ maryamhosseini@jsu.ac.ir
[۲]**- استادیار گروه معماری، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول ایران، (نویسنده مسئول)؛ bina@jsu.ac.ir

۱- مقدمه

طبق تحقیقات انجام شده حدود ۴۰ درصد از مصرف انرژی در سراسر جهان با ساخت و نگهداری ساختمان‌ها مرتبط است (Berardi 2011). در کشور ایران نیز مطابق داده‌های ترازنامه انرژی در سال۱۳۹۰، سهم بخش ساختمان (خانگی، عمومی و تجاری) از کل مصرف نهایی انرژی به طور متوسط ۳۶/۰۷ درصد بوده است (ترازنامهٔ انرژی ایران ۱۳۹۲)، بام‌ها نقش مهمی در میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها ایفا می‌کنند، زیرا آن‌ها در معرض انواع آسیب‌های حرارتی و هواشناسی بیشتر از سایر جدارهای ساختمانی هستند و در مناطقی با سطوح بالای تابش خورشید، ممکن است تا دمای سطح ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد بسته به جهت‌گیری، شیب و فصل سال افزایش یابد (Villi et al. 2009).

با توجه به نقش بام‌ها در میزان مصرف انرژی یکی از رویکردهای ارزشمند برای ساختن ساختمان‌هایی که موجب صرفه‌جویی در انرژی می‌شوند، استفاده از بام سبز و پوشش گیاهی مناسب می‌باشد. این بام‌ها عموما موجب کاهش تاثیرات زیست محیطی ساختمان به ویژه مصرف انرژی می‌شوند. (Cascone et al. 2018; Kokogiannakis et al. 2013). در واقع بام سبز در تابستان با سایه‌ای که با گیاهان ایجاد می‌کنند (Coma& et al. 2017) و با عمل تبخیر و تعرق آن‌ها نفوذ گرما از بام به ساختمان را کاهش می‌دهد (Bevilacqua & et al. 2015) ؛ همچنین در زمستان علاوه بر افزایش ظرفیت گرمایی ساختمان با افزایش لایه‌های بام، از طریق عایق سازی ساختمان (پوشش گیاهی و خاک) (Castleton & et al. 2010; Bevilacqua & et al. 2015; Silvao & et al. 2015) و کاهش سرعت باد، ساختمان را در برابر آب و هوای سرد عایق می‌کند و مصرف انرژی سامانه گرمایش را کاهش می‌دهد. البته عملکرد خنک‌سازی و گرمایش بام‌های سبز به شرایط آب و هوایی هر منطقه بستگی دارد و این نوع از بام‌های در بسیاری از کشورها با توجه به شرایط اقلیمی و ویژگی‌های ساختمان پیشنهاد شده است (La Roche and Berardi 2014)؛ به عبارت دیگر انتخاب بام سبز مناسب به لحاظ مقدار کاهش مصرف انرژی، بسته به شرایط اقلیمی متفاوت است(Refahi and Talkhabi 2015). لذا در طی این مقاله پس از مرور پیشینه‌های انجام شده و بررسی ادبیات تحقیق، نمونه مرجع جهت انجام شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار دیزاین بیلدر[1] تعریف شده است تا با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی به دو پرسش اصلی تحقیق که به شرح زیر است پاسخ داده شود:

۲- پرسش‌های تحقیق

۱. تاثیر لایه‌های تشکیل دهنده بام سبز در بهسازی حرارتی ساختمان‌های مسکونی بر انرژی مصرفی و آسایش حرارتی ساکنان در شرایط اقلیمی شهرستان دزفول چیست؟

۲. بهینه‌ترین جزییات بام سبز از بعد کاهش مصرف انرژی خانگی در موقعیت جغرافیایی شهر دزفول کدام است؟

۳- فرضیه تحقیق

با افزودن و اصلاح لایه‌ها می‌توان جزییات اجرایی بام سبز سازگار با شرایط اقلیمی شهرستان دزفول طراحی نمود و کارکرد حرارتی آن را افزایش داد.

۴- پیشینه پژوهش

ویژگی‌های خنک کننده و گرمایشی بام سبز در بسیاری از پروژه‌های تحقیقاتی نشان داده شده است (Niachou & et al. 2001; Castleton, Stovin and Davison 2010). به عنوان نمونه جافال و همکارانش یک مطالعه جامع از تاثیر بام سبز بر عملکرد ساختمان ارائه دادند و یک نمونه از رفتار حرارتی بام سبز را برای یک خانه تک خانواری با بام معمولی و بام سبز در سه آب و هوای مختلف شبیه‌سازی کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که بهره‌گیری از بام سبز، برای آب و هوای مدیترانه‌ای آتن ۱۲/۸ kWh/mمعادل ۳۲ درصد، برای آب و هوای معتدل لاروشل ۲/۳ kWh/m معادل ۶ درصد و برای آب و هوای سرد استکهلم

۱۰/۷ kWh/m معادل ۸ درصد کاهش داده است (Jaffal et al. 2012). در پژوهشی دیگر لاروش و برادری در مقاله‌ای با عنوان" آسایش و صرفه جویی انرژی با سقف سبز فعال" قابلیت صرفه جویی انرژی سقف سبز را با اتخاذ استراتژی عایق متغیر مورد بحث قرار دادند. این سامانه شامل یک پلانیوم[۲] بین سقف سبز و اتاق زیرین و یک فن حسگردار است که با استفاده از درجه حرارت محیط فعال شده و تهویه صورت می‌گیرد. چهار سلول با سقف سنتی عایق بندی شده، سقف سبز غیر عایق بندی شده، سقف سبز عایق بندی شده و سقف سبز با سامانه عایق متغیر در چندین سال در محیط گرم و خشک با زمستان‌های ملایم مورد آزمایش قرار دادند نتایج نشان داد که در تابستان، سقف سبز غیر عایق بندی شده و سقف سبز با سامانه عایق بندی متغیر، دمای کمترین دمای داخلی را به دست می‌آورد و در زمستان، سقف عایق بندی شده و ساختار سقف سبز با عایق متغیر، بالاترین درجه حرارت داخلی را به دست می‌آورد (La Roche and Berardi 2014). رفاهی و تلخابی در مقاله‌ای با عنوان" بررسی عوامل موثر در کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی به همراه بام‌های سبز" به بررسی میزان کاهش مصرف انرژی با استفاده از عوامل شاخص سطح برگ و عمق لایه خاک در سه اقلیم ایران پرداخته‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در اقلیم آب و هوایی بسیار گرم و خشک (بندرعباس) حدود٪ ۸/۵، در اقلیم گرم و خشک (اصفهان) حدود٪ ۹/۲ و در اقلیم مخلوط و خشک (تبریز) حدود٪ ۶/۶ کاهش مصرف انرژی داشته است (Refahi and Talkhabi 2015)؛ جیم و تسانگ که اثرات بام‌های سبز در محیط گرم و مرطوب هنگ کنگ را بررسی کرده‌اند، مشخص شد که شکل، نوع و ساختار زیست توده نقش مهمی در پتانسیل خنک‌سازی دارند (Jim and Tsang 2011). در تحقیقات ژائو و همکاران که اثرات انتخاب گیاه و بستر مناسب را بر عملکرد حرارتی بام سبز در تابستان مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که این دو مولفه در طراحی بام سبز مهم بشمار می‌آیند ((Zhao & et al. (2014). اقبالی، صادقی و رزاق رستمی (۱۳۹۹) در مقاله‌ای با عنوان" ارزیابی حرارتی بام‌های سبز گسترده در قیاس با سایر بام‌های مسطح در ساختمان‌های مسکونی با لایه فوقانی نقره‌ای و سفید" به ارزیابی حرارتی بام سبز گسترده در قیاس با سایر بام‌های متداول همچون بام نقره‌ای (ایزوگام با رویه آلومینیوم) و بام سفید (با پوشش فوقانی شن) در سه شهر اصفهان، تبریز و بندر انزلی با اقلیم‌های متفاوت می‌پردازد. نتایج تحقیق بر لزوم توجه به شرایط اقلیمی منطقه در جهت انتخاب مواد و مصالح مناسب تاکید دارد. محمودی زرندی و پاکاری (۱۳۹۱)در مقاله‌ای با عنوان «طراحی جزییات مناسب بام‌سبز برای کاهش مصرف انرژی ساختمان» بعد از شناخت بام سبز، با طراحی یک دیتیل و افزودن یک لایه به دیتیل بام سبز به آنالیز انتقال حرارتی اجزای تشکیل دهنده بام سبز پرداخته‌اند. پژوهش ایشان نشان داد که دیتیل تعریف شده در کاهش انتقال حرارت اثر بسیار مطلوب‌تری دارد و می‌تواند برای ساختمان‌های با مصرف انرژی صفر بکار گرفته شود.

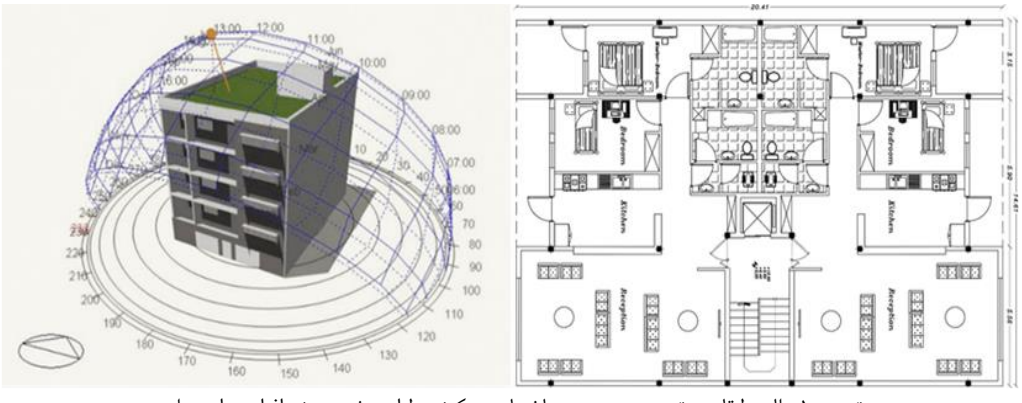
۵- روش پژوهش

پژوهش حاضر بر اساس اهداف تعریف شده در مطالعات اولیه و اثبات نیازها از روش تحقیق کیفی و از طریق بررسی منابع به تکمیل دانش پایه در مورد جنبه‌های مختلف بام سبز و و اصول طراحی و اجرای آن می-پردازد؛ در ادامه یک ساختمان (۵ طبقه،۱۰واحد) با کاربری مسکونی در اقلیم آب و هوایی شهر دزفول از طریق روش‌های محاسباتی و نرم‌افزار شبیه‌سازی دیزاین بیلدر ۵,۳,۰,۰۱۴ شبیه سازی می‌شود (تصویر۱). این نرم‌افزار از موتور شبیه‌سازی انرژی پلاس[۳] استفاده می‌کند و با استفاده از پوشه‌های اطلاعات هواشناسی مخصوص ایران[۴] (ITMY) و آمار ایستگاه هواشناسی صفی‌آباد شهرستان دزفول، محاسبات را برای یکسال براساس استاندارد «اشری[۵]» انجام می‌دهد. تمامی متغیرهای پیش فرض از جمله جنس جداره‌ها، نوع فعالیت، روشنایی، بازشوها، سامانه‌های سرمایش و گرمایش و برنامه زمانبندی هر کدام با استفاده از بانک اطلاعاتی جامع نرم‌افزار و مخصوص هر فضا تعریف شده است. جنس و ساختار به کار رفته در جداره‌ها و سایر مشخصات مربوط به ساختمان شبیه سازی شده در

جدول ۱ آمده است. تمامی نتایج با یک ساختمان با بام رایج مقایسه شده و از شبیه‌سازی شاخص‌های تاثیرگذار بام سبز بر کاهش مصرف انرژی سالیانه و هزینه‌های ناشی از آن، بهترین گزینه از هر شاخص انتخاب می‌گردد. در نهایت با تجزیه و تحلیل موارد ذکر شده جزییات اجرایی مطلوب بام سبز شهرستان دزفول پیشنهاد می‌شود؛ آنگاه در بهینه‌ترین نمونه، تاثیر بام سبز پیشنهادی در مقایسه با ساختمان با بام رایج بررسی خواهد شد.

جدول ۱- مشخصات ساختمان مسکونی طراحی شده در شبیه‌سازی نرم‌افزار دیزاین بیلدر

خصوصیات ساختمان شبیه‌سازی شده	شرح
موقعیت	دزفول (طول جغرافیایی ۴۸درجه و عرض جغرافیایی ۳۲درجه) ؛ ارتفاع ۱۴۳متری از سطح دریا
جهت‌گیری	شمالی- جنوبی
تعداد افراد ساکن	۳۲ نفر
ارتفاع کف تا کف	۳/۲۰ متر
مساحت	زیربنا ۱۳۱۸/۸۵ متر مربع؛ مساحت بام ۲۶۳/۷۷ متر مربع
مصالح دیوار خارجی	آجر نسوز۰/۰۳m، ملات ماسه سیمان ۰/۰۳m، بتن۰/۰۵ m، پلی استایرن اکسترود شده۰/۰۲۳ m، بتن۰/۰۵ m ، پلاستر۰/۰۲ m
مصالح بام	پوشش نهایی ۰/۰۳m ، پلی اتیلن۰/۰۰۰۲ m، عایق رطوبتی(قیر طبیعی)۰/۰۰۴ m، ملات ماسه سیمان۰/۰۵ m، بتن سبک ۰/۱m، سازه سقف۰/۳ m، پلاستر۰/۰۲ m
میزان تعویض هوا در ساعت	۰/۷ACH
روشنایی	لامپ LED؛ ۷/۵ وات بر مترمربع
سامانه‌های سرمایش و گرمایش	سامانه سرمایش کولر گازی(اسپیلیت)؛ سامانه گرمایش پکیج
پنجره	پنجره دوجداره ضخامت هر شیشه ۶ میلی‌متر؛ پر شده از گاز آرگون با ضخامت ۶ میلی‌متر



تصویر ۱-پلان طبقات و تصویر سه بعدی ساختمان مسکونی طراحی شده در نرم‌افزار دیزاین بیلدر

۶- مبانی نظری تحقیق

۶-۱ انواع بام سبز و روش اجرای آن

بام‌های سبز بر اساس عمق کاشت، شیب بام و نوع سامانه اجرایی به سه نوع فشرده، گسترده و نیمه فشرده طبقه‌بندی می‌شوند (Banting & et al. 2005, Silva & et al. 2016).

بام‌های فشرده، با وزن و عمق بیشتر، هزینه‌های کلی بیشتر، دامنه گیاهان قابل کشت و ملزومات نگهداری بیشتر شناخته می‌شوند که می‌توانند درختچه‌ها و حتی درختان کوچک را جای دهند و بام‌های سبز گسترده با وزن و عمق کم و هزینه نگهداری پایین مشـــخص می‌شوند که تنها می‌توانند گیاهان و خزه را در خود جای دهند (Silva & et al. 2016, Dahanayake & Chow 2017) ؛ بام سبز نیمه متمرکز نیز بین بام سبز گسترده و متمرکز قرار دارد. و دارای لایه‌های زهکشی، خاک و گیاه عمیق‌تر و گونه‌های گیاهی متنوع‌تر نسبت به بام گسترده است. به طور کلی بر روی یک بام پیش ساخته شده که با ورق‌های ضد آب (عایق رطوبتی) پوشانده شده است لایه ضد ریشه به منظور جلوگیری از آسیب به ساختار بام، اجرا می‌گردد (Lazzarin & et al. 2005). سپس به منظور تخلیه آب اضافی از محیط کشت به شبکه فاضلاب ساختمان از لایه زهکش استفاده می‌شود که به تبع آن موجب کاهش فشار تحمیلی بر سامانه فاضلاب می‌شود ؛ همچنین این لایه با انباشت آب حاصل از باران و آبیاری، آب مورد نیاز گیاه را در زمان خشکی فراهم می‌کند. البته می بایست از تخلیه آب اضافی و تهویه مناسب بستر و ریشه اطمینان حاصل کرد (Vila & et al. 2012). پیش از عنصر زهکش یک لایه فیلتر در حالیکه اجازه می‌دهد آب عبور کند، مانع از ورود املاح و خاکدانه‌ها به درون زهکش می‌شود (Lazzarin & et al. 2005) ؛ در ادامه بروی لایه فیلتر یک لایه بستر قرار می‌گیرد. این لایه محیطی برای رشد و نمو گیاهان و فراهم کننده مواد مغذی و حفظ ریشه آنان است. محیط کشت می‌بایست وزنی سبک داشته باشد تا به سازه ساختمان آسیبی نرسد؛ همچنین مشخصه اصلی تشخیص بام سبز گسترده از فشرده میزان عمق این لایه است که می‌تواند از۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر متفاوت باشد (همان) و در نهایت پوشش گیاهی است که بسیاری از مزایای بام سبز ناشی از وجود گیاهان است و بسیاری از عوامل از جمله عمق بستر، سطح تابش خورشیدی، آب و هوا تعیین کننده بقای گونه گیاهی می‌باشد (Bradley Rowe 2010).

۶-۲ مولفه‌های تاثیرگذار بر عملکرد حرارتی بام سبز

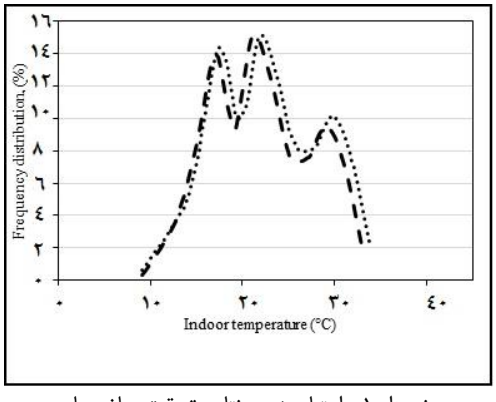
تاثیر پوشش گیاهی در کاهش هدر رفت انرژی ساختمان امری انکار ناپذیر است در بام سبز ساختمان بالاترین لایه مرتبط با هوای آزاد لایه سیزینه می‌باشد. برگ گیاهان با ایجاد رطوبت در هوا و سایه اندازی در خنک کردن لایه‌های زیرین در فصل تابستان نقش بسزایی دارد؛ در نتیجه نوع، اندازه و فرم برگ گیاهان در تولید سایه‌های ایجاد شده متفاوت عمل خواهد کرد. همچنین انواع گیاهان در مرطوب کردن هوا شرایط مختلفی دارند. قابلیت خنک‌سازی گیاهان به ارتفاع گیاه نیز وابسته است و کاهش بار خنک کننده و گرمایشی یک ساختمان ناشی از ارتفاع گیاهان به میزان نفوذ نور خورشید، انعکاس یا جذب نمودن انرژی، باد و ایجاد سایه بستگی دارد. لایه دوم بام سبز محیط کشت گیاه است. محیط کشت (لایه خاک) با کاهش نوسانات گرمایی بروی سطح بام سبب خنک کردن فضای زیرین در تابستان و گرم ماندن آن در زمستان می‌شود. در واقع میزان ضخامت محیط کشت در سرعت رسیدن سرمای تولید شده ناشی از وجود رطوبت و گیاهان موثر است و با افزایش ظرفیت گرمایی بام به نگهداشت انرژی کمک می‌کند. ایجاد لایه هوا و عایق حرارتی به دلیل وجود حباب‌های هوا در ساختار خود، باعث کاهش هدایت حرارت می‌شوند و نقش مهمی در میزان تبادل حرارت بام ساختمان با محیط خارج دارند. همچنین ضریب رسانش در مصالح مختلف، متفاوت است لذا جنس مصالح می‌تواند موجب تسریع و یا تاخیر در انتقال برودت تولیدی شود. به طور کلی عملکرد حرارتی بام متاثر از عوامل متعددی است که می‌توان به انتخاب گیاه (Zhao & et al. 2014) و خصوصیات گیاهی (نوع گیاه، ارتفاع و شاخص سطح برگ) (Sailor 2008) لایه‌های پشتیبانی بام سبز (Kumar and Kaushik

2005) و بستر مناسب (Zhao & et al. 2014) اشاره کرد. البته فرایند انتخاب پوشش گیاهی بام سبز تا حدودی وابسته به شباهت بین محیط زیست‌بام و زیستگاه بومی گیاه می‌باشد (Dvorak and Volder 2010). و انتخاب نوع و ضخامت بستر و پوشش گیاهی به شرایط آب و هوایی بومی، هزینه مصالح و الزامات زیبایی شناختی نیز بستگی دارد (Zhao & et al. 2014). بنابراین به منظور دستیابی به اجزای بهینه بام سبز در شرایط اقلیمی شهرستان دزفول به این سوال پاسخ داده می‌شود که تغییر در عوامل یاد شده چه تاثیری بر عملکرد حرارتی بام سبز دارد.

۶-۳ اعتبار سنجی

برای بهره‌گیری صحیح از نرم‌افزار دیزاین بیلدر لازم است قبل از بررسی تاثیر بام سبز بر مصرف انرژی ساختمان، از صحت و اعتبار این نرم‌افزار اطمینان حاصل کرد.

بدین منظور از تحقیقات اقای سانتاموریس و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شده است. ایشان تاثیر استفاده از بام سبز را با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس برای ساختمان یک مهدکودک در آتن که مجهز به سامانه آزمایشی بام سبز است مورد بررسی قرار داده‌اند.



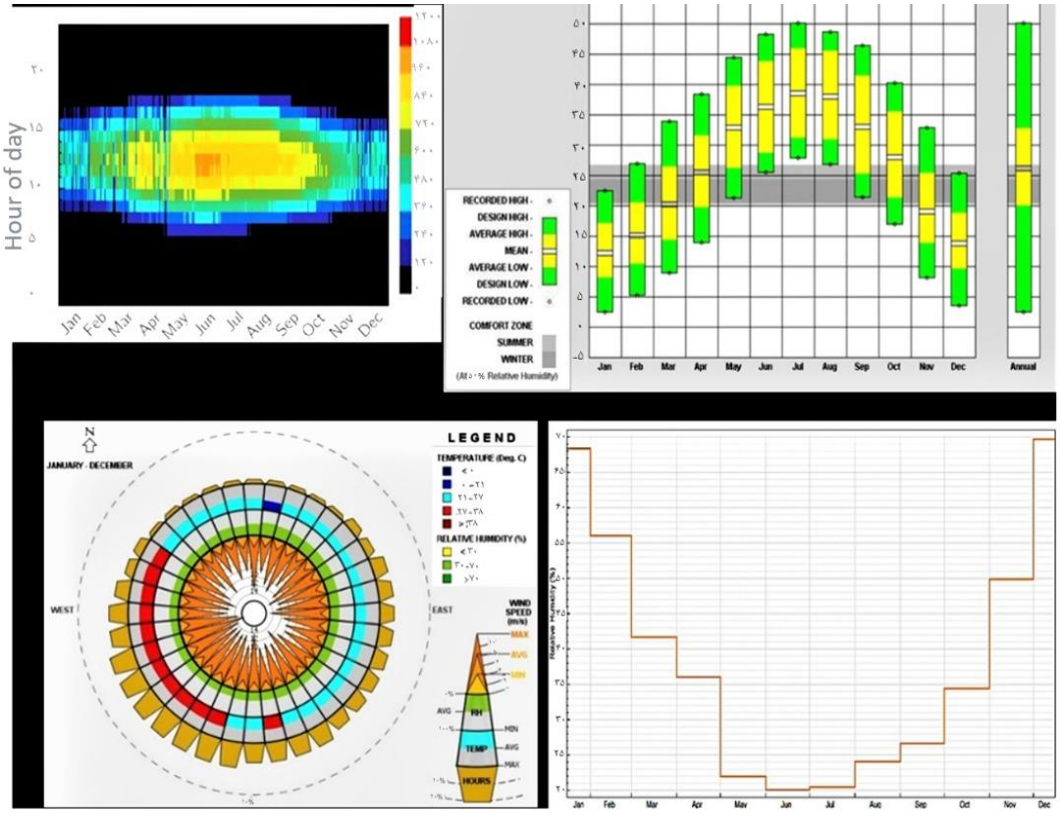
نمودار ۱- اعتبارسنجی نتایج تحقیق حاضر با نتایج آقای سانتاموریس و همکاران(۲۰۰۷) برای توزیع فراوانی دمای هوای داخل ساختمان با بام سبز

از مقایسه نتایج خروجی نرم‌افزار دیزاین بیلدر با نتایج تحقیقات آقای سانتاموریس و همکاران(۲۰۰۷ Santamouris et al.) مشاهده می‌شود که نرم‌افزار دیزاین بیلدر عملکرد خوبی در پیش بینی میزان مصرف انرژی ساختمان نشان داده است بطوریکه نتایج شبیه سازی مقاله مذکور بر نتایج شبیه سازی صورت گرفته منطبق است.

۶-۴ محدوده مورد مطالعه

با توجه به اینکه در مناطق گرمسیری انتخاب پوشش گیاهی مناسب و لایه‌های پشتبانی بام سبز موجب سایه اندازی، کاهش زیاد دمای سقف و کاهش انعکاس در بام ساختمان‌ها می‌گردد و به تبع آن نیاز به انرژی سرمایشی را کاهش می‌دهند لذا شهر دزفول به عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب گردیده است تا اثرات بام سبز در منطقه مذکور مورد بررسی قرار گیرد.

برای استخراج نمودار ۲ داده‌های حاصل از اطلاعات هواشناسی شهرستان دزفول، در قالب پوشه با پسوند (epw) به نرم‌افزار های اقلیمی کنسولکنت کلایمیت ۶,۰ و دی ویو ۲,۰,۰,۵ داده شده که بتوان درک بهتری از محتویات فایل ایجاد نمود. این خروجی‌ها نشان می‌دهند که شدت و محدوده تابش در این شهر خیلی زیاد است. همچنین بالاترین دمای هوا ۵۰ درجه سانتیگراد در تیر و مرداد و پایین‌ترین دمای هوا ۳ درجه سانتیگراد در دی و بهمن می‌باشد (نمودار۲- بالا). همچنین حداکثر رطوبت نسبی۷۰درصد در ماه آذر و دی و حداقل درصد رطوبت۲۰ درصد در تیرماه مشخص شده است (نمودار۲- راست پایین)؛ در نتیجه در زمستان تبخیر سطحی بروی گیاهان و سطح بستر آن بسیار ناچیز است. همچنین خصوصیات باد شهرستان دزفول نشان می‌دهد که باد غالب منطقه و بیشترین تعداد ساعات وزش باد از سمت جنوب غربی می‌باشد، سوز سرد زمستانی در این اقلیم بسیار کم است و تنها از سمت شمال با سرعت کم می‌وزد (نمودار۲- قسمت پایین سمت چپ).



نمودار ۲- دمای هوای شهرستان دزفول، خروجی نرم‌افزار کنسولکنت کلایمیت (سمت راست بالا)- تابش کل در شهرستان دزفول، خروجی نرم افزار دی ویو (سمت چپ بالا)- رطوبت نسبی شهرستان دزفول، خروجی نرم‌افزار دی ویو (سمت راست پایین) و جهت، سرعت و دمای باد شهرستان دزفول خروجی نرم‌افزار

۷- مطالعات و بررسی‌ها

با ارزیابی قابلیت صرفه‌جویی در انرژی و هزینه بام سبز بومی، مجموعه‌ای از ۶ مولفه تاثیرگذار بر عملکرد حرارتی بام سبز برای شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل مورد توجه قرار گرفته است. این مولفه‌ها عبارتند از: مشخصه مساحت برگ (LAI) [۶]، ارتفاع گیاه، عمق لایه خاک، ضخامت عایق حرارتی، لایه هوا، جنس لایه زهکش.

این شبیه‌سازی‌ها بوسیله نرم‌افزار دیزاین بیلدر به ازاء هر مولفه به طور جداگانه انجام گرفته. نرم‌افزار مذکور شبیه‌سازی بام سبز و تاثیر آن بر میزان مصرف انرژی ساختمان را از طریق ساده‌ترین و رایج‌ترین روش‌ها، انتخاب ضریب انتقال حرارت مناسب و استفاده از موازنه انرژی انجام می‌دهد (Santamouris & et al. 2007; Wong & et al. 2003; Niachou & et al. 2001; Refahi and Talkhabi 2015). همچنین از روش‌های دقیق‌تری که جزییات بیشتری را در نظر می‌گیرند نیز استفاده می‌کند (Wong & et al. 2003; Sailor 2008; Theodosiou 2003; Del Barrio 1998 and Frankenstein, Koenig 2004) از جمله این‌ها عبارتند از: ۱) تشعشعات انتقالی موج کوتاه و موج بلند به داخل فضای سبز ۲) گرمای رسانشی در لایه خاک ۳) انتقال گرمای همرفتی ۴) تعرق سطحی از خاک و گیاه (Sailor 2008 and Refahi and Talkhabi 2015). البته بهترین و جامع‌ترین این روش‌ها، روش سیلور[۷] (Sailor 2008) است که بر پایه محاسبات فرنکشتاین و کوییننگ[۸] (Frankenstein and Koenig 2004) بنا شده‌اند. این روش پایه محاسباتی نرم‌افزار

انرژی پلاس (EnergyPlus documentation 2018) نیز هست و همانطور که در بخش روش تحقیق اشاره شد، نرم‌افزار دیزاین بیلدر از شیوه محاسباتی انرژی پلاس استفاده می‌کند. لذا در این نرم‌افزار با استفاده از فرمول‌های (۱) و (۲) معادله حرارتی بام سبز و با استفاده از فرمول (۳) معادله حرارتی هر زون محاسبه، و معین می‌شود؛

الف- معادله حرارتی برای فضای سایه (شامل قسمت روی خاک تا تاج گیاه):

$$F_f = \sigma_f[I_s(1-\alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1}(T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f$$

(۱)

که در این فرمول:

$\sigma_f[I_s(1-\alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4]$ تشعشعات انتقالی موج کوتاه و موج بلند به داخل فضای سبز و $\frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1}(T_g^4 - T_f^4)$ گرمای رسانشی در لایه خاک است. H_f انتقال گرمای همرفتی به عنوان شار حرارتی محسوس و L_f تعرق سطحی از خاک و گیاه به عنوان شار حرارتی نامحسوس می‌باشد. اندیس g برای مشخصات خاک و اندیس f برای مشخصات برگ در نظر گرفته شده است. ε فاکتور ضریب انتشار، I_s تشعشع موج کوتاه و I_{ir} تشعشع موج بلند ($\mathrm{Wm^{-2}}$). α توان بازتابش و σ ضریب استفان-بولتزمن برابر $5.671 \times 10^{-8}\mathrm{Wm^{-2}K^{-4}}$ می‌باشد. همچنین σ_f برابر چگالی برگ است.

ب- معادله حرارتی برای فضای خاک:

$$F_g = (1-\sigma_f)[I_s^{\downarrow}(1-\alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^{\downarrow} - \varepsilon_g \sigma T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1}(T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + q_{sg}''$$

(۲)

پ- معادله حرارتی هر زون:

$$\dot{Q}_{load} = \sum_{i=1}^{Nsl} \dot{Q}_1 + \sum_{i=1}^{Nsurfaces} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{Nzones} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z)$$

(۳)

که در این فرمول $\sum_{i=1}^{Nsl} \dot{Q}_1$ مجموع انتقال حرارتی بارهای داخلی، $\sum_{i=1}^{Nsurfaces} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ مجموع انتقال گرمای مجاور از سطوح هر زون $\sum_{i=1}^{Nzones} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ انتقال گرما به دلیل اختلاط هوا بین زون و $\dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z)$ انتقال گرما به دلیل نفوذ هوا از خارج است، C_p گرمای ویژه هوای زون، A_i کل سطح مقطع انتقال حرارت، h_i ضریب انتقال حرارت و $\dot{m}_i$ دبی جریان جرمی می‌باشد.

در این شبیه سازی داده‌های ورودی مطابق جدول‌های ۲ و ۳ در نظر گرفته شده‌اند و خروجی‌های نرم‌افزار برای هر مولفه به طور جداگانه در قالب جداول مجزا تهیه می‌شوند که در دفتر نشریه به صورت پیوست ارائه شده است. سپس برای تحلیل هر کدام از این جداول، میزان مصرف انرژی سامانه‌ی سرمایشی و گرمایشی ساختمان به صورت نمودار ارائه خواهند شد که در ادامه به بررسی هرکدام پرداخته می‌شود. در نهایت در بهینه‌ترین حالت میزان مصرف انرژی سالانه در دو حالت بهینه (ساختمان دارای بام سبز پیشنهادی) و حالت پایه (ساختمان بدون بام سبز) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مشخصات ورودی مربوط به شبیه سازی ساختمان(طبق جدول۱) و پارامترهای بام سبز(طبق جدول۲و۳) ، با تحلیل هر کدام از این جداول، میزان مصرف انرژی سامانه‌های سرمایش و گرمایش مشخص شده و در جهت درک بهتر به صورت نمودار نشان داده شده است که در ذیل به بررسی هرکدام پرداخته خواهد شد. در نهایت در بهینه‌ترین حالت میزان مصرف انرژی سالانه در دو حالت بهینه (ساختمان دارای بام سبز پیشنهادی) و حالت پایه (ساختمان بدون بام سبز) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول ۲–داده‌های اصلی ورودی نرم‌افزار دیزاین بیلدر برای مشخصات نمونه بام سبز

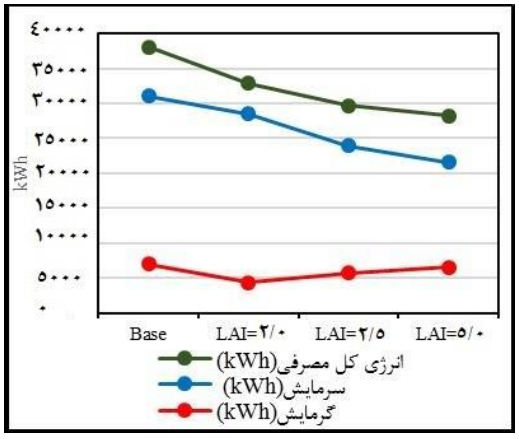
لایه‌های بام سبز	هدایت حرارتی (وات بر متر کلوین)	گرمای ویژه (ژول بر کیلوگرم کلوین)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ضخامت
پوشش گیاهی	–	–	–	۱۰– ۵۰
خاک	۰/۶	۸۸۰	۱۶۸۰	۱۰–۳۰
فیلتر خاک	۰/۱۹	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۰/۰۰۳
لایه زهکش (خرده لاستیک)	۰/۱۳	۶۱۰	۱۰۰۰	۰/۰۳
ژئوتکستایل محافظ	۰/۲۲	۱۸۰۰	۹۱۰	۰/۰۰۲۶
مانع ریشه(PVC)	۰/۱۷	۹۰۰	۱۳۹۰	۰/۰۰۲
عایق رطوبتی(EPDM)	۰/۲۵	۱۰۰۰	۱۱۵۰	۰/۰۰۱۵
شن	۰/۳۶	۸۴۰	۱۸۴۰	۰/۰۵
ایزوگام (قیر)	۰/۱۷	۱۰۰۰	۱۰۵۰	۰/۰۰۴
ملات ماسه سیمان	۱/۴	۶۵۰	۲۱۰۰	۰/۰۳
بتن	۰/۱۷	۸۴۰	۲۳۰۰	۰/۱
سازه سقف	۱/۹	۸۴۰	۲۳۰۰	۰/۳
پلاستر	۰/۱۶	۱۰۰۰	۶۰۰	۰/۰۲

جدول ۳– مشخصات مربوط به پوشش گیاهی بام سبز – ورودی نرم افزار دیزاین بیلدر

مشخصات	مقدار
ارتفاع گیاه	۰/۱۰ –۰/۵۰
مساحت سطح برگ	۵/۰۰ –۰/۵۰
ضریب انعکاس برگ	۰/۴۰
میزان تشعشع برگ	۰/۹۵
حداقل مقاومت گیاه به انتقال رطوبت	۵۰/۰
حداکثر مقدار رطوبت حجمی لایه خاک در حالت اشباع	۰/۵۰
حداقل مقدار رطوبت حجمی لایه خاک	۰/۱۰

۱-۷ تاثیر شاخص مساحت برگ بر میزان مصرف انرژی سرمایش و گرمایش

برای استفاده از محاسبات نرم‌افزار و گرفتن نتایج میزان مصرف انرژی در شرایط مختلف، ۳ اندازه برای مشخصه مساحت برگ گیاه تعیین گردید؛ برای گیاهان پهن‌برگ LAI= ۵، برای گیاهان با برگ متوسط LAI=۲/۵ و برای گیاهان با برگ‌های سوزنی LAI=۰/۵ در نظر گرفته شده‌است. نتایج شبیه‌سازی با توجه به خروجی نرم افزار در نمودار ۳ نشان می‌دهد که گیاهان پهن‌برگ در قیاس با گیاهان سوزنی‌برگ می‌توانند مصـــــرف انرژی



نمودار ۳- تاثیر مشخصه مساحت برگ بر میزان انرژی مصرفی در یک سال

سامانه‌ی سرمایش کل ساختمان را معادل kWh ۶۸۶۴/۳۵ کاهش دهند ؛ این در حالی است که گیاهان پهن برگ میزان مصرف انرژی گرمایشی را افزایش(kWh ۲۲۱۹/۷) و میزان مصرف انرژی کل سامانه‌ی سرمایشی و گرمایشی را kWh ۴۶۴۴/۶ کاهش داده‌اند. به عبارت دیگر هر چه برگ گیاه بزرگتر و یا سطح پوششی بالاتری داشته باشد، سایه اندازی گیاهان بیشتر شده و ساختمان خنک‌تر خواهد شد بنابراین در مصرف برق صرفه‌جویی می‌شود؛ البته گیاهان پهن برگ مانع از نفوذ اشعه‌های خورشید در زمستان می‌شوند در نتیجه مصرف انرژی سامانه گرمایش افزایش می‌یابد. لذا با بررسی میزان انرژی کل مصرفی سالانه و هزینه‌های انرژی مصرفی که در جدول ۴ خلاصه شده است، گیاهان پهن‌برگ در مقایسه با گیاهان سوزنی هزینه‌های مصرف انرژی سرمایش را ۹۱۰/۲۱ دلار کم می‌کند اما هزینه‌های مصرف انرژی گرمایش را ۸۲/۷۰ دلار افزایش داده است بنابراین در مجموع موجب صرفه‌جویی ۸۲۷/۵۰ دلار در یک سال می‌شوند. شایان ذکر است که تعرفه برق در بخش مسکونی، به ازای هر کیلو وات ساعت در ماه معادل ۱۳/۲۶ سنت و تعرفه گاز طبیعی ۱۰/۹۲ دلار بر هر هزار فیت مکعب در نظر گرفته شده است(EIA2019).

جدول ۴- هزینه‌های انرژی مصرفی با توجه به تغییر مشخصه مساحت برگ(دلار)

مشخصه مساحت برگ	قیمت کل انرژی مصرفی سالانه	قیمت انرژی مصرفی سرمایش	قیمت انرژی مصرفی گرمایش
گیاهان سوزنی برگ (LAI=۰/۵)	۳۹۳۸/۳۷	۳۷۷۵/۷۰	۱۶۲/۶۷۶
گیاهان با برگ متوسط (LAI=۲/۵)	۳۳۹۰/۲۲	۳۱۷۵/۲۷	۲۱۴/۹۵۲
گیاهان پهن برگ (LAI=۵)	۳۱۱۰/۸۷	۲۸۶۵/۴۹	۲۴۵/۳۸۳

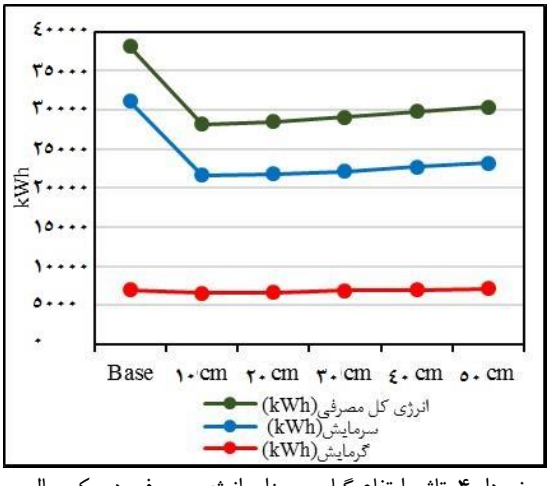
۷-۲ تاثیر ارتفاع گیاه بر میزان مصرف انرژی سرمایش و گرمایش

در این قسمت پنج حالت مختلف ۱۰cm -۵۰cm برای بررسی تاثیر ارتفاع گیاه به نرم افزار معرفی گردید؛ نتایج شبیه‌سازی با توجه به خروجی نرم افزار در نمودار۴ نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع گیاه میزان مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی افزایش یافته است؛ همچنین گیاهان با ارتفاع ۱۰cm نسبت به گیاهان با ارتفاع ۵۰cm میزان کل انرژی مصرفی را ۲۱۶۳/۷۶kWh کاهش داده‌اند. علت این امر این است که در تابستان‌ها تبخیر سطحی ناشی از باد و تابش خورشید بر سطح خاک و پوشش گیاهی به وسیله گیاهان بلندتر کمتر ایجاد می‌شود در نتیجه برودت کمتری به سمت فضای داخلی انتقال می‌یابد ؛ در زمستان گیاهان بلندتر بدلیل سایه اندازی بیشتر مانع از رسیدن تابش خورشید به سطح خاک می‌شوند و مصرف انرژی گرمایشی افزایش می‌یابد. بنابراین گیاهان کوتاه قد (۱۰cm) در مقایسه با گیاهان بلند نشان می‌دهند و هزینه‌های کل انرژی مصرفی در یک سال را ۲۱۷/۲۳۲ دلار کاهش می‌دهند که بیشترین کاهش در بخش سرمایش معادل ۲۱۰/۸۳۴ دلار می‌باشد (جدول۵). همچنین انتخاب

ساکولنت ها یا گیاهان گوشتی با عادات رشد پایین از جمله سدوم ها، گل ناز، گل بشقابی یا آئونیوم، آشوریا که از گونه‌های بومی منطقه بشمار می‌آیند، ارجحیت دارند.

جدول ۵- هزینه‌های انرژی مصرفی با توجه به تغییر ارتفاع گیاه (دلار)

ارتفاع گیاه	قیمت کل انرژی مصرفی سالانه	قیمت انرژی مصرفی سرمایش	قیمت انرژی مصرفی گرمایش
گیاه با ارتفاع۱۰cm	۳۱۱۰/ ۸۷۳	۲۸۶۵/ ۴۹	۲۴۵/ ۳۸۳
گیاه با ارتفاع۲۰cm	۳۱۴۱/ ۲۶۵	۲۸۹۳/ ۶۲	۲۴۷/ ۶۴۵
گیاه با ارتفاع۳۰cm	۳۱۹۶/ ۰۹۵	۲۹۳۷/ ۸۳	۲۵۸/ ۲۶۵
گیاه با ارتفاع۴۰cm	۳۲۷۷/ ۰۵۱	۳۰۱۵/ ۵۴	۲۶۱/ ۵۱۱
گیاه با ارتفاع۵۰cm	۳۳۴۳/ ۰۹	۳۰۷۶/ ۳۲۹	۲۶۶/ ۷۶۱



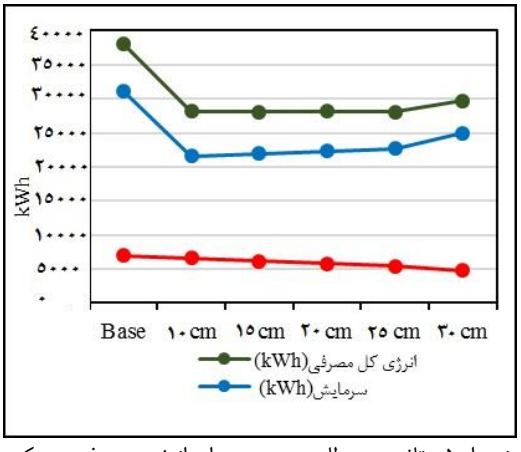
نمودار ۴-تاثیر ارتفاع گیاه بر میزان انرژی مصرفی در یک سال

۳-۷ تاثیر عمق لایه بستر بر میزان مصرف انرژی سرمایش و گرمایش

به منظور بررسی تاثیر عمق لایه خاک (بستر کاشت گیاه) پنج حالت مختلف ۱۰cm، ۱۵cm، ۲۰cm، ۲۵cm، ۳۰cm در نرم‌افزار تعیین گردید. نتایج بدست آمده در نمودار۵ نشان می‌دهد که: با افزایش عمق لایه خاک، انرژی مصرفی سامانه‌ی سرمایش افزایش و انرژی مصرفی سامانه گرمایش کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر در سرمایش، ضخامت۱۰ سانتی متر با کاهش ۳۳۲۴/۷۵kWh و در گرمایش، ضخامت۳۰ سانتی‌متر با کاهش ۱۷۸۶/۵۹kWh به علت خاصیت عایقی خاک عملکرد بهتری را نشان داده است اما به لحاظ مصرف انرژی سالانه، ضخامت ۱۵ سانتی‌متر بهتر عمل کرده است و میزان مصرف انرژی کل را kWh ۱۶۴۳/۸۷کاهش می‌دهد. در واقع ضخامت زیاد خاک مانع رسیدن سرمایش حاصل از تبخیر سطحی ناشی از وجود گیاه و خاک به سطوح زیرین خود شده و مانند عایق حرارتی عمل می‌کند. حال آنکه با توجه به کاهش بهای کل انرژی مصرفی(جدول ۶) میزان حداقل عمق خاک(ضخامت ۱۰سانتی‌متر) می‌تواند با کاهش ۱۵۳۸/۱۶kWhانرژی مصرفی موجب صرفه‌جویی مبلغ ۲۹۵ /۳۸۳ دلار نسبت به بیشترین ضخامت (۳۰سانتی متر) شود و حدود مبلغ۴۴۰/۸۶۴ دلار در بخش سرمایش صرفه‌جویی به وجود آورد در حالی که با افزایش kWh ۱۷۸۶/۵۹ انرژی گرمایشی منجر به۵۷/۵۶۹ دلار افزایش هزینه‌های انرژی گرمایشی می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که ساکولنت‌ها، برخی از گیاهان علفی، گیاهان دارویی، سبزیجات و چمن‌ها مناسب بام‌های سبز کم عمق هستند و می‌توانند در خاک با عمق ۱۰سانتی‌متر رشد یابند.

جدول۶- هزینه‌های انرژی مصرفی با توجه به تغییر ضخامت لایه بستر(دلار)

عمق لایه خاک بر حسب سانتی‌متر	قیمت کل انرژی مصرفی سالانه	قیمت انرژی مصرفی سرمایش	قیمت انرژی مصرفی گرمایش
۳۰	۳۴۹۴/ ۱۶۸	۳۳۰۶/ ۳۵۴	۱۸۷/ ۸۱۴
۲۵	۳۲۱۰/ ۸۰۶	۳۰۰۸/ ۶۷۵	۲۰۲/ ۱۳۱
۲۰	۳۱۷۸/ ۰۱۴	۲۹۶۱/ ۴۲۷	۲۱۶/ ۵۸۷
۱۵	۳۱۳۷/ ۰۷۶	۲۹۰۷/ ۴۱۱	۲۲۹/ ۶۶۵
۱۰	۳۱۱۰/ ۸۷۳	۲۸۶۵/ ۴۹	۲۴۵/ ۳۸۳



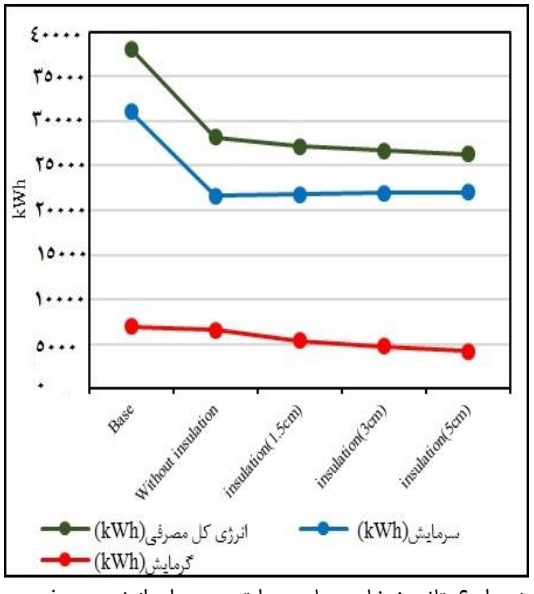
نمودار ۵- تاثیر عمق لایه بستر بر میزان انرژی مصرفی در یک سال

۴-۷ تاثیر ضخامت عایق حرارتی بر میزان مصرف انرژی سرمایش و گرمایش

با ثابت نگهداشتن جنس عایق، چهار حالت برای شبیه سازی تاثیر ضخامت عایق حرارتی بر میزان مصرف انرژی که شامل بام سبز بدون عایق حرارتی، بام سبز همراه با عایق ۱/۵cm، ۳cm و ۵cm می‌باشد، مورد بررسی گرفت. با توجه به خروجی نرم افزار مشاهده می‌شود که بام سبز بدون عایق به لحاظ سرمایش و بام سبز با ضخامت بیشتر عایق به لحاظ گرمایش بهینه‌تر عمل می‌کند؛ و با توجه به اینکه هزینه کل انرژی مصرفی در ضخامت۵ سانت عایق حرارتی نسبت به بام سبز بدون عایق۲۹/۳۹۲ دلار کاهش یافته است (جدول۷) لذا عایق ۵ سانت به عنوان حالت مطلوب انتخاب می‌گردد. عایق مذکور با افزایش ۳۲۱/۷۴kWh انرژی مصرفی سامانه‌ی سرمایش منجر به افزایش۸۲۸ /۵۷ دلار هزینه‌های انرژی سرمایشی می‌شود در حالیکه با کاهش ۱۸۵۲/۶۵kWh انرژی مصرفی سامانه گرمایش موجب کاهش۲۲ /۸۷ دلار هزینه‌های انرژی گرمایشی می‌شود.

جدول ۷-هزینه کل انرژی مصرفی با توجه به تغییر ضخامت عایق حرارتی(دلار)

ضخامت عایق حرارتی	قیمت کل انرژی مصرفی سالانه	قیمت انرژی مصرفی سرمایش	قیمت انرژی مصرفی گرمایش
۵ cm	۳۰۸۱/ ۴۸۱	۲۹۲۳/ ۳۱۸	۱۵۸/ ۱۶۳
۳cm	۳۰۸۴/ ۵۰۷	۲۹۰۸/ ۱۵۵	۱۷۶/ ۳۵۲
۱/۵cm	۳۰۹۲/ ۲۷۸	۲۸۹۱/ ۹۰	۲۰۰/ ۳۷۸
بدون عایق	۳۱۱۰/ ۸۷۳	۲۸۶۵/ ۴۹	۲۴۵/ ۳۸۳



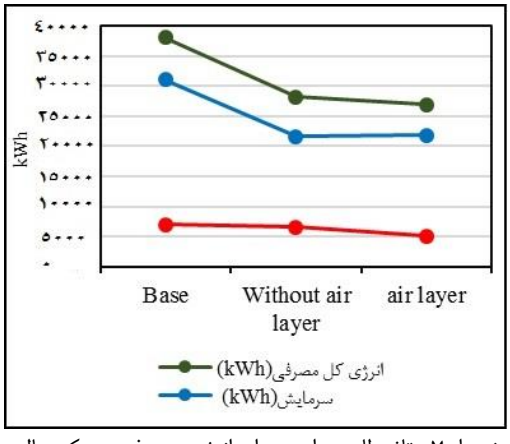
نمودار ۶-تاثیر ضخامت عایق حرارتی بر میزان انرژی مصرفی در یک سال

۵-۷ تاثیر لایه هوا بر میزان مصرف انرژی سرمایش و گرمایش

نتایج شبیه‌سازی به منظور تاثیر یک لایه هوای ۵ سانتی‌متری در بام سبز نسبت به بام سبز بدون لایه هوا نشان می‌دهد که بام سبز بدون لایه هوا به لحاظ سرمایش عملکرد بهتری را نشان می‌دهد این درحالی است که بام سبز با لایه هوا به لحاظ گرمایش مطلوب‌تر می‌باشد و موجب کاهش ۱۴۹۶/۳۱kWh انرژی مصرفی سامانه‌ی گرمایش می‌شود. همچنین میزان مصرف انرژی کل سرمایشی و گرمایشی سالانه بام سبز به همراه لایه هوا بهتر عمل کرده است و منجر به کاهش ۱۲۴۶/۵۷kWh از انرژی کل مصرفی شده است. لذا با توجه به کاهش مجموع انرژی مصرفی سالانه و بهای انرژی کل که در جدول۸ مشخص شده است (۲۲/۶۳۵ دلار) انتخاب مناسب‌تر بام سبز با لایه هوا می‌باشد.

جدول ۸- هزینه کل انرژی مصرفی با توجه به تاثیر لایه هوا در بام سبز(دلار)

لایه هوا	قیمت کل انرژی مصرفی سالانه	قیمت انرژی مصرفی سرمایش	قیمت انرژی مصرفی گرمایش
بام سبز بدون لایه هوا	۳۱۱۰/ ۸۷۳	۲۸۶۵/ ۴۹	۲۴۵/ ۳۸۳
بام سبز همراه با لایه هوا	۳۰۸۸/ ۲۳۸	۲۸۹۸/ ۶۰۸	۱۸۹/ ۶۳۰



نمودار ۷- تاثیر لایه هوا بر میزان انرژی مصرفی در یک سال

۶-۷ تاثیر جنس لایه زهکش بر میزان مصرف انرژی سرمایش و گرمایش

با ثابت نگهداشتن ضخامت لایه زهکش، چهار حالت مختلف مصالح به نرم‌افزار معرفی گردید که شامل زهکش از جنس پلی‌پروپیلن، زهکش از جنس پلی‌اتیلن، زهکش از جنس خرده لاستیک و زهکش از جنس شن و ماسه می‌باشد و ضریب رسانش هر کدام در جدول ۹ بیان شده است. از آن‌ها می‌توان این چنین نتیجه گرفت

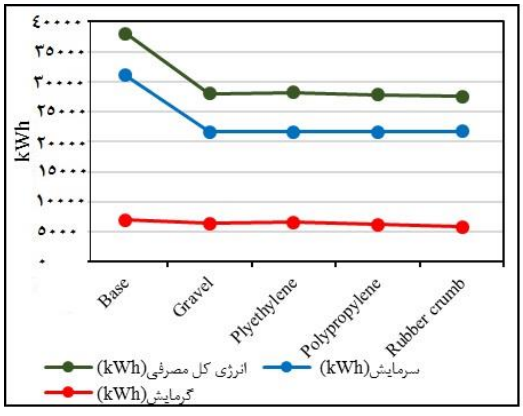
جدول ۹-ضریب رسانش مصالح زهکش، منبع: بانک اطلاعاتی جامع نرم افزار

نوع مصالح	ضریب رسانش[W/m.k]
شن و ماسه	۰/۳۶
خرده لاستیک	۰/۱۳
پلی‌اتیلن	۰/۵
پلی‌پروپیلن	۰/۲۲

که لایه زهکش از جنس پلی‌اتیلن با ضریب رسانش بیشتر به لحاظ مصرف انرژی سرمایشی مطلوب‌تر است و لایه زهکش از جنس خرده لاستیک با ضریب رسانش کمتر به لحاظ مصرف انرژی گرمایشی، گزینه مناسب‌تری است. در واقع هرچه ضریب رسانش کمتر باشد بیانگر این است که ماده قابلیت انتقال حرارت کمتری دارد. در اینجا خرده لاستیک مانند عایق عمل می‌کند و مانع انتقال حرارت می‌شود؛ اما زهکش از جنس پلی‌اتیلن موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود که نتیجه آن تسریع انتقال برودت تولیدی و کاهش مصرف انرژی سامانه سرمایش است. حال آنکه با توجه به کاهش انرژی کل سالانه خرده لاستیک به عنوان جنس لایه زهکش انتخاب بهتری می‌باشد (۶۳۲/۵۳ kWh). البته با توجه به اینکه در صورت استفاده از خرده لاستیک، هزینه کل انرژی مصرفی سالیانه کاهش چشمگیری نداشته است (جدول۱۰) می‌توان از این مولفه چشم پوشی کرد.

جدول ۱۰–هزینه‌های انرژی مصرفی با توجه به تغییر جنس لایه زهکش(دلار)

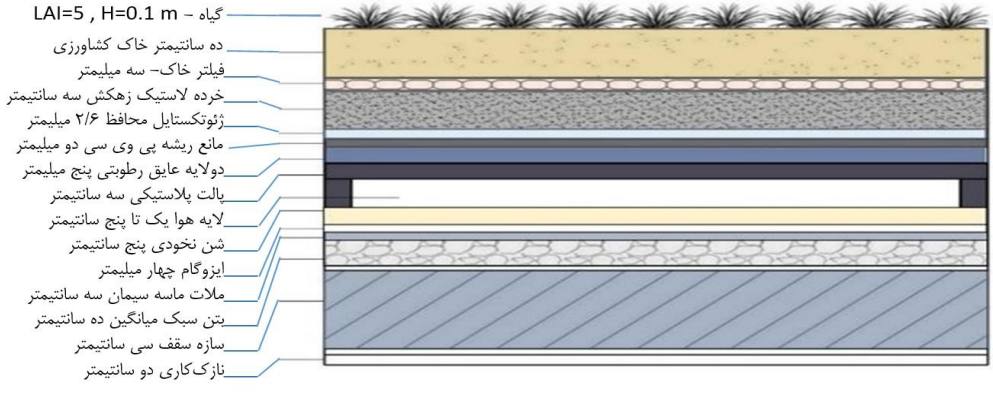
مصالح لایه زهکش	قیمت کل انرژی مصرفی سالانه	قیمت انرژی مصرفی سرمایش	قیمت انرژی مصرفی گرمایش
خرده لاستیک	۳۰۹۹/ ۱۱۵	۲۸۸۱/ ۹۴۸	۲۱۷/ ۱۶۷
پلی پروپیلن	۳۱۰۳/ ۶۰۸	۲۸۷۲/ ۷۲۷	۲۳۰/ ۸۸۱
پلی اتیلن	۳۱۱۰/ ۸۷۵	۲۸۶۵/ ۴۹۲	۲۴۵/ ۳۸۳
شن و ماسه	۳۱۰۸/ ۰۹۴	۲۸۶۸/ ۱۲۸	۲۳۹/ ۹۶۶



نمودار ۸–تاثیر جنس لایه زهکش برمیزان انرژی مصرفی دریک‌سال

۸- یافته‌های تحقیق

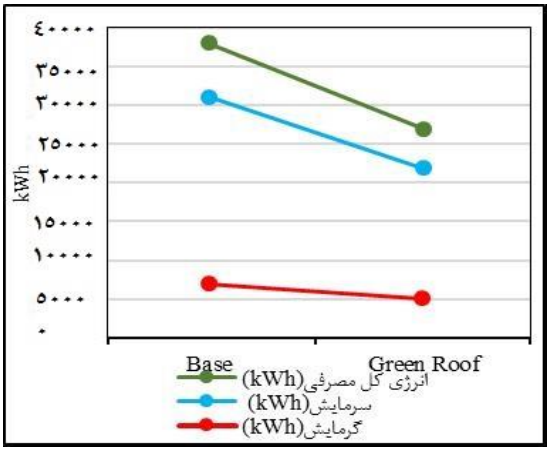
با شبیه‌سازی جزییات متفاوت بام سبز و تحلیل میزان مصرف انرژی به ازای تغییر در هر یک از مولفه‌ها، نتایج قابل توجهی در ارتباط با سوالات پژوهش به دست آمد. در واقع در مراحل مختلف، انرژی مصرفی برای تامین سامانه سرمایش و گرمایش مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که به طور کلی مناسب‌ترین جزییات اجرایی بام سبز برای شهرستان دزفول نمونه‌ای است که از گونه‌های گیاهی پهن‌برگ با رشد پایین یعنی ارتفاع حداکثر ۰/۱m و LAI=۵، عمق بستر با ضخامت ۰/۱m و خرده لاستیک به عنوان زهکش استفاده شود. همچنین استفاده از عایق حرارتی و لایه هوا نیز منجر به کاهش مجموع انرژی سرمایشی و گرمایشی می‌شود اما به دلیل اینکه در کاهش بهای انرژی مصرفی سالیانه بام سبز همراه با لایه هوا و بام سبز با عایق حرارتی تفاوت چشمگیری وجود ندارد و به لحاظ سازه‌ای نیز اجرای لایه هوا علاوه بر ایجاد تهویه و جلوگیری از گندیدگی ریشه گیاهان، به توزیع بار ناشی از بام سبز بروی بام ساختمان کمک می‌کند، لذا بام سبز همراه با لایه هوا انتخاب مناسب‌تری می‌باشد. شایان ذکر است که نحوه اجرای لایه هوا بر بام ساختمان به این صورت است که بعد از اجرای بام و یک لایه شن با ضخامت کم بروی آن، پالت های پلاستیکی بازیافت شده (مواد اولیه HDPE، ابعاد ۱در ۱/۲۰) در کنار یکدیگر نصب می‌شوند و پس از محکم شدن به یکدیگر به منظور ساخت بام گسترده، لایه‌های بام سبز بر روی پالت‌ها اجرا می‌شود و یا در سامانه ار جعبه‌های گیاه روی آن‌ها قرار می‌گیرند. با توجه به موارد مذکور تصویر۲ در کاهش انرژی مصرفی سرمایشی و گرمایشی سالانه بازدهی بیشتری دارد و می‌تواند به عنوان جزییات اجرایی پیشنهادی بام سبز برای ساختمان‌های شهرستان دزفول بکار گرفته شود.



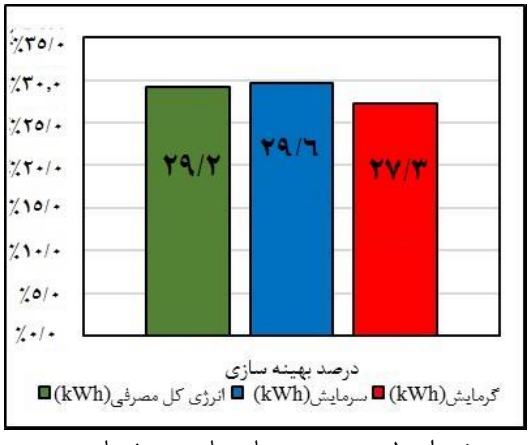
تصویر ۲– جزییات اجرایی بام سبز پیشنهادی سازگار با اقلیم شهرستان دزفول

۸-۱ تحلیل و بررسی میزان مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی سالانه در دو حالت بهینه (ساختمان دارای بام سبز پیشنهادی) و حالت پایه (ساختمان بدون بام سبز)

با بکارگیری جزییات اجرایی بام سبز پیشنهادی (تصویر۲) به شبیه‌سازی حرارتی ساختمان دارای بام سبز در قیاس با ساختمان با بام متداول پرداخته شده است که نتایج به قرار زیر است: به لحاظ مصرف انرژی سامانه سرمایش در دو حالت پایه و بهینه مشاهده می‌شود که ساختمان دارای بام سبز بهینه، انرژی مصرفی را به میزان ۹۲۰۰/۳۶ kWh کاهش می‌دهد و می‌تواند منجر به صرفه‌جویی۲۹/۶ درصد انرژی سرمایشی در فصول گرم سال شود. همچنین بیانگر کاهش۱۹۰۷/۳۷ kWh مصرف انرژی گرمایشی در حالت بهینه می‌باشد و این کاهش موجب صرفه‌جویی۲۷/۳ درصد انرژی گرمایشی در فصول سرد سال می‌گردد. از سوی دیگر با بررسی نتایج مربوط به انرژی کل مصرفی سالانه در نمودار۹ و محاسبه هزینه‌های مصرفی سالانه در جدول۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که ساختمان دارای بام سبز بهینه، میزان کل انرژی مصرفی را در ساختمان شبیه‌سازی شده ۱۱۱۰۷/۷kWh کاهش می‌دهند که در هر متر مربع معادل ۸/۴۲ kWh می‌باشد و می‌تواند۲۹/۲ درصد از کل انرژی سامانه‌ی سرمایش و گرمایش سالانه را صرفه‌جویی کند؛ بنابراین هزینه‌های ناشی از مصرف انرژی در یک سال معادل ۱۲۹۱/۰۳۷ دلار کاهش



نمودار ۹–انرژی مصرفی سالانه در دو حالت پایه و بام سبز بهینه



نمودار ۱۰– درصد بهینه سازی بام سبز پیشنهادی

می‌یابد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که بیشترین صرفه‌جویی هزینه در بخش سرمایش و معادل ۱۲۱۹/۹۶۸ دلار می‌باشد.

جدول ۱۱– هزینه‌های انرژی مصرفی بام‌های متداول و بام سبز بهینه در یک سال

	انرژی کل مصرفی (kWh)	کاهش کل انرژی مصرفی (kWh)	بهای انرژی کل مصرفی (دلار)	کاهش بهای کل انرژی (دلار)	بهای انرژی مصرفی سرمایش(دلار)	بهای انرژی مصرفی گرمایش(دلار)
بام معمولی	۳۸۰۵۶/ ۸	۱۱۱۰۷/ ۷	۴۳۷۹/ ۲۷۵	۱۲۹۱/ ۰۳۷	۴۱۱۸/ ۵۷۵	۲۶۰/ ۷۰۰
بام سبز بهینه	۲۶۹۴۹/ ۰۷		۳۰۸۸/ ۲۳۸		۲۸۹۸/ ۶۰۸	۱۸۹/ ۶۳۰

۸-۲ هزینه اقتصادی بام سبز

نتایج دوره بازگشت سرمایه در جدول ۱۲ آمده است. اگرچه مقدار محاسبه شده تا حدودی بزرگ است ولی واقعیت این است که این مطالعه فقط کاهش هزینه‌های مصرف انرژی(سرمایش و گرمایش) را در نظر می‌گیرد و هزینه‌های ناشی از آلودگی‌های آب و هوا و جزایر گرمایی، مدیریت آب، آسیب‌های فردی و اجتماعی و هزینه‌های ناشی از عایقکاری، تعمیر و نگهداری لحاظ نشده است. هنگامی که تمامی مزایای نصب بام سبز مورد توجه قرار گیرد، ارزش دوره بازگشت سرمایه کاهش می‌یابد و صرفه اقتصادی بیشتر خواهد شد.

جدول ۱۲- بازگشت سرمایه در ساختمان با بام سبزپیشنهادی

کاهش کل انرژی مصرفی (kWh)	کاهش بهای کل انرژی (دلار)	هزینه کل اجرا و نصب بام سبز (دلار)	دوره بازگشت سرمایه (سال)
۱۱۱۰۷/ ۷	۱۲۹۱/ ۰۳۷	۲۱۹۸۰/۸۳	۱۷

۹- نتیجه تحقیق

نتایج مستقیمی که از بررسی این مقاله در راستای پاسخگویی به پرسش تحقیق بدست آمده نشان می‌دهد که:

الف. در بررسی مشخصه مساحت برگ گیاهان،کاهش انرژی در بام سبز دارای گیاهانی با برگ‌های پهن و سطح پوششی بالا، بیشتر است و میزان مصرف انرژی را در کل ساختمان شبیه سازی شده kWh ۴۶۴۴/۶ کاهش می‌دهند که برای هر مترمربع معادل kWh ۳/۵۲ ارزیابی شده است. همچنین گیاهان پهن‌برگ تاثیر چشمگیری در صرفه‌جویی هزینه‌های انرژی دارد که این مقدار معادل۸۲۷/۵۰ دلار در یک سال می‌باشد. لذا گیاهان پهن‌برگ نسبت به گیاهان سوزنی ارجحیت دارند و به عنوان بهینه‌ترین حالت انتخاب می‌شوند.

ب. در بررسی ارتفاع گیاهان بر میزان مصرف انرژی سامانه‌ی سرمایش و گرمایش نتایج نشان می‌دهد که گیاهان کوتاه قد با رشد پایین نسبت به گیاهان با رشد بالا از اهمیت بیشتری برخوردارانـد و و میزان مصرف انرژی را در کل ساختمان شبیه سازی شده kWh ۲۱۶۳/۷۶کاهش می‌دهند که برای هر مترمربع معادل ۱/۶۴kWh می‌باشد؛ بنابراین بهینه‌ترین حالت انتخاب گیاهان در شهرستان دزفول، ارتفاع ۱۰سانتی‌متری گیاه از سطح خاک می‌باشد و هزینه‌های کل انرژی مصرفی در یک سال را معادل ۲۱۷ /۲۳۲ دلار کاهش می‌دهند.

ج. در بررسی ضخامت عمق لایه کشت مشخص شد که کاهش کل انرژی مصرفی و بهای آن در هر ضخامتی از محیط کشت دیده می‌شود اما در ضخامت‌های پایین‌تر این کاهش بیشتر است که به طور متوسط در هر مترمربع معادل ۱/۱۷kWhمی‌باشد. بنابراین عمق خاک با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر به عنوان صحیح‌ترین انتخاب تعیین می‌گردد و موجب صرفه‌جویی مبلغ ۳۸۳/۲۹۵ دلار نسبت به بیشترین ضخامت (۳۰سانتی‌متر) در کل ساختمان می‌شود.

د. نتایج دیگر تحقیق برای تعیین جزییات اجرایی بام سبز بهینه شهر دزفول حاکی از آن است که لایه هوا و عایق حرارتی نیز در پیشبرد اهداف مورد نظر موثر خواهند بود اما میزان تاثیر این دو مورد نسبت به موارد قبلی ذکر شده کمتر است.

ه. نتایج شبیه‌سازی جنس لایه زهکش نشان داد این آیتم تاثیر زیادی بر مصرف انرژی و هزینه کل انرژی مصرفی سالیانه نداشته است بنابراین می‌توان از این فاکتور چشم پوشی کرد.

در مجموع می‌توان عنوان کرد که بکارگیری روش‌های فوق میزان کل انرژی مصرفی را در ساختمان شبیه‌سازی شده kWh/m^2 ۸/۴۲ کاهش می‌دهند و می‌تواند۲۹/۲ درصد از کل انرژی سامانه‌ی سرمایش و گرمایش سالانه را صرفه‌جویی کنند که به تبع آن هزینه‌های ناشی از مصرف انرژی در یک سال معادل ۰۳۷ /۱۲۹۱ دلار کاهش می‌یابد. همچنین مطابق یافته‌های پژوهش و سنجش پارامترهای ارتفاع گیاهان و عمق لایه خاک، بام سبز با سامانه‌ی گسترده به عنوان سامانه‌ی انتخابی مطلوب بام سبز بومی تعیین می‌گردد که از ویژگی‌های سامانه گسترده، عمق و وزن کمتر محیط کاشت گیاهان و تنوع پوشش گیاهی کمتر می‌باشد. بنابراین لازم است گیاهانی مانند ساکولنت‌ها(گیاهان گوشتی) و سدوم‌های پوششی مانند گل بشقابی یا آئونیوم، گل ناز، آشوریا و..که از گیاهان بومی منطقه بشمار می‌آیند، بکارگرفته شوند؛ همچنین می‌توان از خزه‌ها، گیاهان علفی و چمن‌ها، سبزیجات و گیاهان دارویی بهره برد اما از

گونه‌های درختچه‌ای تنها در مواقع ضروری (سایبان، باد شکن، زینتی و...) استفاده شود.

۱۰- تشکر

در این جا لازم است از تمامی اساتید بزرگوار دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول قدردانی به عمل آید.

۱۱- پی نوشت‌ها

1. Design Builder
2. Plenum
3. EnergyPlus
4. Iranian Typical Meteorological Year
5. ASHRAE
6. Leaf area index (LAI)
7. Sailor
8. Frankenstein and Koenig

۹. جهت انجام مطالعات بیشتر و بررسی ابعاد مختلف بام سبز استفاده از روش‌های تجربی (ساخت بام سبز در مقیاس کوچک) مفید خواهد بود.

۱۲- منابع فارسی و منابع لاتین

- اقبالی، سید رحمان ؛صادقی، نگار؛ رزاق رستمی، مهناز (۱۳۹۹). ارزیابی حرارتی بام‌های سبز گسترده در قیاس با سایر بام‌های مسطح در ساختمان های مسکونی (با لایه ی فوقانی نقره ای و سفید). اندیشه معماری. دوره ۴، شماره ۸، صفحه ۲۳۷-۲۵۱.

https://at.journals.ikiu.ac.ir/article_2091.html

- برزگر گنجی، هدی(۱۳۹۱). بررسی گونه‌های مختلف دیوار سبز و اثر بخشی آن‌ها در کاهش میزان مصرف انرژی در ایران. تهران. دانشگاه تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد معماری انرژی.
- ترازنامهٔ انرژی ایران (۱۳۹۲)، تهران، معاونت امور برق و انرژی وزارت نیرو.

https://www.tavanir.org.ir

- محمودی زرندی، مهناز، پاکاری، ندا (۱۳۹۱). طراحی جزییات مناسب بام سبز برای کاهش مصرف انرژی ساختمان. آرمانشهر. شماره۱۱. صفحه ۱۴۱-۱۵۱.

http://www.armanshahrjournal.com/article_33471.html

- Banting D, Doshi H, Li J, Missios P (2005). Report on the environmental benefits and costs of green roof technology for the city of Toronto. City of Toronto and Ontario Centres for Excellence Earth and Environmental Technologies, Toronto. https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.165.9334&rep=rep1&type=pdf
- Berardi, U (2011). Sustainability assessment in the construction sector: rating systems and rated buildings. *Sustainable development*; 20(6): 411–24. https://doi.org/10.1002/sd.532
- Bevilacqua P, Coma J, Pérez G, Chocarro C, Juárez A, Solé C, Simone M, Cabeza L. F (2015). Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs. *Building and Environment*, 92, 305–316. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.026
- Bradley Rowe, D (2010). Green Roofs as a Means of Pollution Abatement. Journal of *Environmental Pollution*, 159: 2100-2110. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.029
- Castleton H.F, Stovin V, Beck S.B.M, Davison J.B (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy Build*, 42: 1582-1591. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004

_PRI_SUM_DCU_NUS_M.htm (accessed June 28, 2019)
- EnergyPlus documentation (2018). US. Department of Energy, 26-27. https://energyplus.net/documentation
- Frankenstein S, Koenig G (2004). FASST vegetation models. Technical Report TR-04- Hanover, NH: US Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory. https://www.semanticscholar.org/paper/FASST-vegetation-models-Frankenstein-Koenig/cb14732253576ff7baf1da7a4ecd47d4c5564a74
- Jaffal I, Ouldboukhitine S.E, Belarbi R (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renew Energy*, 43: 157-164. https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.004
- Jim C.Y, Tsang S.W (2011). Modeling the heat diffusion process in the abiotic layersof green roofs, *Energy and Buildings*, 43 (6): 1341–1350. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.01.012
- Kokogiannakis G, Darkwa J, Yuan K (2013). A combined experimental and simulation method for appraising the energy performance of green roofs in Ningbo's Chinese climate. *Building Simulation*, 7(1), 13–20. https://doi.org/10.1007/s12273-013-0149-0
- Kumar R, Kaushik R.S (2005). Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. Build. Environ, 40: 1505-1511. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.11.015
- Cascone S, Gagliano A, Poli T, Sciuto G (2018). Thermal performance assessment of extensive green roofs investigating realistic vegetation-substrate configurations. *Building Simulation*. https://doi.org/10.1007/s12273-018-0488-y
- Coma J, de Gracia A., Chàfer M, Pérez G, & Cabeza L. F (2017). Thermal characterization of different substrates under dried conditions for extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 144: 175–180. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.031
- Dahanayake K. C, Chow C. L (2017). Comparing reduction of building cooling load through green roofs and green walls by EnergyPlus simulations. *Building Simulation*, 11(3): 421–434. https://doi.org/10.1007/s12273-017-0415-7
- Del Barrio EP (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy Build*. 27: 179-193. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00029-7
- Dvorak B, Volder A (2010). Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review. Landscape and Urban Planning, 96: 197-213. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.04.009
- Energy Information Administration (EIA). U.S. Electric Power Monthly 2019. https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_5_6_a (accessed June 25, 2019).
- Energy Information Administration (EIA). U.S. Natural Gas Prices 2019. https://www.eia.gov/dnav/ng/NG

- La Roche P, Berardi U (2014). Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and Buildings*, 82: 492–504. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.055
- Lazzarin R.M, Castellotti F, Busato F (2005). Experimental measurements and numerical modeling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37: 1260–1267. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.02.001
- Niachou A, Papakonstantinou K, Santamouris M, Tsangrassoulis A, Mihalakakou G (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy Build*, 33: 719-729. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00062-7
- Refahi A.H, Talkhabi H (2015). Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs. *Renewable Energy*, 80: 595-603. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.030
- Sailor D.J (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy Build*, (40): 1466-1478. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001
- Santamouris M, Pavlou C, Doukas P, Mihalakakou G, Synnefa A, Hatzibiros A, et al (2007). Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. *Energy*, 32: 1781–1788. https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.11.011
- Silva CM, Gomes MG, Silva M (2016). Green roofs energy performance in Mediterranean climate. Energy and Buildings, 116: 318–325. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.012
- Silva C. M, Flores-Colen I, Coelho A (2015). Green roofs in Mediterranean areas – Survey and maintenance planning. *Building and Environment*, 94, 131–143. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.029
- Theodosiou TG (2003). Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy Build*, 35: 909-917. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00023-9
- Vila A, Perez G, Sole C, Fernández, A. I, Cabeza L. F (2012). Use of rubber crumbs as drainage layer in experimental green roofs. *Building and Environment*, 48, 101–106. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.010
- Villi G, Pasut W, Carli M. D (2009). CFD modelling and thermal performance analysis of a wooden ventilated roof structure. *Building Simulation*, 2(3): 215–228. https://doi.org/10.1007/s12273-009-9414-7
- Wong NH, Chen Y, Ong C, Sia A (2003). Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Build Environ*, 38: 261-270. https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00066-5
- Wong NH, Cheong DKW, Yan H, Soh J, Ong CL, Sia A (2003).The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy Build*, 35:

thermal performance of green roofs during the summer. *Building and Environment*, 78: 199-211. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.02.011

353-364. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00108-1

- Zhao M, Cesar Tabares-Velasco P, Srebric J, Komarneni S, Berghage R (2014). Effects of plant and substrate selection on

۱۳- چکیده تصویری