

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 تجدیدپذیر کمتر از مدارس معمولی است. در این مدارس با افزودن پوسته‌های سبز مانند بام‌های سبز هیدروپونیک، علاوه بر افزایش ارتباط دانش‌آموزان با طبیعت، میزان مصرف انرژی کاهش پیدا می‌کند. از آنجایی که شناخت اولویت انواع این بام‌ها در اقلیم‌های مختلف، باعث کارکرد بهینه این بام‌ها 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 سبز در 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 استاندارد 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 ($0.6 < 2.72/6$)؛ همچنین درجه حرارت فضای زیر این بام در کاربری آموزشی در سرد ترین ماه برابر ۹.۰۸ است که تقریباً ۶ درجه گرم‌تر از کاربرد بام سبز مدولار است؛ لذا، بام سبز هیدروپونیک گسترده عملکرد حرارتی بهتری از نمونه مدولار از نظر 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.

** دانشجوی 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

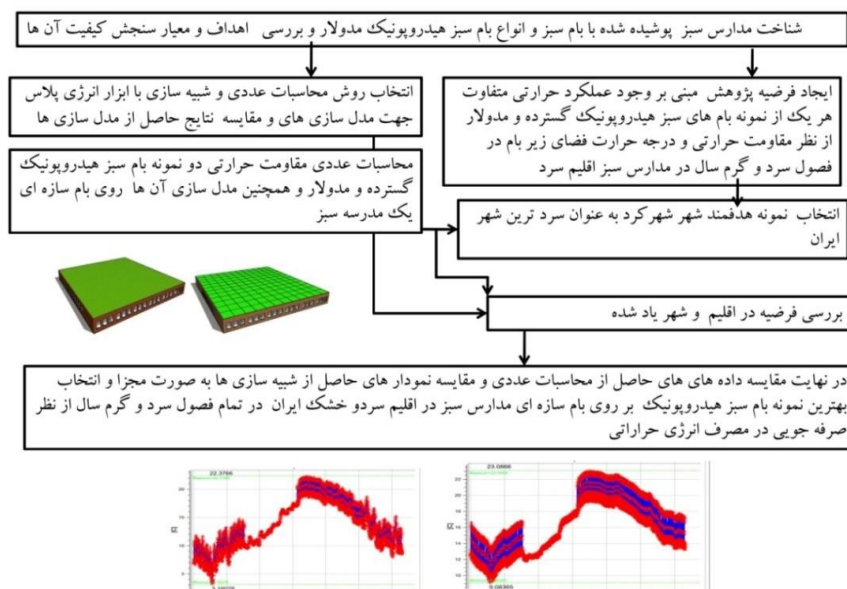
شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی (نویسنده مسئول) S.razzaghi@srttu.edu

**** استاد مدعو، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران - استادیار گروه معماری، دانشکده معماری، دانشگاه آزاد

واحد رودهن

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 حذف شده‌اند (Meiboudi, 2018 & 2019); برای مثال، طبق مطالعه انجام گرفته در سال ۱۳۸۰، ۷۵ درصد مدارس در ایران فاقد پوشش سبز کافی بودند (Fuel Conservation Optimization Organization, 2010); از این رو از اوایل سال ۱۹۹۷ تا اکنون باهدف بهبود درک دانش آموزان از طبیعت در کنار صرفه‌جویی در مصرف انرژی، بام‌های سبز به عنوان حیاط‌های سبز جایگزین، حیاط‌های معمولی مدارس سبز شده‌اند (Vaidya, 2018 & Magzamen, 2017); به نحوی که با به‌کارگیری بام‌های سبز علاوه بر رفاه دانش آموزان و آموزش‌های محیط زیستی، بهره‌وری مناسب از منابع انرژی و کاهش CO_2 در مدارس سبز تضمین شود (Zhao, 2015); حال آن‌که نیاز به مراقبت دائمی و آب یاری فراوان از جمله معایب بام‌های سبز معمولی در مدارس سبز می‌باشند (Dinsdle, 2006). در این زمینه انواع خاص بام‌های سبز شامل بام‌های سبز هیدروپونیک گسترده و بام‌های سبز هیدروپونیک مدولار، معایب بام‌های 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 مطرح شدن این نمونه بام‌ها در فضاهای آموزشی، کمتر مطالعه‌ای به سنجش عملکرد حرارتی این بام‌ها پیرامون صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی مدارس سبز بلاخص در اقلیم سرد و خشک به عنوان نمونه اقلیم کمتر بررسی شده از نظر پوشش‌های سبز پرداخته است (Shokoohi Dehkordi, 2017 & Raji, 2015); لذا در مطالعه حاضر که فرضیه اصلی آن وجود عملکرد حرارتی متفاوت هر یک از نمونه بام‌های 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.



مبانی نظری

از اواخر دهه ۶۰ میلادی و با مورد توجه قرار گرفتن کیفیت محیط‌زیست در بافت شهری و چالش‌های 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 بام‌های سبز نیز به عنوان زیر مجموعه ساختمان‌های سبز و با هدف ایجاد یک

محیط‌زیست سالم برای دانش‌آموزان 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^۱، 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 بام‌ها در ساختمان‌های عمومی توجه بهتری نسبت به ساختمان‌های معمولی داشته است (McRae, 2016)؛ همچنین مطالعات چان^۲ در سال ۲۰۱۳ پیرامون چرخه تجزیه تحلیل هزینه LCCA^۲ توجه‌پذیری اقتصادی کاربست این نمونه بام‌ها در اقلیم‌های سرد را به شرح زیر بیان کرد:

- ۱- هزینه اجرای این نمونه بام‌ها نسبت به بام‌های مرسوم در آب‌وهوای طوفانی از ۲۰.۳ تا ۲۵.۲ درصد کمتر است.
 - ۲- این نمونه بام‌ها در اقلیم سرد ۱۴ تا ۲۰ درصد عمر مفید بیشتری در طول ۴۰ سال دارند؛ از این رو 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 بام‌ها 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 به جای سقف‌های سنتی معمولی در اقلیم‌های سرد سیری باشند (Chan, 2013).
- در ادامه سیتچل^۳ از دانشگاه کالیفرنیا پس از بیست سال مطالعه بر روی بام‌های سبز مورد استفاده در مدارس سبز، موفق به معرفی منابع جایگزین به جای خاک کشاورزی در این نمونه‌ها بام‌ها شد و پس از آن ویگناراجا^۴ در سال ۱۹۹۵ تکنیک‌های رشد هیدروپونیک را در این نمونه بام‌ها مطرح کرد (Jones Jr, 2014). مزیت این نمونه بام‌ها نسبت به نمونه بام‌های سبز معمولی، وزن کم آن‌ها است؛ چراکه در این نمونه بام‌ها به جای استفاده از خاک کشاورزی به عنوان محیط کشت از مواد دیگر مانند پرلیت^۴، پومیس^۵، شلتوک برنج^۶، پشم سنگ^۷ و کوکوپیت^۸ استفاده شده است و نوع پومیس به دلیل قابلیت جذب آب فراوان و نگهداری آب در دوره طولانی‌تر در اقلیم‌های خشک کاربرد بیشتری دارد (Jones Jr, 2014).

دو نوع متداول این نمونه بام‌های سبز در کاربری‌های آموزشی بام‌های سبز هیدروپونیک^۹ گسترده و بام‌های سبز هیدروپونیک مدولار^{۱۰} می‌باشند که تنها تفاوت آن‌ها در اجرای آن‌ها بر روی بام سازه است. به این نحو که در نمونه مدولار، پنل‌های سبز ۲۰ تا ۳۰ مترمربعی هیدروپونیک مدولار بر روی شبکه‌های از پیش تعیین شده در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از همدیگر قرار می‌گیرد؛ ولی در نمونه گسترده، رول‌های 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 بام‌ها به این نحو است که پس از اجرای بام سازه‌ای عایق رطوبتی در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از بام سازه‌ای نصب می‌شود. پس از آن ۱۵ سانتی‌متر 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 بام‌سازی‌های و بام هیدروپونیک محسوس می‌شود و به این صورت ریشه گیاهان کاشته شده از یخ‌زدگی در فصول سرد محافظت می‌شود (Adams, 1989).

طبق مطالعات آدام^{۱۱} در سال ۱۹۸۹ گیاهان کاشته شده بر روی بام‌های 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^{۱۲}، 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



همیشه سبز^۱ چپک زاگرسی^۲، شمشاد سه رنگ^۳، رازک^۴، تیموس همیشه سبز^۵ و دیگر 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 پوشش‌های هیدروپونیک موادی هورمونی مانند اکسین‌ها^۶ و سایتوکین‌ها^۷ و جیبرلین‌ها^۸ اضافه کرد که این مواد باعث نگه قند گیاه گیاه در شیره گیاهان می‌شود از این رو شیره غلیظ شده مانع از یخ‌زدگی سطح گیاهان خواهد شد (Koike, 2018)؛ همچنین بازدارنده‌های رشد مانند اتیلن^۹ و تزریق دی اکسید کربن به آب نیز مانع از یخ‌زدگی ریشه گیاهان می‌شوند (Sarin, 2014).

در ادامه از جمله مزیت‌های استفاده از پوشش‌های 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 دانش‌آموزان (Peng, 2015 & Pérez, 2011) و عایق بودن ساختمان و صرفه‌جویی کلی در مصرف انرژی است (Wilhelmsen, 2017) 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 گرفته شده است در اولین روش مقاومت حرارتی دو نمونه بام سبز مطابق با فرمول ثابت مقاومت حرارتی $R^{14} = (1 \div h_i \cdot \sigma) + \sum (x^{12} \div k^{13}) + (1 \div h_o \cdot \sigma) \times A^{11}$ استخراج شده (Kasmayi, 2014) و داده‌های حاصل از آن‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. در روش دوم شهر شهر کرد که طبق مطالعات عباس نیا در سال ۱۳۹۶، سردترین 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 داده‌های مستخرج از این نرم افزار طبق مطالعات فرنارد در سال ۲۰۱۸ دارای اعتبار جهانی بودند (Fernandes, 2018). پیرامون روش شبیه‌سازی ابتدا، اطلاعات جغرافیایی و آب و هواشناسی ۲۰ ساله این شهر از سازمان آب و هواشناسی کشور استعلام و به کمک نرم افزار المنت (Elements) این اطلاعات به داده‌های ای پی دبلیو (EPW) خوانا برای نرم افزار «انرژی پلاس» تبدیل و به نرم افزار منتقل شدند. همچنین داده‌های هندسی و عددی مدرسه یادشده با ابعاد ۴۰×۴۰ پوشش داده شده با آجر، سنگ، ملات سیمان، گچ و خاک و گچ رویه و ارتفاع سقف 3.2m²، 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 دانش آموز، 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 Gibberellin
- 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 بر حسب واحد w/m².k

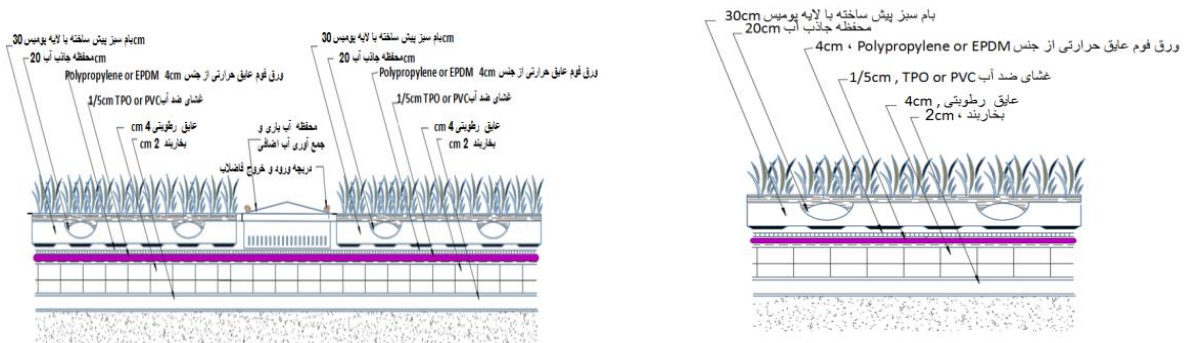
۱۵ عدد ثابت ۱.۴۶

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 صرفاً 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 در نظر گرفتن انتقال حرارت بین Zone های حرارتی مختلف در شرایط مدل‌سازی با بام سبز مدولار و گسترده در نظر با یکدیگر مقایسه شدند).



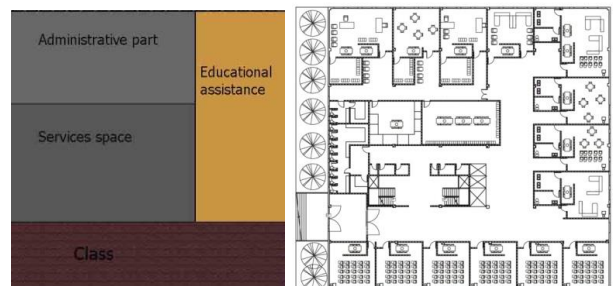
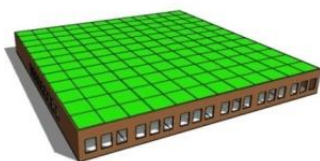
تصویر ۲- جزئیات اجرای دیوارهای مدرسه (<http://www.liveroof.com/detail-drawings>)

همچنین به ترتیب هر یک از بام‌های سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار متناسب با جزئیات اجرایی زیر به صورت 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 از نظر بهبود عملکرد حرارتی فضای داخلی مدارس سبز مورد مطالعه قرار گرفت.



تصویر ۴- جزئیات اجرای بام سبز هیدروپونیک مدولار (<http://www.liveroof.com/detail-drawings>)

تصویر ۳- جزئیات اجرای بام سبز هیدروپونیک گسترده (<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

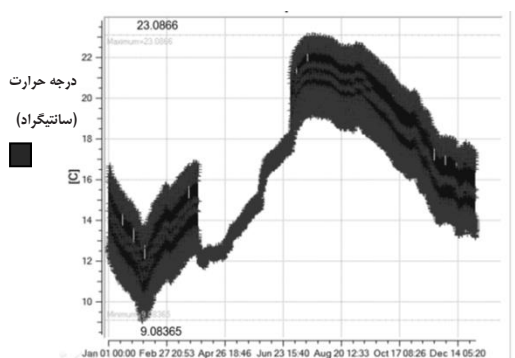
نتایج حاصل از محاسبات عددی و شبیه‌سازی‌ها

پیرامون محاسبات مقاومت حرارتی دو نمونه بام سبز مطابق با جزئیات اجرایی در قسمت مقدمه مقادیر زیر به دست آمدند.

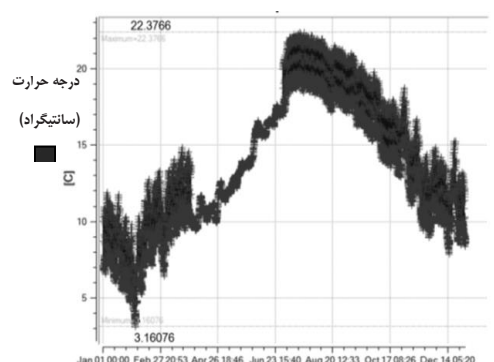
جدول ۱- مقایسه مقاومت حرارتی دو نمونه بام سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار به کمک محاسبات مقاومت حرارتی معادل (بر اساس مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۸)

K	x	لایه‌های بام‌های سبز هیدروپونیک	R1	R2
ضریب هدایت حرارتی w/mk	ضخامت (m)		مقاومت حرارتی بام در حالت استفاده از بام سبز هیدروپونیک گسترده w/m ² .k	مقاومت حرارتی بام در حالت استفاده از بام سبز هیدروپونیک مدولار w/m ² .k
۱/۰۲۵	۳	بام پیش‌ساخته پومیس	$R_1 = (1 \div 1) + (\text{ضریب هدایت حرارتی هوای داخل} \div 1) + (\text{ضریب هدایت حرارتی فوم عایق}) + (\text{هدایت حرارتی بام پومیس}) + (\text{ضریب هدایت حرارتی غشای ضد آب} \div \text{ضخامت غشای ضد آب}) + (\text{ضخامت}) + (\text{ضریب هدایت حرارتی عایق رطوبتی} \div \text{ضخامت عایق رطوبتی}) + (\text{ضریب هدایت حرارتی بخاریند} \div \text{بخاریند}) + (\text{مقاومت حرارتی هوای خارج در شرایط} \div 1) + (\text{هدایت حرارتی بام سازه ای مساحت بام} \times \text{زمستانی})$	$R_2 = (1 \div 1) + (\text{ضریب هدایت حرارتی هوای داخل} \div 1) + (\text{ضریب هدایت حرارتی فوم عایق}) + (\text{هدایت حرارتی بام پومیس}) + (\text{ضریب هدایت حرارتی غشای ضد آب} \div \text{ضخامت غشای ضد آب}) + (\text{ضخامت}) + (\text{ضریب هدایت حرارتی عایق رطوبتی} \div \text{ضخامت عایق رطوبتی}) + (\text{ضریب هدایت حرارتی بخاریند} \div \text{بخاریند}) + (\text{مقاومت حرارتی هوای خارج در شرایط} \div 1) + (\text{هدایت حرارتی بام سازه ای فاصله بین مدول‌های بام سبز مدولار} - \text{مساحت بام}) \times \text{زمستانی}$
۱/۰۵۶	۱/۰۴	ورق فوم عایق		
۱/۰۳۱	۱/۰۱۵	غشای ضد آب pvc	$R_1 = (1 \div 1/46) + (3 \div 1/25) + (1/4 \div 1/056) + (1/15 \div 1/031) + (1/4 \div 1/7) + (1/2 \div 1/26) + (3 \div 2) + (1 \div 6) \times 1764 = 265.06 \text{ w/m}^2.k$	$R_2 = (1 \div 1/46) + (3 \div 1/25) + (1/4 \div 1/056) + (1/15 \div 1/031) + (1/4 \div 1/7) + (1/2 \div 1/26) + (3 \div 2) + (1 \div 6) \times (1764 - 1280) = 7272.6 \text{ w/m}^2.k$
۱/۷	۱/۰۴	عایق رطوبتی		
۱/۰۲۶	۱/۰۲	لایه بخاریند		
۲	۳	بام سازه‌ای		

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 جمعیتی ۳۰۰ دانش‌آموز در شهر شهرکرد به عنوان سردترین شهر ایران به دست آمد.

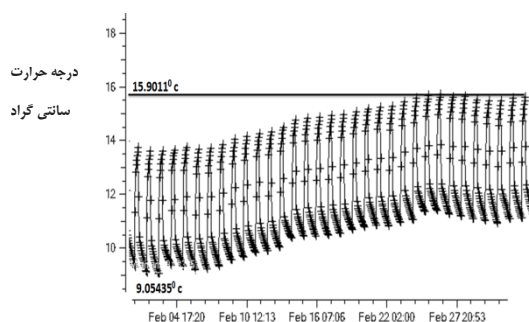


تصویر ۷- نمودار درجه حرارت فضای داخلی مدرسه سبز در فصول مختلف در شرایطی قرارگیری بام سبز هیدروپونیک گسترده بر روی بام سازه‌ای

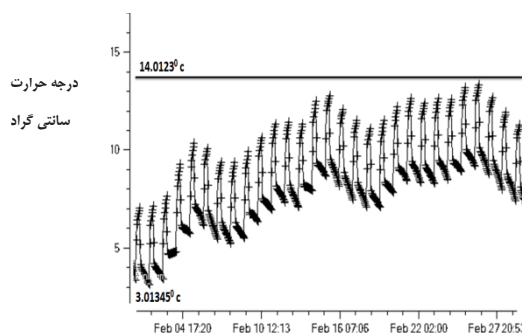


تصویر ۸- نمودار درجه حرارت فضای داخلی مدرسه سبز در فصول مختلف در شرایطی قرارگیری بام سبز هیدروپونیک مدولار بر روی بام سازه‌ای

جهت صحت سنجی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مجدداً شبیه‌سازی دیگری با همین داده‌ها این بار تنها به صورت ماهانه در سردترین ماه سال با دقت عددی بیشتر انجام گرفت که نتایج زیر حاصل شدند.



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



تصویر ۱۰- نمودار درجه حرارت فضای داخلی مدرسه سبز در بهمن‌ماه در شرایطی قرارگیری بام سبز هیدروپونیک مدولار بر روی بام سازه‌ای

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

بحث و نتایج

همان‌طور که مطرح شد، ایده‌ی مدارس سبز با هدف جبران کاستی پوشش سبز در مدارس امروزی شکل گرفته‌است. همچنین طبق مطالعه الدخیل^۱ در سال ۲۰۱۸ بام‌های سبز به عنوان حیاط دوم مدارس یکی از انواع پوشش‌های 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 الخدومی^۲ در سال ۲۰۱۸ و کاراس^۳ در سال ۲۰۱۶ نوع جدید بام‌های سبز که به بام‌های سبز هیدروپونیک معروف می‌باشند؛ نه تنها از نمونه‌های بام‌های سبز معمولی سبک‌تر هستند؛ بلکه این نمونه بام‌ها، پتانسیل بهتری در نگهداری آب دارند (Al-Kodmany & Karras, 2016 2018)؛ از آنجایی که طبق مطالعه منصور^۴ در سال ۲۰۱۴ پیرامون استفاده از بام‌های هیدروپونیک در مدارس سبز، فقدان فقدان انواع بام‌های سبز هیدروپونیک از یک سو باعث عدم بازده حرارتی و بروندی مورد انتظار در مدارس سبز شود و از سوی دیگر

1 Al dakheel
2 Al khodami
3 Karras
4 Mansour

این مدارس را به نمونه‌های یکسان در اقلیم‌هایی با نیازهای حرارتی متفاوت تبدیل کرده است (Mansour, 2014). از این رو پژوهش حاضر به بررسی تفاوت دو نوع بام سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار از نظر مقاومت حرارتی و تاثیر آن‌ها بر دمای محیط داخلی در فصول مختلف در مدارس سبز اقلیم شهر شهرکرد به عنوان سردترین شهر ایران پرداخته است. در این زمینه یافته‌های حاصل از تفاوت مقاومت حرارتی دو نمونه بام سبز هیدروپونیک مدولار و گسترده بر روی مدرسه یادشده متناسب با استاندارد اجرایی آن‌ها نشان دادند که مقاومت حرارتی کل «مجموع مقاومت حرارتی تک تک لایه‌ها در مساحت آن‌ها و مقاومت لایه هوای داخل و خارج»، در بام‌های سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار به ترتیب برابر $۲۶۵۰۶ \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$ و $۷۲۷۲/۶ \text{ w/m}^2 \cdot \text{k}$ می‌باشد؛ از این رو با این که جزئیات لایه‌های هر دو بام مشابه اند، مقاومت حرارتی بام سبز گسترده تقریباً $۳/۶$ برابر بیشتر از مقاومت حرارتی بام سبز مدولار است؛ چراکه در بام‌های سبز هیدروپونیک مدولار محفظه‌های آب‌رسان در اطراف پنل‌های مدولار یکی از عوامل انتقال حرارت از سطح بام به محیط خارج می‌باشند؛ این در حالی است که در سیستم‌های هیدروپونیک گسترده، آب یاری بام به صورت مرکزی بوده و تمامی سطح بام با پوشش‌ها سبز هیدروپونیک عایق می‌شود؛ از این رو این نمونه بام‌ها از نظر مقاومت حرارتی عملکرد بهتری دارند لذا به طور کلی، توان نگه‌داشت حرارت بالاتری و در نتیجه صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی حرارتی در فصول سرد سال خواهد داشت؛ حال آنکه پیرامون داده‌های یک مدرسه سبز ۳۰۰ نفره طبق اطلاعات به دست آمده از روش شبیه‌سازی، چنانچه بام سبز هیدروپونیک گسترده مطابق با اطلاعات مطرح در قسمت روش تحقیق، بر روی بام سازه‌ای مدل مورد نظر قرار گیرد در صورت عدم استفاده از هرگونه تأسیسات گرمایشی و سرمایشی درجه حرارت فضای زیر بام در ماه‌های سرد سال یا انقلاب زمستانی دی و بهمن^{۳۷}، بین ۹ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد و در ماه‌های گرم سال یا انقلاب تابستانی تیر، مرداد و شهریور^{۳۸} بین ۱۸ تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این در حالی است که در حالت استفاده از بام سبز هیدروپونیک مدولار درجه حرارت همان فضا با اطلاعات یکسان به ترتیب ۳۰.۱ 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 این رو به طور کلی درجه حرارت فضای داخلی مدرسه در حالت استفاده از بام سبز هیدروپونیک گسترده بیشتر از بام سبز هیدروپونیک مدولار است ($۳۰.۱ < ۹$) (نمودار ۱ و ۲) به نحوی که در ماه‌های بحرانی «دی و بهمن» شهر یادشده به عنوان سردترین شهر ایران، درجه حرارت فضای زیر بام سبز گسترده تقریباً سه برابر گرم‌تر از همان فضا زیر بام سبز مدولار است که این نتایج نیز حاکی از میزان بیشتر صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی جهت گرم کردن مدرسه است. در ادامه از آنجایی که طبق بررسی‌های هامفریز^{۳۹} در سال ۲۰۱۶ میانگین درجه حرارت تعادل به‌نحوی که انسان در آن احساس آسایش کند بین ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد است (Humphreys, 2018)؛ از این رو نه تنها با استفاده از پوشش بام سبز هیدروپونیک گسترده درجه حرارت فضای داخلی در ماه‌های سرد سال به درجه تعادل 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 حرارتی و بروندی بهتر در فضاهای آموزشی با بار جمعیتی ۳۰۰ نفر و توان تهویه 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 صرفه‌نظر 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 نیم ساعت، نیز درجه حرارت فضای داخلی زیر بام سبز گسترده عدد نزدیک‌تری به شرایط آسایش حرارتی در شرایط یکسان نسبت به بام سبز مدولار است؛ لذا این نمونه بام‌ها از نظر نگه‌داشت حرارت و در نتیجه صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی در شرایط آب و هوایی سرد در مدارس سبز عملکرد حرارتی بهتری دارند این در حالی است که با استفاده از این نمونه بام‌ها در شرایط تابستان نیز درجه حرارت فضای داخلی مدارس سبز در محدوده آسایش باقی می‌ماند؛ لذا به طور کلی با وجود شباهت‌های اجرایی دو نمونه بام سبز هیدروپونیک به دلیل کیفیت نمونه بام سبز هیدروپونیک گسترده این سیستم بامی در مدارس سبز اقلیم سرد از نظر صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی، عملکرد حرارتی بهتری دارند، البته این مورد در صورتی کاملاً صدق خواهد که در این نمونه بام‌ها از گیاهان همیشه سبز استفاده شود و جهت جلوگیری از یخ‌زدگی گیاهان به آن‌ها، مواد خاصی از جمله هورمن‌های گیاهی و یا بازدارنده‌های رشد و یا دی‌اکسید کربن به همراه آب یاری تزریق شوند. در ادامه از آنجایی خروجی داده‌های عددی متناسب با بار جمعیتی، توان تهویه‌ای، روشنایی و تجهیزات الکتریکی فضاهای آموزشی است، صرفاً تفاوت این دو نمونه بام سبز در فضای آموزشی سبز از نظر صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی مورد توجه قرار گرفته شده است؛ لذا جهت بررسی دیگر کاربری‌ها،

مدل‌سازی‌های دیگر متناسب با استانداردهای آن‌ها پیشنهاد می‌شود؛ همچنین از آنجایی که دو نمونه بام سبز هیدروپونیک گسترده و مدولار در مدارس سبز صرفاً در اقلیم سر دو خشک ایران مورد مطالعه قرار گرفتند؛ لذا به منظور سنجش عملکرد این دو نمونه بام سبز در شرایط 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 campus. *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 University Kingston, 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.

- 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 Dobbelen, 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.