# ارزیابی میزان کارایی سامانه‌های سرمایش غیر فعال در اقلیم گرم و خشک ایران

## (مطالعه موردی: دو شهر یزد و اصفهان)

الهام فلاح [۱]، شاهین حیدری [۲]، مهدی فاضلی [۳]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۱/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۴/۰۷

**چکیده:**

یکی از مهمترین عوامل آلوده کننده محیط زیست در جهان و بخصوص در کشور ما که بخش اعظم آن را مناطق گرم و خشک تشکیل می‌دهد، سیستم‌های تهویه و سرمایش است. در این راستا، سامانه‌های سرمایش غیر فعال همواره نقش مؤثری در تأمین آسایش و سلامت ساکنین و کاهش مصرف انرژی داشته است. مقاله پیش رو در پی دستیابی به بهترین تدابیر سرمایش غیر فعال در مسکن شهرهای حاشیه کویر است. بنابراین، شهرهای یزد و اصفهان به عنوان نمونه موردی انتخاب شده و میزان کارایی سامانه‌های سرمایش غیر فعال در این دو شهر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. راهبرد اصلی این پژوهش توصیفی- تحلیلی است. برای به دست آوردن میزان کارایی سامانه‌ها، شرایط آسایش محیطی بنا قبل و بعد از استفاده از این سامانه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس بر مبنای تحلیل‌های صورت گرفته برای هر سامانه در ماه‌های مختلف سال و با مقایسه تطبیقی نتایج، سامانه‌های با حداکثر کارایی برای هر شهر معرفی شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که سرمایش تبخیری غیر مستقیم کاراترین سامانه در گرم‌ترین ماه‌های سال برای اقلیم گرم و خشک (B) است و پس از آن تهویه شبانه برای اصفهان و سایر شهرهای با اقلیم Bsk و سرمایش تبخیری مستقیم برای یزد و سایر شهرهای با اقلیم Bwh پیشنهاد مناسبی می‌باشد.

**کلمات کلیدی:**

اصفهان، اقلیم گرم و خشک، سامانه‌های سرمایش غیر فعال، سامانه کارا، یزد

۱) دانشجوی دکتری معماری، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) Elhamfallah@ut.ac.ir
۲) استادیار دانشگاه تهران، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا Shahin-heidari@yahoo.com
۳) فارغ االتحصیل ارشد معماری، دانشکده معماری، دانشگاه علم و صنعت Mahdifazeli7@gmail.com

**مقدمه**

امروزه حفظ منابع انرژی، جلوگیری از آلودگی زمین و محیط زیست، کاهش میزان مصرف سوخت‌های فسیلی و هم‌زیستی با شرایط طبیعی و اقلیمی از جمله مهم‌ترین اهداف در معماری و شهرسازی است. [۱] طبق پژوهش‌های صورت گرفته، ۴۰ درصد از کل انرژی‌های تولیدی در جوامع توسعه یافته صرف بخش ساختمان می‌شود و بخش اعظم آن مربوط به دستگاه‌های تهویه مطبوع است که این رقم در کشورهای در حال توسعه، افزایش چشمگیری دارد. گذشته از مساله مصرف انرژی و هزینه‌های سنگین مربوط به آن، معضل آلودگی ناشی از کلروفلروکربن استفاده شده در صنعت تهویه و تبرید، یکی از خطرناک‌ترین مضرات این سامانه‌ها محسوب می‌شود. [۳] از جمله اقداماتی که می‌توان در راستای کاهش اثرات نامطلوب ناشی از سیستم‌های سرمایش و تهویه انجام داد، بهره‌گیری از سامانه‌های سرمایش غیر فعال در طراحی بنا است. این سامانه‌ها ارزان‌ترین روش خنک کردن بناها محسوب می‌شوند و کمترین اثرات تخریب محیط زیست را دارند. [۳] در این راستا، پژوهش‌های متعددی در سراسر دنیا به منظور بهره‌گیری از این سامانه‌ها در معماری صورت گرفته است. از جمله آنها پژوهشی است که کارایی سامانه سرمایش تبخیری مستقیم به وسیله استخر روی بام را در یک ساختمان در بغداد مورد مطالعه قرار داده است. [۱۰] در پژوهشی دیگر که بر روی خانه‌های شیراز انجام شده است، تعدادی از سیستم‌های سرمایش تبخیری غیر مستقیم مورد مطالعه قرار گرفته و سه روش استخر آب روی بام، افشاندن آب بر روی بام و استفاده از صفحات منعکس کننده با یکدیگر مقایسه شده است. [۱۶] مقاله دیگری، راهکارهای مختلف سرمایش ایستا را در سالن یک سینما مورد ارزیابی قرار داده و سامانه‌ای متشکل از بادگیر و حوضچه‌های آب بر روی بام را سامانه‌ای با بالاترین کارایی معرفی کرده است. [۱۸] در پژوهش دیگری نیز تهویه شبانه به وسیله دودکش خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفته است. [۱۵] پژوهش‌های معرفی شده و اکثر مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است، یک نوع سامانه را در یک ساختمان خاص مورد ارزیابی قرار داده‌اند. لذا با توجه به اینکه پژوهش‌های مختلف به صورت موردی، راهکارهای مختلف را ارزیابی کرده‌اند، لازم است این سامانه‌ها به صورت جامع و بر اساس کارایی با یکدیگر نیز مقایسه گردند. علاوه بر آن، با توجه به ارتباط عمیق سامانه‌های غیر فعال با اقلیم منطقه [۶]، لازم است که آنها به صورت دقیق‌تر و در خرد اقلیم‌های مختلف یک اقلیم مشخص مورد ارزیابی قرار گیرند. در این راستا، نرم‌افزارهای تحلیلی می‌توانند بخش زیادی از این وظیفه را بر عهده گیرند. [۲۲] پژوهش حاضر در تلاش برای دستیابی به بهترین تدابیر تأمین سرمایش غیر فعال در مسکن شهرهای حاشیه کویر است. بنابراین، ابتدا سامانه‌های غیر فعال و اقلیم مورد نظر معرفی شده،سپس شرایط آسایش محیطی قبل و بعد از استفاده از این سامانه‌ها با استفاده از نرم افزار ودرتول[1] در هر شهر مورد بررسی قرار گرفته و میزان کارایی آنها در دو شهر مورد نظر، ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شده است. در پایان، بر مبنای نتایج بدست آمده از تحلیل‌های صورت گرفته، سامانه‌های با حداکثر کارایی در هر شهر معرفی شده است. پژوهش حاضر از دو جنبه سودمند است، از یک سو، می‌توان تدابیر بدست آمده از پژوهش را در طراحی مسکن همساز با اقلیم در این دو شهر و سایر شهرهای با اقلیم

1) Weather tool

مشابه، مورد استفاده قرار داد. از سوی دیگر، کاربست روش پژوهش می‌تواند به ارائه تدابیر و الگوهای مناسب برای اقلیم‌های دیگر منجر گردد.

## روش تحقیق و ابزار اندازه‌گیری

پژوهش حاضر در محدوده پژوهش‌های نظری- کاربردی قرار دارد. راهبرد اصلی این پژوهش توصیفی- تحلیل[1] است. از این رو، ابتدا با استفاده از نرم افزار ودرتول، داده‌های پژوهش به دست آمده و مورد ارزیابی کمی قرار می‌گیرند. سپس به روش توصیفی- تحلیلی و با مقایسه تطبیقی به تحلیل نتایج پرداخته و بر مبنای استدلال منطقی، سامانه‌های با حداکثر کارایی برای هر شهر معرفی می‌گردند. البته لازم به ذکر است که در این پژوهش، سامانه‌ها به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته و اثر ترکیبی آنها در کنار یکدیگر، موضوع این مطالعه نمی‌باشد. برای انجام پژوهش از نرم افزار ودرتول استفاده شده است که یک نرم افزار تحلیل اقلیم بوده و بر مبنای نمودار سایکرومتریک (زیست اقلیم ساختمانی) داده‌ها را تحلیل می‌کند. فایل اقلیمی مورد نیاز، به عنوان اصلی‌ترین داده ورودی نرم افزار ودرتول، از طریق نرم افزار متئونورم[2] تهیه شده است. مدل آسایش در نظر گرفته شده برای نرم افزار نیز مدل آسایش اشری [۸] می‌باشد. بر اساس این مدل، نرخ لباس افراد در تابستان در فضای مسکونی حدود ۰,۵ Clo در نظر گرفته شده است. نرخ فعالیت نیز بر اساس این استاندارد به طور متوسط، ۱,۲ MET در نظر گرفته شده که متوسطی از حالت نشستن یا انجام فعالیت سبک است. [همان]. تحلیل‌های صورت گرفته در نرم افزار ودرتورل می‌تواند میزان کارایی سامانه در اقلیم مورد نظر را مشخص نماید و میزان کارایی سامانه نشان می‌دهد که استفاده از یک سامانه در ساختمانی در این اقلیم، تا چه میزان می‌تواند شرایط آسایش را تأمین کند. همچنین لازم به توضیح است که نمودارهای خروجی نرم افزار ودرتول، بیان درصدی از محدوده کارایی سامانه‌ها در نمودار سایکرومتریک (زیست اقلیمی ساختمان) می‌باشد.

### اقلیم مورد مطالعه

اقلیم مورد نظر این مقاله، گرم و خشک است که بر اساس دسته بندی کوپن B نامیده می‌شود. در این اقلیم معمولا رطوب نسبی هوا زیر ۴۰ و ۳۰ درصد و کمتر از رطوبت مورد نیاز انسان است. ( انسان بین ۳۰ تا ۶۵ درصد رطوبت نسبی نیاز دارد). بر اساس معیارهای دسته بندی کوپن، اقلیم شهر اصفهان Bsk است که منطقه نیمه گرم و خشک محسوب می‌شود. در این مناطق، میانگین دمای سالانه کم‌تر از ۱۸ درجه سانتی گراد است و خشکی هوا به اندازه‌ای زیاد نیست که بیابان ایجاد کند. بنابراین، در این منطقه می‌توان شاهد پوشش گیاهی علفی نیز بود. اقلیم یزد نیز Bwh است که منطقه کویری و خشک نامیده می‌شود. در این مناطق، میانگین دمای سالانه مساوی یا بیشتر از ۱۸ درجه سانتی‌گراد است که حیات را برای بسیاری از گیاهان غیر ممکن می‌سازد. [۱۲]

---

1) Descriptive-Analytical

۲) Meteonorm : متئونورم نرم افزار قدرتمندی است که برای ساخت داده‌های اقلیمی بسیاری از شهرها و نقاط جهان به کار می‌رود.

### انواع سامانه‌های غیر فعال

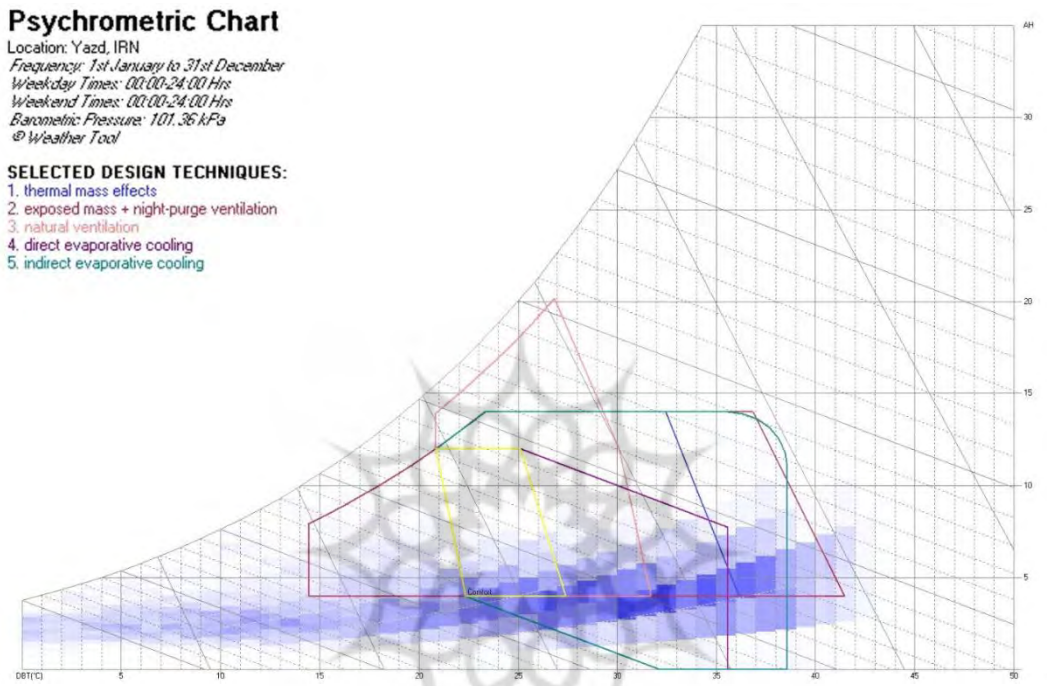
برای دستیابی به آسایش حرارتی در تابستان به گونه‌ای پایدارتر می‌بایست از رویکرد سه مرحله‌ای در طراحی استفاده نمود. مرحله اول پرهیز از گرماست. در این سطح، طراح هر کار ممکنی را برای به حداقل رساندن جذب گرما در ساختمان انجام می‌دهد. اما از آنجا که پرهیز از گرما برای پایین نگه داشتن دما در تمام تابستان کافی نیست، مرحله دوم به نام سرمایش ایستا مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۱۳] استفاده از سامانه‌های غیر فعال برای تأمین گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها راهکار جدیدی نیست و طی قرن‌های متمادی بشر به شیوه‌های مختلف از آنها استفاده کرده است. جذب مستقیم نور خورشید از طریق یک پنجره معمولی با جهت‌گیری مناسب، ساده‌ترین نوع این سامانه‌هاست. این سامانه‌ها که در مقابل سامانه‌های پویا به کار می‌روند، هزینه کمتر و نیاز کم‌تر به نگهداری دارند و علاوه بر آن، قابل اطمینان‌تر هستند. در این سامانه‌ها، گرمایش، سرمایش و روشنایی مورد نیاز برای ایجاد آسایش کالبدی در بنا از منابع طبیعی و تجدید پذیر انرژی تأمین می‌شود. [۶] البته امروزه در سیستم‌های غیر فعال امکان دارد از تجهیزات مکانیکی بسیار ساده مانند فن و پمپ هم استفاده شود که انرژی بسیار اندکی مصرف می‌کنند. [۱۳] در ادامه، با توجه به گستردگی اقلیم گرم و خشک و اهمیت سرمایش فضا در ایران و در راستای اهداف پژوهش، کارایی سامانه‌های سرمایش غیر فعال در هریک از شهرهای مورد نظر ارزیابی می‌شود.

### معرفی سامانه‌های سرمایش غیرفعال مورد مطالعه در پژوهش

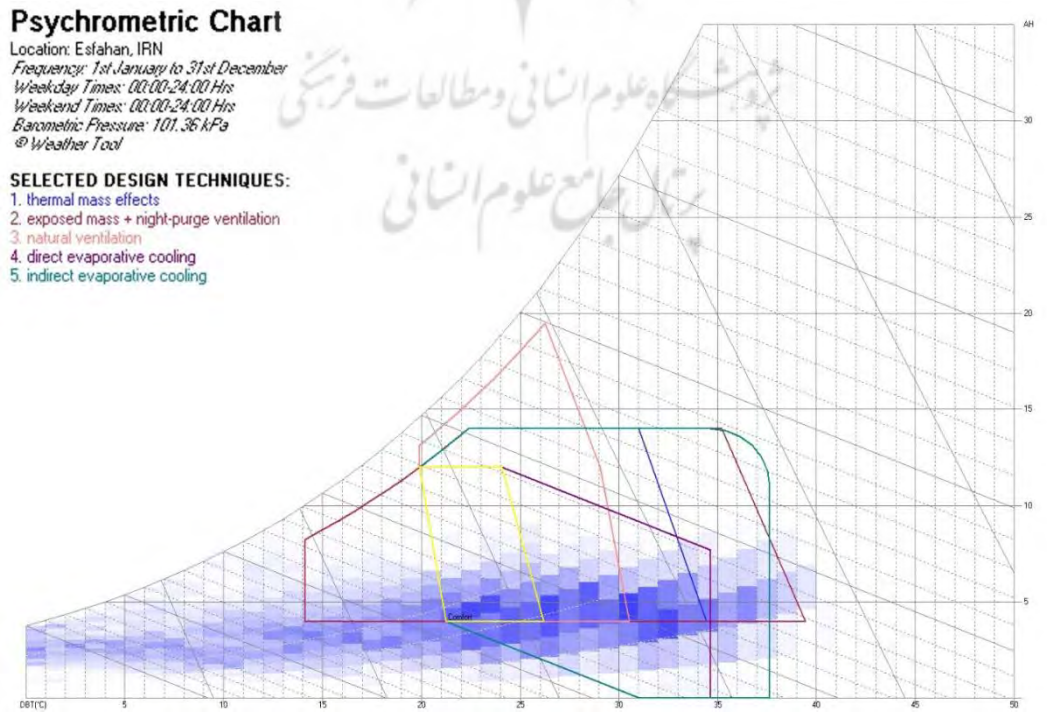
سامانه‌های سرمایش غیر فعال که ارزان‌ترین روش خنک کردن بناها می‌باشند کم‌ترین اثرات تخریب محیط زیست را داشته و بهره‌وری ساختمان را از طریق کاهش جذب گرما از محیط خارج و تسهیل از دست دادن گرما توسط منابع طبیعی خنک کننده به حداکثر می‌رسانند. [۳] سرمایش غیر فعال تا حد امکان از نیروها، انرژی‌ها و جاذب‌های گرمایی طبیعی استفاده می‌کند. اما در برخی موارد پنکه و پمپ‌های بسیار ساده‌ای نیز برای آنها به کار برده می‌شود که در این صورت، سامانه هیبریدی (ترکیبی) نامیده می‌شوند. [۱۳] از آنجایی که سامانه‌های مورد بحث در این مقاله ممکن است در مواردی فقط از پمپ‌ها و پنکه‌های کوچک و کم انرژی بهره برند، این سامانه‌ها نیز در گروه ایستا گنجانده شده‌اند. در این بخش با توجه به داده‌های نرم افزار ودرتول، پنج سامانه سرمایش غیر فعال در شهرهای مورد نظر ارزیابی شده است که عبارتند از تهویه شبانه[۱] ، تهویه طبیعی در طول روز[۲] ، سرمایش تبخیری مستقیم[۳]، سرمایش تبخیری غیر مستقیم[۴] و اثر جرم حرارتی[۵]. در شکل‌های (۱) و (۲) می‌توان تأثیر استفاده از این سامانه‌ها را بر افزایش محدوده آسایش ساکنان در شهر یزد و اصفهان مشاهده کرد.

---

1) Exposed Mass+Night Purge Ventilation
2) Natural Ventilation
3) Direct Evaporative Cooling
4) Indirect Evaporative Cooling
5) Thermal Mass Effects




**شکل ۱) تاثیر سامانه‌های سرمایشی غیر فعال بر افزایش محدوده آسایش ساکنان در شهر یزد [۲۱]**




**شکل ۲) تاثیر سامانه‌های سرمایشی غیر فعال بر افزایش محدوده آسایش ساکنان در شهر اصفهان [۲۱]**

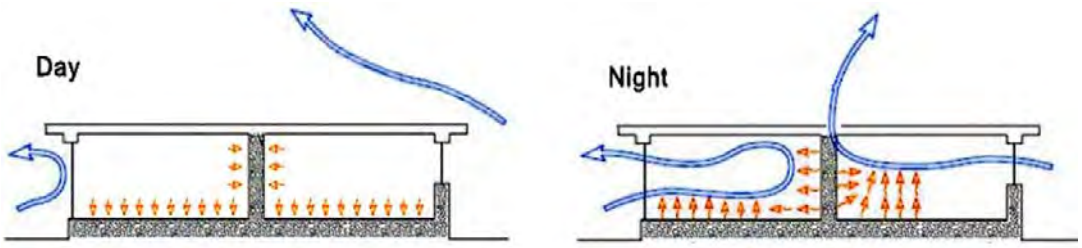
با توجه به شکل‌های (۱) و (۲) می‌توان مشاهده کرد که سامانه‌های مذکور در اغلب اوقات سال با یکدیگر همپوشانی دارند. بنابراین کاربست تمامی سامانه‌های مذکور برای یک اقلیم خاص و برای تمامی بناهای آن اقلیم، توصیه نمی‌گردد و این امر علاوه بر صرف هزینه زیاد، ممکن است در کاربری فضا تداخل ایجاد نماید. [۲۲] از این رو در ادامه در راستای اهداف پژوهش و جهت دستیابی به کاراترین سامانه‌ها، شرایط آسایش محیطی قبل و بعد از استفاده از سامانه‌های مذکور مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرند تا میزان کارایی سامانه درماه‌های مختلف سال به دست آید.

## سرمایش از طریق تهویه

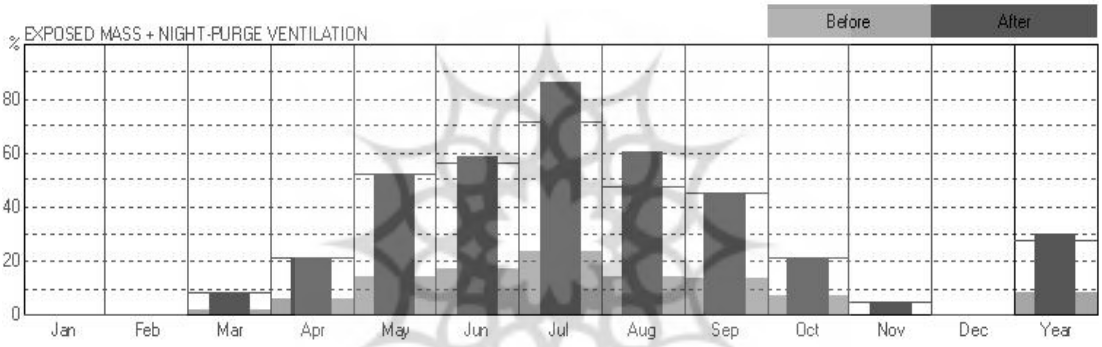
اساس سرمایش از طریق تهویه جابجایی هواست که با افزایش قدرت تبخیر باعث ایجاد سرما می‌شود. در کاربردهای غیر فعال، حرکت هوا یا به وسیله باد یا با استفاده از اثر دودکشی تأمین می‌شود و در سامانه‌های ترکیبی از پنکه برای کمک به جریان هوا استفاده می‌شود. تهویه با تخلیه هوای گرم و تعویض آن با هوای خنک‌تر خارج و نیز هدایت جریان هوا به سمت ساکنان با ترکیبی از جابه‌جایی و تبخیر سبب ایجاد سرما می‌شود. [۱۳] در این سامانه باید الگوی جریان هوا در داخل و خارج ساختمان را مورد توجه قرار داد. بنابراین، باید به نحوه استقرار بنا، فرم و جهت‌گیری، آرایش درون ساختمان و شاخصه‌های پیرامونی و همچنین فرم ساختمان توجه نمود [۵]. به صورت کلی، تهویه به دو صورت تهویه شبانه و روزانه انجام می‌شود که هریک تدابیر خاص خود را می‌طلبد.

## تهویه شبانه

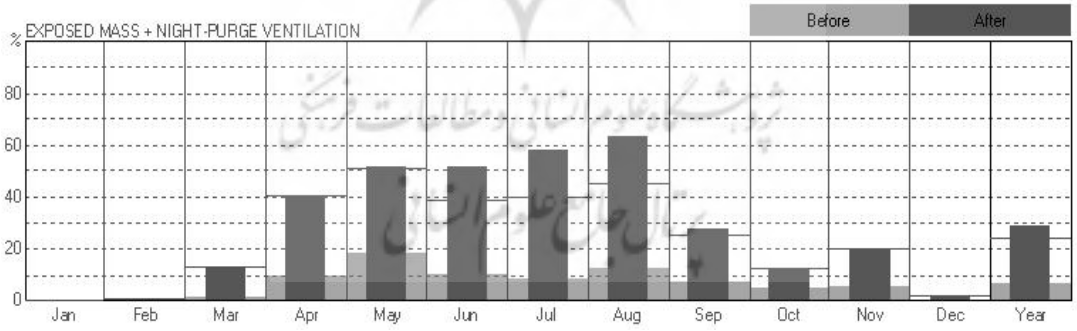
استفاده از سامانه تهویه شبانه به معنی استفاده از هوای خنک شب جهت تأمین آسایش روز می‌باشد (شکل ۳). بر این اساس، در طول روز بازشوها بسته‌اند و مانع ورود هوای گرم به داخل می‌شوند و شب‌ها درحالی که هوا خنک است، بازشوها باز می‌شوند تا جداره‌های داخل بر اثر جریان هوا خنک شوند. برای استفاده از این روش، لازم است دیوارهای داخلی از مصالح با جرم حرارتی بالا ساخته شوند. [۱۳] دمای پایین جداره‌ها در طول روز گرمای محیط را جذب کرده و سبب کاهش دمای داخل می‌گردد. بنابراین، نتیجه‌گیری مطلوب از این راهکار نیازمند استفاده از مصالح با توان ذخیره حرارتی بالا در داخل فضاها می‌باشد. [۷] این راهبرد سرمایشی در اقلیم‌های گرم و خشک به دلیل دامنه وسیع نوسان دمای روز و شب که معمولا بیش از ۳۰ درجه فارنهایت می‌باشد، بهترین عملکرد را دارد [۱۳]. همانطور که در شکل (۴) نیز مشهود می‌باشد، این راهکار برای شهر اصفهان می‌تواند در ماه جولای (تیر و مرداد) که گرمترین ماه‌های سال در این شهر است، شرایط آسایش محیطی ساکنان را تا ۶۰ درصد ارتقا دهد. برای یزد نیز در ماه آگوست (مرداد، شهریور) شرایط آسایش محیطی را تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد. (شکل ۵)




**شکل ۳) در طول روز مصالح داخلی گرمای داخل را جذب می‌کنند و در طول شب به محیط پس می‌دهند. [۱۹]**




**شکل ٤) اثر تهویه شبانه در شهر اصفهان. [۲۱]**



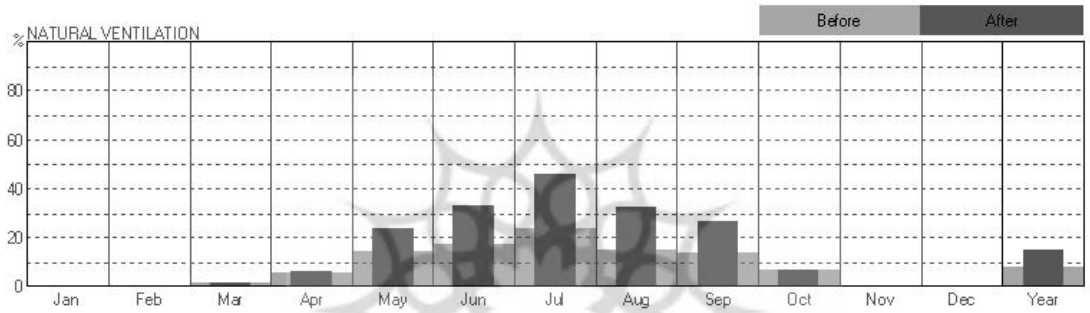

**شکل ٥) اثر تهویه شبانه در شهر یزد. [۲۱]**

## تهویه طبیعی

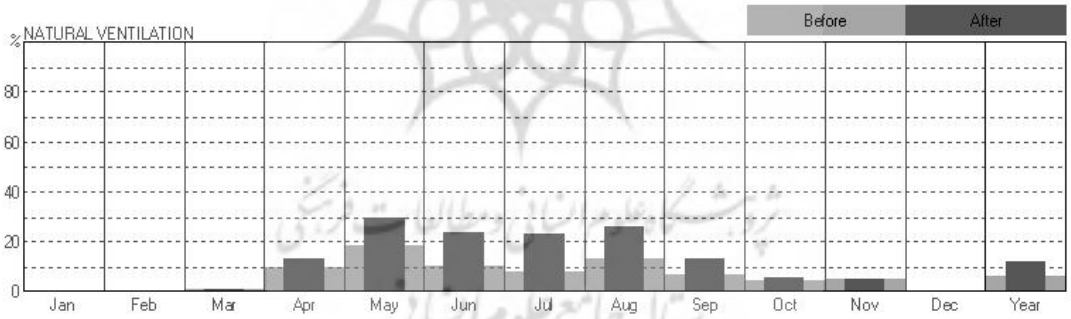
تهویه طبیعی روش بسیار ساده‌ای است که با باز کردن بازشوها برای ورود نسیم خنک برای کاهش گرما امکان‌پذیر است. البته کارایی این روش بستگی زیادی به میزان رطوبت نسبی محیط دارد[۱]. تهویه طبیعی معمولا زمانی مناسب است

۱) برای استفاده از این سامانه در طراحی خانه باید به اثر ناودانی تهویه هوای داخل توجه داشت. این شاخص به بررسی نسبت میان هوای ورودی و خروجی می‌پردازد. در مجتمع‌های مسکونی تنها در صورتی می‌توان به تهویه مطلوب فضاهای داخل در تمامی طبقات دست یافت که بازشوهای طبقات بالاتر به میزان مناسبی وسیع‌تر از طبقه زیرین خود باشد. در غیر این صورت، هوای تازه از اتاق‌های طبقات پایین وارد شده و از اتاق‌های طبقات بالا خارج می‌شود. [۱۰]

که دما و رطوبت داخلی بالاتر از مقادیر خارجی آنهاست [۱۳]. با توجه به نمودار، این سامانه برای اصفهان در ماه جولای (تیر و مرداد) حداکثر کارایی را دارد و شرایط آسایش محیطی را تا ۲۰ درصد افزایش می‌دهد. اما برای یزد از ماه می تا آگوست (اردیبهشت تا شهریور) که گرمترین ماه‌های سال است، کارایی نسبتا یکسانی داشته و شرایط آسایش را تنها تا ۱۰ درصد افزایش می‌دهد.




**شکل ٦) اثر تهویه طبیعی در شهر اصفهان. [۲۱]**




**شکل ۷) اثر تهویه طبیعی در شهر یزد. [۲۱]**

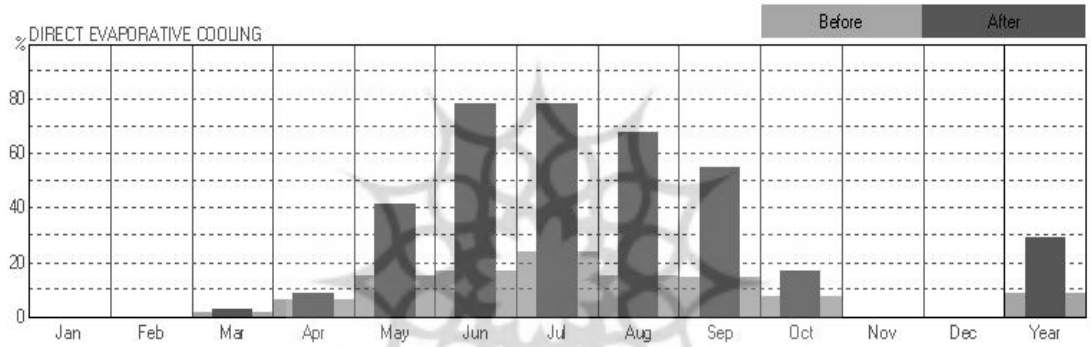
## سرمایش تبخیری

تبادل گرمای هوا، با گرمای نهان قطرات آب در سطوح مرطوب، اساس کار سرمایش تبخیری است. دراین روش می‌توان از تبخیر سطوح مرطوب، برای سرمایش هوای ساختمان، به صورت مستقیم و غیر مستقیم استفاده کرد. سامانه سرمایش تبخیری در رطوبت کم‌تر از ۷۰ درصد (مناطق گرم و خشک) کارایی بالاتری دارد.[۵]

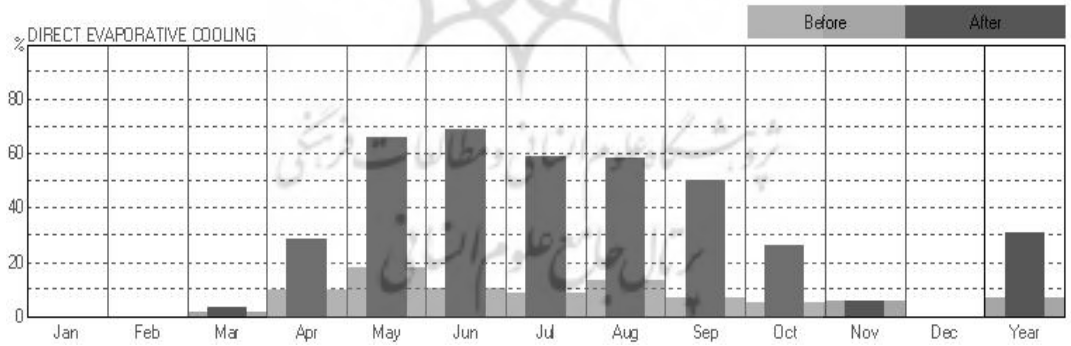
## سرمایش تبخیری مستقیم

استفاده از سامانه سرمایش تبخیری مستقیم در فضاهای داخلی می‌تواند به صورت فوران آب در مسیر عبور جریان هوا به فضاهای داخل و خنک نمودن هوا از طریق تبخیر و افزایش رطوبت نسبی هوای داخلی باشد. [۱۴] استخرها، برکه‌ها و آب‌نماهایی که بلافاصله پشت پنجره یا در حیاط‌ها، به منظور خنک کردن هوا قبل از ورود به ساختمان قرار می‌گیرند، از

سرمایش تبخیری مستقیم استفاده می‌کنند. این سامانه تنها در اقلیم‌های گرم و خشک مناسب می‌باشد [۱۳] و با توجه به رطوبت نسبی ناچیز هوای یزد و اصفهان که در ۴ ماه از سال به زیر ۲۰ درصد نیز می‌رسد، می‌تواند سامانه‌ای کارا برای این شهرها به شمار رود. [۲] با مقایسه شکل (۸) و شکل (۹) می‌توان دریافت که این سامانه در ماه ژوئن (خرداد و تیر) در یزد و اصفهان حداکثر کارایی را دارد و آسایش بنا را تا ۶۰ درصد افزایش می‌دهد. علاوه بر آن، کارایی این سامانه در ماه‌های گرم فصل‌های بهار و پاییز در یزد بیشتر از اصفهان است.




**شکل ۸) اثر سرمایش تبخیری مستقیم در شهر اصفهان. [۲۱]**

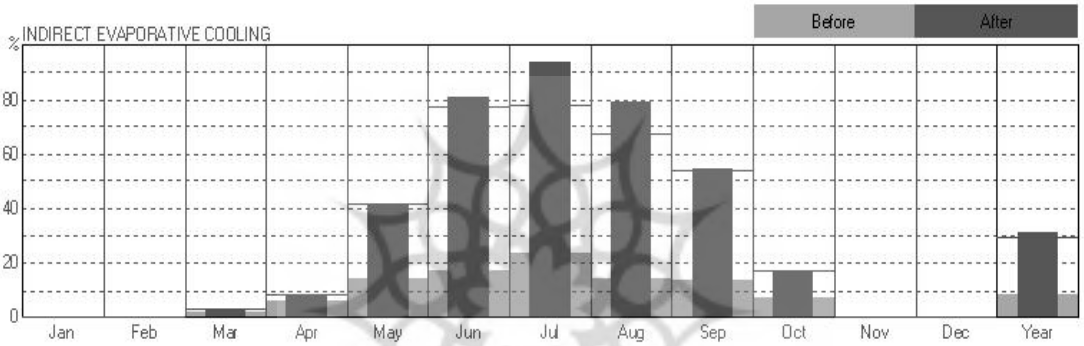



**شکل ۹) اثر سرمایش تبخیری مستقیم در یزد. [۲۱]**

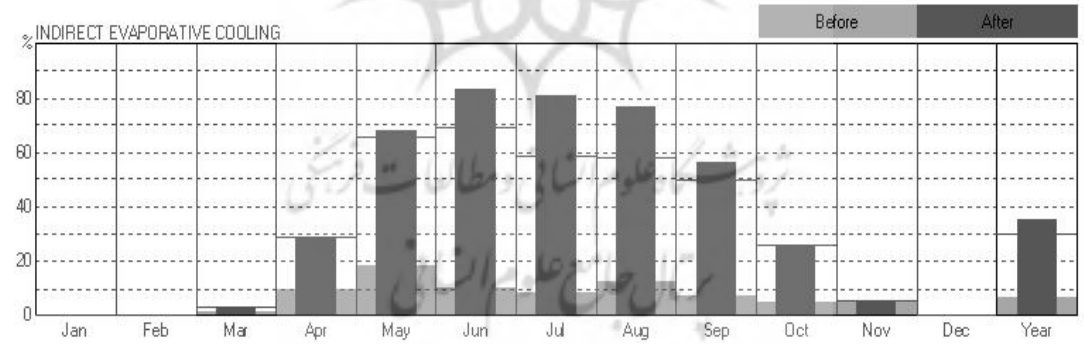
### سرمایش تبخیری غیر مستقیم

این سامانه از طریق خنک کردن یکی از عناصر ساختمانی به کمک تبخیر عمل می‌کند. در این سامانه، هوای داخل ساختمان بدون هیچ‌گونه افزایشی در رطوبت خنک می‌شود، استفاده از حوضچه و استخر سقفی یکی از رایج‌ترین انواع این سامانه‌هاست. در این روش می‌توان از خنک نمودن بام ساختمان استفاده نمود که بام تبدیل به یک جاذب گرمایی برای خنک نمودن داخل ساختمان می‌شود. البته این سامانه در بسیاری موارد به عنوان یک سامانه کاملا غیر فعال به شمار نمی‌آید، چراکه نیاز به فن یا هواکش دارند اما مصرف انرژی این فن‌ها در صورت وجود، بسیار پایین است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که به طور کلی مزایای استفاده از این سامانه در فصول گرم بیشتر از اثر سرمایش تبخیری مستقیم

می‌باشد [۱۷]. با مقایسه شکل (۸) و شکل (۱۰) می‌توان دریافت که این سامانه در ماه جولای (تیر و مرداد) در اصفهان کارایی بنا را تا ۷۰ درصد افزایش می‌دهد. برای یزد نیز در ماه‌های ژانویه، جولای و آگوست (نیمه خرداد تا نیمه شهریور) که گرمترین ماه‌های سال در این شهر است سرمایش تبخیری غیر مستقیم شرایط آسایش محیطی را تا حداکثر ۷۰ درصد افزایش می‌دهد.



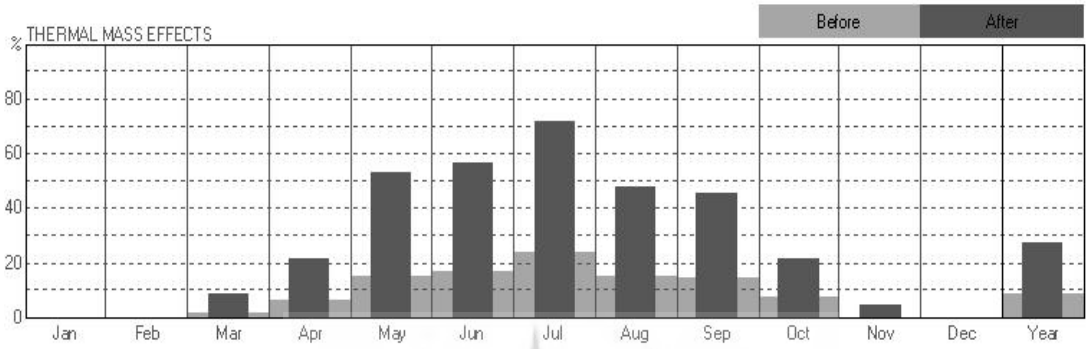

**شکل ۱۰) اثر سرمایش تبخیری غیرمستقیم در شهر اصفهان. [۲۱]**



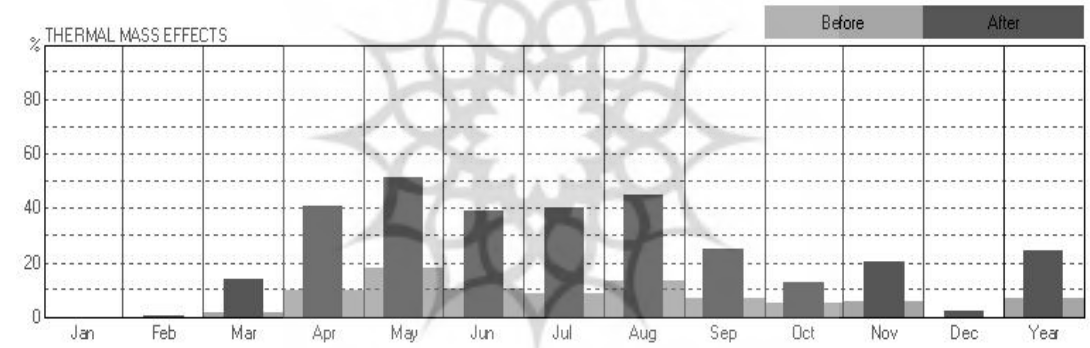

**شکل ۱۱) اثر سرمایش تبخیری غیر مستقیم در یزد. [۲۱]**

### اثر جرم حرارتی

به کار بردن مصالح با توانایی ذخیره گرمایی بالا سبب تعادل بیشتر دمای داخل می‌گردد. این عامل سبب تأخیر در گرم شدن فضای سرد و سرد شدن فضای گرم می‌شود [۹]. نمونه‌های فراوان این راهکار در معماری سنتی حاشیه کویر یافت می‌شود. شکل (۱۲) میزان کارایی این سامانه در تأمین شرایط آسایش محیطی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص می‌باشد، حداکثر کارایی این سامانه برای اصفهان در ماه جولای (تیر و مرداد) است که سطح آسایش ساکنین را تا ۴۵ درصد ارتقاء می‌دهد. در شهر یزد نیز این سامانه از ماه آپریل تا آگوست (نیمه فروردین تا نیمه شهریور) حداکثر بازدهی را داشته و آسایش ساکنین را تا ۳۰ درصد افزایش می‌دهد.




**شکل ۱۲) اثر جرم حرارتی در شهر اصفهان. [۲۱]**




**شکل ۱۳) اثر جرم حرارتی در شهر یزد. [۲۱]**

### ارزیابی سامانه‌های سرمایش غیر فعال

نمودارهای تحلیل کارایی سامانه‌ها به اجمال در جدول (۱) آورده شده است. با توجه به این جدول، کارایی سامانه‌ها را در ماه‌های مختلف سال می‌توان این‌گونه ارزیابی کرد:

- تهویه شبانه: این سامانه در ماه مارس، آپریل و نوامبر در یزد، کارایی بالاتری دارد اما از ماه می تا اکتبر کارایی این سامانه در شهر اصفهان نسبتاً بیشتر است. یعنی کارایی این سامانه اوایل بهار و اواخر پاییز در یزد بالاتر است.
- تهویه طبیعی: این سامانه در ماه می و آپریل در یزد کارایی بیشتری دارد و ماه ژوئن تا سپتامبر کارایی این سامانه در اصفهان بیشتر است.
- سرمایش تبخیری مستقیم: کارایی این سامانه تنها در ماه جولای و آگوست در اصفهان بیشتر از یزد است و در سایر ماه‌ها در یزد کارایی بیشتری دارد.
- سرمایش تبخیری غیر مستقیم: کارایی این سامانه در یزد در اکثر ماه‌های سال از اصفهان بیشتر است و تنها در ماه آگوست کارایی نسبتا کمتری دارد.

- اثر جرم حرارتی: کارایی این سامانه تنها در ماه نوامبر ،یعنی از نیمه آبان تا آذر، در یزد بالاتر است

به صورت کلی، محدوده کارایی سامانه‌ها در یزد وسیع‌تر است و برخی از این سامانه‌ها از ماه مارس تا ماه نوامبر در این شهر کارایی دارند که دلیل آن گرمای طولانی‌تر این شهر نسبت به اصفهان است. با این وجود، کارایی سامانه‌ها در گرمترین ماه‌های سال در اصفهان نسبت به یزد تقریبا بالاتر است.

**جدول ۱) میزان کارایی سامانه‌های سرمایش غیر فعال در شهر اصفهان و یزد**

| ماه های سال | | اسفند | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور | مهر | آبان | | میانگین سالانه |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سامانه | استان | Mars | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | | |
| تهویه شبانه | اصفهان | ۵ | ۱۵ | ۳۵ | ۴۰ | ۶۰ | ۴۵ | ۳۰ | ۱۵ | ۵ | | ۲۰ |
| | یزد | ۱۲ | ۳۰ | ۳۰ | ۴۰ | ۴۸ | ۵۰ | ۲۰ | ۵ | ۱۵ | | ۲۲ |
| تهویه طبیعی | اصفهان | ۰ | ۰ | ۱۰ | ۱۵ | ۲۰ | ۱۸ | ۱۰ | ۰ | ۰ | | ٦ |
| | یزد | ۰ | ۲ | ۱۲ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۰ | ۵ | ۰ | ۰ | | ٤ |
| تبخیری مستقیم | اصفهان | ۰ | ۲ | ۲۵ | ۶۰ | ۵۵ | ۵۲ | ۴۰ | ۱۰ | ۰ | | ۲۰ |
| | یزد | ۰ | ۱۸ | ۴۵ | ۶۰ | ۵۰ | ۴۵ | ۴۲ | ۲۰ | ۰ | | ۲۳ |
| تبخیری غیر مستقیم | اصفهان | ۰ | ۲ | ۲۸ | ۶۲ | ۷۰ | ۶۵ | ۴۰ | ۱۰ | ۰ | | ۲۰ |
| | یزد | ۰ | ۲۲ | ۵۰ | ۷۲ | ۷۰ | ۶۰ | ۵۰ | ۲۰ | ۵ | | ۲۸ |
| جرم حرارتی | اصفهان | ۵ | ۱۵ | ۳۷ | ۴۰ | ۴۵ | ۳۲ | ۳۰ | ۱۵ | ۵ | | ۲۰ |
| | یزد | ۰ | ۱۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۲۰ | ۶ | ۱۵ | | ۲۰ |

**جدول ۲: سامانه‌های با بیش‌ترین کارایی در ماه‌های گرم سال**

| استان | اسفند | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور | مهر | آبان | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mars | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | |
| اصفهان | تهویه شبانه، جرم حرارتی | تهویه شبانه، جرم حرارتی | جرم حرارتی، تهویه شبانه | سرمایش تبخیری غیر مستقیم و مستقیم | سرمایش تبخیری غیر مستقیم | سرمایش تبخیری غیر مستقیم | سرمایش تبخیری مستقیم و غیر مستقیم | تهویه شبانه، جرم حرارتی | تهویه شبانه، جرم حرارتی | |
| یزد | تهویه شبانه | تهویه شبانه | سرمایش تبخیری غیر مستقیم | سرمایش تبخیری غیر مستقیم | سرمایش تبخیری غیر مستقیم | سرمایش تبخیری غیر مستقیم | سرمایش تبخیری غیر مستقیم | سرمایش تبخیری مستقیم و غیر مستقیم | تهویه شبانه، جرم حرارتی | |

با توجه به جدول (۲)می‌توان مشاهده نمود که در اصفهان سامانه تهویه شبانه و جرم حرارتی در ماه مارس، آپریل، می، اکتبر و نوامبر، یعنی در فصل‌های پاییز و بهار کاراترین سامانه در تأمین شرایط آسایش ساکنان است و حتی می‌تواند شرایط

آسایش را تا نزدیک به ۴۰ درصد افزایش دهد و بعد از آن در ماه ژانویه و سپتامبر که اوایل تابستان و اواخر آن هستند، هر دو سامانه سرمایش تبخیری مستقیم و غیر مستقیم کاراترین سامانه‌ها هستند اما در گرم‌ترین زمان سال که نیمه تیر تا نیمه شهریور است، سرمایش تبخیری غیر مستقیم کارایی حداکثر را دارد و می‌تواند تا ۷۲ درصد آسایش ساکنان را افزایش دهد. در یزد نیز سرمایش تبخیری غیر مستقیم از ماه می تا سپتامبر کاراترین سامانه است. در ماه اکتبر، سرمایش تبخیری مستقیم نیز به اندازه غیر مستقیم کارایی دارد. تهویه شبانه و جرم حرارتی نیز تنها در ماه مارس، آپریل و نوامبر یعنی اوایل بهار و اواخر پاییز حداکثر کارایی را دارند. بنابراین، چنانکه بیان شد، سرمایش تبخیری غیر مستقیم برای یزد در شش ماه از سال کاراترین سامانه محسوب می‌شود. اما در اصفهان چهار ماه از سال به عنوان کاراترین سامانه به شمار می‌آید. تهویه شبانه نیز در یزد تنها سه ماه از سال جزو کاراترین سامانه‌هاست. اما در اصفهان پنج ماه از سال به عنوان کاراترین سامانه محسوب می‌شود.

## نتیجه‌گیری

استفاده از سامانه‌های غیر فعال برای تأمین گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها راهکار جدیدی نیست و طی قرن‌های متمادی بشر به شیوه‌های مختلف از آنها استفاده کرده است. این سامانه‌ها که در مقابل سامانه‌های پویا به کار می‌روند، هزینه کمتر و نیاز کم‌تر به نگهداری دارند و علاوه بر آن، قابل اطمینان‌تر هستند. سامانه‌های سرمایش غیر فعال که ارزان‌ترین روش خنک کردن بناها می‌باشند کم‌ترین اثرات تخریب محیط زیست را داشته و بهره‌وری ساختمان را از طریق کاهش جذب گرما از محیط خارج و تسهیل از دست دادن گرما توسط منابع طبیعی خنک کننده به حداکثر می‌رسانند. در این مقاله، پنج سامانه سرمایش غیر فعال در شهرهای یزد و اصفهان ارزیابی شد که عبارتند از تهویه شبانه، تهویه طبیعی در طول روز، سرمایش تبخیری مستقیم، سرمایش تبخیری غیر مستقیم و اثر جرم حرارتی. در این راستا ابتدا، سامانه‌ها و اقلیم مورد نظر معرفی شد. سپس شرایط آسایش محیطی قبل و بعد از استفاده از این سامانه‌ها با استفاده از داده‌های نرم افزار ودرتول در هر شهر مورد بررسی قرار گرفت و میزان کارایی آنها در دو شهر مورد نظر با یکدیگر مقایسه شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد سرمایش تبخیری غیر مستقیم برای یزد در اولویت اول قرار دارد چراکه علاوه بر بالا بودن میانگین سالانه کارایی، میزان کارایی این سامانه در گرم‌ترین ماه‌های سال نیز نسبت به سایر سامانه‌ها بالاتر است. بعد از آن نیز سرمایش تبخیری مستقیم و تهویه شبانه می‌توانند به عنوان سامانه‌های کارا در خانه‌های این شهر مورد استفاده قرار بگیرد که از میان این دو نیز سرمایش تبخیری مستقیم در گرم‌ترین ماه‌های سال کارایی بالاتری داشته است. برای شهر اصفهان نیز با وجود اینکه تهویه شبانه در تعداد ماه‌های بیشتری، سامانه با حداکثر کارایی به شمار می‌آید، اما سرمایش تبخیری غیر مستقیم در گرم‌ترین ماه‌های سال کارایی بالایی دارد و می‌تواند به عنوان سامانه‌ای مناسب در اولویت باشد. پس از آن تهویه شبانه و سرمایش تبخیری مستقیم و جرم حرارتی در ماه‌های نه چندان گرم سال سامانه‌های کارا هستند. بنابراین، سرمایش تبخیری غیر مستقیم می‌تواند به عنوان کاراترین سامانه در گرم‌ترین ماه‌های سال برای اقلیم گرم و

خشک B پیشنهاد شود و پس از آن تهویه شبانه برای اصفهان و سایرشهرهای با اقلیم Bsk و سرمایش تبخیری مستقیم برای یزد و سایر شهرهای با اقلیم مشابه Bwh پیشنهاد مناسبی می‌باشد. لذا با توجه به اینکه کاربست تمامی سامانه‌های سرمایش غیر فعال علاوه بر صرف هزینه زیاد ممکن است در کاربری فضا تداخل ایجاد نماید، ارزیابی کارایی سامانه‌ها در مراحل طراحی یک بنا و استفاده از سامانه‌های با حداکثر کارایی در یک ساختمان علاوه بر تامین آسایش و سلامت ساکنین نیاز به استفاده از سامانه‌های فعال را به میزان زیادی کاهش خواهد داد. علاوه بر این، نتایج پژوهش حاضر با تعیین سامانه‌های با حداکثر کارایی می‌تواند زمینه‌ای فراهم آورد که پژوهش‌های آتی با یک دید جزءنگر، هرکدام از این سامانه‌های کارا را در ساختمان‌های مشخص مورد ارزیابی قرار دهند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

## منابع


[۱] زندیه، مهدی و پروردی نژاد، سمیرا، ۱۳۸۹، *توسعه پایدار و مفاهیم آن در معماری مسکونی ایران*، نشریه مسکن و محیط روستا ، ۲- ۲۱.

[۲] فاضلی، مهدی، (۱۳۹۱)، *طراحی مجتمع آموزشی همساز با اقلیم اصفهان*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران.

[۳] قیابکلو، زهرا (۱۳۹۲)، *مبانی فیزیک ساختمان ۴: سرمایش غیر فعال*، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر، چاپ اول.

[۴] کوخ- نیلسن، هالگر(۱۳۸۴)، *تهویه طبیعی*، ترجمه محمد احمدی نژاد، نشر خاک، چاپ اول.

[۵] مور، فولر (۱۳۸۲)، *سیستم‌های کنترل محیط زیست تنظیم شرایط محیطی در ساختمان*، ترجمه، کی‌نژاد و آذری، دانشگاه هنر اسلامی تبریز.

[۶] وکیلی نژاد، رزا و مهدیزاده سراج، فاطمه و مفیدی شمیرانی، مجید (۱۳۹۲)، *اصول سامانه‌های سرمایش ایستا در عناصر معماری سنتی ایران*، نشریه علمی- پژوهشی انجمن علمی معماری و شهرسازی ایران، شماره ۵، صص. ۱۴۷- ۱۵.

[7] Artmann, Nikolai, (2008) "*Cooling of the building structure by night-time ventilation*", PhD thesis defended in public at Aalborg University.

[8] Ashrae handbook of fundamentals comfort model, 2005.

[9] Haglund, Bruce & Rathmann, Kurt, (2010), "*Termal mass in passive solar and energy conserving builidings*".

[10] Kharrufa, Sahar n., Adil Yahyah, (2008), "*Roof Pond cooling of building in hot arid climates, Building and Environment*, Volume 43, Issue 1, pp. 82- 89.

[11] Kolderup, Erik, (2008), "*Saving Energy with Natural Ventilation Strategies*". Kolderup consulting.

[12] Koppen-Geiger Climate Classification.

[13] Lechner, Norbert, (2009), "*Heating, Cooling, Lightning: Sustainable Design Methods for Architecture"*, Willy, Third edition.

[14] Palmer, J.D, (2002), "*Evaporative cooling guidelines manual for new Mexico schools and commercial buildings*". pp. 25- 27, retrieved 12 September 2005.

[15] Macias, Mato, Schuler and Mitre, "*Application of night cooling concept to social housing design on dry hot climate*", (2006), Volume 38, Issue 9 pp. 1104- 1110.

[16] Sabzi, Haseli, Jafarian, karimi and Taheri, (2015) "*Investigation of cooling load reduction in buildings by passive cooling options applied on roof*", Energy and Building, Volume 109, pp. 135- 142.

[17] Shabbir, R., Ahmad, S.S. 2010. *"Monitoring urban transport air pollution and energy demand in Rawalpindi and Islamabad using leap model"* Energy, Vol. 35, pp. 2323–2332

[18] Tiwari, Lugani and Singh (1993),"*Design parameters of a non- air- conditional cinema, Comfort under arid- zone climatic conditions*", Energy and Building, Volume 19, pp. 249- 261.

[19] URL: sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/night-purge-ventilation.

[20] URL: Xpeditiononline.com/datavis/koppenguide.pdf.

[21] Weather Tool Software.

[22] Wood, Tom, (2010), "*Climate analysis using Autodesk Ecotect, Weather Tool and Solar Tool*", AIA Montana annual conference.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی