مطالعات محیطی هفت حصار شماره سی‌ویکم/ سال هشتم/ بهار ۱۳۹۹
صفحات ۱۴-۵

بام‌های سبز هیدروپونیک برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی مدارس سبز در اقلیم سرد و خشک ایران: مطالعه قیاسی بین دو نمونه بام سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار*

مریم فرهادیان**، سینا رزاقی اصل***، کاوه شکوهی دهکردی****

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۹/۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۱/۱۰

چکیده

مدارس سبز نوع جدید مدارس می‌باشند که در آن‌ها مصرف انرژی‌های تجدیدپذیرکمتر از مدارس معمولی است. در این مدارس با افزودن پوسته‌های سبز مانند بام‌های سبز هیدروپونیک، علاوه برافزایش ارتباط دانش‌آموزان با طبیعت، میزان مصرف انرژی کاهش پیدا می‌کند. ازآنجایی‌که شناخت اولویت انواع این بام‌ها در اقلیم‌های مختلف، باعث کارکرد بهینه این بام ها از نظر صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود؛ لذا در پژوهش حاضر باهدف پیشنهاد بهترین بام سبز در مدارس سبز از نظر صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی در اقلیم سرد دو نمونه بام سبز هیدروپونیک مدولار و گسترده به عنوان انواع متداول بام سبزدر مدارس از نظر مقاومت حرارتی و دمای فضای زیر بام بایکدیگر مقایسه شدند، روش پژوهش ترکیبی از دو روش محاسبات عددی پیرامون مقاومت حرارتی هر دو بام و شبیه‌سازی یک مدرسه سبز استاندار با دو نمونه بام سبز گسترده و مدولار به کمک نرم‌افزار انرژی پلاس ۸ است. در خلال تحقیق، یافته‌ها حاکی از آن بودند که مقاومت حرارتی بام سبز هیدروپونیک گسترده بیشتر از نمونه بام مدولار است (۲۶۵۰۶<۷۲۷۲/۶)؛ همچنین درجه حرارت فضای زیر این بام در کاربری آموزشی در سرد ترین ماه برابر ۹.۰۸ است که تقریبا ۶ درجه گرم‌تر از کاربرد بام سبز مدولار است؛ لذا، بام سبز هیدروپونیک گسترده عملکرد حرارتی بهتری از نمونه مدولار ازنظر صرفه‌جویی در انرژی برای مدارس سبز در آب‌وهوای سرد ایران دارد.

واژگان کلیدی

بام سبز هیدروپونیک گسترده، بام سبز هیدروپونیک مدولار، پتانسیل حرارتی، مدارس، اقلیم سرد ایران

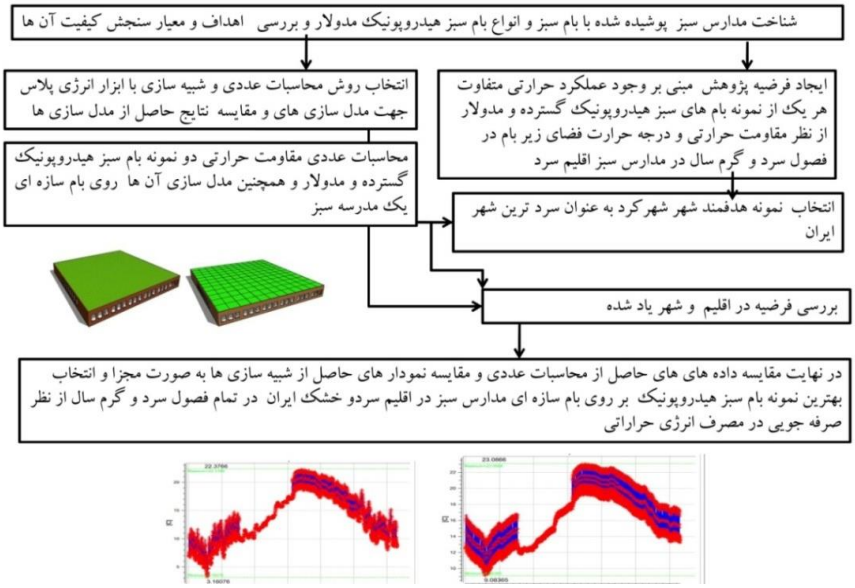
* این مقاله بر گرفته از پایان نامه دکتری مریم فرهادیان با موضوع پیشنهاد مدلی برای مدارس با پوشش سبز در شهر شهرکرد مبتنی بر کاهش مصرف انرژی حرارتی می‌باشد که در سال ۱۳۹۷ به اتمام رسیده است.

** دانشجو دکتری، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران
*** استاد مدعو، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران- استادیار گروه شهرسازی، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی (نویسنده مسئول) S.razzaghi@srttu.edu
**** استاد مدعو، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران- استادیار گروه معماری، دانشکده معماری، دانشگاه آزاد واحد رودهن

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.23225602.1399.8.31.3.8]
[DOI: 10.29252/hafthesar.8.31.3]

مقدمه

مدارس سبز، فضاهای آموزشی با امکانات یک محیط سالم می‌باشند که منجر به کیفیات یادگیری و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، منابع و پول میشوند. با گسترش ساخت‌وساز فضاهای آموزشی از اوایل قرن ۱۹، حیاط‌های مدارس کوچک‌تر شده‌اند و فضاهای سبز از آن‌ها حذف‌شده‌اند (Meiboudi, 2018 & 2019)؛ برای مثال، طبق مطالعه انجام‌گرفته در سال ۱۳۸۰، ۷۵ درصد مدارس در ایران فاقد پوشش سبز کافی بودند (Fuel Conservation Optimization Organization, 2010)؛ ازاین‌رو از اوایل سال ۱۹۹۷ تا اکنون باهدف بهبود درک دانش آموزان از طبیعت در کنار صرفه‌جویی در مصرف انرژی، بام های سبز به عنوان حیاط‌های سبز جایگزین، حیاط‌های معمولی مدارس سبز شده‌اند (Vaidya,2018 & Magzamen, 2017)؛ به‌نحوی‌که با به‌کارگیری بام‌های سبز علاوه بر رفاه دانش آموزان و آموزش‌های محیط زیستی، بهره وری مناسب از منابع انرژی و کاهش Co2 در مدارس سبز تضمین شود (Zhao, 2015)؛ حال آن‌که نیاز به مراقبت دایمی و آب یاری فراوان از جمله معایب بام‌های سبز معمولی در مدارس سبز می باشند (Dinsdle, 2006). در این زمینه انواع خاص بام‌های سبز شامل بام های سبز هیدروپونیک گسترده و بام های سبز هیدروپونیک مدولار، معایب بام های سبز معمولی در مدارس را برطرف کردند (Tsirogiannis, 2014). اگرچه هدف از به‌کارگیری این نمونه بام‌ها در مدارس سبز نیز بهبود صرفه‌جویی در مصرف انرژی مدارس در کنار آموزش‌های محیط زیستی به دانش آموزان است؛ اما به دلیل تازه مطرح‌شدن این نمونه بام‌ها در فضاهای آموزشی، کمتر مطالعه‌ای به سنجش عملکرد حرارتی این بام-ها پیرامون صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی مدارس سبز بلاخص در اقلیم سرد و خشک به عنوان نمونه اقلیم کمتر بررسی‌شده از نظر پوشش های سبز پرداخته‌است (Shokoohi Dehkordi, 2017 & Raji, 2015)؛ لذا در مطالعه حاضر که فرضیه اصلی آن وجود عملکرد حرارتی متفاوت هر یک از نمونه بام های سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار از نظر مقاومت حرارتی و درجه حرارت فضای زیر بام در فصول سرد و گرم سال در مدارس سبز اقلیم سرد است، به سوال اصلی این مطالعه پیرامون چه نوع بام سبز هیدروپونیک، عملکرد حرارتی بهتری برای مدارس سبز در اقلیم سرد دارد، پاسخ داده خواهد شد. همچنین هدف این مطالعه، پیشنهاد بهترین بام سبز هیدروپونیک در مدارس سبز از نظر صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی در اقلیم سرد می‌باشد. در ادامه ساختار تحقیق حاضر به صورت زیر خواهد بود.



تصویر ۱- ساختار تحقیق

مبانی نظری

از اواخر دهه ۶۰ میلادی و با مورد توجه قرار گرفتن کیفیت محیط‌زیست در بافت شهری و چالش های زیست محیطی شهرهای بزرگ (از قبیل آلودگی هوا، کمبود فضای سبز شهری به خصوص در مناطق مرکزی شهر)، جنبش‌های زیست محیطی ظهور پیدا کردند. یکی از این جنبش‌ها که به جنبش ساختمان‌های سبز معروف است، با ایده سبز کردن ساختمان‌ها به ارایه راه‌حل‌های ایستا در زمینه مشکلات شهری پرداخته است. در این زمینه ایده مدارس سبز پوشیده شده با بام های سبز نیز به عنوان زیر مجموعه ساختمان‌های سبز و با هدف ایجاد یک

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.23225602.1399.8.31.3.8]
[DOI: 10.29252/hafthesar.8.31.3]

محیط‌زیست سالم برای دانش آموزان در کنار صرفه‌جویی در مصرف انرژی از سال ۱۳۹۶ به وجود آمد و اولین مدارس مطابق با این تفکر در سال ۱۳۹۶ برای نخستین بار در آمریکا ساخته شدند (Marable, 2104 & Ramli, 2012).

طبق مطالعات انجام‌گرفته پیرامون ساختمان‌های پوشیده شده با بام سبز در ایالت متحده آمریکا توسط مک رای[1]، میزان هزینه‌های مصرفی ساختمان از جمله هزینه تعویض عایق بام و هزینه مصرف انرژی در طول عمر مفید ۲۵ ساله نسبت به میزان هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری و احداث این نمونه بام ها در ساختمان‌های عمومی توجیه بهتری نسبت به ساختمان‌های معمولی داشته است (McRae, 2016)؛ همچنین مطالعات چان[2] در سال ۲۰۱۳ پیرامون چرخه تجزیه تحلیل هزینه LCCA [2] توجیه‌پذیری اقتصادی کاربست این نمونه بام ها در اقلیم‌های سرد را به شرح زیر بیان کرد:

۱- هزینه اجرای این نمونه بام ها نسبت به بام های مرسوم در آب‌وهوای طوفانی از ۲۰.۳ تا ۲۵.۲ درصد کمتر است.

۲- این نمونه بام ها در اقلیم سرد ۱۴ تا ۲۰ درصد عمر مفید بیشتری در طول ۴۰ سال دارند؛ ازاین‌رو با توجه به افزایش قیمت مصالح و کاهش ساخت‌وساز میزان ۴۷. دلار سالانه در هزینه‌های مصرفی در این بخش صرفه‌جویی می‌شود.

۳-قیمت نهایی ساختمان‌های پوشیده شده با بام سبز به دلیل اعطای گواهی‌های تشویقی تا سقف ۹۹. دلار افزایش پیدا میکند.

۴-کاربرد این نمونه بام ها ۲۵ درصد هزینه پیش‌بینی‌شده پیرامون مدیریت سالانه روان آب‌های شهری را در این مناطق کاهش می‌دهد.

۵-هزینه مصرفی در بخش حرارت و تهویه ساختمان ۱۳ دلار در هر فوت مربع کاهش پیدا می‌کند؛ لذا به طول کلی از نظر آنالیز سودمندی این نمونه بام‌ها می‌توان جایگزین اقتصادی مناسبی به‌جای سقف‌های سنتی معمولی در اقلیم‌های سرد سیری باشند (Chan, 2013).

در ادامه سیتچل[3] از دانشگاه کالیفرنیا پس از بیست سال مطالعه بر روی بام های سبز مورد استفاده در مدارس سبز، موفق به معرفی منابع جایگزین به‌جای خاک کشاورزی در این نمونه‌ها بام ها شد و پس‌ازآن ویگناراجا [4] در سال ۱۹۹۵ تکنیک‌های رشد هیدروپونیک را در این نمونه بام ها مطرح کرد (Jones Jr, 2014). مزیت این نمونه بام ها نسبت به نمونه بام های سبز معمولی، وزن کم آن‌ها است؛ چراکه در این نمونه بام‌ها به‌جای استفاده از خاک کشاورزی به عنوان محیط کشت از مواد دیگر مانند پرلیت[4]، پومیس[5]، شلتوک برنج[6]، پشم سنگ[7] وکوکوپیت[8] استفاده‌شده است و نوع پومیس به دلیل قابلیت جذب آب فروان و نگه‌داری آب در دوره طولانی‌تر در اقلیم‌های خشک کاربرد بیشتری دارد (Jones Jr, 2014).

دو نوع متداول این نمونه بام های سبز در کاربری‌های آموزشی بام های سبز هیدروپونیک[9] گسترده و بام های سبز هیدروپونیک مدولار[10] می‌باشند که تنها تفاوت آن‌ها در اجرای آن‌ها بر روی بام سازه است. به این نحو که در نمونه مدولار، پنل های سبز ۲۰ تا ۳۰ مترمربعی هیدروپویک مدولار بر روی شبکه‌های از پیش تعیین شد در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از همدیگر قرار می‌گیرد؛ ولی درنمونه گسترده، رول های سبز هیدروپونیک در فاصله ۲۰ سانتی‌متری بام سازه‌ای در کنار هم قرار می‌گیرند و تأسیسات آب‌رسان در مرکز بام جانمایی می‌شود. جزییات اجرایی این گونه بام ها به این نحو است که پس از اجرای بام سازه‌ای عایق رطوبتی در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از بام سازه‌ای نصب می‌شود. پس‌ازآن ۱۵ سانتی متر غشای ضد آب از جنس پلیمری به عنوان سدی در برابر نفوذ مازاد رطوبت ناشی از نزولات جوی بر روی عایق رطوبتی احداث می‌شود و روی آن‌ها با عایق حرارتی از جنس فوم پوشیده می‌شود و در ادامه محفظه کشت گیاه که پوشیده شده از مواد جاذب مانند پومیس است، قرار می‌گیرد. در این نمونه بام‌ها، حرارت ناشی از تلفات حرارتی سقف، بین بام سازی‌های و بام هیدروپونیک مبحوس می‌شود و به این صورت ریشه گیاهان کاشته شده از یخ‌زدگی در فصول سرد محافظت می‌شود (Adams, 1989).

طبق مطالعات آدام[11] در سال ۱۹۸۹ گیاهان کاشته شده بر روی بام های سبز هیدروپونیک حتی نسبت به گیاهان کاشته شده بر روی زمین معمولی عملکرد بهتری در شرایط آب و هوایی سرد خواهند داشت (Adams, 1989)؛ البته در صورتی که گیاهان شیرخشت[12]، موی

1 Mac Ray
2 Chan
3 setchel
4 perlite
5 pumice
6 Rice hall
7 rockeoo
8 cocopeat
9 Extra hydroponic green roof
10 Modular hydroponic green roof
11 Adam
12 cotoneaster

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.23225602.1399.8.31.3.8]
[DOI: 10.29252/hafthesar.8.31.3]

همیشه سبز[1] چپقک زاگرسی[2]، شمشاد سه رنگ[3]، رازک[4]، تیموس همیشه سبز[5] ودیگر گیاهان همیشه سبز بر روی بام‌های سبز هیدروپونیک هیدروپونیک گسترده کاشته شوند، چرا که طبق مطالعه‌ی لی و همکاران در سال ۲۰۱۸ این گیاهان مقاومت بالایی در شرایط سرد داشته و در تمام فصول میتوان آن‌ها را پرورش داد (Karras, 2016).در این خصوص در حالت سرمای بیش از حد می‌توان در دوره‌های متناوب آب یاری به پوشش های هیدروپونیک موادی هورمونی مانند اکسین‌ها[6] و سایتوکین‌ها[7] و جیبرلین‌ها[8] اضافه کرد که این مواد باعث نگه قند گیاه گیاه در شیره گیاهان می‌شود از این‌رو شیره غلیظ شده مانع از یخزدگی سطح گیاهان خواهد شد (Koike, 2018)؛ همچنین بازدارنده‌های رشد مانند اتیلن[9] و تزریق دی اکسید کربن به آب نیز مانع از یخزدگی ریشه گیاهان می‌شوند (Sarin, 2014).

در ادامه از جمله مزیت‌های استفاده از پوشش های بام سبز در مدارس سبز سایه‌اندازی در برابر تابش مزاحم در عین استفاده حداکثری از روشنایی موثر در فضاهای آموزشی (Pellegrino, 2015) بهبود هوش، تمرکز و استعداد دانش‌آموزان (Tucker, 2017) بهبود یادگیری از طریق سواد بصری (Sarin, 2014)، بهبود سواد محیطی کاران (Goldman, 2018)، افزایش فعالیت‌های اجتماعی (Browning, 2018)، بهبود موفقیت دانش‌آموزان (Kweon,2017 & Matsuoka, 2010)، بهبود سلامت فیزیکی دانش آموزان (Wilhelmsen, 2017) و عایق بودن ساختمان و صرفه‌جویی کلی در مصرف انرژی است (Peng, 2015 & Pérez, 2011; JOHNNEL, 2007; Corden, 2011) در ادامه شناخت بهترین نمونه بام سبز هیدروپونیک در مدارس سبز در هر اقلیم باعث بهبود یکی از مزایای بام سبز یعنی صرفه‌جویی در مصرف انرژی در مدارس سبز اقلیم‌های متفاوت می‌شود در این مورد نیز تمرکز پژوهش حاضر مدارس سبز اقلیم سرد ایران می‌باشد.

روش تحقیق

پیرامون سنجش تفاوت دو نمونه بام سبز هیدروپونیک مدولار و گسترده در زمینه‌ی صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی در مدارس سبز اقلیم سرد و خشک ایران، از دو روش محاسبات عددی و شبیه‌سازی به کمک نرم افزار انرژی پلاس ورژن ۸ بهره گرفته‌شده است در اولین روش مقاومت حرارتی دو نمونه بام سبز مطابق با فرمول ثابت مقاومت حرارتی $R^{14}=(1\div hi^{15})+\Sigma(x^{12}\div k^{13})+(1\div ho^{10})\times A^{11}$ استخراج‌شده (Kasmayi, 2014) و داده های حاصل از آن‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. در روش دوم شهر شهرکرد که طبق مطالعات عباس نیا در سال ۱۳۹۶، سرد ترین شهر ایران است، به عنوان نمونه هدفمند مطالعه حاضر انتخاب شد (Abbas Nia, 2015) و شبیه‌سازی دو نمونه بام سبز هیدروپونیک مدولار و گسترده برای یک مدرسه سبز در این شهر به کمک ابزار انرژی پلاس ۸ انجام گرفت؛ چراکه داده های مستخرج از این نرم افزار طبق مطالعات فرنارد در سال ۲۰۱۸ دارای اعتبار جهانی بودند (Fernandes, 2018). پیرامون روش شبیه‌سازی ابتدا، اطلاعات جغرافیای و آب و هواشناسی ۲۰ ساله این شهر از سازمان آب و هواشناسی کشور استعلام و به کمک نرم‌افزار المنت(Elements) این اطلاعات به داده‌های ای پی دبلیو(EPW) خوانا برای نرم‌افزار «انرژی پلاس» تبدیل و به نرم‌افزار منتقل شدند.

همچنین داده‌های هندسی و عددی مدرسه یادشده با ابعاد ۴۰×۴۰ پوشش داده‌شده با آجر، سنگ، ملات سیمان، گچ‌وخاک و گچ رویه و ارتفاع سقف $3.2m^2$، همچنین ۳۰ پنجره ۲ در ۲ با شیشه‌های تک جداره معمولی و توان تهویه ۱.۵ بار در هر یک و نیم ساعت برای ۳۰۰ دانش‌آموز، روشنایی سقفی ۵۰۰ لوکس و توان حرارتی تجهیزات الکتریکی برابر با $\frac{Btu}{h}$ ۲۱۰۸ طبق استاندارد نوسازی مدارس توسط نرم افزار

1 parthenocissus
2 Aristolochia
3 Celastrus
4 Homulus
5 Mongolicus
6 auxin
7 Cytokines
8 Giberellin
9 Atilen

۱۰ برای اقلیم سرد عدد ثابت ۴
۱۱ مساحت تحت پوشش
۱۲ ضخامت لایه بر حسب واحد m
۱۳ ضریب انتقال حرارتی مصالح بر حسب واحد w/mk
۱۴ مقاومت حرارتی یک بام سبز برحسب واحد w/m2.k
۱۵ عدد ثابت ۱.۴۶

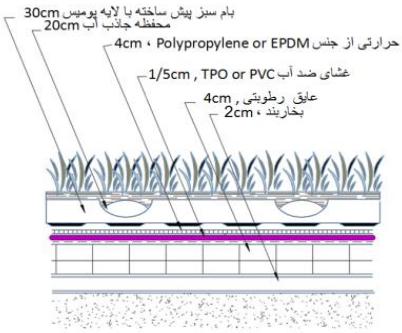
[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.23225602.1399.8.31.3.8]
[DOI: 10.29252/hafthesar.8.31.3]

اکوتک مدل‌سازی و خروجی آن به نرم افزار انرژی پلاس وارد شدند (از آنجایی که انتقال حرارت بین فضاهای مختلف مدرسه مد نظر پژوهش حاضر نبوده و پژوهش به صورت هدفمند صرفا مقایسه تاثیر کاربرد هر دو بام بر صرفه‌جویی کلی انرژی در مدرسه سبز را بررسی می‌نماید؛ لذا تمامی Zone های مختلف مدرسه را به صورت یک zone حرارتی کلی در نظر گرفته شد و میزان درجه حرارت فضای داخل مدرسه بدون درنظر گرفتن انتقال حرارت بین Zoneهای حرارتی مختلف در شرایط مدل‌سازی با بام سبز مدولار و گسترده در نظر با یکدیگر مقایسه شدند.)

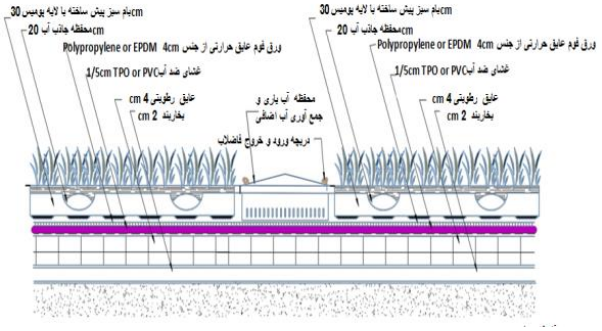


تصویر ۲- جزییات اجرای دیوارهای مدرسه (http://www.liveroof.com/detail-drawings)

همچنین به ترتیب هر یک از بام های سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار متناسب با جزییات اجرایی زیر به‌صورت بام الحاقی در فاصله ۲۰ سانتی‌متر از بام اصلی ساختمان مدل شدند و سپس با مقایسه درجه حرارت‌های ماهانه فضای زیر هر یک از مدل‌سازی‌ها در فصول انقلاب زمستانی (بهمن) و انقلاب تابستانی (مرداد) تفاوت عملکرد این دو نمونه بام ازنظر بهبود عملکرد حرارتی فضای داخلی مدارس سبز مورد مطالعه قرار گرفت.



تصویر ۳- جزییات اجرای بام سبزهیدروپونیک گسترده (http://www.liveroof.com/detail-drawings)



تصویر ۴- جزییات اجرای بام سبزهیدروپونیک مدولار (http://www.liveroof.com/detail-drawings)



تصویر ۵- شبیه‌سازی هندسی پیرامون سنجش تفاوت دو نمونه بام سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار از نظر صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی مدارس در مدارس سبز اقلیم سرد و خشک ایران

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.23225602.1399.8.31.3.8]
[DOI: 10.29252/hafthesar.8.31.3]

نتایج حاصل از محاسبات عددی و شبیه‌سازی‌ها

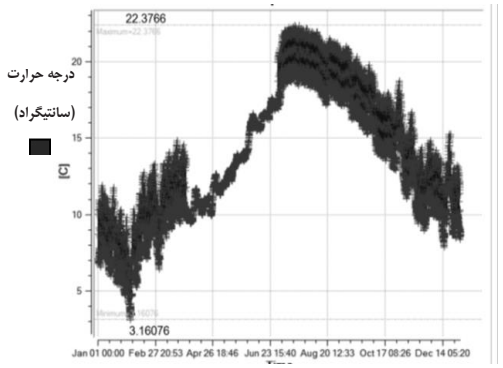
پیرامون محاسبات مقاومت حرارتی دو نمونه بام سبز مطابق با جزییات اجرایی در قسمت مقدمه مقادیر زیر به‌دست آمدند.

جدول ۱- مقایسه مقاومت حرارتی دو نمونه بام سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار
به کمک محاسبات مقاومت حرارتی معادل (بر اساس مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۸)

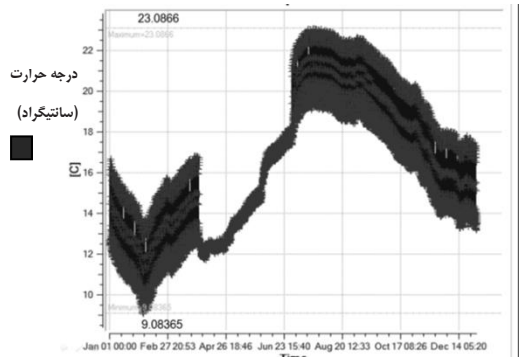
R2 مقاومت حرارتی بام در حالت استفاده از بام سبز هیدروپونیک مدولار $w/m^2.k$	R1 مقاومت حرارتی بام در حالت استفاده از بام سبز هیدروپونیک گسترده $w/m^2.k$	لایه‌های بام‌های سبز هیدروپونیک	x ضخامت (m)	K ضریب هدایت حرارتی w/mk
	R۱=(۱÷ ضریب ضخامت بام پومیس)+(مقاومت حرارتی هوای داخل +(ضریب هدایت حرارتی÷ضخامت فوم عایق) +(هدایت حرارتی بام پومیس +(ضریب هدایت حرارتی غشای ضد آب÷ضخامت غشای ضد آب) ضخامت) + (ضریب هدایت حرارتی عایق رطوبتی÷ضخامت عایق رطوبتی) ضریب ÷ضخامت بام سازه ای) + (ضریب هدایت حرارتی بخاربند÷بخاربند (مقاومت حرارتی هوای خارج در شرایط ÷۱) + (هدایت حرارتی بام سازه ای مساحت بام×زمستانی	بام پیش‌ساخته پومیس	/۳	/۰۲۵
	R۲=(۱÷ ضریب ضخامت بام پومیس)+(مقاومت حرارتی هوای داخل +(ضریب هدایت حرارتی÷ضخامت فوم عایق) +(هدایت حرارتی بام پومیس +(ضریب هدایت حرارتی غشای ضد آب÷ضخامت غشای ضد آب) ضخامت) + (ضریب هدایت حرارتی عایق رطوبتی÷ضخامت عایق رطوبتی) ضریب ÷ضخامت بام سازه ای) + (ضریب هدایت حرارتی بخاربند÷بخاربند (مقاومت حرارتی هوای خارج در شرایط ÷۱) +(هدایت حرارتی بام سازه ای فاصله بین مدول‌های بام سبز مدولار)-مساحت بام) × زمستانی			
R۲=(۱÷۱/۴۶) +(/۳ ÷ /۰۲۵)+ (/۰۴ ÷/۰۵۶)+ (/۰۱۵ ÷/۰۳۱)+ (/۳ ÷/۷)+ (/۰۴ ÷/۰۲۶)+ (/۰۲ ÷(۱۷۶۴-۱۲۸۰)× (۱ ÷۶)+(۲÷) = ۷۲۷۲.۶ $w/m^2.k$	R۱=(۱÷۱/۴۶) +(/۳ ÷ /۰۲۵)+ (/۰۴ ÷/۰۵۶)+ (/۰۱۵ ÷/۰۳۱)+ (۱ +(۲÷/۳) +(/۰۲ ÷/۰۲۶)+ (/۰۴ ÷/۷)+ ۶) ×۱۷۶۴ = ۲۶۵۰۶ $w/m^2.k$	ورق فوم عایق	/۰۴	/۰۵۶
		غشای ضد آب pvc	/۰۱۵	/۰۳۱
		عایق رطوبتی	/۰۴	/۷
		لایه بخاربند	/۰۲	/۰۲۶
		بام سازه‌ای	/۳	۲

در ادامه پس از شبیه‌سازی دو نمونه بام سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار با نرم افزار انرژی پلاس، نیز یافته‌های زیر پیرامون درجه حرارت فضای زیر هر یک این دو نوع بام سبز هیدروپونیک برای مدرسه مدل شده سبز با بار جمعیتی۳۰۰ دانش‌آموز در شهر شهرکرد به عنوان سردترین شهر ایران به دست آمد.

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.23225602.1399.8.31.3.8]
[DOI: 10.29252/hafthesar.8.31.3]

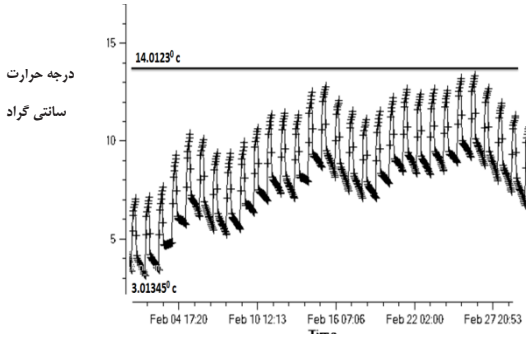


تصویر ۶- نمودار درجه حرارت فضای داخلی مدرسه سبز در فصول مختلف در شرایطی قرارگیری بام سبز هیدروپونیک مدولار بر روی بام سازه‌ای

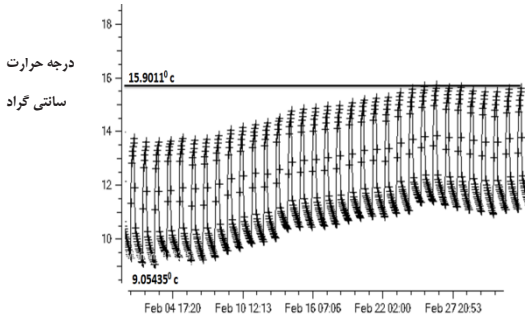


تصویر ۷- نمودار درجه حرارت فضای داخلی مدرسه سبز در فصول مختلف در شرایطی قرارگیری بام سبز هیدروپونیک گسترده بر روی بام سازه‌ای

جهت صحت سنجی داده های حاصل از شبیه‌سازی مجددا شبیه‌سازی دیگری با همین داد ها این بار تنها به صورت ماهانه در سرد ترین ماه سال با دقت عددی بیشتر انجام گرفت که نتایج زیر حاصل شدند.



تصویر ۸- نمودار درجه حرارت فضای داخلی مدرسه سبز در بهمن‌ماه در شرایطی قرارگیری بام سبز هیدروپونیک مدولار بر روی بام سازه‌ای



تصویر ۹- نمودار درجه حرارت فضای داخلی مدرسه سبز در بهمن‌ماه در شرایطی قرارگیری بام سبز هیدروپونیک گسترده بر روی بام سازه‌ای

از آنجایی که درجه حرارت‌های مدل‌سازی‌های ماهانه و مدل‌سازی‌های فصل بهمن‌ماه به عنوان سرد ترین فصل اقلیم سرد، اعداد نزدیکی به یکدیگر می‌باشند؛ لذا داده های حاصل از شبیه‌سازی‌ها صحت سنجی شدند و دارای صحت درونی می‌باشند.

بحث و نتایج

همان طور که مطرح شد، ایده‌ی مدارس سبز با هدف جبران کاستی پوشش سبز در مدارس امروزی شکل گرفته‌است. همچنین طبق مطالعه الدخیل[1] در سال ۲۰۱۸ بام های سبز به عنوان حیاط دوم مدارس یکی از انواع پوشش های سبز به‌کاررفته در مدارس سبز می‌باشند که مانند یک عایق در شرایط زمستانی و تابستانی باعث بهبود شرایط آسایش حرارتی می‌شوند (Al Dakhe et al., 2018). طبق مطالعه الخدامی[2] در سال ۲۰۱۸ و کاراس[3] در سال ۲۰۱۶ نوع جدید بام‌های سبز که به بام‌های سبز هیدروپونیک معروف می‌باشند؛ نه تنها از نمونه‌های بام های سبز معمولی سبک‌تر هستند؛ بلکه این نمونه بام‌ها، پتانسیل بهتری در نگه‌داری آب دارند (Al-Kodmany, & 2018 Karras, 2016)؛ ازآنجایی‌که طبق مطالعه منصور[4] در سال ۲۰۱۴ پیرامون استفاده از بام های هیدروپونیک در مدارس سبز، فقدان فقدان مطالعه انواع بام‌های سبز هیدروپونیک از یک سو باعث عدم بازده حرارتی و برودتی مورد انتظار در مدارس سبز شود و از سویی دیگر

1 Al dakheel
2 Al khodami
3 Karras
4 Mansour

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.23225602.1399.8.31.3.8]
[DOI: 10.29252/hafthesar.8.31.3]

این مدارس را به نمونه‌های یکسان در اقلیم‌هایی با نیازهای حرارتی متفاوت تبدیل کـرده اسـت (Mansour, 2014). ازایـن‌رو پـژوهش حاضر به بررسی تفاوت دو نوع بام سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار از نظر مقاومت حرارتی و تاثیر آن‌ها بر دمای محیط داخلـی در فصـول مختلف در مدارس سبز اقلیم شهر شهرکرد به عنوان سردترین شهر ایران پرداخته است. در این زمینه یافتـه‌هـای حاصـل از تفـاوت مقاومـت حرارتی دو نمونه بام سبز هیدروپونیک مدولار و گسترده بر روی مدرسه یادشده متناسب با استاندارد اجرایی آن‌هـا نشـان دادنـد کـه مقاومـت حرارتی کل «مجموع مقاومت حرارتی تک‌تک لایه ها در مساحت آن‌ها و مقاومت لایه هوای داخل و خارج»، در بام های سـبز هیـدروپونیک گسترده و مدولار به ترتیب برابر ۲۶۵۰۶ $w/m^2.k$ و۷۲۷۲/۶ $w/m^2.k$ می‌باشد؛ ازاین‌رو با این که جزییات لایه های هر دو بام مشابه اند، مقاومت حرارتی بام سبز گسترده تقریبا ۳/۶ برابر بیشتر از مقاومت حرارتی بام سبز مدولار است؛ چراکه در بام های سبز هیدروپونیک مـدولار محفظه‌های آب‌رسان در اطراف پنل‌های مدولار یکی از عوامل انتقال حرارت از سطح بام به محیط خارج می‌باشند؛ این در حالی است کـه در سیستم های هیدروپونیک گسترده، آب یاری بام به صورت مرکزی بوده و تمامی سطح بام با پوشش ها سـبز هیـدروپونیک عـایق مـی‌شـود؛ ازاین‌رو این نمونه بام ها از نظر مقاومت حرارتی عملکرد بهتری دارند لذا به طور کلی، توان نگه داشت حرارت بالاتری و در نتیجه صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی حرارتی در فصول سرد سال خواهد داشت؛ حال‌آنکه پیرامون داده های یک مدرسه سبز ۳۰۰ نفره طبق اطلاعـات بـه دست آمده از روش شبیه‌سازی، چنانچه بام سبز هیدروپونیک گسترده مطابق با اطلاعات مطرح در قسمت روش تحقیق، بر روی بام سـازه‌ای مدل مورد نظر قرار گیرد در صورت عدم استفاده از هرگونه تأسیسات گرمایشی و سرمایشی درجه حرارت فضای زیر بام در ماه‌های سرد سـال یا انقلاب زمستانی دی و بهمن[37]، بین ۹ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد و در ماه‌های گرم سال یا انقلاب تابستانی تیر، مرداد و شهریور[38] بین ۱۸ تـا ۲۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این در حالی است که در حالت استفاده از بام سبز هیدروپونیک مدولار درجه حـرارت همـان فضـا بـا اطلاعـات یکسان به ترتیب ۳.۱ تا ۷ درجه سانتی‌گراد برای ماه‌های سرد سال«دی و بهمن» و ۱۵ تا ۲۲.۳ درجه سانتی‌گراد برای ماه‌های گرم سال«تیر و مرداد و شهریور» است. از این‌رو به طور کلی درجه حرارت فضای داخلی مدرسه در حالت استفاده از بام سبز هیدروپونیک گسـترده بیشـتر از بام سبز هیدروپونیک مدولار است (۹>۳.۱) (نمودار ۱ و ۲) به نحوی که در ماه‌های بحرانی «دی و بهمندر شهر یادشده به عنوان سرد ترین شهر ایران، درجه حرارت فضای زیر بام سبز گسترده تقریبا سه برابر گرم‌تر از همان فضا زیر بام سبز مدولار است که این نتایج نیـز حـاکی از میزان بیشتر صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی جهت گرم کردن مدرسه است. در ادامه ازآنجایی‌که طبق بررسی‌هـای هـامفریز[39] در سـال ۲۰۱۶ میانگین درجه حرارت تعادل به‌نحوی‌که انسان در آن احساس آسایش کند بین ۲۰ تا ۲۵ درجه سـانتی‌گـراد اسـت (Humphreys, 2018)؛ ازاین‌رو نه تنها با استفاده از پوشش بام سبز هیدروپونیک گسترده درجه حرارت فضای داخلی در ماه‌ها سـرد سـال بـه درجـه تعـادل نزدیک می‌شود، در فصول گرم سال نیز این میزان در محدوده آسایش باقی خواهد ماند. لذا به طور کلی به علت مزیت‌های حرارتی یادشده از نظر مقاومت حرارتی در تمام کاربری‌ها و همچنین راندمان حراتی و برودتی بهتر در فضاهای آموزشی با بار جمعیتی ۳۰۰ نفر و توان تهوه ای ۱.۵ بار در هر یک و نیم ساعت، بام سبز هیدروپونیک گسترده، از نظر صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی در مدارس اقلیم سرد نسبت به بام سبز مدولار دارای اولویت است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به طور کلی صرفه نظر از نوع کاربری زیر بام سبز مقاومت حرارتی بام سبز هیدروپونیک گسترده نسبت به بام سبز هیدروپونیک مدولار میزان بیشتری است. این حالی است در کاربری آموزشی با بار جمعیتی ۳۰۰ نفر و توان تهویه ۱.۵ بار در هر یک و نـیم سـاعت، نیـز درجـه حـرارت فضای داخلی زیر بام سبز گسترده عدد نزدیک‌تری به شرایط آسایش حرارتی در شرایط یکسان نسبت به بام سبز مدولار است؛ لذا ایـن نمونـه بام ها از نظر نگه داشت حرارت و در نتیجه صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی در شرایط آب و هوایی سرد در مدارس سبز عملکرد حرارتـی بهتری دارند این درحالی است که با استفاده از این نمونه بام ها در شرایط تابستان نیز درجه حرارت فضای داخلـی مـدارس سـبز در محـدوده آسایش باقی می‌ماند؛ لذا به طور کلی با وجود شباهت‌های اجرایی دو نمونه بام سبز هیدروپونیک به دلیل کیفیت نمونه بام سـبز هیـدروپونیک گسترده این سیستم بامی در مدارس سبز اقلیم سرد از نظر صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی، عملکرد حرارتی بهتری دارند، البته این مـورد در صورتی کاملا صدق خواهد که در این نمونه بام ها از گیاهان همیشه سبز استفاده شود و جهت جلوگیری از یخزدگی گیاهان به آن‌ها، مـواد خاصی از جمله هورمن‌های گیاهی و یا بازدارنده‌های رشد و یا دی اکسید کربن به همراه آب یاری تزریق شوند. در ادامـه از آنجـایی خروجـی داده های عددی متناسب با بار جمعیتی، توان تهویه‌ای، روشنایی و تجهیزات الکتریکی فضاهای آموزشی است، صرفا تفاوت این دونمونـه بـام سبز در فضای آموزشی سبز از نظر صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی مورد توجه قرارگرفته شده است؛ لذا جهت بررسی دیگـر کـاربری‌هـا،

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.23225602.1399.8.31.3.8]
[DOI: 10.29252/hafthesar.8.31.3]

مدل‌سازی‌های دیگر متناسب با استانداردهای آن‌ها پیشنهاد می‌شود؛ همچنین از آنجایی که دو نمونه بام سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار در مدارس سبز صرفا در اقلیم سر دو خشک ایران مورد مطالعه قرار گرفتند؛ لذا به منظور سنجش عملکرد این دو نمونه بام سـبز در شـرایط آب و هوایی دیگر، محاسبات و مدل‌سازی‌های دیگری در شرایط جغرافیایی و دمایی متفاوت در جهت مطالعات آتی توصیه می‌شود.

فهرست منابع

– Abbas Nia, M. (2015). The Chaharmahal and Bakhtiari Province's Climate and Watershed Areas Using Modern Statistical Techniques, Iranian Journal of Water Research. Volume 9. Number 2. Page 121-131(in persian).

– Adams, P. (1989, October). Hydroponic systems for winter vegetables. In II International Symposium on Protected Cultivation of Vegetables in Mild Winter Climates 287 (pp. 181-190).

– Al Dakheel, J., Tabet Aoul, K., & Hassan, A. (2018). Enhancing Green Building Rating of a School under the Hot Climate of UAE; Renewable Energy Application and System Integration. Energies, 11, 9, 2465.

– Al-Kodmany, K. (2018). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. Buildings, 8, 2, 24,1-36.

– Browning, M. H., Kuo, M., Sachdeva, S., Lee, K., & Westphal, L. (2018). Greenness and school-wide test scores are not always positively associated–A replication of "linking student performance in Massachusetts elementary schools with the 'greenness' of school surroundings using remote sensing". Landscape and Urban Planning, 178, 69-72.

– Chan, A. L. S., & Chow, T. T. (2013). Energy and economic performance of green roof system under future climatic conditions in Hong Kong. Energy and Buildings, 64, 182-198.

– Corden, Y. (2011). Efficacy of Green Roof Technology in Colder Climates. Earth Common Journal Vol. 1, No. 1 2011p73.

– Dinsdle, s. Pearen, b. (2006). Feasibility study for green roof application on Queen university campuse. Queen physical plant services.58

– Fernandes, M. S., Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2018). An Aiding Tool for Building Design Generation, Thermal Assessment and Optimization-EnergyPlus Interaction Overview. arXiv preprint arXiv:1806.05949.

– Fuel Conservation Optimization Organization. (2010). Modification of energy consumption patterns in schools and departments, Booklet, Part 3, Chapter I, 33 (in persian).

– Goldman, D., Ayalon, O., Baum, D., & Weiss, B. (2018). Influence of 'green school certification'on students' environmental literacy and adoption of sustainable practice by schools. Journal of Cleaner Production, 183, 1300-1313.

– Humphreys, M. A., & Nicol, J. F. (2018). Principles of Adaptive Thermal Comfort. In Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia (pp. 103-113). Springer, Singapore

– JOHNNEL, J. (2007). Thermal Performance of Green Roofs in Cold Climates. Queen's UniversityKingston, Ontario, Canada. September.p48-80.

– Jones Jr, J. B. Complete guide for growing plants hydroponically. (2014) , CRC Press ,Boca Raton, 223.

– Karras, G., Tsirogiannis, I. L., Varras, G., Lampraki, E., Bakea, M., & Savvas, D. (2016). Exterior hydroponic panel-system and plants evaluation and effects on the building's outer surface conditions. In VI International Conference on Landscape and Urban Horticulture 1189, 217-222.

– Kasmayi, M. (2014). Climate and Architecture. Iranian Housing Investment Company. 7, 1, 112-118.

– Koike, I., Shimomura, K., & Umehara, M. (2018). Quantification of Endogenous Auxin and Cytokinin during Internode Culture of Ipecac. JoVE, Journal of Visualized Experiments, 133, e56902.

– Kweon, B. S., Ellis, C. D., Lee, J., & Jacobs, K. (2017). The link between school environments and student academic performance. Urban Forestry & Urban Greening, 23, 35-43.

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.23225602.1399.8.31.3.8]
[DOI: 10.29252/hafthesar.8.31.3]

– Magzamen, S., Mayer, A. P., Barr, S., Bohren, L., Dunbar, B., Manning, D., & Cross, J. E. (2017). A Multidisciplinary Research Framework on Green Schools: Infrastructure, Social Environment, Occupant Health, and Performance. Journal of School Health, 87, 5, 376-387.
– Mansour, O. E. (2014). Reflections on The Image of Green Buildings: An Ethnographic Evaluation of A "LEED" Certified Elementary School. In Proceedings of the 6th Annual Architectural Research Symposium in Finland, 245.
– Marable, S. A. (2014). Green Schools-The Implementation and Practices of Environmental Education in LEED and USED Green Ribbon Public Schools in Virginia.125.
– Matsuoka, R. H. (2010). Student performance and high school landscapes: Examining the links. Landscape and urban planning, 97, 4, 273-282.
– McRae, A. M. (2016). Case study: A conservative approach to green roof benefit quantification and valuation for public buildings. The Engineering Economist, 61(3), 190-206.
– Meiboudi, H., Lahijanian, A., Shobeiri, S. M., Jozi, S. A., & Azizinezhad, R. (2018). Development of a new rating system for existing green schools in Iran. Journal of Cleaner Production, 188, 136-143.
– Meiboudi, H., Lahijanian, A., Shobeiri, S. M., Jozi, S. A., & Azizinezhad, R. (2016). Creating an integrative assessment system for green schools in Iran. Journal of cleaner production, 119, 236-246.
– National building regulation. (2018). Energy saving guide. Iran development Publication, 340.
– Pellegrino, A., Cammarano, S., & Savio, V. (2015). Day lighting for Green schools: A resource for indoor quality and energy efficiency in educational environments. Energy Procedia, 78, 3162-3167.
– Peng, L. L., & Jim, C. Y. (2015). Seasonal and diurnal thermal performance of a subtropical extensive green roof: The impacts of background weather parameters. Sustainability, 7, 8, 11098-11113.
– Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M., & Cabeza, L. F. (2011). Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate. Energy conversion and management, 52, 4, 1861-1867
– Raji, B., Tenpierik, M. J., & van den Dobbelsteen, A. (2015). The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 610-623.
– Ramli, N. H., Masri, M. H., Zafrullah, M., Taib, H. M., & Hamid, N. A. (2012). A comparative study of green school guidelines. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 50, 462-471
– Sarin, R. (2014). Effect of growth regulators on Callus production in two medicinally important plants of cucurbitaceous.
– Shokoohi Dehkordi, K., Farhadian, M. (2017). Investigating the effect of Atrium-related Green Roof Cooling and Heating loads on Energy Management in Pedagogical Spaces in Cold Climate. Journal of Environmental Science and Technology, 19, 5, 571-583. doi: 10.22034/jest.2017.11396.
– Tsirogiannis, I. L., Karras, G., Lambraki, E., Varras, G., Savvas, D., & Castellano, S. (2014). Evaluation of a plastic tube based hydroponic system for horizontal and vertical green surfaces on buildings. In XXIX International Horticultural Congress on Horticulture: Sustaining Lives, Livelihoods and Landscapes (IHC2014), 1108, 323-330.
– Tucker, R., & Izadpanahi, P. (2017). Live green, think green: Sustainable school architecture and children's environmental attitudes and behaviors. Journal of Environmental Psychology, 51, 209-216.
– Vaidya, V., Gothankar, J., Pore, P., Patil, R., & Murarkar, S. (2018). Green school audit of twenty two schools in Pune city. International Journal Of Community Medicine And Public Health, 5, 2, 620-626
– Wilhelmsen, C. K., Skalleberg, K., Raanaas, R. K., Tveite, H., & Aamodt, G. (2017). Associations between green area in school neighbourhoods and overweight and obesity among Norwegian adolescents. Preventive medicine reports, 7, 99-105.
– Zhao, D. X., He, B. J., & Meng, F. Q. (2015). The green school project: A means of speeding up sustainable development?. Geoforum, 65, 310-313.

[Downloaded from hafthesar.iauh.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.23225602.1399.8.31.3.8]
[DOI: 10.29252/hafthesar.8.31.3]