

مروری بر مزایا و چالش‌های بام سبز به‌عنوان راهکاری غیرفعال در ساختمان‌ها

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۸

کد مقاله: ۱۴۳۳۵

سهیلا عبدی‌زاده^{۱*}، فرهاد احمدنژاد^۲

چکیده

در دهه اخیر، تحقیقات درباره بام سبز به‌عنوان یکی از راهکارهای غیرفعال سرعت گرفته است که این راهکار در صورت طراحی متناسب با اقلیم قادر به کاهش قابل‌ملاحظه مصرف انرژی خواهد بود. هدف پژوهش حاضر، مروری بر مزایای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مرتبط با بام سبز و همچنین نحوه عملکرد آن در مناطق مختلف است. روش تحقیق در این پژوهش، به‌صورت توصیفی و بر اساس جمع‌آوری از منابع مختلفی نظیر مقالات پژوهشی، کتاب‌ها، مطالعات موردی انجام شد. نتایج حاصل از مطالعه نشان داد که بام سبز نقش مهمی در پایداری و بهبود عملکرد شهرها در برابر تغییرات اقلیمی داشته و در بسیاری از کشورها برای استفاده از این فناوری پاداش‌هایی نیز در نظر گرفته شده است. با این حال، از چالش‌های اصلی مرتبط با بام سبز می‌توان به هزینه بالای ساخت اولیه، هزینه نگهداری بالا و مشکلات نشتی سقف اشاره کرد. بام‌های سبز اصلاح‌شده راهکاری مقرون‌به‌صرفه برای مقابله با این چالش‌ها شناخته شد که می‌تواند متناسب با اقلیم هر منطقه عمل کند. این پژوهش در نهایت با در نظر گرفتن چالش‌ها و شکاف تحقیقاتی، توصیه‌هایی را به منظور عملکرد بهینه بام سبز ارائه داد.

واژگان کلیدی: بام سبز، مزایا، انرژی، صرفه‌جویی، راهکار غیرفعال

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد معماری و انرژی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول)

so.abdizadeh@tabriziau.ac.ir

۲- استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

*- این مقاله مستخرج از پایان‌نامه مقطع کارشناسی‌ارشد سهیلا عبدی‌زاده با عنوان "طراحی خوابگاه دانشجویی دانشگاه هنر اسلامی تبریز با رویکرد تأثیرگذاری راهکارهای غیرفعال بر میزان مصرف انرژی" و با راهنمایی آقای دکتر فرهاد احمدنژاد در گروه معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز انجام شده است.

۱- مقدمه

افزایش شهرنشینی به دلیل رشد سریع اقتصادی منجر به تخریب محیط زیست و تغییرات اقلیمی شده است (Addai, Serener and Kirikkaleli, 2022). این مشکلات با به کارگیری راهکارهای جدید نظیر باغ‌های بارانی، بام‌ها و دیوارهای سبز می‌تواند اثرات نامطلوب شهرنشینی را کاهش داده و به بهبود اقلیم مناطق کمک کند (He et al, 2020). بام‌های سبز با عناوین مختلفی همچون بام‌های گیاهی، بام‌های خنک، بام‌های اکولوژیکی، باغ‌بام یا بام‌های زنده شناخته می‌شوند. بام‌های سبز، سقف‌هایی با انواع پوشش گیاهی هستند که باتوجه به مزایای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی طراحی شده و از اجزای متعددی نظیر لایه پوشش گیاهی، محیط کشت، لایه فیلتر، مواد زهکشی، عایق، لایه مانع ریشه و غشاء ضد آب تشکیل شده‌اند. انتخاب بهینه هر یک از اجزا برای ارتقای عملکرد بام سبز ضرورت دارد. بر اساس مطالعات گسترده انجام شده در مناطق مختلف جهان، بام‌ها در میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کنند؛ لذا یکی از رویکردهای مهم جهت ساخت ساختمان‌هایی که منجر به صرفه‌جویی در انرژی می‌شوند، استفاده از بام سبز و پوشش گیاهی مناسب است. از طرفی، قابلیت بام سبز در کاهش مصرف انرژی باتوجه به شرایط اقلیمی هر منطقه متفاوت است. برای همین منظور، تمام شاخص‌های مؤثر بر عملکرد حرارتی بام سبز بایستی با شرایط اقلیمی منطقه مطابقت داشته باشد (Scolaro and Ghisi, 2022).

پژوهش حاضر با روش توصیفی، ضمن آشنایی با فناوری بام سبز، در نظر دارد با مروری بر مزایای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مرتبط با بام سبز به بررسی چالش‌ها و شکاف تحقیقاتی موجود پرداخته و راهکارهایی را جهت مقابله با این چالش‌ها به منظور عملکرد بهینه بام سبز ارائه دهد.

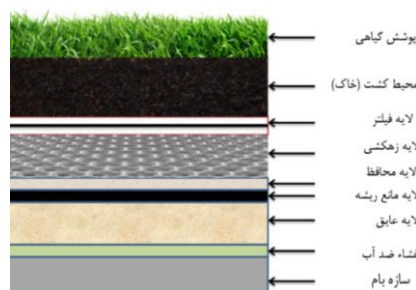
۲- مبانی نظری

۲-۱- مفهوم بام سبز

بام‌های سبز به‌عنوان تکنیکی جدید در ساختمان‌های سبز، از یک لایه پوشش گیاهی با لایه‌های دیگر بر روی سقف ساختمان تشکیل می‌شوند (Wang et al, 2021). ساختمان‌های سبز در مفهوم وسیع‌تر به ساختمان‌هایی اطلاق می‌شود که با هدف کمک به سلامت بشر و به کارگیری هوشمندانه از منابع طبیعی طراحی، بهره‌برداری و استفاده مجدد می‌شوند و همچنین اثرات منفی بر محیط زیست را کاهش داده و تابع استانداردهای بین‌المللی خاصی هستند. مهم‌ترین علل ساخت این گونه ساختمان‌ها، دستیابی به توسعه پایدار، کاهش تولید کربن دی‌اکسید و آلودگی کمتر هوا و هزینه پایین‌تر در مصرف انرژی نسبت به ساختمان‌های سنتی می‌باشد (Allen et al, 2015).

۲-۲- انواع بام سبز و اجزای آن

طبقه‌بندی‌های متفاوتی از بام‌های سبز وجود دارد که بر اساس عمق محیط کشت، پوشش گیاهی، چگالی و نحوه استفاده از آن متفاوت است. به‌طور کلی، بام‌های سبز به چهار دسته فشرده، نیمه فشرده، گسترده تک‌لایه و گسترده چندلایه تقسیم می‌شوند. بام‌های سبز فشرده به دلیل عمق زیاد خاک (بیشتر از ۱۲ اینچ)، دارای ظرفیت نگهداری آب بالایی بوده و انتخاب گیاه می‌تواند شامل طیف گسترده‌ای از درختان و درختچه‌های کوچک باشد؛ در نتیجه این امر، سازه متحمل وزن زیادی می‌شود که مستلزم توجه طراحان است. بام‌های سبز نیمه فشرده با ضخامت محیط کشت متوسط (۱۲-۶ اینچ)، معمولاً دارای گیاهان و درختچه‌های کوچک و چمن هستند که برای عملکرد بهتر نیاز به نگهداری منظم و هزینه اولیه بالایی دارند. ضخامت بام‌های سبز گسترده تک‌لایه نیز بین ۳-۴ اینچ بوده و از گیاه سدوم^۱ به‌عنوان پوشش گیاهی استفاده می‌شود که معمولاً نیازی به آبیاری نداشته و در مقایسه با سایر بام‌ها به سرمایه و هزینه نگهداری کمی نیاز دارد. از لحاظ سازه‌ای نیز به دلیل وزن بسیار سبک، محدودیتی ندارند. بام‌های سبز گسترده چندلایه با ضخامت محیط کشت ۴-۶ اینچ، سبک‌وزن هستند که بیشتر در ایالات متحده استفاده می‌شوند. باتوجه به آنچه گفته شد، بام‌های سبز گسترده (تک‌لایه و چندلایه) به دلیل وزن کمتر، عدم نیاز به آبیاری و هزینه ساخت و نگهداری کمتر از رایج‌ترین نمونه‌های بام سبز در سراسر جهان محسوب می‌شوند (Scolaro and Ghisi, 2022). بام‌های سبز از نظر ساختاری به‌منظور کاهش اثرات نامطلوب شهرنشینی طراحی شده‌اند.



شکل ۱- اجزا و لایه‌های تشکیل‌دهنده بام سبز

اجزای بام سبز باتوجه به مکان آن متفاوت است (شکل ۱). انتخاب صحیح هر لایه باتوجه به موقعیت و شرایط اقلیمی به جهت مزایای زیست محیطی در بلندمدت ضروری دارد.

۱-۲-۲- نوع پوشش گیاهی

انتخاب لایه گیاهی، حیاتی ترین بخش در توسعه و به حداکثر رساندن عمر بام سبز است که در این بین، سلامت گیاه در اجرای موفق آن نقش اساسی دارد. بر اساس مطالعات عواملی همچون موقعیت جغرافیایی، شدت بارندگی، رطوبت، باد و نور خورشید در انتخاب گیاه مؤثرند. بسیاری از محققان به بررسی گونه های گیاهی بر اساس عمق خاک پرداخته اند؛ چراکه عمق محیط کشت می تواند بر انتخاب گونه گیاهی متناسب با بام سبز اثرگذار باشد. در این راستا، مبشری (۲۰۱۴) باتوجه به خاک مورد استفاده، نوع پوشش گیاهی را ارائه کرد که در جدول ۱ نشان داده شده است (Mobasheri, 2014).

جدول ۱- انواع گونه های گیاهی متناسب با عمق محیط کشت

عمق محیط کشت (خاک)	نوع پوشش گیاهی
۵-۰ سانتی متر	خزه ها و گل سنگ ها
۵-۱۰ سانتی متر	علفزارهای کوتاه خودرو با عمر بالا، مقاوم به خشکی، گیاهان چند ساله، چمن، گیاهان ریشه دار کوچک روینده در ارتفاعات زیاد
۱۰-۲۰ سانتی متر	ترکیبی از گیاهان چند ساله با عمر کم یا متوسط، چمن، گیاهان ریشه دار یک ساله از مناطق خشک، گل های خودرو و نیم بته های مقاوم

پوشش گیاهی در بام سبز از عوامل مؤثر برای بهبود کیفیت هوا، رواناب و نیز کاهش گرما در یک منطقه است (Romali, Ardzu and Suzany, 2023). باین حال، باید توجه داشت که پشت بام، فضایی طبیعی برای رشد گیاه نیست؛ چراکه آب همواره عاملی محدودکننده برای این فضاهاست. به علاوه، محدودیت در بار ساختمان بر عمق محیط کشت مؤثر است. با در نظر گرفتن تمام عوامل ذکر شده، پوشش گیاهی بهینه برای بام های سبز دارای ویژگی هایی است که در جدول ۲ ارائه شده است (Zhang et al, 2022).

جدول ۲- ویژگی های پوشش گیاهی بهینه برای بام سبز

مقاومت در برابر خشکسالی و آب و هوای نامطلوب	دارای ریشه های کوتاه و نرم	تبخیر و تعرق بیشتر
در دسترس و مقرون به صرفه	بقا در شرایطی با حداقل مواد مغذی	قابلیت کاهش جزیره گرمایی
عدم نیاز به آبیاری منظم	هزینه نگهداری کمتر	سرعت تکثیر بالا

بدیهی است که گیاهان نمی توانند تمامی ویژگی های فوق را به صورت یکجا داشته باشند. برای همین، مطالعاتی در خصوص انتخاب پوشش گیاهی مناسب انجام شده است. در این راستا، گونه های سدوم از محبوب ترین پوشش های گیاهی محسوب می شوند که در اقلیم های مختلف عملکرد خوبی از خود نشان داده اند و می توانند بدون آبیاری به مدت طولانی تری مقاومت کنند (Gong et al, 2021).

دورمن^۱ و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه ای نشان دادند که گونه مذکور حتی پس از یک دوره چهار ماهه نیز بدون آبیاری قادر به متابولیسم هستند (Durhman, Rowe and Rugh, 2006). باتوجه به این ویژگی، گونه سدوم در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته و روی بام هایی با عمق کشت کم نیز موفق عمل کرده است (Gong et al, 2021). در این راستا، گتیر و روو^۲ (۲۰۰۸) چندین نوع از این گونه گیاهی را مطالعه کرده و به این نتیجه رسیدند که عمق کشت ۷ سانتی متر برای رشد و عملکرد گیاه کفایت می کند. به دلیل در دسترس نبودن گونه سدوم در اکثر نقاط جهان، بایستی گیاهان بومی مناسبی به منظور ارتقای عملکرد بام های سبز شناسایی شوند (Getter and Rowe, 2008). برای این منظور بلانوسا^۳ و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه ای نشان دادند که گیاه سنبله نقره ای^۴ از قابلیت خنک کنندگی زیادی برخوردار است. باین حال، مطالعات حاکی از این است که پوشش گیاهی بومی به دلیل اینکه قبلاً با شرایط اقلیمی محلی سازگار شده اند و به راحتی در دسترس هستند، گزینه ای مناسب برای استفاده در بام های سبز محسوب می شوند (Blanusa et al, 2013). شوائتز و ارل^۵ (۲۰۱۴) چهار گونه گیاهی بومی را برای استفاده در بام های سبز در شرایط اقلیمی مختلف بررسی کردند. نتایج حاکی از این بود که گل ناز یخی^۶ در شرایط خشکسالی بهترین گونه محسوب می شود (Schweitzer and Erell, 2014). مونتروسو^۷ و همکاران (۲۰۰۵) با بررسی ۱۸ گونه بومی در

- 1- Durhman
- 2- Getter & Rowe
- 3- Blanusa
- 4- Stachys byzantine
- 5- Schweitzer & Erell
- 6- Aptenia cordi folia
- 7- Monterusso

میشیگان به این نتیجه رسیدند که صرفاً چهار گونه توانایی زنده ماندن در شرایط بدون آبیاری را دارند (Monterusso, Rowe and Rugh, 2005). با این حال، تحقیقات بیشتری در مورد انتخاب گونه‌های گیاهی بومی برای استفاده در بام‌های سبز مورد نیاز است تا کیفیت آب و همچنین اکوسیستم را بهبود بخشد.

۲-۲-۲- محیط کشت

محیط کشت را می‌توان لایه بحرانی نامید؛ چرا که مستقیماً بر رشد گیاه تأثیرگذار بوده و موفقیت بام سبز در طولانی‌مدت با این لایه مرتبط است. این لایه باید دارای خواص منحصربه‌فردی نظیر وزن سبک و نسبت بالایی از مواد معدنی باشد. پر واضح است که یک محیط کشت نمی‌تواند تمامی ویژگی‌های مطلوب را دارا باشد، لذا روش بهینه، ترکیب اجزای مختلف در این لایه است. مواد مختلف کم‌هزینه و سبک مانند پوکه، زئولیت، پوکه سنگ، ورمیکولیت، پرلیت، خاک گیاهی، آجر خرد شده می‌توانند در زیرلایه قرار بگیرند. همچنین، مواد زائد بومی نیز می‌تواند بام سبز را مقرون‌به‌صرفه کند (Vijayaraghavan and Raja, 2015). با این حال، مواد زائد بومی منجر به معایبی می‌شوند که می‌توان به مواردی نظیر زمان ماند آب، وزن افزایش یافته (فروپاشی ساختار سقف)، ترویج رشد علف‌های هرز بومی، از بین بردن مواد مغذی مورد نیاز برای رشد گیاه و سهولت در سخت شدن اشاره کرد. از این رو، استفاده ۱۰۰ درصدی از این مواد پیشنهاد نمی‌شود و باید با مواد معدنی با چگالی کمتر ترکیب گردند. ترکیبات ارگانیک موجود در لایه محیط کشت؛ مانند خاکاره، خاک گیاهی، برای تأمین مواد مغذی بام سبز ضروری بوده و بر کیفیت رواناب مؤثرند (Vijayaraghavan, 2016)؛ لذا دستورالعمل آلمانی^۱ پیشنهاد می‌کند که محیط کشت برای بام سبز گسترده ۸-۴ درصد و برای بام سبز فشرده ۱۲-۶ درصد دارای مواد معدنی باشد (LOSKEN, 2008). این لایه از بام سبز باید دارای ظرفیت نگهداری آب^۲ بالایی باشد تا جریان رواناب را کاهش داده و به مقاومت گیاهان در زمان خشکسالی کمک کند. این امر، از طریق افزایش حجم و عمق لایه کشت امکان‌پذیر است.

در این راستا، کائو^۳ و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای استفاده از بیوجار به عنوان ماده افزودنی، برای به حداکثر رساندن ظرفیت نگهداری آب در محیط کشت استفاده کردند. نتایج آن‌ها بیانگر افزایش ظرفیت نگهداری آب در صورت استفاده از بیوجار بود (Cao et al, 2014). دستورالعمل آلمانی مقدار WHC بیشتر از ۲۰ درصد را برای بام‌های سبز به منظور کاهش رواناب و بهبود آب موجود در گیاه پیشنهاد می‌کند (LOSKEN, 2008). همچنین، مطالعات حاکی از این است که محیط کشت برای جلوگیری از نشست بام و کمک به جریان مداوم آب در هنگام بارندگی باید دارای تخلخل بالایی باشد. سایر ویژگی‌های یک محیط کشت ایده‌آل در جدول ۳ به طور خلاصه بیان شده است (Vijayaraghavan, 2016).

جدول ۳- ویژگی‌های یک محیط کشت ایده‌آل

پایداری بالا در شرایط مختلف	مقرون‌به‌صرفه	سبک وزن
پشتیبانی از طیف گسترده‌ای از گیاهان	ظرفیت بالایی نگهداری آب	حاوی حداقل محتوای ارگانیک
کمک به افزایش کیفیت آب	هدایت هیدرولیکی بالا	خاصیت تهویه مطلوب
شستشوی کمتر و ظرفیت جذب بالا	سهولت دسترسی	

۲-۲-۳- لایه فیلتر

یک لایه فیلتر در بام سبز برای جداسازی محیط کشت از لایه زهکشی و جلوگیری از ورود ذرات کوچک‌تر مانند خاک‌های ریز، بقایای گیاهی و مسدود شدن لایه زهکشی استفاده می‌شود. این پارچه‌ها که به ژئوتکستایل معروف‌اند، برای تأمین جریان بهتر آب در لایه زهکشی مورد استفاده واقع شده و همچنین دارای مقاومت کششی زیاد و نفوذپذیری بالایی آب هستند و به عنوان یک غشای مانع ریشه عمل می‌کنند. وونگ و جیم^۴ (۲۰۱۴) با بررسی عملکرد لایه فیلتر نشان دادند که این لایه تقریباً ۱/۵ لیتر آب در مترمربع را جذب می‌کند (Wong and Jim, 2014). به علاوه در مطالعه‌ای دیگر لیچ و لوند هولم^۵ (۲۰۰۶) بیان کردند که پارچه ضخیم‌تر تقریباً ۳۰۰ درصد بیشتر از بام‌های سبز فاقد لایه فیلتر، آب باران را در خود نگه می‌دارد؛ لذا، انتخاب پارچه فیلتر مناسب برای افزایش عملکرد بام سبز ضرورت دارد (Licht and Lundholm, 2006).

۲-۲-۴- لایه عایق

لایه عایق یک لایه اختیاری در هر سقفی است. این لایه از هدررفت گرما در زمستان و نیز اتلاف هوای خنک در تابستان از طریق ذخیره آب در سیستم بام سبز جلوگیری می‌کند. هنگام اعمال بام‌های سبز روی سقف‌های موجود در پروژه‌های مقاوم‌سازی، عایق بیشتری مورد نیاز است. این لایه در بالایی عایق رطوبتی اجرا می‌شود تا غشا را از تراکم و آسیب فیزیکی بیشتر حفظ کند.

1- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL)

2- water holding capacity (WHC)

3- Cao

4- Wong & Jim

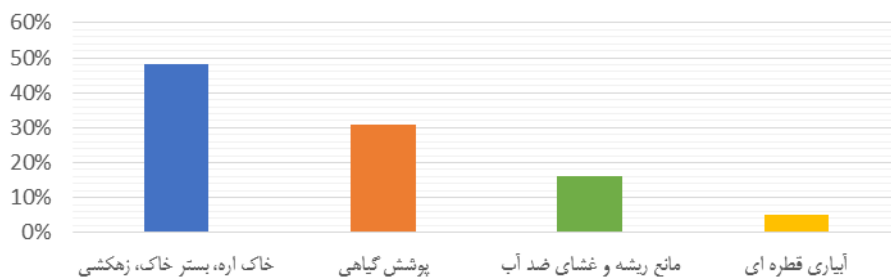
5- Licht & Lundholm

۵-۲-۲- لایه زهکشی

لایه زهکشی به لحاظ امکان حذف آب اضافی از محیط کشت برای بام‌های سبز اهمیت بالایی دارد. چراکه از این طریق بار وارده به ساختمان کاهش یافته و احتمال ریزش سازه به حداقل می‌رسد. همچنین، می‌تواند از غشاه ضد آب حفاظت کرده و بهره‌وری انرژی ساختمان را بهبود بخشد. این لایه در دو نوع اصلی پانل‌های مدولار زهکشی (پلی‌اتیلن یا پلی‌استایرن) و مواد دانه‌ای زهکشی (سنگ‌دانه‌های رس منبسط‌شده سبک (لیکا)، شیل منبسط‌شده، خرده‌های آجر، شن درشت و خرده‌سنگ) وجود دارد. بسیاری از محققان عملکرد انواع مختلف لایه‌های زهکشی را در بام‌های سبز بررسی کرده‌اند. در این راستا، پرز^۱ و همکاران (۲۰۱۲)، آزمایشاتی را برای بررسی رفتار حرارتی بام‌های سبز گسترده با استفاده از خرده‌های لاستیکی به‌عنوان مواد لایه زهکشی انجام دادند که نتایج بیانگر رفتار حرارتی بهینه لاستیک در مقایسه با سقف مرجع بود (Pérez et al, 2012). مطالعه دیگری توسط وونگ و جیم (۲۰۱۴) انجام یافت که در آن از لایه زهکشی جدیدی استفاده کردند که توانایی ذخیره آب تا ۴/۳ لیتر بر مترمربع را نشان داد. بزرگ‌ترین چالش برای لایه زهکشی هزینه و دفع این لایه است (Wong and Jim, 2014). از این‌رو، تحقیقات بیشتری برای انتخاب لایه زهکشی مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست مورد نیاز است.

۶-۲-۲- غشاه ضد آب و لایه‌های مانع ریشه

در بام سبز، به دلیل مرطوب بودن خاک و رطوبت زیاد، احتمال نشتی افزایش می‌یابد؛ لذا اجرای غشاه ضد آب ضرورت دارد که شامل ورق‌های قیر اصلاح‌شده، غشاهای کاربردی مایع، غشاهای ورقه‌ای تک‌لایه سیستم‌های سیمان پلیمری و غشاهای ترموپلاستیک هستند. لازم به ذکر است که انتخاب لایه عایق رطوبتی بهینه، عمر بام سبز را افزایش می‌دهد. لایه مانع ریشه در بام سبز به‌منظور محافظت ساختار بام از ریشه گیاهان اجرا می‌شود که در صورت نبود این لایه، ریشه از ساختار بام بیرون آمده و کل ساختار بام سبز را مختل می‌کند. از رایج‌ترین موانع ریشه می‌توان به ورق‌های پلی‌اتیلن نازک اشاره کرد. انجام مطالعات در رابطه با سازگاری مانع ریشه با غشاه ضد آب با اهمیت بوده و می‌تواند در شرایط اقلیمی مختلف عملکرد خوبی داشته باشد. از آنجایی که اجزای بام سبز گسترده نسبت به بام سبز فشرده دارای وزن سبک و محیط کشت متوسط است، از این‌رو، محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری برای آن آسان‌تر است. مهم‌ترین قسمت بام سبز گسترده، انتخاب بستر مناسب خاک و لایه‌های زهکشی است که حداکثر هزینه مورد نیاز برای تهیه خاک‌اره (۲۰ میلی‌متر)، بستر خاک (۱۰۰ میلی‌متر) و زهکشی (۱۰ میلی‌متر) ۴۸ درصد از کل هزینه مورد نیاز می‌باشد. پوشش گیاهی مطلوب ۳۱ درصد، لایه مانع ریشه و غشاه ضد آب ۱۶ درصد و آبیاری قطره‌ای ۵ درصد از هزینه کل را به خود اختصاص داده‌اند که در نمودار ۱ به تفکیک ارائه شده است. این هزینه‌ها متأثر از نوع پروژه (ساخت جدید یا پروژه مقاوم‌سازی)، نیازهای آبیاری، شیب بام سبز و عمق رشد و غیره است که در صورت استفاده از گیاه بومی مناسب و بستر محلی برای سقف گسترده، هزینه را می‌توان به حداقل رساند (Wang et al, 2023).



نمودار ۱- تفکیک هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای بام سبز گسترده

۳-۲- مزایای بام سبز

۱-۲-۳- کاهش رواناب

بام‌های سبز بهترین راهکار برای مدیریت رواناب بوده و از احتمال وقوع سیل در مناطق شهری می‌کاهند؛ چراکه لایه‌های بستر و پوشش گیاهی با افزایش تبخیر و تعرق، توانایی ذخیره مقدار زیادی از آب را دارند. کاهش رواناب به عوامل زیادی از جمله نوع پوشش گیاهی، ضخامت محیط کشت، نوع مواد زهکشی، شدت بارندگی و شیب بام سبز بستگی دارد. مهم‌ترین قسمت زیرلایه بام سبز است و باید ظرفیت نگهداری رطوبت بالایی برای ذخیره آب باران داشته باشد. در این راستا، لیو و لی^۲ (۲۰۱۷) عملکرد بام سبز را برای کنترل رواناب ناشی از بارندگی در دانشگاه دیکین استرالیا بررسی کردند. نتایج نشان داد که بام‌های سبز در کاهش سیلاب‌های ناگهانی شهری بسیار مفید هستند (Liu, Li Y and Li J, 2017). در مطالعه دیگری، ژانگ^۳ و همکاران

1- Pérez

2- Liu & Li

3- Zhang

(۲۰۱۵) ظرفیت نگهداشت آب باران را با استفاده از بام سبز در چونگ کینگ، چین بررسی کردند. بررسی ۱۹ رویداد بارندگی نشان داد که بام سبز، رواناب را به طور متوسط ۷۷٫۲ درصد در خود ذخیره کرده است. این امر نشان می‌دهد که بام سبز راه‌حل مناسبی برای مدیریت رواناب در مناطق شهری است (Zhang et al, 2015).

۲-۳-۲- افزایش کیفیت آب

بام‌های سبز بهترین روش برای کنترل رواناب و بهبود کیفیت آب هستند. زیرلایه بام سبز و لایه‌های پوشش گیاهی، نقش مهمی در کاهش رواناب و جذب آلاینده‌های مختلف از آب باران دارند. بدین صورت که زیرلایه، آلاینده‌ها و فلزات سنگین را از آب باران جذب کرده و کیفیت آب را افزایش می‌دهد. برندتسون^۱ (۲۰۱۰) در چندین مطالعه به بررسی کیفیت آب بام سبز پرداخت و نشان داد که درصد فلزات سنگین در رواناب شهری به طور قابل توجهی بیشتر از رواناب بام سبز است. نسبت فلزات سنگین و نیتروژن حاصل از رواناب بام سبز به نوع بستر، کود مصرفی و عمر بام سبز بستگی دارد و عواملی نظیر نوع گیاه، و بستر، شدت باران، کیفیت مکان از نظر آلودگی، نوع بام سبز (فشرده یا گسترده) و عمر آن، نوع لایه زهکشی، کودها و مواد معدنی مورد استفاده در بستر برای افزایش کیفیت رواناب از بام‌های سبز بسیار مهم هستند (Berndtsson, 2010).

۲-۳-۳- بهبود محیط‌زیست و کاهش مصرف انرژی

دو کارکرد مهم بام سبز در مناطق شهری، کاهش دمای سطح و آسایش حرارتی است. این بام‌ها با افزایش مقاومت حرارتی سقف، باعث خنک شدن ساختمان در تابستان و کاهش هزینه‌های مربوط به مصرف انرژی می‌شوند. علاوه بر این، با جذب کمتر تشعشعات خورشیدی توسط پوشش گیاهی و بستر سبز بام نسبت به انواع دیگر سقف‌ها، در هزینه سرمایش نیز صرفه‌جویی می‌شود. چندین مطالعه عملکرد بام سبز در منطقه شهری را برای کاهش پدیده جزیره گرمایی مورد بحث قرار داده‌اند. در این راستا، هی^۲ و همکاران (۲۰۱۷) عملکرد حرارتی بام سبز را با پیشنهاد دو شاخص جدید به نام‌های شاخص عایق و تنظیم دما بررسی کردند. مشخص شد که با وجود تغییرات کم در ضریب عایق، شاخص تنظیم دما در فصول مختلف دارای تغییرات زیادی است. این امر بیانگر اثر سرمایشی قوی‌تر بام سبز در تابستان نسبت به زمستان در شهر شانگهای چین است (He et al, 2017). مطالعه دیگری با استفاده از شبیه‌سازی توسط انرژی پلاس^۳ و انویمت^۴ مزایای حرارتی بام سبز در مناطق شهری را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که بام سبز در کاهش دمای سطح و مصرف انرژی ساختمان در مناطق شهری عملکرد مطلوبی دارد (Morakinyo et al, 2017).

یوم و لاروچ^۵ (۲۰۱۷) پتانسیل سرمایشی در ادغام بام سبز به یک سیستم خنک‌کننده تابشی را در جنوب کالیفرنیا بررسی کرده و نشان دادند که عملکرد بام سبز با این سیستم در خنک‌سازی دمای داخلی بهتر از سایر اتاق‌ها است. این مطالعه اثبات کرد که بام سبز روشی بسیار مفید برای کنترل دمای داخلی ساختمان است (Yeom and LaRoche, 2017). نتایج تحقیقات کارتریس^۶ و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که بام سبز قابلیت کاهش مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی را به ترتیب به میزان ۵ و ۱۶ درصد دارد که این امر به کاهش هزینه مصرف انرژی در ساختمان‌های شهری کمک می‌کند (Karteris et al, 2016). عبادتی و احيایی (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای با بررسی سه اقلیم مختلف در شهرهای تهران، تبریز و بندرعباس به این نتیجه رسیدند که ادغام بام سبز منجر به کاهش میزان نیاز به برق جهت تأمین سرمایش و گرمایش در ساختمانی دوطبقه به ترتیب به میزان ۱۶٫۳، ۱۲٫۵ و ۲۳ درصد در مقایسه با سقفی با پوشش آسفالت می‌شود (Ebadati and Ehyaei, 2020). هی و همکاران (۲۰۱۸) در مقاله‌ای به ارزیابی عملکرد حرارتی نوع جدیدی از بام سبز در پنج منطقه آب‌وهوایی چین پرداختند. بر اساس نتایج، میزان تأثیر نسبت آب و ضخامت خاک در زمستان و تابستان متفاوت است. بام سبز جدید قادر به کاهش دمای سطح داخلی در تابستان و افزایش دمای سطح در زمستان است. ضخامت خاک در تابستان و شاخص سطح برگ نیز مؤثر بود (He et al, 2018). محمودزاده و موخوپادها^۷ (۲۰۱۹) نیز در مقاله‌ای اثرات بام‌های سبز گسترده را بر عملکرد انرژی ساختمان‌های مدارس در چهار اقلیم آمریکای شمالی تحلیل کردند. عوامل متعددی از جمله شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه، ضخامت عایق حرارتی و میزان رطوبت خاک به عنوان متغیرهای طراحی که مرتبط با شرایط اقلیمی هر منطقه بودند، مورد بررسی واقع شدند. نتایج نشان داد که بار سرمایشی با افزایش ارتفاع گیاه در همه شهرها زمانی که شاخص سطح برگ بالا برود کاهش می‌یافت و در مقابل بار گرمایشی با ارتفاع گیاه افزایش پیدا می‌کرد (Mahmoodzadeh and Mukhopadhyaya, 2019). باتوجه به آنچه گفته شد می‌توان استنتاج کرد که صرفه‌جویی در مصرف انرژی از طریق بام‌های سبز به عوامل زیادی مانند عمق و ترکیب زیرلایه، شرایط اقلیمی، نوع بام سبز،

1- Berndtsson
2- He
3- EnergyPlus
4- ENVI-met
5- Yeom & LaRoche
6- Karteris
7- Mukhopadhyaya

پوشش گیاهی، عایق و آبیاری بستگی دارد؛ لذا، مطالعه انواع مختلف گیاهان و تأثیر تغییرات فصلی بر کاهش دمای بام سبز در مکان‌های مختلف توصیه می‌شود.

۳-۴- تصفیه هوای شهری

در مناطق شهری، هوا معمولاً حاوی گردوغبار است که باعث عدم آسایش شهروندان می‌گردد. بام سبز توانایی جذب این ریزگردها را دارد؛ به طوری که می‌تواند به دو روش جذب آلاینده‌ها توسط گیاهان و همچنین کاهش دمای سطح و در نتیجه کاهش نیاز به سوخت‌های فسیلی به رفع آلودگی هوا و آسایش انسان در مناطق شهری کمک کند. برخی تحقیقات نشان داده‌اند که بام‌های سبز، ریزش گردوغبار را تا ۱۰۰ میلی گرم بر متر کاهش می‌دهند. مطالعه‌ای در چین نشان داد که گونه‌های درختی ۸۷ درصد، درختچه‌ها ۱۱/۳ درصد و چمن‌زارها ۱/۷ درصد از گردوغبار موجود در هوا را جذب می‌کنند؛ لذا درختان و بام‌های سبز فشرده توانایی بیشتری در جذب آلاینده‌های هوا دارند (Zhao, Li and Yan, 2002).

۳-۵- کاهش آلودگی صوتی

یکی دیگر از مزایای بام سبز کاهش سطح صدا در مقایسه با سایر سقف‌ها است. باین‌حال، مطالعات کمی برای ارزیابی کاهش نویز از بام سبز انجام شده است. نی^۱ (۲۰۰۶) تأثیر بام سبز را بر کاهش سطح نوفه بررسی کرده و نشان داد که گیاهان قابلیت کاهش سطح صدا را دارند (Ni, 2006). در مطالعه‌ای دیگر، کانلی و هاجسون^۲ (۲۰۱۳) بام‌های سبز را بام‌های بدون پوشش گیاهی در این زمینه بررسی کردند. نتایج نشان داد که بام‌های سبز در مقایسه با سقف‌های بدون پوشش گیاهی توانایی جذب امواج صوتی و کاهش سطح صدا را به میزان ۱۰ و ۲۰ دسی‌بل دارند (Connelly and Hodgson, 2013). همچنین، پنگ و جیم^۳ (۲۰۱۳) با انجام آزمایش‌های میدانی به بررسی عملکرد بام سبز در کاهش صدا در مناطق شهری پرداختند. نتایج حاکی از این بود که لایه پوشش گیاهی بام سبز به علت ضریب جذب بالا در کاهش صدا عملکرد مطلوبی دارد (Peng and Jim, 2013).

۳-۶- مزایای زیست‌محیطی

بام‌های سبز چشم‌انداز طبیعی مناطق و همچنین زیست‌بوم را بهبود می‌بخشند. در این راستا، پنگ و جیم^۳ (۲۰۱۳) نشان دادند که بام‌های سبز نقش مهمی در ارتقای اکولوژی و کاهش از بین رفتن زیستگاه در مناطق شهری دارند، باین‌حال اندازه‌گیری آن در مناطق شهری امری دشوار است. بام‌های سبز مروج فعالیت‌های تفریحی بوده و با تبدیل سطوح غیرقابل نفوذ ساختمان‌ها به مناطق سبز طبیعی، می‌تواند مزایای زیست‌محیطی بیشتری در مناطق شهری داشته باشد (Peng and Jim, 2013).

۳-۷- مزایای اجتماعی

بام‌های سبز با کاهش آلودگی هوا و صوتی، تأثیر خوشایندی بر ساکنان داشته و باعث رهایی شهر از ساخت‌وساز بتنی می‌شوند (Ni, 2006). فضاهای باز سبز با تشویق مردم به باغبانی در بام، منجر به ارتباط افراد شده، فرصت‌هایی را برای کشاورزی شهری ایجاد کرده و ارزش ملک را نیز افزایش می‌دهد. با ایجاد کشاورزی شهری، افراد می‌توانند سبزیجات مختلف را تولید کرده و نیاز جامعه به تولید مواد غذایی را رفع کنند. در این راستا، ویتینگهیل^۴ و همکاران (۲۰۱۳) در میشیگان با کاشت گوجه‌فرنگی، لوبیاسبز، خیار، فلفل، ریحان و پیازچه در بام سبز نشان دادند که تمامی گیاهان به جز فلفل دارای عملکرد مطلوبی برای تولید غذا از بام سبز هستند. همچنین نتایج نشان داد که با انتخاب مناسب نوع سبزی و مدیریت صحیح در یک بام سبز، می‌توان به تولید مواد غذایی بیشتر دست‌یافت (Whittinghill, Rowe and Cregg, 2013).

۳-۸- مزایای اقتصادی

هزینه بام سبز توسط عوامل مختلفی مانند انتخاب سیستم بام سبز و نوع پوشش گیاهی و لایه‌های عایق رطوبتی تعیین می‌شود. مطالعات حاکی از صرفه اقتصادی بام سبز در صورت طراحی صحیح است. در ساختمان‌های قدیمی که عایق کمتری دارند استفاده از بام سبز می‌تواند راهکاری مطلوب در مقاوم‌سازی بنا باشد و انرژی مصرفی برای گرمایش و سرمایش را کاهش دهد. علاوه بر این، بام‌های سبز ارزش ملک و زیبایی‌شناختی ساختمان را افزایش داده و بر طول عمر سقف می‌افزایند (Cristiano, Deidda and Viola, 2021). همچنین، میزان بارش در برآورد هزینه‌ها مؤثر است. به عنوان مثال، عملکرد بام‌های سبز در شهرهای جنوب اروپا به دلیل میزان بارندگی کم نسبت به اروپای شمالی (لندن، آمستردام و اسلو) که در آن مقدار بارندگی زیاد است، بهینه نمی‌باشد (Ascione et al, 2013).

1-Ni

2- Connelly & Hodgson

3- Peng & Jim

4- Whittinghill

باتوجه به مزایای متعدد مطرح شده برای بام‌های سبز، کشورهای زیادی قوانین و سیاست‌های تشویقی مستقیم یا غیرمستقیمی برای کاربران در جهت استفاده از این فناوری اتخاذ کرده‌اند که این سیاست‌ها شامل مشوق‌های مالی و یا کاهش هزینه آب می‌شود. اخیراً، اصلاحات و جایگزین‌های جدید بر روی بام‌های سبز، کاربرد این بام را در مناطق مختلف جهان تقویت کرده است. سقف آبی سبز^۱، شکل اصلاح شده‌ای از بام سبز است که توسط کشور کره معرفی شده است. این بام با دارابودن یک‌لایه اضافی از قابلیت ذخیره آب بیشتری برخوردار بوده و از ایجاد سیل ناگهانی در شهر جلوگیری می‌کند (Shafique, Lee and Kim, 2016). بام‌های سبز هیبریدی فتوولتائیک^۲ نوع دیگری از بام سبز است که در آن پانل‌های PV با سایه زنی و کاهش تابش نور خورشید به بام سبز کمک کرده و بازده الکتریکی را بهبود می‌بخشد (Kaiser et al, 2014).

۳- مشکلات و چالش‌های بام سبز

با وجود مزایای زیاد بام‌های سبز که بخش‌های قبل بدان اشاره شد، چالش‌هایی نظیر هزینه اولیه بالا، ناآگاهی از نحوه ساخت، هزینه‌های نگهداری و غیره استفاده از آن‌ها را در کشورهای توسعه‌نیافته محدود می‌کند. در این میان طراحی بهینه بام سبز باتوجه به اقلیم‌های متنوع، چالشی بزرگ است. بدین صورت که انتخاب گیاه در اقلیم سرد نیاز به توجه بیشتر داشته و در اقلیم گرم نیاز به انتخاب گیاه مناسب برای عملکرد بهتر بام سبز در فصل تابستان وجود دارد. ویژگی‌های بام سبز به عوامل متعددی از جمله هزینه بالای ساخت‌وساز اولیه (وابسته به مکان، هزینه نیروی کار، نوع و متریکال بام سبز)، کاهش استفاده از مواد پلیمری و دفع آن‌ها (جایگزینی مواد دیگر به جای پلیمر با قابلیت بازیافت)، هزینه‌های بالای نگهداری (نیاز به نگهداری، آبیاری، کوددهی منظم و بررسی زهکشی و محیط کشت)، تحقیقات محلی محدود (مختص به کشورهای معدودی مانند آمریکا، استرالیا و تعداد کمی از کشورهای اروپایی و آسیایی)، مشکلات ناشی سقف (لزوم توجه به اجزای مختلف بام سبز، وزن و قابلیت ذخیره‌سازی آن‌ها) و عدم همکاری بین زمینه‌های مختلف (نیاز به همکاری بین رشته‌های معماری، عمران، محیط‌زیست و ساکنان) بستگی دارد؛ بنابراین، ضرورت دارد که تمام عوامل فوق برای رفع محدودیت‌های بام سبز در نظر گرفته شود.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

پژوهش حاضر با بررسی مزایای زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی به این نتیجه رسید که چالش‌های زیادی در حیطه بام‌های سبز وجود دارد و این امر می‌تواند فرصت‌های تحقیقاتی بیشتری را برای محققین جهت طراحی مقرون‌به‌صرفه‌تر در آینده مهیا کند. بااین‌حال، آزمایش‌های تجربی دقیق‌تری در مورد هر یک از اجزای بام سبز بایستی انجام شود که مستلزم همکاری تحقیقاتی بین‌رشته‌ای است. از طرفی، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که به دلیل مشکلات مدیریتی و هزینه‌های ساخت‌وساز بالا، اجرای بام سبز نیازمند توجه بیشتر به‌منظور کاربرد گسترده در جهان است و برای دستیابی به مزایای متعدد بام سبز بایستی شیوه‌های مقرون‌به‌صرفه‌تر این بام‌ها توسعه یابد.

همچنین، نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان داد که بام‌های سبز روش‌های بالقوه‌ای برای کاهش اثرات نامطلوب شهرنشینی بوده و به دلیل مزایای متعدد مانند مدیریت رواناب، افزایش کیفیت آب و کاهش جزیره گرمایی در مناطق شهری و جلوگیری از گرمایش جهانی بهترین شیوه‌های مدیریتی هستند که به‌راحتی می‌توانند در ساختمان‌های موجود ادغام شده و مزایای متعدد زیست‌محیطی و اجتماعی به همراه داشته باشند. بااین‌حال، شکاف تحقیقی در بین کشورهای توسعه‌نیافته و توسعه‌یافته وجود دارد. به‌علاوه، با وجود کثرت تحقیقات در اقلیم‌های سرد، نیاز به تحقیقات بیشتری در اقلیم‌های مختلف احساس می‌شود. برای استفاده از بام سبز باید مشوق‌هایی برای مالکان ساختمان وجود داشته باشد که این امر منجر به اجرای بام سبز در مقیاس بزرگ می‌شود. بدیهی است که کیفیت آب رواناب بام سبز بهتر از رواناب بام سنتی است، بنابراین باید از این رواناب برای اهداف بهینه مانند شستشوی سرویس بهداشتی، تمیزکردن سطوح و آبیاری گیاهان مجاور استفاده کرد. درنهایت، برای کاهش هزینه‌های بام سبز و افزایش عملکرد آن بهتر است اجزای بام سبز مانند پوشش گیاهی و محیط کشت به‌صورت بومی انتخاب گردند. همچنین، عملکرد محیط کشت در برابر فرسایش بادی، شرایط خشکسالی و بارندگی‌های شدید و اثر تراکم ناشی از وزن سبک مواد معدنی در این لایه ارزیابی شود.

منابع

1. Addai, K. Serener, B. and Kirikkaleli, D. (2022). Empirical analysis of the relationship among urbanization, economic growth and ecological footprint: Evidence from Eastern Europe. *Environmental Science and Pollution Research*. 29 (19): 27749-60.
2. Allen, J.G. MacNaughton, P. Laurent, J.G. Flanigan, S.S. Eitland, E.S. Spengler, J.D. (2015). Green buildings and health. *Current environmental health reports*. 2:250-8.

1- Green blue roof
2- Hybrid photovoltaic (PV) green roof

3. Ascione, F. Bianco, N. de’Rossi, F. Turni, G. Vanoli, G.P. (2013). Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy*. 104: 845-59.
4. Berndtsson, J.C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological engineering*. 36 (4): 351-60.
5. Blanus, T. Monteiro, M.M. Fantozzi, F. Vysini, E. Li, Y. Cameron, R.W. (2013). Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better ‘cooling service’. *Building and Environment*. 59: 99-106.
6. Cao, C.T. Farrell, C. Kristiansen, P.E. Rayner, J.P. (2014). Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants. *Ecological Engineering*. 71:368-74.
7. Connelly, M. and Hodgson, M. (2013). Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs. *Applied Acoustics*. 74 (10): 1136-43.
8. Cristiano, E. Deidda, R. and Viola, F. (2021). The role of green roofs in urban Water-Energy-Food-Ecosystem nexus: A review. *Science of the Total Environment*. 756: 143876.
9. Durhman, A.K. Rowe, D.B. and Rugh, C.L. (2006). Effect of watering regimen on chlorophyll fluorescence and growth of selected green roof plant taxa. *HortScience*. 41(7): 1623-8.
10. Ebadati, M. and Ehyaei, M.A. (2020). Reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs in three different climates of Iran. *Advances in Building Energy Research*. 14 (1): 66-93.
11. Getter, K.L. Rowe, D.B. (2008). Media depth influences Sedum green roof establishment. *Urban Ecosystems*. 11: 361-72.
12. Gong, Y. Zhang, X. Li, H. Zhang, X. He, S. Miao, Y.A. (2021). comparison of the growth status, rainfall retention and purification effects of four green roof plant species. *Journal of Environmental Management*. 278: 111451.
13. He, C. Zhao, J. Zhang, Y. He, L. Yao, Y. Ma, et al. (2020). Cool roof and green roof adoption in a metropolitan area: climate impacts during summer and winter. *Environmental Science & Technology*. 54 (17): 10831-9.
14. He, Y. Yu, H. Chen, P. Zhao, M. (2018). Thermal performance evaluation of a new type of green roof system. *Energy Procedia*. 152:384-9.
15. He, Y. Yu, H. Ozaki, A. Dong, N. Zheng, S. (2017). Long-term thermal performance evaluation of green roof system based on two new indexes: A case study in Shanghai area. *Building and Environment*. 120: 13-28.
16. Kaiser, A.S. Zamora, B. Mazón, R. García, J.R. Vera, F. (2014). Experimental study of cooling BIPV modules by forced convection in the air channel. *Applied Energy*. 135: 88-97.
17. Karteris, M. Theodoridou, I. Mallinis, G. Tsiros, E. Karteris, A. (2016). Towards a green sustainable strategy for Mediterranean cities: Assessing the benefits of large-scale green roofs implementation in Thessaloniki, Northern Greece, using environmental modelling, GIS and very high spatial resolution remote sensing data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 58: 510-25.
18. Licht, J. and Lundholm, J. (2008). Native coastal plants for northeastern extensive and semi-intensive green roof trays: substrates, fabrics and plant selection.
19. Liu, C. Li, Y. and Li, J. (2017). Geographic information system-based assessment of mitigating flash-flood disaster from green roof systems. *Computers, Environment and Urban Systems*. 64: 321-31.
20. LOSKEN, G. (2008). "FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Land schaft sbau eV)–Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing–Green Roofing Guideline."
21. Mahmoodzadeh, M. and Mukhopadhyaya, P. Valeo, C. (2019). Effects of extensive green roofs on energy performance of school buildings in four North American climates. *Water*. 12 (1): 6.
22. Mobasheri, M. (2014). Green roofs-construction and functional requirements for four buildings on the IST campus. *Tecnico Lisboa*.
23. Monterusso, M.A. Rowe, D.B. and Rugh, C.L. (2005). Establishment and persistence of Sedum spp. and native taxa for green roof applications. *HortScience*. 40 (2): 391-6.
24. Morakinyo, T.E. Dahanayake, K.K. Ng, E. Chow, C.L. (2017). Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study. *Energy and Buildings*. 145:226-37.
25. Ni, Y. (2006). Effect of indoor greening on the reduction of low frequency noise annoyance level. *J Zhejiang For Inst*. 23 (1): 112-4.
26. Peng, L.L. and Jim, C.Y. (2013). Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation. *Energies*. 6 (2): 598-618.

27. Pérez, G. Coma, J. Solé, C. Castell, A. Cabeza, L.F. (2012). Green roofs as passive system for energy savings when using rubber crumbs as drainage layer. *Energy Procedia*. 30: 452-60.
28. Romali, N.S. Ardzu, F.A. and Suzany, M.N. (2023). The potential of coconut waste as green roof materials to improve stormwater runoff. *Water Science and Technology*. 87 (6): 1515-28
29. Schweitzer, O. and Erell, E. (2014). Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate. *Energy and Buildings*. 68: 25-32.
30. Scolari, T.P. and Ghisi, E. (2022). Life cycle assessment of green roofs: A literature review of layers materials and purposes. *Science of The Total Environment*. 829:154650.
31. Shafique, M. Lee, D. and Kim, R. (2016). A field study to evaluate runoff quantity from blue roof and green blue roof in an urban area. *International Journal of Control and Automation*. 9 (8): 59-68.
32. Vijayaraghavan, and K. Raja, F.D. (2015). Pilot-scale evaluation of green roofs with Sargassum biomass as an additive to improve runoff quality. *Ecological Engineering*. 75: 70-8.
33. Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and sustainable energy reviews*. 57: 740-52.
34. Wang, J. Garg, A. Huang, S. Mei, G. Liu, J. Zhang, K. et al. (2021). The rainwater retention mechanisms in extensive green roofs with ten different structural configurations. *Water Science and Technology*. 84 (8):1839-57.
35. Wang, J. Mei, G. Garg, A. Chen, D. Liu, N. (2023). A simplified model for analyzing rainwater retention performance and irrigation management of green roofs with an inclusion of water storage layer. *Journal of Environmental Management*. 326: 116740.
36. Whittinghill, L.J. Rowe, D.B. and Cregg, B.M. (2013). Evaluation of vegetable production on extensive green roofs. *Agroecology and sustainable food systems*. 37 (4): 465-84.
37. Wong, G.K. and Jim, C.Y. (2014). Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime. *Ecological Engineering*. 70: 366-78.
38. Yeom, D. and LaRoche, P. (2017). Investigation on the cooling performance of a green roof with a radiant cooling system. *Energy and Buildings*. 149: 26-37.
39. Zhao, Y. Li, S. and Yan, Z. (2002). Duct capturing effect and assessment method for urban green space. *J Huazhong Univ Agric*. 21 (6): 582-6.
40. Zhang, Q. Miao, L. Wang, X. Liu, D. Zhu, L. Zhou, B. et al. (2015). The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. *Landscape and Urban Planning*. 144:142-50
41. Zhang, S.X. Zhang, S.H. Yan, J. Yang, H. Wang, R.Z. Wei, L.Y. et al. (2022). Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation. *Huan Jing ke Xue Huanjing Kexue*. 43 (6): 3187-94.