سنجش کارآیی و عملکرد حرارتی انواع دیوارهای سبز

بهزاد وثیق[1] و سارا محمدی[2]

تاریخ دریافت: 98/10/25
تاریخ پذیرش: 99/07/06

چکیده: معماری به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر میزان هدررفت انرژی و یا نحوه استفاده از انرژی، می‌تواند اثری مهم بر روی میزان مصرف انرژی داشته باشد و در این میان، تعدیل اقلیمی به عنوان راه حلی در معماری پایدار مطرح است. بهینه‌سازی دیوار ساختمان مانند الحاق دیوار سبز، جهت کنترل گرما و تهویه از این راهکارها محسوب می‌شوند. جغرافیای تحقیق در کرمان، انتخاب شده است؛ که به واسطه شرایط آب‌وهوایی آن نیاز به مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی است. سوأل اصلی تحقیق آن است که کدامیک از راهکارهای دیوار سبز می‌تواند عملکرد بهتری در کاهش دمای داخلی بنایی در شهر کرمان داشته باشد. در این مقاله از دو روش شبیه‌سازی میدانی و نرم‌افزاری بهره برده شده و اطلاعات از طریق دیتالاگرهای دما و رطوبت و داده‌های حاصل از نرم‌افزار گردآوری و مقایسه شده است. در بخش شبیه‌سازی، سه دیوار مرجع، سبز غیرمستقیم و دیوار گلدانی در دو محیط میدانی و نرم‌افزاری ساخته و به صورت تطبیقی، بررسی شدند. نتایج هر دو روش آزمون با هم مقایسه شد که از میان سه گونه دیوار سبز، دیوار سبز گلدانی به واسطه افت دمایی و افزایش رطوبت قابل توجه نسبت به دو گونه دیگر دیوار سبز عملکرد بهینه ای داشته است.

واژگان کلیدی: دیوار سبز، پایداری، آسایش حرارتی.

---

[1] **استادیار** معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه جندی‌شاپور، دزفول، ایران. (نویسنده مسئول) vasiq@jsu.ac.ir

[2] **کارشناسی ارشد** معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه جندی‌شاپور، دزفول، ایران.

1- مقدمه

رشد سریع مصرف انرژی و خطر تهی‌سازی منابع، باعث ایجاد بحران انرژی در دهه 70 میلادی شد که این موضوع، منجر به تجدید نظر در نحوه استفاده از منابع تأمین کننده انرژی شد(Khan, et al., 2020). آژانس بین‌المللی انرژی، بیان می‌کند؛ طی 2008-1984، با افزایش 49 درصدی انرژی، 43 درصد کربن بیشتر انتشار داده شده و سهم افزایش مصرف انرژی در کشورهای در حال توسعه بسیار بیشتر از سایر کشورها بوده است(Yuan, et al., 2017) در این میان، میزان مصرف انرژی در ساختمان 40 درصد از کل انرژی مصرفی و 36 درصد از کل کربن دی اکسید منتشر شده در دنیا را به خود اختصاص می‌دهد و این میزان به دلیل نیاز به ساختمان‌سازی در آینده، به سرعت افزایش خواهد یافت (Vera, et al., 2018, Wang, and Zhao 2018). با توجه به هدررفت عمده انرژی در تهویه ساختمان، مجامع بین‌المللی درصدد تعیین چارچوب کنترل تأثیرات منفی محیطیِ ناشی از گسترش شهرنشینی هستند(Bouyer, et al., 2011). لذا بازگشت به روش‌هایی برای کاهش هدررفت انرژی، به یکی از مهمترین موضوعات در معماری پایدار تبدیل شده است. نقطه مشترک بسیاری از این رویکردها بهره‌گیری از ظرفیت طبیعت؛ مانند استفاده از فضای سبز در دیوار داخلی و خارجی، به عنوان مؤلفه کلیدی است(Pérez, et al., Boafo, et al., 2017 ,2014). کنترل مصرف انرژی در ایران همانند سایر کشورهای در حال توسعه، از اهمیت بالایی برخوردار است و آزمون نحوه بومی‌سازی روش‌های طبیعت‌محور ضروری است. در این پژوهش، به اثر اثر دیوار سبز بر کاهش مصرف انرژی در ساختمانی مسکونی در کرمان پرداخته شده است. هدف از این پژوهش بررسی بهینگی انواع دیوار سبز است؛ لذا، ابتدا لازم است تا به شیوه کنترل مصرف انرژی از طریق دیوار سبز اشاره شود.

دیوار سبز می‌تواند باعث کاهش اثرات جزایر گرمایی شهر، افزایش منظر سبز، بهبود کیفیت هوا و بهبود بهره‌وری انرژی ساختمان داشته باشد(Xing, et al., 2019). دیوار سبز به سه سیستم سنتی، دوپوسته و گلدانی، تقسیم می‌شود که براساس نوع اتصال گیاه به بدنه عمودی تعیین می‌شود. نمای گلدانی سامانه‌ای است ساخته شده از پانل‌ها یا نمدهای جئوتکستایل[7]، که گیاهان یا در زمین یا در گلدان‌هایی در ارتفاع‌های متفاوت کاشته می‌شوند(Larcher and et al., 2018). این پانل‌ها نگهدارنده گیاهانی مثل سرخس و بوته‌های کوچک در ابعاد و انواع متفاوت و دارای حفره‌هایی برای جایگیری گیاهان است. دیوارها گاهی از قبل کشت شده‌اند و به سازه‌ی عمودی دیوار سبز متصل می‌شوند (Pérez, et al., 2011). به منظور استفاده از این نوع دیوار سبز، چهار عامل اساسی باید در نظر گرفته شوند: 1-سایه ایجاد شده توسط گیاهان و ایجاد مانع برای انتقال اشعه خورشید 2-عایق حرارتی ایجاد شده به وسیله گیاهان و لایه خاک 3-سرمایش تبخیری حاصل از گیاه و لایه خاک 4-کنترل باد(Perez,et al., 2011).

با توجه به اینکه مسأله تحقیق بر پایه تحلیل اثر نوع دیوار سبز بر میزان انتقال حرارت است؛ لازم است ابتدا به بررسی پیشینه تحقیقات دیوار سبز پرداخته شود. فنگ و همکاران، توازن انرژی دیوار سبز گسترده را به واسطه یک مدل ریاضی مورد بررسی قرار دادند و با انجام تحقیق میدانی آن را اعتبارسنجی کردند. نتایج نشان داد که در مدت 24 ساعت از روزی تابستانی، در زمانی اشباع خاک از آب، دیوار سبز گسترده 99.1 درصد کل گرمای به دست آمده را از راه‌های متفاوت دفع کرده است(Feng, et al., 2010). پرینی و همکاران با بررسی سیستم‌های دیوار سبز پرداخته و نشان دادند؛ دیوارهای سبز باعث کاهش دمای سطح پشت لایه‌ی گیاهی در مقایسه با نمای مرجع می‌شوند(Perini, et al., 2011). راجی و همکاران(2015)، به بررسی نقش سرمایشی دیوار سبز در تابستان و نقش عایق حرارتی آن در زمستان پرداخته و نشان دادند؛ در حالت خشک دمای سطح بالاتر از حالت مرطوب است و این بدین معنی است که جریان شار خروجی در حالت لایه خشک بیشتر است. همچنین میزان تبخیر و تعرق در حالت لایه مرطوب بیشتر از حالت خشک است و تفاوت میزان تبخیر و تعرق منجر به هدایت حرارتی متفاوت نسبت به فضای پایین می‌شود(Raji o, et al., 2015) (Lazzarin, et al., 2005). سامیه صالح و همکارانش به تحلیل اثر دیوار سبز بر

صرفه‌جویی انرژی در بنگلادش انجام دادند. ابتدا میزان تبخیر و تعرق از طریق معادله پنتمن-منتهث[1] محاسبه شد و سپس جواب به‌دست آمده[2] در نرم‌افزار سُلن[3] وارد شد. داده‌های آب‌وهوایی مورد نیاز از نرم‌افزار کراپ وات[4] استخراج شد. ایشان بر این باورند؛ چنان‌چه میزان انرژی مورد نیاز برای سرمایش و تهویه 25 درصد کل انرژی مصرفی ساختمان باشد؛ کارآیی ذخیره انرژی دیوار سبز می‌تواند نزدیک به 100درصد باشد(SamiaSal.,eh 2017). مالیس و همکارنش سه نمونه دیوار سبز را انتخاب و در نمونه اول از یک مدل سرامیک متخلخل استفاده کردند؛ در نمونه دوم از آجرهای سوراخ‌دار و در حالت سوم از ترکیب مواد آکوستیک حفره‌دار با سفال استفاده کردند. برای هر نمونه دمای داخل لایه از طریق ترموکوپل و دمای شاخ و برگ‌ها[5] از طریق سنسور مادون قرمز اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که دمای اندازه‌گیری شده در سطح برگ و داخل لایه‌ها در هر سه نمونه، پایین‌تر از سطح دیوار مرجع است(Mal.,ys, et al.,2014) در تحقیق وانگ و همکاران، نمونه دیوارهای سبز در دو لایه بستر گیاهی و دیوار، به وسیله دیتالاگر دما و رطوبت، اندازه گرفتند. نتایج نشان داد کاهش دما در جایی اتفاق می‌افتد که تراکم شاخسار بیشتر است. لذا استفاده از گیاهان رونده به کمک شبکه توریِ چسبیده بر دیوار، علی‌رغم نداشتن لایه خاک، باعث کاهش دمای 4.38 درجه سانتی‌گرادی می‌شود(Wong, et al., 2010). پولسلی و همکاران دو مدل متفاوت پوشش بیرونی: پوشش عایق‌دار(عایق پلی استایرن بین حفره‌های آجرهای دیوار- دیوارهای بزرگ سنتی (سنگی یا آجری) را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از سیستم دیوار سبز گلدانی و دیوار مستقیم می‌تواند شرایط جامع پایدار در شرایط امرژی[6] و در طول عمر 25 ساله، به وجود آورد(Pulselli, et al., 2014). خینک و همکاران، به بررسی تأثیر سیستم سبز عمودی در شرایط داخل ساختمان و بررسی میزان مصرف انرژی ساختمان تحت آب‌وهوای سرد و مرطوب در طول زمستان پرداختند. نتایج نشان می‌دهد؛ میزان مصرف انرژی الکتریکی اندازه‌گیری شده در اتاق مرجع 1.22 برابر اتاق دارای سیستم سبز محاسبه شد. به علاوه میزان 18 درصد صرفه‌جویی در انرژی در اتاق دارای سیستم سبز عمودی اندازه‌گیری شد(Xing, et al., 2019). بر اساس تحقیقات فوق، عواملی مانند ویژگی اقلیمی، شکل و ویژگی دیوار، ویژگی‌های گیاه، عملکرد حراراتی گیاه و بستر بر کارآیی انرژی دیوار سبز مؤثرند. با توجه به نقش اصلی نوع گیاه در بهینگی دیوار سبز، اثر اقلیم و ویژگی‌های رشد گیاه می‌باید؛ مورد بررسی قرار داد. مهمترین پارامترهای انتخاب گیاه، شاخص سطح برگ، مقاومت روزنه برگ، میانگین ارتفاع گیاه و میزان تابش سطح برگ بوده و جهت آزمون کارآیی آن ویژگی‌های حرارتی بستر کاشت شامل هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی، تراکم و ضخامت است(Vera, et al., 2018). مطالعه پارامتریِ مدل‌سازی گرمایی سطوح گیاهی براساس تعدادی از پارامترها نشان‌دهنده رفتار زیستی گیاهان، رفتار حرارتی هوا بین سایبان و رفتار دمایی و هیدرولیکی بستر کاشت است. در تحقیقات کارآیی دیوار سبز، پارامترهایی شامل چگالی شاخساره(LAI)، ضخامت تاج گیاه(L)، ضریب محو نور و بهره‌وری گیاهان در ره‌گیری اشعه خورشید(k_s)، آلبیدو شاخ‌وبرگ(ρ_f) ضریب توزیع مجدد گرمای پنهان است(Mal.,ys, et al., 2014). مطالعات در اقلیم‌های متفاوت نشان داد؛ شاخص سطح برگ و ضخامت بستر کاشت، مهمترین پارامترها هستند. علاوه بر آن، دمای محیط و ضریب انتقال گرما در مصالح، رطوبت و باد و سرمایش تبخیری از عوامل مؤثر بر کارکرد دیوار سبز هستند(Santamouris,and Kolokotsa, 2013). تئودوس اهمیت سرعت باد و رطوبت نسبی را در سرمایش حاصل از سطح سبز طرح و توضیح می‌دهد که محیط خشک سبب افزایش میزان تعرق و باد جابه‌جایی رطوبت از کنار پوشش گیاهی را تسریع می‌کند(Theodosiou, 2003). جهت ایجاد رطوبت و کاهش دما، علاوه بر موارد فوق، جهت‌گیری دیوار، نوع مصالح و ایجاد خلل و فرج‌هایی برای حرکت باد و ...قابل بررسی است(Webb, et al., 2018 and Sal.,ata, et al., 2015). (جدول1). با توجه به نوع گیاهان آزمون و تفاوت اقلیمی که عمدتا به بررسی میدانی-آزمایشگاهی در اقلیم مرطوب یا سرد پرداخته شده؛ ملاحظه می‌شود که اقلیم گرم‌وخشک کمتر مورد توجه بوده است. علاوه بر آن

جنس گیاهان در هر تحقیق باعث تفاوت داده‌های مربوط به چگالی شاخسار خواهد بود؛ لذا تحقیق حاضر می‌تواند دارای جنبه جدید و نوآورانه باشد.

جدول 1– شاخص‌های مؤثر بر سنجش عملکرد دیوار سبز
Tab.1-Indicators affecting the performance of green wal., l performance

شاخص	متغیرها
بیرونی	خورشید، دمای محیط، رطوبت و سرعت باد و رطوبت نسبی و سرمایش تبخیری
درونی	ضریب انتقال گرما در مصالح-جهت‌گیری دیوار- نوع مصالح -میزان خلل و فرج دیوار اصلی
دیوار سبز	سطح سایه گیاه-عایق حرارتی گیاه و خاک -سرمایش تبخیری گیاه و خاک –انسداد باد -شاخص سطح برگ، مقاومت روزنه‌های برگ، ارتفاع گیاه، بازتاب برگ -چگالی شاخساره (LAI)، ضخامت تاج (L)، -ضریب محو نور(k_s)،-آلبیدو شاخسار(ρ_f)،-ضریب توزیع مجدد گرمای پنهان

بر اساس مطالب فوق، پرسش اصلی پژوهش آن است که: "ویژگی‌های گیاهی و بستر کاشت در دیوار سبزی در شهر کرمان چگونه باشد تا بتواند در کنترل مصرف انرژی مؤثر باشد؟"با توجه به تحقیق تلاش شده است تا ابتدا با ساخت نمونک در مقیاس واقعی از هر گونه دیوار، در بازه گرمترین ساعات سال اطلاعات دمایی نمونه جمع‌آوری شود. در ادامه براساس داده حاصل از نرم‌افزار شبیه‌سازی و مقایسه تطبیقی بین آن و داده‌های نمونک، تلاش شد؛ بهینه‌ترین نوع دیوار سبز معرفی شود.

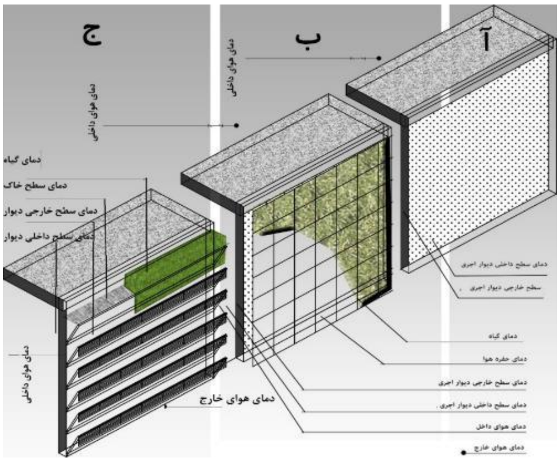
2- روش تحقیق

با توجه به رویکرد تحقیق، جهت بررسی دو نوع دیوار سبز غیر مستقیم و دیوار سبز گلدانی با یک دیوار مرجع، نمونک‌ها ساخته و داده‌های دمایی آنها اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار نمونک‌ها شبیه‌سازی و داده‌های آن به طور تطبیقی، مقایسه شد. استفاده از پیچک در دیوار سبز مستقیم با پوشش گیاهی چسبیده به دیوار به دلیل امکان آسیب‌رسانی به نمای دیوار، از تحقیق حذف شد. جهت جنوب غربی غالب‌ترین جهت‌گیری ساختمان در کرمان است و لذا نمونه‌ها در جهت جنوب‌شرقی ساختمان ساخته شدند. علاوه بر آن، با توجه به اقلیم کرمان، تابستان به عنوان زمان مورد بررسی انتخاب شد. بازه زمانی انجام این آزمایش از یک تا پانزدهم تیرماه 1398 است. به دلیل تابش آفتاب و گرمای زیاد در تابستان کرمان و کاهش نسبی این دما در شب، بررسی شرایط در روز از اهمیت بیشتری برخوردار است. به همین دلیل ثبت داده‌ها در روز از ساعت 9 تا 17، در بازه‌های دو ساعتی صورت گرفته است. به دلیل استفاده گسترده آجر در این اقلیم، از آن در اجرای نمونه‌ها استفاده شده است. در گام اول گیاهان همیشه سبز برای دیوار سبز گلدانی و دیوار سبز غیر مستقیم، تهیه شدند. با توجه به اهمیت نوع گیاهان لازم است گیاهان مبتنی بر اقلیم و بوم کرمان انتخاب و در پروژه استفاده گردند لذا؛ در این آزمایش پس از کاوش در گیاهان بومی، از میان مهمترین گیاهان مساعد با نگهداشت در فضای بیرونی، انواعی که کمترین نیاز به آبیاری و نگهداری دایم را داشته و درصد رطوبت قابل توجهی نیز نسبت به سایر داشته باشند؛ انتخاب شد. پس از این مرحله، دو نوع گیاه شاخ گوزنی(ناز یخی)[8] در دیوار سبز گلدانی و گیاه پاپیتال[9] در دیوار سبز غیر مستقیم استفاده شد. به دلیل ایجاد شرایط مشابه و قابل مقایسه، در طول دوران ثبت اطلاعات، گیاهان به یک صورت آبیاری شده‌اند. خاک استفاده شده در این آزمایش، با توجه به نیاز گیاهان، ترکیب خاک گلدان، شن بادی و ورمی کمپوست است. سپس با استفاده از پارچه ترانزیت، محل کاشت دیوار سبز گلدانی دوخته و نصب شد. پس از قرار دادن دو گونه دیوار سبز بر روی دیوارهای آجری ساخته شده، اندازه‌گیری شد. پس از ساخت نمونک‌ها لازم است تا داده‌ها برداشت شود. از این‌رو ابتدا متغیرهای مورد بررسی تعیین(تصویر1) و سپس به‌وسیله 13 دما-رطوبت‌سنج دیجیتالی، رطوبت و دما اندازه‌گیری شدند(جدول2). در تصویر1 نقاط نصب ابزار نشان داده شده است. مشخصات استفاده شده گیاهان به شرح جدول 3 است.

3- نتایج و بحث

یافته‌های پژوهش از دو روش شبیه‌سازی، ساخت نمونک انجام شده است. در ادامه نتایج داده‌های رطوبت‌سنج دیجیتالی برداشت و در قالب جدول 4 تنظیم شد. دمای هوای خارج برای تمام نمونه‌ها به جهت موقعیت و زمان

آزمون یکسان و برابر با 39 درجه سانتی‌گراد است. در جدول زیر می‌توان داده‌های یک روز را مشاهده نمود(جدول 4).


ج
ب
آ
دمای هوای داخلی
دمای هوای داخلی
دمای گیاه
دمای سطح خاک
دمای سطح خارجی دیوار
دمای سطح داخلی دیوار
دمای هوای داخلی
دمای هوای خارج
دمای سطح داخلی دیوار اجری
سطح خارجی دیوار اجری
دمای گیاه
دمای حفره هوا
دمای سطح خارجی دیوار اجری
دمای سطح داخلی دیوار اجری
دمای هوای داخل
دمای هوای خارج

شکل 1–دیوارهای مورد آزمون: راست بالا دیوار مرجع، وسط دیوار سبز غیرمستقیم، چپ: دیوار گلدانی

Fig.1-Top right: Reference wal., l, middle: Indirect green wal., l, left: potted-wal., l

نتایج نشان می‌دهد، برخلاف تفاوت دمای خارج و داخل در دیوار مرجع، همچنان دمای داخل بالاتر از سطح آسایش است. همین عدد در دیوار غیر مستقیم 33 درجه سانتی‌گراد است که با وجود کاهش نسبت به دیوار مرجع در بازه قابل قبولی نیست. داده‌های حاصل از دیوار گلدانی نشان‌دهنده میانگینی پایینتر از 30 درجه سانتی‌گراد است. همان‌طورکه در نمودار مشخص است، دیوار سبز گلدانی سبب رطوبت بالاتری در داخل فضا شده است، که این موضوع، نکته مثبتی در اقلیم گرم و خشک کرمان است که علاوه بر نیاز به کاهش دما، ایجاد رطوبت جهت تهویه نیز ضروری است. جهت کاهش خطا، می‌بایست نتایج حاصل از ازمون پیش، توسط شبیه‌سازی CFD از طریق نرم‌افزار کامسول بررسی شود. ابتدا لازم است مسأله در نرم‌افزار حل شود. ابتدا سه حالت به صورت آن‌که 1-تنها دیوار مرجع در نظر گرفته می‌شود 2- دیوار سبز گلدانی با احتساب سه لایه آجر، خاک، گیاه با تخلخل کم 0.05 در نظر گرفته می‌شود.3-دیوار سبز غیر مستقیم با احتساب 3 لایه آجر، حفره هوا، گیاه با تخلخل 0.45 در نظر گرفته می‌شود. تخلخل یاد شده حاصل برداشت از وضع موجود نمونک‌های آزمون است. در حالت اول یعنی دیوار مرجع از ماژول "جابه‌جایی گرما در جامدات" استفاده شده است.

جدول2-دقت و مشخصات ابزار اندازه گیری دما–رطوبت‌سنج دیجیتالی

Tab. 2-Accuracy and specifications of digital., temperature-humidity measuring instruments

مدل	سایز	دما			رطوبت			ابزار کالیبره
	LCD	وضوح	دامنه	دقت	دامنه	وضوح	دقت	
UNIT A12-T	4.5"	0.1℃ (0.1°F) و 1%RH	-10～ 50℃ (14~122°F)	±1℃ (±1.8°F)	10～ 99%RH	1%RH	±5%RH	دماسنج الکلی کالیبره آزمایشگاه تشخیص طبی سپهر کرمان

جدول 3-مشخصات گیاهان آزمون(Baratella and et al.,2018)

Tab.3-Specifications of the studied plants

نوع گیاه	تخلخل	چگالی	k	c_p	گاما
گیاه شاخ گوزنی (دیوارسبز گلدانی)	5%	1050kg/m^3	0.14	2720	1.0030
گیاه پاپیتال (دیوار سبز غیر مستقیم)	45%	900kg/m^3	0.19	2385	1.00013

در این ماژول از دو معادله انتقال حرارت جابه‌جایی و هدایتی استفاده می‌شود. در حالت دوم و سوم از ماژول"جابه‌جایی گرما در پوشش متخلخل" استفاده شده است که علاوه بر معادله انتقال حرارت جابه‌جایی و هدایتی به معادله انتقال حرارت محیط متخلخل نیز نیاز است (جدول 4). داده‌های حاصل از تحلیل شبیه‌سازی در جدول5 ارائه شده است. داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی، میانگین دمای دوره 15روزه نمونه‌های آزمایشی است.

در شبیه‌سازی از انتقال حرارت بالا و پایین دیوار، صرف نظر و تنها شرط اولیه و دو شرط "جریان گرما" با دمای خارجی 10 و دمای داخلی پا برجاست. در حالت گیاه سبز غیر مستقیم با تخلخل 0.45، پس از انتخاب ماژول "جابه‌جایی گرما در پوشش متخلخل"برای هوا و آجر از مصالح موجود در نرم‌افزار استفاده شده است؛ اما مصالح گیاهان و خاک، در هر دو حالت ساخته شده است. پس از اختصاص دادن هر مستطیل به جنس در "جابه‌جایی گرما در پوشش متخلخل" برای بخش آجر و هوا که متخلخل نیست"جابه‌جایی گرما در جامدات" اضافه می‌شود. در نهایت پس از تعیین صلبیت و زمان مورد مطالعه، با انتخاب گزینه "محاسبه" مسأله حل شد.

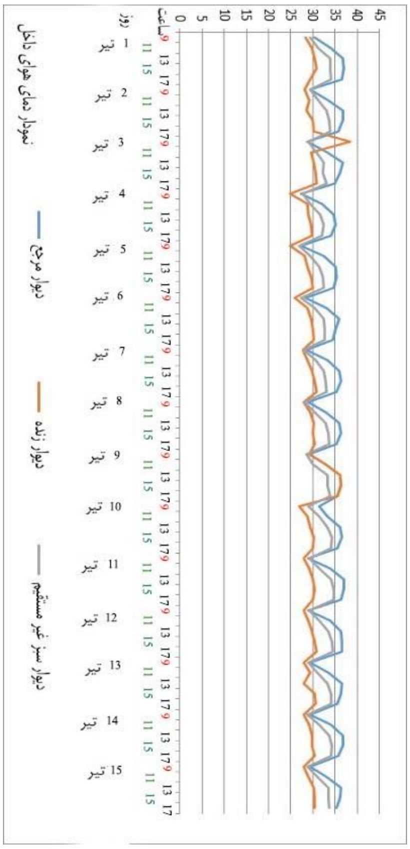
در بخش "نتایج" با انتخاب گزینه "مقادیر استخراج شده"، به تعداد مرزها "متوسط خط" انتخاب می‌شود و پس از انتخاب گزینه "ارزیابی"، دماها برای هر مرز و طی هر هشت ساعت به دست می‌آید. از این اطلاعات می‌توان برای مقایسه و نتیجه‌گیری استفاده کرد. دو نمونه دیگر نیز به همین منوال اجرا شد. می‌توان نتایج سه دیوار را در جدول 6 زیر مشاهده نمود. اعتبار و پایایی نتایج حاصل از این جدول بسته به اعتبار روش و نرم‌افزار است. روش مورد استفاده در این مقاله از جنبه نرم‌افزاری پیشتر در تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته است(Al., Musleh and et al., 2020-Kishore and et al., 2020-(Wijesuriya and et al., 2020 با این تفاوت که در کنار استفاده از نرم‌افزار کامسول از روش‌های عددی و یا بهره گیری از نرم‌افزارهای کمکی مانند متلب (Bozkaya, 2017) نیز استفاده شده است که با رویکرد نیمه‌تجربی این تحقیق تفاوت دارد. در این تحقیق با توجه به مقایسه تطبیقی داده‌های نرم‌افزاری با شرایط واقعی نمونک‌ها، روش عددی دارای اعتبار بالاتری نسبت به روش‌های صرفا نرم‌افزاری و عددی است.

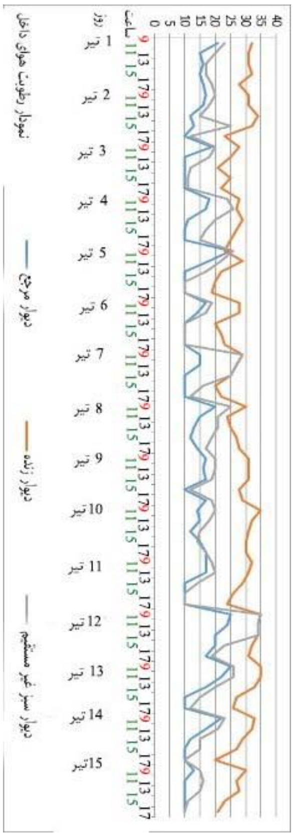
یکی از مهمترین موضوعات در تحقیقات علمی، سنجش روایی و پایایی پژوهش است. پایایی درجه‌ای از یکسان بودن نتایج در طول زمان معین و تحت شرایط و روش کار مشابه است که با قابلیت تکرار و تکثیر نتایج اندازه‌گیری می‌شود. پایایی شامل سه بخش متفاوت است. ثبات که به معنی کسب نتایج یکسان در نمونه مشابه در صورت تکرار آزمون است؛ هم‌ارزی یا تعادل، هنگامی به دست می‌آید که چنانچه آزمون توسط محققین مختلفی به کار رود، نتایج یکسانی را به دست آورد؛ و همگنی شاخصی است که تمام بخش‌های آزمون مورد استفاده دارای سازگاری درونی باشد. بنابراین برای تعیین همگنی، تعدادی از تعاریف مختلف عملیاتی از مفاهیم مشابه بر روی نمونه مشابه با یک روش خاص در شیوه جمع‌آوری داده‌ها آزمون می‌شود و نتایج به‌دست آمده باید به هم وابسته باشند. با توجه به شروط فوق و براساس شرایط یکسان آزمایش که دیوارهای ساخته شده در یک محوطه، با فاصله مشابه از دیوار جانبی، به همراه دیتالاگر یکسان و سایر شرایط مشابه مورد آزمون قرار گرفته‌اند؛ می‌توان شرایط آزمون را مشابه فرض نمود. در مورد ثبات درونی داده‌ها با توجه به مدت زمان و دامنه آزمون در فصل بحرانی، چنانچه شرایط آزمون به قرار یاد شده تکرار شود؛ نتایج قابل مشاهده دوباره خواهد بود. از این‌رو هم‌ارزی نتایج نیز متصور است. با این حال چنانچه هرکدام از موارد من جمله چگالی شاخسار نمونه گیاهان مورد آزمون تغییر یابد؛ در نتایج و کارآیی دیوار سبز امکان تغییرات جزئی ولی قابل توجه صورت می‌گیرد. همگنی آزمون نیز با توجه به بازه زمانی روزانه و ماهانه و کنترل مداوم شرایط آزمون توسط نگارندگان به صورت میدانی و مستمر حاصل شده است. از سوی دیگر روایی درجه‌ای از صحت نتایج مطالعه است و نشان می‌دهد که مطالعه موضوع آزمون، تا چه اندازه‌ای درست سنجیده شده است؟ در آزمون دیوارهای سبز، پیش‌زمینه مقایسه‌ای بین تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که امکان دخالت تمامی متغیرهای اقلیمی و یا کالبدی شهر مانند آلودگی هوا و مشابه آن در آزمون امکان‌پذیر نبوده است.

جدول 4- میانگین تطبیقی دمای و رطوبت سه گونه دیوار

Tab.4-Comparative average of temperature and humidity of three wal., l types

نوع دیوار: (مصالح آجر)	ساعت	دمای شاخسار	دمای خاک	دمای حفره هوا	دمای دیوار خارجی	دمای دیوار داخلی	دمای هوای داخل	رطوبت هوای خارج	رطوبت شاخسار	رطوبت خاک	رطوبت حفره هوا	رطوبت دیوار خارجی	رطوبت دیوار داخلی	رطوبت هوای داخل
دیوار مرجع	9	___	___	___	35.8	30.8	30.5	11	___	___	___	10≥	19	21
	11	___	___	___	40	36.5	34.1	12	___	___	___	10≥	15	15
	13	___	___	___	42	41.2	36.8	15.6	___	___	___	10≥	12	16
	15	___	___	___	41.2	41	37.1	17.7	___	___	___	10≥	18	15
	17	___	___	___	41	40.3	36.5	22.4	___	___	___	10≥	10≥	16
دیوار سبز گلدانی	9	26	23.5	___	30.7	28.5	28.5	11	49	64	___	40	27	32
	11	32.6	28.1	___	34.9	30.5	29.8	12	34	36	___	27	28	31
	13	32.8	30.1	___	35.1	32.4	30.5	15.6	33	35	___	27	29	31
	15	31.8	30.3	___	33.8	33	30.9	17.7	31	37	___	29	27	32
	17	25.4	32	___	29.8	26.1	29.4	22.4	34	48	___	30	26	28
دیوار سبز غیر مستقیم	9	25.4	___	32	29.8	29.4	29.4	11	17	___	22	16	20	23
	11	32.3	___	37	36.6	33	31.2	12	10≥	___	10≥	10≥	18	20
	13	32.8	___	37.2	37.3	36.5	33.9	15.6	10≥	___	10≥	10≥	17	17
	15	30.5	___	37.9	37.7	37.2	33.9	17.7	10≥	___	10≥	10≥	15	17
	17	29.8	___	35.9	37.3	36.8	34.1	22.4	11	___	10≥	10≥	15	19





جدول 5- معادلات استفاده شده در پیاده‌سازی ماژول

Tab 5- Equations used in the research

هدایت	جابه‌جایی	معادله محیط متخلخل
$\mathrm{dz}\boldsymbol{\rho Cp}\frac{\boldsymbol{\partial T}}{\boldsymbol{\partial t}}+\mathrm{dz}\boldsymbol{\rho cpu.\nabla T}+\boldsymbol{\nabla.q}$ $\boldsymbol{=dzq+q0}$ $\boldsymbol{+dzQted}$ $\boldsymbol{q=-dzk\nabla\mathrm{T}}$	$-n*q$ $=dzq0$ $q0$ $=h(Text$ $-T)$	$dz(\rho cp)\frac{\sigma T}{eff\delta t}+dz\rho cpu*\nabla T+\nabla*q$ $=dzQ+q0+dzQvd$ q $=-d_z a_{eff}\nabla\mathrm{T}$ $\left(\rho C_p\right)_{eff}=\theta_p\rho_P c_{p.P}+(1+\theta_z)\rho c_p$ $k_{eff}=\theta_p k_p+\left(1-\theta_p\right)k+k_{disp}$

جدول 6-میانگین دمای 15 روز و ساعت 9 صبح

Tab 6- The average temperature for 15 days and al., so at 9 o'clock in the morning

نوع دیوار	رطوبت هوای بیرون	دمای هوای خارج	دمای شاخ و برگ گیاه	دمای خاک	دمای حفره هوا	دمای سطح خارجی دیوار	دمای سطح داخلی دیوار	دمای هوای داخل	دمای 9صبح شاخ و برگ گیاه	دمای 9 صبح خاک	دمای 9 صبح حفره هوا	دمای سطح خارجی دیوار
مرجع	15.8	41.55	__	__	__	41.75	40.45	33.55	__	___	__	34.3
سبز گلدانی	15.8	41.55	31.75	30.15	__	33.55	30.25	29.05	26.2	24.5	__	28.6
سبز غیر مستقیم	15.8	41.55	32.75	_	36.85	37.45	33.45	31.45	28.9	__	31	30.8

مرزی بین سطح داخلی دیوار و هوای داخل، برای دیوار مرجع، از ساعت نه تا هفده به صورت (34.29 تا 35.5) و دمای شرایط مرزی بین سطح خارجی دیوار و هوای خارجی برای دیوار مرجع، از ساعت نه تا هفده نیز به شکل(34.3 تا 39.3) افزایش یافته است. اختلاف دمای شرایط مرزی داخلی و شرایط مرزی خارجی در دیوار مرجع به طور میانگین 3 درجه، و در بیشترین حالت 3.85 درجه سانتی‌گراد بود، که نشان‌دهنده تأثیر مصالح آجر و فضای ایزوله شده است. دمای شرایط مرزی بین سطح داخلی دیوار و هوای داخلی برای دیوار سبز گلدانی، از ساعت نه تا هفده(28.6 تا 28) تا حدی کاهش یافته است، دمای شرایط مرزی بین خاک و سطح خارجی دیوار برای دیوار سبز گلدانی، از ساعت نه تا هفده، بسیار نزدیک به هم و تقریبا روند کاهشی دارد. (26.7 تا 26) دمای شرایط مرزی بین گیاه و خاک برای دیوار سبز گلدانی، از ساعت نه تا هفده تقریبا روند افزایشی داشته است (25.39 تا 27.05) و دمای شرایط مرزی بین گیاه و هوای خارجی برای دیوار سبز گلدانی، از ساعت نه تا هفده افزایش یافته است(26.25 تا 38.82).

اختلاف دمای شرایط مرزی داخلی و شرایط مرزی خارجی در دیوار سبز گلدانی به طور میانگین 7.36 لذا تمرکز، تنها روی متغیرهای مورد آزمون بود. نتایج نیز بر اساس تغییرات کنترل شده موضوعات به دست آمده است. نتایج حاکی از مؤثر بودن تغییرات هر عامل طراحی است. لذا شرط اول که مؤثر بودن متغیرهاست، حاصل شده است. در دیوار مرجع، دمای خارجی دیوار به علت میزان دمای بیشتر و شرایط مرزی وابسته، بیشتر است و هر چه به سمت داخل نزدیک می‌شود، دما کمتر و دیوار خنک‌تر می‌شود. تغییرات دمایی در هر ساعت برای دیوار گلدانی نیز نشان می‌دهد؛ هر چه نزدیکی به سمت داخل باشد، دما به علت میزان دمای کاهش یافته کمتر است. تغییرات دمایی در هر ساعت برای دیوار سبز غیر مستقیم نیز، نتایج مشابه دیوار سبز گلدانی را نشان می‌دهد. مقایسه خروجی شبیه‌سازی نمونه‌ها نشان می‌دهد، روند کاهش دما در همه حالات، یکسان است؛ اما در حالت سوم(دیوار غیر مستقیم) نسبت به حالت دوم (دیوار گلدانی) به دلیل ضریب تخلخل بیشتر و عرض لایه‌های کمتر و همچنین به دلیل ضریب رسانش متفاوت خاک نسبت به هوا عملکرد کمتری دارد؛ در نتیجه حالت دوم یا دیوار گلدانی بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. بررسی شرایط مرزی در خروجی‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد؛ دمای شرایط

با توجه به خروجی‌های حاصل آمده، میانگین دمای اختلاف دمای بیرونی‌ترین مرز با داخلی‌ترین آن، در دیوار مرجع 3 درجه سانتی‌گراد، در دیوار سبز گلدانی 7.36 درجه سانتی‌گراد و در دیوار غیر مستقیم 5.5 درجه سانتی‌گراد است.

حداکثر اختلاف دما نیز در دیوار مرجع در ساعت 13 و به میزان 3.85 درجه سانتی‌گراد؛ در دیوار گلدانی در ساعت 17 وبه میزان 10.77 درجه سانتی‌گراد، در دیوار غیر مستقیم در ساعت 17 و به میزان 8.54 درجه سانتی‌گراد است. در نتیجه مشخص شد که دیوار گلدانی به علت ظرفیت حرارتی خاک و گیاه، سایه‌اندازی، و تخلخل کمتر گیاه، عرض بیشتر نمونه، به طور قابل ملاحظه عملکرد بهتری نسبت به دیگر نمونه‌ها دارد. در حالت دوم با تغییر جنس از هوا به خاک تغییرات چشم‌گیری حاصل شده است.

درجه، و در بیشترین حالت 10.77 درجه سانتی‌گراد است که نشان‌دهنده میزان تأثیر مصالح ظرفیت حرارتی خاک و گیاه است. در دیوار سبز غیر مستقیم دمای شرایط مرزی بین سطح داخلی دیوار و هوای داخلی برای دیوار سبز غیر مستقیم، از ساعت نه تا هفده افزایش یافته است(30.65تا 31.3) و دمای شرایط مرزی بین حفره هوا و سطح خارجی دیوار برای دیوار سبز غیر مستقیم، از ساعت نه تا هفده افزایش یافته است(30.84تا 31.6).

دمای شرایط مرزی بین گیاه و حفره هوا برای دیوار سبز غیر مستقیم، از ساعت نه تا هفده به وضوح افزایش یافته است(29.99تا 36.97) دمای مرز بین هوای بیرون و گیاه برای دیوار غیر مستقیم، از ساعت نه تا هفده به وضوح افزایش یافته است(28.95تا 39.84) اختلاف دمای مرز داخلی و مرز خارجی در دیوار غیر مستقیم به طور میانگین 5.5، و در بیشترین حالت 8.54 درجه سانتی‌گراد است که نشان‌دهنده این میزان تأثیر سایه‌اندازی و ظرفیت حرارتی گیاه است (جدول 7).

جدول 8- بررسی دما شرایط مرزی در خروجی‌های شبیه‌سازی- دماها بر حسب سانتی گراد است.

Tab. 8- the temperature in boundary conditions - the temperatures in terms of Celsius

اختلاف دما			**مرز2**	**مرز 1**	**ساعت**	
0.01			34.3	34.29	9	دیوار مرجع
3.68			38.05	34.37	11	
3.85			38.75	34.9	13	
3.83			39.13	35.3	15	
3.8			39.35	35.55	17	
اختلاف دمای مرز1 و4	مرز4	مرز 3	مرز2	مرز 1	ساعت	دیوار سبز گلدانی
-2.35	26.25	25.39	26.57	28.6	9	
8.27	36.75	25.22	26.25	28.48	11	
9.72	37.93	25.78	26.29	28.21	13	
10.41	38.49	26.43	26.38	28.08	15	
10.77	38.82	27.05	26.5	28.05	17	
اختلاف دمای مرز1 و 4	مرز4	مرز 3	مرز2	مرز 1	ساعت	دیوار سبز غیر مستقیم
-1.7	28.95	29.99	30.84	30.65	9	
5.42	36.97	30.98	30.7	31.55	11	
7.22	38.34	33.54	30.93	31.12	13	
8.02	39.23	35.55	31.18	31.21	15	
8.54	39.84	36.97	31.42	31.3	17	

انتخاب شد؛ با این حال سطح تخلخل پایین ممکن است بر افت دمایی مؤثر باشد. همچنین نمی‌توان به طور قطع عملکرد دیوار گلدانی را در اقلیم گرم‌وخشک، به دلیل تفاوت‌های بسیار در عوامل اقلیمی، جهت‌گیری ساختمان، تفاوت هربال هر منطقه و ... نسبت به سایر اقلیم‌ها بررسی نمود.

بر اساس نتایج تحقیق لازم است در طراحی نمای ابنیه در کرمان، به قابلیت استفاده از گونه دیوار گلدانی توجه شود. مهمترین عوامل در طراحی دیوار گلدانی، انتخاب گونه کاشت، میزان سطح پوششی و در نهایت جزئیات اتصالات دیوار گلدانی به دیوار است. نتایج تحقیق به واسطه نوع گیاهان مورد آزمون و شرایط اقلیمی آزمون، تنها در شهر کرمان قابلیت بررسی دارد. در تحقیق حاضر محدودیت‌هایی مانند عدم امکان تغییر زاویه و یا شکل پلانی دیوار و یا تنوع گیاه بر اساس هربال کرمان، وجود داشته که پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی مورد توجه پژوهندگان باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود؛ تأثیر آبیاری، تبخیر و تعرق خاک و گیاهان در واریته گسترده هر منطقه، سن و میزان تخلخل گیاهان، نوع و ترکیب مختلف خاک، جهت افزایش کارآیی دیوار گلدانی بررسی شود.

4–نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر و نوع سبزینگی بر کاهش دمای داخلی یک ساختمان مسکونی پرداخته شد. هدف از تحقیق مقایسه تطبیقی کارآیی انواع دیوار سبز در کاهش انتقال حرارت است. از این رو با ساخت نمونک و شبیه‌سازی از طریق نرم‌افزار، دیوارها مقایسه شدند. در تعیین متغیرهای تحقیق به جنس، فاصله، ترتیب قرارگیری دیوارها، نوع گیاه، مصالح به عنوان متغیر داخلی و رطوبت و دمای محدوده آزمایش به عنوان متغیر بیرونی در بازه 15روز گرم تابستان از ساعت 9 -17 در نظر گرفته شد. در این مقایسه میانگین دمای هوای خارج، میانگین دمای شاخ و برگ گیاه، میانگین دمای خاک، میانگین دمای حفره هوا، میانگین دمای سطح خارجی دیوار، میانگین دمای سطح داخلی دیوار، میانگین دمای هوای داخل، اختلاف میانگین دمای هوای داخل با میانگین دمای هوای خارج بررسی می‌شود. میانگین اختلاف دمای هوای خارج و دمای هوای داخل در آزمایش تجربی بین دیوار مرجع و دیوار غیر مستقیم 2.2 درجه و بین دیوار غیر مستقیم و دیوار گلدانی 2.4 درجه است. همچنین میانگین اختلاف دمای هوای خارج و داخل در نرم افزار بین دیوار مرجع و دیوار غیر مستقیم 2.5 درجه و بین دیوار غیرمستقیم و دیوار گلدانی 1.9 درجه است.

وجود خاک یکی از مهمترین فاکتورهای مؤثر بر کاهش دما در دیوار گلدانی است که نشانگر برتری آن بر اثر تخلخل و حفره در دیوار غیر مستقیم، است. وجود گیاهان در دیوار خارجی، باعث افت 2 درجه دما بین دیوار مرجع و غیر مستقیم و در دیوار گلدانی 5 درجه شده که می‌تواند باعث کاهش استفاده از وسایل خنک‌ساز شود. تفاوت دمایی بین دمای 41.6 درجه تابستانی و دمای داخلی در دیوار گلدانی 15.6 درجه است که بیشترین افت دمایی را نشان می‌دهد. این یافته‌ها با تحقیقات سامیه صالح و همکاران(2017) و وونگ و همکاران(2010) همراستاست. با این حال نسبت به نتایج یافته‌های وونگ(2010) و مالیس(2014) و نیز راجی(2015) نشانگر عملکرد بهتر دیوار گلدانی در اقلیم کرمان دارد. در این تحقیق دو نوع گیاه با تخلخل نزدیک

پی‌نوشت

[1] معادله پنتمن-منتهث به صورت زیر محاسبه می‌شود: $ET = (\Delta(Rn - G) + \rho acp\ (\delta e)ga) / (\Delta + \gamma(1 + ga/gs))\ Lv(1)$

[2] به کمک معادله زیر میزان صرفه‌جویی در انرژی را تخمین زد: $E = \text{Evapotranspiration (m/day) x Area (1 m2) x 2257 (in kJ/m3)}E$

میزان صرفه جویی انرژی در یک متر مربع از نمای سبز است بر حسب کیلو ژول روش دومی معادله‌ای است با استفاده از شاخص سطح برگ (نسبت سطح برگ به سطح زمین): $QT = LAI\ (PCp)\ (es, plants- eair) / \gamma\ (rs+ ra)$

[3] SOLENE نرم‌افزاری است با قابلیت شبیه‌سازی و ارزیابی اثرات آب و هوایی در پروژه‌های شهری و معماری

[4] CropWat

[5] میزان تبخیر وتعرق(گرمای نهان) روزانه می‌تواند به این شکل بیان شود: $Etd = Ir + Pr - Dr$ Etd: میزان تبخیر وتعرق/ Ir: / / Pr: آب باقی مانده توسط نمونه‌ها / Dr آب تخلیه شده.

[6] Emergy: انواع مختلف انرژی و منابع (مانند نور خورشید، آب، سوخت‌های فسیلی، معدن و غیره) محسوب می‌شود؛ به مقدار انرژی که در تحولات مستقیم و غیر مستقیم برای تولید محصول یا خدمات مصرف می‌شود نیز گفته می‌شود.

[7] Geotextile نوعی پارچه نفوذپذیر است که در هنگام استفاده با خاک، قابلیت جداسازی، فیلترکردن، تقوست، حفاظت و زه‌کشی دارد.

[8] نام علمی: aptenia cordifolia نام انگلیسی: heartleaf iceplant / baby sun rose این گیاه در در جنوب ایران به وفور کاربرد دارد. به عنوان گیاه پوششی مقاوم، گل‌دار محسوب می‌شود. در برابر گرما و خشکی مقاوم است. این گیاه در مقابل بی آبی و خشکی نیز مقاوم است.

[9] نام علمی:Hedera Helix نام تیره: Aral.,iaceae نام انگلیسی Ivy این گیاه از لحاظ ظاهری شکل رونده و آویز دارد، همیشه سبز و مناسب فضای باز است و بهترین رشد را زمانی دارد که چند ساعت نور مستقیم آفتاب را دریافت کند.

منابع

Al., Musleh, M., Topriska, E. V., Jenkins, D., and Owens, E. (2020). Thermoelectric generator characterization at extra-low-temperature difference for building applications in extreme hot climates: Experimental., and numerical., study. Energy and Buildings, 225, 110285.

Baratella, P., da Silva, V. G., and Eng, A. D. (2018), Anal.,ysis of development of indicators for sustainability assessment: application to Brazilian buildings.3.

Boafo ,F. E., et al., (2017). "Eval.,uating the impact of green roof evapotranspiration on annual., building energy performance." International., Journal., of Green Energy 14(5).

Bouyer, J., et al., (2011). "Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context." Energy and Buildings 43(7).

Bozkaya, B., Li, R., Labeodan, T., Kramer, R., and Zeiler, W. (2017). Development and eval.,uation of a building integrated aquifer thermal., storage model. Applied Thermal., Engineering, 126.

Feng, C., et al., (2010). "Theoretical., and experimental., anal.,ysis of the energy bal.,ance of extensive green roofs." Energy and Buildings 42(6).

Kishore, R. A., Bianchi, M. V., Booten, C., Vidal.,, J., and Jackson, R. (2020). Optimizing PCM-integrated wal.,ls for potential., energy savings in US Buildings. Energy and Buildings, 226, 110355.

Khan, I., Hou, F., and Le, H. P. (2020). The impact of natural., resources, energy consumption, and population growth on environmental., qual.,ity: Fresh evidence from the United States of America. Science of The Total., Environment, 142222.

Lazzarin, R. M., et al., (2005). "Experimental., measurements and numerical., modelling of a green roof." Energy and Buildings 37.

Larcher, F., Battisti, L., Bianco, L., Giordano, R., Montacchini, E., Serra, V., and Tedesco, S. (2018). Sustainability of living wal.,l systems through an ecosystem services lens. Urban Horticulture Springer, Cham, 22.

Mal.,ys, L., et al., (2014). "A hydrothermal., model to assess the impact of green wal.,ls on urban microclimate and building energy consumption." Building and environment 73.

Pérez, G., et al., (2014). "Vertical., Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review." Renewable and sustainable energy reviews 39.

Perez, G., et al., (2011). "Green vertical., systems for buildings as passive systems for energy savings." Applied energy 88(12).

Perini, K., et al., (2011). "Vertical., greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope." Building and environment 46(11).

Pulselli, R., et al., (2014). "Emergy based eval.,uation of environmental., performances of Living Wal.,l and Grass Wal.,l systems." Energy and Buildings 73.

Raji o: A B., et al., (2015). The impact of greening systems on building energy performance Renewable and sustainable energy reviews 45.

Sal.,ata, F., et al., (2015). "How high al.,bedo and traditional., buildings’ material.,s and vegetation affect the qual.,ity of urban microclimate. A case study." Energy and Buildings 99.

Santamouris, M. and D. Kolokotsa (2013). "Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art." Energy and Buildings 57.

SamiaSal.,eh, J. B. K., Michael Sanchez (2017). "Anal.,ysis of Possible Energy Savings Impacts of Green Wal.,ls on Urban Dwellings in Bangladesh." American Journal., of Engineering Research (AJER 6(7): 10.

Theodosiou, T. G. (2003). "Summer period anal.,ysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique." Energy and Buildings 35(9).

Vera, S., et al., (2018). "A critical., review of heat and mass transfer in vegetative roof models used in building energy and urban enviroment simulation tools." Applied energy.22(2).

Wang, Z. and J. Zhao (2018). "Optimization of Passive Envelop Energy Efficient Measures for Office Buildings in Different Climate Regions of China Based on Modified Sensitivity Anal.,ysis." Sustainability 10(4): 907.

Webb, M., et al., (2018). "Simulation of a biomimetic façade using TRNSYS." Applied energy 213.

Wijesuriya, S., Tabares-Velasco, P. C., Biswas, K., and Heim, D. (2020). Empirical., val.,idation and comparison of PCM modeling al.,gorithms commonly used in building energy and hygrothermal., software. Building and Environment, 173, 106750.

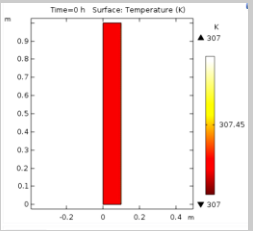
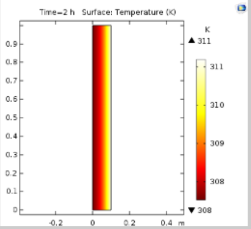
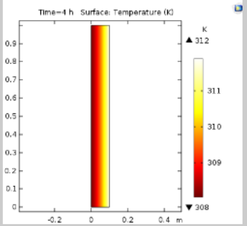
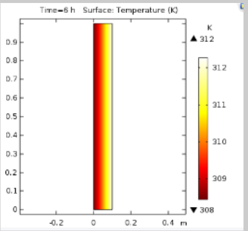
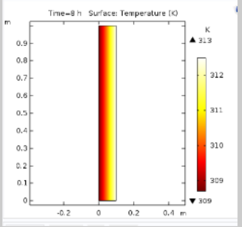
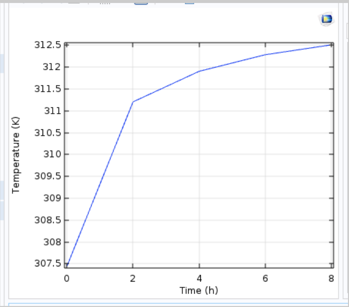
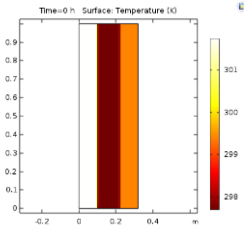
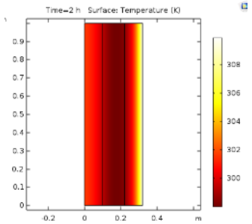
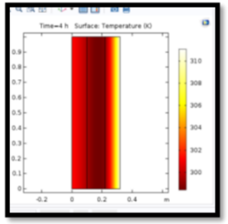
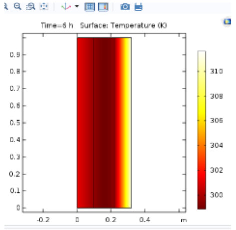
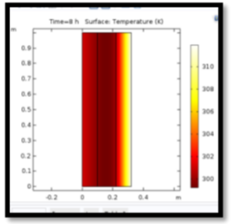
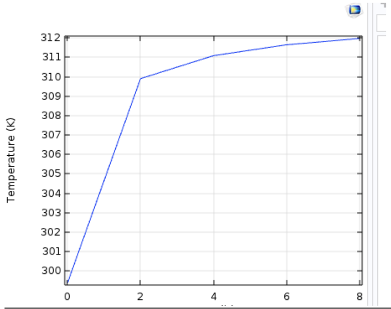
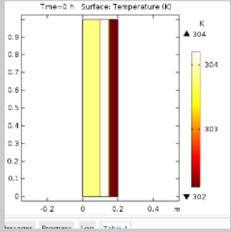
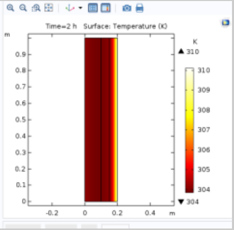
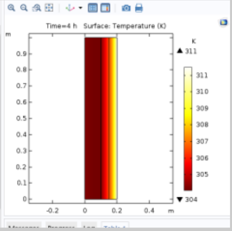
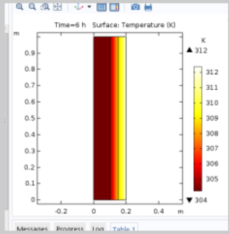
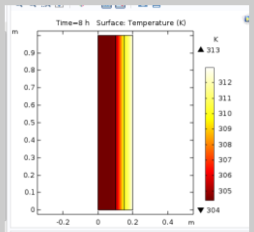
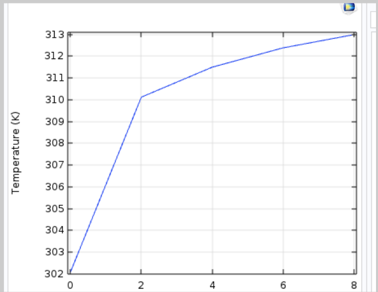
Wong, N. H., et al., (2010). "Thermal., eval.,uation of vertical., greenery systems for building wal.,ls." Building and environment 45.

Xing, Q., et al., (2019). "Experimental., investigation on the thermal., performance of a vertical., greening system with green roof in wet and cold climates during winter." Energy and Buildings 183.

Yuan, Y., et al., (2017). "Bionic building energy efficiency and bionic green architecture: a review." Renewable and sustainable energy reviews 74.

جدول 7- نتایج حاصل از نرم‌افزار برای سه دیوار آزمون

Tab 7- Results of software for three test wal., ls

دیوار	ساعت 9	ساعت 11	ساعت 13	ساعت 15	ساعت 17	نمودار دما بر حسب زمان
مرجع						
گلدانی						
غیرمستقیم