

اللهم لا تجزنا



دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی معماری

بررسی تاثیر دیوارهای سبز بر عملکرد حرارتی ساختمان

نگارنده: نسرين السادات آقايان

استاد راهنما
دکتر مسعود طاهري شهراييني

آذر ۱۳۹۸

شکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند و بی‌کران‌ترین سپاس‌ها به ساحت مقدس یوسف زهرا (ع) که چشم‌ها برای زیارت صبحش بیدارند. سلام و دورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...
وظیفه خود می‌دانم سپاسگزار تمام آنهایی باشم که در این دوره ارزشمند، بودنشان و امیدشان راهگشای من بود؛ پدرم، مهربانی مشفق، بردبار و حامی. مادرم سنگ صبوری که الفبای زندگی به من آموخت. همسرم که نشانه لطف الهی در زندگی من است و همانند تمام روزهای گذشته با صبر و حوصله در کنارم بود.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عز و جل":

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از استاد ارجمند جناب آقای دکتر مسعود طاهری شهرآئینی که نهایت تلاش را در راهنمایی اینجانب جهت انجام این پایان‌نامه ارائه نموده‌اند، تشکر و قدردانی نموده و توفیق روزافزون ایشان را از خداوند متعال خواستارم.

همچنین تشکر و قدردانی می‌نمایم از جناب آقای دکتر منصفی پراپری و جناب آقای دکتر محمودی که برای داوری این پایان‌نامه قبول زحمت نمودند و وقت گران‌بهای خود را در اختیار اینجانب قرار دادند.

تعمیر نامه

اینجانب **نسرین السادات آقایان** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته معماری دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "بررسی تاثیر دیوارهای سبز بر عملکرد حرارتی ساختمان" تحت راهنمایی دکتر مسعود طاهری شهرآئینی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو نسرین السادات آقایان

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

روند رو به رشد شهرنشینی و ضرورت تأمین زمین مناسب جهت تهیه مسکن، افزایش کارخانه‌ها و شهرک‌های صنعتی، کاهش مساحت اختصاص یافته به فضای سبز در شهرها و... از جمله عواملی هستند که در شهرهای مدرن مصرف بی‌رویه منابع انرژی و به تبع آن مشکلات زیست‌محیطی فراوانی نظیر آلودگی هوا، ایجاد جزایر گرمایی، افزایش گازهای گلخانه‌ای و... را ایجاد کرده‌اند. در دهه‌های اخیر افزایش آگاهی نسبت به مسائل محیط زیست منجر به استفاده از معیارهای پایداری در طراحی سیستم‌های شهری و ساختمان شده است. در این میان توجه به گیاهان و افزایش فضای سبز از جمله مهم‌ترین راه‌حل‌های پیشنهادی برای تحقق معماری سبز و کاهش معضلات زیست‌محیطی محسوب می‌گردد. با توجه به حجم بالای ساخت و ساز در شهرها، امروزه نمای ساختمان‌ها بیشترین امکان و ظرفیت را برای کاشت گیاهان و ایجاد سیستم‌های سبز عمودی دارا می‌باشند. سیستم‌های سبز عمودی به عنوان ابزاری کارآمد سبب ارتقای فضاهای شهری از نظر اجتماعی و زیست‌محیطی گردیده و همچنین با بهبود عملکرد حرارتی ساختمان‌ها باعث کاهش مصرف انرژی شده است. در پژوهش حاضر ابتدا با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای به ارائه مطالبی در باب معرفی انواع سیستم‌های سبز و کارایی و ملاحظات اجرایی آن‌ها پرداخته شده است. در ادامه با هدف بررسی تاثیر این سیستم‌ها بر عملکرد حرارتی ساختمان‌ها، یک نمونه دیوار سبز ایجاد و بر روی دیوارهای جنوبی و غربی یک ساختمان مسکونی در شهر شاهرود نصب گردیده است. در یک مقایسه تطبیقی با دیوار بدون پوشش گیاهی مشخص شد که سیستم‌های سبز عمودی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش دمای سطح خارجی دیوار و همچنین کاهش نوسانات دمایی دیوار دارند. به طوری که دیوار سبز مورد آزمایش در این پژوهش میانگین حداکثر دمای سطح خارجی را به میزان ۱۳ درجه در جهت جنوبی و حدود ۱۹ درجه در جهت غربی کاهش داده است.

کلمات کلیدی: سیستم‌های سبز عمودی، تاثیر حرارتی، کاهش دمای سطح

فهرست مطالب

ک	فهرست جداول
ل	فهرست اشکال
ن	فهرست نمودارها
۱	فصل ۱: کلیات پژوهش
۲	۱-۱ مقدمه
۴	۲-۱ سؤالات تحقیق
۵	۳-۱ ضرورت تحقیق
۵	۴-۱ روش تحقیق
۷	فصل ۲: مروری بر ادبیات پژوهشی
۸	۱-۲ مقدمه
۸	۲-۲ فواید
۸	۱-۲-۲ تأثیر دیوارهای سبز در محیطهای شهری
۱۱	۲-۲-۲ تأثیرات دیوارهای سبز در مقیاس ساختمان
۱۴	۳-۲ طبقه‌بندی سیستم‌های سبز عمودی
۱۵	۱-۳-۲ نماهای سبز، Green facade
۱۹	۲-۳-۲ دیوار زنده
۲۳	۴-۲ مقایسه دیوار سبز و بام سبز
۲۴	۵-۲ ملاحظات اجرایی
۲۴	۱-۵-۲ سیستم آبیاری
۲۴	۲-۵-۲ نگهداری و مراقبت
۲۵	۳-۵-۲ بستر و نوع گیاه
۲۶	۴-۵-۲ ساختار اجرایی

- ۲۷ waterproofing، سیستم ضد آب، ۵-۵-۲
- ۲۷ تغذیه گیاه، آبیاری و ۶-۵-۲
- ۲۸ دیوارها، ملاحظات ویژه برای ۷-۵-۲
- ۲۸ سبزی، اجرای دیوارهای سبزی، عوامل تأثیرگذار در انتخاب مکان نصب و ۶-۲
- ۲۹ سبزی، تاریخچه استفاده از دیوارهای سبزی، ۷-۲
- ۳۱ سبزی، پژوهش‌های انجام‌شده بر روی دیوارهای سبزی، ۸-۲
- ۳۲ تجربی، تحقیقات تجربی، ۱-۸-۲
- ۳۴ در نمافزار، تحقیقات مبتنی بر شبیه‌سازی در ۲-۸-۲
- ۳۷ ایران، پژوهش‌های انجام‌شده در ۳-۸-۲

فصل ۳: مواد و روشها

- ۳۹
- ۴۰ پژوهش، روش شناسی پژوهش، ۱-۳
- ۴۲ وضعیت و موقعیت، ۲-۳
- ۴۲ شهر شاهرود، بررسی اقلیمی شهر شاهرود، ۱-۲-۳
- ۴۶ دیوار سبزی، انتخاب سیستم دیوار سبزی، ۲-۲-۳
- ۴۶ گیاهان، انتخاب گیاهان، ۳-۲-۳
- ۴۹ کاشت، روند کاشت، ۴-۲-۳
- ۵۰ نصب و پارامترهای مرتبط، انتخاب مکان نصب و پارامترهای مرتبط، ۵-۲-۳
- ۵۲ دیوار، نحوه‌ی نصب پنل‌ها روی دیوار، ۶-۲-۳
- ۵۳ هوا، حفره هوا، ۷-۲-۳
- ۵۳ آبیاری، نحوه آبیاری، ۸-۲-۳
- ۵۳ دیوار سبزی، شرح سیستم دیوار سبزی، ۹-۲-۳
- ۵۴ پژوهش، شرح دستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش، ۱۰-۲-۳

فصل ۴: تجزیه و تحلیل یافته‌های پژوهش

- ۵۷
- ۵۸ برداری، بازهی دیتا برداری، ۱-۴

۵۸	۲-۴ فاکتورهای آب و هوایی
۵۸	۱-۲-۴ تابش آفتاب
۵۹	۲-۲-۴ سرعت باد
۶۰	۳-۲-۴ دمای هوا
۶۰	۳-۴ بررسی دمای سطح دیوارهای خارجی
۶۰	۱-۳-۴ دیوار مرجع
۶۲	۲-۳-۴ دیوار پشت دیوار سبز جنوبی
۶۳	۳-۳-۴ دیوار پشت دیوار سبز غربی
۶۴	۴-۳-۴ مقایسه دمای سطوح خارجی دیوار پشت دیوار سبز با دیوار مرجع در جهت جنوب
۶۷	۵-۳-۴ مقایسه دمای سطوح خارجی دیوار پشت جداره سبز با دیوار مرجع در جهت غرب
۷۱	۶-۳-۴ مقایسه دیوار جنوبی و غربی
۷۱	۴-۴ بررسی دمای هوا و سطوح دیوارهای داخلی
۷۱	۱-۴-۴ دمای هوای داخل اتاقک
۷۳	۲-۴-۴ دیوارهای مرجع
۷۴	۳-۴-۴ دیوار پشت دیوار سبز جنوبی
۷۵	۴-۴-۴ دیوار پشت دیوار سبز غربی
۷۷	۵-۴ بررسی حفره هوا
۷۹	۶-۴ تحلیل جهت شار حرارتی
۸۱	۷-۴ بررسی دمای سطح گیاهان

فصل ۵: نتیجه گیری

۸۵	
۸۶	۱-۵ نتیجه گیری
۸۷	۲-۵ توصیهها

۸۸

۹۲

پیوستها

مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: وضعیت UGI های انتخاب شده ۳۶
- جدول ۲-۲: حداکثر کاهش دما در مقایسه با وضعیت موجود در ارتفاع ۱,۵ متری برای هر گزینه ۳۷
- جدول ۱-۳: مشخصات دستگاههای مورد استفاده در پژوهش ۵۶
- جدول ۱-۴: حداکثر و حداقل و میانگین دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع جنوبی ۶۵
- جدول ۲-۴: حداکثر و حداقل و میانگین دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع جنوبی در بازهی ۵ روزه ۶۵
- جدول ۳-۴: حداکثر و حداقل و میانگین دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع غربی ۶۸
- جدول ۴-۴: حداکثر و حداقل و میانگین دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع غربی در بازهی ۵ روزه ۶۹
- جدول ۵-۴: مقایسه میانگین حداکثر دمای سطح خارجی دیوار جنوبی و غربی ۷۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: (راست) نمای سبز غیر مستقیم، (چپ) نمای سبز مستقیم [۵]..... ۱۶
- شکل ۲-۲: نمای سبز سنتی [9]..... ۱۶
- شکل ۳-۲: نمای سبز دو طرفه با سازهی حمایتی داربست مدولار [۲۵]..... ۱۷
- شکل ۴-۲: نمای سبز دو طرفه، سیستم شبکه توری سیمی [۲۵]..... ۱۸
- شکل ۵-۲: نمای سبز دو طرفه، سیستم کابلی [۲۵]..... ۱۸
- شکل ۶-۲: نمای سبز گلدانی [9]..... ۱۹
- شکل ۷-۲: انواع دیوار زنده، (راست) سیستم هیدروپونیک، (چپ) دیوار زنده مدولار [۵]..... ۲۰
- شکل ۸-۲: دیوار زنده مدولار [26]..... ۲۰
- شکل ۹-۲: جزئیات اجرایی دیوار زنده نمدی [۲۵]..... ۲۱
- شکل ۱۰-۲: دیوار زنده نمدی، (راست) بنایی در شهر آوینیون فرانسه، (چپ): موزه برانلی در پاریس [۲۵]..... ۲۱
- شکل ۱۱-۲: دیوار زنده فعال [۲۵]..... ۲۲
- شکل ۱۲-۲: دانشگاه دکسل..... ۲۳
- شکل ۱۳-۲: باغهای بابل [۲]..... ۳۰
- شکل ۱۴-۲: پارک یونیورسال در کالیفرنیا، دیوار سبز [۲۶]..... ۳۰
- شکل ۱۵-۲: پارک MFO در زوریخ با دیوارهای زنده [۲]..... ۳۱
- شکل ۱۶-۲: طراحی مدل در Design Builder: (a) ساختمان خوابگاه (b) ساختمان اداری و (c) ساختمان تحقیقاتی با دیوار سبز [۴۲]..... ۳۵
- شکل ۱۷-۲: (راست): مکانهای گیرنده در مدل، (چپ): سایت انتخاب شده مدل سازی در شهر کلمبو..... ۳۶
- شکل ۱-۳: پلان اتاقک مورد آزمایش و موقعیت دیوارهای سبز و محل نصب ترموکوپلهای حرارتی..... ۴۱
- شکل ۲-۳: مقطع دیوار اتاقک مورد آزمایش و محل نصب ترموکوپلهای حرارتی..... ۴۱
- شکل ۳-۳: (راست) دیوار سبز جنوبی، (چپ) دیوار سبز غربی..... ۴۲
- شکل ۴-۳: (راست) دیوار سبز غربی و جنوبی، (چپ) فضای داخلی اتاقک، دیوار غربی..... ۴۲
- شکل ۵-۳: میانگین حداکثر و حداقل دما در شاهرود [۴۷]..... ۴۳

- شکل ۳-۶: میانگین حداکثر و حداقل دما در ماه July [۴۷]..... ۴۳
- شکل ۳-۷: میانگین دما در روز ۲۰ ماه July [۴۷]..... ۴۴
- شکل ۳-۸: نمودار سالانه رطوبت در شاهرود..... ۴۴
- شکل ۳-۹: نمودار میزان سالانه سرعت باد در شاهرود [۴۷]..... ۴۵
- شکل ۳-۱۰: نمودار جهت باد در شاهرود [۴۷]..... ۴۵
- شکل ۳-۱۱: گیاه *crassula volkensii* [۴۹]..... ۴۸
- شکل ۳-۱۲: مراحل قلمه زدن و پرورش گیاه *crassula volkensii* در پنهلها..... ۵۰
- شکل ۳-۱۳: موقعیت مکان انتخابی..... ۵۲
- شکل ۳-۱۴: اتاقک آسانسور..... ۵۲
- شکل ۳-۱۵: مراحل نصب قابهای چوبی و پنهلها به دیوار..... ۵۳
- شکل ۳-۱۶: دیتالاگر حرارتی مدل Hobo UX 120- 014M..... ۵۵
- شکل ۳-۱۷: دیتالاگر حرارتی مدل Hobo UX 100-003..... ۵۵
- شکل ۳-۱۸: دوربین حرارتی HT مدل THT46..... ۵۶
- شکل ۴-۱: دیاگرام جهت شار حرارتی در دیوار غربی در روز ۱۶ July..... ۸۱
- شکل ۴-۲: تحلیل عکس دوربین حرارتی از دیوار جنوبی ساعت ۱۰:۳۰ روز ۲۰ July..... ۸۲
- شکل ۴-۳: تحلیل عکس دوربین حرارتی از دیوار غربی ساعت ۱۰:۳۰ روز ۲۰ July..... ۸۲
- شکل ۴-۴: تحلیل عکس دوربین حرارتی از دیوار جنوبی ساعت ۱۷:۳۰ روز ۲۰ July..... ۸۳
- شکل ۴-۵: تحلیل عکس دوربین حرارتی از دیوار غربی ساعت ۱۷:۳۰ روز ۲۰ July..... ۸۳

فهرست نمودارها

- نمودار ۱-۲: دسته بندی انواع سیستمهای سبز عمودی ۱۵
- نمودار ۱-۴: میزان تابش خورشید ۵۹
- نمودار ۳-۴: دمای هوا ۶۰
- نمودار ۴-۴: دمای سطح خارجی دیوار مرجع جنوبی و غربی و دمای هوا ۶۲
- نمودار ۵-۴: دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع جنوبی و دمای هوا ۶۳
- نمودار ۶-۴: دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع غربی و دمای هوا ۶۴
- نمودار ۷-۴: حداکثر دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع جنوبی در بازهی ۵ روزه ۶۶
- نمودار ۸-۴: دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز ، دیوار مرجع جنوبی و دمای هوا در روز ۱۸ July ۶۷
- نمودار ۹-۴: حداکثر دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع غربی در بازهی ۵ ۶۹
- نمودار ۱۳-۴: دمای سطح داخلی دیوار مرجع جنوبی و غربی و دمای هوای داخل ۷۴
- نمودار ۱۴-۴: مقایسه دما سطح خارج و دمای سطح داخل دیوار جنوبی ۷۵
- نمودار ۱۵-۴: مقایسه دما سطح خارج و دمای سطح داخل دیوار غربی ۷۶

فصل ۱: کلیات پژوهش

۱-۱ مقدمه

امروزه افزایش مهاجرت به شهرها و توسعه شهرنشینی، افزایش ساخت و ساز را به دنبال داشته است. علاوه بر این صنعتی شدن شهرها و مصرف بی‌رویه منابع انرژی اثرات مخرب زیست محیطی بسیاری را برای شهرها ایجاد کرده است. ۵۰ درصد از جمعیت جهان (۳,۴ میلیارد) در مناطق شهری سکونت دارند و پیش‌بینی می‌شود که رشد سریع شهرها تا سال ۲۰۳۰ به ۶۶ درصد (۵,۰ میلیارد) برسد. این جمعیت به فضاهای بیشتری برای زندگی و کار نیاز دارند. از این‌رو، مناطق شهری با جایگزینی پوشش‌های گیاهی و فضاهای سبز با ساختمان‌ها به سرعت در حال توسعه می‌باشند [1]. این تغییرات به شدت سریع و بعضاً برنامه‌ریزی نشده مشکلات زیست محیطی فراوان و مخربی را برای مناطق شهری در پی دارد. افزایش گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا، آلودگی صوتی، پدیده جزیره گرمایی و دیگر موارد، بخشی از اثرات مخرب این توسعه است که شهرها و ساکنین آن را تهدید می‌کند و در سال‌های اخیر به‌عنوان یک مسئله شهری مهم مورد توجه قرار گرفته است.

از سوی دیگر در گذشته یکی از اصول مهم در معماری ایران توجه به مسائل اقلیمی و آسایش ساکنان بوده است که این مسئله در معماری امروز بسیار کم اهمیت شده است و معماری امروز اغلب یک سبک ساختمان‌سازی را برای همه مناطق پیشنهاد می‌کند، بدون اینکه شرایط اقلیمی آن منطقه را در نظر بگیرد. امروزه طراحی ساختمان‌هایی که راندمان مناسبی در مصرف انرژی داشته باشند و کم‌ترین آسیب را به محیط زیست برسانند از مهم‌ترین رسالت‌های معماران محسوب می‌گردد.

در طراحی ساختمان‌ها عوامل و عناصر متعددی وجود دارد که ضمن توجه به مصرف بهینه انرژی سبب تأمین آسایش حرارتی ساکنان ساختمان‌ها نیز می‌گردد که نمای ساختمان‌ها نقش مهمی را در این زمینه ایفا می‌کند. علاوه بر تأثیر بسزای نمای ساختمان‌ها بر کیفیت محیط شهری، نما یکی از عناصر تأثیرگذار بر عملکرد حرارتی ساختمان‌ها به شمار می‌رود و ارتباط تنگاتنگی با کیفیت فضای داخلی و آسایش ساکنین دارد. ساختمان‌ها در طول روز در معرض تابش مستقیم آفتاب قرار دارند بدون اینکه سایه‌اندازی مناسب

روی جداره‌های آن‌ها صورت گیرد و اکثراً به علت استفاده از مصالح غیراصولی با مقاومت حرارتی پایین و عدم استفاده از عایق حرارتی، انتقال حرارت از دیوارها به فضای داخل به راحتی انجام گرفته و آسایش ساکنین را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در تابستان در طول روز ساختمان لحظه به لحظه گرم‌تر شده و ساکنین آن‌ها مجبورند برای تأمین آسایش خود از سیستم‌های تهویه مکانیکی استفاده کرده که مصرف زیاد انرژی را در پی دارد. "با کاهش روزافزون منابع انرژی و افزایش آلودگی‌های محیطی در شهرها طراحی پوسته‌ی ساختمان‌ها می‌بایست با به‌کارگیری حداکثر تکنولوژی‌های موجود در جهت خلق فضای مطلوب با مصرف کم‌ترین منابع تجدیدناپذیر انرژی باشد" [2].

در دهه‌های اخیر، ارتقای سطح آگاهی و دغدغه‌مندی نسبت به مسائل محیط‌زیست، سبب استفاده از معیارهای پایداری در طراحی سیستم‌های شهری و ساختمان‌ها شده است. در این میان با توجه جایگاه ویژه گیاهان در مناطق شهری توجه بسیاری از محققان و کارشناسان به سیستم‌های سبز عمودی معطوف گردیده است. عناصر گیاهی با قابلیت خنک کردن محیط، سایه‌اندازی، کاهش گرمای انعکاسی، تولید رطوبت و برودت تبخیری [3] اثرات مطلوبی بر محیط‌های شهری دارند و به‌کارگیری آن‌ها در سیستم‌های سبز عمودی راه‌حلی هوشمندانه در جهت کاهش معضلات زیست محیطی محسوب می‌گردد.

از مزایای سیستم‌های سبز عمودی در شهرها می‌توان به کاهش اثر پدیده جزایر گرمایی، کاهش آلودگی هوا، کاهش جذب انرژی خورشیدی و اشعه‌های منعکسه از خیابان و ساختمان‌های دیگر در شهرها، بهبود شرایط بیوکلماتیک در شهرها، کارکردهای روانی، افزایش رطوبت نسبی، جذب غبار و ذرات معلق در هوا، تمیز و زیبا ساختن منظر عمومی شهرها اشاره کرد [3], [2].

علاوه بر تأثیرات کارآمد سیستم‌های سبز عمودی بر محیط شهری، نباید از اثرات مهم این سیستم‌ها بر عملکرد حرارتی ساختمان‌ها غافل بود. استفاده از سیستم‌های سبز عمودی روش نوینی است که نقش اثرگذاری در کاهش انتقال حرارت به داخل ساختمان دارد. این سیستم بر روی دیوار خارجی مانند یک عایق عمل کرده و با سایه‌اندازی مناسب بر روی دیوار و همچنین کاهش دمای هوا به وسیله تعریق و تبخیر،

دمای سطح خارجی دیوار را کاهش داده و به تبع آن نوسانات دمایی در داخل ساختمان تعدیل می‌گردد و به آسایش حرارتی ساکنان کمک می‌کند. این امر کاهش مصرف انرژی را نیز به دنبال دارد. دسته‌بندی‌های متفاوت برای سیستم‌های سبز عمودی وجود دارد که در همه‌ی آن‌ها بستر کاشت نقش بارزی در تعیین مدل سیستم‌های عمودی دارد؛ اما به‌طور کلی این سیستم‌ها به دو دسته نماهای سبز و دیوارهای زنده تقسیم می‌شوند. در نماهای سبز بستر کاشت در روی زمین باقی می‌ماند و فقط گیاهان به‌صورت عمودی رشد کرده و سطوح عمودی را پوشش می‌دهند. ولی در دیوارهای زنده بستر کاشت به‌صورت عمودی در مقابل سطوح عمودی قرار می‌گیرد. در این روش امکان رشد گیاهان متنوع‌تر، امکان پوشش سریع سطوح بزرگ و رشد یکنواخت در امتداد سطح عمودی و امکان اجرا در ساختمان‌های بلند وجود دارد [4]. در این راستا در پژوهش حاضر تلاش می‌گردد ضمن ارائه تعریفی جامع از سیستم‌های سبز عمودی و بررسی انواع آن‌ها، طی یک آزمایش عملی تأثیرات حرارتی این سیستم‌ها بر ساختمان‌ها بررسی گردد.

۱-۲ سؤالات تحقیق

با توجه به اینکه سیستم‌های سبز عمودی یک راه‌حل مؤثر در بهبود عملکرد حرارتی ساختمان‌ها و آسایش حرارتی فضاها داخلی محسوب می‌گردند لذا در این پژوهش در پی یافتن پاسخ این پرسش‌ها هستیم که: سیستم‌های سبز عمودی چقدر در کاهش دمای دیوارهای خارجی مؤثر هستند؟ تأثیر سیستم‌های سبز عمودی بر میزان حرارتی که از دیوار به فضای داخلی انتقال پیدا می‌کند چگونه است؟

سیستم‌های سبز عمودی چه تأثیری بر کاهش دمای دیوارهای داخلی ساختمان دارد؟

تأثیر سیستم‌های سبز عمودی بر کاهش میزان مصرف انرژی ساختمان چگونه است؟

۳-۱ ضرورت تحقیق

در زمینه مباحث مربوط به پایداری ابتدا بام‌های سبز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت و طی تحقیقات وسیع نقش مؤثر آن‌ها به‌عنوان عایق حرارتی در پشت بام اثبات گردیده و مطالعات گسترده‌ای به جهت شناخت تکنولوژی‌ها و ساختارهای بام سبز انجام شده است. ولی با توجه به رشد بلند مرتبه‌سازی در شهرها تأثیر حرارتی سطوح عمودی به‌مراتب بیشتر از بام‌ها است و ایجاد جداره‌های سبز بر روی نمای ساختمان‌ها راهکار مؤثرتری محسوب می‌گردد؛ اما با وجود تأثیرات مهم سیستم‌های سبز عمودی بر کاهش مصرف انرژی، در این زمینه تحقیقات و اطلاعات کافی وجود ندارد. پژوهش‌های این حوزه شامل تحقیقات شبیه‌سازی و تحقیقات آزمایشگاهی و تجربی می‌گردد. تحقیقات تجربی امکان مطالعه دقیق‌تری را نسبت به تحقیقات شبیه‌سازی فراهم می‌آورد و نتایج آن امکان استفاده کاربردی از سیستم‌های سبز عمودی را ایجاد می‌کند، از این‌رو بیشتر حائز اهمیت است. اما متأسفانه در ایران انجام این‌گونه تحقیقات بسیار نادر است.

همچنین در تحقیقات تجربی شرایط آب و هوایی منطقه‌ای که پژوهش در آن انجام گرفته و نوع گیاهان استفاده شده در نتایج نهایی تحقیق تأثیر زیادی دارد و بعضاً نمی‌توان نتایج تحقیقات انجام گرفته در سایر کشورها را برای شرایط منطقه‌ای دیگر تعمیم داد؛ بنابراین با توجه به تحقیقات کم در این حوزه در ایران نیاز فراوانی برای شناخت همه‌جانبه این سیستم‌ها و عواملی که کارایی این سیستم‌ها را افزایش می‌دهد، احساس می‌شود.

۴-۱ روش تحقیق

به جهت تأثیرات فراوان سیستم‌های سبز عمودی و تحقیقات محدود در این زمینه، در این پژوهش در نظر داریم با انتخاب سیستم دیوارهای زنده، تأثیر سیستم‌های سبز عمودی بر عملکرد حرارتی ساختمان را مورد آزمایش و بررسی قرار دهیم. روند جمع‌آوری اطلاعات به این‌گونه است که در یک بازه‌ی حدوداً یک ماهه

در تیرماه سال ۹۸ در شهرستان شاهرود یک دیوار زنده با گیاهان بومی مورد آزمایش قرار گرفته و اطلاعات دمایی و رطوبتی موردنظر توسط دیتالاگرها اندازه‌گیری شده و این اطلاعات با اطلاعات دمایی و رطوبتی ثبت شده از یک دیوار مرجع (دیوار بدون پوشش سبز) مقایسه می‌گردد. نهایتاً با تحلیل و بررسی نمودارها و جداول به دست آمده نتایج حاصل بیان می‌گردد و با توجه به نتایج برای بهبود شرایط، راهکار و پیشنهادهای منطقی ارائه می‌گردد.

فصل ۲: مروری بر ادبیات پژوهشی

۱-۲ مقدمه

با توجه به جایگاه ویژه سیستم‌های سبز عمودی در دستیابی به اهداف پایداری، پژوهش در این زمینه جهت شناخت هرچه بیشتر فواید و تکنولوژی‌های جدید در این حوزه واجد اهمیت است. لذا در این فصل تلاش می‌گردد به روش کتابخانه‌ای و با استناد به پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، ابتدا اطلاعات جامع و کاملی در راستای بیان فواید و تاثیرات این سیستم‌ها بر محیط‌های شهری و ساختمان‌ها ارائه گردد و در ادامه ضمن معرفی انواع سیستم‌های سبز عمودی، ملاحظات اجرایی و فناوری‌های نوین در این حوزه بیان گردد.

۲-۲ فواید

به‌طور کلی تأثیرات و مزایای دیوارهای سبز را می‌توان در دو مقیاس شهری و ساختمان‌ها بررسی کرد.

۱-۲-۲ تأثیر دیوارهای سبز در محیط‌های شهری

در مقیاس شهری دیوارهای سبز از جهات و جنبه‌های گوناگونی در محیط‌های شهری تأثیرگذار هستند که از جمله‌ی این تأثیرات می‌توان به تأثیرات زیست‌محیطی، تأثیرات اجتماعی، تأثیرات اقتصادی و... اشاره کرد.

۱-۱-۲-۲ تأثیرات زیست‌محیطی

در سال‌های اخیر به دلیل فواید بی‌شمار سیستم‌های سبز عمودی در بهبود شرایط زیستی و محیطی در مناطق شهری از جمله کاهش گازهای گلخانه‌ای، کاهش آلودگی هوا، کاهش آلودگی صوتی، کاهش پدیده جزیره‌ی گرمایی، بهبود میکرو اقلیم شهری، کاهش ذرات گردوغبار، کاهش جذب انرژی خورشیدی [3] و غیره این سیستم‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

- کاهش آلودگی هوا

سقف‌ها و دیوارهای سبز می‌توانند به حذف آلاینده‌های گازی از هوا کمک کنند. در مقیاس وسیع، آن‌ها می‌توانند به کاهش کلی گرمای محیطی (افزایش تابش گرما از مصالح ساختمانی با جرم حرارتی بالا) کمک کنند. در نتیجه کیفیت هوا افزایش می‌یابد؛ زیرا آلودگی‌های فوتوشیمیایی کمتر در دمای پایین هوا تولید می‌شود. در محیط‌های داخلی، گیاهان نشان داده‌اند که ظرفیت قابل توجهی برای کاهش ترکیبات آلی سبک از هوا دارند. فرش‌ها و سایر تجهیزات نرم‌افزاری و اداری از منابع آلاینده‌های گاز طبیعی هستند؛ درج پوشش گیاهی مانند دیوار سبز می‌تواند به بهبود کیفیت هوای محیط داخلی کمک کند [5].

اجرای سیستم‌های سبز بر روی دیوارهای ساختمان با مصالح معمول (بتن، آجر و غیره) می‌تواند یک ابزار مفید برای مقابله با آلودگی هوا (محلی) باشد. سیستم‌های سبز عمودی دارای پتانسیل بالاتری برای جذب ذرات در یک ساختمان نسبت به سقف سبز است. به‌عنوان مثال نماهای سبز در یک ساختمان مکعبی چهار برابر سقف است [6]. در پژوهشی که توسط B. A. Currie و همکارش در شهر تورنتو انجام شده است تأثیر سقف‌های سبز و دیوارهای سبز بر آلودگی هوا بررسی گردیده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که به‌طور گسترده افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصدی سطح سقف‌های سبز در ساختمان‌های مرکز شهر به‌طور قابل توجهی به سلامت اجتماعی، مالی و محیطی همه شهروندان کمک می‌کند [7]. همچنین در پژوهشی دیگر M. Ottel  و همکاران اثرات فیلترکردن ذرات معلق در هوا و بهبود کیفیت هوا به‌وسیله سبزی‌سازی نما را اندازه‌گیری کرده‌اند [6].

- کاهش پدیده جزیره گرمایی

پدیده جزیره گرمایی (UHI) پدیده‌ای است که باعث اختلاف دما بین شهرها و مناطق اطراف روستایی و حومه آن می‌شود. در مناطق شهری به علت کاهش مناطق سبز و کاهش سایه‌ها و همچنین محدودیت گردش هوا در دره‌های شهری و تولید بالای زباله، حرارت از سیستم‌های خنک‌کننده، وسایل موتوری و پروسه‌های صنعتی به دام می‌افتد و جزیره گرمایی ایجاد شده بر شرایط آسایش در فضای باز تأثیرات منفی

می‌گذارد [8]. از طرفی سطوح سخت در محیط‌های شهری مانند بتن، آجر، شیشه، آسفالت و سقف، که دارای جرم حرارتی بالایی هستند، گرمای خورشید را در طول روز جمع کرده و آن را به آرامی به اتمسفر می‌رسانند. این امر به افزایش دمای محیط در شهرها کمک می‌کند و باعث ایجاد توده‌هایی با حجم زیاد و پایدار در برابر هوای گرم (جزایر گرمایی شهری) می‌شود. درجه حرارت را می‌توان به وسیله‌ی پوشش سقف یا دیوار با یک لایه پوشش گیاهی که سبب سایه‌اندازی بر مصالح ساختمانی می‌شود کاهش داد. انرژی خورشید که در غیر این صورت حرارت سقف یا سطح دیوار را افزایش می‌دهد، در این روش در فرایند تبخیر تعرق بکار می‌رود که منجر به از دست دادن گرما نهان می‌گردد و باعث کاهش دمای هوا می‌شود. استراتژی شهری برای اجرای سقف‌های سبز، دیوارها و نماها می‌تواند به کاهش برخی عواقب منفی جزایر گرمایی شهر کمک کند. در این بین باید به انتخاب مناسب گیاه و عمق بستر برای به حداکثر رساندن پتانسیل خنک‌کننده توجه شود [5].

- کاهش آلودگی صوتی

با توجه به خواص عایق بودن سیستم‌های سبز می‌توان به این موضوع پی برد که پوشش گیاهی می‌تواند سطوح صدا را به سه روش کاهش دهد. اول، صدا می‌تواند توسط عناصر گیاه مانند تنه، شاخه و برگ منعکس یا پراکنده شود. به‌عنوان مکانیسم دوم، جذب توسط گیاهان وجود دارد. این اثر را می‌توان به ارتعاشات مکانیکی عناصر گیاهی ناشی از امواج صوتی نسبت داد که منجر به تسریع تبدیل انرژی صدا به گرما می‌شود. به‌عنوان مکانیسم سوم، می‌توان ذکر کرد که سطح صدا می‌تواند توسط تداخل امواج صوتی با لایه‌های خاکی کاهش یابد. از مطالعاتی که ظرفیت عایق صوتی سیستم‌های سبز عمودی (VGS) را در نظر می‌گیرند، می‌توان نتیجه گرفت که این سیستم‌ها به‌طور مثبت به بهبود آکوستیک ساختمان و در نهایت شهر کمک می‌کنند [9].

۲-۱-۲-۲ تأثیرات اجتماعی

ویژگی سرزندگی در شهرها به‌طور فزاینده‌ای به دسترسی به فضای باز سبز بستگی دارد. دیوارهای سبز می‌توانند سرزندگی و طراوت را در شهرها افزایش دهند و امکان تولید غذا، تفریح، آرامش و سرمایه‌گذاری‌های تجاری را فراهم آورند. در مناطق متراکم و در حال رشد سریع شهر، سهم سقف‌ها و دیوارهای سبز در فضای سبز به‌طور کلی نباید کم ارزش شمرده شود. به‌خصوص در مناطق درون شهر که اکثر فضای اشغال شده به‌وسیله‌ی ساختمان‌ها و زیرساخت‌های مرتبط است و امکان ایجاد پارک‌ها و باغ‌های جدید بسیار محدود است [5].

در مقیاس شهر، سقف‌های سبز و دیوارهای سبز با ایجاد سلامت روان‌شناختی از طریق حضور پوشش گیاهی، بدون اشغال هر فضایی در سطح خیابان به افزایش پوشش گیاهی در محیط شهری کمک می‌کند [4]. علاوه بر این کاشت عمودی به بهبود سلامت و رفاه و حفظ تنوع زیستی شهری کمک می‌کند [8].

الینز و همکاران امکان استفاده از دیوارهای سبز را به‌عنوان وسیله‌ای برای بهبود نه‌تنها زیبایی‌شناسی بلکه به‌عنوان یک اکوسیستم در شهر پیشنهاد می‌کنند تا گردشگری بیشتری را به یک منطقه خاص تحت آب‌وهوای مدیترانه جذب کند [10].

۲-۱-۲-۳ تأثیرات اقتصادی

این سیستم‌ها با افزایش ارزش املاک مزایای مناطق شهری را افزایش می‌دهند [4]. صاحبان ساختمان‌ها و فروشندگان به‌طور فزاینده‌ای سقف‌ها و دیوارهای سبز را نصب می‌کنند تا یک منطقه متفاوت را به وجود آورند و بازده تجاری و جاذبه بصری را افزایش دهند و ساختمان را به یک نقطه عطف محلی تبدیل کنند [5].

۲-۲-۲ تأثیرات دیوارهای سبز در مقیاس ساختمان

دیوارهای سبز تأثیرات بی‌شماری بر ساختمان‌ها و عملکرد حرارتی آن‌ها دارد. این سیستم‌ها در جداره‌ی ساختمان مانند یک عایق حرارتی مؤثر عمل کرده و با کاهش انتقال حرارت به داخل، آسایش حرارتی

ساکنین را در پی دارد. همچنین باعث کاهش نوسان دمایی سطح دیوار شده و سرعت بادهای سطحی بر روی دیوار را کاهش می‌دهد [3].

۲-۲-۱ بهبود عملکرد حرارتی و صرفه‌جویی

به‌منظور استفاده از سیستم‌های عمودی سبز به‌عنوان سیستم‌های صرفه‌جویی انرژی منفعل باید چهار مکانیسم اساسی مورد توجه قرار گیرد: جلوگیری از تابش خورشیدی به دلیل سایه تولیدشده توسط پوشش گیاهی، عایق حرارتی ارائه‌شده توسط پوشش گیاهی و بستر، سرمایش تبخیری که ناشی از تبخیر سطح گیاهان و بستر است و مانع اثر باد [11].

- اثر سایه

مزیت قابل توجه سقف‌ها و دیوارهای سبز، در توانایی آن‌ها در کاهش نیازهای ساختمان و گرمایش است. دیوارهای سبز می‌توانند دما را به‌طور مستقیم با سایه انداختن سطح ساختمان کاهش دهند [4]. اثر سایه، که احتمالاً مهم‌ترین هدف برای صرفه‌جویی در انرژی است، اساساً شامل جلوگیری از تابش خورشید بر دیوار توسط گیاهان می‌باشد [9]. اکبری و همکاران نشان داد که سایه درختان در دو خانه تحت آزمایش، صرفه‌جویی انرژی فصلی ۳۰ درصدی را به خود اختصاص داده‌اند که به‌طور متوسط صرفه‌جویی روزانه ۳,۶ و ۴,۸ کیلووات ساعت در روز است [12].

در ارتباط با نماهای سبز سنتی، kohler دریافت که مقدار این اثر سایه بستگی به چگالی شاخ و برگ دارد. Ivy شاخصی است که تأثیر حداکثر خنک‌کننده را در مقایسه با سایه درخت مقایسه می‌کند. در این پژوهش تفاوت ۳ درجه سانتی‌گراد در دمای اتاق در فصل زمستان به دست آمد [14], [13]. به‌تازگی مطالعات اخیر نشان داده است که گیاهان بالارونده می‌توانند پتانسیل خنک‌کنندگی در سطح ساختمان را فراهم کنند که این مسئله در طول دوره‌های گرم سال بسیار مهم است. از این رو، علاوه بر کاهش خسارات جوی حرارتی، دمای حداکثر اساساً پایین‌تر است [16], [15].

-عایق حرارتی

دیوارهای سبز می‌توانند تغییراتی در شرایط (دما و رطوبت) محیط فضای بین دیوار سبز و دیوار ساختمان ایجاد کنند. این لایه هوا می‌تواند یک اثر عایقی ایجاد کند. تجدید هوا در این فضا، تراکم شاخ و برگ و طراحی دهانه‌های نما باید در طراحی در نظر گرفته شود. برای دیوارهای زنده، ظرفیت عایق به ضخامت بستر کاشت بستگی دارد [11]. Hoyano گزارش داد که یک دیوار زنده می‌تواند انتقال انرژی به یک دیوار ساختمان را ۰,۲۴ کیلووات ساعت در مترمربع کاهش دهد [17]. توزیع شار حرارتی در یک دیوار غربی در یک ساختمان دو طبقه که با یک نوع پیچک ضخیم پوشانده شده است، به صورت آزمایشی برای بررسی اثر خنثی آجری اندازه‌گیری شد. دیوار سبز در یک روز تابستان موجب کاهش بار سرمایشی به میزان ۲۸ درصد از طریق دیوار غربی شد [18].

-سرمایش تبخیری

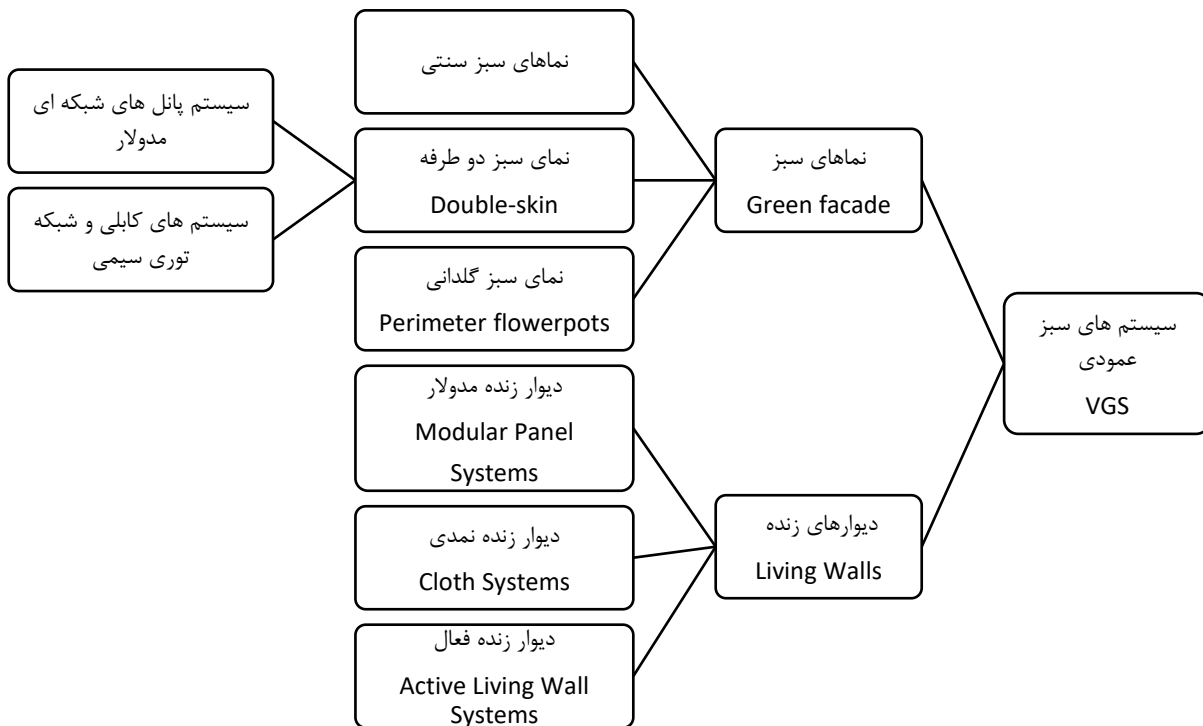
فرآیند تبخیر و تعرق گیاهان نیاز به انرژی دارد. این فرآیند فیزیکی به اصطلاح "سرمایش تبخیری"، نشان‌دهنده 2450 J برای هر گرم از آب تبخیر شده است. این سرد شدن تبخیر برگ بستگی به نوع گیاه و قرار گرفتن آن‌ها در معرض خورشید دارد. همچنین شرایط آب و هوایی تأثیر می‌گذارد. محیط خشک یا اثر باد می‌تواند تبخیر و تعرق گیاهان را افزایش دهد. در مورد دیوارهای زنده، خنک‌کننده تبخیری از سطح بستر گیاه مهم خواهد بود. در این حالت رطوبت بستر عامل مهمی است [11]. در آزمایش 'Bioshader' نشان داده شده است که سطح رطوبت در یک دفتر اداری با نمای سبز به‌طور مداوم بالاتر از دفتر اداری بدون این مکانیسم است و بین ماه ژوئیه تا اکتبر رطوبت ۵ تا ۱۴٪ بالاتر است که این مسئله نشان می‌دهد که استفاده از پوشش گیاهی رطوبت بیشتری را به محیط داخلی منتقل می‌کند [19], [20]. با توجه به آزمایش‌های وانگ از آنجا که عایق مورد استفاده در خارج از ساختمان بسیار مؤثرتر از عایق داخلی است -به‌خصوص در ماه‌های تابستان- سیستم‌های سبز عمودی می‌توانند اثر دو برابری کاهش انرژی ورودی خورشیدی از طریق سایه و کاهش جریان گرما به داخل ساختمان را داشته باشند [21], [22].

-اثر باد

سیستم‌های عمودی سبز ساختمان‌ها به‌عنوان مانع از باد عمل می‌کنند و در نتیجه تأثیر باد بر روی نمای ساختمان را مسدود می‌کنند. این اثر بستگی به چگالی و نفوذپذیری شاخ و برگ و همچنین جهت نما و جهت و سرعت باد دارد [11]. یکی از راه‌های افزایش بهره‌وری انرژی در یک ساختمان مسدود کردن باد است. در زمستان، باد سرد نقش مهمی در کاهش دمای داخل ساختمان‌ها دارد. حتی در ساختمان‌های هوابندی شده، باد اثربخشی عایق را کاهش می‌دهد. Dinsdale و همکاران نشان داد که محافظت از ساختمان باد سرد با پوشش گیاهی (سقف سبز و دیوارهای سبز) تقاضای حرارت را ۲۵ درصد کاهش می‌دهد [23]. از سوی دیگر، با توجه به استفاده از پوشش گیاهی به‌عنوان یک اصلاح‌کننده اثر باد در ساختمان‌ها، باید مراقب بود که این سیستم‌ها در تابستان مانع تهویه نباشند و در زمستان گردش هوا ایجاد نکند [24].

۲-۳ طبقه‌بندی سیستم‌های سبز عمودی

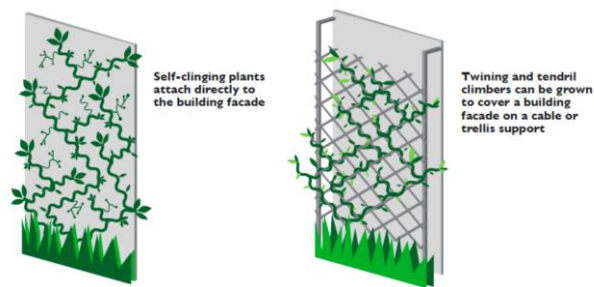
امروزه انواع مختلفی از سیستم‌های سبز عمودی وجود دارد. از دیوارهای سبزی که به وسیله گیاهان بالارونده و چسبیده به دیوار تشکیل شده تا سیستم‌های جدیدی که به وسیله مواد و فن‌آوری‌های پیشرفته برای حمایت از گیاهان وسیع‌تر ایجاد شده است، همه را می‌توان جزو سیستم‌های سبز عمودی به حساب آورد. تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای این سیستم‌ها وجود دارد که بستر کاشت عامل تعیین‌کننده و مهمی در همه‌ی تقسیم‌بندی‌ها محسوب می‌گردد. بستر کاشت مکانی است که ریشه‌های گیاه در آن قرار می‌گیرد و گیاه با مواد مغذی را تغذیه می‌کند. در یک تقسیم‌بندی کلی سیستم‌های سبز عمودی را می‌توان در دو دسته‌ی اصلی تقسیم کرد: نماهای سبز و دیوارهای زنده. (نمودار ۱-۲)



نمودار ۱-۲: دسته بندی انواع سیستم های سبز عمودی

۱-۳-۲ نماهای سبز، Green facade

نماهای سبز سیستم‌هایی هستند که در آن گیاهان بالارونده یا بوته‌های آویزان به‌طور مستقیم یا با استفاده از ساختارهای پشتیبانی ویژه، برای پوشش منطقه مورد نظر، توسعه می‌یابد (شکل ۱-۲). گیاهان را می‌توان به‌طور مستقیم در زمین، در پایه ساختار و یا در گلدان، در ارتفاع‌های مختلف از نما کاشت [9]. در مقالات و پژوهش‌های انجام‌شده دسته‌بندی‌های مختلفی برای نماهای سبز ذکر شده است. Maria Manso و همکارانش نماهای سبز را به دو دسته نمای سبز مستقیم و نمای سبز غیرمستقیم تقسیم می‌کنند [4]. اما Gabriel Pérez و همکارانش در طبقه‌بندی که از نماهای سبز انجام می‌دهند آن‌ها را به سه دسته‌ی نمای سبز سنتی، نمای سبز دوطرفه و نمای سبز گلدانی تقسیم می‌کند [9].



شکل ۱-۲: (راست) نمای سبز غیر مستقیم. (چپ) نمای سبز مستقیم [۵]

۱-۱-۳-۲ نمای سبز سنتی

نمای سنتی سبز به عنوان یک سیستم سبز سازی مستقلی در نظر گرفته شده است که شامل استفاده از گیاهان بالارونده خودرو است که به طور مستقیم در زمین ریشه دارند و گیاه مستقیماً به دیوار متصل می شود [4] (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲: نمای سبز سنتی [9]

۲-۱-۳-۲ نماهای سبز دوطرفه

در مورد نماهای سبز دوطرفه، سیستم‌هایی هستند که در آن‌ها از داربست‌های مدولار، سیم‌کشی و یا ساختار مش مشبک به عنوان ساختار حمایتی استفاده شده است. داربست‌های مدولار، مدول‌های شبکه‌ای بسیار سبک فلزی هستند که بر روی دیوار ساختمان یا سازه‌های مستقل نصب می‌شوند که گیاهان بالارونده را حمایت می‌کنند [9].

سیستم پانل‌های شبکه‌ای مدولار، سبک و از جنس شبکه استیل گالوانیزه بوده و به گونه‌ای طراحی شده است که نمای سبز را با فاصله‌ای از سطح دیوار نگه می‌دارد. پانل‌های مشبک، به صورت مدولار در کنار

هم قرار گرفته و می‌توانند سطح بزرگی را بپوشانند. به این پانل‌ها همچنین می‌توان فرم داد تا اشکال و منحنی‌های موردنظر را شکل دهند. این سیستم مدولار به دلیل سختی و صلابت پانل‌ها، می‌تواند بین قسمت‌های مختلف ساختمان پل زده و یا به‌عنوان دیواره‌های مستقل بکار گرفته شود [25]. (شکل ۲-۳)



شکل ۲-۳: نمای سبز دو طرفه با سازه‌ی حمایتی داربست مدولار [۲۵]

در ساختارهای سیمی از سیستم کابل‌های فولادی به‌منظور لنگرگاه‌ها، جداسازها و سایر ویژگی‌هایی که برای ساختن ساختار سبک حمایتی برای گیاهان بالارونده لازم است، استفاده می‌شود. ساختار مش یک ساختار بسیار سبک است که برای پشتیبانی گیاهان بالارونده، ساخته‌شده با مش فولادی متصل به دیوار ساختمان و یا به ساختار ساختمان است [9] (شکل ۲-۴).

سیستم‌های کابلی و شبکه توری یا به‌تنهایی و یا به‌صورت تلفیقی برای ایجاد نمای سبز به کار می‌روند. شبکه‌های سیمی اغلب برای نگهداری از گیاهانی که رشدی آهسته داشته و به پشتیبانی بیشتری نیاز دارند، کاربرد دارند. سیستم‌های شبکه توری انعطاف‌پذیرتر از سیستم کابلی بوده و قابلیت طراحی متنوع‌تری را دارند. سیستم کابلی برای نگهداری از گیاهان رونده‌ی پر شاخ و برگ و با رشد سریع بکار می‌رود. سیستم کابلی از یک سری توپی، غالباً از جنس فولاد ضدزنگ، تشکیل شده که قابلیت عبور کابل‌ها و کشش و انقباض آن‌ها از میان یکدیگر را جهت شکل‌گیری شبکه مورد نظر فراهم کرده، تکیه‌گاه و حامل گیاه مورد نظر می‌باشد. توپی‌ها به کمک پیچی که از میان سوراخ مرکزی توپی عبور می‌کنند به سطح دیوار نصب می‌شوند. نحوه قرارگیری و فاصله بین توپی‌ها بر روی دیوار مطابق با طرح خاص انتخابی خواهد بود (شکل ۲-۵). با این حال فاصله‌های انتخابی با توجه ویژه نسبت به نوع گیاهان شکل می‌گیرد. به‌عنوان مثال، حتی برای گیاهان بالارونده‌ی بسیار نیرومندی چون ویتیس، فضای بیش از ۵۰ سانتی

متر فاصله بین تویی‌ها توصیه نمی‌شود. در مورد گیاهان بالارونده‌ی با نیروی متوسط مانند کلماتیس، فاصله‌ای معادل ۱۵ الی ۳۰ سانتی‌متر توصیه می‌شود. کابل‌ها می‌توانند به‌صورت افقی، عمودی و یا ضربدری به هم متصل شوند و اشکال متنوعی را به وجود آورند. نصب این نوع نمای سبز بسیار آسان است و افراد عادی بدون نیروی متخصص می‌توانند آن را بر روی دیواره منزل و بالکن‌ها پیاده کنند [25].



شکل ۲-۴: نمای سبز دو طرفه. سیستم شبکه توری سیمی [۲۵]



شکل ۲-۵: نمای سبز دو طرفه. سیستم کابلی [۲۵]

۳-۱-۳-۲ نماهای سبز گلدانی

هنگامی که بوته‌های معلق در اطراف ساختمان به‌عنوان بخشی از ترکیب نما برای تشکیل یک نمای سبز کاشته شده است، نماهای سبز گلدانی ایجاد می‌شود. [۹] (شکل ۲-۶)

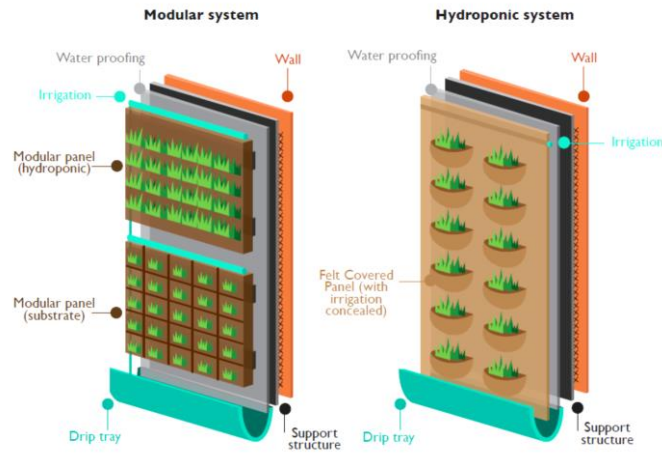


شکل ۲-۶: نمای سبز گلدانی [9]

۲-۳-۲ دیوار زنده

در این سیستم‌ها به‌وسیله‌ی تجهیزات ویژه، بستر کاشت در جلوی دیوار و به موازات آن قرار می‌گیرد. دیوارهای زنده ایجاد دیوارهای سبز را در ساختمان‌های بلند، پوشش سریع سطوح بزرگ و رشد یکنواخت در امتداد سطح عمودی ممکن می‌سازند. از دیگر مزایای دیوارهای زنده می‌توان به اجرا در مناطق بالاتر و سازگاری با انواع ساختمان‌ها همچنین ادغام انواع مختلفی از گونه‌های گیاهی اشاره کرد [4]. سیستم‌های دیوار زنده شامل پانل‌های از قبل کاشته شده، مدول‌های عمودی یا پرده‌های کاشته شده می‌باشد. این پانل‌ها می‌توانند از پلاستیک، پلی‌استایرن، پلی‌استر، پارچه‌های مصنوعی، خاک رس، فلز و بتن ساخته شده و از تنوع و تراکم زیاد گونه‌های گیاهی پشتیبانی نمایند. دیوارهای زنده به دلیل تنوع و تراکم پوشش گیاهی، به حفاظت بیشتری نسبت به نمای سبز نیاز دارند. این سیستم از انواع گونه‌های گیاهی مانند ترکیبی از پوشش گیاهی، گل چند ساله، درختچه‌های کوچک و سرخس و غیره پشتیبانی می‌کند و در محیط‌های مختلف آب و هوایی بسیار خوب عمل می‌کند. با این حال، انتخاب گونه‌هایی که ممکن است با شرایط آب و هوایی غالب سازگار باشد، نگهداری سیستم را آسان می‌کند [26].

دیوارهای زنده را می توان به سه دسته دیوار زنده مدولار، دیوار زنده نمدی (هیدروپونیک) و دیوار زنده فعال تقسیم کرد. (شکل ۲-۷)



شکل ۲-۷: انواع دیوار زنده. (راست) سیستم هیدروپونیک. (چپ) دیوار زنده مدولار [۵]

۱-۲-۳-۲ دیوار زنده مدولار

انواع مختلفی از پانل های مدولار وجود دارد. بر اساس مواد ساختاری، آن ها از فولاد گالوانیزه، پلی اتیلن یا پلاستیک های بازیافتی ساخته شده اند. بستر کاشت در داخل پانل یا مدول می تواند بستر آلی یا ترکیبات معدنی باشد. مواد آلی به وسیله تأمین مواد مغذی و افزایش ظرفیت نگهداری آب از رشد گیاهان حمایت می کنند. فیبرهای آلی (کوکوپیت) یا خز ه شایع ترین هستند [27] (شکل ۲-۸)



شکل ۲-۸: دیوار زنده مدولار [26]

۲-۲-۳-۲ دیوار زنده نمدی

دیوار زنده نمدی، توسط پاتریک بلان (Patrick Blanc)، گیاه شناس معروف فرانسوی پایه گذاری شده است. این نوع دیوار ترکیبی از دولایه منسوج صنعتی (نوعی نمد) است که ریشه گیاهان بین آن قرار می گیرند (شکل ۲-۹). یک لایه نازک پی وی سی ضد آب در پشت این لایه نمدی نصب شده و از انتقال رطوبت به دیوار جلوگیری می کند. این دیوار به وسیله ی قاب نگهداری می شود و مواد غذایی از طریق سیستم آبیاری (روش هیدروپونیک) از بالا به پایین پخش می شود. [25] (شکل ۲-۱۰)



شکل ۲-۹: جزئیات اجرایی دیوار زنده نمدی [۲۵]



شکل ۲-۱۰: دیوار زنده نمدی. (راست) بنایی در شهر آوینیون فرانسه. (چپ): موزه برانلی در پاریس [۲۵]

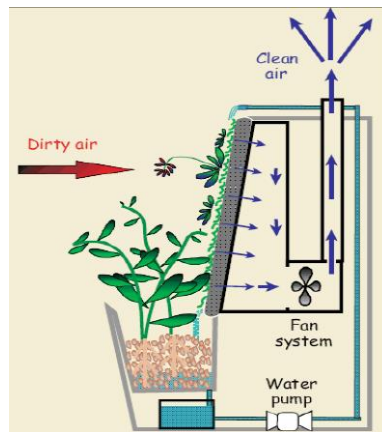
۲-۲-۳-۳ دیوار زنده فعال

از دیگر سیستم های جالب، دیوار زنده فعال (ALW^۱) است که با ایجاد جریان هوا از طریق دیواره زنده باعث بیوفیلتراسیون این هوا می شود. درعین حال، سرد شدن این هوا به علت تبادل آدیاباتیک بین هوا و گیاهان صورت می گیرد. این مزایای مرتبط با کیفیت محیط زیست و عملکرد انرژی مرتبط با استفاده از آن

۱. Active Living Wall

را افزایش می‌دهد. ALW هنگامی که با تهویه مطبوع و تأسیسات تهویه مطابقت دارد، به‌طور خاص مؤثر است [27].

در این سیستم، از هوای تولیدشده توسط گیاهان در سیستم تهویه هوای ساختمان استفاده می‌شود؛ شاخ و برگ گیاهان مونوکسید و دی‌اکسید کربن را جذب می‌کنند، موجودات ذره‌بینی ریشه، ترکیبات آلی و ذرات معلق در هوا را می‌زدایند و فرآیند طبیعی گیاهان هوای تازه تولید می‌کند که از طریق یک هواکش درون سیستم کشیده شده و سپس داخل ساختمان پخش می‌شود. در این سیستم ریشه گیاه بین دو لایه منسوج صنعتی قرار می‌گیرد و سیستم کاشت به‌صورت هیدروپونیک بوده و تغذیه آن‌ها از طریق آب غنی‌شده با مواد مغذی انجام می‌گیرد (شکل ۲-۱۱) [25].



شکل ۲-۱۱: دیوار زنده فعال [۲۵]

یک نمونه مشهور از یک بیوفیلتر فعال در دیوار عمودی پنج طبقه در ساختمان مجتمع پاپاداکیس در دانشگاه دکسل در ایالات متحده وجود دارد (شکل ۲-۱۲). این دیوار بزرگ از گیاهان گرمسیری به‌عنوان یک فیلتر زنده برای جذب ترکیبات آلی فرار از هوا کار می‌کند [27].



شکل ۲-۱۲: دانشگاه دکسل

۲-۴ مقایسه دیوار سبز و بام سبز

اساساً دو راه اصلی برای ادغام پوشش گیاهی در یک ساختمان وجود دارد: سقف‌های سبز و نماهای سبز. استفاده از سقف‌های سبز یک عمل نسبتاً رایج در سراسر جهان است. مطالعات زیادی روی طبقه‌بندی سیستم‌های گسترده و متمرکز این سیستم‌ها انجام شده است و تولیدکنندگان فراوانی برای این سیستم‌ها وجود دارد. درحالی‌که، در مورد سیستم‌های سبز عمودی در ساختمان‌ها، درباره‌ی سیستم‌های سازنده، گونه‌های مورد استفاده و... تحقیقات و مطالعات پراکنده‌ای صورت گرفته است. لازم به ذکر است که از نظر معماری، استفاده از یک فضای مسطح مانند سقف ساختمان برای این سیستم‌ها آسان‌تر بوده درحالی‌که در مورد نماهای سبز، مشکل اجرای آن در سطوح عمودی، می‌تواند علت استفاده کم از آن‌ها باشد؛ اما از روی دیگر، سبز کردن دیوارهای یک ساختمان به‌طور بالقوه بر محیط ساختمان از سقف‌های سبز تأثیر بیشتری می‌گذارد، زیرا سطح دیوارهای ساختمان همیشه بیشتر از سقف است. در ساختمان‌های بلند این میزان می‌تواند تا ۲۰ برابر سطح سقف باشد [9].

۲-۵ ملاحظات اجرایی

۲-۵-۱ سیستم آبیاری

سیستم آبیاری عامل مهمی در موفقیت بر سقف‌ها و دیوارهای سبز محسوب می‌گردد. روش‌های مختلفی برای آبیاری سیستم‌های سبز از جمله آبیاری ساده دستی، سیستم آبیاری اتوماتیک، سیستم آبیاری هوشمند و انواع دیگر وجود دارد که انتخاب این سیستم‌ها به نوع گونه گیاهی کاشته شده و بودجه تعریف شده برای ساخت سیستم‌های سبز بستگی دارد [2].

بسیاری از دیوارهای سبز تقاضای آب بالایی دارند. بهتر است که منابع آبی غیرقابل شرب برای آبیاری در نظر گرفته شود. خصوصاً برای سیستم‌هایی که نیاز به آب زیادی دارند. استفاده مجدد از آب آبیاری در تأسیسات سقف و دیوار سبز، مفید است. در این شرایط ضد عفونی و تصفیه آب روان‌آب لازم است؛ زیرا بازیافت مداوم آب تصفیه نشده می‌تواند بیماری ناشی از خاک را گسترش دهد [5].

۲-۵-۲ نگهداری و مراقبت

در طراحی و برنامه‌ریزی یک سقف یا دیوار سبز باید درک درستی از نحوه حفظ و نگهداری سیستم‌ها وجود داشته باشد. صاحبان ساختمان‌ها و مدیران املاک باید بدانند که چه چیزی در حفظ سقف یا دیوار نقش دارد و باید در مدیریت آن متعهد باشند.

سیستم‌های ایجاد شده نباید از مهارت‌ها، فن‌آوری‌ها و منابع کسانی که مسئولیت نگهداری از آن‌ها را بر عهده خواهند گرفت، تجاوز کند. نمونه‌هایی از بام‌های سبز در ملبورن وجود دارد که طراحی شده‌اند که نیاز به مدیریت پیچیده باغبانی دارد؛ اما این مدیریت به عهده کارمندان قراردادی است که هیچ تخصص خاصی در بام‌های سبز ندارند. این مسئله می‌تواند به شکایات کاربر منجر شود که از نظر اقتصادی و محیط‌زیست ناکارآمد و ناپایدار است. گنجاندن هزینه‌های نگهداری مداوم، بخش مهمی از ملاحظات طراحی بخصوص از دید مشتری است. اگرچه، سقف‌ها یا دیوارها البته می‌توانند از ابتدا تا دهه‌ها ادامه داشته باشند،

اما در بعضی موارد برای طول عمر محدود طراحی شده‌اند و بنابراین فرآیند برچیدن باید در مرحله طراحی در نظر گرفته شود [5]. با توجه نوع سیستم ساخته شده باید کنترل‌های دوره‌ای شامل کنترل سیستم آبیاری، کنترل وضعیت گیاهان انجام گیرد تا از عدم نشت آب، عدم گرفتگی لوله‌های آبرسانی، عدم وجود آفات در گیاهان و دیگر موارد اطمینان حاصل شود [2].

۲-۵-۳ بستر و نوع گیاه

انتخاب گونه‌های گیاهی به شرایط آب و هوایی منطقه بستگی دارد. در مکان‌هایی با تابش شدید، گونه‌های مقاوم باید انتخاب گردد. گونه‌های انتخابی باید دارای سیستم ریشه‌های کم‌عمق و فیبری باشند تا بتوانند در حجم محدودی از محیط موجود، رشد مناسب داشته باشند. دیوارهای سبز خارجی اغلب در معرض باد شدید و مداوم قرار دارند که گونه انتخابی باید مقاومت لازم را داشته باشد. رشد سریع گیاهان نیازهای نگهداری را افزایش می‌دهد و گیاهان با رشد آهسته اغلب ترجیح داده می‌شوند. انتخاب گیاه باید با سیستم مخصوص دیوار سبز و فناوری نصب‌شده مطابقت داشته باشد. همه گونه‌ها در هر سیستم به‌خوبی رشد نمی‌کنند. با انتخاب گونه‌هایی که کم آب هستند، می‌توان میزان مورد نیاز آب را به حداقل رساند. همچنین در انتخاب گونه‌های گیاهی ابتدا باید اطمینان حاصل کرد که گونه‌ها مستعد ابتلا به آفات یا بیماری نباشند. از گونه‌های علف‌های هرز یا گیاهی که پتانسیل رشد علف‌های هرز را دارند باید اجتناب شود.

نوع بستر کاشت نیز در انتخاب گیاهان مؤثر است. عمق بستر در اندازه گیاهانی که قابل رشد هستند و در میزان آب مورد نیاز تأثیر می‌گذارد. بستر یک عامل محدودکننده برای دیوارهای سبز نیست؛ زیرا ساخت آن‌ها متناسب با گونه‌های گیاهی است. اپیفیت‌ها و لیتوفیت‌ها گیاهانی هستند که به خاک احتیاج ندارند، اغلب در دیوارهای سبز استفاده می‌شوند و می‌توانند تا اندازه‌های بالغ رشد کنند. حتی گونه‌هایی که به‌طور معمول در خاک رشد می‌کنند بدون داشتن بستر از طریق یک سیستم هیدروپونیک قابل رشد هستند. در انتخاب گیاه باید شرایط لازم برای نگهداری گیاهان مختلف و ظاهر مطلوب آن‌ها با توجه به اهداف زیبایی‌شناختی و سایر طراحی‌های پروژه در نظر گرفته شود.

بسته به مقیاس دیوار، گیاهان کاشته شده می‌توانند از پوشش‌های زمینی تا گونه‌های بزرگ‌تر علفی، درختچه و حتی درختان کوچک باشند. در انتخاب گیاه ابتدا باید نتایج دلخواه دیوار سبز در نظر گرفته شود. باید توجه داشت که شکل رشد گیاه، قرار گرفتن در معرض آفتاب و سایه و همچنین قرار گرفتن در معرض باد، در سطوح عمودی نسبت به سطح زمین تفاوت قابل توجهی دارد [5].

۲-۵-۴ ساختار اجرایی

سیستم‌های دیوار سبز هیدروپونیک سیستم‌های بدون بستر هستند و از طریق بست‌هایی که از دیوار باربر (یا یک سازه مستقل) خارج می‌شوند، نصب شده‌اند تا بین دیوار (یا ساختار دیگر) و صفحه پشتی سیستم دیوار سبز شکاف هوایی ایجاد شود. در یک سیستم هیدروپونیک، یک محیط رشد مانند فوم باغبانی، یک الیاف معدنی یا یک تشک نمدی فراهم می‌شود. این مواد می‌توانند به‌عنوان یک اسفنج نگهدارنده آب عمل کنند. مزیت سیستم هیدروپونیک این است که هیچ‌گونه پوسیدگی ساختاری از محیط در حال رشد وجود ندارد و هیچ نمکی از کود و مواد مغذی تهیه نمی‌شود. با گذشت زمان، ریشه‌های گیاهی از طریق کل سیستم رشد کرده و از بین می‌روند تا بتوانند شبکه‌ای بسیار مستحکم ایجاد کنند.

دیوارهای سبز مدولار (سیستم‌های مبتنی بر بستر) از پنل‌های ساخته‌شده از پلاستیک یا فلز برای نگهداری بستر استفاده می‌کنند. بستر مستقیماً درون پنل‌های خالی بسته‌بندی شده یا در یک کیسه فیبر مصنوعی با نفوذپذیر آب قرار می‌گیرد. پنل‌ها به هم متصل شده و به دیوار یا به یک چارچوب مستقل با ساختاری محکم متصل می‌شوند. همچنین، پنل‌های پلاستیک یا فلز را می‌توان روی یک شبکه فلزی ثابت به دیوار آویزان کرد. پنل‌ها را می‌توان به‌صورت تکی برای تعمیر و نگهداری و یا کاشت مجدد جدا کرد. بستر در این سیستم‌ها ساختاری را برای حمایت از گیاه فراهم می‌کند و دسترسی به آب، هوا و مواد مغذی را تسهیل می‌کند و نیاز به مدیریت مداوم در ارتباط با سیستم‌های هیدروپونیک را کاهش می‌دهد. با این وجود، با گذشت زمان ذخایر مواد مغذی از بین می‌رود.

سینی‌های قطره‌ای Drip tray برای گرفتن آب آبیاری اضافی از بستر استفاده می‌شود. اندازه سینی قطره ای باید برای نگه داشتن حجم آب کل چرخه آبیاری (قبل از تخلیه قبل از شروع چرخه های بعدی) کافی باشد. آب گرفته شده در سینی قطره ای می‌تواند به جای هدر رفتن به بالای دیواره جهت استفاده مجدد پمپ شود. سینی های قطره ای باید دارای لوله زهکشی با قطر کافی برای خالی کردن سینی قطره ای یا مدیریت آب کافی به منظور کاهش سرریز سینی باشند [5].

۲-۵-۵ سیستم ضد آب، waterproofing

سیستم ضد آب، وابسته به نوع پروژه است. در بعضی موارد یک شکاف هوای کافی بین پشت سیستم کاشت و دیوار ایجاد می‌شود و نیازی به ضد آب کردن نیست. شکاف هوا مانع از حرکت آب بین دیوار و سیستم کاشت و ریشه‌های گیاهان هوا می‌شود تا خطر سیستم‌هایی را که به‌طور مستقیم با دیوار تماس دارند و همچنین مسیر حرکت رطوبت را کاهش دهد. فراهم ساختن یک شکاف هوا بین سیستم کاشت و دیوار ساختمان نیز باعث جلوگیری از رشد قارچ‌ها می‌شود و از صدمه زدن رطوبت و نمک‌های محلول از کود به دیوار جلوگیری می‌کند. در برخی موارد دیوار حائل ممکن است ضد آب باشد؛ به‌عنوان مثال، دیوار بتنی از قبل ساخته‌شده ممکن است به اندازه کافی ضخیم باشد تا بتواند کاملاً ضد آب باشد یا یک دیوار ساخته‌شده از تخته سه لا چوب خشک، از موادی که درون چوب استفاده می‌شود، ضد آب است.

۲-۵-۶ آبیاری و تغذیه گیاه

دیوارهای سبز بدون آبیاری قابل اجرا نیستند. وقفه در آبرسانی یکی از دلایل اصلی خرابی گیاهان در دیوارهای سبز است. سیستم‌های آبیاری خودکار و کنترل راه دور برای دیوارها در مکان‌های با ارتفاع بالا یا در مکان‌هایی که دسترسی دشوار است استفاده می‌شود. باید دقت کرد که کیفیت، طراحی و هزینه‌ها بین سیستم‌های مختلف متفاوت خواهد بود. پیشرفته‌ترین سیستم‌ها، ناظر تعمیر و نگهداری را قادر می‌سازد تا عملکرد خودکار سیستم را از جمله حجم آبیاری تحویل داده، فرکانس آن، میزان رطوبت بستر و همچنین PH و میزان مواد مغذی در تأمین آب، ردیابی کند.

در سیستم‌های هیدروپونیک، تغذیه گیاه توسط یک سیستم تزریق کود انجام می‌شود که دوزهای کنترل‌شده کود را به سیستم آبیاری تزریق می‌کند. سیستم‌های هیدروپونیک نیاز به نظارت مستمر بر PH، سختی آب و مواد جامد محلول دارند.

برای سیستم‌های دیوار سبز هیدروپونیک، سیستم کود دهی ممکن است ۰,۵-۲۰ لیتر محلول آبیاری در هر مترمربع در روز اعمال کند. چرخه آبیاری به‌طور معمول چند دقیقه طول می‌کشد و چندین بار در روز مورد نیاز خواهد بود. کمبود حجم آبیاری باعث کاهش ضایعات و کمبود آن می‌شود. رواناب آبیاری ممکن است در مخزن پایه دیوار جمع شود و از طریق سیستم دیوار سبز دوباره بازیابی شود. آبیاری باید به‌محض نصب گیاهان در سیستم دیوار در دسترس باشد [5].

۲-۵-۷ ملاحظات ویژه برای دیوارها

نورپردازی اغلب برای دیوارهای سبز داخلی که در مناطق کم‌نور قرار دارند لازم است. بسیاری از دیوارهای سبز در مناطق غیر روشن نصب شده‌اند. نورپردازی دیوارهای سبز بسیار تخصصی است و نیاز به خدمات یک طراح یا مهندس روشنایی دارد. گیاهان برای فتوسنتز و رشد مناسب نیاز به مقادیر و کیفیت بسیار خاص نور دارند. دانش گسترده‌ای در مورد باغبانی و طراحی سیستم‌های دیوار سبز برای انتخاب گونه مناسب برای سطح نوری موجود در سایت موردنیاز است. یکی دیگر از ملاحظات نصب دیوارهای سبز حرکت هوا در اطراف شاخ و برگ است. این امر برای جلوگیری از رشد قارچ مهم است و تهویه اضافی ممکن است برای اطمینان از حرکت هوای کافی برای دیوارهای داخلی لازم باشد [5].

۲-۶ عوامل تأثیرگذار در انتخاب مکان نصب و اجرای دیوارهای سبز

جنبه‌های گوناگون سایت مانند موقعیت جغرافیایی، عوامل زیست‌محیطی، ارتفاع ساختمان، اثرات ساختمان‌های اطراف و ... عوامل تأثیرگذاری هستند که باید قبل از احداث دیوارهای سبز در سایت مورد نظر مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. درک شرایط آب و هوایی برای انتخاب گیاهان متناسب با سایت مورد

نظر ضروری است. اغلب بهترین روش این است که بحرانی‌ترین حالت برای رشد گیاهان تخمین زده شود و با توجه به آن طراحی شود.

بررسی میانگین سرعت باد در ارتفاع بالاتر از سطح زمین اهمیت زیادی دارد. باد ممکن است در اطراف لبه‌های ساختمان شدید باشد. ضروری است که بار باد که سقف، دیوار یا نمای سبز را تحت تأثیر قرار می‌دهد بررسی شود. باد در ارتفاع زیاد دما را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد و همچنین دارای تأثیر مستقیم بر آبیاری گیاهان است؛ بنابراین بر روی انتخاب گونه‌ها و نیازهای آبیاری اثر می‌گذارد.

برای تأمین آب موردنیاز برای آبیاری گیاهان باید تجزیه و تحلیل دقیقی روی میزان تقاضای آب برای آبیاری صورت گیرد و میزان بارندگی منطقه موردنظر و همچنین شرایط ذخیره آب در منابع بررسی شود. در مناطق شهری، با توجه به افزایش جرم حرارتی ساخته شده از سازه‌ها و افزایش گرمای متناسب، درجه حرارت با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد. ارزیابی محدوده دما احتمالاً در یک سایت در طراحی کاشت، بسیار مهم است. فضاهای محصور مانند دره‌های شهری می‌توانند محیط بی‌نظیر خود را ایجاد کنند؛ اما آشفستگی باد، آلودگی، رطوبت و دما می‌تواند در این خرده اقلیم شدید باشد. آب‌وهوای محلی این مناطق شرایط رو به رشد گیاهان را تغییر خواهد داد و باید در هنگام طراحی سقف و دیوارهای سبز مورد توجه قرار گیرد [5].

۷-۲ تاریخچه استفاده از دیوارهای سبز

مفهوم باستانی دیوارهای سبز در بابل وجود دارد که در حدود ۲۵۰۰ سال پیش ساخته شده است. در بابل باستان، پادشاه بخت‌النصر دوم باغ‌های معلق بابل را ساخت و این باغ‌ها جز عجایب دنیای باستان و قدیمی‌ترین دیوار سبز محسوب می‌گردد (شکل ۲-۱۳).



شکل ۲-۱۳: باغ‌های بابل [۲]

قرن سوم قبل از میلاد نیز رومیان انگور را بر روی داربست‌هایی در باغچه‌های باغ‌ها و دیوارهای ویلاهای خود پرورش می‌دادند.

در سال ۱۹۲۰، بریتانیا و شمال آمریکا، ایجاد داربست‌ها و گیاهان خودرویی را در خانه‌ها و باغ‌های خود گسترش دادند. در سال ۱۹۸۸، سیستم کابل کشی ضدزنگ برای نماهای سبز شروع استفاده شد و در اوایل ۱۹۹۰ استفاده از سیستم‌های کابلی و سیمی و سیستم‌های پنل مدرن وارد بازار آمریکای شمالی شد.

اولین کاربرد عمده سیستم پانل درختکاری در سال ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴ در Universal City Walk در کالیفرنیا مورد استفاده قرار گرفت. همچنین یک دیوار زنده در محیط داخلی با سیستم تصفیه زیستی در ساختمان زندگی کانادا در تورنتو نصب گردید [26](شکل ۲-۱۴).



شکل ۲-۱۴: پارک یونیورسال در کالیفرنیا. دیوار سبز [۲۶]

در سال ۲۰۰۲ نیز در پارک امفو زوریخ سازه‌ای متشکل از ۱۳۰۰ گیاه بالارونده ساخته شد که تفسیر نوینی از پارک‌های شهری بود که فضای باز و سبزی را به صورت معمارانه ایجاد بیان می‌کرد [2](شکل ۲-۱۵).



شکل ۲-۱۵: پارک MFO در زوریخ با دیوارهای زنده [۲]

۸-۲ پژوهش‌های انجام‌شده بر روی دیوارهای سبز

در اواسط دهه هفتاد میلادی بحث‌های جدی و کارشناسانه‌ای در مورد توسعه پایدار و استفاده بهینه از منابع انرژی در محافل علمی شکل گرفت و توجه به فضاهای سبز و نقش گیاهان در تحقق اهداف پایداری مورد بررسی قرار گرفت و حدوداً از اواخر سال ۱۹۸۰ تحقیقات گسترده‌ای بر روی دیوارهای سبز انجام شد. دسته‌ای از تحقیقات همچون پژوهش‌های انجام‌شده توسط Samar Sheweka و Maria Manso به معرفی کلی سیستم‌های سبز می‌پردازد و با دسته‌بندی آنان به بیان ویژگی‌های این سیستم‌ها می‌پردازد [28], [4]. دسته دیگری از تحقیقات تأثیرات حرارتی این سیستم‌ها بر ساختمان را بررسی می‌کند و به‌وسیله دو روش آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار در پی یافتن عوامل دخیل در افزایش کارایی این سیستم‌ها است. البته در میان این تحقیقات تعداد معدودی را می‌توان یافت که به‌صورت تجربی تأثیر این دیوارها را بر یک ساختمان و محیط واقعی نه شبیه‌سازی‌شده و ماکت بررسی کرده باشد. به‌طورکلی در این دسته از تحقیقات شاخص‌های مختلفی نظیر دمای هوای خارج، دمای سطح خارجی دیوار، دمای هوای داخل، دمای سطح داخلی، شار حرارتی و غیره بررسی می‌گردد تا تأثیر پارامترهایی مانند جهت‌گیری دیوار، سیستم‌های سبز گوناگون (نمای سبز مستقیم، نمای سبز غیرمستقیم و دیوار زنده)، حفره هوا (فاصله بین سیستم سبز عمودی و دیوار)، گیاهان مختلف و موارد مشابه دیگر، در ارتقای کارایی این سیستم‌ها مشخص گردد. در این زمینه مقالات متعددی وجود دارد که در ادامه به بیان آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۸-۱ تحقیقات تجربی

اولین پژوهش‌ها که به صورت تجربی انجام شد، به سال ۱۹۸۸ در ژاپن برمی گردد. Hoyono در پژوهشی تأثیر یک نمونه نمای سبز مستقیم در جهت غربی و نمونه‌ی دیگر نمای سبز غیرمستقیم در جهت جنوب غربی را بر دمای سطح خارج بررسی کرد [17]. در سال‌های بعد نیز koyama و همکاران در ژاپن و perez و همکاران در اسپانیا تحقیقاتی با همین ویژگی‌ها به انجام رسانند [29], [11].

L. Bianco و همکاران [30]، K. Perini و همکاران [31]، olivieri و همکاران [32] و Giuliano Vox و همکاران [8] نیز تحقیقاتی بر نمای جنوبی برای بررسی تأثیرات دیوارهای زنده بر دمای سطح خارجی انجام دادند.

C.L. Tan و همکاران [33] در سنگاپور و Q. Chen و همکاران [34] در چین با هدف بررسی تأثیر دیوار زنده بر دمای سطح خارجی و داخلی در جهت غربی تحقیقاتی را انجام دادند.

R.U. Galagoda و همکاران [35] در منطقه کلمبو در سریلانکا ۹ نمونه سیستم‌های سبز عمودی از انواع مختلف نمای سبز مستقیم، نمای سبز غیرمستقیم و دیوار زنده که هرکدام در جهات مختلف نصب شده بودند را مورد آزمایش قرار دادند و تأثیرات حرارتی آن‌ها را بر دمای هوای خارج و دمای سطح خارجی دیوارها بررسی کردند.

Kalano C. Dahanayake و همکاران [36] در هنگ‌کنگ نوع گیاهان بکار رفته در سیستم‌های سبز را مورد بررسی قرار داده‌اند و شاخص‌های تأثیرگذار گیاهان را برای افزایش کارایی سیستم‌های سبز معرفی می‌کنند. همچنین Rafael Fernandez و همکارانش [27] نیز در پژوهشی ویژگی‌های انواع گیاهان مناسب برای سیستم‌های سبز عمودی را بیان می‌کنند.

پژوهش Djedjig و همکارانش [37] بر روی یک نمونه دیوار زنده در شهر لارآچل فرانسه انجام گرفت که دیوار زنده بر روی یک اتاقک شبیه‌سازی شده نصب گردید. هدف از این آزمایش بررسی تأثیر پوشش‌های گیاهی بر تغییرات روزانه و فصلی در محیط‌های خارج و داخل بود. برای مقایسه یک اتاقک شبیه‌سازی شده

به‌عنوان مرجع بدون پوشش گیاهی نگهداری شد. نتایج آزمایش نشان داد که دیوار سبز باعث کاهش ۱۰ درجه‌ای دمای سطح داخلی اتاقک و کاهش ۵ درجه‌ای دمای هوای داخل شده است و همچنین دمای هوای خارج (دمای هوای دره‌های خیابانی) را تا ۱,۵ درجه کاهش داده است.

پژوهش دیگر توسط M.Manso و همکارانش [38] بر روی یک سیستم مدولار جدید به نام Geogreen انجام شد. این سیستم بر روی یک نمونه ماکت آزمایشی در شهر Covilha پرتغال به‌منظور بررسی تأثیر آن بر دمای سطح داخل و شار حرارتی بر نمای جنوب شرقی نصب گردید. در اولین دوره آزمایش رفتار حرارتی مدول‌های Geogreen بدون پوشش گیاهی با دیوار مرجع مقایسه گردید. مشخص شد که مدول‌های Geogreen دامنه حرارتی روزانه را تا ۴,۱ درجه کاهش می‌دهند و با افزایش ۱,۸ درجه‌ای حداقل دمای سطح داخل و افزایش ۳ درجه‌ای حداکثر دمای سطح داخلی می‌شود. همچنین انتقال حرارت از طریق هدایت ۳۷٪ کاهش داشته است. در مرحله دوم آزمایش رفتار حرارتی مدول‌های Geogreen با پوشش گیاهی با دیوار مرجع مقایسه گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در این مرحله سیستم Geogreen در کاهش دمای سطح داخلی بسیار مؤثر است به‌طوری‌که اختلاف دمای بین حداکثر درجه حرارت سطح داخلی در دیوار مرجع و دیوار Geogreen در روز به ۷ درجه رسید. همچنین در این مرحله دیوار Geogreen باعث کاهش ۷۵٪ اتلاف حرارتی از طریق هدایت را نسبت به دیوار مرجع شد.

در یک پژوهش Jlia coma و همکارانش [39]، تأثیر سیستم‌های سبز عمودی را در کاهش مصرف انرژی با مقایسه بین نمای سبز و دیوار زنده در منطقه‌ای در شمال شرقی اسپانیا بررسی کردند. سه کابین و ماکت به ابعاد ۳*۳*۳ تهیه گردید. یک کابین به‌عنوان دیوار مرجع قرار گرفت و بر روی دو کابین دیگر یکی دیوار زنده و دیگری نمای سبز نصب شد. به‌وسیله یک پمپ گرمایی دمای داخل کابین‌ها روی ۲۴ درجه ثابت نگه داشته شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن بود که نمای سبز دوطرفه باعث کاهش ۳۳,۸٪ و دیوار زنده باعث کاهش ۵۸,۹٪ مصرف انرژی شده‌اند. همچنین میانگین کاهش دمای دیوار خارجی در دیوار زنده برای جهت جنوبی ۱۶,۵ درجه در جهت شرق ۴,۵ درجه در جهت غرب ۶,۵ درجه بوده است.

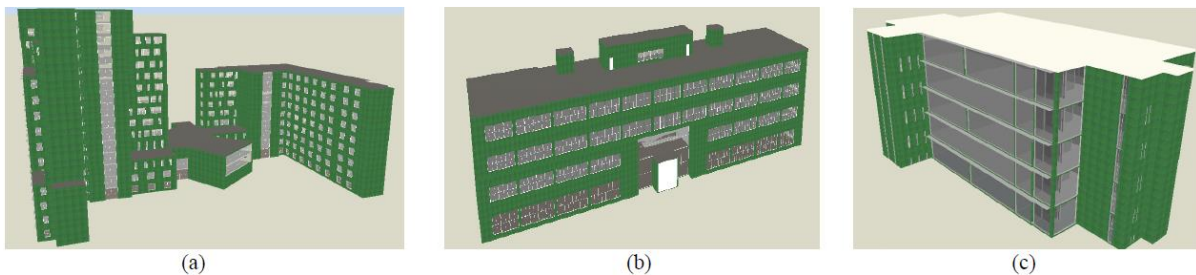
پژوهش دیگر در مکزیک توسط J.A Sanchez-Resndiz و همکاران [40] با هدف بررسی تأثیرات دمایی دیوارهای سبز انجام گرفت. برای انجام این آزمایش نیز اتاقک‌های آزمایشی شبیه به کلبه‌های متداول مکزیکی ساخته شد و یک نمونه دیوار زنده بر دیوار جنوبی نصب گردید و داخل کلبه با یک لایه عایق پوشانده شد. حس‌گرهای تعیین درجه حرارت و رطوبت در داخل کلبه و بین لایه‌های دیوار قرار داده شد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش گواه کاهش ۲٫۵ درجه‌ای دمای سطح داخل به‌وسیله دیوار زنده در گرم‌ترین روز سال بود. دیوار زنده باعث ایجاد زمان تأخیر دوساعته در رسیدن به حداکثر دما گردید و در کل باعث بهبود شرایط داخل کلبه گردید.

در سال ۲۰۱۴ در امارت متحده عربی Mohamoud Haggag و همکاران [41] پژوهشی را بر روی دیوارهای زنده با هدف بررسی تأثیرات حرارتی سیستم‌های سبز عمودی بر ساختمان انجام دادند و آن‌ها دو کلاس مشابه از یک مدرسه را در شهر العین انتخاب کرده و بعد از نصب دیوار زنده روی دیوار خارجی یکی از کلاس‌ها تأثیرات آن را بر روی دمای هوای خارج، دمای سطح خارج، دمای هوای داخل کلاس در فاصله ۱ متری دیوار و دمای سطح داخلی دیوار را بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده تأثیرات مثبت دیوار سبز را نشان داد به‌طوری‌که دیوار سبز باعث کاهش ۵ درجه‌ای دمای هوای داخل، کاهش ۶ درجه‌ای دمای سطح خارج و کاهش ۶ درجه‌ای دمای سطح داخل شده بود و همچنین ۲۰٪ باعث کاهش مصرف انرژی تهویه مطبوع گردیده بود.

۲-۸-۲ تحقیقات مبتنی بر شبیه‌سازی در نرم‌افزار

چندی از مقالات و پژوهش‌ها با کمک نرم‌افزارهای مختلف به بررسی تأثیرات حرارتی دیوارهای سبز در ساختمان‌ها پرداخته‌اند و با شبیه‌سازی یک نمونه واقعی و مدل کردن دیوار سبز بر روی آن میزان مصرف بار سرمایشی و گرمایشی و به‌طور کلی صرفه‌جویی در مصرف انرژی را اندازه‌گیری کرده‌اند. به‌عنوان نمونه می‌توان به تحقیقی که Sinchita Poddar و همکارانش در پردیس دانشگاه KAIST انجام دادند اشاره کرد. آنان سه ساختمان اداری، مسکونی و تحقیقاتی دانشگاه را در نرم‌افزار Design Builder

شبیه‌سازی کردند. مدل‌های دیوار سبز برای سه ساختمان موردنظر با توجه به سطح بیرونی دیوار با مشخصات یک لایه خاک ۸۰ میلی‌متری و گیاه *H. helix* به‌عنوان ماده گیاهی انتخاب شد و تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای بین مصرف انرژی شبیه‌سازی شده و مصرف انرژی واقعی ساختمان‌های مورد مطالعه انجام گردید (شکل ۲-۱۶).



شکل ۲-۱۶: طراحی مدل در Design Builder: (a) ساختمان خوابگاه (b) ساختمان اداری و (c) ساختمان تحقیقاتی با دیوار سبز [۴۲]

داده‌های شبیه‌سازی انرژی نشان داد که لایه گیاه روی نما می‌تواند به‌طور مؤثری در روزهایی با باد شدید و دمای صفر یا زیر صفر باعث کاهش مصرف انرژی گرمایش ساختمان از طریق کاهش سرعت باد شود. به‌طوری‌که به دلیل حداکثر استفاده و حضور افراد در طول شب در خوابگاه‌ها (ساختمان مسکونی) در تأسیسات گرمایشی (۶۰٪)، سرمایش (۱۰٪) و همچنین صرفه‌جویی در کل انرژی (۳۱٪) برای تأسیسات مسکونی به دست آمد. در حالی که کاهش مصرف انرژی گرمایشی برای ساختمان تحقیقاتی (۷٪) و ساختمان اداری (۳٪) به دست آمد. در مقابل، در تابستان و در ساختمان تحقیقات و تأسیسات اداری که در آن سرمایش به دلیل اشغال روزانه حائز اهمیت است، پوشش گیاهی منجر به صرفه‌جویی در انرژی سرمایشی نشد و در این ساختمان‌ها هیچ‌گونه صرفه‌جویی در انرژی قابل توجهی را نشان نداد [42].

همچنین در پژوهشی دیگر که H.M.P.I.K.Herath و همکارانش در مناطق استوایی کلمبو، پایتخت تجاری سریلانکا انجام دادند، تأثیرات دمایی دیوارهای سبز در کاهش پدیده جزیره گرمایی (UHI) در یک شبیه‌سازی کامپیوتری برای شرایط آب‌وهوای گرم و مرطوب تابستان در ماه اوت بررسی گردید. روش تحقیق شامل مدل‌سازی در مقیاس واقعی از بافت شهری منتخب با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met V4

بود. یک تحقیق میدانی به مدت ۴۸ ساعت و در دو روز داغ و مداوم در سایت انجام شد. دما، آب‌وهوا و رطوبت در اوت ۲۰۱۶ در فواصل ۵ دقیقه ثبت شد و میانگین دما در ساعت به دست آمد.

منطقه مورد مطالعه در داخل نرم‌افزار ENVI-met V4 شبیه‌سازی گردید و سه گیرنده (R1، R2 و R3) با در نظر گرفتن موقعیت دیوارهای ساختمان و جاده آسفالت به شرح زیر در نظر گرفته شد (شکل ۲-۱۷):

۱. R1- پوشش ساخته شده (دیوار) از سه طرف و جاده آسفالت از یک طرف
۲. R2- همه طرفین دارای پوشش‌های ساختمان و شبیه‌سازی جزایر گرمایی UHI موجود
۳. R3- پوشش از دو طرف ساخته شده، جاده آسفالت از یک جهت و دیگری از سنگفرش.



شکل ۲-۱۷: (راست): مکان‌های گیرنده در مدل. (چپ): سایت انتخاب شده مدل سازی در شهر کلمبو

سپس مقادیر دما در ارتفاع ۱,۵ متر با مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی دما مقایسه شد. UGI‌های مناسب انتخاب شده (فضای سبز عمودی و بام سبز با در نظر گرفتن هندسه موجود، جهت‌ها و الگوهای استفاده از زمین) در بخش‌های مختلف به طرح‌های ENVI-met به سایت معرفی شدند. (جدول ۲-۱)

جدول ۲-۱: وضعیت UGI‌های انتخاب شده

وضعیت	بخش‌ها	UGIs
۱T	میزان پوشش گیاهی موجود (بسیار کمتر)	وضع موجود
۲T	۵۰٪ از کل مساحت سقف	بام سبز
۳T	۷۵٪ از کل مساحت سقف	
۴T	۱۰۰٪ از کل مساحت سقف	
۵T	۵۰٪ از کل مساحت دیوارها (جهت شرق-غرب)	دیوار سبز
۶T	۱۰۰٪ از کل مساحت دیوارها (جهت شرق-غرب)	
۷T	قسمت قابل معتبر از کل دیوار ناحیه شمالی- جنوبی	

اطلاعات از پرونده‌های IDT از ENVI-met مانند دمای هوا در ارتفاع ۱,۵ متر (میانگین ارتفاع یک شخص ایستاده) انتخاب شده و مقادیر دمای موجود و مقادیر شبیه‌سازی شده را با یکدیگر مقایسه گردید. حداکثر کاهش دما در مقایسه با وضعیت موجود در ارتفاع ۱,۵ متری برای هر گزینه در جدول ۲-۲ آمده است.

جدول ۲-۲: حداکثر کاهش دما در مقایسه با وضعیت موجود در ارتفاع ۱,۵ متری برای هر گزینه

وضعیت	R1	R2	R3
T2	1.94	1	1.29
T3	1.96	1.01	1.58
T4	1.98	1.06	1.49
T5	2.02	1	1.58
T6	2.03	1.01	1.59
T7	1.93	1.01	1.55

همان‌گونه که مشاهده می‌شود بهترین کاهش دما به میزان $C_{2,03}$ برای R1 در T6، $C_{1,06}$ برای R2 در T4 و $C_{1,59}$ برای R3 در T6 به دست آمد. نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش دمای ۱-۲ درجه سانتی‌گراد می‌تواند به‌طور مستقیم معضلات ناشی از جزایر گرمایی را کاهش داده و آسایش حرارتی یک شهر را افزایش دهد و فضای سبز شهر یک گزینه کارآمد در ایجاد مقاومت در برابر گرم شدن کره زمین و تأثیر تغییرات اقلیمی منطقه است [1].

۲-۸-۳ پژوهش‌های انجام‌شده در ایران

پژوهش‌های انجام‌شده در ایران بیشتر به‌صورت مطالعات کتابخانه‌ای و بیان انواع و کارکرد کلی دیوارهای سبز می‌باشد. تنها چند پایان‌نامه به‌طور خاص تأثیرات حرارتی این سیستم‌ها را بر ساختمان بررسی کرده‌اند که از میان آن‌ها فقط یک مورد بر اساس تحقیقات تجربی و بر روی یک نمونه ساختمان واقعی می‌باشد و بقیه پایان‌نامه‌ها از شبیه‌سازی در نرم‌افزار استفاده کرده‌اند.

در سال ۱۳۹۵ در دانشگاه صنعتی شاهرود آقای فرید مهدی پور [43] پایان‌نامه‌ای با عنوان "ارزیابی تأثیرات دیوارهای سبز بر عملکرد حرارتی ساختمان" انجام دادند که می‌توان آن را تنها پژوهش تجربی در

زمینه دیوارهای سبز در ایران دانست. در این پایان نامه ۳ نوع دیوار زنده با ۳ نوع گیاه متفاوت انتخاب شد و بر روی دیوار غربی یکی از ساختمان‌های دانشگاه نصب گردید. طی دو هفته و در دو دوره خشک‌سالی (شرایطی که سیستم آبیاری دیوار زنده قطع شده بود) و دوره آبیاری اطلاعات موردنظر جمع‌آوری شد. نتایج به‌دست‌آمده نقش بسیار مهم دو عامل را در کارایی حرارتی این سیستم‌ها روشن ساخت؛ یکی میزان تراکم پوشش گیاهان و دیگری رطوبت لایه‌ها. به‌طوری‌که "در واقع تغییرات در الگوی کاهش حرارت متناظر با چگالی شاخ و برگ می‌باشد" [43]. البته تمامی دیوارهای سبز شرایط بهتری نسبت به دیوار مرجع ایجاد کردند و اختلاف دمایی حدود ۱۸ درجه‌ای در سطح دیوار خارجی به دست آمد.

در پژوهشی دیگر با عنوان " بررسی ارتباط سیستم‌های عمودی سبز و مصرف انرژی در ساختمان‌ها (با طراحی یک نمونه موردی)" شبنم رستم‌خانی به کمک نرم‌افزار دیزاین بیلدر بار سرمایشی، بار گرمایشی و مصرف انرژی کل یک ساختمان ۴ طبقه شبیه‌سازی شده را محاسبه کرد. در این پژوهش ابتدا ۳ سیستم سبز عمودی با ضخامت‌های متفاوت شبیه‌سازی شدند و بر روی دیوار جنوبی ساختمان مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که سیستم سبز با تراکم بالا و ضخامت ۰,۴ متر و ضریب سطح برگ ۵، در میزان مصرف انرژی صرفه‌جویی بیشتری را ایجاد می‌کند؛ بنابراین این سیستم سبز برای شبیه‌سازی در سایر جبهه‌های ساختمان انتخاب گردید و در مراحل بعدی سیستم سبز یک مرتبه به تفکیک برای جبهه‌های گوناگون ساختمان و یک مرتبه برای کل ساختمان و در آخر برای بام (به‌صورت بام سبز) شبیه‌سازی شد و نتایج هر مرحله مورد تحلیل قرار گرفت و عملکرد حرارتی سیستم‌های سبز با عملکرد عایق حرارتی در نرم‌افزار مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد دیوار سبز در کاهش مصرف انرژی ساختمان بسیار مؤثر است و تأثیر کاهش بار سرمایشی حاصل از کاربرد دیوار سبز در ساختمان بیشتر از تأثیر عایق حرارتی است، اگرچه عایق حرارتی در فصول سرد عملکرد بهتری نسبت به دیوار سبز دارد. در نهایت نیز در مصرف انرژی کل تفاوت ناچیزی بین این دو روش وجود داشت [2].

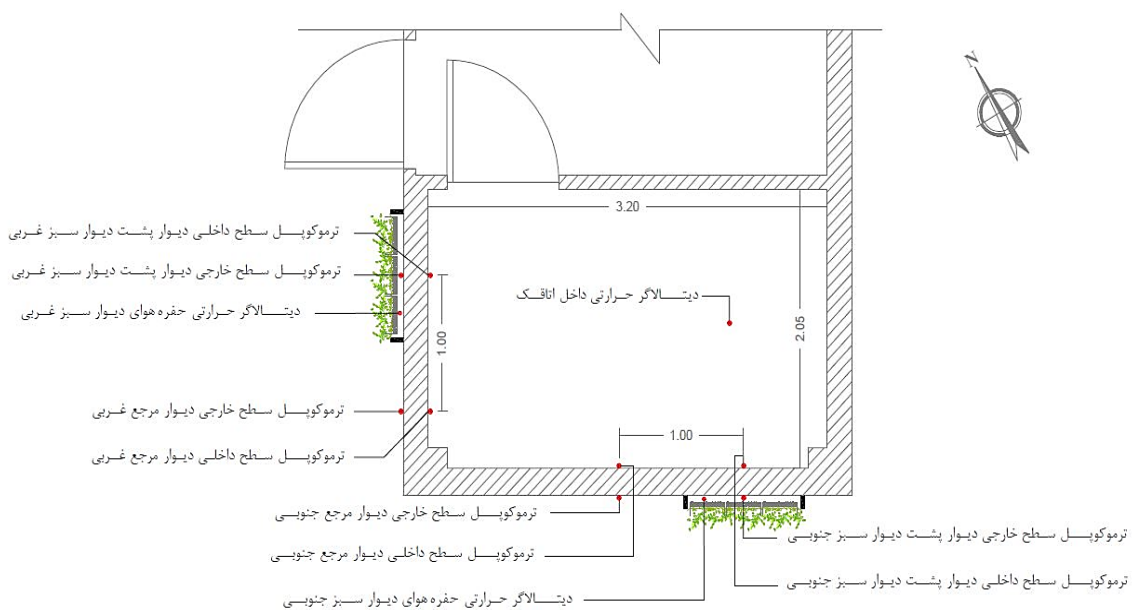
فصل ۳ : مواد و روش ها

با توجه به هدف اصلی این پژوهش که مبتنی بر بررسی تاثیر دیوارهای سبز بر عملکرد حرارتی ساختمان می‌باشد، یکی از انواع دیوارهای سبز انتخاب و در شهرستان شاهرود مورد آزمایش قرار گرفت. در بخش اول این فصل به بیان روش انجام پژوهش پرداخته شده است و در بخش دوم با عنوان "موقعیت و وضعیت" ابتدا به بررسی شرایط اقلیمی شهرستان شاهرود پرداخته و در ادامه مراحل مختلف پژوهش شامل عملیات انتخاب نوع دیوار سبز و نوع گیاه، انتخاب مکان نصب و مراحل اجرایی و... به تفصیل شرح داده می‌شود.

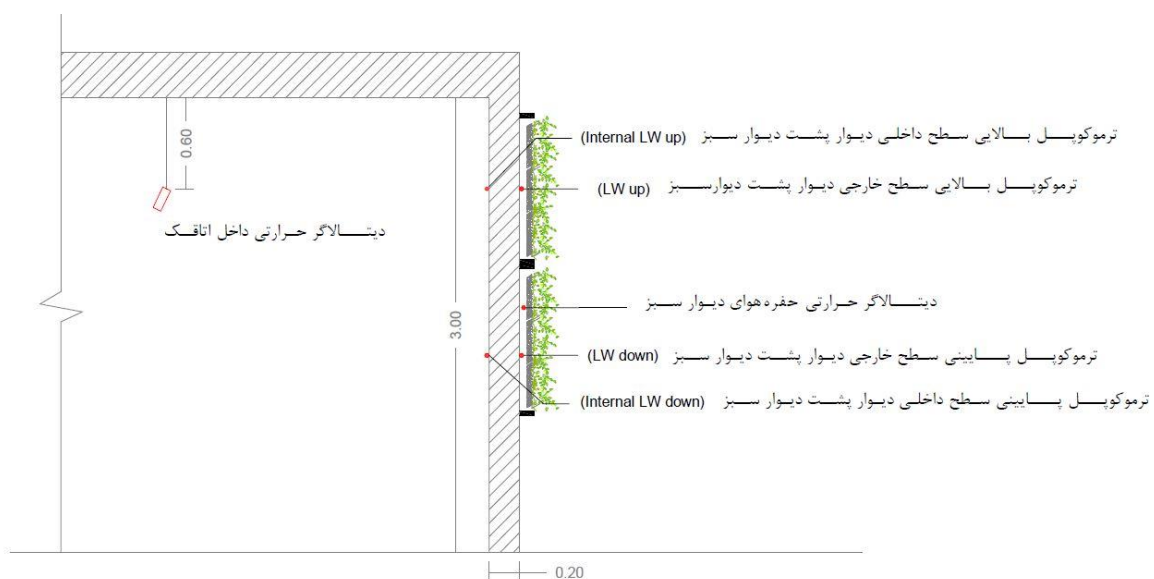
۳-۱ روش شناسی پژوهش

به منظور بررسی تاثیر دیوارهای سبز در کاهش دمای سطح خارجی دیوار و به‌طور کلی تاثیر آن‌ها بر عملکرد حرارتی ساختمان، اقدام به ساخت یک نمونه دیوار سبز و آزمایش بر روی دیوار یک ساختمان نمودیم. بدین منظور دیوار سبز به ابعاد ۱ در ۲ متر با گیاه *crassula volkensii* ساخته شد و بر روی دیوارهای اتاقک آسانسور در یک ساختمان مسکونی سه طبقه در شهرستان شاهرود نصب گردید. با توجه به تاثیر مهم تابش خورشید بر دمای سطح، دیوارهای جنوبی و غربی اتاقک با جهت گیری ۲۹ درجه به سمت غرب برای نصب دیوار سبز انتخاب و در کنار دیوارهای سبز نیمی از دیوار به فضایی برای دیوار مرجع (دیوار بدون پوشش گیاهی) اختصاص داده شد. در یک بازه ۲۹ روزه در ماه ژولای سال ۲۰۱۹ (اواسط تیر ماه تا اواسط مرداد ماه سال ۹۸) یعنی گرم‌ترین روزهای سال، دیتا لاگرهای حرارتی در محل نصب و اطلاعات دمایی مورد نظر به صورت ۲۴ ساعته ثبت گردید. همچنین با توجه به تاثیر حفره هوا در کارایی دیوارهای سبز و به منظور اندازه‌گیری دما و رطوبت حفره هوا، دیتالاگر حرارتی و رطوبتی در پشت دیوارهای سبز نصب شد. جهت بررسی تاثیر این سیستم‌ها بر فضای داخلی نیز چند دیتا لاگر حرارتی و رطوبتی در فضای داخلی اتاقک قرار داده شد (شکل‌های ۱-۳، ۲-۳، ۳-۳ و ۴-۳). در مدت دیتا برداری به منظور بررسی دمای سطح گیاهان چند روز گرم انتخاب و به‌وسیله دوربین حرارتی به فاصله هر یک ساعت از سطح دیوار سبز و دیوار مرجع عکس برداری صورت گرفت.

در خصوص بررسی تاثیر دیوارهای سبز روش‌های گوناگونی توسط محققان آزمایش گردید اما دقیق-ترین این روش‌ها که به شرایط ساختمان نزدیک بوده، آزمایش بر دیوار یک ساختمان به جای ساخت ماکت و بلوک‌های آزمایشی است که در این حالت از مقایسه تطبیقی اطلاعات مربوط به دیوار سبز و دیوار مرجع، نتایج مورد نظر استخراج می‌گردد. [41]، [44]، [45] در این پژوهش نیز از این روش برای بررسی کارایی دیوارهای سبز استفاده شده است.



شکل ۳-۱: پلان اتاق مورد آزمایش و موقعیت دیوارهای سبز و محل نصب ترموکوپل‌های حرارتی



شکل ۳-۲: مقطع دیوار اتاق مورد آزمایش و محل نصب ترموکوپل‌های حرارتی



شکل ۳-۳: (راست) دیوار سبز جنوبی. (چپ) دیوار سبز غربی



شکل ۳-۴: (راست) دیوار سبز غربی و جنوبی. (چپ) فضای داخلی اتاقک. دیوار غربی

۲-۳ موقعیت و وضعیت

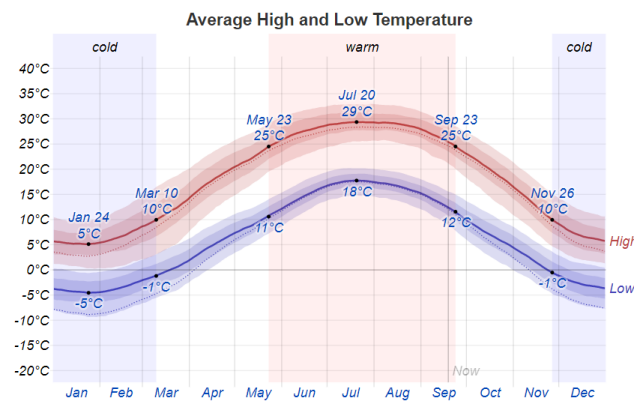
۱-۲-۳ بررسی اقلیمی شهر شاهرود

شاهرود با مساحتی برابر با ۵۱۴۱۹ کیلومترمربع یکی از شهرستان‌های استان سمنان می‌باشد. این شهر در حاشیه شمالی دشت کویر و در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز با موقعیت جغرافیایی ۲۵ دقیقه و ۳۶ درجه عرضی و ۵۸ دقیقه و ۵۴ درجه طولی با ارتفاعی معادل ۱۳۸۰ متر از سطح دریا واقع شده است [۴۶]. شاهرود دارای تابستان‌های طولانی و گرم و خشک است و زمستان‌های آن بسیار سرد، خشک و تا حدودی ابری می‌باشد. در طول سال دما به طور معمول از ۵- درجه سانتی‌گراد تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد تغییر

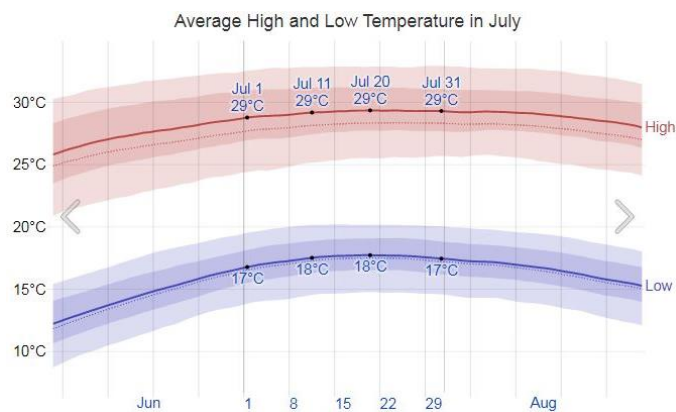
می‌کند. [47]

۳-۲-۱-۱ دمای هوا

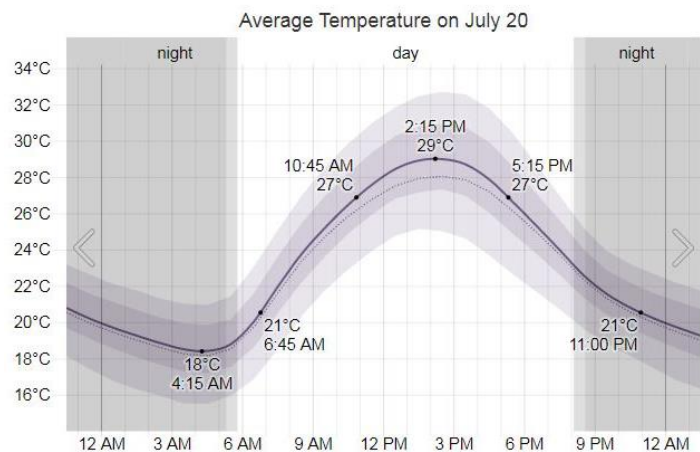
بررسی میانگین حداکثر و حداقل دمای هوای شاهرود طی چند سال نشان می‌دهد که گرم‌ترین ماهها مربوط به اواخر ماه مه تا اواخر ماه سپتامبر می‌باشد که دمای هوا در این ماهها بالای ۲۵ درجه است (شکل ۳-۵). اما همانگونه در شکل ۳-۶ مشخص است گرم‌ترین روزها مربوط به ماه ژولای می‌باشد که در روز بیستم این ماه دما به‌طور میانگین به حداکثر میزان خود یعنی ۲۹ درجه می‌رسد. در این روز افزایش دما از ساعت ۶:۴۵ شروع شده و شاهد گرم‌ترین ساعات روز از ۱۰:۴۵ صبح تا ۱۷:۱۵ دقیقه هستیم و دمای هوا در ساعت ۱۴:۱۵ دقیقه به حداکثر میزان خود می‌رسد. (شکل ۳-۷) [47]



شکل ۳-۵: میانگین حداکثر و حداقل دما در شاهرود [۴۷]



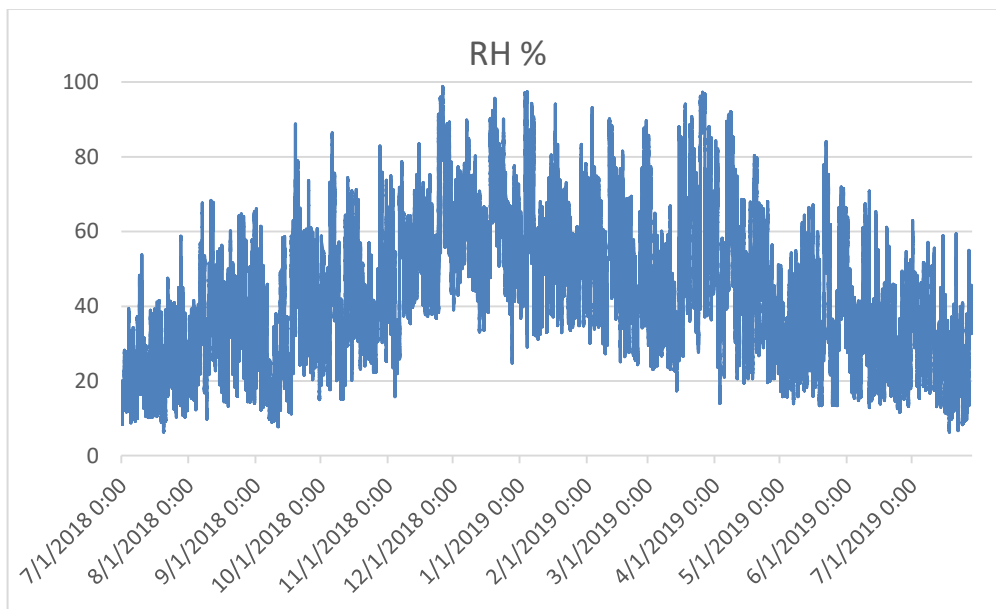
شکل ۳-۶: میانگین حداکثر و حداقل دما در ماه July [۴۷]



شکل ۳-۷: میانگین دما در روز ۲۰ ماه July [۴۷]

۲-۱-۲-۳-۲ رطوبت هوا

بررسی دوره یکساله رطوبت هوا در شاهرود نشان می‌دهد که در این شهر در فصول گرم سال میزان رطوبت به شدت کاهش می‌یابد، به طوری که میانگین رطوبت هوا در تابستان به ۲۵٪ می‌رسد و شرایط ناخوشی‌پندگی را ایجاد می‌کند (شکل ۳-۸).

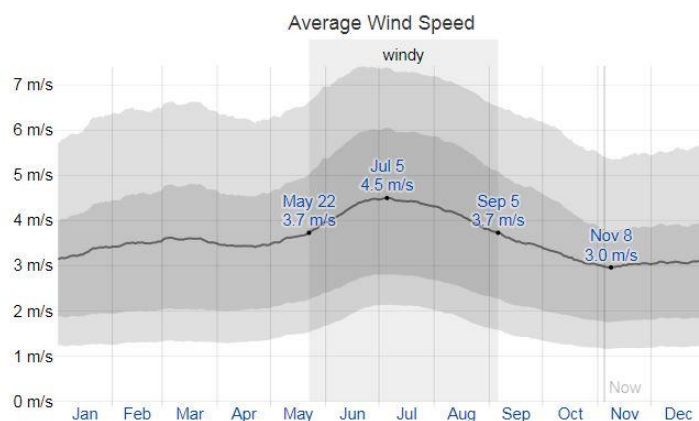


شکل ۳-۸: نمودار سالانه رطوبت در شاهرود

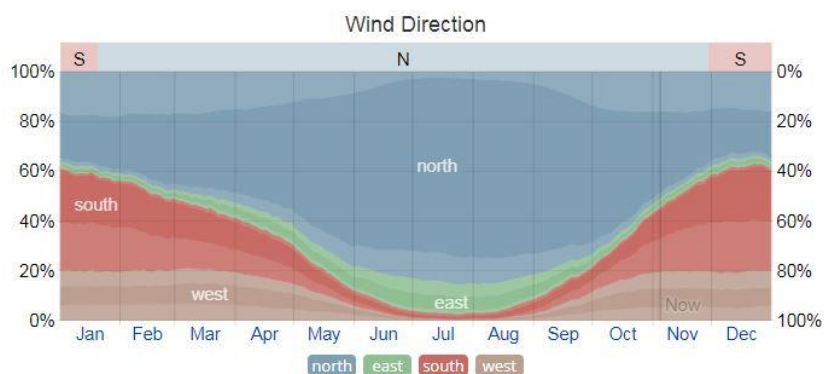
۳-۲-۳-۱-۳ سرعت و جهت باد

میانگین سرعت باد در شاهرود در طول سال تغییرات فصلی قابل توجهی را تجربه می‌کند. مطابق شکل ۳-۳-۹ از ۲۲ مه تا ۵ سپتامبر میانگین سرعت باد به بیشتر از ۳,۷ متر بر ثانیه می‌رسد. بیشترین سرعت باد مربوط به روز ۵ ژوئیه است که میانگین سرعت باد ۴,۵ متر بر ثانیه است. بقیه ماه‌ها سال هوا آرام بوده و کمترین میزان سرعت باد مربوط به روز ۸ نوامبر با سرعت ۳,۰ متر بر ثانیه می‌باشد.

جهت باد نیز در شاهرود در طول سال متفاوت است. ده ماه سال یعنی از ۲۰ ژانویه تا ۲۹ نوامبر جهت باد غالب از سمت شمال بوده و در بقیه ماه‌ها شاهد وزش باد غالب از سمت جنوب هستیم. (شکل ۳-۱۰) [۴۷]



شکل ۳-۹: نمودار میزان سالانه سرعت باد در شاهرود [۴۷]



شکل ۳-۱۰: نمودار جهت باد در شاهرود [۴۷]

۳-۲-۲ انتخاب سیستم دیوار سبز

سیستم دیوار سبز انتخابی در این پژوهش از نوع دیوارهای زنده یا Living wall می‌باشد. جهت ساخت دیوار زنده از پنل‌های موجود در آزمایشگاه بهره‌وری انرژی دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده گردید. پنل‌ها از شرکت زمینه در تهران که نمایندگی دیوارهای سبز می‌باشد خریداری شده بود و بسیار شبیه نمونه تولیدی آن در شرکت ELT کانادا بود [43]. ابعاد پنل‌ها ۳۰ در ۳۰ سانتی‌متر و به عمق ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد و ۴ محل برای پیچ شدن به دیوار در اطراف آن تعبیه شده است. هر پنل به ۸ قسمت ۷,۵ در ۱۵ سانتی‌متری تقسیم شده و در بدنه‌ی آن شیارهای عمیقی جهت انتقال بهتر آب به هر قسمت در نظر گرفته شده است. برای آبیاری قطره‌ای سیستم در بالای پنل‌ها شیاری برای قرارگیری لوله آب ۱۶ وجود دارد که از طریق آن آب از قسمت بالا تا پایین پنل به راحتی هدایت می‌شود و آب مازاد به وسیله ۴ شیاری که در پایین هر پنل وجود دارد، از آن خارج شده و به پنل پایینی منتقل می‌گردد. به جهت نگهداری خاک موجود و تحمل وزن آن، دیواره‌های پنل با زاویه ۶۰ درجه طراحی شده است. در این پژوهش ۳۶ عدد پنل برای ساخت دو دیوار سبز هر کدام به ابعاد ۲ در ۱ متر مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۲-۳ انتخاب گیاهان

در این پژوهش در خصوص انتخاب گیاه مناسب جهت ایجاد دیوار سبز عوامل متعددی دخیل می‌باشند از جمله:

- مطابقت با شرایط آب و هوایی شاهرود
- مقاومت لازم در برابر تابش شدید آفتاب
- عدم انتخاب گونه گیاهی باریشه‌های عمیق و بلند
- رشد و تکثیر سریع و افقی در سطح خاک
- نیاز به آبیاری کم و مقاوم در برابر کم آبی

• از نظر اقتصادی مقرون به صرفه بودن

از این رو جهت انتخاب گیاه مناسب و پرورش آن‌ها، ابتدا مقالات، پایان‌نامه‌ها و همچنین مطالعات شرکت-های سازنده دیوارهای سبز بررسی گردید و گیاهان ذکر شده در منابع مذکور مورد مطالعه قرار گرفت. از میان آن‌ها، گیاهانی که با شرایط آزمایش در این پژوهش مطابقت داشت، گزینش شد. سپس با مراجعه به تعدادی گلخانه فعال در سطح شهر شاهرود و مشورت با متخصصین عرصه گل و گیاه پیرامون منابع موجود، پیشنهادات این عزیزان در خصوص گیاهانی که با شرایط فوق‌الذکر هماهنگی داشته باشند، مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت یکی از انواع گیاهان کراسولا برای این پژوهش مناسب شناخته شد. کراسولاها گونه بسیار متنوع و گسترده‌ای از ساکولنت‌ها (succulent) می‌باشند که حدود ۲۰۰ نوع مختلف از آن‌ها شناخته شده است.

در مقالات متعددی انواع مختلف ساکولنت‌ها و کراسولاها به‌عنوان گیاه مناسب برای دیوار سبز معرفی شده و گونه‌ای از این گیاهان توسط محققان مورد آزمایش قرار گرفته است [48], [38]. در این پژوهش نیز با کمک یکی از متخصصین در امور گل و گیاه در شهر شاهرود و با توجه به مطابقت بیشتر با شرایط پژوهش و اینکه شاهرود در منطقه خشکی قرار دارد، گونه "*crassula volkensis*" انتخاب گردید. (شکل ۳-۱۱)

۳-۲-۱ معرفی *crassula volkensis*

نام علمی گیاه: *crassula volkensis* subsp, *crassula galunknsis*

دسته: succulent

خانواده: crassulaceae

تیره فرعی: crassuloideae

گونه: volkensis



شکل ۳-۱۱: گیاه *Crassula volkensii* [۴۹]

کراسولاهای یکی از زیرشاخه‌های بزرگ ساکولنت‌ها محسوب می‌گردند که به بیش از ۲۰۰ نوع مختلف تقسیم می‌شوند. معروف‌ترین نوع کراسولا *Crassula ovata* می‌باشد که به گیاه یشم معروف است. گیاه *Crassula volkensii* نیز یکی از انواع خانواده بزرگ کراسولاهای می‌باشد که معمولاً اندازه بوته‌ی آن به ۱۵ سانتی‌متر می‌رسد. برگ‌های این گیاه به رنگ سبز زیتونی بوده و با خال‌های قرمز ریز پوشیده شده‌اند که ابعاد برگ‌ها حدوداً ۳ سانتی‌متر طول و سانتی‌متر عرض می‌باشد و دارای گل‌های سفید ریز در انتهای شاخه‌ها است که گل‌ها در اوایل بهار شکوفا می‌شود. *Crassula volkensii* بومی آفریقای شرقی بوده و با گل‌های بسیار زیبا و سفید خود به‌عنوان یک پوشش زمینی یا گیاه تزئینی ایده‌آل است. این گیاه برای رشد به نور زیاد آفتاب و سایه جزئی احتیاج دارد. به خشکی بسیار مقاوم بوده و به آبیاری کمی نیازمند است؛ بطوریکه آب زیاد باعث از بین رفتن آن می‌شود. PH خاک مناسب آن حدود ۶ می‌باشد و خاک آن باید حتماً زهکشی مناسبی داشته باشد. روش تکثیر آن بسیار ساده و به روش قلمه زدن است [49].

۳-۲-۲-۳ بستر کاشت انتخابی

ترکیبات خاک در این پژوهش باید به گونه انتخاب می‌شد که وزن کمی داشته و تخلخل مناسب برای انتقال بهتر آب و هوا به ریشه‌ها را دارا باشد. لذا برای بستر کاشت گیاهان ترکیبی از خاک سبک، کود برگ، پوشال تهیه شده از سبوس برنج و کوکوپیت انتخاب شد و برای جلوگیری از رشد قارچ‌ها در کوکوپیت مقدار کمی سم قارچ کش به آن اضافه گردید.

ابتدا پنل‌ها با لایه‌ای ۳-۴ سانتی متری از کوکوپیت پر شدند و سپس خاک آماده شده از مواد فوق الذکر در پنل‌ها ریخته شد و بدین ترتیب بستر مناسب جهت کاشت قلمه‌ها آماده گردید.

-کوکوپیت

کوکوپیت (Cocopeat) از الیاف نارگیل فشرده شده تهیه می‌شود و به شکل مکعبهای فشرده، قالب‌های کوچک، تخته‌ای و یا صفحات گرد عرضه می‌شود. جهت استفاده باید آن‌ها را باز کرده در معرض هوا قرار داد و به آن آب اضافه کرد. با این کار ۱ کیلوگرم کوکوپیت خشک به تقریباً ۱۵ لیتر کوکوپیت مرطوب تبدیل می‌شود. کوکوپیت اغلب از کشورهای آسیای جنوب شرقی مانند سریلانکا، هندوستان و... وارد کشور می‌شود. الیاف نارگیل حتی زمانی که از آب اشباع شده باشد تخلخل هوایی بسیار خوبی را دارا بوده و با کاربرد صحیح موجب افزایش رویش بذر، ریشه، گل و میوه در گیاهان می‌شود. کوکوپیت رطوبت را حتی هوای خشک جذب می‌کند. این سهولت خیس شدن و خصوصیت زهکشی سریع الیاف نارگیل بدان معنی است که الیاف نارگیل نیازی به آبیاری مکرر و در فواصل کوتاه ندارد. این امر منجر به کاهش مصرف کود و هزینه کمتر آبیاری می‌گردد. همچنین کیفیت ذاتی الیاف نارگیل، ایجاد شرایط بهینه برای ریشه‌دار نمودن سریع و تکثیر ایده‌آل گیاه می‌باشد. در بسیاری از موارد این امر منجر به سرعت بیشتر ریشه‌دار شدن قلمه‌ها در طول سال و نیز استفاده بهینه از فضای گلخانه و تجهیزات می‌گردد [50].

۳-۲-۴ روند کاشت

روش کاشت و تکثیر گیاه *crassula volkensis* به صورت قلمه زدن می‌باشد. در مورخ سوم اسفند ماه سال ۹۷ تعداد حدودی ۸۰ قلمه تهیه و در پنل‌ها کاشته شد. در شب به علت سردی هوای اسفند ماه نیاز بود قلمه‌ها در برابر سرما محافظت شوند که از طریق ایجاد پوشش پلاستیکی روی پنل‌ها فضایی شبیه گلخانه برای آن‌ها مهیا گردید که البته در طول روز به دلیل نیاز گیاهان به آفتاب مستقیم این پوشش پلاستیکی برداشته می‌شد. با گذشت دو هفته از کاشت گیاهان مشاهده شد تعدادی از قلمه‌ها از بین رفته و همچنین قسمت‌هایی از پنل‌ها خالی مانده است از همین رو تعدادی قلمه جدید تهیه و به آن‌ها اضافه شد. آبیاری

قلمه‌ها به صورت دستی و در ابتدا، سه روز یکبار انجام می‌شد ولی در اواسط اردیبهشت ماه و با توجه به گرم شدن هوا و رشد گیاهان، به صورت دو روز یکبار ادامه یافت. لازم به ذکر است در این مدت سعی شد به طور میانگین هر بیست روز مقداری خاک به پنل‌ها اضافه گردد. نهایتاً در اوایل تیر ماه سال ۹۸ با مشاهده رشد گیاهان به میزان مطلوب، پنل‌ها آماده نصب بر روی دیوار شدند. (شکل ۳-۱۲)



شکل ۳-۱۲: مراحل قلمه زدن و پرورش گیاه *Crassula volkensii* در پنل‌ها

۳-۲-۵ انتخاب مکان نصب و پارامترهای مرتبط

از فواید مهم دیوارهای سبز تأثیر آن‌ها در عملکرد حرارتی ساختمان‌هاست. سایه‌اندازی بر روی دیوار و عمل تعریق و تبخیر که از سطح گیاهان صورت می‌پذیرد، دمای سطح دیوار را به‌طور چشم‌گیری کاهش داده و باعث کاهش انتقال حرارت می‌گردد. مطالعات اخیر نشان داده است دیوارهای سبز توانایی کنترل منافع و تلفات گرما را دارند که باعث بهبود آسایش حرارتی در محیط داخلی و کاهش تقاضای انرژی سرمایشی می‌

شوند [4]. این کارایی دیوارهای سبز در مناطق گرم و خشک و در فصول گرم سال حائز اهمیت بیشتری است.

دیوارهای ساختمان در طول روز در معرض تابش مستقیم قرار گرفته و هر لحظه درجه حرارت آن‌ها افزایش می‌یابد. موقعیت جغرافیایی ایران به گونه ایست که این موضوع در رابطه با دیوارهای جنوبی و غربی در تابستان از اهمیت بالایی برخوردار بوده و میزان انتقال حرارت از این دو جبهه به فضای داخلی بسیار بالاست. البته در این میان دیوار غربی شرایط بحرانی‌تری داشته زیرا از طرفی از ساعات اولیه روز با گرم شدن هوا دمای سطح آن افزایش یافته و از طرف دیگر در ساعات بعدازظهر تابش مستقیم و طولانی مدت خورشید، این روند افزایش دما را تشدید می‌نماید.

به‌طور کلی در انتخاب مکان نصب دیوار سبز محدودیت‌های زیادی وجود داشت؛ از جمله این محدودیت‌ها جهت دیوارها بود، زیرا ضرورت داشت دیوارهای مورد آزمایش در جهت جنوب و غرب بوده و دارای بازشوهای وسیع نباشند. همچنین نمی‌بایست روی دیوارهای انتخابی سایه‌اندازی خارجی صورت پذیرد. در ضمن نیاز بود محل مورد انتخاب از جهت انجام عملیات نصب پنل‌های دیوار سبز قابلیت دسترسی مناسبی داشته باشد. نکته بسیار مهم دیگر فضای پشت دیوارها بود که می‌بایست کاملاً کنترل شده و بسته باشد. با توجه به این محدودیت‌ها و بررسی گزینه‌های مختلف دیوارهای اتاقک آسانسور یک ساختمان مسکونی سه طبقه واقع در خیابان مولوی شهر شاهرود انتخاب گردید (شکل ۳-۱۳). در اطراف این ساختمان، ساختمان مرتفع‌تر دیگری وجود ندارد به همین علت سایه‌اندازی خارجی بر روی دیوارهای جنوبی و غربی اتاقک اتفاق نمی‌افتد. همچنین دیوار جنوبی فاقد هرگونه بازشو بوده ولی در قسمت بالای دیوار غربی بازشوی کوچکی به ابعاد 40×45 سانتی متر قرار دارد. از جهت سهولت در نصب دیوار و تجهیزات مربوط به انجام آزمایش، فضای پشت بام ساختمان مذکور از شرایط مطلوبی برخوردار است. فضای پشت دیوارها اتاقکی به ابعاد $2 \times 3,20$ متر است که جز بازشوی کوچک دیوار غربی بازشوی دیگری به فضای بیرون ندارد. ارتفاع دیوارها ۳ متر و ضخامت آن‌ها ۲۰ سانتی متر می‌باشد (شکل ۳-۱۴).



شکل ۳-۱۳: موقعیت مکان انتخابی



شکل ۳-۱۴: اتاقک آسانسور

۳-۲-۶ نحوه‌ی نصب پنل‌ها روی دیوار

برای نصب پنل‌ها بر روی دیوار و ایجاد دیوار سبز، قاب‌هایی چوبی از چوب نراد روسی به طول ۱ متر، عرض ۱۰ سانتی‌متر و به ضخامت ۳ سانتی‌متر ساخته شد و به‌وسیله پیچ ۶ فولادی به دیوار نصب شدند. ساختار داخلی قاب‌های چوبی به‌گونه‌ای بود که ستونک‌هایی به طول ۱ متر در ۷ سانتی‌متر و ضخامت ۲ سانتی‌متر در آن تعبیه شده بود که امکان پلاک شدن پنل‌ها بر روی آن با یک فاصله ۵ سانتی‌متری از دیوار پشتی را فراهم می‌ساخت. درون هر قاب ۹ پنل قرار می‌گرفت که پنل‌ها به‌وسیله پیچ ۵ mdf به ساختار داخلی قاب‌ها متصل شدند (شکل ۳-۱۵).



شکل ۳-۱۵: مراحل نصب قاب‌های چوبی و پنل‌ها به دیوار

۳-۲-۷ حفره هوا

در سیستم دیوارهای زنده مدولار معمولاً پنل‌ها را با فاصله از دیوار نصب می‌کنند که بدین وسیله با ایجاد حفره هوایی در پشت دیوار سبز کارایی سیستم افزایش می‌یابد. این حفره هوایی مانند عایق حرارتی عمل کرده و در کاهش تبدلات حرارتی موثر است. از طرفی به علت وجود این فاصله احتمال نفوذ رطوبت به دیوار پشتی در هنگام آبیاری از بین می‌رود. با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه فاصله بهینه بین دیوار سبز و دیوار پشتی حدود ۴-۶ سانتی متر ذکر شده است [43] [51]. لذا در این پژوهش نیز حفره هوایی ۵ سانتی متری در پشت دیوار زنده ایجاد گردید.

۳-۲-۸ نحوه آبیاری

آبیاری دیوار زنده در این پژوهش به روش دستی انجام گردید و به وسیله لوله ۵ میلی متری دو روز یکبار به صورت منظم آبیاری سیستم انجام شد.

۳-۲-۹ شرح سیستم دیوار سبز

نوع گیاه: *crassula volkensii*

مکان: دیوار غربی و جنوبی اتاقک آسانسور یک ساختمان مسکونی در شهر شاهرود

ضخامت پوشش گیاهی: ۱۲-۱۵ سانتی متر

تراکم و میزان پوشش: دیوار جنوبی ۹۰٪، دیوار غربی ۸۵٪

سن گیاه: زیر یک سال

بستر گیاه: خاک سبک، کود برگ، پوشال سبوس برنج و کوکوپیت

نوع دیوار سبز: دیوار سبز از نوع دیوار زنده در ابعاد ۱ در ۲ متر ساخته شده با پنلهایی به ابعاد ۳۰ در ۳۰

در ۱۰ سانتی‌متر

حفره هوا بین نما و دیوار سبز: ۵ سانتی‌متر

جنس دیوار ساختمان: دیوار از جنس بلوک سفالی به قطر ۱۵ سانتی متر با نمای سیمانی

جهت ساختمان: $36^{\circ} 25'40''$ N $54^{\circ} 58'26''$ E

شرح فضای پشتی: اتاقکی به ابعاد ۳،۲۰ در ۲ در ۳ متر

۳-۲-۱۰ شرح دستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش

در این پژوهش برای بررسی تأثیر دیوار سبز بر کاهش دمای سطح خارجی و داخلی دیوارهای جنوبی و غربی اتاقک مورد آزمایش، از مجموعه‌ای از دستگاه‌های ثبت‌کننده اطلاعات (data logger) حرارتی و رطوبتی استفاده شد. این دستگاه‌ها به گونه‌ای تنظیم شدند که اطلاعات دمای سطح، دمای هوا و رطوبت هر ۱۰ دقیقه یکبار در حافظه‌ی آن‌ها ذخیره گردد. همچنین برای به دست آوردن فاکتورهای آب‌وهوایی در روزهای آزمایش از اطلاعات ایستگاه هواشناسی که در دانشگاه صنعتی شاهرود مستقر بود، استفاده شد. (جدول ۳-۱)

۳-۲-۱۰-۱ ایستگاه هواشناسی (Hobo RX 3000)

ایستگاه هواشناسی دانشگاه صنعتی از نوع Hobo RX 3000 می‌باشد که پنج فاکتور دمای هوا، رطوبت هوا، جهت و سرعت باد، میزان اشعه خورشید و میزان بارش باران را هر ۵ دقیقه یکبار ثبت کرده و در حافظه‌ی خود ذخیره می‌کند.

۲-۱۰-۲-۳ دیتالاگرهای حرارتی (Hobo UX ۱۲۰-۰۱۴M)

برای اندازه‌گیری دمای سطح خارجی و داخلی دیوار اتاقک در پشت دیوارهای سبز و همچنین دمای سطح دیوارهای مرجع، از دیتالاگرهای حرارتی Hobo UX 120 استفاده گردید. (شکل ۳-۱۶) این دیتالاگر ۴ کاناله بوده و به وسیله ۴ ترموکوپل آن دمای سطح دیوار در ۴ نقطه (۲ نقطه از سطح دیوار در پشت دیوار سبز و ۲ نقطه از سطح دیوار مرجع) اندازه‌گیری شد. ترموکوپل‌ها مدل T از جنس مس-مفتول با دقت $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ و وضوح 0.3°C بوده و در نقاط موردنظر کاملاً به دیوار چسبانده شدند. در این پژوهش ۴ دستگاه دیتالاگرهای حرارتی Hobo UX 120 مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۳-۱۶: دیتالاگر حرارتی مدل Hobo UX 120-014M

۳-۱۰-۲-۳ دیتالاگر حرارتی (Hobo UX ۱۰۰-۰۰۳)

برای اندازه‌گیری دما و رطوبت حفره هوا در پشت دیوارهای سبز و همچنین دما و رطوبت داخل اتاقک از دیتالاگر حرارتی Hobo UX 100 استفاده شد. این دیتالاگر رطوبت هوا را با دقت 3.5% و وضوح 0.07% ثبت می‌کند. ۳ دستگاه از این دیتالاگر در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. (شکل ۳-۱۷)



شکل ۳-۱۷: دیتالاگر حرارتی مدل Hobo UX 100-003

۴-۱۰-۲-۳ دوربین حرارتی HT مدل THT46

به منظور اندازه‌گیری دمای سطح لایه گیاهی در دیوار سبز از دوربین حرارتی HT مدل THT46 استفاده شد. در مدت آزمایش در گرم‌ترین روزها به فاصله هر یک ساعت یکبار از سطح دیوار سبز و دیوار مرجع به وسیله این دوربین حرارتی عکس‌برداری انجام شد. (شکل ۳-۱۸)



شکل ۳-۱۸: دوربین حرارتی HT مدل THT46

جدول ۳-۱: مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش

ردیف	نام دستگاه	تعداد	عملکرد	دقت اندازه‌گیری
۱	Hobo RX 3000	1	ایستگاه هواشناسی، سنجش فاکتورهای آب و هوا	± 8 seconds per month in 0° to 40°C (32°F to 104°F) range
۲	Hobo UX 120-014M	۴	سنجش دمای سطوح	$\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1.08^{\circ}\text{F}$) \pm thermocouple probe accuracy
۳	Hobo UX 100-003	۳	سنجش دما و رطوبت	Temperature Sensor: $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ from 0° to 50°C RH Sensor: $\pm 3.5\%$ from 25% to 85% including hysteresis at 25°C
۴	مدل HT THT46	۱	سنجش دمای سطوح	$0.1^{\circ}\text{C} / 0.1^{\circ}\text{F}$

فصل ۲: تجزیه و تحلیل یافته‌های پژوهش

۱-۴ بازه‌ی دیتا برداری

دیتا برداری در ۲۹ روز یعنی از July ۲ تا July ۳۱ (۱۱ تیرماه تا ۹ مردادماه) انجام شد. اطلاعات به صورت ۲۴ ساعته برای تمامی سطوح توسط دستگاه‌ها ثبت گردید. اینتروال دستگاه‌ها ۱۰ دقیقه تنظیم گردید یعنی تمامی دستگاه‌ها اطلاعات دما و رطوبت را هر ۱۰ دقیقه یکبار ثبت می‌کردند. در این پژوهش میزان دما و رطوبت موارد ذیل بررسی گردید:

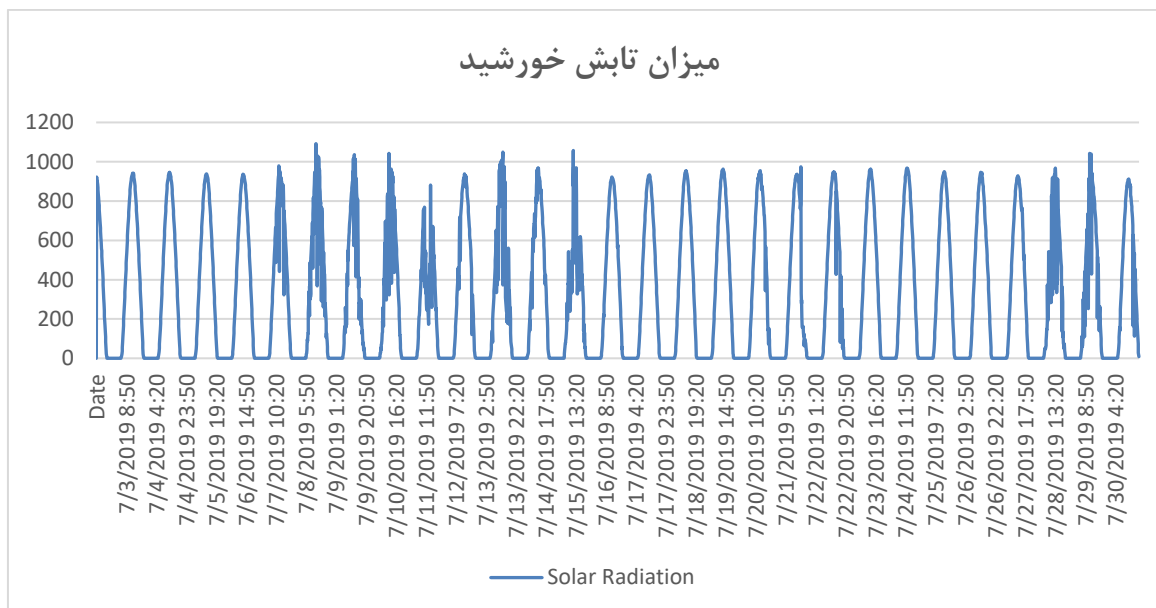
- دمای سطوح خارجی
- دمای سطوح داخلی
- دما و رطوبت حفره هوا
- دما و رطوبت هوای داخل اتاقک

۲-۴ فاکتورهای آب و هوایی

به منظور بررسی تأثیرات فاکتورهای آب و هوایی بر دمای سطوح مورد آزمایش در پژوهش برخی از این فاکتورها نظیر تابش آفتاب، سرعت باد و دما هوا مورد تحلیل گرفت.

۱-۲-۴ تابش آفتاب

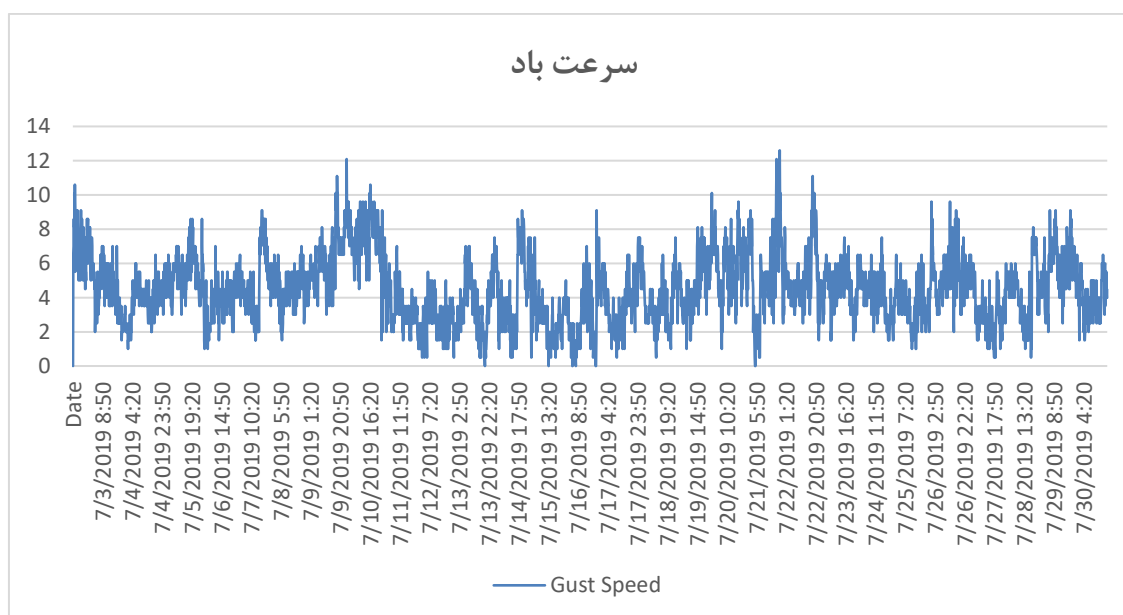
در کل بازه‌ی دیتا برداری اکثر روزها آفتابی بودند و فقط در چند روز در ساعات صبح شاهد هوای ابری بودیم. روز ۸ July بین ساعات ۱۲ ظهر تا ۱۴ هوا لحظاتی ابری شد. بعد از آن در روز ۱۰ July نیز از ساعت ۹:۳۰ تا ۱۲:۳۰ هوا ابری گردید. ابری‌ترین روز در کل مدت دیتا برداری مربوط به ۱۱ July می‌باشد که از ساعت ۱۲ تا ۱۴ هوا کاملاً ابری بود و با توجه به اینکه دیوارهای مورد آزمایش در این ساعات در معرض بیشترین تابش قرار می‌گرفتند مطمئناً این ساعات ابری بر دمای سطح دیوارها تأثیر داشته است. همچنین روزهای ۱۳ و ۱۵ July از ساعت ۹ تا ۱۱ و روز ۲۸ July در ساعت ۱۱ و ۱۴ تا ۱۵ هوا ابری بود و در روز ۲۹ July نیز ساعاتی از صبح شاهد هوای ابری بودیم (نمودار ۱-۴).



نمودار ۴-۱: میزان تابش خورشید

۴-۲-۲ سرعت باد

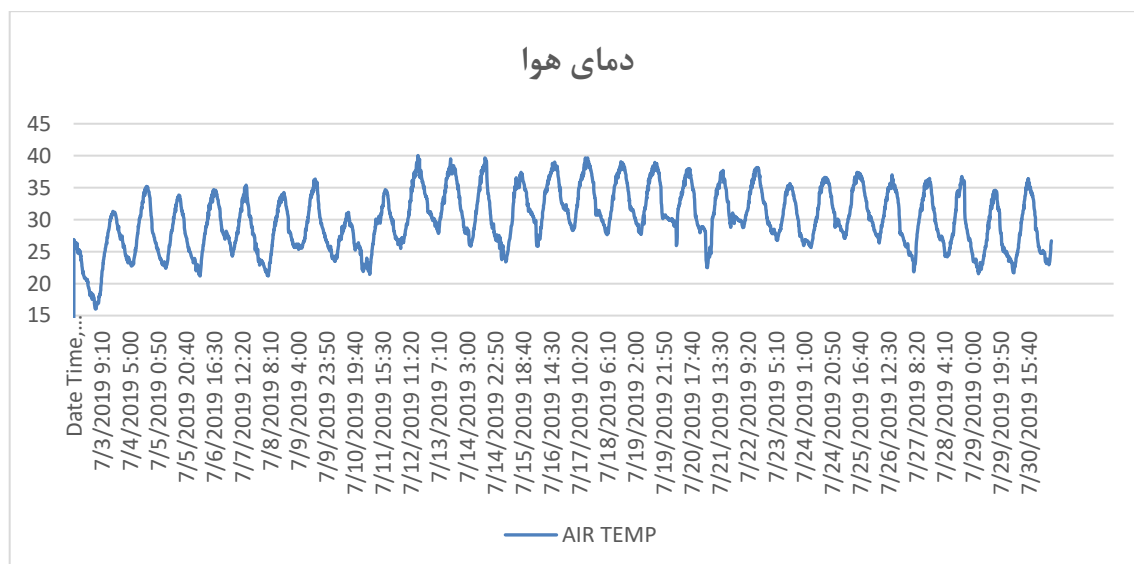
به طور کلی سرعت باد در مدت دیتابرداری در حدود $3-6 \text{ m/s}$ بوده و فقط در ساعاتی از عصر و بعد از غروب آفتاب در روزهای ۹ و ۲۱ July شاهد بادهای شدید با سرعت 12 m/s بودیم که این افزایش سرعت باد به علت اینکه در ساعات پایانی روز رخ داد در حداکثر دمای سطح دیوارها تأثیری نداشت (نمودار ۴-۲).



نمودار ۴-۲: سرعت باد

۳-۲-۴ دمای هوا

در مدت دیتا برداری معمولاً بین ساعات ۱۵ تا ۱۷ دمای هوا به حداکثر میزان خود می‌رسید و میانگین حداکثر آن معادل ۳۶,۲۶ درجه بود و سپس کاهش دما تا حدوداً ساعت ۶:۳۰ ادامه داشت و میانگین حداقل دمای هوا به ۲۴,۱۶ درجه می‌رسید. در روزهای ۱۲ تا ۱۹ July گرم‌ترین روزهای دیتا برداری اتفاق افتاد که دمای هوا به‌طور میانگین به ۳۸ درجه می‌رسید و حداکثر دمای سطوح نیز در همین بازه ثبت شده است. در روز ۱۲ July حداکثر میزان دمای هوا در کل مدت دیتا برداری رخ داده است. در این روز در ساعت ۱۶:۳۰ دمای هوا به ۴۰,۰۳ درجه رسید. همچنین حداقل دمای هوا مربوط به ۳ July با ۱۶,۰۳ درجه در ساعت ۴:۴۰ می‌باشد. (نمودار ۳-۴)



نمودار ۳-۴: دمای هوا

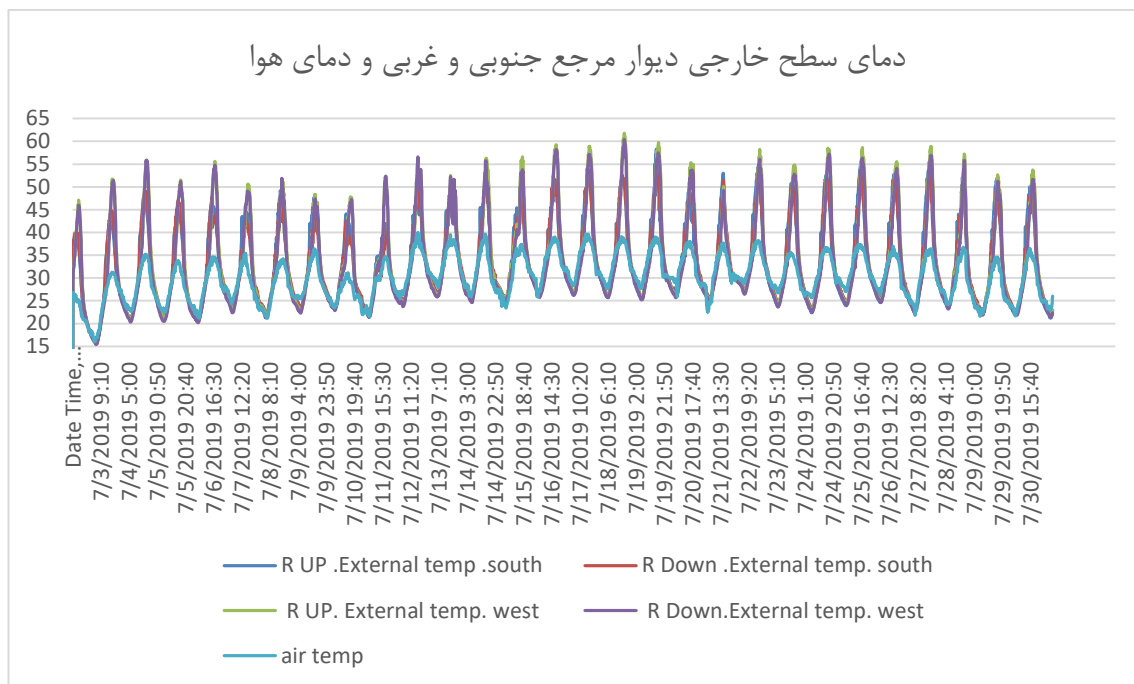
۳-۴ بررسی دمای سطح دیوارهای خارجی

۱-۳-۴ دیوار مرجع

با توجه به موقعیت اتاقک مورد آزمایش که جهت‌گیری جنوبی با ۲۹ درجه انحراف نسبت به غرب دارد، دیوار جنوبی اتاقک حدوداً از ساعت ۱۲ تا ۱۷ و دیوار غربی آن از ساعت ۲ تا پایان روز در معرض تابش

قرار داشت. در مدت دیتا برداری زمان طلوع آفتاب ساعت ۵:۳۶ تا ۵:۵۵ و زمان غروب آفتاب ۲۰:۱۲ تا ۱۹:۵۷ بود. حداکثر دمای سطح ثبت شده برای دیوار مرجع جنوبی ۵۸,۲۷ درجه در روز ۱۹ July ساعت ۱۶:۲۰ می باشد که اختلاف دمایی ۲۱ درجه با دمای هوا در آن روز داشت و حداکثر دمای سطح دیوار مرجع غربی معادل ۶۱,۸۲ درجه در روز ۱۸ July ساعت ۱۷:۵۰ به ثبت رسیده است که اختلاف دمایی ۲۴ درجه با دمای هوا در آن روز دارد. همچنین حداقل دمای ثبت شده برای هر دو دیوار مرجع حدوداً معادل ۱۵,۵ درجه در روز ۳ July می باشد. (نمودار ۴-۴)

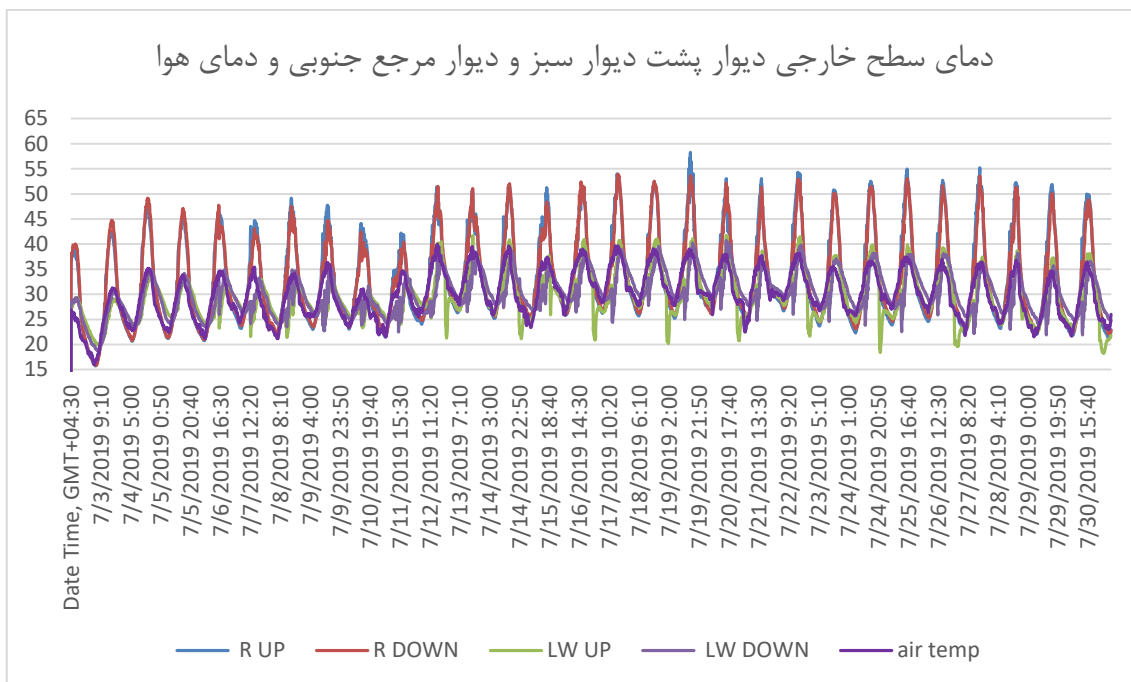
سطح دیوار مرجع جنوبی معمولاً در ساعت ۱۶ تا ۱۶:۲۰ به حداکثر دمای خود می رسید و به طور میانگین حداکثر دمایی معادل ۵۰,۱۱ درجه داشت و بعد از آن کاهش دما شروع شده به طوری که در ساعت ۶ صبح این دیوار به کمترین دمای خود می رسید و سپس دوباره افزایش دما اتفاق می افتاد. میانگین حداقل دمای سطح برای این دیوار برابر ۲۳,۳۸ درجه بود. همچنین دمای سطح دیوار مرجع غربی نیز معمولاً در ساعات حدوداً ۱۷ تا ۱۷:۳۰ به حداکثر می رسید و به طور میانگین حداکثر دمایی معادل ۵۴,۷۲ درجه داشت. پس از آن کاهش دما تا ساعت ۶:۲۰ ادامه می یافت و به طور میانگین به حداقل دمای ۲۳,۴۵ درجه می رسید. در مدت دیتا برداری میانگین حداکثر دمای هوا معادل ۳۶,۲۶ درجه بود که در مقایسه با میانگین حداکثر دمای سطوح خارجی دیوارهای مرجع اختلاف دمایی برابر با ۱۳,۸۵ درجه در دیوار مرجع جنوبی و ۱۸,۴۹ درجه در دیوار مرجع غربی به ثبت رسیده است. می توان این گونه بیان کرد که در کل مدت دیتا برداری دیوارهای مرجع بیشترین و کمترین دما را نسبت به سایر سطوح خارجی کسب کردند.



نمودار ۴-۴: دمای سطح خارجی دیوار مرجع جنوبی و غربی و دمای هوا

۴-۳-۲ دیوار پشت دیوار سبز جنوبی

در مدت دیتا برداری دمای پشت دیوار سبز جنوبی به طور معمول بین ساعات ۱۸:۳۰ تا ۱۹:۳۰ به حداکثر دمای خود می‌رسید و پس از آن دمای دیوار روند کاهشی داشت و در ساعات حدوداً ۸ تا ۸:۳۰ به حداقل دمای خود می‌رسید. حداکثر دمای ثبت شده برای این سطح در روزهای ۱۳ و ۲۰ July معادل ۴۱,۷ درجه در ساعت ۱۶ می‌باشد و حداقل دمای ثبت شده ۱۸,۹ درجه در روز ۳ July ساعت ۶:۵۰ می‌باشد. میانگین حداکثر دمای سطح خارجی برای این دیوار معادل ۳۷,۱۱ درجه بود که نسبت به میانگین حداکثر دمای هوا اختلاف ناچیز ۰,۸۵ درجه‌ای مشاهده گردید. (نمودار ۴-۵)

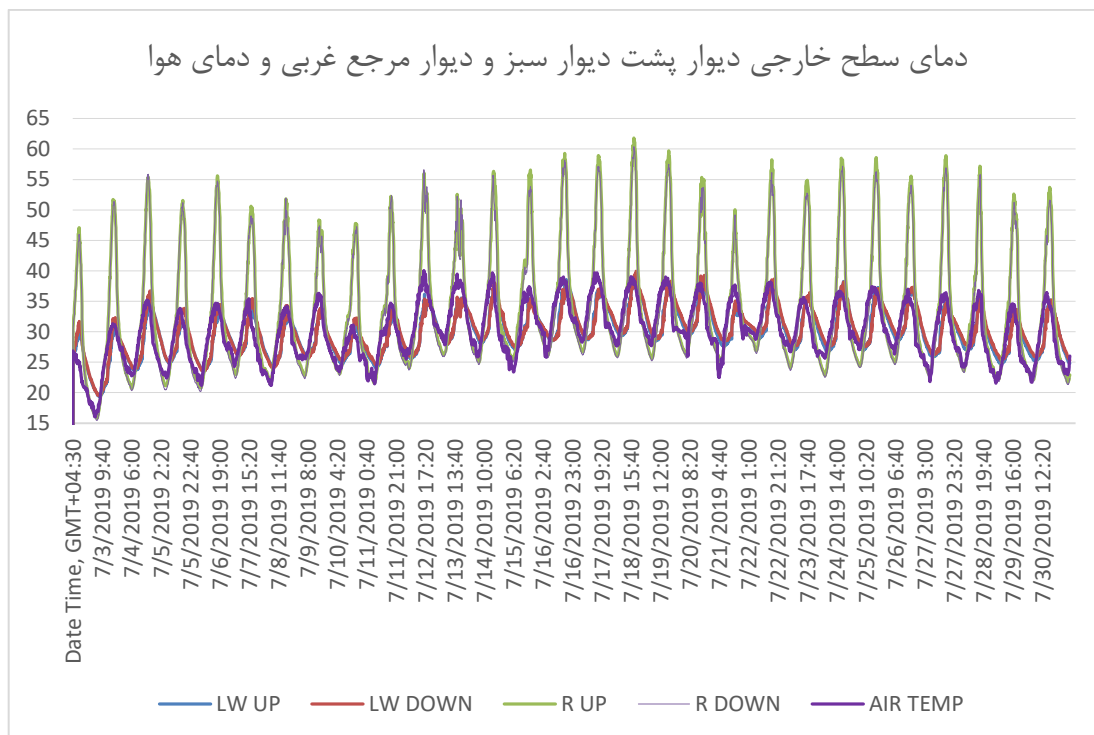


نمودار ۴-۵: دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع جنوبی و دمای هوا

۴-۳-۳ دیوار پشت دیوار سبز غربی

دیوار سبز نصب شده بر دیوار غربی اتاقک باعث شد که سطح خارجی دیوار پشت آن سایه باشد و نسبت به دیوار مرجع دمایی پایین تری داشته باشد. دمای سطح خارجی این دیوار در مدت دیتا برداری حدوداً در ساعات ۱۸:۳۰ تا ۱۹:۳۰ به حداکثر دمای خود می‌رسید و پس از آن دمای دیوار کاهش یافته تا در ساعات ۸ تا ۸:۴۰ به کمترین مقدار خود می‌رسید و بعد از آن دوباره روند افزایش دما آغاز می‌گردید.

حداکثر دمای سطح خارجی دیوار پشتی در این جهت در روز ۱۸ July در ساعت ۱۹:۲۰ معادل ۳۹,۹۲ درجه و حداقل دمای سطح خارجی در روز ۳ July ساعت ۷ معادل ۱۹,۴ درجه ثبت گردیده است. در مدت دیتا برداری میانگین حداکثر دمای سطح خارجی برای این دیوار معادل ۳۵,۴ درجه بود که این دما از میانگین حداکثر دمای هوا کمتر بود و اختلافی برابر با ۰,۸۶ درجه داشت. (نمودار ۴-۶)



نمودار ۴-۶: دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع غربی و دمای هوا

۴-۳-۴ مقایسه دمای سطوح خارجی دیوار پشت دیوار سبز با دیوار مرجع

در جهت جنوب

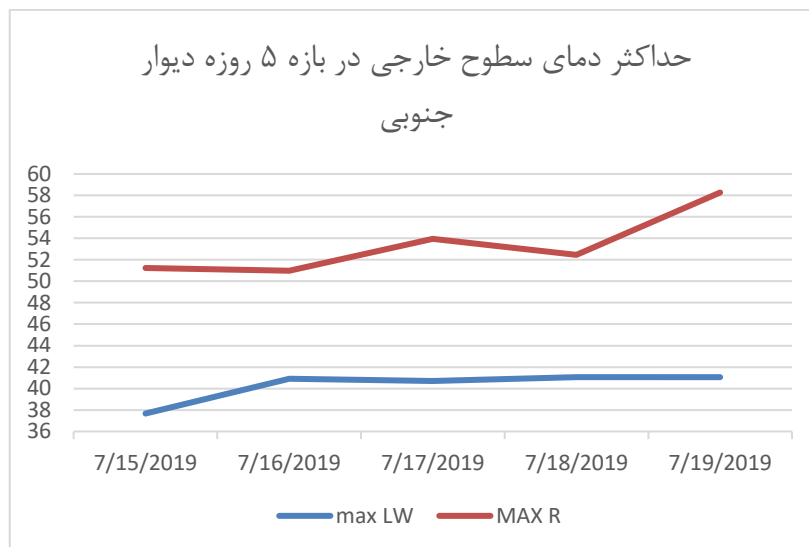
برای مقایسه و تحلیل بهتر دمای سطوح خارجی دیوار پشت دیوار سبز با دیوار مرجع، اطلاعات مربوط به حداکثر، حداقل و میانگین دمای هر روز این سطوح در مدت دیتا برداری در جدول ۴-۱ گردآوری گردید. همان‌گونه که در این جدول آمده است، بین حداکثر دمای سطوح مرجع و دیوار پشت دیوار سبز در جهت جنوب اختلاف زیادی وجود دارد به طوری که در روز ۲۸ July این اختلاف به بیشترین مقدار خود یعنی ۱۷٫۸۵ درجه رسید؛ اما از مقایسه میانگین حداکثر دمای سطح در دیوار مرجع و دیوار پشت دیوار سبز اختلاف ۱۳ درجه‌ای حاصل شد که نشان از تأثیر فراوان دیوار سبز جنوبی در کاهش دمای سطح دیوار پشتی خود است. همچنین به منظور تحلیل بهتر اطلاعات و مشخص تر شدن تأثیر دیوارهای سبز در کاهش دمای سطح، یک بازه ۵ روزه از مدت دیتا برداری یعنی July ۱۵ تا July ۱۹ که گرم‌ترین روزها در این مدت بودند، انتخاب گردید و جداول و نمودارهای مربوطه ترسیم و مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۴-۲).

جدول ۴-۱: حداکثر و حداقل و میانگین دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع جنوبی

روز	دیوار پشت دیوار سبز جنوبی LW			دیوار مرجع جنوبی R		
	Max	Min	Average	Max	Min	Average
7/2/2019	29.3	24.03	27.33175	38.87	19.86	30.70937
7/3/2019	29.18	19.96	24.16576	42.54	15.7	26.79833
7/4/2019	33.59	23.87	28.1216	47.34	20.61	30.97229
7/5/2019	33.39	25.42	29.15292	45.57	21.21	30.37757
7/6/2019	32.68	23.27	27.30347	46.75	20.8	31.0175
7/7/2019	32.98	21.57	28.5491	44.67	23.17	31.31806
7/8/2019	31.86	21.42	27.37333	49.16	21.84	31.50264
7/9/2019	33.89	23.82	28.50854	47.73	23.02	31.785
7/10/2019	30.9	23.32	27.15757	44.09	23.04	30.70875
7/11/2019	32.78	23.65	27.52403	42.2	21.53	29.87347
7/12/2019	40.46	21.3	30.60243	51.45	24.05	34.00354
7/13/2019	41.7	26.74	31.91778	50.58	26.32	35.13389
7/14/2019	40.87	21.82	30.88549	51.97	25.17	34.39979
7/15/2019	37.67	21.13	29.12431	51.23	24.72	34.45681
7/16/2019	40.91	26.96	32.16194	50.98	25.93	35.44278
7/17/2019	40.7	20.88	30.86597	53.96	26.21	36.17417
7/18/2019	41.05	27.34	32.85521	52.47	25.7	35.62479
7/19/2019	41.06	20.19	31.01618	58.27	25.22	35.39354
7/20/2019	41.77	22.19	32.19854	53.04	26.29	34.66771
7/21/2019	38.62	20.76	29.49181	53.03	24.44	33.50993
7/22/2019	41.51	21.68	31.86486	54.29	26.7	35.80431
7/23/2019	37.74	22.84	29.76507	50.83	23.68	33.48056
7/24/2019	39.82	18.44	29.72451	52.55	22.33	33.375
7/25/2019	39.91	24.94	30.41681	54.93	23.88	34.42042
7/26/2019	39.26	20.36	31.41722	52.73	24.59	34.15917
7/27/2019	39.26	20.36	31.41722	52.73	24.59	34.15917
7/28/2019	37.38	19.64	27.62986	55.23	22.36	33.41417
7/29/2019	38.69	24.05	28.64347	52.25	23.19	32.5859
7/30/2019	37.27	22.5	27.69111	51.91	22.05	31.81715
Average	37.11	22.56	29.47855	50.11	23.38	33.00296

جدول ۴-۲: حداکثر و حداقل و میانگین دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع جنوبی در بازه ۵ روزه

روز	دیوار پشت دیوار سبز جنوبی LW			دیوار مرجع جنوبی R		
	Max	Min	Average	Max	Min	Average
7/15/2019	37.67	21.13	29.12431	51.23	24.72	34.45681
7/16/2019	40.91	26.96	32.16194	50.98	25.93	35.44278
7/17/2019	40.7	20.88	30.86597	53.96	26.21	36.17417
7/18/2019	41.05	27.34	32.85521	52.47	25.7	35.62479
7/19/2019	41.06	20.19	31.01618	58.27	25.22	35.39354

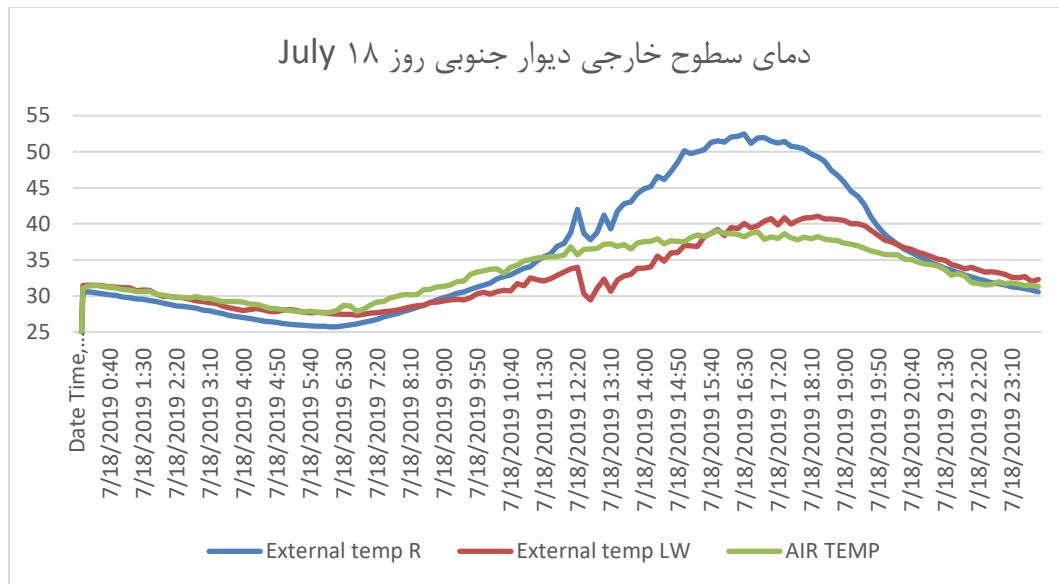


نمودار ۴-۷: حداکثر دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع جنوبی در بازه ۵ روزه

بر طبق نمودار ۴-۷ مشخص می‌گردد دیوار سبز جنوبی در گرم‌ترین روزهای دیتا برداری در کاهش حداکثر دمای سطح خارجی دیوار پشت خود تأثیر شگرفی داشته؛ به طوری که حداکثر دمای این سطوح اختلاف زیادی در حدود ۱۲ درجه دارند. همچنین مشاهده می‌شود که دیوار سبز در کاهش نوسانات دمایی مؤثر بوده و به طور معمول حداکثر دمای سطح خارجی دیوار را در یک محدوده دمایی نگه داشته است.

حال اگر دمای سطوح خارجی دیوار جنوبی را در ساعات مختلف یک روز بررسی کنیم، تأثیر دیوار سبز در کاهش حداکثر دمای سطح بیشتر مشخص می‌گردد. به این منظور یکی از روزهای گرم در مدت دیتا برداری یعنی ۱۸ July انتخاب گردید و نمودار مربوط به دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع در این روز ترسیم شد. بر طبق نمودار ۴-۸ دامنه تغییرات دمایی سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز بسیار محدود و هماهنگ با تغییرات دمای هوا بوده و دمای این سطح معمولاً بین ۲۸ تا ۴۰ درجه تغییر کرده است. ولی دیوار مرجع دارای دامنه تغییرات شدیدتر بوده و دمای سطح خارجی آن حدوداً از ۲۶ تا ۵۲ درجه نوسان داشته است. همچنین بر طبق این نمودار دیوار سبز حداکثر دمای سطح خارجی را به میزان حدوداً ۱۲ درجه کاهش داده است که این امر تأثیر زیاد دیوارهای سبز در کاهش حداکثر دما در ساعات گرم روز که بیشترین میزان تابش بر دیوار وجود دارد، را مشخص می‌کند.

این قابلیت دیوارهای سبز در کاهش حداکثر دمای سطوح نشان از تاثیر فراوان این سیستم ها در کاهش انتقال حرارت به داخل دارد که این مسئله صرفه جویی در مصرف انرژی در ساختمان ها را به دنبال خواهد داشت.



نمودار ۴-۸: دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز، دیوار مرجع جنوبی و دمای هوا در روز ۱۸ July

۴-۳-۵ مقایسه دمای سطوح خارجی دیوار پشت جداره سبز با دیوار مرجع

در جهت غرب

به منظور مقایسه و تحلیل بهتر اطلاعات به دست آمده از دیوار غربی نیز اطلاعات مربوط به حداکثر، حداقل و میانگین دمای هر روز سطوح خارجی دیوار پشت دیوار سبز با دیوار مرجع، در مدت دیتا برداری در جدول ۴-۲ گردآوری گردید.

بر طبق این جدول، بین حداکثر دمای سطح پشتی دیوار سبز غربی با دیوار مرجع در همین جهت اختلاف زیادی مشاهده می شود. به طوری که در روز ۲۷ July این اختلاف به بیشترین مقدار خود یعنی ۲۳,۵۱ درجه می رسید؛ اما از مقایسه میانگین حداکثر دمای سطح در دیوار مرجع و دیوار پشت دیوار سبز در این جهت

اختلاف ۱۹,۳۲ درجه به دست آمد که نظیر دیوار سبز جنوبی حاکی از تأثیر بسیار زیاد دیوار سبز غربی در کاهش دمای سطح دیوار پشت خود دارد.

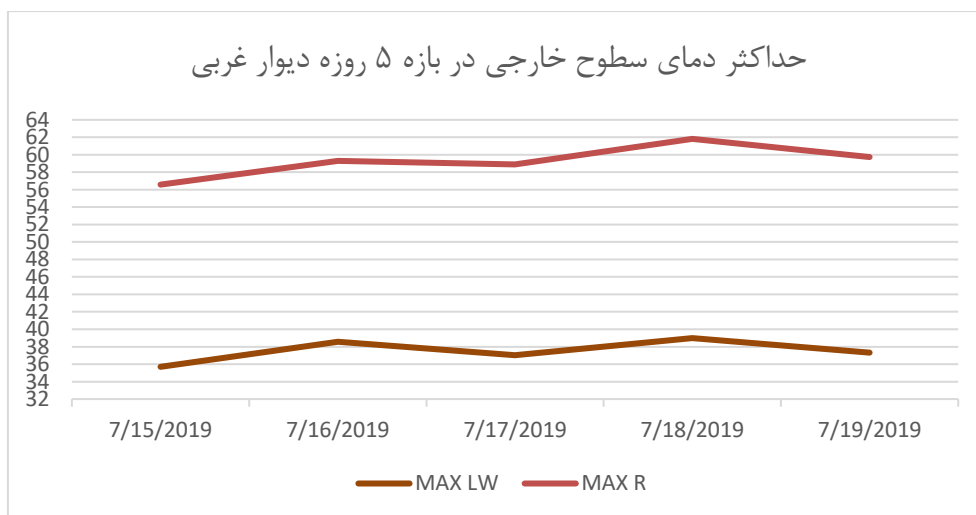
جدول ۳-۴: حداکثر و حداقل و میانگین دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع غربی

روز	دیوار پشت دیوار سبز غربی LW			دیوار مرجع غربی R		
	Max	Min	Average	Max	Min	Average
7/2/2019	30.43	23.65	27.2046032	47.1	19.98	33.321746
7/3/2019	31.22	19.38	24.126014	51.73	15.83	27.9711888
7/4/2019	35.48	23.62	28.2081944	55.39	20.67	31.8432639
7/5/2019	31.95	24.82	28.2145139	51.56	21.11	30.9663194
7/6/2019	33.85	23.64	27.6933333	55.6	20.74	31.8611111
7/7/2019	33.89	26.22	29.37625	50.63	22.9	32.0765278
7/8/2019	33.29	24.3	28.0561806	51.82	21.85	31.6696528
7/9/2019	33.68	25.92	28.9292361	48.33	22.81	31.2746528
7/10/2019	31.14	24.82	27.3807639	47.8	23.05	30.9661111
7/11/2019	33.59	24.16	27.9627778	52.22	21.56	31.3461806
7/12/2019	36.17	25.58	29.7341667	56.03	24.01	34.47
7/13/2019	35.59	27.8	31.365	52.54	26.21	35.1674306
7/14/2019	37.32	28.09	31.7561111	56.32	25.04	34.6992361
7/15/2019	35.7	26.92	30.408125	56.58	25.4	35.2632639
7/16/2019	38.58	28.5	32.4060417	59.28	26.13	36.9620139
7/17/2019	37.02	28.67	32.5019444	58.9	26.69	37.1022917
7/18/2019	38.99	29.3	33.2899306	61.82	25.99	37.2314583
7/19/2019	37.31	28.45	32.505625	59.72	25.61	36.6429167
7/20/2019	39.05	29.38	32.9016667	55.32	26.07	35.3345833
7/21/2019	34.34	27.6	30.3949306	50.03	24.86	32.6036806
7/22/2019	38.26	28.76	32.1634722	58.24	26.83	35.7827083
7/23/2019	35.99	26.99	30.8955556	54.85	24.05	34.2104861
7/24/2019	38.27	26.73	31.1759722	58.52	22.81	34.265625
7/25/2019	37.27	26.92	31.2902778	58.6	24.39	35.2173611
7/26/2019	37.2	28.35	32.2020833	55.53	24.96	34.7340972
7/27/2019	35.42	25.81	29.8449306	58.93	22.73	34.010625
7/28/2019	36.56	26.93	30.0528472	57.21	23.55	32.6217361
7/29/2019	33.73	24.61	28.2768056	52.62	22.22	31.7034722
7/30/2019	35.28	25.17	29.196875	53.72	22.14	32.3061111
Average	35.4	26.24	29.98	54.72	23.45	33.57

در خصوص دیوار غربی نیز به منظور تحلیل بهتر اطلاعات و بیان تأثیر دیوارهای سبز در کاهش دمای سطح، در ادامه یک بازه ۵ روزه از مدت دیتا برداری یعنی July ۱۵ تا July ۱۹ که گرم‌ترین روزها در این مدت بودند، انتخاب گردید و جداول و نمودارهای مربوطه ترسیم و مورد بررسی قرار گرفت. (جدول ۴-۴)

جدول ۴-۴: حداکثر و حداقل و میانگین دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع غربی در بازه ۵ روزه

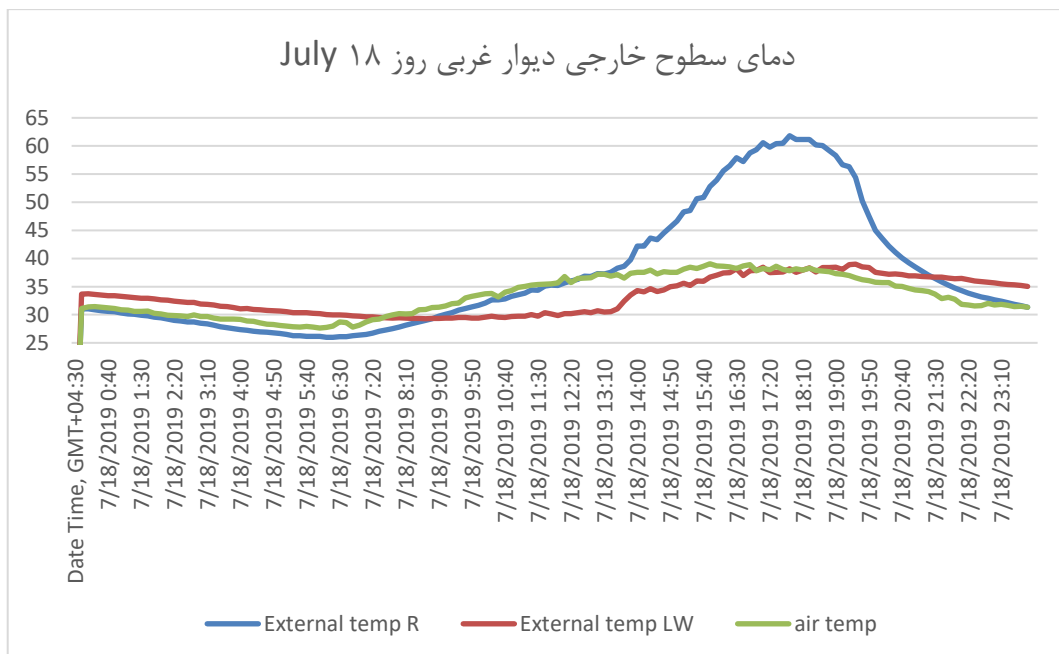
روز	دیوار پشت دیوار سبز غربی LW			دیوار مرجع غربی R		
	Max	Min	Average	Max	Min	Average
7/15/2019	35.7	26.92	30.408125	56.58	25.4	35.2632639
7/16/2019	38.58	28.5	32.4060417	59.28	26.13	36.9620139
7/17/2019	37.02	28.67	32.5019444	58.9	26.69	37.1022917
7/18/2019	38.99	29.3	33.2899306	61.82	25.99	37.2314583
7/19/2019	37.31	28.45	32.505625	59.72	25.61	36.6429167



نمودار ۴-۹: حداکثر دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع غربی در بازه ۵

بر طبق نمودار ۴-۹ مشاهده می‌گردد که تأثیر دیوار سبز غربی در گرم‌ترین روزهای دیتا برداری در کاهش حداکثر دمای سطح خارجی دیوار پشت خود حتی از دیوار جنوبی نیز بیشتر بوده و حداکثر دمای سطح خارجی دیوار مرجع اختلافی در حدود ۲۱ درجه با حداکثر دمای سطح دیوار پشت دیوار سبز دارد. در جهت نیز دیوار سبز در کاهش نوسانات دمایی مؤثر بوده و به‌طور معمول حداکثر دمای سطح خارجی دیوار را در یک محدوده دمایی نگه داشته است.

در جهت غربی نیز اگر دمای سطوح خارجی در ساعات مختلف یک روز بررسی شود، تاثیر بیشتر دیوار سبز در کاهش حداکثر دمای سطح در جهت غربی مشخص می‌گردد. به این منظور نمودار مربوط به دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز و دیوار مرجع در جهت غربی در روز ۱۸ July ترسیم شد. بر طبق نمودار ۴-۱۰ دامنه‌ی تغییرات دمایی سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز در این جهت بسیار کم‌تر از جهت جنوب می‌باشد و با تغییرات دمای هوا هماهنگ است. دمای این سطح معمولا بین ۳۰ تا ۳۶ درجه تغییر کرده است. ولی دیوار مرجع دارای دامنه تغییرات شدیدتر بوده و دمای سطح خارجی آن حدودا از ۲۶ تا ۶۰ درجه نوسان داشته است. همچنین بر طبق این نمودار دیوار سبز حداکثر دمای سطح خارجی در این روز را به میزان حدودا ۲۲ درجه کاهش داده است که این امر حاکی از تاثیر شگرف دیوارهای سبز در کاهش حداکثر دما در ساعات گرم روز در جهت غربی است بطوری که این تاثیر بسیار بیشتر از تاثیر دیوارهای سبز در جهت جنوب می‌باشد. این قابلیت دیوارهای سبز در کاهش حداکثر دمای سطوح در جهت غربی برای مناطقی که افزایش دمای دیوارهای غربی یک معضل محسوب می‌شود بسیار مفید و راه‌گشا بوده و باعث کاهش انتقال حرارت به داخل و به تبع آن صرفه جویی در مصرف انرژی در ساختمان‌ها خواهد شد.



نمودار ۴-۱۰: دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز ، دیوار مرجع غربی و دمای هوا در روز ۱۸ July

۴-۳-۶ مقایسه دیوار جنوبی و غربی

از بررسی و مقایسه‌ی میانگین حداکثر دمای سطح خارجی دیوارها در دو جهت جنوبی و غربی مشخص می‌شود که میانگین حداکثر دمای سطح خارجی دیوار در دیوار مرجع غربی نسبت به دیوار مرجع جنوبی ۴,۶۱ درجه بیشتر است. این اختلاف دما گواه این مسئله است که در ایام گرم سال در منطقه شاهرود دیوارهای غربی از نظر دمای سطح در وضعیت بحرانی‌تری نسبت به دیوارهای جنوبی قرار دارند. از طرفی اختلاف میانگین حداکثر دمای سطح خارجی دیوار مرجع و دیوار پشت دیوار سبز جنوبی معادل ۱۳ درجه و اختلاف میانگین حداکثر دمای سطح خارجی دیوار مرجع و دیوار پشت دیوار سبز غربی معادل ۱۹,۳۲ درجه است. از مقایسه این اختلاف در دو جهت جنوبی و غربی نیز می‌توان به این نکته پی برد که دیوار سبز در کاهش دمای سطح خارجی دیوار در جهت غربی کارآمدتر از جهت جنوبی عمل کرده است (جدول ۴-۵).

جدول ۴-۵: مقایسه میانگین حداکثر دمای سطح خارجی دیوار جنوبی و غربی

	نوع دیوار	جنوبی	غربی
میانگین حداکثر دمای سطح خارجی	دیوار مرجع	50.11	54.72
	دیوار پشت دیوار سبز	37.11	35.4

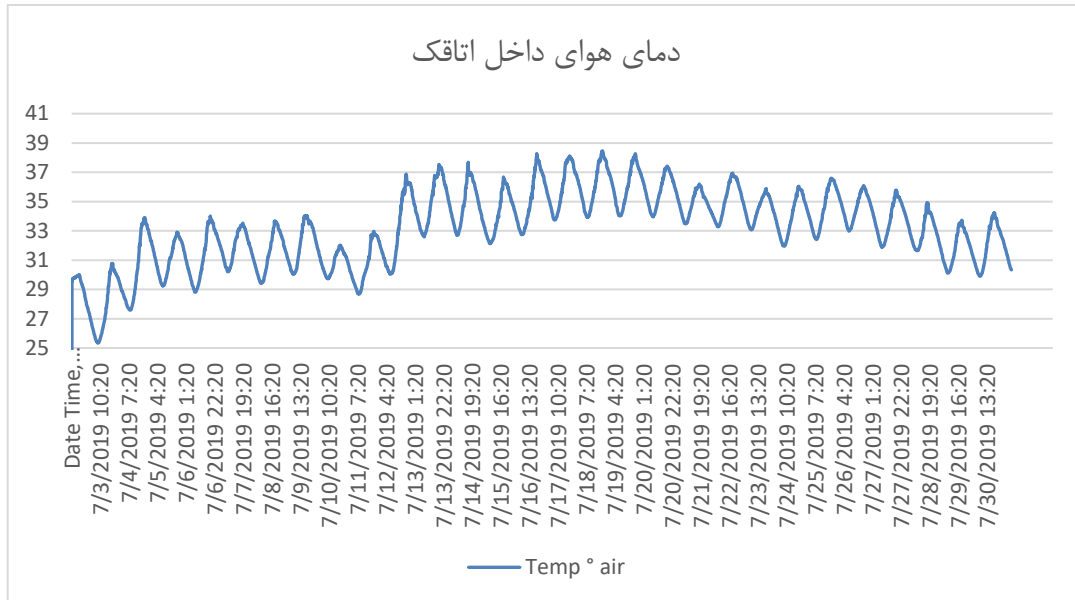
۴-۴ بررسی دمای هوا و سطوح دیوارهای داخلی

۴-۴-۱ دمای هوای داخل اتاقک

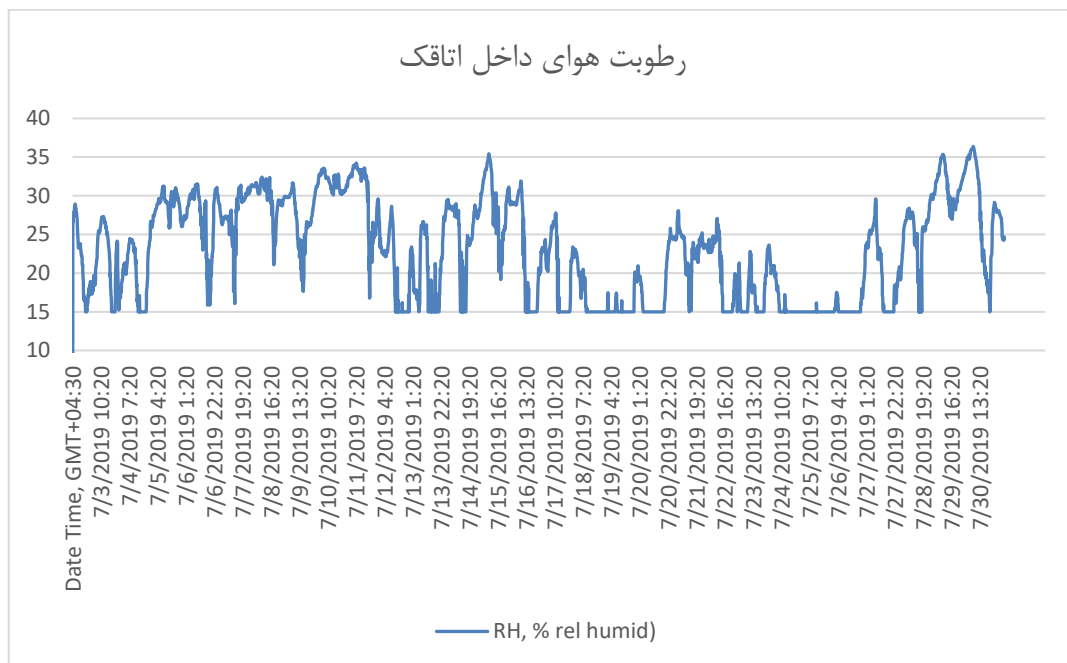
در مدت دیتا برداری دامنه تغییرات دمای هوای داخل اتاقک کم و معمولاً بین ۶ تا ۸ درجه بود. میانگین حداکثر دمای هوای داخل اتاقک معادل ۳۵,۳۱ درجه بود و میانگین حداقل دمای هوای داخل به ۳۱,۱۶ درجه می‌رسید. در روز ۱۸ July دمای هوای داخل به حداکثر میزان خود در ساعت ۱۹:۰۰ یعنی ۳۸,۴۵ درجه رسید. همچنین حداقل دمای هوا در روز ۳ July با ۲۵,۳۳ درجه در ساعت ۸:۳۰ ثبت گردیده است

(نمودار ۴-۱۱). رطوبت هوای داخل اتاقک نیز بین ۱۵٪ تا ۳۵٪ متغیر بود و بیشترین رطوبت هوا در روز

July ۳۰ به میزان ۳۵٫۶۵٪ ثبت شده است. (نمودار ۴-۱۲)



نمودار ۴-۱۱: دمای هوای داخل اتاقک



نمودار ۴-۱۲: رطوبت هوای داخل اتاقک

۴-۴-۲ دیوارهای مرجع

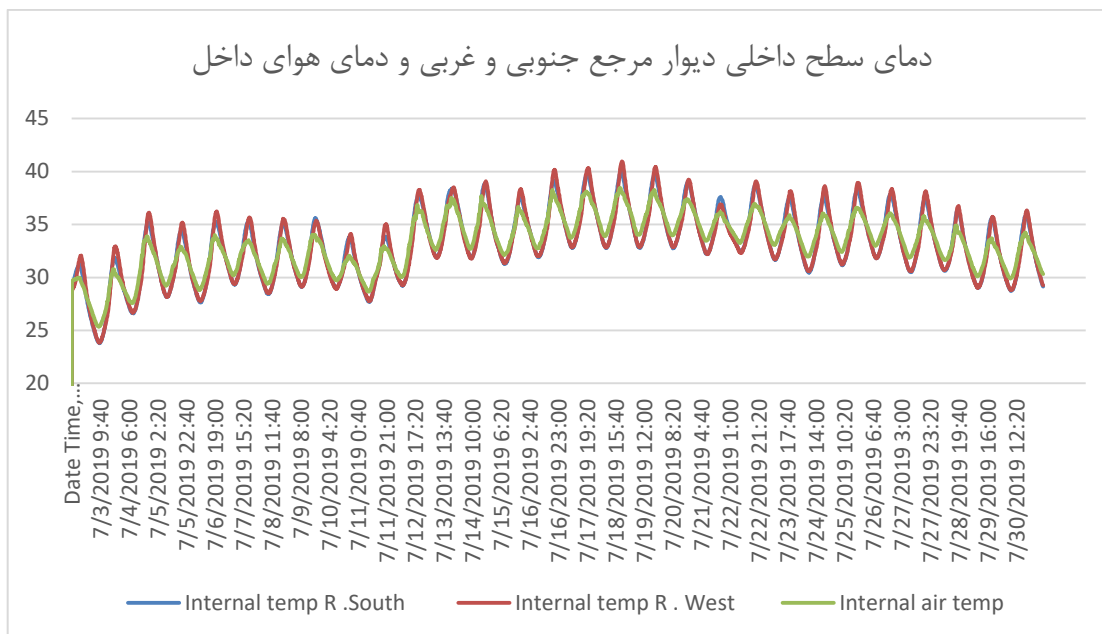
در مدت دیتا برداری به‌طور کلی دامنه تغییرات دمای سطح داخلی کم بود و دمای سطح داخلی دیوارهای مرجع جنوبی و غربی حدوداً از ۲۴ تا ۴۰ تغییر کرد.

معمولاً در مدت دیتا برداری دمای سطح داخلی دیوار مرجع جنوبی حدوداً در ساعت ۱۹:۳۰ و دیوار مرجع غربی بین ساعات ۲۰ تا ۲۰:۳۰ به حداکثر میزان خود می‌رسیدند و بعد از آن کاهش دما دیوارها شروع می‌شد به طوری که دیوار مرجع جنوبی در ساعات ۸:۴۰ تا ۹ و دیوار مرجع غربی حدوداً در ساعت ۹ به حداقل دمای سطح خود می‌رسیدند.

دمای سطح داخلی دیوار مرجع جنوبی در روز ۱۸ July یعنی گرم‌ترین روز دیتا برداری به حداکثر میزان خود معادل ۳۹,۹۸ درجه در ساعت ۱۹:۳۰ رسید و حداکثر دمای سطح داخلی دیوار مرجع غربی نیز در همین روز معادل ۴۰,۹۵ درجه در ساعت ۲۰:۲۰ ثبت گردید. لازم به ذکر است که در این روز حداکثر دمای هوای داخل اتاقک ۳۸,۴۵ درجه بود که اختلاف اندک ۱,۵ و ۲,۵ درجه با دمای سطوح داشت. هر دو دیوار مرجع در روز ۳ July در ساعت حدوداً ۹:۳۰ حداقل دمای سطح داخلی به میزان ۲۳,۸ درجه را تجربه کردند. حداقل دمای هوای داخل اتاقک در این روز معادل ۲۵,۳۳ درجه بود.

اما به‌طور کلی میانگین حداکثر دمای سطح داخلی دیوار مرجع جنوبی و غربی به ترتیب ۳۶,۷۷ و ۳۷,۲۶ درجه بود که با میانگین حداکثر دمای هوای داخل اتاقک (۳۵,۳۱ درجه) اختلاف ۱,۴۶ و ۱,۹۵ درجه‌ای داشت. (نمودار ۴-۱۳)

با مقایسه دمای سطوح داخلی و خارجی دیوارهای مرجع مشخص می‌گردد که اختلاف میانگین حداکثر دمای سطح خارجی و داخلی دیوار مرجع جنوبی ۱۳,۳۴ درجه و برای دیوار مرجع غربی ۱۷,۴۶ درجه با زمان تأخیر ۳ ساعته می‌باشد که نشانگر تغییرات زیاد دمای این دو سطح در دیوارهای مرجع است.

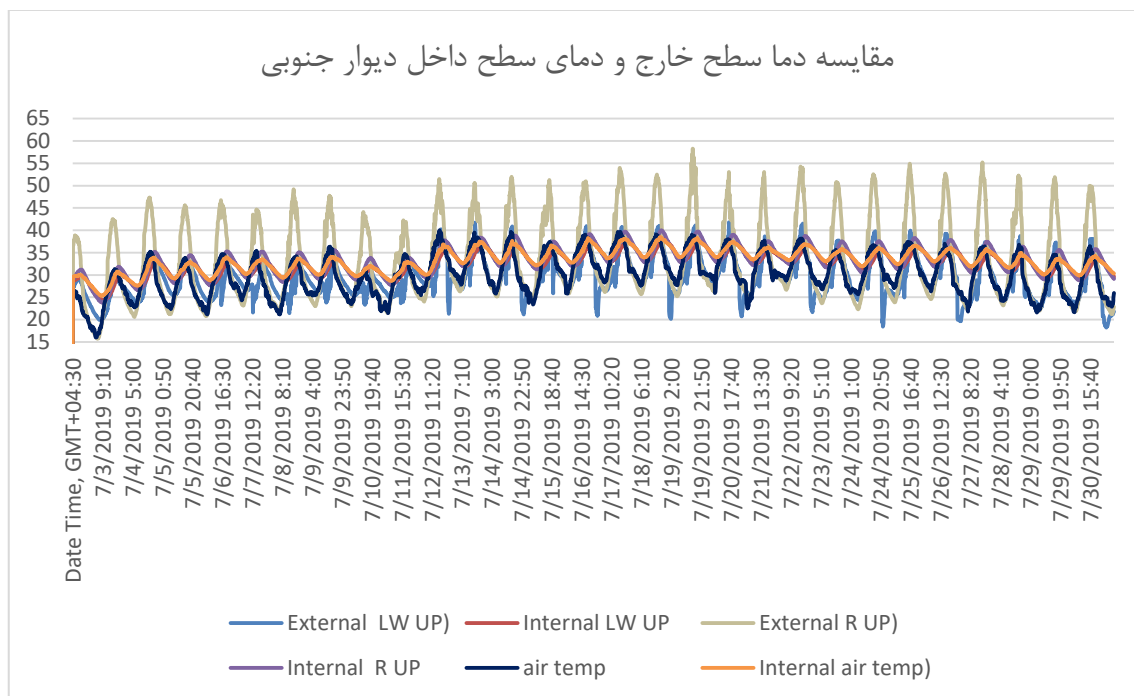


نمودار ۴-۱۳: دمای سطح داخلی دیوار مرجع جنوبی و غربی و دمای هوای داخل

۴-۴-۳ دیوار پشت دیوار سبز جنوبی

به‌طور کلی در مدت دیتا برداری دامنه‌ی تغییرات دمای سطح داخلی دیوار پشت دیوار سبز جنوبی بسیار کم بود و اختلاف دمایی زیادی نسبت به دمای سطح دیوار مرجع مشاهده نشد و نوسانات دمایی آن با نوسانات دمای هوای داخل بسیار هماهنگ بود. دمای این سطح معمولاً بین ۲۵ تا ۳۵ درجه متغیر بود و در روز ۱۸ July به حداکثر میزان خود یعنی ۳۷٫۸۵ درجه در ساعت ۱۰:۲۰ رسید. همچنین در روز ۳ July حداقل دما معادل ۲۴٫۳۰ درجه در ساعت ۹:۳۰ برای این سطح ثبت گردید. به‌طور معمول سطح داخلی دیوار پشت دیوار سبز جنوبی در ساعات ۲۱:۲۰ تا ۲۲ به حداکثر دمای خود می‌رسید و بعد از آن کاهش دما آغاز گردیده به‌طوری‌که در ساعت ۹:۳۰ به حداقل میزان خود می‌رسید. در این جهت زمان به حداکثر رسیدن دمای سطح خارجی نسبت به سطح داخلی حدود ۳ ساعت تاخیر داشت. میانگین حداکثر دمای سطح داخلی برای این دیوار معادل ۳۴٫۸۴ درجه ثبت شده است که اختلاف ناچیز ۰٫۴۷ درجه‌ای با میانگین حداکثر دمای هوای داخل و ۱٫۹۳ درجه‌ای با میانگین حداکثر دمای سطح دیوار داخلی دیوار مرجع داشت. همچنین مقایسه میانگین حداکثر دمای سطح داخلی و خارجی دیوار پشت دیوار سبز در این

جهت نشان می‌دهد که این اختلاف معادل ۲,۲۷ درجه است. این اختلاف دما نسبت به اختلاف دمایی مشابه در دیوار مرجع (۱۳,۳۴ درجه) بسیار اندک بوده و حاکی از این مسئله است که دیوار سبز اختلاف دمایی سطح خارجی و داخلی دیوار پشت خود را به حداقل رسانده است. (نمودار ۴-۱۴)

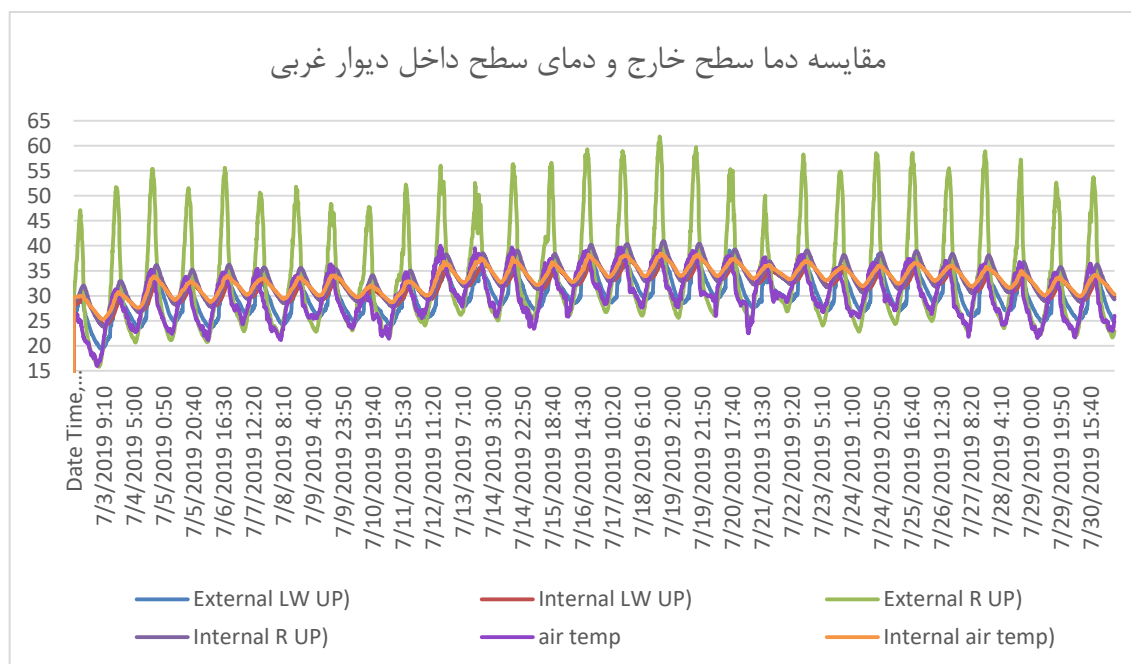


نمودار ۴-۱۴: مقایسه دما سطح خارج و دمای سطح داخل دیوار جنوبی

۴-۴-۴ دیوار پشت دیوار سبز غربی

تغییرات دمایی سطح داخلی دیوار پشت دیوار سبز غربی نیز با نوسانات دمایی هوای داخل بسیار هماهنگ بود و معمولاً برای این سطح تغییرات دمایی معادل ۲۵ تا ۳۵ درجه ثبت گردیده است. این سطح در روز July ۱۸ به حداکثر دمایی خود یعنی ۳۷,۵۲ درجه در ساعت ۲۲ رسید و در روز ۳ July حداقل دمایی خود معادل ۲۴,۱۴ درجه را در ساعت ۱۰ تجربه کرد. دمایی این سطح نیز معمولاً حدوداً در ساعت ۲۲ به حداکثر و در ساعت ۱۰ به حداقل میزان خود می‌رسید. در این جهت زمان به حداکثر رسیدن دمایی سطح خارجی نسبت به سطح داخلی ۳ ساعت تاخیر داشت. برای این سطح نیز میانگین حداکثر دمایی ۳۴,۵۵ درجه به دست آمد که اختلاف ۰,۷۶ درجه‌ای با میانگین حداکثر دمایی هوای داخل اتاقک و ۲,۷۱ درجه‌ای با

میانگین حداکثر دمای سطح داخلی دیوار مرجع داشت. همچنین از مقایسه میانگین حداکثر دمای سطح داخلی و خارجی دیوار پشت دیوار سبز مشخص می‌شود که اختلاف میانگین حداکثر دمای این سطوح ۰,۸۵ درجه است که با توجه به مقدار مشابه در دیوار مرجع غربی (۱۷,۴۶ درجه)، در این جهت نیز نشان از نقش بسیار مؤثر دیوار سبز در کاهش اختلاف دمای سطح خارجی و داخلی دیوار دارد. (نمودار ۴-۱۵)



نمودار ۴-۱۵: مقایسه دما سطح خارج و دمای سطح داخل دیوار غربی

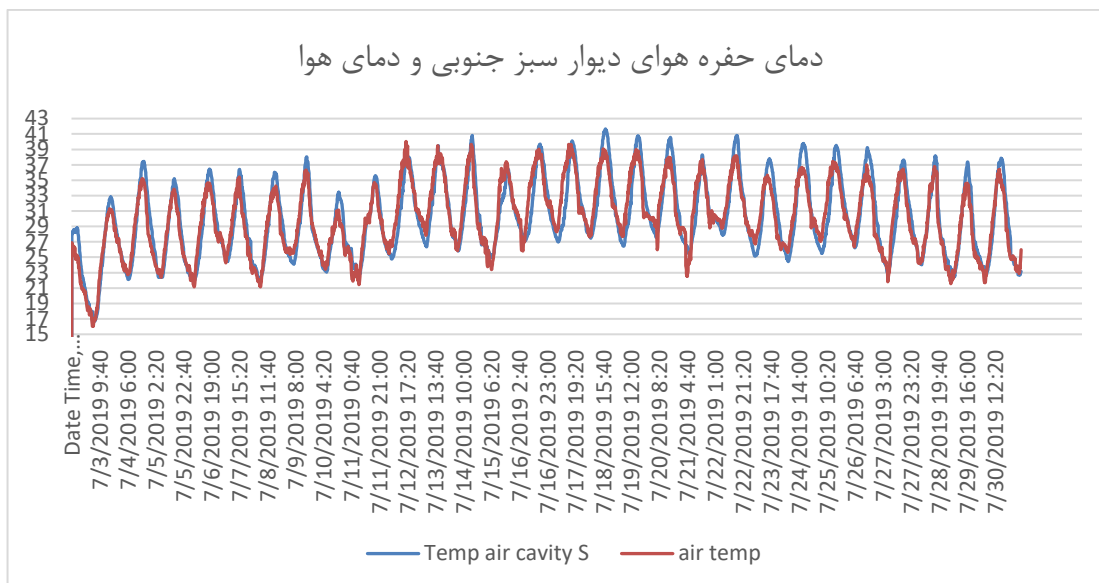
به‌طور کلی یکی از اثرات مهم دیوارهای سبز محافظت از نما می‌باشد. نمای ساختمان‌ها در معرض عوامل جوی قرار داشته و برخی از مصالح ساختمانی ممکن است در نتیجه قرار گرفتن در معرض تابش خورشید و یا یخ زدگی منقبض و منبسط شده و آسیب ببینند. دیوارهای سبز می‌توانند با سایه‌اندازی بر روی دیوار، از نمای ساختمان در برابر تابش مستقیم محافظت کرده و با کاهش نوسانات دمایی سطح دیوار و همچنین کاهش اختلاف بین دمای سطح خارجی و داخلی دیوار سبب افزایش طول عمر مصالح نما گردند. [52] در این پژوهش از مقایسه میانگین حداکثر دمای سطوح داخلی و خارجی دیوار پشت دیوارهای سبز و دیوارهای مرجع مشاهده گردید که اختلاف دمای سطح خارجی و داخلی دیوار مرجع و دیوار پشت دیوار سبز به ترتیب معادل ۱۳,۳۴ درجه و ۲,۲۷ درجه در جهت جنوب و ۱۷,۴۶ درجه و ۰,۸۵ درجه در جهت غرب

می‌باشد. این اعداد نشان می‌دهد که دیوارهای سبز سبب کاهش اختلاف دمای سطح خارجی و داخلی دیوار می‌شوند و بدین ترتیب سبب محافظت مصالح نما و افزایش طول عمر آن‌ها می‌گردند. در حالی که اختلاف دمایی زیاد سطح خارجی و داخلی دیوارهای مرجع در دراز مدت به مصالح نما آسیب رسانده و سبب از بین رفتن آن‌ها می‌گردد.

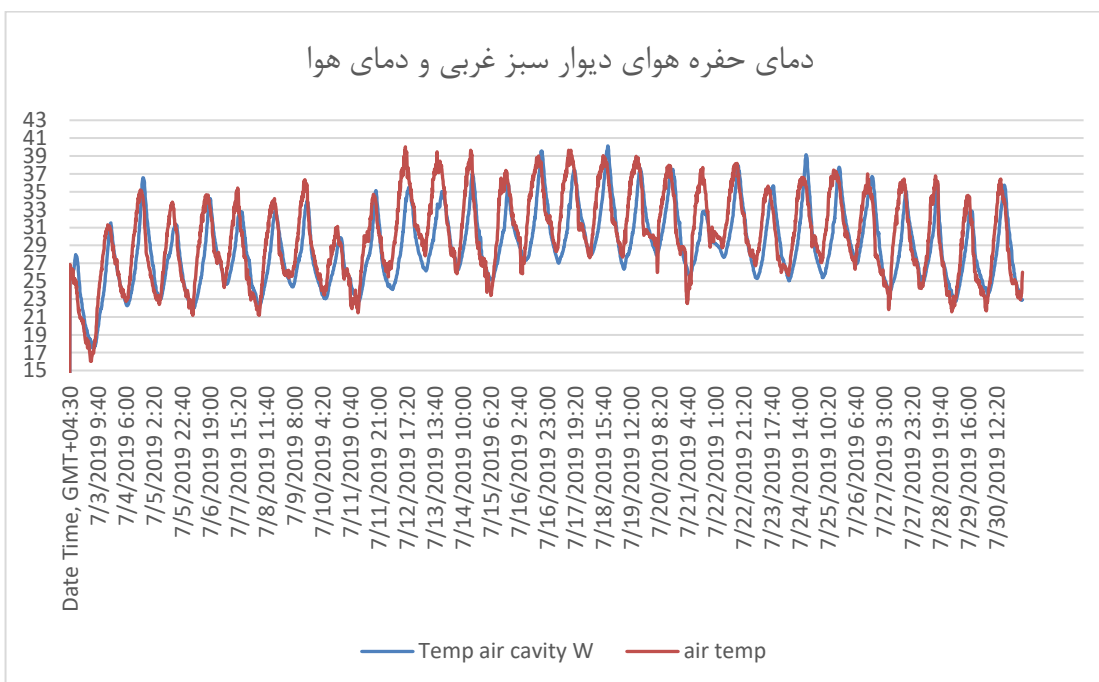
۴-۵ بررسی حفره هوا

در مدت دیتا برداری دمای حفره هوای دیوار سبز جنوبی معمولا بین ۲۶ تا ۳۸ درجه متغیر بود. دمای هوای این حفره در روز ۱۸ July به بیشترین مقدار خود معادل ۴۰٫۸ درجه رسید و در روز ۳ July کمترین مقدار معادل ۱۷ درجه را تجربه کرد (نمودار ۴-۱۶). دامنه تغییرات دمای هوای حفره دیوار سبز غربی نیز معمولا بین ۲۷ تا ۳۷ درجه بود. دمای هوای این حفره در روز ۱۸ July به حداکثر میزان خود معادل ۴۰٫۱۲ درجه رسید و در روز ۳ July کمترین دما معادل ۱۷٫۵۳ درجه برای آن ثبت شده است. (نمودار ۴-۱۷) دمای هوای حفره‌ها در بیشتر ساعات با اندکی اختلاف کمتر از دمای هوا بود ولی به دلیل حرارتی که در بعضی از ساعات از سطح داخلی دیوار پشت دیوار سبز به خارج منتقل می‌شد، دمای حفره هوا بیشتر از دمای هوا شده بود.

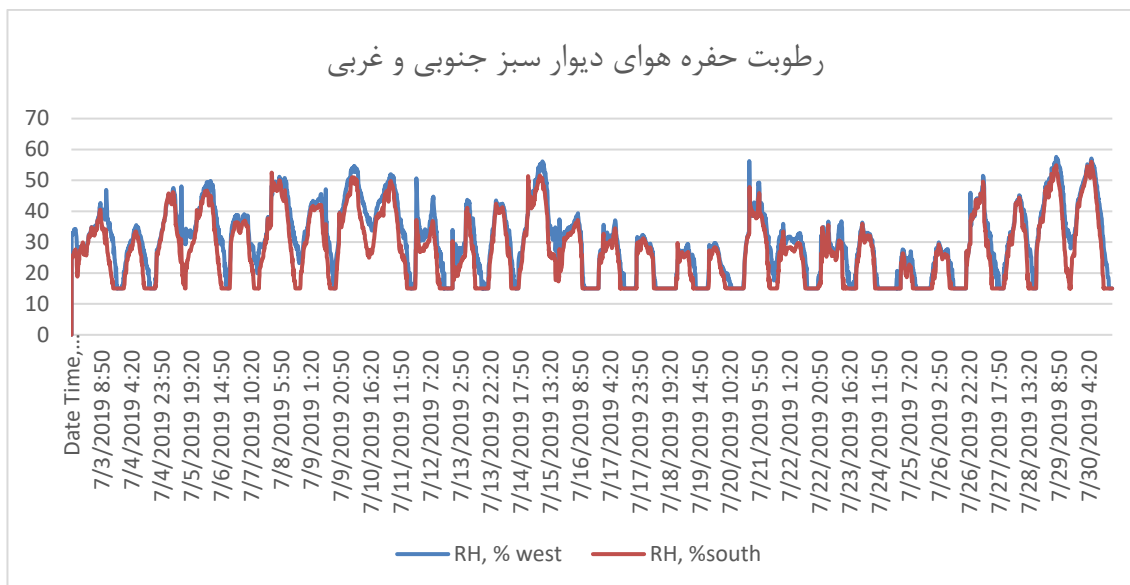
رطوبت حفره‌ها نیز معمولا بین ۱۵٪ تا ۴۵٪ متغیر بود. در گرم‌ترین روزهای دیتا برداری حداکثر رطوبت حفره‌ها معمولا به ۲۶٪ می‌رسید. بیشترین میزان رطوبت نیز مربوط به روز ۳۰ July معادل ۵۵٪ می‌باشد. (نمودار ۴-۱۸)



نمودار ۴-۱۶: دمای حفره هوای دیوار سبز جنوبی و دمای هوا



نمودار ۴-۱۷: دمای حفره هوای دیوار سبز غربی و دمای هوا



نمودار ۴-۱۸: رطوبت حفره هوای دیوار سبز جنوبی و غربی

۴-۶ تحلیل جهت شار حرارتی

برای بررسی جهت شار حرارتی در دیوارها میانگین دمای سطوح محاسبه و بررسی گردید.

در جهت غربی میانگین دمای سطوح عبارت است از:

میانگین دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز = ۲۹,۹۸ درجه

میانگین دمای سطح خارجی دیوار مرجع = ۳۳,۵۷ درجه

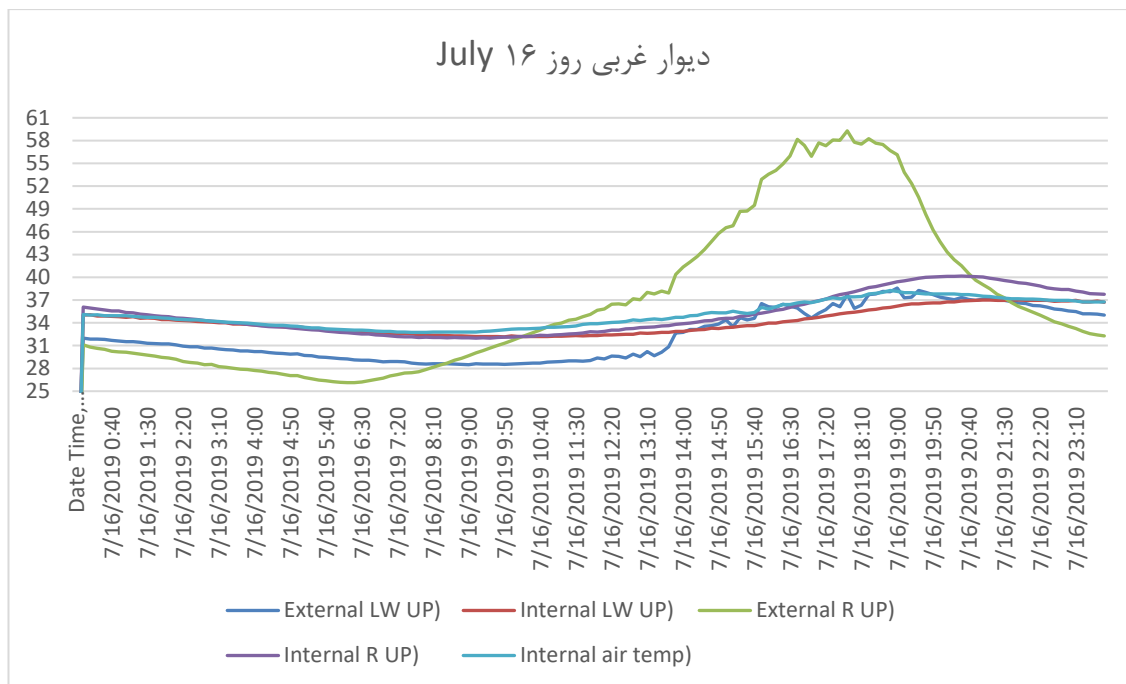
میانگین دمای سطح داخلی دیوار پشت دیوار سبز = ۳۲,۲۵ درجه

میانگین دمای سطح داخلی دیوار مرجع = ۳۳,۱۱ درجه

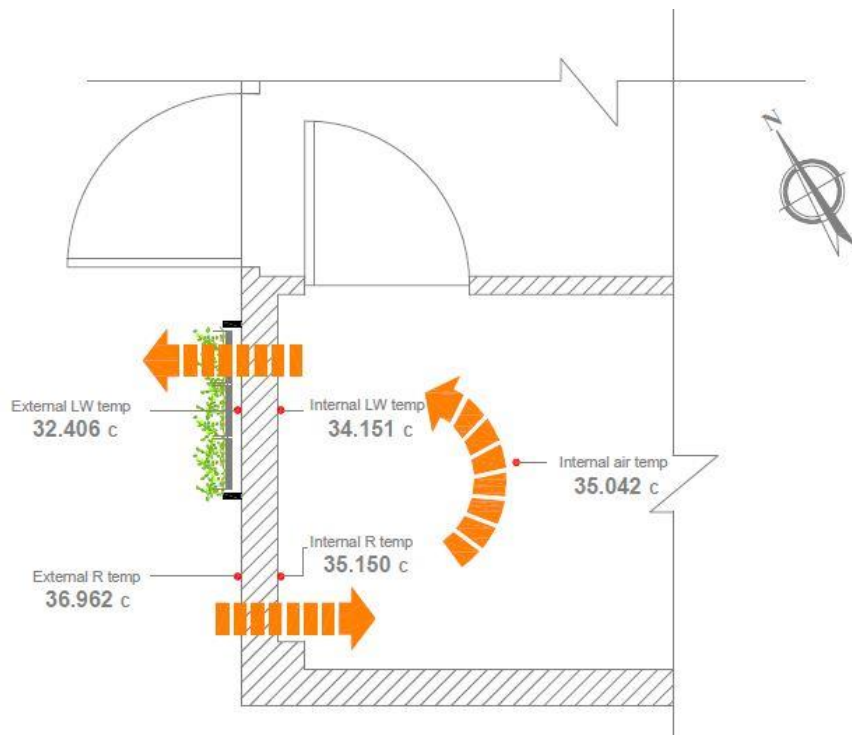
این اعداد مبین این نکته است که جهت شار حرارتی برای دیوار پشت دیوار سبز از داخل به خارج یعنی برعکس جهت شار حرارتی دیوار مرجع می‌باشد. برای بیان علت این مسئله یک روز از کل مدت دیتا برداری یعنی ۱۶ July به‌عنوان نمونه بررسی شد.

نمودار ۴-۱۹ دمای سطوح داخلی و خارجی و همچنین دمای هوای داخلی و خارج اتاق را در این روز نشان می‌دهد. در این روز میانگین دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز معادل ۳۲,۴۰۶ درجه،

میانگین دمای سطح خارجی دیوار مرجع معادل ۳۶,۹۶۲ درجه، میانگین دمای سطح داخلی دیوار پشت دیوار سبز معادل ۳۴,۱۵۱ درجه و میانگین دمای سطح داخلی دیوار مرجع معادل ۳۵,۱۵۰ درجه می‌باشد. در واقع علت بالاتر بودن میانگین دمای سطح داخلی دیوار پشت دیوار سبز نسبت به سطح خارجی‌اش را می‌توان این‌گونه بیان کرد که دمای سطوح خارجی در بعدازظهر به علت تابش آفتاب افزایش می‌یابد ولی از آنجاکه افزایش دمای سطح خارجی دیوار مرجع بسیار بیشتر از دیوار پشت دیوار سبز است (حدود ۲۱ درجه اختلاف در حداکثر دمای دو سطح)، حرارت بیشتری را به داخل منتقل می‌کند و دمای هوای داخل اتاقک و دمای سطح داخلی دیوار پشت دیوار سبز را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع دمای سطح داخلی دیوار پشت دیوار سبز به‌مرور زمان در اثر افزایش دمای هوا داخل اتاقک و همچنین دمای سطح داخلی دیوار مرجع بالا رفته به‌طوری‌که در ساعاتی دمای آن از دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوار سبز بیشتر می‌گردد و سبب انتقال حرارت از داخل به خارج می‌شود (شکل ۴-۱).



نمودار ۴-۱۹: دیوار غربی روز ۱۶ July

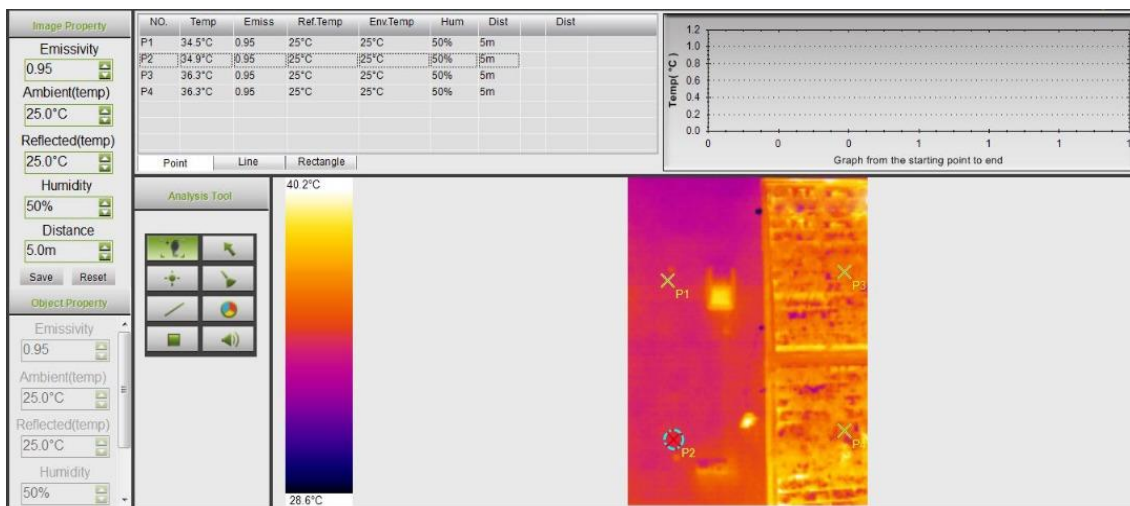


شکل ۴-۱: دیاگرام جهت شار حرارتی در دیوار غربی در روز ۱۶ July

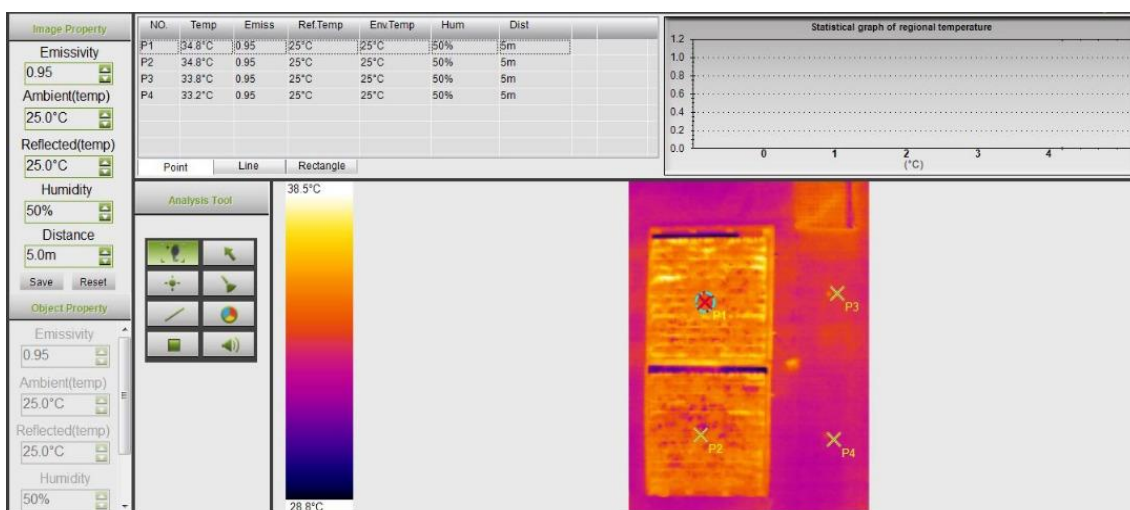
۷-۴ بررسی دمای سطح گیاهان

به منظور بررسی دمای سطح گیاه و مقایسه‌ی آن با دمای دیوار مرجع، در روز ۲۰ July به وسیله دوربین حرارتی از ساعت ۱۰:۳۰ تا ۱۸ به فاصله هر ۲ ساعت از دیوارها عکس برداری شد. سپس عکس‌ها در نرم افزار مخصوص تحلیل عکس‌های دوربین حرارتی (THT Link) مورد بررسی قرار گرفتند.

اشکال ۲-۴ و ۳-۴ مربوط به ساعت ۱۰:۳۰ می باشد و می گردد. در این ساعت به علت اینکه دیوارها هنوز در معرض تابش نیستند، اختلاف دمای سطح گیاه با دمای دیوار مرجع ناچیز است. در این ساعت دمای سطح گیاه با اختلاف ۱ درجه‌ای از دمای سطح دیوار مرجع بیشتر است که شاید بتوان علت را در ظرفیت بالای گیاهان در حفظ حرارت روز قبل دانست.

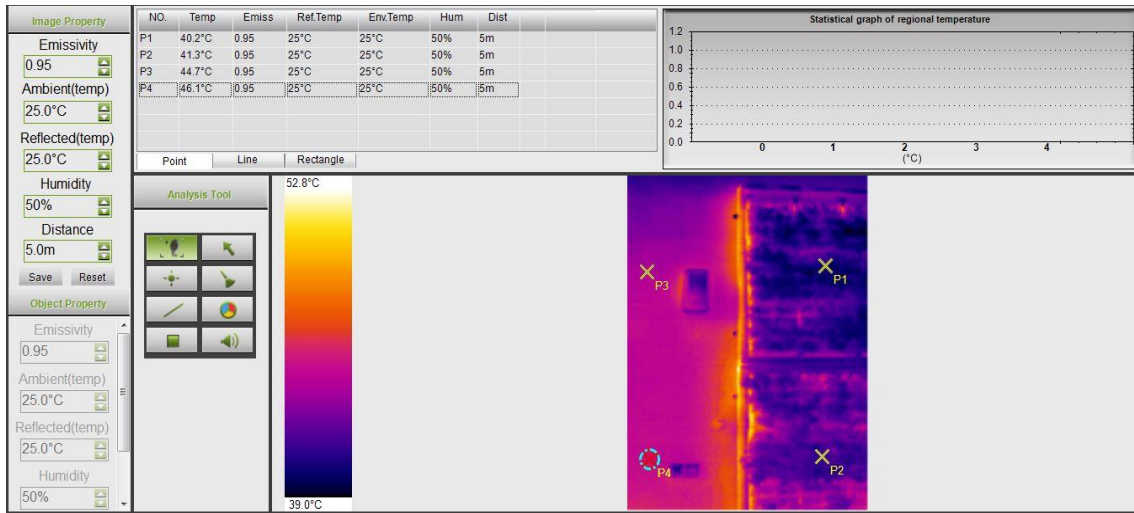


شکل ۴-۲: تحلیل عکس دوربین حرارتی از دیوار جنوبی ساعت ۱۰:۳۰ روز ۲۰ July

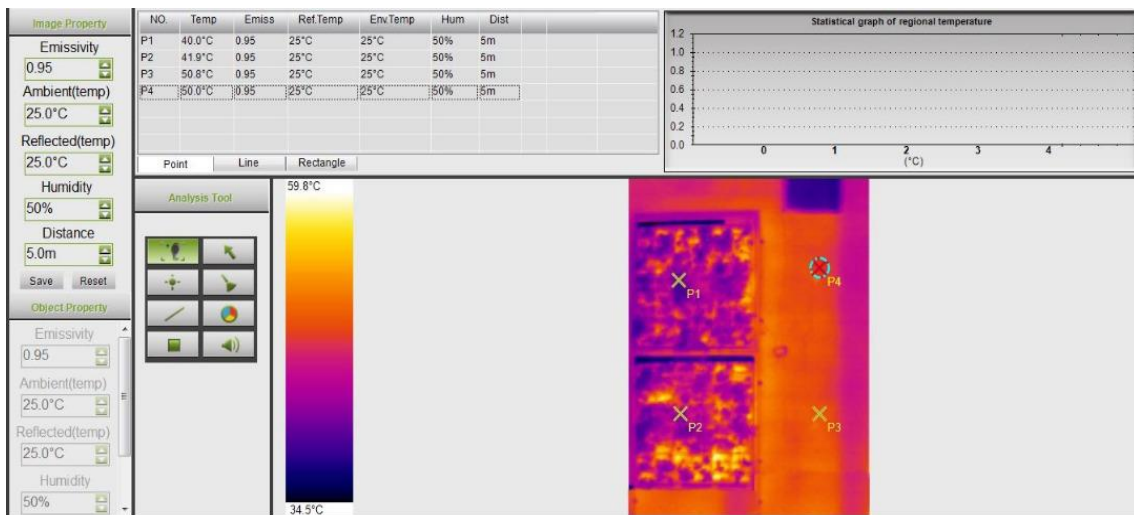


شکل ۴-۳: تحلیل عکس دوربین حرارتی از دیوار غربی ساعت ۱۰:۳۰ روز ۲۰ July

اما در ساعاتی که دیوارها در معرض تابش قرار می‌گیرند، دمای سطح دیوار مرجع هر لحظه بالاتر رفته به طوری که در اشکال ۴-۴ و ۴-۵ که مربوط به ساعت ۱۷:۳۰ می‌باشد، مشاهده می‌گردد که اختلاف دمای سطوح در برخی نقاط به ۱۰ درجه می‌رسد و سطح گیاه دمایی به مراتب پایین‌تر از سطح دیوار مرجع دارد.



شکل ۴-۴: تحلیل عکس دوربین حرارتی از دیوار جنوبی ساعت ۱۷:۳۰ روز ۲۰ July



شکل ۴-۵: تحلیل عکس دوربین حرارتی از دیوار غربی ساعت ۱۷:۳۰ روز ۲۰ July

فصل ۵ : نتیجه گیری

۵-۱ نتیجه گیری

در این پژوهش تلاش گردید تا در راستای تحقق اهداف پایداری سیستم دیوارهای سبز معرفی و تاثیر آنها بر عملکرد حرارتی ساختمان‌ها بررسی گردد. بدین منظور با ساخت یک نمونه دیوار سبز و نصب بر روی دیوار اتاقک آسانسور یک ساختمان مسکونی در شهرستان شاهرود اطلاعات حرارتی مورد نظر در یک بازه ۲۹ روزه در گرم‌ترین روزهای سال ۹۸ (از اواسط تیرماه تا اواسط مرداد ماه) ثبت و مورد تحلیل قرار گرفت. از مقایسه اطلاعات بدست آمده از دیوار سبز و دیوار مرجع (دیوار بدون پوشش گیاهی) بازده بالای این سیستم‌ها در کاهش دمای سطح خارجی دیوار روشن گردید. به طوری که دمای سطح خارجی دیوار پشت دیوارهای سبز در مدت دیتا برداری حداکثر دمای ۴۰ درجه رسید در حالی که حداکثر دمای سطح دیوارهای مرجع به ۵۸ تا ۶۰ درجه ثبت گردید. اما به‌طور میانگین دیوارهای سبز در این پژوهش توانستند حداکثر دمای سطح خارجی دیوار پشت خود را در جهت جنوب و غرب به ترتیب ۱۳ و ۱۹٫۲۳ درجه نسبت به دیوار مرجع کاهش دهند. در واقع دیوار سبز با سایه اندازی بر سطح دیوار و فرایند سرمایش تبخیری که از سطح گیاهان صورت می‌گیرد سبب کاهش محسوس حداکثر دمای سطح خارجی شده که این امر کاهش انتقال حرارت به فضای داخل را به دنبال داشته و ضمن صرفه جویی در مصرف انرژی در ایجاد آسایش حرارتی در فضای داخل موثر است.

همچنین در این پژوهش از مقایسه دمای سطح خارجی و داخلی سطوح، تاثیر قابل ملاحظه دیوارهای سبز در راستای محافظت از دیوار در برابر تابش مستقیم خورشید و افزایش طول عمر مصالح نما روشن گردید. دیوارهای سبز اختلاف میانگین دمای سطح خارجی و داخلی دیوار پشت خود را کاهش داده به طوری که در جهت جنوب این اختلاف میانگین حداکثر دمای سطح خارجی و داخلی دیوار پشت دیوار سبز ۲٫۲۷ درجه بود در حالی که همین پارامتر برای دیوار مرجع دمایی معادل ۱۳٫۳۴ درجه بدست آمد. در جهت غربی نیز این اختلاف میانگین به ۰٫۸۵ درجه رسید در حالی که در دیوار مرجع در این جهت تفاوت میانگین حداکثر دمای ۱۷٫۴۶ درجه ای بین سطوح خارجی و داخلی آن وجود داشت.

بر طبق اطلاعات بدست آمده میانگین حداکثر دمای دیوار مرجع جنوبی ۵۰٫۱۱ درجه و دیوار مرجع غربی ۵۴٫۷۲ درجه بود که از بررسی تطبیقی این پارامتر روشن گردید که در شهر شاهرود دیوارهای غربی در وضعیت بحرانی تری قرار دارند که البته با توجه به تاثیر بیشتر دیوار سبز در کاهش میانگین حداکثر دمای سطح خارجی در جهت غربی می‌توان نتیجه گرفت که در این شهر دیوارهای سبز جهت حل معضل دمایی دیوارهای غربی کارآمدتر هستند.

در این پژوهش دیوارهای سبز سبب ایجاد جریان شار حرارتی بر عکس یعنی از سطح داخلی به سطح خارجی دیوار شدند. بررسی میانگین دمای سطوح نشان داد که میانگین دمای سطح داخلی دیوار پشت دیوار سبز از میانگین دمای سطح خارجی آن بیشتر بوده که این امر سبب انتقال حرارت از داخل اتاقک به بیرون و خنک شدن فضای داخلی در ساعات پایانی روز می‌شود.

۵-۲ توصیه‌ها

دیوارهای سبز معمولاً بر روی جبهه‌های آفتاب‌گیر ساختمان نصب می‌گردند و گیاهان ساعات طولانی در معرض تابش مستقیم خورشید قرار دارند لذا باید از گیاهانی استفاده شود که در چنین شرایط سختی مقاومت لازم را داشته باشند. از این رو تحقیق و پژوهش بیشتر جهت شناخت گونه‌های گیاهی متنوع که متناسب با شرایط این سیستم‌ها باشند، توصیه می‌گردد. در راستای بررسی میزان تاثیر سایه اندازی و سرمایش تبخیری در کارایی این سیستم‌ها نیز توصیه می‌گردد پژوهش‌های آینده پنل‌های بدون گیاه را نیز مورد آزمایش قرار دهند. از طرفی جهت بررسی دقیق‌تر تاثیر دیوارهای سبز بر شار حرارتی در تحقیقات آتی از دو اتاقک مجزا استفاده شود. همچنین با توجه به اینکه در شهر شاهرود جبهه غربی ساختمان‌ها از نظر شرایط حرارتی در وضعیت حادثری نسبت به سایر جبهه قرار دارد، توصیه می‌گردد در این شهر دیوارهای سبز بیشتر بر دیوارهای غربی نصب گردند و پژوهش‌های آتی نیز با تحقیقات گسترده و در بازه‌های زمانی طولانی‌تر بر روی دیوار غربی متمرکز شوند.

پیوست

پیوست الف: حداکثر، حداقل و میانگین دمای سطح داخلی دیوار مرجع و دیوار پشت دیوار سبز جنوبی

روز	LW دیوار پشت دیوار سبز جنوبی			R دیوار مرجع جنوبی		
	max	min	average	max	min	average
7/2/2019	29.63	28.18	29.11825	31.23	28.08	30.08444
7/3/2019	29.75	24.34	26.81472	31.85	23.8	27.27167
7/4/2019	33.15	26.97	29.62146	35.18	26.59	30.23854
7/5/2019	32.63	28.71	30.83167	34.44	28.14	31.13507
7/6/2019	33.06	28.01	30.39181	35.28	27.64	31.01576
7/7/2019	33.37	29.73	31.60458	35.24	29.32	32.09271
7/8/2019	32.88	28.61	30.74139	35.06	28.43	31.39563
7/9/2019	33.63	29.41	31.50653	35.61	29.11	32.05847
7/10/2019	32.65	29.01	30.58306	33.82	28.94	31.21833
7/11/2019	32.37	28.02	30.02382	33.86	27.68	30.4534
7/12/2019	35.97	29.68	32.36618	37.77	29.21	32.90965
7/13/2019	36.58	31.99	34.26674	38.39	31.87	35.0384
7/14/2019	36.68	32.21	34.54813	38.81	31.79	35.01681
7/15/2019	35.4	31.39	33.36729	37.48	31.25	34.08674
7/16/2019	37.19	32.18	34.35007	39.17	31.9	35.06049
7/17/2019	37.35	32.95	35.19236	39.7	32.78	35.9816
7/18/2019	37.85	33.19	35.46778	39.98	32.78	36.04118
7/19/2019	37.52	33.06	35.40757	39.75	32.77	36.00208
7/20/2019	37.25	33.27	35.33604	39	32.75	35.68826
7/21/2019	36.46	32.45	34.25382	37.59	32.18	34.75507
7/22/2019	36.74	32.57	34.40826	38.71	32.37	35.035
7/23/2019	36.11	31.98	33.88875	37.48	31.64	34.44882
7/24/2019	35.64	31.01	33.26861	37.61	30.44	33.68896
7/25/2019	36.07	31.42	33.69333	38.26	31.15	34.37361
7/26/2019	35.93	32.32	34.23229	37.86	31.8	34.63389
7/27/2019	35.93	32.32	34.23229	37.86	31.8	34.63389
7/28/2019	35.17	30.81	32.96354	37.43	30.49	33.62965
7/29/2019	34.37	30.79	32.63771	36.39	30.62	33.22236
7/30/2019	33.17	29.23	31.28313	35.65	29.03	31.93299
average	34.84	30.54	32.63	36.77	30.21	33.21

پیوست ب: حداکثر، حداقل و میانگین دمای سطح داخلی دیوار مرجع و دیوار پشت دیوار سبز غربی

روز	LW دیوار پشت دیوار سبز غربی			R دیوار مرجع غربی		
	Max	Min	Average	Max	Min	Average
7/2/2019	29.32	28.09	28.7292063	32.06	28.63	30.3539683
7/3/2019	29.83	24.14	26.5435664	32.94	23.84	27.446993
7/4/2019	33.01	26.96	29.4250694	36.12	26.67	30.3122222
7/5/2019	32.59	28.5	30.4819444	35.2	28.18	31.1876389
7/6/2019	32.98	27.88	30.1026389	36.25	27.74	31.1025694
7/7/2019	33.01	29.59	31.3509722	35.67	29.38	32.1261806
7/8/2019	32.78	28.47	30.5069444	35.54	28.52	31.4385417
7/9/2019	33.17	29.28	31.2330556	35.37	29.15	31.8911806
7/10/2019	32.35	28.73	30.2113889	34.11	28.91	31.1352778
7/11/2019	32.4	27.84	29.7559722	35.04	27.75	30.6675694
7/12/2019	35.54	29.23	31.7485417	38.27	29.26	32.8376389
7/13/2019	36.21	31.84	33.8913889	38.5	31.82	34.8564583
7/14/2019	36.15	31.89	34.0929167	39.08	31.76	34.8804861
7/15/2019	35.38	31.17	33.0904861	38.34	31.34	34.1774306
7/16/2019	37.01	32.16	34.1519444	40.16	32	35.1509722
7/17/2019	37.08	33.01	35.01875	40.33	32.83	36.0065278
7/18/2019	37.54	33.17	35.200625	40.95	32.83	36.0910417
7/19/2019	37.17	33.02	35.1430556	40.44	32.85	36.0402778
7/20/2019	36.76	33.17	35.0174306	39.25	32.86	35.6435417
7/21/2019	36.09	32.29	33.9611111	36.9	32.2	34.4749306
7/22/2019	36.5	32.44	34.1345139	39.1	32.31	34.8985417
7/23/2019	35.97	31.91	33.724375	38.14	31.71	34.4508333
7/24/2019	35.63	30.92	33.0773611	38.64	30.58	33.78125
7/25/2019	36.11	31.45	33.5899306	38.94	31.24	34.4091667
7/26/2019	35.69	32.18	33.9899306	38.36	31.79	34.6043056
7/27/2019	35.01	30.73	32.7645833	38.14	30.58	33.6531944
7/28/2019	34.52	30.76	32.5063194	36.75	30.67	33.1841667
7/29/2019	32.89	29.05	31.0065278	35.74	29.03	31.831875
7/30/2019	33.52	28.98	31.0454167	36.34	28.8	31.8241667
Average	34.55	30.305	32.258	37.26	30.18	33.119

پیوست ج: حداکثر، حداقل و میانگین دمای هوا

روز	دمای هوا		
	Max	Min	Average
7/2/2019	26.87	19.39	23.257619
7/3/2019	31.31	16.03	24.1141259
7/4/2019	35.21	22.73	28.1995139
7/5/2019	33.84	22.39	27.3977083
7/6/2019	34.68	21.17	28.1764583
7/7/2019	35.42	23.42	28.7297222
7/8/2019	34.23	21.17	27.581875
7/9/2019	36.34	25.36	29.4289583
7/10/2019	31.13	23.47	26.8271528
7/11/2019	34.7	21.44	28.0754167
7/12/2019	40.03	25.48	32.1494444
7/13/2019	39.49	27.83	33.2728472
7/14/2019	39.66	25.84	31.3314583
7/15/2019	37.4	23.38	30.5422222
7/16/2019	39.01	25.82	33.1777083
7/17/2019	39.66	28.32	33.7772917
7/18/2019	39.06	27.63	33.3294444
7/19/2019	38.98	27.7	33.0820139
7/20/2019	37.98	25.96	32.3935417
7/21/2019	37.7	22.51	30.9348611
7/22/2019	38.17	28.74	32.8224306
7/23/2019	35.64	26.7	30.6165278
7/24/2019	36.61	25.65	30.9724306
7/25/2019	37.43	27.09	32.2796528
7/26/2019	36.99	26.33	30.9796528
7/27/2019	36.44	21.82	29.6075
7/28/2019	36.77	24.17	28.9607639
7/29/2019	34.6	21.56	27.2345833
7/30/2019	36.42	21.68	28.5142361
Average	36.26	24.16	29.923

پیوست د: حداکثر، حداقل و میانگین دمای هوا داخل اتاقک

روز	دمای هوای داخل اتاقک		
	Max	Min	Average
7/2/2019	29.998	28.177	29.4976032
7/3/2019	30.78	25.336	27.7403007
7/4/2019	33.896	27.585	30.3625556
7/5/2019	32.906	29.246	31.1403333
7/6/2019	34.001	28.798	31.1874236
7/7/2019	33.53	30.199	31.9782361
7/8/2019	33.686	29.421	31.4297847
7/9/2019	34.053	30.023	32.0725556
7/10/2019	32.595	29.722	31.0174306
7/11/2019	32.957	28.673	30.664
7/12/2019	36.86	30.023	32.9785
7/13/2019	37.517	32.595	34.9504792
7/14/2019	37.682	32.699	34.9654722
7/15/2019	36.67	32.132	34.1298403
7/16/2019	38.264	32.75	35.0423611
7/17/2019	38.125	33.739	35.9537083
7/18/2019	38.459	33.922	36.1416528
7/19/2019	38.264	34.027	36.0983264
7/20/2019	37.407	33.974	35.7742292
7/21/2019	36.182	33.477	34.9593125
7/22/2019	36.942	33.295	35.0441944
7/23/2019	35.886	33.061	34.5822847
7/24/2019	36.048	31.978	33.9403542
7/25/2019	36.588	32.415	34.5135903
7/26/2019	36.075	32.983	34.6403403
7/27/2019	35.779	31.875	33.7901111
7/28/2019	34.924	31.645	33.1874097
7/29/2019	33.712	30.123	31.9267014
7/30/2019	34.237	29.897	31.9631736
Average	35.31	31.16	33.161

مراج

- [1] H. M. P. I. K. Herath, R. U. Halwatura, and G. Y. Jayasinghe, "Modeling a Tropical Urban Context with Green Walls and Green Roofs as an Urban Heat Island Adaptation Strategy," *Procedia Eng.*, vol. 212, no. 2017, pp. 691–698, 2018.
- [2] شبیم . رستم خانی, "بررسی ارتباط سیستم های عمودی سبز و مصرف انرژی در ساختمان ها) با طراحی یک نمونه موردی), " تربیت دبیر شهید رجایی.
- [3] مهیار, کلیائی, "ارتقا و بازنگری دستورالعمل موجود در شهرداری تهران در خصوص دیوارهای سبز به منظور بکارگیری در بلندمرتبه ها," دانشگاه پیام نور استان تهران.
- [4] M. Manso and J. Castro-Gomes, "Green wall systems: A review of their characteristics," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 863–871, 2015.
- [5] S. Carpenter, *A Guide to Green Roofs, Walls And Facades*. 2014.
- [6] M. Ottel , H. D. van Bohemen, and A. L. A. Fraaij, "Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls," *Ecol. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 154–162, 2010.
- [7] B. A. Currie and B. Bass, "Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model," *Urban Ecosyst.*, vol. 11, no. 4, pp. 409–422, 2008.
- [8] G. Vox, I. Blanco, and E. Schettini, "Green façades to control wall surface temperature in buildings," *Build. Environ.*, vol. 129, no. September, pp. 154–166, 2018.
- [9] G. P rez, J. Coma, I. Martorell, and L. F. Cabeza, "Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 139–165, 2014.
- [10] R. S. G kt rk, "Use of outdoor living walls in Mediterranean-like climates: a case study of Antalya Kaleici," *J. Food, Agric. Environ.*, vol. 11, no. 1, pp. 687–692, 2013.
- [11] G. P rez, L. Rinc n, A. Vila, J. M. Gonz lez, and L. F. Cabeza, "Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 4854–4859, 2011.

- [12] H. Akbari, D. M. Kurn, S. E. Bretz, and J. W. Hanford, "Peak power and cooling energy savings of shade trees," *Energy Build.*, vol. 25, no. 2, pp. 139–148, 1997.
- [13] M. Köhler, "Green facades—a view back and some visions," *Urban Ecosyst.*, vol. 11, no. 4, p. 423, 2008.
- [14] W. J. Stec, A. H. C. Van Paassen, and A. Maziarz, "Modelling the double skin façade with plants," *Energy Build.*, vol. 37, no. 5, pp. 419–427, 2005.
- [15] E. A. Eumorfopoulou and K. J. Kontoleon, "Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 5, pp. 1024–1038, 2009.
- [16] K. J. Kontoleon and E. A. Eumorfopoulou, "The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 5, pp. 1287–1303, 2010.
- [17] A. Hoyano, "Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building," *Energy Build.*, vol. 11, no. 1–3, pp. 181–199, 1988.
- [18] D. N. W. H. F. Di, "COOLING EFFECT OF IVY ON A WALL," *Exp. Heat Transf.*, vol. 12, no. 3, pp. 235–245, Jul. 1999.
- [19] A. Miller, K. Shaw, and M. Lam, "Vegetation on building facades: Bioshader," *Case study Rep.*, 2007.
- [20] K. Ip, M. Lam, and A. Miller, "Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 1, pp. 81–88, 2010.
- [21] N. H. Wong, A. Y. K. Tan, P. Y. Tan, and N. C. Wong, "Energy simulation of vertical greenery systems," *Energy Build.*, vol. 41, no. 12, pp. 1401–1408, 2009.
- [22] N. H. Wong *et al.*, "Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 3, pp. 663–672, 2010.
- [23] E. G. McPherson, L. P. Herrington, and G. M. Heisler, "Impacts of vegetation on residential heating and cooling," *Energy Build.*, vol. 12, no. 1, pp. 41–51, 1988.
- [24] O. JM, "La vegetación como instrumento para el control bioclimático," Universitat Politècnica de Catalunya, 1999.
- [25] سبز ستاد توسعه عمودی فضای، دستورالعمل کاربردی اجرای دیوار سبز بر بدنه ساختمان. ۱۳۹۲.
- [26] M. . Paridah, A. Moradbak, A. . Mohamed, F. Abdulwahab taiwo Owolabi, M. Asniza, and S. H. . Abdul Khalid, "We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of

Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %,” *Intech*, vol. i, no. tourism, p. 13, 2016.

- [27] R. Fernández-Cañero, L. Pérez Urrestarazu, and K. Perini, “Vertical greening systems: Classifications, plant species, substrates,” *Nat. Based Strateg. Urban Build. Sustain.*, pp. 45–54, 2018.
- [28] S. Sheweka and A. N. Magdy, “The living walls as an approach for a healthy urban environment,” *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 592–599, 2011.
- [29] T. Koyama, M. Yoshinaga, H. Hayashi, K. Maeda, and A. Yamauchi, “Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls,” *Build. Environ.*, vol. 66, pp. 96–103, 2013.
- [30] L. Bianco, V. Serra, F. Larcher, and M. Perino, “Thermal behaviour assessment of a novel vertical greenery module system: first results of a long-term monitoring campaign in an outdoor test cell,” *Energy Effic.*, vol. 10, no. 3, pp. 625–638, 2017.
- [31] K. Perini, F. Bazzocchi, L. Croci, A. Magliocco, and E. Cattaneo, “The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. Field monitoring in Mediterranean climate,” *Energy Build.*, vol. 143, pp. 35–42, 2017.
- [32] F. Olivieri, L. Olivieri, and J. Neila, “Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal facade under summer conditions in a continental mediterranean climate,” *Build. Environ.*, vol. 77, pp. 61–76, 2014.
- [33] C. L. Tan, N. H. Wong, and S. K. Jusuf, “Effects of vertical greenery on mean radiant temperature in the tropical urban environment,” *Landsc. Urban Plan.*, vol. 127, pp. 52–64, 2014.
- [34] Q. Chen, B. Li, and X. Liu, “An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate,” *Energy Build.*, vol. 61, pp. 298–307, 2013.
- [35] R. U. Galagoda, G. Y. Jayasinghe, R. U. Halwatura, and H. T. Rupasinghe, “The impact of urban green infrastructure as a sustainable approach towards tropical micro-climatic changes and human thermal comfort,” *Urban For. urban Green.*, vol. 34, pp. 1–9, 2018.
- [36] K. C. Dahanayake, C. L. Chow, and G. L. Hou, “Selection of suitable plant species for energy efficient Vertical Greenery Systems (VGS),” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 2473–2478, 2017.
- [37] R. Djedjig, R. Belarbi, and E. Bozonnet, “Green wall impacts inside and outside

- buildings: Experimental study,” *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 578–583, 2017.
- [38] M. Manso and J. P. Castro-Gomes, “Thermal analysis of a new modular system for green walls,” *J. Build. Eng.*, vol. 7, pp. 53–62, 2016.
- [39] J. Coma, G. Pérez, A. de Gracia, S. Burés, M. Urrestarazu, and L. F. Cabeza, “Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades,” *Build. Environ.*, vol. 111, pp. 228–237, 2017.
- [40] J. A. Sánchez-Reséndiz, L. Ruiz-García, F. Olivieri, and E. Ventura-Ramos, “Experimental assessment of the thermal behavior of a living wall system in semi-arid environments of central Mexico,” *Energy Build.*, vol. 174, pp. 31–43, 2018.
- [41] M. Haggag, A. Hassan, and S. Elmasry, “Experimental study on reduced heat gain through green façades in a high heat load climate,” *Energy Build.*, vol. 82, pp. 668–674, 2014.
- [42] S. Poddar, D. Y. Park, and S. Chang, “Simulation Based Analysis on the Energy Conservation Effect of Green Wall Installation for Different Building Types in a Campus,” *Energy Procedia*, vol. 111, no. September 2016, pp. 226–234, 2017.
- [43] فرید . مهدی پور تملی, “ارزیابی تاثیر دیوارهای سبز بر روی عملکرد حرارتی ساختمان,” دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [44] U. Mazzali, F. Peron, P. Romagnoni, R. M. Pulselli, and S. Bastianoni, “Experimental investigation on the energy performance of living walls in a temperate climate,” *Build. Environ.*, vol. 64, pp. 57–66, 2013.
- [45] L. S. H. Lee and C. Y. Jim, “Subtropical summer thermal effects of wirerope climber green walls with different air-gap depths,” *Build. Environ.*, vol. 126, pp. 1–12, 2017.
- [46] ز. . فرنام, “ارزیابی و تعیین اقلیم آسایش گردشگری شهر شاهرود,” *مجله کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در برنامه ریزی*, p. 10.
- [47] “<https://weatherspark.com/y/105379/Average-Weather-in-Shahrud-Iran-Year-Round>.” .
- [48] S. Wilkinson, R. C. Feitosa, I. T. Kaga, and I. H. De Franceschi, “Evaluating the Thermal Performance of Retrofitted Lightweight Green Roofs and Walls in Sydney and Rio de Janeiro,” *Procedia Eng.*, vol. 180, no. 0, pp. 231–240, 2017.
- [49] “<https://worldofsucculents.com/crassula-volkensii/>.” .
- [50] “<https://www.abartazeha.com/>.” .
- [51] K. Perini, M. Ottel , A. L. A. Fraaij, E. M. Haas, and R. Raiteri, “Vertical greening

systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 11, pp. 2287–2294, 2011.

- [52] S. Mohamed, A. Nourhan, and M. Mohamed, “Green Facades as a New Sustainable Approach Towards Climate Change,” *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 507–520, 2012.

Abstract

The growing trend of urbanization and the need to provide suitable land for housing, increasing factories and industrial settlements, reducing the green space in cities, etc. are among the factors that in modern cities are the excessive consumption of energy resources and the Consequently, they have caused many environmental problems such as air pollution, creation of heat islands, increased greenhouse gases and so on. In recent decades, increasing awareness of environmental issues has led to the application of sustainability criteria in the design of urban and building systems. Among these, attention to plants and increasing green space are among the most important proposed solutions for realizing green architecture and reducing environmental problems. Due to the high volume of construction in the cities, today the facades of buildings have the greatest potential for planting plants and creating vertical green systems. Vertical green systems, as an efficient tool, have improved urban spaces socially and environmentally and have also reduced energy consumption by improving the thermal performance of buildings. In the present study, first, using library studies, we have presented some introduction to the types of green systems and their efficiency and implementation considerations. In order to investigate the impact of these systems on the thermal performance of buildings, a green wall prototype has been created and installed on the south and west walls of a residential building in Shahroud. A comparative comparison with a wall without vegetation revealed that vertical green systems had a significant effect on lowering the outer surface temperature of the wall as well as reducing the wall temperature fluctuations. The green wall tested in this study reduced the average maximum external surface temperature by 13 degrees in the south and about 19 degrees in the west.

Keywords: Vertical green systems, thermal impact, surface temperature reduction



Shahrood University of
Technology

Faculty of Architectural Engineering and Urbanism

M.Sc.Thesis in Architectural Engineering

Investigating the effect of green walls on the thermal performance of building

By:Nasrin Sadat Aghayan

Supervisor:
Dr. Taheri Shahraini

November. 2019