

## مرور سیستماتیک بر تأثیر بام‌های سرد بر آسایش حرارتی و بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها در اقلیم گرم و خشک

شکوه سادات اسدالهی<sup>۱</sup>، منصوره طاهباز<sup>۲\*</sup>، نیلوفر نیک قدم<sup>۳</sup>، مهناز محمودی زرنندی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

### چکیده

در اقلیم‌های گرم و خشک، چالش‌های مرتبط با آسایش حرارتی و مصرف بالای انرژی سرمایشی، از مسائل اساسی در طراحی پایدار ساختمان‌ها محسوب می‌شوند. بام سرد به‌عنوان یکی از راهکارهای غیرفعال طراحی معماری، با قابلیت بازتابش تابش خورشیدی و کاهش دمای سطح بام، نقش مؤثری در بهبود عملکرد حرارتی و انرژی دارد. هدف این مقاله، ارائه یک مرور سیستماتیک از پژوهش‌های بین‌المللی و داخلی در این زمینه است. این مقاله، یک مرور سیستماتیک از مطالعات منتشرشده بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ پیرامون اثر بام سرد بر آسایش حرارتی و بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها در اقلیم گرم و خشک ارائه می‌دهد. جستجوی منابع در پایگاه‌های ScienceDirect, Web of Science, Scopus, SID و MagIran انجام شد و بر اساس معیارهای PRISMA، ۱۵ مقاله نهایی برای تحلیل انتخاب شدند. یافته‌ها نشان داد که بام سرد می‌تواند دمای هوای داخلی را تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش داده و مصرف انرژی سرمایشی را بین ۱۵٪ تا ۴۰٪ کاهش دهد. همچنین، فناوری‌های مختلف بام سرد، از انواع سنتی و نانویی تا سیستم‌های پیشرفته مانند PCM و تهویه‌شونده، بسته به شرایط اقلیمی و اجرایی، عملکرد متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در نهایت، این مقاله با تحلیل هم‌راستایی و واگرایی‌های مطالعات، عوامل مؤثر بر عملکرد بام سرد را شناسایی کرده و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه می‌دهد. این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مرجعی کاربردی برای معماران، مهندسان و سیاست‌گذاران حوزه انرژی و طراحی اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد.

### کلمات کلیدی:

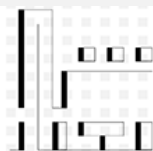
بام سرد، آسایش حرارتی، بهره‌وری انرژی، اقلیم گرم و خشک، طراحی غیرفعال، مرور سیستماتیک.

<sup>۱</sup> - گروه معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> - گروه معماری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup> - گروه معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

<sup>۴</sup> - گروه معماری، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.



## ۱. مقدمه

روند فزاینده گرم شدن زمین به عنوان یکی از چالش‌های اصلی قرن بیست و یکم، پیامدهایی گسترده بر پایداری زیست‌محیطی، مصرف انرژی و کیفیت زندگی انسان‌ها در محیط‌های مصنوعی داشته است. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، تخریب لایه ازن، گسترش مناطق شهری و وابستگی روزافزون به منابع انرژی فسیلی، منجر به بروز پدیده‌هایی چون افزایش دمای هوا، نوسانات شدید حرارتی، و شکل‌گیری جزایر گرمایی شهری شده‌اند (اولپایانی، ۲۰۲۱؛ سانتاموریس، ۲۰۱۵). بر اساس مطالعات منتشرشده، انتظار می‌رود تقاضای سرمایشی ساختمان‌ها تا سال ۲۰۵۰ در مناطق گرم تا ۲۷۵٪ افزایش یابد، که این امر فشار مضاعفی بر زیرساخت‌های انرژی و محیط‌زیست وارد خواهد کرد (گائو و همکاران، ۲۰۲۳؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۴). در اقلیم‌های گرم و خشک، که با تابش شدید، رطوبت نسبی پایین و نوسانات دمایی روزانه و فصلی همراه است، مصرف انرژی برای سرمایش فضای داخلی سهم بالایی از بار انرژی ساختمان را به خود اختصاص می‌دهد (عثمانی و همکاران، ۲۰۲۳؛ یزدانی و بانسی، ۲۰۲۱). طبق مطالعات، حدود ۶۴٪ از مصرف انرژی ساختمان‌های این اقلیم‌ها صرف سرمایش می‌شود که عمدتاً از طریق سامانه‌های مکانیکی مانند کولرهای گازی و چیلرها تأمین می‌گردد (بنموسا و همکاران، ۲۰۲۳). این وابستگی شدید به سیستم‌های سرمایشی نه تنها مصرف برق را افزایش می‌دهد، بلکه با تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای، بحران اقلیمی را تشدید می‌کند (لویسنسون و اکبری، ۲۰۱۰). در چنین بستری، ضرورت طراحی معماری پایدار و استفاده از راهکارهای غیرفعال برای کنترل حرارت در ساختمان‌ها دوچندان می‌شود (فنگ و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از مؤثرترین و در عین حال ساده‌ترین این راهکارها، بهره‌گیری از «بام سرد» است؛ راهکاری که از طریق بازتاب تابش خورشیدی و افزایش گسیلندگی حرارتی سطح بام، باعث کاهش جذب گرما و در نتیجه خنک‌سازی فضای داخلی ساختمان می‌شود (تیان و همکاران، ۲۰۲۳؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۳).

مفهوم بام سرد نخستین بار در دهه ۱۹۸۰ میلادی در ایالات متحده مطرح شد و سپس با حمایت‌های علمی از سوی موسساتی نظیر آزمایشگاه ملی لارنس برکلی گسترش یافت (لویسنسون و اکبری، ۲۰۱۳). بام سرد در ساده‌ترین تعریف خود، به بامی اطلاق می‌شود که دارای بازتابش خورشیدی بالا (حدود ۰.۷۰ به بالا) و گسیلندگی حرارتی بالا (بیش از ۰.۷۵) باشد (اشعری، ۲۰۰۷). این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که در شرایط تابش مستقیم خورشید، دمای سطح بام سرد تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از بام معمولی باقی بماند (اکبری و همکاران، ۱۳۸۰؛ بسیونی و محمود، ۲۰۲۴). این تفاوت دمایی مستقیماً باعث کاهش انتقال حرارت به فضای داخلی و کاهش بار سرمایشی می‌گردد (ژائو و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعات میدانی و شبیه‌سازی‌های متعددی اثربخشی بام‌های سرد را در کاهش دمای داخلی، افزایش آسایش حرارتی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی تأیید کرده‌اند. برای مثال، در مطالعه‌ای در ایالت تگزاس، استفاده از بام سفید منجر به کاهش ۲۱٪ در مصرف انرژی سرمایشی گردید (کنوپکی و اکبری، ۲۰۰۱). همچنین در مناطق شهری پرجمعیتی نظیر لس‌آنجلس، اجرای طرح‌های گسترده بام سرد، کاهش دمای متوسط شهری تا ۲ درجه سانتی‌گراد را در پی داشته است (لویسنسون و همکاران، ۲۰۱۰). با این حال، علی‌رغم اثبات مزایای بام سرد، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده، یا بر اقلیم‌های مرطوب تمرکز داشته‌اند (فنگ و همکاران، ۲۰۱۹)، یا به بررسی موردی عملکرد بام سرد در یک ساختمان خاص محدود بوده‌اند (راوات و سینگ، ۲۰۲۲). در ادبیات پژوهشی ایران نیز علی‌رغم پیشرفت‌هایی مانند مطالعه مولایی و همکاران (۱۳۹۷) درباره مقایسه بام سبز و سرد در شهرهای مختلف، تحلیل‌های جامع و تطبیقی در اقلیم گرم و خشک کمتر به چشم می‌خورد. در مواردی نظیر مطالعه درویش و همکاران (۱۴۰۰)، تمرکز صرفاً بر ظرفیت بازتابش بام در یک پروژه خاص بوده و دید کل‌نگر به اقلیم و انواع ساختمان‌ها ارائه نشده است. همچنین، مطالعاتی مانند رزمگاه (۱۳۹۳) تنها به تغییر رنگ به عنوان ابزار بام سرد پرداخته و اثرات ترکیبی مصالح و شرایط اقلیمی بررسی نشده‌اند. افزون بر این، تنوع فناوری‌های نوین در حوزه بام سرد، از جمله بام‌های فراسرد (Super Cool Roof) و بام‌های تطبیقی-دمایی (Temperature Adaptive Roof)، نیازمند تحلیل‌های مقایسه‌ای دقیق برای انتخاب راهکارهای بهینه در اقلیم خشک می‌باشد (تیان و همکاران، ۲۰۲۳؛ گائو و همکاران، ۲۰۲۲). بام‌های تطبیقی قادرند به صورت هوشمند، در فصول مختلف میزان بازتابش خود را تنظیم کرده و در زمستان مانع از افت حرارتی بیش از حد شوند (کیم و همکاران، ۲۰۲۰).

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، چالش‌هایی مانند کاهش بازتابش در اثر آلودگی، شست‌وشو، و افزایش زبری سطح در طول زمان (aging effect)، مشکلات زیبایی‌شناسی، مقاومت مکانیکی در برابر شرایط سخت اقلیمی و هزینه‌های اولیه نصب، از جمله موانع اجرایی بام‌های سرد در اقلیم‌های خشک محسوب می‌شوند (اکبری و همکاران، ۱۳۹۰؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین، سیاست‌گذاری ناکافی و فقدان انگیزه‌های اقتصادی برای اجرای این فناوری در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، سرعت گسترش آن را کند کرده است (باسیونی و محمود، ۲۰۲۴). با توجه به فقدان مرورهای ساختاریافته و جامع درباره بام سرد در اقلیم گرم و خشک، هدف مقاله حاضر، ارائه یک مرور سیستماتیک از پژوهش‌های بین‌المللی و داخلی در این زمینه است. این مقاله با جمع‌آوری و تحلیل مطالعات تجربی، شبیه‌سازی‌ها، و تحلیل‌های نظری، به دنبال پاسخ به این پرسش است که: «بام سرد تا چه اندازه می‌تواند در اقلیم گرم و خشک آسایش حرارتی و بهره‌وری انرژی را ارتقاء دهد؟» و «چه عواملی (مصلح، طراحی، موقعیت، نگهداری) در کارایی آن نقش دارند؟» مقاله حاضر با پیروی از روش‌شناسی مرور نظام‌مند بر مبنای چارچوب PRISMA، تلاش دارد تا با ارائه تصویری دقیق از وضعیت موجود پژوهش در این حوزه، راه را برای تدوین استانداردها، طراحی‌های بهینه و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد برای معماران، مهندسان، و سیاست‌گذاران هموار سازد. یافته‌های این مقاله می‌تواند به‌طور خاص برای مناطقی همچون مرکز ایران، شمال آفریقا، خاورمیانه و جنوب غرب آسیا که از نظر ویژگی‌های اقلیمی هم‌راستا هستند، کاربردی باشد.

## ۲. پیشینه پژوهش

پیشینه پژوهش درباره بام‌های سرد را می‌توان به سه محور کلیدی تقسیم نمود: (۱) مبانی نظری و مفهومی، (۲) مطالعات کاربردی و تجربی، و (۳) مطالعات شبیه‌سازی و تحلیل عملکردی. این بخش با هدف تحلیل روند نظری، تطور مفاهیم و طبقه‌بندی مطالعات انجام‌شده در زمینه تأثیر بام سرد بر عملکرد حرارتی و انرژی ساختمان در اقلیم گرم و خشک تدوین می‌گردد.

### ۲.۱ بام سرد

بام سرد به‌عنوان یکی از راهکارهای طراحی غیرفعال در معماری اقلیمی، در پاسخ به چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از افزایش دمای جهانی و افزایش مصرف انرژی، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم، توسعه یافته است. این راهکار مبتنی بر اصول فیزیک تابشی و انتقال حرارت در پوسته‌های خارجی ساختمان است، که با ارتقاء ویژگی‌های بازتابی و گسیلندگی سطح بام، میزان جذب حرارت خورشیدی را به حداقل می‌رساند و اتلاف حرارتی را به حداکثر می‌رساند (لوپسون و اکبری، ۲۰۱۳؛ اشراپی، ۲۰۰۷). در تعریف علمی، بام سرد سطحی است با ضریب بازتاب خورشیدی (Solar Reflectance) بالا و ضریب گسیلندگی حرارتی (Thermal Emittance) بالا که به‌واسطه این ویژگی‌ها در تابش مستقیم خورشید، نسبت به بام‌های معمولی دمای سطحی پایین‌تری دارد (ژائو و همکاران، ۲۰۲۳؛ تیان و همکاران، ۲۰۲۳). این ویژگی‌ها مانع از گرم شدن بیش از حد سطح بام و انتقال حرارت به داخل ساختمان می‌شوند، و در نتیجه نیاز به استفاده از تجهیزات سرمایشی پرمصرف را کاهش می‌دهند (بنموسا و همکاران، ۲۰۲۳).

بر اساس استاندارد ASHRAE 90.2، بامی زمانی سرد تلقی می‌شود که دارای ضریب بازتابش بیش از ۰.۰۷ و گسیلندگی بیش از ۰.۷۵ باشد (اشراپی، ۲۰۰۷). برخی پژوهش‌ها بام‌هایی با بازتابش بالای ۰.۰۸ و گسیلندگی بیش از ۰.۰۹ را در دسته بام‌های «فرا سرد» (Super Cool Roof) قرار می‌دهند که حتی می‌توانند در شرایط تابش شدید، دمای سطحی کمتری از دمای هوای محیط داشته باشند (تیان و همکاران، ۲۰۲۳؛ جنتل و همکاران، ۲۰۱۵). از نظر ترمودینامیکی، عملکرد بام سرد را می‌توان از منظر تراز انرژی تابشی سطح بام تحلیل کرد. سطح بام در طول روز تابش خورشیدی را دریافت می‌کند و بخشی از آن را جذب و بخشی را بازتاب می‌دهد. در بام‌های تیره‌رنگ معمولی، حدود ۸۵٪ انرژی تابشی جذب می‌شود و به گرما تبدیل می‌شود، در حالی که در بام‌های سرد این نسبت به زیر ۳۰٪ کاهش می‌یابد (اکبری و همکاران، ۱۳۸۰؛ بسیونی و محمود،

۲۰۲۴). در کنار این ویژگی، سطح بام سرد به واسطه گسیلندگی بالا، گرمای جذب شده را نیز به صورت تابش فروسرخ در بازه ۸-۱۳ میکرومتر به آسمان پس می‌فرستد؛ فرآیندی که به آن خنک‌سازی تابشی (Radiative Cooling) گفته می‌شود (رامان و همکاران، ۲۰۱۴).

در اقلیم‌های گرم و خشک، به دلیل وجود آسمان صاف و رطوبت پایین، شرایط برای بهره‌گیری از خنک‌سازی تابشی بسیار مناسب است؛ زیرا «پنجره تابشی جوی» (Atmospheric Window) به خوبی باز است و تابش فروسرخ می‌تواند به راحتی از جو عبور کرده و به فضا بازتاب یابد (اولیایی، ۲۰۲۱). از این رو، عملکرد بام سرد در این اقلیم‌ها می‌تواند بسیار بهینه‌تر از اقلیم‌های مرطوب باشد که در آن‌ها بخار آب در جو، این پنجره را می‌بندد و مانع از خنک‌سازی مؤثر می‌شود (تیان و همکاران، ۲۰۲۳؛ اکبری و متیوز، ۲۰۱۲). از منظر طراحی معماری، بام سرد به دو صورت قابل اجرا است:

- پوشش‌های بازتابنده (Reflective Coatings): که شامل رنگ‌های سفید، غشاهای آکرلیک، پلی‌اورتان یا مواد نانوکامپوزیتی با ضرایب بازتاب بالا هستند.
- مصالح ذاتی با رنگ روشن: مانند ورق‌های فلزی لعابدار، سنگ‌های سفید، یا سفال‌های با سطح لعاب‌خورده که بدون نیاز به پوشش اضافی، ویژگی‌های بازتابی مناسبی دارند (اکبری و لوینسون، ۲۰۱۳؛ روات و سینگ، ۲۰۲۲).

در ایران نیز مطالعات متعددی به بررسی مفهومی بام سرد پرداخته‌اند. رزمگاه (۱۳۹۳) بام خنک را به عنوان تجربه‌ای موفق در استفاده از رنگ‌های روشن در شهرهای کویری معرفی کرده است. اسداللهی و طاهباز (۱۴۰۰) بر نقش بام سرد در کاهش پارامترهای گرمایی شهر تأکید کرده‌اند و آن را ابزاری مؤثر در مدیریت انرژی در ساختمان و محیط شهری دانسته‌اند. مطالعه درویش و همکاران (۱۴۰۰) نیز نشان داده است که افزایش ضریب بازتابش سطح بام‌ها می‌تواند تا ۱۷٪ مصرف انرژی سرمایشی ساختمان را در شهری کاهش دهد. باید توجه داشت که در کنار عملکرد حرارتی، دوام، مقاومت در برابر آلودگی، و امکان نگهداری آسان از جمله فاکتورهایی هستند که در انتخاب نوع بام سرد مؤثرند. با گذر زمان، سطح بام در معرض آلودگی، گرد و غبار، دوده و تغییرات جوی قرار می‌گیرد که می‌تواند ضریب بازتابش را کاهش داده و عملکرد آن را تضعیف کند (برتر و اکبری، ۱۹۹۷؛ لوینسون و همکاران، ۲۰۰۵). از این رو، استفاده از پوشش‌های خودپاک‌شونده یا مقاوم به آلودگی، و برنامه‌های نگهداری منظم، در پایداری عملکرد بام سرد اهمیت بسزایی دارد (آگاروال و مولتی، ۲۰۲۴). از نظر تئوری طراحی اقلیمی، استفاده از بام سرد به عنوان راهکاری مؤثر در دسته‌بندی راهکارهای غیرفعال سرمایشی قرار می‌گیرد. این راهکار به‌ویژه در ساختمان‌هایی با سقف‌های وسیع مانند مدارس، بیمارستان‌ها و ساختمان‌های تجاری مؤثرتر است، زیرا سطح مواجهه بیشتر با تابش مستقیم، پتانسیل بالاتری برای بهره‌برداری از ویژگی‌های بازتابی دارد (عثمانی و همکاران، ۲۰۲۳؛ یزدانی و بانسی، ۲۰۲۱).

در مجموع، مبانی نظری بام سرد ترکیبی از اصول فیزیکی تابش، طراحی اقلیمی، و مصالح نوین ساختمانی است. بام سرد نه تنها ابزاری برای کاهش بار سرمایشی و افزایش آسایش حرارتی محسوب می‌شود، بلکه عنصری کلیدی در توسعه معماری پایدار و مدیریت منابع انرژی در اقلیم‌های گرم و خشک است. این ویژگی‌ها، ضرورت تحلیل جامع عملکرد بام سرد در چنین اقلیم‌هایی را برجسته ساخته و بستر مناسبی برای انجام مرور سیستماتیک علمی فراهم می‌سازد.

## ۲,۲ مطالعات جهانی پیرامون عملکرد بام سرد

مطالعات بین‌المللی متعددی در دهه‌های اخیر، به ارزیابی اثربخشی بام‌های سرد در کاهش دمای سطحی، ارتقای آسایش حرارتی، و کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها در اقلیم‌های مختلفی از جمله گرم و خشک، گرم و مرطوب، نیمه‌خشک و استوایی انجام شده‌اند و داده‌هایی ارزشمند در خصوص رفتار بام‌های سرد در شرایط گوناگون اقلیمی ارائه می‌کنند (اکبری و لوینسون، ۲۰۱۳؛ روات و سینگ، ۲۰۲۲؛ وانگ

و همکاران، ۲۰۲۴). در جدول زیر، نمونه‌هایی از مطالعات کلیدی جهانی در این زمینه فهرست شده‌اند که در اقلیم‌های خشک یا نیمه‌خشک صورت گرفته‌اند:

جدول ۱ - پیشینه مطالعات بین‌المللی

| نویسندگان                  | کشور         | نوع پژوهش              | نتایج کلیدی                                                               |
|----------------------------|--------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| (2023) تیان و همکاران      | چین          | مروری تحلیلی           | بام‌های فراسرد و تطبیقی عملکرد بالایی دارند                               |
| عثمانی و همکاران<br>(2023) | الجزایر      | شبیه‌سازی و میدانی     | بام تهویه‌شونده سرد باعث کاهش دمای داخلی تا ۴٫۹۵ درجه شده است             |
| بنموسا و همکاران<br>(2023) | مراکش        | شبیه‌سازی حرارتی       | مواد سلولزی بازتابنده تا ۴۰٪ مصرف انرژی را کاهش داده‌اند                  |
| (2022) راوات و سینگ        | هند          | تحلیل فنی-اقتصادی      | صرفه‌جویی اقتصادی ۲۵٪ در مناطق گرمسیری                                    |
| جیانگ و همکاران<br>(2024)  | چین          | آزمایشگاهی و شبیه‌سازی | کارایی بالای مواد تغییر فاز یافته در بام سرد در شرایط تابستانی            |
| وانگ و همکاران<br>(2024)   | چین          | تحلیل عملکرد انرژی     | بام سرد تا ۲۵٪ کاهش بار سرمایشی در ساختمان‌های اقلیم خشک را نشان داده است |
| (2024) آگاروال و مولتی     | ایالات متحده | مروری تحلیلی           | ضرورت توجه به دوام عملکرد و آلودگی سطحی بام سرد در استفاده بلندمدت        |
| اکبری و لوینسون<br>(2013)  | ایالات متحده | تحلیل استانداردها      | تدوین استانداردهای بام سرد موجب ارتقاء بهره‌برداری در سطح شهر شده است     |

تحلیل داده‌های جدول فوق نشان می‌دهد که بام‌های تهویه‌شونده سرد (Ventilated Cool Roofs) در مناطق خشک مانند الجزایر به‌طور میانگین توانسته‌اند دمای داخلی را تا حدود ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهند و ساعات ناراحتی حرارتی را به میزان قابل توجهی کاهش دهند (عثمانی و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین استفاده از مصالح سلولزی بازتابنده در پروژه‌های در مراکش، موجب کاهش ۴۰٪ در بار سرمایشی شد (بنموسا و همکاران، ۲۰۲۳). در مطالعه‌ای در چین، بام‌های تغییر فاز یافته (PCM-integrated) توانستند با تنظیم گرمای عبوری از سقف، آسایش حرارتی را حتی در ساعات اوج تابش تأمین کنند (جیانگ و همکاران، ۲۰۲۴). پژوهش تیان و همکاران (۲۰۲۳)، با بررسی تحول تاریخی تکنولوژی بام سرد، بر اهمیت مصالح جدیدی مانند بام‌های فراسرد و بام‌های دمایی-تطبیقی تأکید کرده است که می‌توانند بسته به دمای محیط، بازتابش و گسیلندگی خود را تنظیم کنند و عملکردی پویا در طول سال ارائه دهند. این رویکرد برای اقلیم‌هایی با تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های خنک (نظیر

مناطق در ایران) می‌تواند بسیار مؤثر باشد. مطالعات جهانی همچنین به چالش‌هایی مانند کاهش عملکرد بام سرد در اقلیم‌های مرطوب، افت بازتابش در اثر آلودگی هوا، و دوام بلندمدت مصالح پرداخته‌اند (آگاروال و مولتی، ۲۰۲۴؛ اولیانی، ۲۰۲۱). در این زمینه، نقش طراحی، نگهداری، و نوع پوشش بام به عنوان عوامل مؤثر در عملکرد نهایی بام سرد شناخته شده‌اند (اکبری و همکاران، ۱۳۸۰؛ باسیونی و محمود، ۲۰۲۴).

## ۲,۳ پژوهش‌های ایران و اقلیم گرم و خشک

در دهه‌های اخیر، مطالعات متعددی در ایران با هدف تحلیل عملکرد بام سرد در اقلیم‌های متنوع کشور انجام شده‌اند. با توجه به تنوع اقلیمی در ایران، بخش‌هایی از کشور مانند استان‌های مرکزی، یزد، کرمان، خراسان جنوبی، و تهران شرایطی بسیار مناسب برای بهره‌گیری از بام سرد دارند.

### جدول ۲ - پیشینه مطالعات داخلی

| نویسندگان               | شهر/اقلیم                                | نوع پژوهش                                        | نتایج کلیدی                                                                           |
|-------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| رمزگاه (۱۳۹۳)           | نامشخص / کویری                           | پژوهش تجربی رنگ بام                              | رنگ سفید باعث کاهش محسوس دمای سطح بام شد                                              |
| درویش و همکاران (۱۴۰۰)  | شهرری / گرم و خشک                        | تحلیل عددی و میدانی بازتابش سطوح                 | افزایش بازتابش باعث کاهش ۱۷٪ در مصرف انرژی سرمایشی شد                                 |
| مولایی و همکاران (۱۳۹۷) | تهران، تبریز، بندرعباس / اقلیم‌های متنوع | تحلیل تطبیقی بام سبز و سرد                       | بام سرد در تبریز عملکرد بهتری از بام سبز داشته و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر بوده |
| اسدالهی و طاهباز (۱۴۰۰) | تهران / گرم و خشک                        | تحلیل نظری و تحلیلی اثر بام بر جزیره گرمایی شهری | بام سرد ابزاری مؤثر در تعدیل گرمای شهری و ارتقاء آسایش حرارتی محیط شهری است           |

مطالعه رمزگاه (۱۳۹۳) یکی از نخستین تلاش‌های تجربی در استفاده از رنگ‌های روشن به عنوان ابزار خنک‌کننده بام در اقلیم کویری بود. در این تحقیق، مشخص شد که استفاده از رنگ سفید ساده می‌تواند دمای سطح بام را تا بیش از ۱۰ درجه کاهش دهد و انتقال حرارت به فضای زیر بام را محدود سازد. درویش و همکاران (۱۴۰۰) با تحلیل دقیق پروژه مسکن مهر شهرری، نشان دادند که افزایش ضریب بازتابش سطوح بام موجب کاهش ۱۷٪ در مصرف انرژی سرمایشی شده است. این پژوهش یکی از معدود مطالعاتی است که هم از داده‌های میدانی و هم تحلیل عددی در مدل‌سازی استفاده کرده است. پژوهش مولایی و همکاران (۱۳۹۷) بام سرد را در کنار بام سبز در چهار شهر ایران با اقلیم‌های متفاوت مقایسه کرد. نتایج نشان داد که بام سرد در شهر تبریز (اقلیم خشک سرد) عملکرد بهتری نسبت به بام سبز داشته و از نظر هزینه نیز اقتصادی‌تر بوده است. در نهایت، مطالعه اسدالهی و طاهباز (۱۴۰۰) در زمینه تحلیل نقش بام سرد در تعدیل پدیده جزیره گرمایی شهری در تهران، به شکل‌گیری دیدگاه‌های نوینی در هم‌پیوندی میان معماری، اقلیم و محیط زیست شهری منجر شده است. این پژوهش با تمرکز بر پیوندهای بین سطح بام، آسایش حرارتی و پایداری محیطی، نشان می‌دهد که بام سرد نه تنها در سطح ساختمان بلکه در مقیاس شهری نیز می‌تواند اثربخش باشد. با بررسی مجموع این مطالعات، روشن است که پژوهش در ایران هنوز به مرور نظام‌مند نیاز دارد تا تفاوت‌های اقلیمی، مصالح مورد استفاده، و ویژگی‌های معماری محلی را در طراحی بام سرد به صورت یکپارچه تحلیل نماید.

## ۲,۴ دسته‌بندی فناوری‌های بام سرد<sup>۱</sup>

فناوری‌های بام سرد، به‌عنوان یکی از ابزارهای نوآورانه در طراحی غیرفعال و مدیریت انرژی، در طول دو دهه گذشته دستخوش توسعه چشمگیری شده‌اند. این فناوری‌ها، به‌طور کلی، با هدف کاهش جذب حرارت خورشیدی و افزایش توان تابش حرارتی طراحی می‌شوند و در اقلیم‌های گرم نقش بسزایی در ارتقاء عملکرد حرارتی ساختمان ایفا می‌کنند (اکبری و لوینسون، ۲۰۱۳؛ تیان و همکاران، ۲۰۲۳). تنوع شرایط اقلیمی، تنوع فرم ساختمان‌ها و الزامات زیبایی‌شناختی، سبب شده است که فناوری‌های بام سرد در قالب‌های متعددی توسعه یابند. بر اساس مطالعات مروری (آگاروال و مولتی، ۲۰۲۴؛ بنموسا و همکاران، ۲۰۲۳). می‌توان فناوری‌های بام سرد را در پنج دسته‌ی عمده طبقه‌بندی کرد:

- الف) بام‌های بازتابنده سنتی<sup>۲</sup>: این گروه، رایج‌ترین نوع بام‌های سرد را شامل می‌شود که از رنگ‌ها یا پوشش‌های روشن (معمولاً سفید) برای افزایش بازتابش خورشیدی استفاده می‌کنند. این پوشش‌ها اغلب از جنس اکریلیک، سیلیکونی یا آلومینیومی هستند و بر روی بام‌های فلزی، بتنی یا ایزوگام نصب می‌شوند (اکبری و همکاران، ۲۰۰۱؛ روات و سینگ، ۲۰۲۱). مطالعات نشان می‌دهد که این بام‌ها می‌توانند تا ۳۰٪ در مصرف انرژی سرمایشی صرفه‌جویی ایجاد کنند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۴).
- ب) بام‌های نانویی و پوشش‌های پیشرفته<sup>۳</sup>: این فناوری شامل پوشش‌هایی است که با استفاده از ذرات نانو مانند  $ZnO$  و  $TiO_2$  ساخته شده‌اند و توان بازتابش بیشتری در طیف‌های مرئی و مادون قرمز دارند (ژائو و همکاران، ۲۰۲۳). پوشش‌های نانویی دارای مقاومت بیشتری نسبت به آلودگی، اشعه UV و شرایط جوی هستند و در برابر پیری عملکرد پایدارتری دارند (جنتل و همکاران، ۲۰۱۵). بام‌های نانویی در اقلیم‌های آلوده مانند شهرهای بزرگ کارایی بالایی دارند.
- پ) بام‌های تهویه‌شونده<sup>۴</sup>: در این فناوری، بین سطح بیرونی بام و لایه سازه‌ای، یک فضای خالی برای تهویه طبیعی ایجاد می‌شود که با افزایش تبادل هوا، از تجمع گرما جلوگیری می‌کند. در مطالعه عثمانی و همکاران (۲۰۲۳)، این فناوری در مناطق بیابانی نتایج درخشانی داشته و دمای داخلی ساختمان را تا ۴,۹۵ درجه کاهش داده است.
- ت) بام‌های فراسرد<sup>۵</sup>: این گروه از بام‌ها با استفاده از فناوری‌های نوین تابش فروسرخ، قادرند حتی در اوج تابش خورشیدی، دمای سطحی پایین‌تر از دمای محیط حفظ کنند (تیان و همکاران، ۲۰۲۳). در این فناوری‌ها، بازتابش بیش از ۹۵٪ و گسیلندگی بسیار بالا (تا ۹۸٪) گزارش شده است که عملکردی فوق‌العاده در اقلیم خشک فراهم می‌آورد (ژائو و همکاران، ۲۰۲۳).
- ث) بام‌های تطبیقی دمایی<sup>۶</sup>: این بام‌ها قادرند در فصول گرم بازتابنده و در فصول سرد جذب‌کننده حرارت باشند. این ویژگی تطبیقی از طریق تغییر فاز در پوشش سطحی یا استفاده از پلیمرهای حساس به دما حاصل می‌شود (کیم و همکاران، ۲۰۲۰). این نوع بام برای مناطقی با نوسانات فصلی بالا (مانند یزد یا کرمان) مناسب است.

علاوه بر این دسته‌بندی‌ها، استفاده از مصالح طبیعی با رنگ روشن (سنگ آهک، گچ، کاهگل سفید) در معماری بومی مناطق خشک ایران نیز می‌تواند در چارچوب بام سرد ارزیابی شود. این روش‌ها با مصالح بوم‌آورد، تطابق اقلیمی و ماندگاری بالا همراه هستند و در مقالاتی مانند اسدالهی و طاهباز (۱۴۰۰) نیز بدان اشاره شده است. در مجموع، طبقه‌بندی فناوری‌های بام سرد نشان می‌دهد که انتخاب نوع مناسب بام باید بر اساس

<sup>1</sup> Classification of Cool Roof Technologies

<sup>2</sup> Conventional Reflective Roofs

<sup>3</sup> Nano-Engineered Coatings

<sup>4</sup> Ventilated Cool Roofs

<sup>5</sup> Super Cool Roofs

<sup>6</sup> Temperature Adaptive Roofs

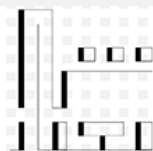


ویژگی‌های اقلیمی، اقتصادی، سازه‌ای و فرهنگی هر منطقه انجام گیرد. چنین نگاهی، در تدوین چارچوب‌های طراحی اقلیمی، نقش کلیدی ایفا خواهد کرد.

جدول ۳ دسته‌بندی فناوری‌های بام سرد

| نوع فناوری                   | ویژگی‌های فنی اصلی                                                                    | مزایا                                                      | محدودیت‌ها                                                      | منابع علمی                                      |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| بام سفید سنتی                | پوشش با رنگ سفید یا روشن، SRI بالا، بازتاب طیف مرئی و مادون قرمز خورشید               | هزینه پایین، اجرای آسان، در دسترس بودن مصالح               | کاهش عملکرد در گذر زمان، حساس به آلودگی سطحی                    | اکبری و لوینسون (۲۰۱۳)؛ راوات و سینگ (۲۰۲۱)     |
| بام‌های نانویی               | پوشش با ذرات $ZnO$ ، $TiO_2$ و فناوری‌های نانو، بازتاب بالا، مقاومت UV و خودتمیزشونده | دوام بالا، مقاومت در برابر آلودگی، عملکرد یکنواخت          | هزینه بالاتر، نیاز به فناوری پیشرفته                            | ژائو و همکاران (۲۰۲۳)؛ جنتل و همکاران (۲۰۱۵)    |
| بام تهویه‌شونده              | لایه هوای میانی، تهویه طبیعی، کاهش انتقال حرارت هدایتی                                | عملکرد بالا در اقلیم خشک، کاهش دمای داخلی، افزایش عمر سازه | نیاز به طراحی مهندسی، اجرای پیچیده‌تر                           | عثمانی و همکاران (۲۰۲۳)؛ اکبری و همکاران (۲۰۰۱) |
| بام فراسرد (Super Cool Roof) | بازتاب $> 95\%$ ، گسیلندگی بالا، دمای سطحی پایین‌تر از دمای محیط                      | عملکرد بسیار مؤثر، مناسب برای اقلیم‌های خشک با تابش شدید   | هزینه بالا، محدود بودن تولید تجاری در مقیاس وسیع                | تیان و همکاران (۲۰۲۳)؛ بنموسا و همکاران (۲۰۲۳)  |
| بام تطبیقی دمایی             | تغییر ویژگی‌های حرارتی با دما، استفاده از پلیمرهای هوشمند یا PCM                      | عملکرد فصلی بهینه، کاهش نیاز سرمایش و گرمایش               | هزینه بالا، توسعه فناوری هنوز در حال پیشرفت                     | کیم و همکاران (۲۰۲۰)؛ تانگ و همکاران (۲۰۲۱)     |
| مصالح بومی روشن (سنتی)       | استفاده از گچ، آهک، خاک سفید، سنگ‌های روشن در معماری بومی                             | هماهنگی با معماری بومی، دسترسی محلی، هزینه پایین           | حساسیت به فرسایش، نیاز به نگهداری، عملکرد وابسته به شرایط اقلیم | رمگاه (۱۳۹۳)؛ اسدالهی و طاهباز (۱۴۰۰)           |





|             |                                |                      |                     |                 |
|-------------|--------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------|
| بام با مواد | استفاده از مواد تغییر فاز برای | کاهش بار پیک سرمایش، | هزینه بالا، نیاز به | جیانگ و همکاران |
| تغییر فاز   | جذب/رهایش حرارت در ساعات       | حفظ دمای یکنواخت در  | عایق‌بندی دقیق      | (۲۰۲۴)؛ گائو و  |
| (PCM)       | پیک                            | شب و روز             |                     | (۲۰۲۲) همکاران  |

## ۲,۵ شکاف‌های پژوهشی و ضرورت مرور سیستماتیک

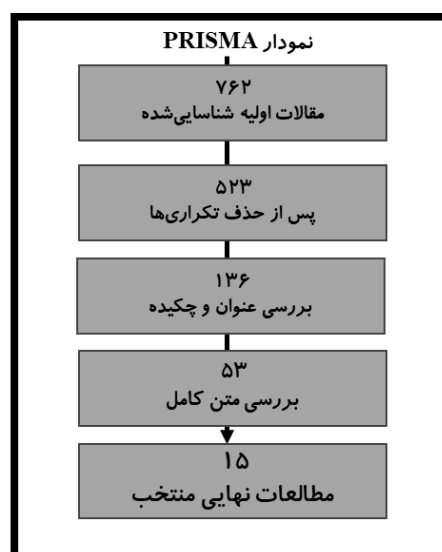
با وجود افزایش چشمگیر مطالعات پیرامون بام‌های سرد در سال‌های اخیر، تحلیل عمیق ادبیات موجود نشان می‌دهد که شکاف‌های تحقیقاتی قابل توجهی در این حوزه، به‌ویژه در زمینه اقلیم گرم و خشک، همچنان وجود دارد. این شکاف‌ها از سطوح نظری و مفهومی تا سطوح کاربردی و اجرایی را در بر می‌گیرند.

- شکاف اول: فقدان تمرکز اقلیمی در بسیاری از مطالعات: بسیاری از پژوهش‌های جهانی بدون در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص اقلیم خشک، به بررسی عمومی عملکرد بام‌های سرد پرداخته‌اند (فنگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۴). این در حالی است که پارامترهایی چون شدت تابش، اختلاف دمای روز و شب، گرد و غبار و آلودگی هوا در اقلیم خشک، تأثیر چشمگیری بر کارایی بام سرد دارند (اولپیان، ۲۰۲۱؛ عثمانی و همکاران، ۲۰۲۳).
- شکاف دوم: نبود تحلیل‌های طولانی‌مدت از دوام و پیری عملکرد: بسیاری از مطالعات تجربی، تنها عملکرد کوتاه‌مدت بام‌های سرد را بررسی کرده‌اند. کاهش بازتابش در اثر آلودگی، تغییر رنگ، فرسایش، و تجمع ذرات از جمله عواملی هستند که به مرور موجب افت عملکرد بام سرد می‌شوند و مطالعات اندکی به این مقوله پرداخته‌اند (لوینسون و همکاران، ۲۰۰۵؛ آگاروال و مولتی، ۲۰۲۴).
- شکاف سوم: فقدان تحلیل اقتصادی جامع: برخی مطالعات مانند راوات و سینگ (۲۰۲۲) به تحلیل اقتصادی در اقلیم‌های خاص پرداخته‌اند، اما در بسیاری از پژوهش‌ها، مقایسه هزینه-فایده بام‌های سرد با سایر استراتژی‌ها (مانند بام سبز یا عایق‌کاری سنگین) صورت نگرفته است. این مسأله به‌ویژه در مناطق با محدودیت منابع، از اهمیت بالایی برخوردار است.
- شکاف چهارم: توجه ناکافی به معیارهای بومی و فرهنگی: در ادبیات داخلی، مسائلی مانند هماهنگی با منظر شهری، فرهنگ نگهداری، زیبایی‌شناسی بام‌ها و تمایل ساکنین کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این موضوع می‌تواند به شکست اجرایی پروژه‌های بام سرد در سطح شهری منجر شود (اسدالهی و طاهباز، ۱۴۰۰).

در چنین شرایطی، انجام یک مرور سیستماتیک ساختاریافته بر اساس چارچوب‌هایی نظیر PRISMA، به منظور شناسایی، دسته‌بندی، و تحلیل انتقادی مطالعات موجود، یک نیاز علمی جدی است. مرور سیستماتیک می‌تواند ضمن پر کردن شکاف‌های مفهومی و کاربردی، شواهد هم‌راستا و متناقض را آشکار کرده و بستر تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد را برای معماران، پژوهشگران، سیاست‌گذاران و مهندسان فراهم آورد (تیان و همکاران، ۲۰۲۳؛ یزدانی و بنشی، ۲۰۲۱).

## ۳. روش شناسی

برای انجام این مطالعه مروری نظام‌مند، چارچوب (PRISMA<sup>۱</sup>) به‌عنوان استاندارد بین‌المللی برای طراحی و گزارش مرورهای سیستماتیک به کار گرفته شد. هدف اصلی از به‌کارگیری این چارچوب، مستندسازی شفاف و بازتولیدپذیر فرآیند شناسایی، غربالگری، ارزیابی، و انتخاب منابع علمی معتبر مرتبط با موضوع بام‌های سرد در اقلیم‌های گرم و خشک بود. جستجوی منابع در پایگاه‌های داده معتبر شامل Scopus، Web of Science، ScienceDirect، SID، و MagIran انجام گرفت. دامنه جستجو شامل مقالات منتشرشده بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ بود. تنها مقالاتی که به زبان فارسی یا انگلیسی نوشته شده و دارای متن کامل قابل‌دسترسی و داوری‌شده (peer-reviewed) بودند، در مرحله بعدی غربالگری وارد شدند. عبارات جستجو ترکیبی از کلیدواژه‌هایی مانند “Energy Efficiency”، “Thermal Comfort”، “Cool Roof”، “Hot and Dry Climate”، و معادل فارسی آن‌ها شامل «بام سرد»، «آسایش حرارتی»، «مصرف انرژی»، و «اقلیم گرم و خشک» بود. ترکیب این واژگان با استفاده از عملگرهای منطقی (AND/OR) و جستجو در بخش‌های عنوان، چکیده و کلیدواژه صورت گرفت. در مرحله نخست، مجموعاً ۷۶۲ مقاله شناسایی شد. پس از حذف تکراری‌ها، ۵۲۳ مقاله باقی ماندند. از این میان، ۱۳۶ مقاله با بررسی عنوان و چکیده وارد مرحله غربالگری اولیه شدند. در مرحله ارزیابی متن کامل، ۵۳ مقاله مورد ارزیابی قرار گرفتند و در نهایت، ۱۵ مقاله با انطباق کامل با معیارهای ورود به‌عنوان منابع نهایی در تحلیل‌های این مطالعه استفاده شدند. نمودار زیر روند انتخاب مقالات را مطابق با چارچوب PRISMA نمایش می‌دهد:



شکل ۱ نمودار تصویری PRISMA

### ۳،۱ معیارهای ورود و خروج مطالعات

معیارهای ورود به مطالعه:

- تمرکز بر فناوری بام سرد در اقلیم‌های گرم یا خشک
- ارائه داده‌های تجربی، تحلیلی یا شبیه‌سازی درباره عملکرد حرارتی یا مصرف انرژی

<sup>۱</sup> Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

- مقالات منتشرشده در ژورنال‌های علمی معتبر
- زبان مقاله انگلیسی یا فارسی، سال انتشار بین ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵

معیارهای حذف:

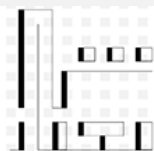
- مطالعات نظری فاقد داده کمی یا کیفی
- پژوهش‌های متمرکز بر اقلیم‌های غیرمرتبط (مرطوب، معتدل یا سرد)
- مقالات کنفرانسی فاقد داوری دقیق
- مطالعات تکراری میان پایگاه‌های مختلف

## ۳,۲ مقالات منتخب نهایی

در جدول زیر، مشخصات ۱۵ مقاله نهایی منتخب که بر اساس معیارهای فوق وارد تحلیل نهایی شدند، ارائه شده است. این مقالات شامل مطالعات داخلی و بین‌المللی با تنوع روش‌شناسی (شبیه‌سازی، میدانی، اقتصادی، تحلیلی) و موضوعی هستند:

جدول ۴ جدول مقالات منتخب نهایی مرور سیستماتیک

| ردیف | نویسندگان               | کشور / منطقه | نوع مطالعه                  | یافته کلیدی                                            |
|------|-------------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1    | (۲۰۱۳) اکبری و لوینسون  | ایالات متحده | تحلیل استاندارد و مرور نظری | توسعه استانداردهای بام سرد در سطح ملی                  |
| 2    | (۲۰۲۳) عثمانی و همکاران | الجزایر      | شبیه‌سازی و میدانی          | کاهش دمای داخلی تا $4.95^{\circ}\text{C}$ در اقلیم خشک |
| 3    | (۲۰۲۳) بنموسا و همکاران | مراکش        | تحلیل عددی مصالح سلولزی     | کاهش مصرف انرژی تا ۴۰٪ با مصالح سلولزی                 |
| 4    | (۲۰۲۳) تیان و همکاران   | چین          | مرور تحولات فناورانه        | معرفی بام‌های تطبیقی و فراسرد                          |
| 5    | (۲۰۲۲) راوات و سینگ     | هند          | تحلیل اقتصادی و عملکردی     | صرفه‌جویی اقتصادی و انرژی در مناطق گرم                 |
| 6    | (۲۰۲۴) جیانگ و همکاران  | چین          | شبیه‌سازی همراه با PCM      | اثروگذاری مثبت PCM در تابستان‌های گرم                  |
| 7    | (۲۰۲۴) وانگ و همکاران   | چین          | تحلیل عملکرد انرژی          | کاهش بار سرمایشی تا ۲۵٪                                |



|    |                         |                     |                             |                                                    |
|----|-------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------|
| 8  | (۲۰۲۳) ژائو و همکاران   | چین                 | تحلیل ضرایب حرارتی          | تحلیل اثر پارامترهای حرارتی سقف بر مصرف انرژی      |
| 9  | (۲۰۲۴) آکاروال و مولتی  | ایالات متحده        | مرور جامع پوشش‌های بام      | تأکید بر مقاومت پوشش و عملکرد بلندمدت              |
| 10 | (۲۰۲۱) یزدانی و بانسی   | ایران               | مقایسه بام سرد و سبز        | برتری بام سرد نسبت به بام سبز در اقلیم خشک         |
| 11 | درویش و همکاران (۱۴۰۰)  | ایران (شهری)        | تحلیل تجربی-عددی بازتاب بام | کاهش ۱۷٪ مصرف انرژی در مسکن مهر شهری               |
| 12 | اسدالهی و طاهباز (۱۴۰۰) | ایران (تهران)       | تحلیل نظری و زیست‌محیطی     | نقش بام سرد در کاهش جزیره گرمایی شهری              |
| 13 | رزمگاه (۱۳۹۳)           | ایران (نامشخص/کوبی) | تجربه رنگ بام در اقلیم کوبی | کاهش محسوس دمای بام با رنگ سفید                    |
| 14 | مولایی و همکاران (۱۳۹۷) | ایران (چند شهر)     | تحلیل تطبیقی در چند اقلیم   | عملکرد بهتر بام سرد در تبریز نسبت به سایر اقلیم‌ها |
| 15 | (۲۰۲۱) النوعیمی و محمد  | عراق                | ارزیابی معماری بام سرد      | کاهش مصرف برق با طراحی اقلیمی بام سرد              |

این مطالعات، نمایانگر طیف گسترده‌ای از فناوری‌ها، اقلیم‌ها، و متدولوژی‌ها هستند و زمینه لازم برای تحلیل جامع و چندلایه را فراهم می‌سازند. در مراحل بعدی مقاله، یافته‌های استخراج‌شده از این مقالات در محورهای اصلی آسایش حرارتی، بهره‌وری انرژی، فناوری‌های بام سرد و چالش‌های اجرایی تحلیل خواهند شد.

#### ۴. یافته‌ها

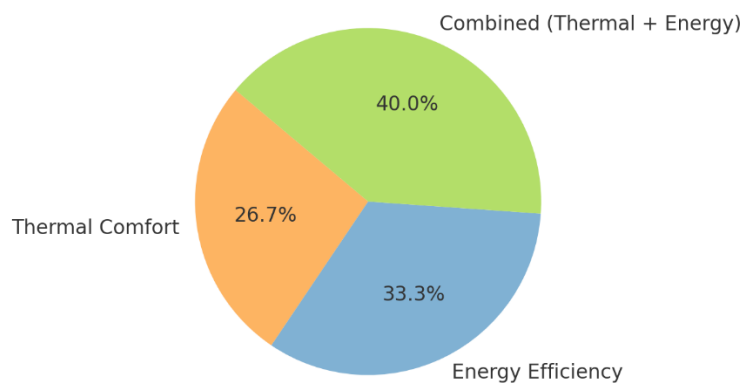
یافته‌های به‌دست‌آمده از مرور سیستماتیک ۱۵ مقاله منتخب، در چهار محور اصلی شامل:

- تأثیر بام‌های سرد بر آسایش حرارتی،
- تأثیر بام‌های سرد بر بهره‌وری انرژی،
- ارزیابی فناوری‌ها و طراحی‌های متنوع بام سرد،
- عوامل مؤثر بر عملکرد بام‌های سرد

سازمان‌دهی شده‌اند. این تقسیم‌بندی، تحلیل مقایسه‌ای یافته‌ها را تسهیل کرده و نقاط اشتراک، تضاد و نوآوری را شناسایی می‌سازد.

نمودار اول:

- ۴۰٪ از مطالعات روی هر دو بُعد آسایش حرارتی و بهره‌وری انرژی تمرکز دارند.
- ۳۳,۳٪ فقط به بهره‌وری انرژی پرداخته‌اند.
- ۲۶,۷٪ صرفاً آسایش حرارتی را تحلیل کرده‌اند.



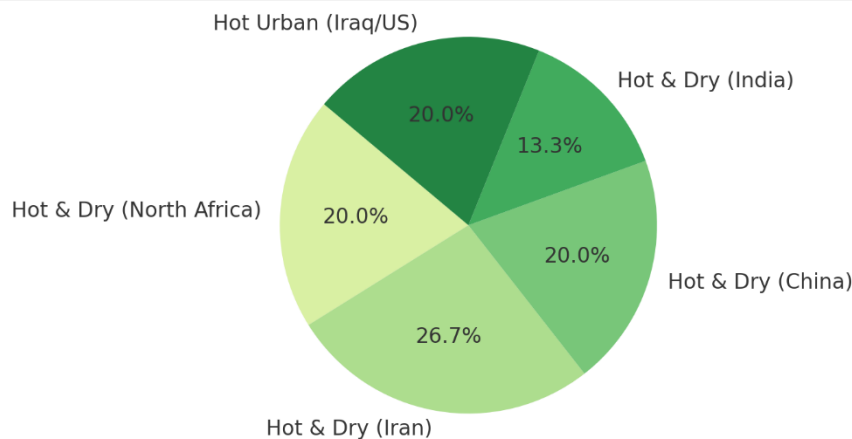
## شکل ۲ توزیع تمرکز عملکرد در مطالعات سقف خنک

نمودار دوم: توزیع مناطق اقلیمی در مطالعات بام خنک

- ۲۶,۷٪ از مطالعات انجام شده در ایران.

مناطق دیگر:

- ۲۰٪: شمال آفریقا (الجزایر، مراکش)
- ۲۰ درصد: چین
- ۲۰٪: مناطق شهری گرم مانند عراق و جنوب آمریکا
- ۱۳,۳٪: هند



شکل ۳ توزیع مناطق اقلیمی در مطالعات بام سرد

#### ۴,۱ تأثیر بام سرد بر آسایش حرارتی<sup>۱</sup>

آسایش حرارتی یکی از شاخص‌های بنیادین در ارزیابی کیفیت محیط‌های داخلی ساختمان‌ها به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک محسوب می‌شود. این شاخص تابعی از چند متغیر محیطی از جمله دمای هوای داخلی، دمای سطوح احاطه‌کننده، سرعت جریان هوا، و رطوبت نسبی است (فنگر، ۱۹۷۰). در چنین اقلیمی که تفاوت دمای روز و شب زیاد، تابش خورشیدی شدید، و رطوبت نسبی بسیار پایین است، کنترل دمای داخلی به‌صورت غیرفعال چالش‌برانگیز بوده و وابستگی به سیستم‌های سرمایشی مکانیکی اغلب اجتناب‌ناپذیر است (اولیبانی، ۱۳۹۰؛ یزدانی و بانسی، ۲۰۲۱). استفاده از فناوری بام سرد، به‌عنوان راهکاری غیرفعال در طراحی اقلیمی، قادر است به‌صورت مؤثر دمای سطحی سقف را کاهش داده و در نتیجه، انتقال حرارت به فضای داخلی را محدود نماید. این فرآیند منجر به کاهش دمای میانگین مؤثر<sup>۲</sup> و در نتیجه بهبود شاخص‌های آسایش حرارتی نظیر  $PMV$  ( $^3$ ) و  $PPD$  ( $^4$ ) می‌شود (تیان و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعات میدانی متعددی اثرگذاری بام سرد را در بهبود آسایش حرارتی در اقلیم گرم و خشک اثبات کرده‌اند. برای نمونه، در پژوهش عثمانی و همکاران (۲۰۲۳)، استفاده از بام تهویه‌شونده سرد در اقلیم بیابانی شهر بیسکرا در الجزایر منجر به کاهش میانگین دمای هوای داخلی در ساعات اوج تابش تا ۴۰۹۵ درجه سانتی‌گراد گردید. این کاهش دما باعث افزایش زمان حضور در منطقه آسایش حرارتی طبق نمودار گیونی<sup>۵</sup> و کاهش ساعات ناراحتی حرارتی شد. همچنین در همین مطالعه، شاخص  $SET^*$ <sup>۶</sup> نیز بهبود یافت که نشان‌دهنده افزایش تطابق حرارتی ساکنان با فضای داخلی است. مطالعه بنموسا و همکاران (۲۰۲۳) نیز تأیید می‌کند که استفاده از پوشش‌های

<sup>1</sup> Thermal Comfort Performance

<sup>2</sup> Mean Radiant Temperature

<sup>3</sup> Predicted Mean Vote

<sup>4</sup> Predicted Percentage of Dissatisfied

<sup>5</sup> Givoni comfort chart

<sup>6</sup> Standard Effective Temperature

سلولزی بازتابنده در سطح بام، علاوه بر کاهش دمای سطحی سقف به میزان ۱۸-۲۲ درجه، باعث کاهش محسوس در دمای هوای زیر سقف و افزایش آسایش در فضای اتاق زیرین می‌گردد. این مطالعه با بهره‌گیری از شبیه‌سازی حرارتی چندلایه، نشان داد که شاخص PPD در روزهای بسیار گرم از بیش از ۴۵٪ به کمتر از ۲۵٪ کاهش می‌یابد که از نظر طراحی حرارتی بسیار قابل توجه است.

در پژوهش داخلی درویش و همکاران (۱۴۰۰)، عملکرد آسایشی بام سرد در مجتمع مسکن مهر شهرری مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه که از داده‌های میدانی و شبیه‌سازی عددی استفاده شده بود، مشخص شد که استفاده از پوشش بام با ضریب بازتاب بیش از ۰.۸، باعث کاهش میانگین دمای هوای داخلی به میزان ۲.۷ درجه و کاهش شاخص PMV به مقدار نزدیک‌تر به صفر (از ۱.۹ به ۰.۸) گردید. این بهبود در منطقه‌ای با تابستان‌های بسیار گرم و بدون رطوبت، نشانه‌ای از تأثیر واقعی بام سرد بر بهبود آسایش حرارتی است. یافته‌های مطالعه جیانگ و همکاران (۲۰۲۴) نیز تأکید می‌کند که استفاده از مواد تغییر فاز (PCM) در ساختار بام می‌تواند با ذخیره حرارت در ساعات روز و آزادسازی آن در ساعات شب، نوسانات دمای داخلی را کاهش داده و شرایط پایدارتر و قابل تحمل‌تری برای کاربران فراهم آورد. این ویژگی، خصوصاً در اقلیم‌هایی که اختلاف دمای شب و روز زیاد است (مانند یزد یا کرمان)، می‌تواند نقش بسزایی در ارتقاء آسایش حرارتی شبانه داشته باشد.

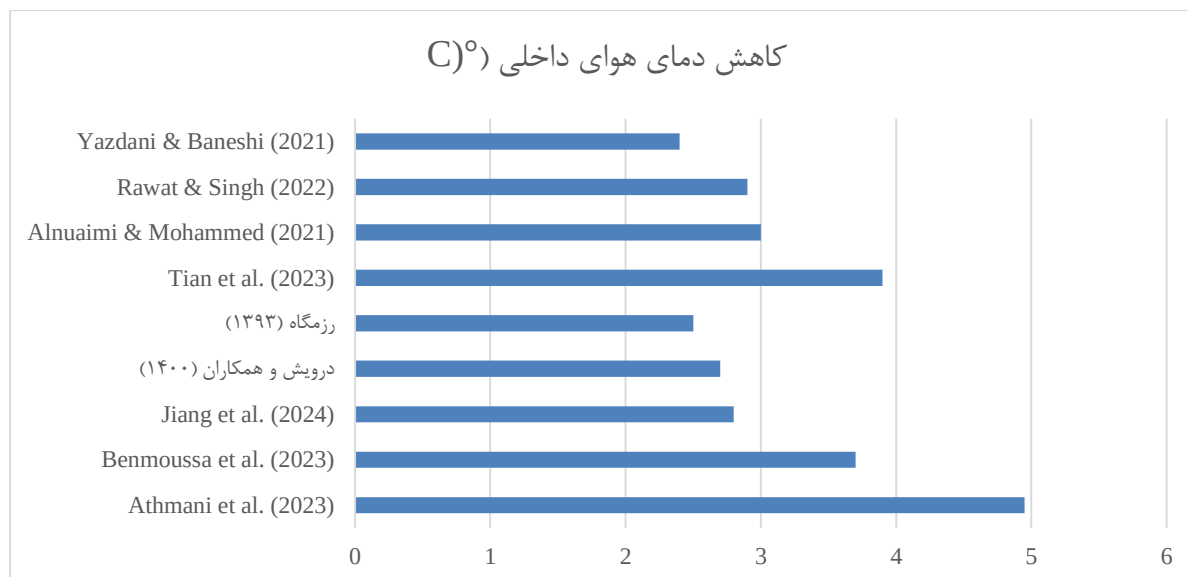
جدول ۵ اثر بام سرد بر آسایش حرارتی در اقلیم گرم و خشک

| مطالعه                  | اقلیم                    | نوع بام سرد           | کاهش دمای هوای داخلی (C°) | بهبود شاخص آسایش حرارتی          |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|
| عثمانی و همکاران (۲۰۲۳) | الجزایر، بیابانی خشک     | بام تهویه‌شونده       | 4.95                      | کاهش SET* و ساعات ناراحتی        |
| بنموسا و همکاران (۲۰۲۳) | مراکش، خشک نیمه‌بیابانی  | پوشش سلولزی بازتابنده | 3.7                       | کاهش PPD به زیر ۲۵٪              |
| جیانگ و همکاران (۲۰۲۴)  | چین، گرم تابستانی        | بام PCM               | 2.8                       | پایداری حرارتی شبانه/روزانه      |
| درویش و همکاران (۱۴۰۰)  | ایران، شهرری (گرم و خشک) | پوشش بازتابنده معمولی | 2.7                       | کاهش PMV از ۱.۹ به ۰.۸           |
| رزمگاه (۱۳۹۳)           | ایران، اقلیم کویری       | رنگ سفید سنتی         | 2.5                       | بهبود شرایط قابل تحمل در تابستان |
| تیان و همکاران (۲۰۲۳)   | چین، گرم و خشک شهری      | فراسرد و تطبیقی       | 3.9                       | افزایش ساعات حضور در منطقه آسایش |



|                        |                       |                      |     |                             |
|------------------------|-----------------------|----------------------|-----|-----------------------------|
| النوعیمی و محمد (۲۰۲۱) | عراق، گرم شهری        | طراحی اقلیمی بام سرد | 3   | کاهش وابستگی به کولر در روز |
| راوات و سینگ (۲۰۲۲)    | هند، اقلیم گرم ترکیبی | پوشش سفید نانویی     | 2.9 | کاهش PMV به زیر ۱،۰         |
| یزدانی و بانشی (۲۰۲۱)  | ایران، چند اقلیم      | مقایسه سرد و سبز     | 2.4 | بهبود مقایسه‌ای شاخص PMV    |

در ادبیات نظری، رابطه بین دمای سطح سقف و آسایش حرارتی داخلی به‌خوبی شناخته شده است. کاهش دمای سقف به‌طور مستقیم باعث کاهش دمای متوسط تابشی در اتاق می‌شود که اثر روانی و فیزیولوژیکی قابل‌توجهی بر کاربران دارد (فنگر، ۱۹۷۰). این اثر در فضاهای با سقف پایین، و در فضاهای خواب که تماس مستقیم بیشتری با سقف دارند، بارزتر است (اکبری و لوینسون، ۲۰۱۳؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۳). از منظر معماری بومی، در اقلیم‌های گرم و خشک ایران، استفاده از مصالح روشن در سقف و بهره‌گیری از بام‌های سفید سنتی (مانند بام‌های کاهگلی یا گچی) در گذشته نیز با هدف تعدیل دمای فضای زیرین انجام می‌گرفته است (رزمگاه، ۱۳۹۳). این رویکرد سنتی که امروزه در قالب بام سرد بازتعریف شده، ریشه در دانش اقلیمی معماری ایرانی دارد.



#### شکل ۴ اثر انواع بام سرد بر کاهش دمای داخلی در اقلیم گرم و خشک

نمودار ارائه‌شده نیز، کاهش دمای داخلی حاصل از هر فناوری را به‌صورت میله‌ای مقایسه می‌کند. این جدول و نمودار، نشان می‌دهند که فناوری‌هایی مانند بام تهویه‌شونده و بام‌های فراسرد یا PCMs، در اقلیم خشک بیشترین اثربخشی را در بهبود شرایط حرارتی داشته‌اند، در حالی که گزینه‌هایی مانند رنگ سفید سنتی نیز همچنان کارایی مناسبی با هزینه پایین دارند. در مجموع، مرور مطالعات نشان می‌دهد که بام سرد نه‌تنها منجر به

کاهش دمای داخلی می‌شود، بلکه به‌صورت مستقیم شاخص‌های آسایش حرارتی را نیز بهبود می‌بخشد. این اثر، در اقلیم‌های گرم و خشک که شدت تابش زیاد و تهویه طبیعی ناکارآمد است، از اهمیت دوچندان برخوردار است. به‌ویژه در ساختمان‌هایی با بام وسیع و جمعیت ثابت (مانند مدارس و درمانگاه‌ها)، می‌توان با به‌کارگیری بام سرد، آسایش حرارتی را بدون افزایش مصرف انرژی مکانیکی تأمین کرد.

## ۴,۲ تأثیر بام سرد بر بهره‌وری انرژی<sup>۱</sup>

در اقلیم‌های گرم و خشک که بیشترین بخش بار انرژی ساختمان به سرمایش اختصاص می‌یابد، بام سرد به‌عنوان راهکاری مؤثر در کاهش مصرف انرژی سرمایشی نقش کلیدی ایفا می‌کند. این فناوری با کاهش جذب تابش خورشیدی در سطح سقف، انتقال حرارت به فضای داخلی را محدود کرده و موجب کاهش نیاز به سیستم‌های مکانیکی سرمایشی می‌شود (اکبری و لوینسون، ۲۰۱۳؛ یزدانی و بانسی، ۱۳۹۰). مطالعه وانگ و همکاران (۲۰۲۴)، در اقلیم گرم خشک چین نشان داد که استفاده از بام سفید با بازتابش بالا منجر به کاهش حدود ۲۵٪ در مصرف انرژی سرمایشی سالانه شده و شاخص انرژی مصرفی ساختمان (EUI) به شکل معنی‌داری کاهش یافته است. همچنین، ژائو و همکاران، (۲۰۲۳) با تحلیل ضرایب حرارتی بام نشان دادند که کاهش رسانایی حرارتی بام و افزایش بازتابش، منجر به کاهش انرژی خالص روزانه در ماه‌های گرم به میزان ۲۲,۵٪ گردیده است. مطالعه بنموسا و همکاران. (۲۰۲۳) عملکرد چشمگیری در کاهش انرژی نشان داده است. در این پژوهش، استفاده از پوشش‌های سلولزی بازتابنده در اقلیم نیمه‌بیابانی مراکش باعث کاهش ۴۰٪ در بار سرمایشی سالانه ساختمان شده و هم‌زمان، مصرف پیک برق را نیز کاهش داده است. این مطالعه یکی از محدود پژوهش‌هایی است که تأثیر بام سرد را در مقیاس سالانه و در ارتباط با بار پیک تحلیل کرده است.

در ایران، در پژوهش درویش و همکاران (۱۴۰۰)، استفاده از پوشش بازتابنده سفید در پروژه مسکن مهر شهرری موجب کاهش ۱۷٪ در انرژی سرمایشی تابستانه شد. این مطالعه با تحلیل انرژی ماهانه و دمای محیط داخلی، اثربخشی بام سرد را در ساختمان‌های اجتماعی تایید کرد. مطالعه راوات و سینگ (۲۰۲۲) در هند به تحلیل فنی-اقتصادی انواع پوشش بام سرد پرداخته و علاوه بر کاهش ۲۵٪ انرژی مصرفی، نرخ بازگشت سرمایه (ROI) بالا برای پوشش نانویی سفید ثبت کرده است. این تحلیل نشان می‌دهد که بام سرد نه تنها از منظر فنی، بلکه از منظر اقتصادی نیز قابل توجیه است. در جدول زیر، خلاصه‌ای از مهم‌ترین یافته‌های مطالعات معتبر مرور شده در زمینه بهره‌وری انرژی ارائه شده است:

جدول ۶- اثر بام سرد بر بهره‌وری انرژی در اقلیم گرم و خشک

| مطالعه                | اقلیم         | نوع بام سرد            | درصد کاهش مصرف انرژی سرمایشی | شاخص‌های انرژی بهبود یافته            |
|-----------------------|---------------|------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| وانگ و همکاران (2024) | چین، گرم خشک  | بام سفید معمولی        | 25                           | کاهش EUI (kWh/m <sup>2</sup> ) سالانه |
| ژائو و همکاران (۲۰۲۳) | چین، نیمه‌خشک | تحلیل ضرایب حرارتی بام | 22.5                         | کاهش انرژی خالص روزانه                |

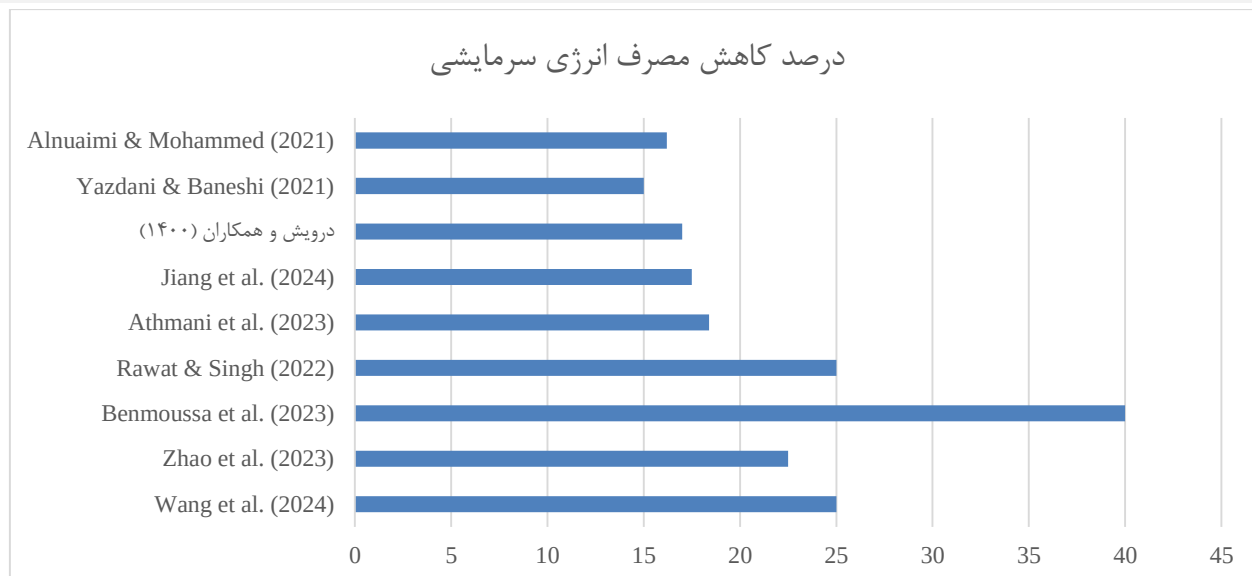
<sup>۱</sup> Energy Efficiency Outcomes

بهار ۱۴۰۴

دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب

|                            |                            |                          |      |                                              |
|----------------------------|----------------------------|--------------------------|------|----------------------------------------------|
| بنموسا و همکاران<br>(۲۰۲۳) | مراکش، خشک<br>نیمه بیابانی | سلولزی بازتابنده         | 40   | کاهش بار سرمایشی سالانه<br>و پیک             |
| راوات و سینگ<br>(۲۰۲۲)     | هند، گرم ترکیبی            | پوشش نانویی سفید         | 25   | نرخ بازگشت اق                                |
| عثمانی و همکاران<br>(۲۰۲۳) | الجزایر، بیابانی<br>خشک    | بام تهویه شونده          | 18.4 | کاهش انرژی مصرفی و<br>انتشار CO <sub>2</sub> |
| جیانگ و همکاران<br>(۲۰۲۴)  | چین، گرم تابستانی          | کاهش مصرف در ساعات اوج   |      |                                              |
| درویش و همکاران<br>(۱۴۰۰)  | ایران، شهری                | پوشش بازتابنده<br>معمولی | 17   | صرفه جویی تابستانه در<br>مصرف برق            |
| یزدانی و بانسی<br>(۲۰۲۱)   | ایران، چند اقلیم           | مقایسه سرد و سبز         | 15   | بهبود عملکرد حرارتی با بام<br>سرد            |
| النوعیمی و محمد<br>(۲۰۲۱)  | عراق، گرم شهری             | طراحی اقلیمی بام<br>سرد  | 16.2 | کاهش برق خانوار در تابستان                   |

همچنین، نمودار زیر به صورت بصری درصد کاهش مصرف انرژی سرمایشی حاصل از استفاده از انواع بام سرد را در مناطق مختلف نشان می دهد:



### شکل ۵ - اثر بام سرد بر بهره‌وری انرژی در اقلیم گرم و خشک

نتایج به‌دست‌آمده از مرور نشان می‌دهد که بام سرد نه تنها در بهبود آسایش حرارتی، بلکه در کاهش مصرف انرژی سرمایشی نیز نقش معناداری دارد. فناوری‌هایی مانند پوشش‌های بازتابنده سلولزی و بام‌های تهویه‌شونده و PCM، در کنار روش‌های سنتی، توانسته‌اند تا ۴۰٪ کاهش در بار سرمایشی ایجاد کنند. این یافته‌ها حاکی از آن است که بام سرد باید به‌عنوان یک گزینه راهبردی در طراحی ساختمان‌های اقلیم خشک مورد توجه سیاست‌گذاران، مهندسان و معماران قرار گیرد.

### ۴,۳ فناوری‌ها و طراحی‌های مورد استفاده<sup>۱</sup>

مرور مطالعات منتخب نشان می‌دهد که بام‌های سرد نه به‌عنوان یک فناوری واحد، بلکه به‌عنوان یک طیف متنوع از راهکارهای طراحی و مصالح قابل تعریف‌اند. این فناوری‌ها در پاسخ به شرایط اقلیمی، منابع در دسترس، ملاحظات اقتصادی، و اهداف زیست‌محیطی در مناطق مختلف تکامل یافته‌اند (اکبری و لوینسون، ۲۰۱۳؛ تیان و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعات مورد بررسی، فناوری‌های بام سرد را در قالب هفت گروه اصلی معرفی می‌کنند:

- بام‌های سفید سنتی<sup>۲</sup>: ساده‌ترین و رایج‌ترین نوع، شامل پوشش‌های رنگ روشن (مانند آهک یا رنگ‌های پایه آب). این نوع بام در بسیاری از پروژه‌های ابتدایی مانند مطالعه رزمگاه (۱۳۹۳) یا بررسی درویش و همکاران (۱۴۰۰) استفاده شده و مزیت اصلی آن، سادگی اجرا و هزینه پایین است. معایب آن شامل کاهش بازتابش به‌مرور زمان در اثر آلودگی سطحی می‌باشد.

<sup>۱</sup> Technological Variants and Designs

<sup>۲</sup> Traditional White Roofs

- فناوری‌های تطبیقی و فراسرد<sup>۱</sup>: مانند آنچه در تیان و همکاران. (۲۰۲۳) آمده، دارای قابلیت تطابق با شرایط حرارتی محیط، با بازتابش بالای ۹۵٪ و گسیلندگی نزدیک به ۱۰ این فناوری‌ها در اقلیم‌های با نوسانات دمایی بالا بسیار مؤثر هستند، هرچند اجرای آن‌ها نیازمند مصالح پیشرفته و هزینه بالاست.
- پوشش‌های نانویی<sup>۲</sup>: همان‌گونه که در پژوهش ژائو و همکاران (۲۰۲۳) و راوات و سینگ (۲۰۲۲) آمده، این پوشش‌ها دارای خاصیت خودتمیزشوندگی، مقاومت UV و دوام سطحی بالا هستند. با اینکه عملکرد انرژی و دوام آن‌ها قابل توجه است، اما هزینه اولیه و نیاز به تولید صنعتی محدودیت ایجاد می‌کند.
- بام‌های سلولزی با بازتاب روزانه: همان‌گونه که در بنموسا و همکاران. (۲۰۲۳) آمده، شامل استفاده از مصالح سبز و زیست‌تخریب‌پذیر با بازتابش خورشیدی بالا. این نوع بام، تلفیقی از مصالح پایدار و عملکرد حرارتی مطلوب است اما ممکن است از نظر پایداری مکانیکی محدود باشد.
- بام‌های دارای مواد تغییر فاز (PCM): در مطالعاتی چون جیانگ و همکاران (۲۰۲۴) نشان داده شده که این نوع بام‌ها با ذخیره حرارت در طول روز و آزادسازی آن در شب، عملکرد حرارتی پایدارتری نسبت به انواع سنتی دارند. با این حال، هزینه‌های تولید بالا و نیاز به عایق‌بندی دقیق، چالش‌هایی برای توسعه آن محسوب می‌شود.
- بام‌های تهویه‌شونده: در مطالعه عثمانی و همکاران. (۲۰۲۳)، به‌کار رفته و شامل طراحی لایه‌ای با فضای تهویه زیر پوشش بام است که موجب کاهش انتقال حرارت هدایتی و افزایش طول عمر بام می‌شود.
- بام‌های با طراحی اقلیمی سنتی: مانند آنچه در پژوهش النوعیمی و محمد (۲۰۲۱) مطرح شده، ترکیبی از مصالح بومی و اصول طراحی سنتی مانند شیب مناسب، مصالح روشن و تهویه طبیعی هستند و در شهرهای سنتی با پذیرش اجتماعی بالا قابل استفاده‌اند.

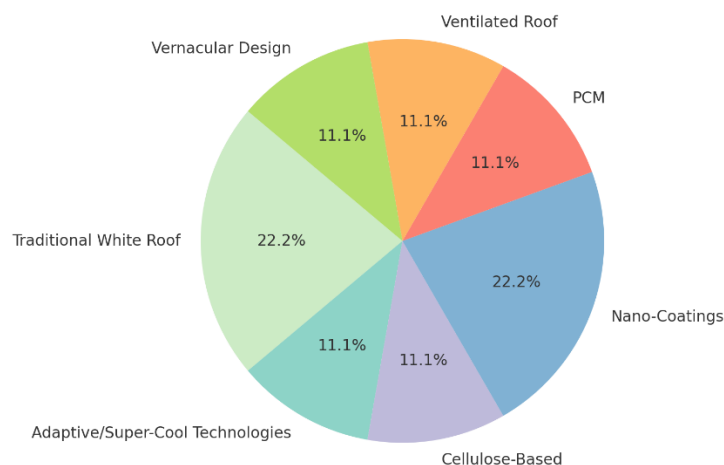
جدول ۷- مقایسه فناوری‌های بام سرد در مطالعات مرور شده

| مطالعه                 | نوع فناوری بام سرد  | ویژگی فنی کلیدی                     | مزایا                   | محدودیت‌ها                 |
|------------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| اکبری و لوینسون (۲۰۱۳) | بام سفید سنتی       | بالا، هزینه پایین SRI               | دسترسی آسان، اجرای ساده | آلودگی سطحی، کاهش بازتابش  |
| (۲۰۲۳) تیان و همکاران  | بام تطبیقی و فراسرد | بازتاب $< 95\%$ ، تنظیم دمای خودکار | عملکرد عالی شب و روز    | پیچیدگی طراحی و اجرای گران |

<sup>1</sup> Adaptive and Super Cool Roofs

<sup>2</sup> Nano-engineered Coatings

|                            |                          |                                                |                                              |                                            |
|----------------------------|--------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|
| بنموسا و همکاران<br>(۲۰۲۳) | سلولزی با<br>تابش روزانه | بازتاب بالا، زیست‌پذیر                         | ترکیب پایداری<br>زیست‌محیطی و کارایی<br>بالا | محدودیت در دسترسی و<br>دوام در بلندمدت     |
| (۲۰۲۳) ژائو و همکاران      | پوشش نانویی<br>حرارتی    | مقاوم در برابر UV،<br>خودتمیزشونده             | دوام بالا و نگهداری آسان                     | هزینه بالاتر از پوشش‌های<br>سنتی           |
| (۲۰۲۲) راوات و سینگ        | پوشش نانویی<br>سفید      | ماندگاری بالا، کاهش گرمای<br>جذب‌شده           | نرخ بازگشت اقتصادی<br>مطلوب                  | نیاز به فناوری صنعتی تولید                 |
| جیانگ و همکاران<br>(۲۰۲۴)  | مواد تغییر فاز<br>(PCM)  | ذخیره و آزادسازی گرما در<br>نوسانات دما        | پایداری در آسایش شب و<br>روز                 | هزینه تولید بالا و نیاز به<br>عایق دقیق    |
| عثمانی و همکاران<br>(۲۰۲۳) | بام تهویه‌شونده          | جریان هوای طبیعی در لایه<br>میانی              | کاهش انتقال حرارت و<br>افزایش دوام           | طراحی پیچیده‌تر و وابسته<br>به اقلیم       |
| النوعیمی و محمد<br>(۲۰۲۱)  | طراحی اقلیمی<br>بومی     | مصالح روشن، تهویه طبیعی،<br>شیب بهینه          | هماهنگ با معماری سنتی<br>و پذیرفته‌شده       | نیازمند دانش بومی و<br>محدود به فرم خاص    |
| رزمگاه (۱۳۹۳)              | رنگ سفید<br>سنتی (کاهگل) | ساده، مقرون‌به‌صرفه، قابل اجرا<br>در بافت سنتی | ارزان و در دسترس                             | اثر محدود در مناطق با<br>گردوغبار و آلودگی |



شکل ۶- پرکاربردترین فناوری‌ها در مطالعات منتخب

نمودار دایره‌ای بالا نشان می‌دهد که پرکاربردترین فناوری‌ها در مطالعات منتخب شامل بام‌های سفید سنتی و پوشش‌های نانویی هستند که مجموعاً بیش از ۴۰٪ از مطالعات را تشکیل می‌دهند. با این حال، فناوری‌های نوظهور مانند بام‌های PCM، تطبیقی و تهویه‌شونده نیز در حال گسترش‌اند و در اقلیم خشک اثربخشی بالایی نشان داده‌اند. در مجموع، انتخاب نوع فناوری بام باید بر اساس شرایط اقلیمی، ویژگی‌های معماری ساختمان، محدودیت‌های اقتصادی، و الزامات اجرایی صورت گیرد. مرور مطالعات نشان می‌دهد که هیچ راه‌حل واحدی برای همه شرایط وجود ندارد، بلکه رویکرد ترکیبی میان سنت و نوآوری در هر منطقه، بهترین نتایج را به همراه خواهد داشت.

#### ۴,۴ عوامل مؤثر بر عملکرد بام سرد<sup>۱</sup>

اثربخشی بام سرد به‌عنوان یک راهکار طراحی غیرفعال نه تنها تابع نوع فناوری و مصالح مورد استفاده است، بلکه به شدت تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی، شرایط اقلیمی، شرایط بهره‌برداری، و نحوه نگهداری بام قرار دارد. تحلیل ۱۵ مقاله منتخب مرور سیستماتیک نشان می‌دهد که عملکرد واقعی بام سرد در شرایط اقلیمی گرم و خشک، تحت تأثیر حداقل پنج عامل اصلی است:

- خواص اپتیکی سطح (ضریب بازتابش و گسیلندگی حرارتی): مطالعات متعددی از جمله اکبری و لوینسون (۲۰۱۳)، وانگ و همکاران. (۲۰۲۴)، و ژائو و همکاران (۲۰۲۳) نشان داده‌اند که دو پارامتر اساسی—ضریب بازتاب خورشیدی (SR) و ضریب گسیلندگی حرارتی (ε)—نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش دمای سطح بام و میزان انتقال حرارت به فضای داخلی دارند. به‌طور خاص، پوشش‌هایی با SR بالاتر از ۰٫۸ و ε بالاتر از ۰٫۹، عملکرد بهینه در اقلیم خشک دارند (ژائو و همکاران، ۲۰۲۳؛ یزدانی و بنشی، ۱۳۹۰).
- دوام و پایداری عملکرد سطح بام در برابر آلودگی و فرسایش: مطالعات مانند آگاروال و مولتی (۲۰۲۴) و بنموسا و همکاران. (۲۰۲۳) به این موضوع اشاره کرده‌اند که آلودگی محیطی (گردوغبار، دوده، باران اسیدی) منجر به کاهش SR و افزایش دمای سطحی بام در طول زمان می‌شود. در مطالعه راوات و سینگ (۲۰۲۲)، اثبات شد که پوشش‌های نانویی به‌دلیل خاصیت خودتمیزشوندگی، مقاومت به UV و دوام سطحی، عملکرد پایدارتری نسبت به پوشش‌های سنتی دارند. این موضوع در پژوهش‌های داخلی مانند رزمگاه (۱۳۹۳) نیز مشهود است که رنگ‌های روشن بومی بدون نگهداری منظم دچار افت بازده می‌شوند.
- ویژگی‌های هندسی و طراحی بام: زاویه شیب سقف، وجود سایه‌انداز، فرم ساختمان و ارتفاع سقف از دیگر پارامترهای مؤثر هستند. تیان و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که بام‌های با طراحی تطبیقی و متحرک بسته به موقعیت خورشید، قابلیت بازتابش بیشتری فراهم می‌کنند. همچنین در عثمانی و همکاران (۲۰۲۳) مشخص شد که بام‌های تهویه‌شونده با ایجاد فضای خالی بین لایه بیرونی و سقف اصلی، نرخ انتقال حرارت هدایتی را تا ۳۵٪ کاهش می‌دهند.
- شرایط اقلیمی محلی (شدت تابش، رطوبت نسبی، باد، گردوغبار): مطالعات انجام‌شده در مناطق متفاوت (الجزایر، مراکش، عراق، هند، چین، و ایران) مانند جیانگ و همکاران (۲۰۲۴) و النوعیمی و محمد (۲۰۲۱) نشان داده‌اند که در اقلیم‌های خشک و با آسمان صاف، تأثیر خنک‌سازی تابشی (Radiative Cooling) به‌مراتب بیشتر از اقلیم‌های مرطوب است. در چنین مناطقی، اختلاف زیاد دمای شب و روز و تابش مستقیم خورشید در روز، عملکرد بام‌های سرد را به حداکثر می‌رساند (اولپیان، ۲۰۲۱).
- نحوه بهره‌برداری و نگهداری بام: یافته‌های اسدالهی و طاهباز (۱۴۰۰) و درویش و همکاران (۱۴۰۰) حاکی از آن است که نگهداری منظم بام، شامل شست‌وشوی سطح، بازسازی پوشش‌ها، و تعمیر شکستگی‌ها می‌تواند عملکرد اولیه بام سرد را حفظ نماید. در مطالعه

<sup>۱</sup> Determinant Factors in Cool Roof Performance

النوعیمی و محمد (۲۰۲۱)، آموزش کاربران ساختمان و اعمال رفتارهای سازگار با اقلیم در بهره‌برداری از بام نیز به‌عنوان یک عامل کلیدی شناسایی شده است.

#### جدول ۸- عوامل مؤثر بر عملکرد بام سرد و مقالات مرجع

| عامل مؤثر                   | توضیح                                                      | مطالعات مرجع                                                                               |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| خواص اپتیکی<br>سطح (SR و E) | تعیین‌کننده اصلی دمای سطح بام و توان<br>بازتاب/گسیلش حرارت | اکبری و لوینسون (۲۰۱۳)، ژائو و همکاران (۲۰۲۳)، وانگ و همکاران (۲۰۲۱) (۲۰۲۴)، یزدانی (۱۳۹۳) |
| دوام و آلودگی<br>سطح بام    | کاهش بازده عملکرد در اثر گردوغبار، باران<br>اسیدی و UV     | (۲۰۲۲) سینگ رواوات، (۲۰۲۳) بنموسا، (۲۰۲۴) آگراوال و مولیتی (۱۳۹۳) رزمگاه                   |
| طراحی بام و<br>تهویه        | فرم سقف، لایه‌های عایق، تهویه زیر بام                      | تین و همکاران (۲۰۲۳)، عثمانی و همکاران (۲۰۲۳)، درویش و همکاران (۱۴۰۰)                      |
| شرایط اقلیمی<br>موضعی       | شدت تابش، آلودگی هوا، رطوبت نسبی،<br>دمای شبانه‌روزی       | (۲۰۲۱) آپویانی، (۲۰۲۱) النوعیمی و محمد، (۲۰۲۴) جیانگ (۱۴۰۰) اسدالهی و طاهباز               |
| بهره‌برداری و<br>نگهداری    | تأثیر رفتار ساکنان، نگهداری دوره‌ای،<br>شست‌وشو و تعمیرات  | درویش (۱۴۰۰)، اسدالهی (۱۴۰۰)، النوعیمی و محمد (۲۰۲۱)، مولایی و همکاران (۱۳۹۷)              |

#### ۵- بحث و تفسیر

تحلیل ۱۵ مطالعه منتخب در این مرور سیستماتیک، اثربخشی بام سرد را به‌عنوان یک راهکار طراحی غیرفعال در بهبود شرایط حرارتی و بهره‌وری انرژی در اقلیم گرم و خشک تأیید می‌کند. با این حال، تفاوت در نتایج حاصل از مطالعات مختلف، نشان از آن دارد که عملکرد بام سرد نه تنها به نوع فناوری بلکه به شرایط اقلیمی، طراحی، مصالح و نحوه نگهداری آن بستگی دارد. این بخش به تحلیل همسویی و واگرایی نتایج و تبیین علل احتمالی آن‌ها می‌پردازد.

#### ۵،۱- همسویی در نتایج: اجماع علمی بر اثربخشی بام سرد

نخستین و مهم‌ترین همسویی در مطالعات، اتفاق‌نظر بر کاهش مصرف انرژی سرمایشی از طریق بام سرد است. تمام مقالات، از جمله وانگ و همکاران (۲۰۲۴)، رواوات و سینگ (۲۰۲۲)، بنموسا و همکاران (۲۰۲۳)، و درویش و همکاران (۱۴۰۰)، کاهش معناداری در مصرف انرژی (بین ۱۵٪ تا ۴۰٪) را گزارش کرده‌اند. این همسویی، مستقل از نوع فناوری (سستی، نانویی، تهویه‌شونده یا PCM) و مکان جغرافیایی، نشان‌دهنده ظرفیت ذاتی بام سرد در کاهش انتقال حرارت تابشی در اقلیم گرم است. از سوی دیگر، نتایج مطالعات عثمانی و همکاران (۲۰۲۳)، جیانگ و همکاران (۲۰۲۴)، و یزدانی و بانشی (۲۰۲۱) بر تأثیر بام سرد بر ارتقای شاخص‌های آسایش حرارتی مانند PPD، PMV و SET\* تأکید دارند. هم‌راستایی یافته‌ها در این حوزه نیز، بام سرد را نه تنها به‌عنوان فناوری صرفاً انرژی‌محور، بلکه در ارتقاء کیفیت زندگی کاربران نیز مطرح می‌سازد.



## ۵,۲- واگرایی در نتایج: نقش عوامل محیطی، اجرایی و مصالح

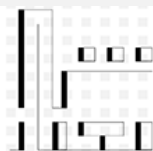
با وجود همسویی‌های کلی، تفاوت‌هایی نیز در شدت اثر و دوام عملکرد گزارش شده است. برای نمونه، بنموسا و همکاران (۲۰۲۳) کاهش ۴۰٪ مصرف انرژی را گزارش کرده‌اند، در حالی که در مطالعه یزدانی و بانسی (۲۰۲۱) این میزان تنها ۱۵٪ بوده است. این تفاوت، ناشی از نوع مصالح به کار رفته، شدت تابش، و نیز ساختار معماری ساختمان‌ها در مطالعات مختلف است. همچنین، مطالعات مانند رزمگاه (۱۳۹۳) و اکبری ولوینسون (۲۰۱۳) نسبت به افت عملکرد بام‌های سفید ساده در اثر آلودگی سطحی هشدار داده‌اند، در حالی که در مطالعاتی مانند ژائو و همکاران (۲۰۲۳) و راوات و سینگ (۲۰۲۲) استفاده از پوشش‌های نانویی با خاصیت خودتمیزشونده پیشنهاد شده است. این واگرایی نشان‌دهنده اهمیت انتخاب فناوری متناسب با شرایط آلودگی محیطی و قابلیت نگهداری بلندمدت است. یکی دیگر از حوزه‌های واگرایی، دوام و پایداری عملکرد است. فناوری‌های نوین مانند (PCM جیانگ و همکاران، ۲۰۲۴) و بام تطبیقی (تیان و همکاران، ۲۰۲۳) علی‌رغم اثربخشی بالا، در برخی مناطق به دلیل پیچیدگی اجرا و هزینه‌های نگهداری، به صورت محدود مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نشان می‌دهد که توسعه صنعتی فناوری بام سرد باید همراه با رویکرد اقتصادی و بوم‌سازگار باشد.

## ۵,۳- تحلیل انتقادی مطالعات ایرانی در مقایسه با مطالعات بین‌المللی

مطالعات ایرانی، از جمله اسدالهی و طاهباز (۱۴۰۰)، درویش و همکاران (۱۴۰۰)، مولایی و همکاران (۱۳۹۷)، و رزمگاه (۱۳۹۳)، غالباً بر فناوری‌های ساده و بومی تمرکز داشته‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که حتی استفاده از رنگ سفید سنتی یا پوشش‌های ساده نیز می‌تواند کاهش دمای داخلی و مصرف انرژی را فراهم آورد. با این حال، فقدان تحلیل جامع اقتصادی، مدل‌سازی دینامیک، و ارزیابی طول عمر عملکرد، از ضعف‌های مشهود در ادبیات داخلی است. در مقابل، مطالعات بین‌المللی مانند راوات و سینگ (۲۰۲۲) یا آگاروال و مولتی (۲۰۲۴) به صورت ساختاریافته به تحلیل هزینه-فایده، سناریوهای اقلیمی، و فناوری‌های پیشرفته پرداخته‌اند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که پژوهش‌های ایرانی باید به سمت استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته، تحلیل طول عمر چرخه‌ای (LCA)، و ارزیابی مالی-اجرایی حرکت کنند تا راهکارهای پیشنهادی قابلیت پیاده‌سازی صنعتی و شهری پیدا کنند.

## ۵,۴- پیشنهاد‌های طراحی و راهبردهای اجرایی

- بر مبنای یافته‌ها و تحلیل‌ها، می‌توان توصیه‌های زیر را برای طراحی بهینه بام سرد در اقلیم گرم و خشک ارائه کرد:
- انتخاب مصالح متناسب با شرایط محیطی: در مناطق گردوغبارخیز، استفاده از پوشش‌های نانویی یا فراسرد با خاصیت خودتمیزشونده توصیه می‌شود.
  - ترکیب فناوری‌های نوین و سنتی: در بافت‌های سنتی، استفاده از مصالح بومی با اصلاحات عملکردی (مانند اضافه کردن لایه تهویه یا پوشش بازتابنده سبک) می‌تواند هم‌پذیری اجتماعی و هم عملکرد اقلیمی را تضمین کند.
  - طراحی معماری یکپارچه: عملکرد بام سرد زمانی بهینه خواهد بود که با سایر عناصر طراحی اقلیمی (جهت‌گیری ساختمان، سایه‌انداز، تهویه طبیعی) هماهنگ شود.
  - برنامه‌ریزی نگهداری بلندمدت: ایجاد پروتکل‌های نگهداری سطح بام، بازبینی دوره‌ای پوشش‌ها، و شست‌وشوی منظم برای حفظ بازتابش الزامی است.
  - تحلیل اقتصادی و مدل‌سازی انرژی پیش از اجرا: استفاده از ابزارهای BIM، مدل‌سازی انرژی، و ارزیابی اقتصادی می‌تواند اثربخشی پروژه را پیش‌بینی و بهینه کند.



## ۶. نتیجه گیری

این مرور سیستماتیک با بررسی ۱۵ مطالعه کلیدی داخلی و بین‌المللی، به تحلیل نقش بام‌های سرد در ارتقای آسایش حرارتی و بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های اقلیم گرم و خشک پرداخت. نتایج حاصل از تحلیل مقایسه‌ای مطالعات نشان داد که بام سرد، یکی از مؤثرترین و در عین حال اقتصادی‌ترین راهکارهای طراحی غیرفعال در مناطق گرم و خشک است که می‌تواند بدون نیاز به فناوری‌های پیچیده، تأثیر چشمگیری بر کاهش دمای داخلی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی سرمایشی، و ارتقای کیفیت محیط زندگی داشته باشد. مطالعات منتخب اثبات کرده‌اند که فناوری‌های مختلف بام سرد از بام‌های سفید ساده گرفته تا سیستم‌های پیشرفته‌تر مانند PCM، تهویه‌شونده، نانویی، و فراسرد می‌توانند به‌طور متوسط دمای داخلی را بین ۲۰۵ تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهند و بار سرمایشی ساختمان را تا ۴۰٪ کاهش دهند. این دستاوردها در اقلیمی که تابستان‌هایی با دمای بسیار بالا و تابش شدید خورشید دارد، از اهمیت حیاتی برخوردار است. در عین حال، این مطالعه تأکید می‌کند که کارایی واقعی بام سرد، وابسته به مجموعه‌ای از عوامل است؛ از جمله خواص اپتیکی سطح، دوام مصالح در برابر آلودگی و تابش، ویژگی‌های طراحی معماری، اقلیم محلی، و نحوه نگهداری و بهره‌برداری. این موضوع نشان می‌دهد که انتخاب بام سرد نمی‌تواند یک تصمیم تکنیکی منفک باشد، بلکه باید در بستر طراحی یکپارچه، با در نظر گرفتن ویژگی‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی انجام گیرد.

## ۷. پیشنهاد برای تحقیقات آتی

بر اساس تحلیل شکاف‌های پژوهشی موجود در ادبیات، پیشنهادهای زیر برای توسعه تحقیقات آینده در زمینه بام سرد در اقلیم‌های گرم و خشک ارائه می‌گردد:

- مطالعات طولانی‌مدت عملکرد: بیشتر مطالعات حاضر، به دوره‌های زمانی کوتاه و فصلی محدود بوده‌اند. پژوهش‌های آینده باید دوام عملکرد حرارتی و انرژی بام سرد را در بازه‌های زمانی چندساله، به‌ویژه با لحاظ آلودگی، فرسایش، و تغییر اقلیم بررسی کنند.
- تحلیل چرخه عمر (LCA): با توجه به دغدغه‌های پایداری، ارزیابی چرخه عمر مصالح و فناوری‌های بام سرد (از تولید تا پایان عمر مفید) در مطالعات آینده باید جایگاه ویژه‌ای داشته باشد.
- توسعه رویکردهای ترکیبی: پیشنهاد می‌شود مطالعاتی با ترکیب فناوری‌های بام سرد و بام سبز (Hybrid Roofs) برای مقایسه عملکرد آن‌ها در اقلیم خشک انجام شود؛ خصوصاً در ابعاد هم‌زمان آسایش حرارتی، زیست‌محیطی و روان‌شناختی.
- شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پارامتریک: استفاده از ابزارهای پیشرفته مدل‌سازی انرژی، مانند Energy Plus یا Design Builder برای شبیه‌سازی رفتار بام سرد در سناریوهای اقلیمی مختلف و طراحی بهینه آن‌ها توصیه می‌شود.
- پژوهش‌های میان‌رشته‌ای با رویکرد اجتماعی-فرهنگی: در مناطق تاریخی یا شهری با بافت سنتی، بررسی هم‌پذیری اجتماعی، دیدگاه کاربران، و تلفیق با معماری بومی می‌تواند مسیر کاربردی‌سازی بام سرد را هموارتر سازد.
- توسعه فناوری‌های بومی‌سازی شده: طراحی مصالح بوم‌آورد با ویژگی‌های بازتابنده و مقاوم، و اجرای آن‌ها با فناوری‌های ساده، می‌تواند به توسعه بام‌های سرد در مناطق کم‌برخوردار کمک کند.

## فهرست منابع

- اسدالهی، شکوه سادات و طاهباز، منصوره، ۱۴۰۰، بام سرد استراتژی مثبت جهت بهبود پارامترهای جزایر گرمایی شهری، مدیریت انرژی و آسایش حرارتی. معماری سبز ۲۵، ۷: (۲۰۲۱) ۱-۱۰.

- مولایی، محمدمهدی، پیله چی ها، پیمان، و افشار، آذر. (۱۳۹۷). ارزیابی انرژی کارایی بام سبز در ایران؛ نمونه موردی: شهرهای تهران، تبریز، رامسر، بندرعباس. مدیریت شهری، ۱۷ (۵۲)، ۳۴-۲۱.
- رزمگاه، فرشاد. (۱۳۹۳). بام خنک: تجربه ای در خنک کردن بام از طریق تغییر رنگ. صفه، ۲۴ (۶۵)، ۳۴-۲۵.
- درویش، امیراصلاح، مدی، و گرجی مهلبانی. (۱۴۰۰). ظرفیت بازتابش خورشیدی سطوح بام در کاهش مصرف انرژی سرمایشی مسکن شهری، مطالعه موردی: مسکن مهر شهرری. فصلنامه علمی پژوهش های بوم شناسی شهری، ۱۰ (۲۰)، ۱۱۱-۱۲۶.
- Aggarwal, C., & Molleti, S. (2024). State-of-the-Art Review: Effects of Using Cool Building Cladding Materials on Roofs. Buildings, 14(8), 2257. <https://doi.org/10.3390/buildings14082257>
- Akbari, H., & Levinson, R. (2013). Evolution of cool-roof standards in the US. Advances in Building Energy Research, 1–32. <https://doi.org/10.1080/17512549.2013.865559>
- Alnuaimi, S. F., & Mohammed, W. M. (2021, February). Living cool: An approach for architectural “cool roof” to decrease the electricity consumption in Iraq. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1076(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1076/1/012016##>
- Athmani, W., Sriti, L., Dabaieh, M., & Younsi, Z. (2023). The potential of using passive cooling roof techniques to improve thermal performance and energy efficiency of residential buildings in hot arid regions. Buildings, 13(1), 21. <https://doi.org/10.3390/buildings13010021>
- Basyouni, Y. A., & Mahmoud, H. (2024). Affordable green materials for developed cool roof applications: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 202, 114722. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114722>
- Benmoussa, Y., Ezziani, M., Djire, A. F., Amine, Z., Khaldoun, A., & Limami, H. (2023). Simulation of an energy-efficient cool roof with cellulose-based daytime radiative cooling material. Materials Today: Proceedings, 72, 3632–3637. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.044##>
- Fanger, P. O. (1970). Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. McGraw-Hill.
- Feng, W., Zhang, Q., Ji, H., Wang, R., Zhou, N., Ye, Q., ... & Lau, S. S. Y. (2019). A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 114, 109303
- Jiang, L., Gao, Y., Zhuang, C., Feng, C., Zhang, X., & Guan, J. (2024). Experiment verification and simulation optimization of phase change material cool roof in summer: A case study of Chongqing, China. Energy, 293, 130613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130613>
- Rawat, M., & Singh, R. N. (2021). Performance evaluation of a cool roof model in composite climate. Materials Today: Proceedings, 44, 4956-4960
- Rawat, M., & Singh, R. N. (2022). Techno-economic analysis of cool roof materials in a composite climatic zone. Materials Today: Proceedings, 52, 1406–1410. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.504>
- Tang, S., Akkurt, N., Zhang, K., Chen, L., & Ma, M. (2021). Effect of roof and ceiling configuration on energy performance of a metamaterial-based cool roof for low-rise office building in China. Indoor and Built Environment, 30(10), 1739-1750
- Tian, D., Zhang, J., & Gao, Z. (2023). The advancement of research in cool roof: Super cool roof, temperature-adaptive roof and crucial issues of application in cities. Energy and Buildings, 291, 113131. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113131>

- Ulpiani, G. (2021). On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework. *Science of the Total Environment*, 751, 141727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141727>
- Wang, Y., Wang, Z. H., Rahmatollahi, N., & Hou, H. (2024). The impact of roof systems on cooling and building energy efficiency. *Applied Energy*, 376, 124339. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124339>
- Yazdani, H., & Baneshi, M. (2021). Building energy comparison for dynamic cool roofs and green roofs under various climates. *Solar Energy*, 230, 764-778 .
- Yazdani, H., & Baneshi, M. (2021). Building energy comparison for dynamic cool roofs and green roofs under various climates. *Solar Energy*, 230, 764-778. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.001>
- Zhao, S., Hai, G., & Zhang, X. (2023). An analysis of the influence of cool roof thermal parameters on building energy consumption based on orthogonal design. *Buildings*, 14(1), 28. <https://doi.org/10.3390/buildings14010028>

## A systematic review of the impact of cool roofs on thermal comfort and energy efficiency of buildings in hot and dry climates

### Abstract

**State the problem :**In hot and arid climates, thermal discomfort and excessive cooling energy demand are major challenges in achieving sustainable building design. Cool roofs, as a passive architectural strategy, reduce roof surface temperature by reflecting solar radiation, thus improving indoor thermal comfort and energy efficiency. **Objective:** Aim: The aim of this article is to provide a systematic review of international and domestic research in this field. This study presents a systematic review of literature published between 2000 and 2025 on the impacts of cool roofs on thermal comfort and energy performance of buildings in hot and dry

climates. and "What factors (materials, design, location, maintenance) play a role in its effectiveness?" **Research method** A comprehensive search was conducted in Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SID, and MagIran databases, and following PRISMA guidelines, 15 studies were selected for in-depth analysis. Results reveal that cool roofs can reduce indoor air temperatures by up to 5°C and cooling energy consumption by 15–40%. A wide range of technologies were analyzed—from traditional white surfaces and nanocoatings to advanced PCM and ventilated systems—showing varied effectiveness depending on climatic, material, and maintenance conditions. **Tips** The study critically evaluates aligned and divergent findings across the literature, identifies key influencing factors, and proposes directions for future research. **Conclusion:** This review provides a practical reference for architects, engineers, and energy policymakers engaged in climate-responsive design in arid regions.

### Keywords

Cool roof, Thermal comfort, Energy efficiency, Hot and dry climate, Passive design, Systematic review