طراحی جزئیات مناسب بام سبز برای کاهش مصرف انرژی ساختمان*

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۲۰
تاریخ پذیرش نهایی: ۹۱/۱/۱۴

مهناز محمودی زرندی - ندا پاکاری*****

چکیده

بام سبز بامی است که با محیط کشت رونده پوشانده می‌شود. محدود بودن منابع انرژی و به موازات آن روند رو به رشد مصرف انرژی و اثرات نامطلوب و خسارت‌های جبران‌ناپذیر آن بر محیط طبیعی از دغدغه‌های شهرهاست و یکی از راهکارهایی که برای کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها پیشنهاد می‌شود احداث باغ بام است. باغ بام یا بام سبز چنانچه صحیح طراحی و اجرا شود و در آن ملاحظات اقلیمی در نظر گرفته شود می‌تواند تا حد زیادی به کاهش مصرف انرژی کمک کند. ایجاد سبزینگی در فضای پشت‌بام از طریق ممانعت از تابش اشعه‌های خورشیدی و تبخیر سطحی و تعرق در خنک‌سازی آب و هوای شهر و منطقه و هوای داخل ساختمان که بر روی آن قرارگرفته‌اند تأثیر مثبت دارند. این خنک‌سازی با کاهش نوسانات گرمایی بر روی سطح خارجی بام و افزایش ظرفیت گرمایی بام صورت می‌گیرد که فضای زیر بام را در تابستان خنک نگه داشته و میزان گرمایش را در طی زمستان افزایش می‌دهد. در این تحقیق بعد از شناخت بام سبز، با این فرضیه که "می‌توان با طراحی یک دیتیل و افزودن یک لایه به دیتیل بام سبز کارکرد حرارتی آن را افزایش داد" به آنالیز انتقال حرارتی اجزای تشکیل‌دهنده بام سبز پرداخته شده است. سپس جهت ارزیابی کاهش انتقال حرارت، دیتیل بهینه بام سبز جهت کاهش انتقال حرارت با بام‌های سبز متداول مقایسه شد و مشاهده گردید دیتیل تعریف‌شده در کاهش انتقال حرارت اثر بسیار مطلوب تری دارد و می‌تواند برای ساختمان‌های با مصرف انرژی صفر بکار گرفته شود. در تحقیق انجام‌شده روش تحقیق در بخش‌های مربوط به مزایا و استاندارد و عملکرد حرارتی بام سبز توصیفی با رویکرد کیفی است و اما در بخش‌های مرتبط با ارزیابی دیتیل بهینه رویکرد کمی و روش تحلیلی بوده و از نرم‌افزار انسیس استفاده شده است.

واژگان کلیدی: بام سبز، انتقال حرارت، کاهش مصرف انرژی، نرم‌افزار انسیس، دیتیل.

* این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی با عنوان "دستیابی به دیتیل بهینه بام سبز با هدف کاهش مصرف انرژی ساختمان" در مرکز تحقیقات بتن و ساختمان دانشگاه آزاد اسلامی قزوین است.

** استادیار معماری، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران.
*** کارشناسی ارشد معماری، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران (نویسنده مسئول).
Email: Nedapakari@yahoo.com

مقدمه

بام سبز بامی است که مقدار یا تمامی آن با پوشش گیاهی و محیط کشت رویِنده پوشانده شده و لذا جزییات اجرایی آن می‌بایست با بام‌های معمول تفاوت داشته باشد. بام‌های سبز نیازمند عناصری هستند که بتوانند عمل نگهداری، زهکشی رطوبت و نگهداری گیاهان را مطابق استانداردهای ساختمان فراهم آورند.
این بام‌ها با تبادل هوا بین مناطق با تراکم ساختمانی زیاد، جریان‌های هوا را بهبود بخشیده و رطوبت هوای شهر را تعدیل می‌کنند. از سایر مزایای این بام‌ها می‌توان به کاهش بار گرمایش و سرمایش، تصفیه هوا، حفاظت از فاضلاب، کاهش آلودگی صوتی و از همه مهم‌تر کاهش مصرف انرژی نام برد.
بام سبز در برگیرنده سه لایه اصلی پوشش گیاهی، محیط کشت و لایه زهکشی است که نوع مصالح مصرفی و ترکیب لایه‌ها و همچنین نحوه اجرای آن تأثیرات متفاوتی بر عملکرد حرارتی آن دارد. این نوشتار با تأکید بر نقش کارکرد حرارتی بام سبز، به استانداردهای اجرایی و شرح لایه‌ها و مصالح بام سبز پرداخته و با معرفی جزییات اجرایی مناسب برای کاهش انتقال انرژی در بام، به مقایسه جزییات اجرایی پیشنهادی با جزییات بام‌های سبز متداول می‌پردازد.

۱. اهمیت و ضرورت تحقیق

بام سبز به دلیل بهبود شرایط اجتماعی و اقتصادی و زیست‌محیطی، در برنامه‌ریزی بیشتر شهرهای پیشرفته جهان قرار گرفته است و این در حالی است که حتی در مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان و مسکن در خصوص مصرف انرژی به آن هیچ اشاره‌ای نشده است. در ساختمان‌ها معمولاً اتلاف حرارت از طریق بام زیاد است و مصرف انرژی واحدهای طبقه آخر افزایش می‌یابد لذا بام سبز راه‌حلی برای این معضل است. بام سبز با افزایش لایه‌های بام، مانند یک عایق حرارتی عمل می‌کند و تبادل گرما بین فضای داخل و بیرون ساختمان را کنترل می‌کند به همین دلیل استفاده از آن ضروری به نظر می‌رسد.

۲. پیشینه و روش تحقیق

طیف وسیعی از تحقیقات پیرامون این موضوع در کشورهای مختلف انجام شده است. در زمینه عملکرد حرارتی آن نیز مطالعاتی انجام گرفته است به عنوان مثال، گاپلی عملکرد گرمایی و تأثیر پوشش‌های گیاهی با میانگین ضریب جذب متفاوت برای اشعه‌های خورشیدی را تحلیل نموده[۱] و یا پالومو به ساده‌سازی الگوهای اجزا بام سبز از طریق ترسیم آماری و تکنیک‌های الگوی کاهش انرژی ساختمان پرداخته است.[۲]
این تحقیق با این پیش‌فرض که "می‌توان دیتیلی طراحی نمود تا نسبت به دیتیل‌های اجرایی موجود بام سبز نقش موثرتری در کاهش انتقال حرارت داشته باشد." آغاز شد لذا روش تحقیق نیز به دو صورت توصیفی و تحلیلی انجام پذیرفت. در بخش‌هایی که به شناخت استانداردهای موجود و نمونه‌های طراحی‌شده بام‌های سبز پرداخته‌شده روش توصیفی و در بخشی که دیتیلی بر مبنای مطالعات صورت گرفته پیشنهادشده و با تحلیل‌های نرم‌افزاری و تجربی مورد سنجش قرارگرفته روش تحلیلی بوده است.

۳. استانداردهای اجرایی بام سبز

در ساختمان‌های دارای بام سبز توجه به استانداردهای تعریف‌شده در طراحی، انتخاب مصالح و اجرای بام سبز ضروری بوده و در بازدهی بیشتر آن تأثیر مثبتی می‌گذارند. گزیده‌ای از استانداردها در اجرای بام سبز که برخی از آن‌ها برگرفته از استانداردهای " لید"[۳] بوده و برخی ضوابطی برگرفته از نتایج تحقیقات دیگران است در ادامه آمده است:

- از گیاهان بومی یا سازگار با منطقه استفاده شود و پوشش‌های گیاهی انتخاب شود که در بادهای شدید نیز استوار و بی‌حرکت باقی بماند و در مقابل خشکسالی مقاومت داشته باشد. (cited from: Specialized Information of Green Roof)
- از مصالح و تولیداتی که در منطقه تولید می‌شود، به دلیل پشتیبانی از منابع منطقه‌ای استفاده شود و یا مصالح بازیافتی ساختمان برای اجرای بام سبز به کار رود. همچنین می‌تواند از مصالح تجدید شدنی و با خطر آتش‌سوزی حداقل و با آلودگی کم باشد (Hake, 2007, pp. 100-112).
- غشاء ضدآب قبل از اجرای بام سبز مورد آزمایش قرار گیرد. (Ibid)
- آب‌های سطحی قبل از اینکه جریان یابند توسط سیستم زهکشی جمع‌آوری شود (Ibid, 109) و آب‌های جمع‌آوری شده توسط بام سبز می‌تواند دوباره برای مصارفی مانند سرویس‌های بهداشتی، سرمایش و گرمایش استفاده شود. (Ibid, 124)
- استفاده از مواد شیمیایی مانند کودها و آفت‌کش‌ها روی بام سبز به حداقل برسد یا حذف گردد. (Ibid, 125)

۴. کاهش انتقال حرارت از طریق ذخیره انرژی ساختمان

بام‌های سبز میزان مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش را کاهش می‌دهند. از کل تابش خورشیدی که توسط بام سبز دریافت می‌شود ۲۷% انعکاس می‌یابد و ۶۰% توسط گیاه جذب می‌گردد و ۱۳% به داخل خاک نفوذ پیدا می‌کند (RyersonUniversity, 2005, p.8). مطالعات انجام‌شده در مرکز تحقیقات ملی کانادا نشان داده که بام سبز می‌تواند جریان گرما را در روی بام ۷۰% تا ۹۰% در تابستان و ۱۰% تا ۳۰% در زمستان کاهش دهد و میزان مصرف انرژی ساختمان را حدوداً ۷۵% پایین آورد (Liu & Bass, 2005). با توجه به اینکه انتقال حرارت همواره از بدنه‌ها و فضاهای با دمای بیشتر به فضاهای با دمای کمتر صورت می‌گیرد لذا انتقال حرارت در بام‌ها در زمستان از داخل به خارج و در تابستان از خارج به داخل است البته میزان این تأثیر متناسب با فصل‌ها و میزان رطوبت متغیر است.

۴-۱- انتقال حرارت در تابستان

لایه‌های بام‌های سبز با کاهش نوسانات گرمایی سطح خارجی بام و از طریق افزایش ظرفیت گرمایی لایه‌های سقف و پوشش‌های گیاهی نیز با سایه‌اندازی، حفظ رطوبت و فتوسنتز به خنک‌سازی فضای زیر بام در طی تابستان کمک می‌کنند. ترکیب واکنش‌های انجام‌شده در خاک و واکنش‌های فتوسنتز و تعریق و تعرق گیاهان باعث کاهش میزان انرژی آفتاب جذب‌شده توسط لایه‌ی بام می‌شود. پژوهش‌ها روی بام سبز اشاره می‌کند که بیش‌ترین فواید خنک‌سازی در تابستان مربوط به تعریق و تعرق بام‌های سبز است.
(Oberndorfer et al., 2007, p. 831)

البته شدت تعرق گیاه به عوامل مختلفی از قبیل نوع برگ یا ساقه، ساختمان ریشه، شدت نور، رطوبت خاک و مانند آن بستگی دارد. به عنوان مثال 'اثر سایه' در پوشش گیاهی می‌تواند تکان دهنده باشد. سایه‌اندازی شاخ و برگ گیاهان بر روی بام مانع افزایش دمای سطح بام می‌شوند.

تحقیقات دانشگاه ناتینگهام درباره دمای فضای زیر بام معمولی و بام سبز در تابستان بیانگر این است که چنانچه میانگین درجه حرارت معادل ۱۸,۴ درجه سانتیگراد باشد، دمای فضای زیر بام‌های معمولی معادل ۳۲ درجه و دمای فضای زیر بام سبز معمولی معادل ۱۷,۱ درجه سانتیگراد است (Enviromental Advantages of Green Roof, 2010, para.7).

۴-۲ - انتقال حرارت در زمستان

بام سبز علاوه بر افزایش ظرفیت گرمایی ساختمان با افزایش لایه‌های بام، از طریق عایق‌سازی ساختمان (پوشش گیاهی و خاک) و کاهش سرعت باد، ساختمان را در برابر آب و هوای سرد عایق می‌کند و مصرف انرژی برای گرمایش را کاهش می‌دهد.

۱- عایق سازی بام

گیاهان پیوسته مقداری هوا لابه‌لای ریشه‌های خود نگه می‌دارند که به صورت یک لایه عایق حرارتی عمل می‌کند. البته کارایی این لایه عایق حرارتی در بام‌های سبز به میزان رطوبتی که در خود نگه می‌دارند وابسته است. هر چه میزان رطوبت بام بیشتر باشد بازده آن کاهش می‌یابد و گرمای بیشتری را از دست می‌دهد. (Enviromental Advantages of Green Roof, 2010, para.8).

۲- کاهش سرعت باد

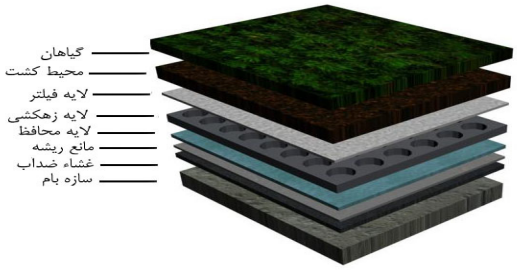
نتایج یک تحقیق در دانشگاه تورنتو نشان می‌دهد که: بام‌های سبز در اقلیم‌های سرد نیز کارکرد لازم در جهت گرم نگه‌داشتن فضاها را دارند. این تحقیق نشان می‌دهد تأثیر بام سبز در کاستن از شدت وزش باد از اثر سایه‌اندازی آن بیشتر است. پوشش گیاهی مانع یخزدگی محیط کاشت در زمستان می‌شود که میزان عایق بودن بام را افزایش می‌دهد. البته در بام‌های سبز متراکم در صورتی که پوشش گیاهی روی سقف‌ها دچار یخزدگی یا پوشیده از برف شوند امتیاز مضاعفی در جهت نگهداری از انرژی در زمستان فراهم می‌کنند. (Brad, 2007, p. 4) تحقیقات دانشگاه ترنت[۴] در پیتربورو[۵] کانادا درباره دمای فضای زیر بام معمولی و بام سبز در زمستان نشان می‌دهد چنانچه میانگین دمای روزانه در یک روز زمستانی ۰ درجه سانتیگراد باشد دمای فضای زیر بام معمولی ۰,۲ درجه سانتیگراد و دمای فضای زیر بام سبز معمولی ۴,۷ درجه سانتیگراد خواهد بود که این نکته بیانگر تأثیر این بام‌ها در کاهش انتقال حرارت است (Enviromental Advantages of Green Roof, 2010, para.10).

۵. لایه‌های تشکیل‌دهنده بام سبز

بام سبز از لایه‌های مختلفی تشکیل شده است که هر یک از آن‌ها دارای عملکردهای خاصی می‌باشند (شکل ۱). این لایه‌ها با مصالح مختلف (جدول ۱) در کنار یکدیگر سیستم یکپارچه بام سبز را تشکیل می‌دهند که عبارت‌اند از:

شکل ۱: اجزای بام سبز

شکل – ۱: اجزای بام سبز



- پوشش گیاهی[۱۳] *
- محیط کشت[۱۲] *
- لایه فیلتر[۱۱] *
- کنترل فرسایش
- محافظ آب
- زهکشی[۱۰] و درز پوش‌ها *
- لایه محافظ[۹] *
- مانع ریشه[۸] *
- غشاء ضد آب[۷] *
- سازه بام

(موارد ستاره‌دار در سیستم بام سبز الزامی است.)

۱-۵- پوشش گیاهی: بسیاری از مزایای بام سبز از وجود گیاهان ریشه می‌گیرد. تقریباً همه انواع گیاهان می‌توانند در روی بام سبز رشد یابند. اما بسیاری از عوامل مانند عمق بستر، میزان تابش خورشیدی، آب و هوا، رطوبت بستر، بقای گونه‌های گیاهی بام‌های سبز را تعیین می‌کنند (Bradley Rowe, 2010, p. 5). همچنین توجه به انتخاب گونه‌های بومی یا سازگار با شرایط منطقه در موفقیت بام سبز مؤثرند؛ اما مهم‌ترین مسئله در بام‌های سبز گسترده دامنه مقاومتی پوشش گیاهی است. گیاهانی مناسب هستند که در برابر شرایط اقلیمی ناملایم و خشکسالی مقاومت کنند و بتوانند برای مدت طولانی آب را در بافت‌های خود ذخیره کنند. سدوم، کراکسولاسیا و خزه‌ها رایج‌ترین جمعیت گیاهی به‌کاررفته در بام‌های سبز گسترده می‌باشند.

۲-۵- محیط کشت: محیط کشت درعین‌حال که خواص فیزیکی و شیمیایی برای رشد گیاه فراهم می‌کند، باید به مقدار کافی مواد مغذی و ظرفیت نگهداری آب برای حمایت از گیاهان بام سبز را داشته باشد. ترکیب بستر رشد با توجه به گونه‌های گیاهی در نظر گرفته می‌شود و بر حسب شرایط آب و هوای منطقه می‌تواند متفاوت باشد. اصولاً بستر دارای ۸۰% مواد معدنی سبک و ۲۰% مواد آلی و حدوداً ۳۰% ظرفیت نگهداری آب می‌باشد. استفاده از سنگ پامیس در ترکیب بستر نیز در جذب دی‌اکسیدکربن مؤثر می‌باشد. همچنین محیط کشت به واسطه الزامات خاص سازه‌ای سبک باشد. لیکا، پرلیت، پشم سنگ علاوه بر سبک بودن، عایق حرارتی و عایق صوت بوده و جاذب و بازدارنده از نفوذ رطوبت می‌باشند.

۳-۵- لایه فیلتر: برای ممانعت از ورود املاح و مواد محیط‌کشت به لایه زهکشی از یک لایه روکش الیافی استفاده می‌شود. این لایه با حفظ رطوبت برای محیط‌کشت، جریان آب عبور کرده از آن را تصفیه می‌کند بنابراین در بهبود کیفیت آب خروجی از بام و حفظ آب نقش مهمی دارد. همچنین لایه فیلتر می‌تواند مانع نفوذ ریشه شود. لایه فیلتر معمولاً از الیاف پارچه‌ای ژئوتکستایل است و حتی می‌تواند از شن و ماسه نیز باشد که در این حالت با لایه زهکشی از مصالح دانه‌ای ترکیب می‌شود.

۴-۵- لایه زهکشی: لایه زهکشی بین محیط کشت و لایه محافظ قرار می‌گیرد تا بتواند آب اضافی جذب‌شده در سیستم را از طریق مجاری خود به شبکه فاضلاب ساختمان انتقال دهد. این لایه معمولاً مقدار زیادی از آب باران را در خود نگه می‌دارند که در زمان خشکی، آب مورد نیاز گیاه را تأمین کند و نیز موجب کاهش فشار تحمیلی بر سیستم فاضلاب می‌شود؛ بنابراین این لایه برای کاهش بار سیستم‌های مجاری فاضلاب و بهبود کیفیت آب خروجی از بام سبز به کار می‌رود. ساده‌ترین مواد طبیعی زهکشی سنگریزه‌ها هستند. علاوه بر آن به خرده‌های آجر گدازه‌های آتشفشانی (لاوا) و ماده مصنوعی خاک رس منبسط‌شده (لیکا) می‌توان اشاره نمود که متخلخل هستند و قابلیت نگهداری آب و مواد مغذی بیشتری را دارند. پشم سنگ نیز می‌تواند به عنوان زهکش استفاده شود زیرا میزان زیادی آب را در خود

نگه می‌دارد و در دوره زمانی طولانی‌تری برای گیاه آزاد می‌سازد. (cited from Soflaei & Rahimi, 2006) البته امروزه ورق‌های زهکشی به صورت شبکه‌ای به شکل فنجان از جنس ترکیبات پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن نسبت به مصالح دیگر بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۵-۵- لایه محافظ: این لایه از غشاء و عایق بام در برابر نفوذ ریشه گیاهان حفاظت می‌کند. در این لایه به طور معمول از مواد مقاوم در برابر رطوبت استفاده می‌شود. لایه محافظ می‌تواند یک لایه نازک بتن سبک‌وزن، ورقه عایق ضخیم یا ورقه پلاستیکی ضخیم یا ورق نازک مسی یا ترکیبی از آن‌ها باشد. بعضی از سیستم‌های بام سبز به لایه محافظ نیازی ندارند (Wark & Wark, 2003). البته در برخی از موارد لایه مانع ریشه یا ضد آب خود دارای مواد محافظ می‌باشد.

۶-۵- مانع ریشه: لایه‌ای است که از نفوذ ریشه‌ها و آسیب زدن به عایق و غشاء سقف جلوگیری می‌کند. این لایه در مکان‌هایی با ترافیک عبوری زیاد و سیستم‌های متمرکز که گیاهانی با ریشه‌های عمیق دارند و مخصوصاً در مناطق خشک که گیاهان ریشه‌های تهاجمی دارند، استفاده می‌شود (Tolderlund, 2010). مصالحی مانند پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE)[۶]، ورق هیدروکسید مس، بتن غیرقابل نفوذ، پلی وینیل کلراید (PVC)[۷]، الفین ترموپلاستیک (TPO)[۸]، می‌توانند به عنوان مانع ریشه استفاده شوند.

۷-۵- غشاء ضدآب: غشاء ضدآب از نفوذ آب به ساختمان جلوگیری می‌نماید. برای لایه ضدآب بهتر است از مصالحی استفاده گردد که در برابر فشارهای هیدرواستاتیکی مقاومت و دوام بیشتری داشته باشد. غشاء ضدآب می‌تواند از مصالحی مانند قیر اصلاح‌شده، آسفالت، ترموپلاستیک از غشاهای پلی وینیل کلراید (PVC)، الفین ترموپلاستیک (TPO)، غشاء الاستومری (اتیلن پروپیلن)، غشاء (EPDM)[۹] باشد.

جدول ۱: مصالح لایه‌های بام سبز

لایه‌های بام سبز		مصالح
پوشش گیاهی	بام سبز گسترده	سدوم‌ها، خزه‌ها، گیاهان علفی، چمن‌ها
	بام سبز نیمه گسترده	گیاهان علفی، چمن‌ها، بوته‌ها، درختچه‌ها
	بام سبز متراکم	گیاهان علفی، چمن‌ها، بوته‌ها، درختچه‌ها، درختان
محیط کشت	موادآلی	کودهای گیاهی
	مواد معدنی	شن و ماسه، لیکا، پرلیت، پشم سنگ، سنگ پامیس
لایه فیلتر		بافت پارچه‌ای ژئوتکستایل، شن و ماسه
لایه زهکشی		مصالح دانه‌ای، لیکا، پشم سنگ، لاوا، مواد فوم، ورق‌های فنجانی شکل از ترکیبات پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن
لایه محافظ		بتن سبک، ورق پلاستیکی، ورق مسی، پلی استایرن، بافت ژئوتکستایل
مانع ریشه		ورق هیدروکسید مس، پلی وینیل کلراید (PVC)، الفین ترموپلاستیک (TPO)، پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE)، بتن غیر قابل نفوذ، بافت پارچه‌ای ژئوتکستایل (برای گیاهان با ریشه‌های الیافی)
غشاء ضدآب		پلی وینیل کلراید (PVC)، الفین ترموپلاستیک (TPO)، غشاء الاستومری (اتیلن پروپیلن)، غشاء (EPDM)، عناصر پلیمری اصلاح شده قیری

در بام‌های سبز عمده‌ترین نقش حرارتی بر عهده لایه پوشش گیاهی و محیط کشت است و دیگر لایه‌ها فقط بسته به نوع مصالح مصرفی و میزان عایق بودن آن‌ها در این امر تأثیرگذار هستند. البته نوع پوشش گیاهی و ضخامت محیط کشت در عملکرد حرارتی بام سبز نقش دارند.

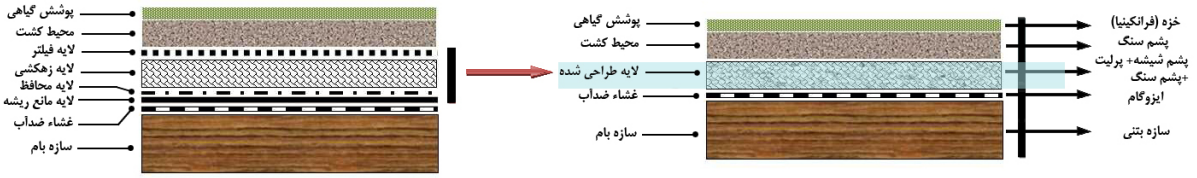
۶. جزئیات اجرایی مناسب بام سبز

در این پژوهش دیتیلی مناسب جهت به حداقل رساندن انتقال حرارت از داخل به خارج ساختمان و بالعکس تعریف شده است. در این دیتیل تعداد لایه‌های بام سبز به سه لایه اصلی پوشش گیاهی، محیط کشت و لایه طراحی‌شده کاهش می‌یابد و در آن از مصالحی که ضریب انتقال حرارت آن‌ها پایین می‌باشد و عایق هستند استفاده می‌شود. از مزایای این جزییات اجرایی می‌توان به عواملی مانند سرعت بالا و سهولت اجرا، کاهش در بار وارد بر سازه ساختمان با کاستن تعداد لایه‌ها، هزینه پایین اجرا و مهم‌تر از این موارد نقش مثبت آن در کاهش انتقال حرارت نام برد. (شکل ۲)

بام سبز طراحی‌شده دارای لایه‌های زیر می‌باشد:

- پوشش گیاهی
- محیط‌کشت
- لایه طراحی‌شده (در برگیرنده لایه زهکشی نیز می‌باشد)
- عایق رطوبتی
- سازه بام

شکل ۲: لایه‌های بام سبز معمولی و بام سبز طراحی شده

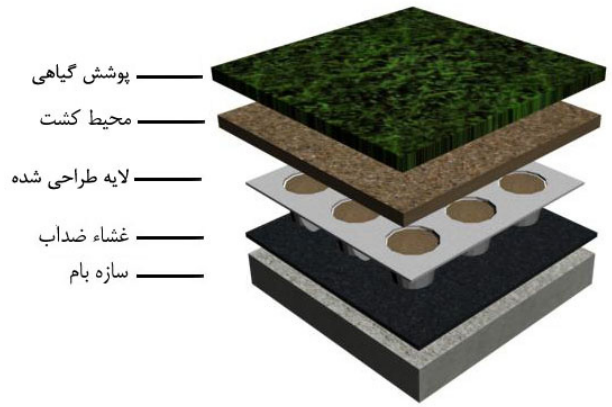


این بام سبز ترکیبی از یک لایه پوشش گیاهی انبوه مانند خزه‌ها به اضافه یک لایه ۵ سانتیمتری محیط کشت در روی لایه طراحی‌شده می‌باشد. در محیط کشت از پشم سنگ استفاده می‌شود. پشم سنگ به دلیل سبک‌وزنی می‌تواند جانشین لایه خاک شود و این امکان را به وجود آورد که گیاهان مستقیماً روی آن رشد کنند. یک بام سبز گسترده کم ارتفاع در حالت اشباع وزنی معادل ۵۰ کیلوگرم بر مترمربع دارد، درحالی‌که استفاده از پشم سنگ به عنوان لایه خاک تنها وزنی معادل ۳۵ کیلوگرم بر مترمربع را ایجاد می‌کند (Soflaei & Rahimi, 2006, p. 59). این ماده تهیه‌شده از سنگ‌های معدنی دارای خاصیت عایق حرارتی و امکان نفوذ ریشه‌های پوشش گیاهی در آن است. پشم سنگ می‌تواند مقدار زیادی آب را در خود نگه دارد و آن را در دوره‌های زمانی طولانی برای گیاه آزاد سازد.

لایه طراحی‌شده دربرگیرنده قالبی به شکل شبکه‌ای از گلدان‌هایی به ارتفاع ۱۰ سانتیمتر است که با فواصل معین در کنار هم قرارگرفته‌اند و محیط مناسبی را برای رشد گیاهان با ریشه‌های عمیق‌تر فراهم می‌کنند و موجب پایداری بیشتر گیاه در مقابل ناملایمات آب و هوایی می‌گردند. جنس قالب از ترکیب پشم‌شیشه، پشم سنگ، پرلیت و رزین می‌باشد. به دلیل استفاده از این مواد در قالب که تقریباً عایق می‌باشند و حضور هوا محبوس مابین فضای خالی بین گلدان‌ها، انتقال حرارت کاهش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد. (شکل ۳)

از طرفی دیگر قالب خود دارای لایه زهکشی است. گلدان‌ها به میزان معینی آب را در درون خود نگه می‌دارند و آب مازاد به دلیل جلوگیری از پوسیدگی و گندیدگی گیاه و عدم رشد باکتری‌ها و جانداران در آن محیط توسط روزنه‌های تعبیه‌شده در ارتفاع میانی گلدان‌ها خارج می‌گردد و توسط ناودانی‌های زیر قالب وارد مسیر اصلی جمع‌آوری آب‌های سطحی می‌شود. عایق رطوبتی بودن قالب احتمال نفوذ آب به لایه‌های زیرین و آسیب رساندن به سازه بام را به حداقل می‌رساند با این حال برای اطمینان از یک لایه عایق رطوبتی بر روی سازه بام استفاده می‌شود.

شکل ۳: لایه‌های بام سبز طراحی شده



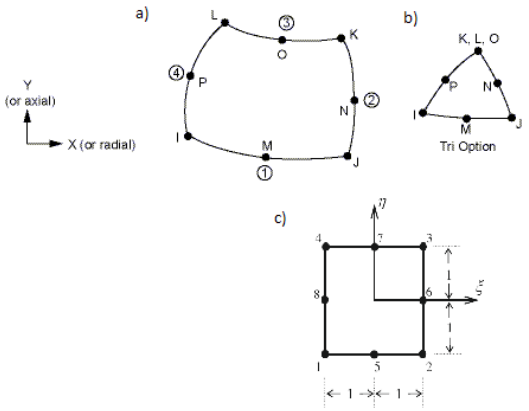
۷. تحلیل رفتار حرارتی دیتیل پیشنهادی

مدل‌سازی عددی از روش‌های متداول و بهینه در حل معادلات مهندسی می‌باشد. روش المان محدود[۱۰] به عنوان یکی از روش‌های تحلیل عددی در مسائل گسترده‌ای در حوزه‌ی رشته‌های مهندسی برای تخمین حل دقیق[۱۱] مسائل بکار می‌رود. این روش در اصل برای حل مسائل پیچیده در تحلیل تنش در جامدات بکار می‌رود ولی امروزه با گسترش این روش، در مسائل بسیاری همچون حل عددی معادلات انتقال حرارت و انواع گوناگون از مسائل مکانیک پیوسته[۱۲] کاربرد وسیعی دارد.

۷-۱- الگوی اجزا محدود

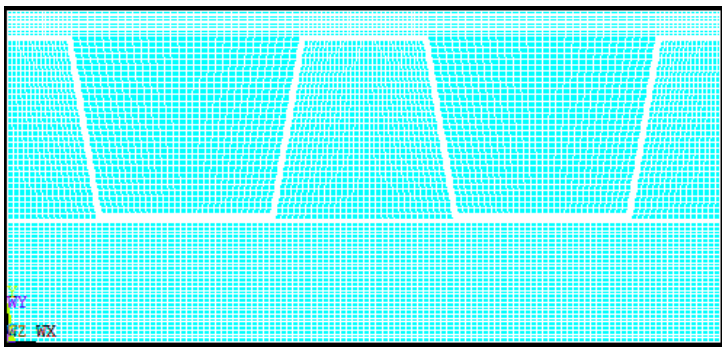
در تحقیق حاضر از نرم‌افزار انسیس[۱۳] برای شبیه‌سازی هندسه بام سبز استفاده شده است. بام سبز با استفاده از المان ۴ ضلعی ۸ گره‌ای[۱۴] و۶ گره‌ای مثلثی[۱۵] بسط داده می‌شود که المان ۶ گره‌ای مثلثی از قرار گرفتن ۳ گره بر روی هم المان ۴ ضلعی حاصل می‌شود (شکل ۴) و شبکه مش ایجادشده با گره‌ها مبنای تحلیل بوده است. (شکل۵)

شکل ۴: المان‌های ۴ و ۶ و ۸ گره ای شبیه سازی



(Jurgen Bathe,1996)

شکل ۵: شبکه مش لایه‌های بام برای تحلیل نرم افزاری



۷-۲- مشخصات مواد

مشخصات مواد بکار رفته در بام سبز مطابق جدول ۲ می‌باشد. بازه تغییرات دمایی در بام سبز محدود می‌باشد. از این رو رفتار مواد به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود و همچنین به دلیل نوع طراحی، هندسه و شبکه‌بندی به‌کاررفته در آن، رفتار به دست آمده به صورت خطی می‌باشد.

جدول ۲: ضریب هدایت حرارتی لایه‌های بام سبز طراحی شده

	عنوان فارسی ماده	عنوان لاتین ماده	ضریب رسانندگی گرمایی Thermal Conductivity - k - W/(m.°C)
۱	پوشش گیاهی	Wood across the grain, white pine	۰,۱۲
۲	خاک	Soil	۰,۲۸
۳	پشم سنگ	Roock wool, dry to moist	۰,۱۵ – ۱,۸
۴	پروپیلن	Polypropylene	۰,۱ – ۰,۲۲
۵	پرلیت خشک پرلیت مرطوب	Sand, dry Sand, moist	۰,۱۵ - ۰,۲۵ ۰,۲۵ -۲
۶	قیر(ایزوگام)	Bitumen	۰,۱۷
۷	بتن	Concrete, stone	۱,۷

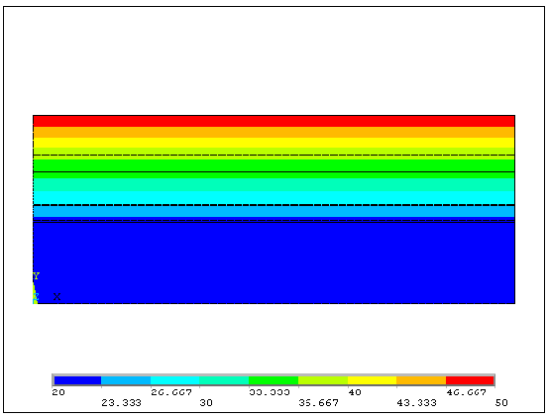
۳-۷- تحلیل انتقال حرارت

محوریت بحث در این تحقیق، تغییرات دما در لایه‌های مختلف بام سبز می‌باشد از این رو لازم است که برای به دست آوردن توزیع دما در ساختار بام سبز، تحلیل انتقال حرارت انجام شود. از توزیع دمای به دست آمده در حوزه زمان (تحلیل دینامیکی) برای اعتبارسنجی مدل با مدل‌های قبلی استفاده می‌گردد. بنابراین تحلیل انتقال حرارت در بحرانی‌ترین شرایط عملکردی (حالتی کمترین و بیش‌ترین دما در بالاترین نقطه بام ایجاد می‌گردد) انجام می‌شود.

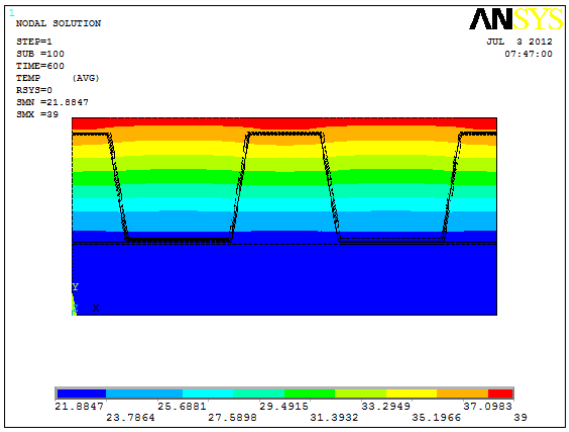
شرایط مرزی حرارتی شامل شرط مرزی جابجایی(همرفتی) از طرف پایین‌ترین نقطه بام و همچنین شارگرمایی در بالاترین نقطه بام است که توسط منبع حرارتی خورشید تولید می‌گردد و دو طرف بام دارای عایق می‌باشد. برای تحلیل حرارتی مدل‌های بررسی‌شده، از شرایط یکسان دمایی استفاده شده است. برای بررسی نفوذ حرارتی در بام مورد نظر، دما بر روی بام در اثر تابش خورشید ۴۷ درجه سانتیگراد و در سطح پایین که نشان‌دهنده‌ی دما در شرایط ایده آل است ۱۷ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. به طور کلی ۳۰ درجه اختلاف دما بین دو سطح وجود دارد و میزان نفوذ حرارتی در هر کدام از لایه‌ها از روی کانتورهای[۱۶] توزیع دمایی بررسی می‌گردند.

برای تحلیل چگونگی تأثیر بام سبز در دمای محیط رفتار حرارتی و انتقال حرارت دو نوع بام سبز معمولی و بام با دیتیل پیشنهادی، با یکدیگر مقایسه تطبیقی شده‌اند. (شکل ۶)

شکل ۶: کانتورهای توزیع دما برای دو بام مورد نظر



(الف) بام سبز معمولی

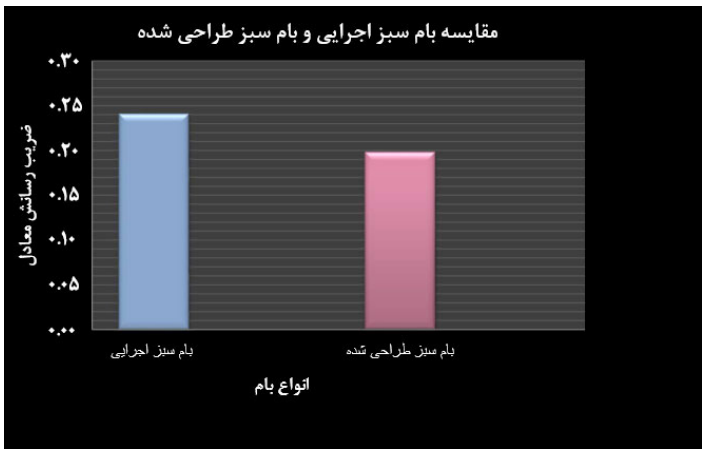


(ب) بام سبز طراحی شده

۸. ارائه نتایج

با توجه به اینکه هدف از این تحقیق کاهش انتقال حرارت بام به وسیله لایه‌های اجرایی بوده است لذا در طراحی از اجزا و لایه‌هایی استفاده گردیده تا ضریب رسانش کمتری داشته باشند. در جزییات اجرایی پیشنهادی به دلیل استفاده از مواد کم‌رسانا همچون پشم‌شیشه و پشم سنگ و رزین میزان انتقال حرارت نسبت به بام سبز معمولی بسیار کمتر است. دو لایه ایزوگام و بتن نیز به دلیل رسانش کمتر انتقال حرارت کمتری دارند البته باید در نظر داشت که ضخامت ایزوگام کمتر از بتن است و بتن نسبت به قیر کاملاً رساناتر می‌باشد.
در تحلیل نرم‌افزاری ضریب رسانش مواد به دلیل شرایط مرطوب نسبت به حالت خشک بالاتر است لذا از ضریب انتقال حرارت معادل استفاده شده است. این کار با استفاده از روش‌های معادل‌سازی ضریب انتقال حرارت معادل به دست آمده و انتقال حرارت با ضریب معادل، برای لایه‌ها در نظر گرفته شده است. مقایسه تطبیقی ضریب رسانش معادل دو نمونه بام سبز در نمودار زیر نشان داده شده است (نمودار ۱).

نمودار ۱: مقایسه ضریب رسانش معادل بام‌ها: (۱) بام سبز اجرایی، (۲) بام سبز طراحی شده



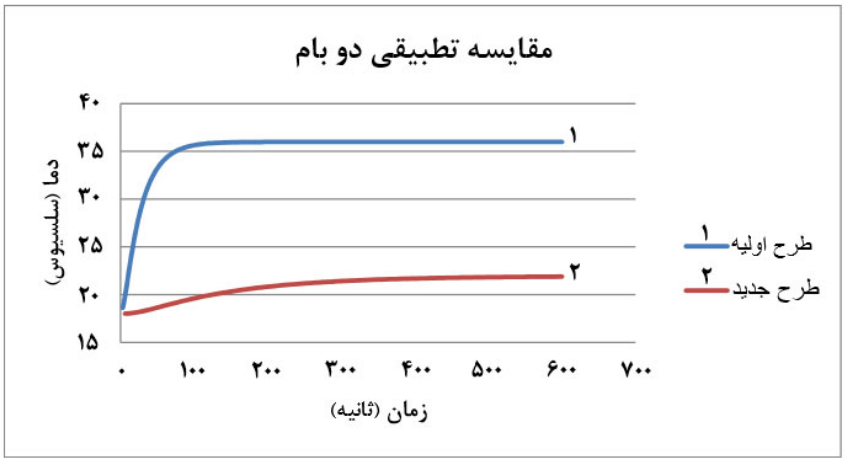
در جدول ۳ میزان انتقال حرارت برای هر کدام از بام‌ها آمده است و مقادیر بهینه‌سازی بام‌ها در کاهش انتقال حرارت به صورت کاملاً مشخص ذکرشده‌اند. با توجه به این نتایج بهینه بودن بام سبز طراحی‌شده نسبت به بام سبز معمولی قابل‌درک است.

جدول ۳: میزان انتقال حرارت بر واحد سطح برای هر کدام از بام‌ها

	بام سبز اجرایی	بام سبز طراحی شده
انتقال حرارت بر واحد سطح $\left[k/m^2\right]$	۳۰,۸۸۸	۱۸,۲۴۸۴
درصد بهینه سازی انتقال حرارت نسبت به بام اجرایی	۸۲,۱	۹۵,۴

نتایج نرم‌افزاری نشان داده است که در بام سبز طراحی‌شده لایه زیرین که با دمای ۱۷ درجه در نظر گرفته شده بود پس از انتقال حرارت از لایه‌های بالایی بام پس از گذشت ۶۰۰ دقیقه به حداکثر به دمای ۲۲ درجه می‌رسد و پس از آن دمای لایه‌ها از این بالاتر نمی‌رود و ثابت می‌ماند. در مورد بام سبز معمولی لایه پایینی پس از ۱۰۰ دقیقه از ۱۷ درجه حداکثر به ۳۶ درجه می‌رسد و ثابت می‌ماند (نمودار ۲).
نتایج تحلیل‌های نرم‌افزاری و تجربی به منظور بررسی عملکرد حرارتی بام‌های سبز، در نمونه ساخته‌شده بام سبز طراحی‌شده و نمونه ساده بام سبز معمولی در محیط آزمایشگاهی بیانگر بهینه بودن بام سبز طراحی‌شده از نظر حرارتی، نسبت به طرح بام‌های سبز معمولی می‌باشد.

نمودار ۲: مقایسه تطبیقی بام اولیه (سبزمعمولی) با طرح جدید (طراحی شده) از نظر تغییر دمای لایه زیرین



انتقال حرارت در بام سبز با لایه طراحی‌شده به صورت تجربی نیز مورد بررسی قرار گرفت و مدلی با ابعاد ۱ متر در ۱ متر در آزمایشگاه ساخته شد و نتایج نرم‌افزاری با نتایج سنسورهای حرارتی محک زده شد. در نهایت نتایج نرم‌افزاری با میزانی از اختلاف تأیید گردید. به نظر می‌آید اختلاف میان نتایج تجربی و نتایج نرم‌افزاری به دلیل عدم در نظر گرفتن نقش سایه در کاهش انتقال حرارت در نتایج نرم‌افزاری است.

پی‌نوشت

1. Cappelli, M., Cianfrini, C., Corcicone, M. (1998). Effects of Vegetation Roof on Indoor Temperatures, *Heat Environ*. 16 (2).
2. Palomo, E. (1999). Roof Components Models Simplification Via Statistical Linearization and Model Reduction Techniques, *Energy Build*. 29 (3)
3. LEED: Leadership in Energy and Environmenal Design: این استاندارد یعنی راهنمای طراحی محیطی و انرژی توسط هیات برنامه‌ریزی انجمن ساختمان‌های سبز آمریکا تنظیم شده است و در بیشتر کشورهای جهان ساختمان‌های سبز بر اساس گواهی این انجمن اعتبار پیدا می‌کنند.
4. Trent University
5. Peterborough
6. High Density Polyethylene
7. Poly vinil chloride
8. Thermoplastic polyolefin
9. Ethylene propylene diamine monomer
10. Finite element method
11. Exact Solution
12. Continuum Mechanics
13. ANSYS
14. Node quadrilateral
15. Node triangular
16. Contour

References

- Baker, A.J.M., Brooks, R., (1989). Terrestrial Higher Plants Which Hyperaccumulate Metallic Elements – A Review Of Their Distribution. *Journal of Ecology and Phytochemistry. Journal of Biorecovery*, 1 (2), 81–126.
- Bass, B. (2007). Green Roofs and Green Walls: Potential Energy Savings in the winter. Toronto: Adaptation & Impacts Research Division Environment Canada at the University of Toronto Centre for Environment
- Bradley Rowe, D. (2010). Green Roofs as a Means of Pollution Abatement. *Journal of Environmental Pollution*, 159, 2100-2110. Available from http://www.sciencedirect.com.
- Environmental Advantages of Green Roof, (2010). Retrieved from http://www.efb-greenroof.eu/verband/fachbei/fa01_englisch.html
- Green Roof Types, (2010), International Green Roof Association Retrieved from http://www.igra-world.com/types_of_green_roofs/index.php
- Hake, A., (2007), Promoting *Sustainable Green Roofs through Leadership in Energy and Environmental Design*, (LEED), Kansas: Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree master of Landscape Architecture at Kansas State University
- Jurgen Bathe, K. (1996). *Finite Element Procedures*. Michigan: Prentice Hall
- Liu, K. & Bass, B. (2005). Performance of Green Roof Systems. Canada: National Research Council Canada.
- Luckett, K. (2009). Green Roof Construction and Maintenance. New York: McGraw-Hill.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. KY, Bradley Rowe, D. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services, *Journal of Bioscience*, 57, 823-833. Retrieved from http://digitalcommons.ryerson.ca/arch/1
- Ryerson University. (2005). Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto, Retrieved from http://www.toronto.ca/greenroofs/pdf/chapter2.pdf
- Specialized Information of Green Roof, Retrieved from http://www.greenroof.ir/index.php?option=com_content&task=view&id=59&Itemid=86
- Soflaei, F. & Rahimi, S. (2006), Bam Ya Bagh Zarurate Tarahi-E Paydar (Roof Garden, the Necessity of Sustainable Design), *Journal of Abadi*, 51, 56-63
- Tolderlund, L. (2010), Design Guidelines and Maintenance Manual For Green Roofs In The Semi-Arid And Arid West, LEED AP, GRP, University Of Colorado Denver, Retrieved from
- http://www2.epa.gov/sites/production/files/documents/GreenRoofsSemiAridAridWest.pdf.
- Wark, Ch. G. & Wark, W. W. (2003). Green Roof Specifications and Standards, Retrieved from http://www.greenroofs.com/pdf/newslinks-803_construction_ specifier.pdf.