سال ۲۹، شماره ۱۳۳، صفحات ۴۳-۵۳، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

DOI: 10.30506/mmep.2020.124253.1821

# مروری بر سیستم‌های ترکیبی بادگیر با سیستم‌های سرمایش و گرمایش جهت بهبود طراحی و افزایش بهره‌وری انرژی

یوسف گرجی مهلبانی[۱ و *]، مریم یعقوبی مقدم[۲]، محمد حکیم آذری[۳]، فرشاد ترابی[۴]

[۱] استاد گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

[۲] دانشجوی کارشناسی‌ارشد معماری و انرژی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

[۳] دانشجوی کارشناسی‌ارشد معماری و انرژی، گروه معماری و فناوری، دانشگاه هنر، تهران، ایران

[۴] دانشیار گروه سیستم‌های انرژی، دانشکده مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

*مسئول مکاتبات: Gorji@arc.ikiu.ac.ir

## ◄ چکیده

پژوهش پیش رو ضمن معرفی بادگیر و پارامترهای مؤثر بر آن، مروری بر سیستم‌های ترکیبی شامل بادگیر و سیستم‌های سرمایش و گرمایش غیرفعال جهت بهبود میزان مصرف انرژی و آسایش حرارتی دارد. تاکنون تحقیقات متنوع و گسترده‌ای در خصوص بادگیر و افزایش عملکرد آن انجام شده که از مهم‌ترین آنها تغییر در تناسبات موجود بوده است. هدف تحقیق پیش رو، بررسی و مرور پژوهش‌ها و مطالعاتی است که عملکرد بادگیر را از طریق ترکیب با دیگر سیستم‌های مکانیکی و یا ترکیب آن با مصالح مختلف، بهبود بخشیده‌اند و با افزودن قابلیتی جدید، ایجاد عملکردی همچون عملکرد سیستم مکانیکی مورد نیاز امروز را سبب شده‌اند. این بررسی‌ها علاوه بر آشنایی با روش‌های گوناگون کاربرد این سامانه در ترکیب آن با سیستم‌های دیگر، تحلیل نقاط قوت و ضعف آنها را به همراه دارد. داده‌ها و اطلاعات ارزشمند حاصل در به کارگیری بهینه سامانه مذکور در ترکیب با دیگر سیستم‌ها مؤثر خواهد بود.

## ◄ واژگان کلیدی

بادگیر
سیستم سرمایش
سیستم گرمایش
سیستم‌های ترکیبی
مصرف انرژی
آسایش حرارتی

## ◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۱

## ۱ مقدمه

روند رو به رشد جمعیت و افزایش تقاضا که پیامدهای جبران‌ناپذیر افزایش مصرف منابع، هزینه‌ها، انتشار آلاینده‌ها و غیره که تشدید پدیده تغییر اقلیم و گرم شدن جهانی را در پی دارد غیرقابل انکار است. پیشرفت صنعت ساختمان در تقابل با شرایط اقلیمی و عدم توجّه به شرایط زیست‌محیطی، رویکردی مخرب است که به وضعیت نابسامان آب و هوایی یک منطقه دامن می‌زند. در نتیجه بازنگری در شیوه‌های ساختمان‌سازی و باز تعریف عناصر سازنده یک ساختمان امری مهم است. صرف‌نظر از تأثیرات مخرب سیستم‌های رایج ساختمانی بر محیط زیست، ناکارآمدی آنها در بهره‌گیری از امکانات بالقوه اقلیمی امری اجتناب‌ناپذیر است. شرایط ویژه اقتصادی و ضرورت بهره‌وری مصرف انرژی بر اهمیت ایجاد ارتباطی دوسویه میان ساختمان و محیط می‌افزاید و این مهم حاصل نمی‌شود مگر اینکه عناصر سازنده یک ساختمان، ترکیبی مؤثر از شاخصه‌های معماری اقلیمی و سیستم‌های نوین باشد.

بادگیر به عنوان یکی از عناصر شاخص در معماری اقلیمی ایران، با توجّه به دارا بودن مزایایی چون تأمین آسایش حرارتی مستقل از تأسیسات مکانیکی و الکتریکی، کاهش مصرف انرژی و در نتیجه کاهش هزینه و نیز کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها، می‌تواند همچنان به عنوان مؤلفه‌ای کاربردی و مؤثر در طراحی همساز با اقلیم مورد بهره‌برداری و توجّه قرار گیرد. مسئله مهم چگونگی تلفیق آن با تکنولوژی‌های موجود در معماری امروز است، به نحوی که بتوان با بهره‌گیری بیشتر از امکانات فراهم‌شده، به تعریفی نوین از بادگیر رسید.

این مهم که به عنوان پدیده‌ای اقلیمی در ایران مطرح می‌شود، در صورتیکه بتوان از آن جهت تأمین بخشی از بار گرمایش و سرمایش بخشی ساختمان به کمک سیستم‌های ترکیبی بهره گرفت، می‌توان ابعادی جدید به این عنصر معماری افزود و با بهره‌گیری از سیستم‌های دیگر در ترکیب با بادگیر، به محدود کردن دمای جریان هوا وارده در یک بازه مشخص در ساعات مختلف روز و در فصول مختلف می‌توان کمک نمود و در عین حال به عنوان سیستم پیش گرمایش و یا پیش سرمایش از آن بهره برد.

## ۲ بادگیر

بادگیر[۱] یک ویژگی معماری (سبز) است که از تهویه طبیعی برای القای جریان هوای خارجی به ساختمان استفاده می‌کند [۱، ۲]. این برج یک ساختار از مصالح بنایی[۲] است که به منظور تسهیل جریان هوا از داخل ساختمان طراحی شده است [۳]. بادگیرها را می‌توان در سه گروه بصورت زیر طبقه‌بندی کرد: بادگیرهای بومی[۳]، بادگیرهای مدرن یا تجاری[۴] و بادگیرهای فوق مدرن[۵]. پایه

[1] Wind Tower/Wind Catcher [2] Masonry-Type Structure [3] Vernacular Windcatcher [4] Modern or Commercial Windcatcher [5] Per Modern Windcatcher

و اساس هر سه نوع تقریباً یکسان است. با وجود این، پیشرفت تکنولوژی، افزایش قیمت انرژی و زمین و تغییر در انتظار افراد، سبب ایجاد تغییراتی در بادگیرهای سنتی شده است تا آنرا برای وضعیت کنونی قابل استفاده کند [۴]. بیش از سه هزار سال است که این سیستم در مناطق گرم و خشک، بویژه در خاورمیانه، و بطور خاص ایران، مصر و اردن استفاده شده است [۵، ۶].

اشکال مختلفی از بادگیرها به لحاظ ارتفاع برج، مقطع عرضی و تعداد بازشوها که به ساختار ساختمان و نیز تجربه شخصی معمار طراح آن مربوط می‌شود، وجود دارد [۴، ۷]. فرم و ساختار بادگیر سنتی ضمن تأثیر بر نرخ جریان هوای ورودی به سیستم و ظرفیت سرمایشی ساختمان، نشانه عزت، ثروت و موقعیت اجتماعی صاحب‌خانه بودند [۷، ۸]. در طراحی بادگیر، علاوه بر موارد مذکور، تعداد افراد خانواده نیز عاملی مؤثر در این امر بوده است [۹]. امروزه، بادگیرها با ارتفاعات، تعداد بازشوها و موقعیت‌های نصب مختلف طراحی می‌شوند. زیرا تغییر جهت و سرعت باد می‌تواند بر عملکرد سیستم تأثیر داشته باشد [۵]. علاوه بر این، القای جریان باد بطور مستقیم در سطح بالا، سیستم را قادر می‌سازد از غلظت بالاتر آلاینده‌های موجود در سطح زمین جلوگیری کند [۲].

بادگیر یک روش نوآورانه ایرانی برای تأمین سرمایش فضا [۹] و همانطور که از نام آن پیداست، بخشی از بافت ساختمان در اقلیم گرم و خشک یا گرم و مرطوب ایران است که با هدایت جریان باد و بهره‌گیری از انرژی پاک طبیعت، تأثیر بسزایی بر تعدیل درجه حرارت و رساندن دمای اتاق به دمای آسایش انسان دارد [۹، ۱۰]. برج بادگیر تقریباً بلندتر از سایر قسمت‌های خانه است و بصورت عناصر عمودی در بافت سنتی شهرهای این مناطق به چشم می‌خورند و پس از مناره‌های مساجد[۶]، عنصر مؤثر در تعریف خط آسمان[۷] شهر است [۹، ۱۰]. بادگیر کانالی است که با قرار گرفتن در بخش تابستان‌نشین هر خانه و با وجود منافذی که در رأس خود رو به سمت باد مطلوب دارد، جریان باد را به این بخش از خانه هدایت می‌کند [۱۰]. در حقیقت عملکرد اصلی بادگیر، هدایت هوا به داخل، سرمایش نسبی هوا و ایجاد جریان طبیعی هوا در ساختمان است. از بادگیر در برقراری جریان طبیعی هوا در آب‌انبارهای عمومی و خنک نگه داشتن آب در این فضاها نیز استفاده می‌شد. بادگیرها اغلب برج‌های کوچک چهارضلعی و چندضلعی منظم هستند که در آنها ساختار مثلثی به ندرت دیده می‌شود [۹]. ایران از جمله کشورهایی است که براساس نوع معماری و اقلیم، بویژه در مناطق جنوبی و حاشیه کویر، انواع مختلفی از بادگیر را به لحاظ شکل و اندازه را داراست [۱۱]. نوع زیباتر و کاربردی‌تر آنها در اطراف دشت‌های خشک و سوزان، بویژه در شهر کاشان، یزد، بم، طبس، جهرم و ساحل اروندرود و خلیج فارس وجود دارد [۱۲].

## ۱.۲ کالبد بادگیر

بادگیر از اجزای کالبدی مشخصی تشکیل شده است که در جزییات بسیار متفاوت هستند. بطور کلی اجزای عملکردی هر بادگیر شامل موارد زیر است:

**تنوره:** به پایین‌ترین قسمت بادگیر و در جایی که تیغه‌های اصلی داخلی بادگیر به اتمام می‌رسند؛ تنوره بادگیر گفته می‌شود. عملکرد اصلی تنوره، خارج‌سازی جریان هوای داخل بادگیر و انتقال هوای داخل کانال بادگیر است. در بعضی موارد که بادگیر سرمایش و تهویه دو طبقه (زیرزمین و همکف) را بر عهده دارد، دو دریچه عمودی و افقی در تنوره تعبیه می‌شود و در غیر اینصورت، تنوره با یک دریچه عمودی به صورت و یا غیرمستقیم (از طریق حوضخانه) به فضاهای ساختمان مرتبط می‌شود.

**کانال (ستون):** به غالب‌ترین و بلندترین بخش بادگیر که از تنوره آغاز شده و تا قفسه ادامه دارد. کانال بادگیر می‌گویند. کانال بادگیر وظیفه هدایت جریان هوای مطلوب را از قفسه به تنوره و انتقال جریان هوای نامطلوب از تنوره به قفسه را دارد. کانال بادگیر با توجّه به نوع بادگیر می‌تواند از تیغه‌های اصلی تفکیک‌کننده جریان‌های مطلوب و نامطلوب تشکیل شده باشد. تیغه‌های تفکیک‌کننده سبب ایجاد کانال‌های داخلی درون کانال اصلی بادگیر می‌شوند که با توجّه به جهت وزش باد نسبت به قفسه بادگیر، فشار درون کانال‌های داخلی تعیین می‌شود. ارتفاع کانال بادگیر وابسته به ارتفاع بادهای مطلوب است. قسمت فوقانی کانال بادگیر که از سقف بالاتر است، ساقه نامیده می‌شود.

**قفسه:** بالاترین قسمت بادگیر که بر روی کانال واقع شده است را قفسه بادگیر می نامند. قفسه بادگیر را حتی می‌توان مهم‌ترین بخش بادگیر دانست، چرا که با قرار گرفتن در مقابل جریان هوا سبب ایجاد اختلاف فشار در آن می شود و ناحیه‌های فشار مثبت و منفی اطراف قفسه بوجود می‌آید. پس از آن به طور همزمان دو عمل زیر را انجام می‌دهد: بخشی از جریان هوا را که مقابل قفسه قرار دارد را محصور کرده و با تغییر جهت آن از مسیر افقی به قائم، بخشی از کانال‌های داخلی ستون بادگیر را تغذیه می‌کند. در این لحظه جریان رو به پایین را درون بادگیر به وجود می‌آورد.

در اثر فشار منفی حاصل از عبور مابقی جریان هوا که هم راستا و پشت به قفسه می‌باشند، جریان هوای داخل ساختمان را از طریق کانال‌های فشار منفی به سمت بالا می‌کشد تا در محل قفسه آن را رها سازد.

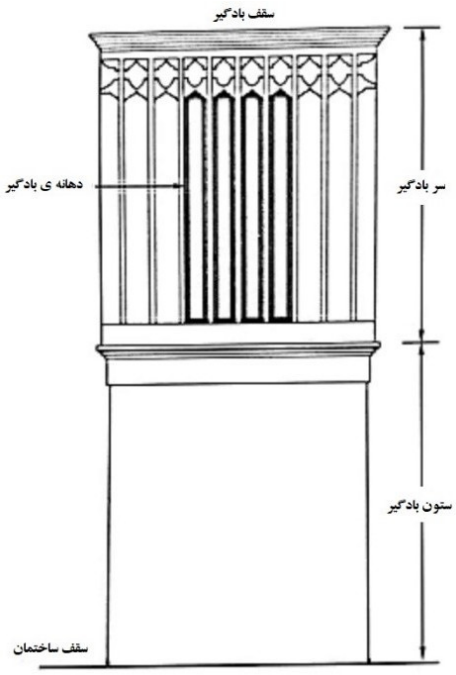
قفسه بادگیر از بخش‌های زیر تشکیل شده است:

- سقف: سقف قفسه‌های بادگیر از لحاظ فرم در سه حالت اجرا شده‌اند: مسطح، شیبدار و منحنی.
- تیغه‌های تفکیک‌کننده داخلی: درون قفسه بادگیر مجموعه‌ای از تیغه‌ها وجود دارد که بعضی از آنها تا نزدیک تنوره پایین می‌آیند (تیغه‌های اصلی) و مابقی (تیغه‌های فرعی) با ارتفاع قفسه برابرند.
- دهانه‌های ورودی هوا: با توجّه به جهت وزش باد و نظر طراح بعضی از دهانه‌ها باز و بعضی بسته بوده است. تزیینات دهانه‌ها بسیار متنوع است و احتمالاً با توجّه به سلیقه معمار، طرح خاصی را بکارگرفته شده است [۱۰، ۱۳].

## ۲.۲ طبقه‌بندی بادگیر

بادگیرها براساس روش‌های مختلفی مانند اقلیم و محل استقرار، عملکرد، جهت‌گیری و فرم پلان طبقه‌بندی می‌شوند [۹، ۱۴]:

[6] Minarets [7] Skyline




**شکل ۱:** بخش‌های مختلف بادگیر [۱۱].

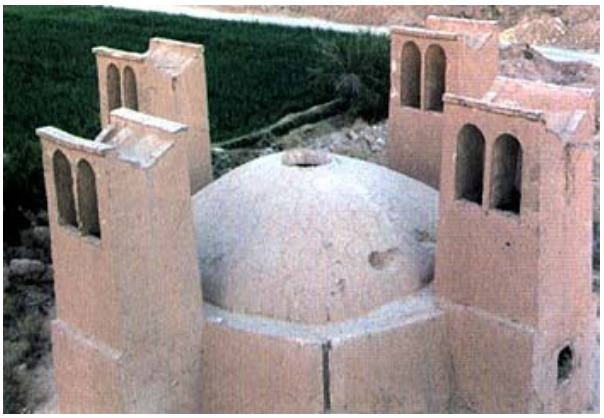
### ۱.۲.۲ اقلیم و محل استقرار

از نظر محل استقرار بر سه گونه اردکانی، کرمانی و یزدی تقسیم می‌گردد [۱۱].

**بادگیر اردکانی** (شکل ۲): این نوع از بادگیر به لحاظ ساختار، ساده‌تر و مقرون به صرفه‌تر از دیگر گونه‌های بادگیر بوده و تنها در جبهه شمال (باد مطبوع اصفهان) بازشو داشته و در دیگر جهات فاقد منفذ است. از این رو این بادگیر شکننده بوده. پس، ضلع جنوبی آن بصورت نیمه هلال ساخته می‌شده است تا در صورت وزش باد از جهات دیگر، در برخورد با این هلالی از سرعت و تیزی باد کاسته شود.

**شکل ۲:** بادگیر اردکانی [۱۵].

**بادگیر کرمانی** (شکل ۳): بر بام خانه‌های متوسط رو به پایین بنا می‌شده است. از آنجاییکه بادگیرهای کرمانی دو طرفه هستند، بادگیر دوقلو نیز خوانده می‌شوند. این بادگیرها کمی دقیق‌تر از بادگیرهای اردکانی عمل می‌کنند؛ چرا که به دلیل دوسویه بودن، فشار باد اعمال شده به یک جهت سبب تخلیه سریع هوای گرم و آلوده از جهت دیگر می‌شود.



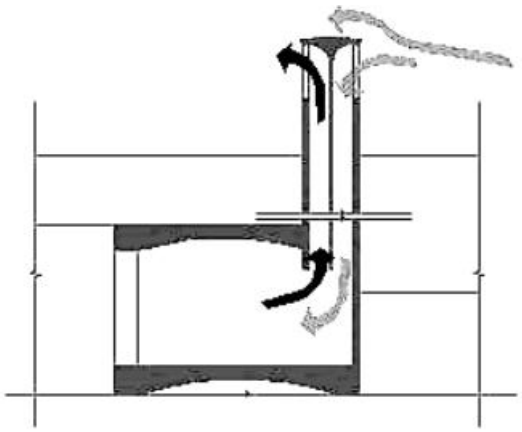
**شکل ۳:** بادگیر کرمانی [۱۴].

**بادگیر یزدی** (شکل ۴): غایت معماری بادگیرها است که گاه سه جهتی و بیشتر چهار سویه است. بطور معمول درون کانال‌های آن، با تیغه‌هایی از آجر، چوب یا گچ به چند قسمت تقسیم می‌شود. بیشتر، زیر کانال بادگیر حوضی می‌ساخته‌اند که هوای خشک پر از غبار، پس از برخورد با آب، مرطوب و تصفیه شود [۱۱].

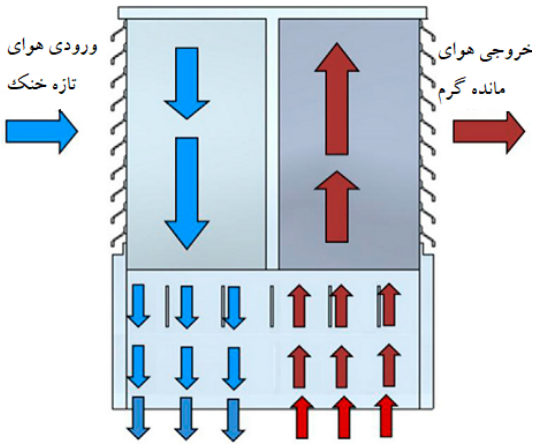
**شکل ۴:** بادگیر یزدی [۱۶].

### ۲.۲.۲ عملکرد

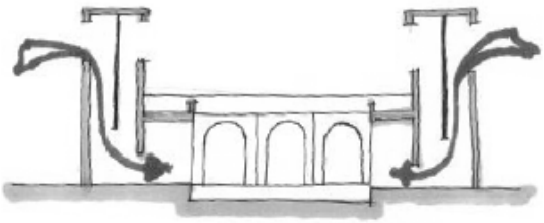
گروه اول: بادگیرهایی که از طریق جابجایی، سرمایش ساختمان را فراهم می‌نمایند: این نوع در مناطق گرم و مرطوب با رطوبت بالا مانند بوشهر، لار و ... استفاده می‌شوند.



**شکل ۵:** اصول کار بادگیر [۱۷].



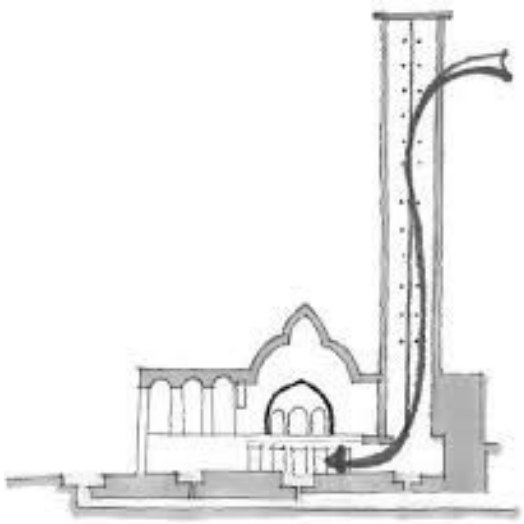

**شکل ۶:** طرح کلی عملکرد بادگیر [۱۸].



**شکل ۷:** عملکرد بادگیر در مناطق گرم و مرطوب [۱۹].

گروه دوم: بادگیرهایی که سرمایش ساختمان را از طریق همرفت و تبخیر تأمین می‌کند و شامل انواع مختلفی است:

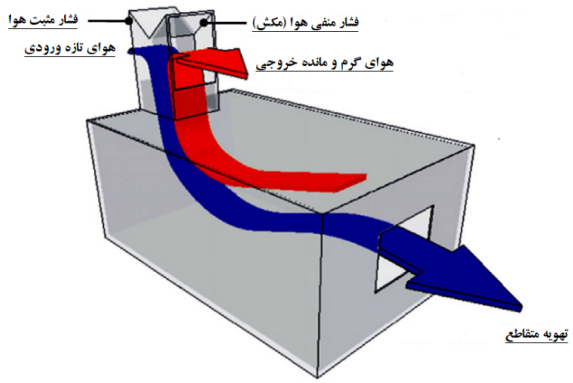
- جریان هوای بر روی یک حوض یا کانال آب
- قرار دادن بوته‌های حصیری و خاردار و سفال در قسمت بازشوی بادگیر و آب پاشی آنها
- جداسازی بادگیر از ساختمان و اتصال آنها از طریق کانال زیرزمینی [۹].



**شکل ۸:** عملکرد بادگیر در مناطق گرم و خشک [۱۹].

### ۳.۲.۲ جهت‌گیری

بطور کلی جهت‌گیری بادگیر به موقعیت بادگیر نسبت به چهار جهت اصلی جغرافیایی اشاره دارد و با توجّه به عملکرد، استفاده از نیروی باد و جهت وزش باد مطلوب تعیین می‌گردد [۱۹]. قسمت بالای برج ممکن است در یک، دو یا چهار طرف دارای دریچه باشد که مشرف به جهت باد غالب برای تطبیق با جهات مناسب باد است. نام‌گذاری بادگیر معمولاً با تعداد جهت آن انجام می‌شود [۱۹]، مانند آنچه محمودی [۱۰] در کتاب خود انجام داده است: بادگیرهای یک طرفه، بادگیرهای دو طرفه، بادگیرهای سه طرفه، بادگیرهای چهار طرفه، بادگیرهای چند طرفه، بادکش‌های گنبدی.




**شکل ۹:** دیاگرام جریان تهویه یک اتاق با بادگیر [۲۰].

### ۴.۲.۲ فرم پلان

بطور کلی در ایران، بادگیر با پلان‌های مربع، مستطیل، شش و هشت ضلعی و دایره‌ای دیده شده است. بادگیر با فرم مثلث در هیچ کجای ایران، کشورهای خاورمیانه و مصر شناخته نشده است. نوع دایره‌ای در ایران بسیار نادر است و تنها یک بادگیر با پلان دایره‌ای در شهر یزد وجود دارد [۱۱].

| شکل | نمونه های پلان بادگیر |
|---|---|
| دایره | |
| مربع | |
| مستطیل | |

**شکل ۱۰:** انواع بادگیر براساس فرم پلان [۱۱].

## ۳ مروری بر سیستم‌های ترکیبی

بهادری‌نژاد طرح بهبودیافته‌ای شامل لوله‌های اسپری‌کننده آب[8] و مجراهای سفالی[9] به منظور بهبود عملکرد بادگیر برای تهویه طبیعی و سرمایش غیرفعال پیشنهاد داد. طرح پیشنهادی در شرایط آب و هوایی و طراحی مشابه قادر به انتقال هوا با میزان جریان بیشتری به ساختمان است. همچنین می‌تواند دمای هوا را با استفاده از تبخیر به دماهای پایین‌تر کاهش دهد. نرخ جریان هوای بالاتر و قابلیت سرمایش تبخیری بادگیر جدید به منظور سرد شدن جرم ساختمان و کاهش دما می‌تواند در طول شب تابستان بطور کامل مورد استفاده قرار گیرد. تجزیه و تحلیل حرکت، توده و انرژی[10] برای طرح پیشنهادی انجام شد. نتایج پژوهش به صورت اشکال گرافیکی به عنوان راهنما جهت کاربرد طرح در مناطق گرم و خشک جهان ارائه شد [۲۱].

بهادری و همکاران دو طرح جدید از بادگیرها را در کنار نوع سنتی آن آزمایش کردند. همه بادگیرها دارای ابعاد یکسان بودند. دو طرح جدید شامل بادگیر با ستون‌های مرطوب که پرده‌های مرطوب در ستون‌های بادگیر آویزان شده و دیگری بادگیر با سطوح مرطوب که پدهای خنک‌کننده تبخیری مرطوب در ورودی آن نصب شده است. دمای هوای حاصل بادگیرهای جدید براساس الزامات سرمایش تبخیری بسیار پایین‌تر از دمای هوای حاصل از طراحی متداول است، اما رطوبت نسبی آن بسیار بالاتر است. در بادگیرهای جدید سرعت جریان هوا اندکی کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهند که بادگیر با ستون‌های مرطوب در سرعت بالای باد عملکرد بهتری را داراست درحالیکه بادگیر با سطوح مرطوب در سرعت پایین باد عملکرد بهتری را دارد. در این پژوهش ساخت نمونه‌های ارائه‌شده در اندازه‌های مختلف و ترکیب کردن آنها در طراحی ساختمان‌های جدید و استفاده از آنها به عنوان جایگزینی برای سیستم‌های سرمایش تبخیری مانند کولر آبی پیشنهاد شده است [۲۲].

جعفریان و همکاران به بررسی تأثیر نوعی سیستم قدیمی و خاص سرمایشی مشابه بادگیر پرداختند. تفاوت این سیستم با بادگیرها وجود کانال اضافی متصل به بادگیر است که نقب[11] نامیده می‌شود. نقب کانالی زیر زمینی است که رطوبت زمین را برای سرمایش هوا استفاده می‌کند. باد ورودی از طریق بادگیر از نقب عبور کرده و سرمایش تبخیری در نقب آنرا خنک‌تر می‌کند و به این ترتیب افزایش اثر سرمایشی بادگیر را سبب می‌گردد. در این مطالعه، مدل یک‌بعدی برای بررسی عملکرد نقب ارائه و معادلات حفظ انرژی، جرم و حرکت همزمان حل شده است. به منظور ارزیابی مدل، چیدمان آزمایشی ساده براساس ابعاد واقعی نقب طراحی شد. نتایج توانایی نقب را در سرمایش در طول ماه‌های گرم در اقلیم گرم و خشک نشان می‌دهند [۲۳].

سوتولو و همکاران پژوهشی را به منظور بهینه‌سازی عملکرد انرژی بادگیرهای استوانه‌ای به عنوان سیستم‌های غیرفعال برای تهویه حرارتی فضاهای شهری مورد مطالعه قرار دادند. دو مدل تئوری، یک مدل حرارتی و یک مدل سیال، به ترتیب برای توصیف سیستم تبخیری و طراحی برج ایجاد شد. مدل حرارتی عملکرد برج را هنگام کار فن و نازل‌ها ارزیابی می‌کند و اختلاف بین دمای خارجی و داخلی را ارائه می‌دهد. مدل مذکور به منظور تجزیه و تحلیل واکنش حرارتی سیستم به نوسانات در پارامترهای طراحی مورد استفاده قرار گرفت. به این منظور، سه بهینه‌سازی تک پارامتری و چند پارامتری انجام شد. مدل سیال به منظور توصیف عملکرد برج زمانیکه فن و نازل‌ها کار نمی‌کنند، به‌کارگرفته شده است و رفتار باد از طریق برج را نشان می‌دهد. پیکربندی دیگری از بادگیر مورد ارزیابی قرار گرفته است: تغییر تعداد دریچه‌های بادگیر، تغییر ارتفاع دیواره‌های داخلی بادگیر و اصلاح هندسه روزنه‌های تهویه [۲۴].

عبدا... و هیروشی در تحقیق خود به بررسی عددی تأثیر پارامترهای دودکش خورشیدی بر پارامترهای بادگیر پرداخته‌اند. پژوهش مذکور در دو بخش به صورت زیر انجام شد: فاز اول مربوط به توصیف سیستم و معادلات ریاضی و فاز دوم شامل مدل یکپارچه جدید است. شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار ترنسیس[12] انجام گردید. مطالعات پارامتری در مرحله دوم به منظور دست‌یابی به کارایی بالا طرح جدید کوچک فشرده به‌ویژه برای گرم‌ترین روزهای فصل تابستان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی با توجّه به استاندارد اشری، بطور تقریبی ۸۰ درصد محدوده آسایش قابل قبول، با نرخ تهویه مطلوب ۴۱۴ مترمکعب بر ساعت برای گرم‌ترین روز را فراهم می‌نماید. یافته‌های تحقیق عملکرد بالای سیستم در گرم‌ترین روز با ابعاد کوچک دودکش خورشیدی و سادگی ترکیب آن در پوسته ساختمان نسبت به سیستم پیشنهادی قبل از مطالعات پارامتریک در فاز اول را نشان می‌دهد [۲۵].

بن هامو و همکاران با ترکیب بادگیر و مبدل های حرارتی هوا–زمین، سامانه سرمایش طبیعی جدیدی را پیشنهاد کردند. در این تحقیق عملکرد سیستم ترکیبی بادگیر و مبدل‌های حرارتی هوا–زمین با بادگیر های سطوح خیس شونده مقایسه شده است و نشان داده می‌شود، درصورت استفاده از سامانه ترکیبی، عملکرد آن بهبود می‌یابد و دمای خروجی کاهش چشمگیری پیدا می‌کند [۲۶].

جاسیم طرح جدیدی را برای سیستم سرمایش غیرفعال با استفاده از بادگیر مبدل حرارتی زمین به هوا (WEAHE) ارائه داده است. به منظور بهره‌گیری از مزیت آب‌های زیرزمینی برای مرطوب نمودن مسیر حرکت هوا در دیوارها، لوله‌ها و انتقال هوا به ستون‌های هوای داخلی به فشار وابسته است. پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد بادگیر یک مبدل حرارتی زمین به هوا در بهبود محیط داخلی و کاهش مصرف انرژی در مناطق گرم و خشک انجام شد. جهت انجام مطالعات میدانی از یک بهینه‌ساز[13] ۲/۵ × ۱/۸ متر استفاده شده است. سپس یک مدل توسعه یافته با اضافه کردن راهروهای عمودی و افقی به عمق ۳ متر برای حرکت قسمت عمودی[14] در زمین ارائه و شبیه‌سازی کامپیوتری با استفاده از برنامه شبیه‌سازی عددی (CFD[15]) انجام گردید. نتایج نشان داد که در طول تابستان با افزایش جریان هوا و دما، حدود ۱۸ درجه سانتیگراد افت دما و ۲۳ درصد بهبود در رطوبت نسبی به وجود آمده است. ضریب عملکرد[16] (COP) سیستم WEAHE در این پژوهش با افزایش سرعت هوا (۳/۵ – ۱/۵ متر بر ثانیه) بین ۵/۲۴ – ۳/۴۳ متفاوت است. این امر سبب می‌شود طراحی جدید WEAHE[17] ابزاری برای خود–سرمایش[18] و

[8] Water-Spraying Pipes [9] Clay Conduits [10] Momentum, Mass and Energy Analyses [11] Naghb [12] TRNSYS [13] Wind-Catcher Optimizer [14] Antenna [15] Computational Fluid Dynamics [16] The Coefficient of Performance [17] Wind-Catcher of an Earth-to-Air Heat Exchanger [18] Self - Cooling

منبع پایدار روشنایی روز باشد و باعث کاهش مصرف انرژی در کشورهای گرم و خشک گردد [۲۷].

کالاتیت و همکاران در تحقیق خود از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و تجزیه و تحلیل تونل باد جهت بررسی عملکرد یک بادگیر یک طرفه استفاده نمودند. یک مدل معیار تجربی دقیق با استفاده از نمونه‌سازی سریع ایجاد و در یک تونل باد مادون سرعت صوت حلقه بسته[19] آزمایش شد. یک نمایش هندسی دقیق از مجموعه تست تونل باد در مدل سازی عددی بازسازی شد. نتایج تجربی برای جریان هوای داخلی و خارجی، نرخ عرضه و ضرایب فشار با نتایج عددی مقایسه شد. از آزمایش تجسم دود[20] نیز برای آنالیز بیشتر ساختار دقیق جریان هوا درون بادگیر و همچنین داخل اتاق آزمایش استفاده گردید. پس از اعتبارسنجی موفقیت آمیز مدل CFD معیار، دستگاه‌های انتقال حرارت استوانه‌ای[21] (HTD) در مدل بادگیر یک طرفه قرار گرفتند تا دمای هوا ناشی از فضای تهویه را کاهش دهند. یافته‌های تحقیق نشان داد مدل پیشنهادی قادر به کاهش دمای عرضه تا حداکثر ۱۲ کلوین در خرد اقلیم وابسته به سرعت هوای بیرونی است [۱۸].

چودری و همکاران در پژوهشی یک چرخه حرارتی حلقه بسته [22] حاوی لوله‌های گرم استوانه‌ای[23] ادغام شده در یک بادگیر مدور نصب شده بر روی بام به منظور دستیابی به آسایش داخلی را مورد بررسی قرار دادند. لوله‌های حرارتی مسی پر شده با آب بطور سیستماتیک بصورت افقی قرار داده شدند. آب به عنوان سیال با هدف ایجاد سیستم خنثی کربن[24] در کار حفظ کیفیت هوای محیط ساخته شده مورد استفاده قرار گرفت. معادلات سه بعدی رنس[25] همراه با معادلات حرکت، پیوستگی و انرژی با استفاده از فلوئنت[26] برای شبیه‌سازی میدان سرعت و فشار حل شدند. نتایج پژوهش، توانایی سیستم سرمایشی پیشنهادی در تأمین هوای تازه مورد نیاز برای هر ساکن/کاربر را نشان می‌دهد. اعتبار سنجی یافته‌های تحقیق با مقایسه با ساختار بادگیرهایی که بطور مشابه در پیشینه تحقیق آنالیز شده بودند، انجام گرفت. پژوهش مذکور، عملکرد پایدار سیستم‌های تهویه طبیعی را در ارائه سرمایش بدون مصرف انرژی در مناطقی که شامل شرایط اقلیم گرم و معتدل و مرطوب است، طبقه‌بندی نموده است [۲۸].

خانی و همکاران مطالعه تجربی از یک طرح مدولار بادگیر با سطوح مرطوب (پوشال مانند نی مرطوب) را ارائه داده‌اند. پارامترهای دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا در زمان‌های مختلف و در نقاطی که سرعت هوای محیط صفر بوده اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان داد که بادگیر مدولار می‌تواند دمای هوا را بطور میانگین تا ۱۰ °C کاهش دهد و رطوبت نسبی جریان هوا در یک ساختمان را بطور متوسط تا حدود ۳۶ درصد افزایش دهد. علاوه بر این بادگیر ارائه شده می‌تواند برای جریان هوای ورودی به ساختمان سرعتی تا حدود ۱/۸ متر بر ثانیه را ایجاد نماید. داده‌های حاصل بهبود شرایط هوای داخل به شرایط آسایش را خاطر نشان می‌سازد [۲۹].

کالاتیت و همکاران عملکرد بادگیر نصب شده بر روی بام در ترکیب با لوله‌های گرم[27] را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و تجزیه و تحلیل آزمایش میدانی مورد ارزیابی قرار دادند. در این بررسی، مدل بادگیر به یک اتاق $۵\,\mathrm{m} \times ۵\,\mathrm{m} \times ۳\,\mathrm{m}$ متصل شد. نرم‌افزار فلوئنت و مدل $k-\epsilon$ استاندارد برای انجام شبیه‌سازی رنس با حالت پایدار[28] مورد استفاده قرار گرفت. مدل عددی تجزیه و تحلیل مفصلی از جریان هوا و توزیع دما در داخل اتاق آزمایش ارائه داد. تجزیه و تحلیل غلظت $CO_۲$ نشان داد که این سیستم قادر به ارائه هوای تازه در داخل فضا و کاهش سطح $CO_۲$ است. در این مطالعه از PMV[29] برای محاسبه آسایش حرارتی استفاده نموده است. مدل عددی با استفاده از داده‌های تجربی اعتبارسنجی و بین هر دو روش تحلیل تطابق خوبی مشاهده شد [۳۰].

سلطانی و همکاران در تحقیق خود طراحی بادگیر جدیدی را با پد مرطوب ارائه دادند. طرح مذکور شامل یک بخش ثابت (ستون)، بخش متحرک و چرخان (سر/کلاهک)، ورودی هوا با یک صفحه و دو دریچه در انتهای ستون است. بادگیر طراحی شده قابلیت نصب بر روی بام به منظور بهره‌گیری از جریان هوای محیط را دارد. به منظور دریافت سرعت بهینه باد برای شرایط آسایش مطلوب قسمت بالایی (سر) بادگیر بصورت دستی و خودکار قابل کنترل است. در راستای بیشینه نمودن عملکرد سیستم، پمپ کوچکی برای توزیع و اسپری نمودن آب بر روی پد سرمایش تبخیری در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) جریان هوا در اطراف و درون بادگیر پیشنهادی به منظور تجزیه و تحلیل عملکرد تهویه آن انجام شد. بدین ترتیب، سرعت، فشار کل و توزیع ضریب فشار در اطراف و درون بادگیر برای سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که طراحی بادگیر جدید با یک پد مرطوب می‌تواند راه‌حلی منطقی برای بهبود طبیعی آسایش حرارتی ساختمان‌ها در اقلیم گرم و خشک باشد.

نوروزی و همکاران، در پژوهش خود، یک بادگیر در مقیاس آزمایشگاهی را با سیستم تبخیری ترکیبی تجهیز نمودند. مجموعه طراحی شده، از یک بازشوی یک طرفه با یک پد مرطوب قابل تنظیم و یک تیغه مرطوب تشکیل شده است. تجزیه و تحلیل نظری بادگیر انجام شد و مجموعه‌ای از آزمایشات جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل‌های بدست صورت پذیرفت. در این تحقیق، سرعت باد، ارتفاع بادگیر و نحوه عملکرد بازشو (باز یا بسته) بر افت دما و سرعت هوای در حال حرکت از طریق بازشو و همچنین بار سرمایشی محسوس بررسی شد. نتایج نشان داد که در شرایط باد خیز، هنگام باز بودن پد، سرعت هوای داخلی کمی بیشتر بود. برعکس در صورتیکه سرعت باد صفر بود، پد بسته منجر به افزایش سرعت هوای داخل گردید. در نتیجه ارتفاع ۲/۵ متر و ۳/۵ متر بادگیر و سرعت باد کمتر از ۳ متر بر ثانیه، بار سرمایشی بطور تقریبی با به‌کارگیری حالت بسته پد، دو برابر شده است [۳۱].

سیدآبادی و همکاران در پژوهشی به بررسی ترکیب مواد تغییر فازدهنده (PCM[30]) با سیستم غیرفعال بادگیر پرداخته‌اند. یک مطالعه جامع سه بعدی پویا وابسته به زمان در خصوص مواد تغییر فازدهنده که به عنوان ذخیرساز حرارتی عمل می‌کنند در ترکیب با دیوار بادگیر جهت کاهش اختلاف دما انجام شده است. این پژوهش با بهره‌گیری از متلب [31] جهت کاهش بار سرمایشی

[19] A Closed-Loop Subsonic Wind Tunnel [20] Smoke Visualisation Experiment [21] Heat Transfer Devices (HTD) [22] A Novel Closed-Loop Thermal Cycle [23] Cylindrical Heat Pipes [24] System Carbon-Neutral [25] Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) [26] FLUENT [27] Heat Pipes [28] The Steady-State RANS Simulation [29] Predicted Mean Vote [30] Phase Change Material [31] The MATLAB Open-Source Code Software

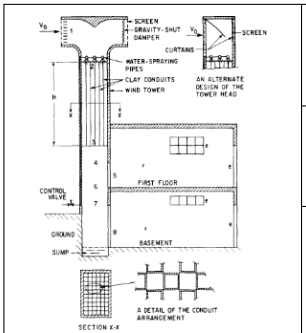
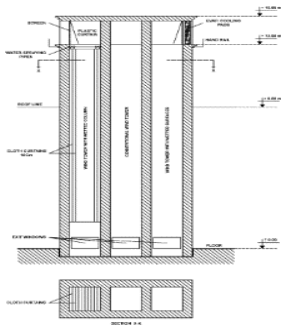
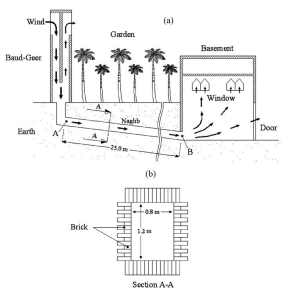
محیط انجام شده است. طبق یافته‌های پژوهش حدود ۲۵ درجه افت دما در ۷ ساعت کاری در این سیستم اندازه‌گیری شده است [۳۲].

بررسی‌ها نشان داد که در اکثر مواردی که از این سامانه در سیستم‌های ترکیبی استفاده می‌شود، کارایی سامانه به مقدار چشمگیری افزایش می‌یابد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد استفاده از این سامانه نه تنها به عنوان یک سیستم سرمایشی مد نظر قرار نگرفته است، بلکه می‌توان جهت پیش گرمایش هوای ورودی نیز از آن استفاده کرد. هرچند که در مجموع، سامانه در کاربرد سرمایشی از کارایی مناسب‌تری برخوردار است. در جدول‌های ۱ تا ۳ به بررسی مزایا و معایب سیستم‌های بادگیر نوین طراحی شده که در پیشینه تحقیق بدان اشاره شده است پرداخته می‌شود.

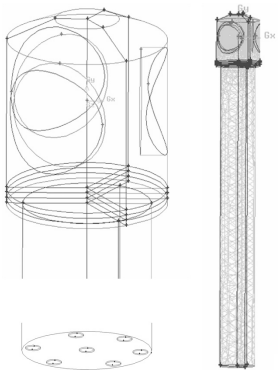
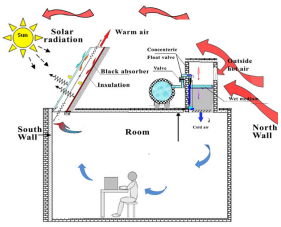
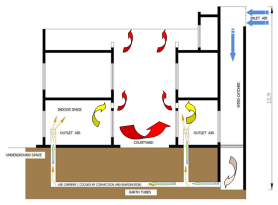
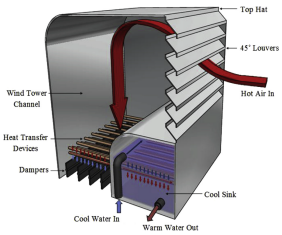
## ۴ نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی پیشینه پژوهش نشان داد که نمونه‌های نوآورانه ارائه‌شده برای بادگیر یا سیستم‌های ترکیب‌شده با آن ضمن به همراه داشتن مزایایی، معایبی را نیز به دنبال داشته است. از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به ایجاد رطوبت در مصالح به دلیل استفاده از آب یا قطرات آن و گهگاه افزایش رطوبت بصورت مستقیم اشاره کرد. از سوی دیگر، اکثر نوآوری‌های صورت‌گرفته از منظر اقتصادی و اجرایی توجیه چندانی نداشته و صرفاً در مرحله ایده و نوآوری باقی مانده و بصورت انبوه مورد استفاده قرار نگرفته است. البته نباید از این مهم گذر کرد که تمامی سیستم‌های جدید، افزایش عملکرد بادگیر سنتی را سبب گردیده‌اند و این افزایش عملکرد به معنای بهبود شرایط داخل از نظر آسایش حرارتی است. از دیگر معایب قابل توجّه در سیستم‌های نوآورانه، محدود شدن استفاده آنها به ساختمان‌های کوتاه مرتبه است. از این رو در صورتی که بتوان سیستم بادگیر را در تحقیقات آتی با سیستمی ترکیب نمود که ضمن ایجاد پیش گرمایش و پیش سرمایش، مصرف انرژی ساختمان را کاهش و آسایش حرارتی را افزایش دهد و مشکلاتی چون ایجاد رطوبت در مصالح و دیگر معضلات سیستم‌های طراحی شده را نداشته باشد قدمی مثبت در این زمینه برداشته شده است.

**جدول ۱:** مقایسه طرح‌های جدید بادگیر (نگارندگان).

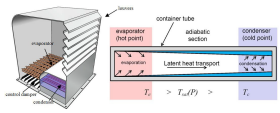
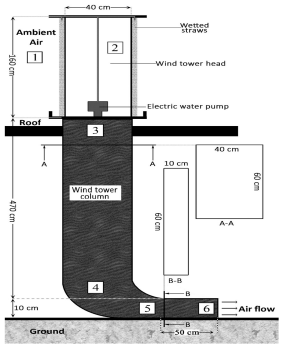
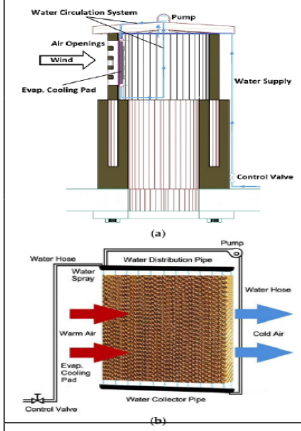
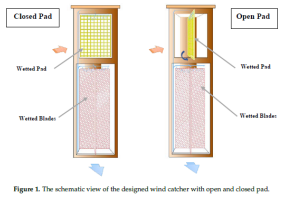
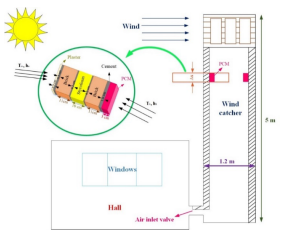
| سال | | | |
|---|---|---|---|
| ۱۹۸۵ | یک طراحی بهبود یافته بادگیر جهت تهویه طبیعی و سرمایش غیرفعال | |  |
| | مزایا | وجود سفال سبب کاهش دمای بیشتر می‌شود. | |
| | معایب | وجود آب سبب افزایش رطوبت و تخریب مصالح می‌شود. پاشش آب در سیستم سبب افزایش هزینه تعمیر و نگهداری می‌شود. | |
| ۲۰۰۸ | بررسی تجربی یک بادگیر با طراحی جدید | |  |
| | مزایا | کاهش دمای دریافتی در محیط داخل نسبت به سیستم سنتی. امکان بهره‌گیری در محیط‌های با سرعت کم یا زیاد. | |
| | معایب | وجود آب سبب افزایش رطوبت و تخریب مصالح می‌شود. تعمیر و نگهداری پدها و پردهای مرطوب سخت و هزینه‌بر است. | |
| ۲۰۱۰ | تجزیه و تحلیل عملکرد سیستم سرمایشی غیرفعال با کانال‌های زیرزمینی | |  |
| | مزایا | کاهش دمای دریافتی در محیط داخل ـ سرمایش غیرفعال. | |
| | معایب | عدم کارایی برای معماری امروزی. نیاز به فضای زیاد جهت بهره‌گیری کامل از سیستم طراحی‌شده. | |

**جدول ۲:** ادامه جدول ۱.

| | | | |
|---|---|---|---|
| ۲۰۱۲ | ارزیابی عملکرد انرژی در یک بادگیر تبخیری | |  |
| | مزایا | کاهش دمای دریافتی در محیط داخل. | |
| | معایب | نیاز به آب دارد که ممکن است وارد سازه ساختمان شود. ایجاد آلودگی صوتی با توجّه به وجود فن. هزینه تعمیر و نگهداری بالا با توجّه به وجود فن. نیاز به فضای زیاد جهت بهره‌گیری کامل از سیستم طراحی شده. | |
| ۲۰۱۴ | بررسی پارامتریک دودکش خورشیدی با بادگیر سرمایشی اتاقی در مصر | |  |
| | مزایا | کاهش دمای دریافتی در محیط داخل. | |
| | معایب | وجود آب سبب افزایش رطوبت و تخریب مصالح می‌شود. کاربرد برای تعداد طبقات کم. | |
| ۲۰۱۵ | طراحی پایدار بادگیر در ترکیب با مبدل حرارتی زمین به هوا (اقلیم گرم و خشک) | |  |
| | مزایا | کاهش دمای دریافتی در محیط داخل. | |
| | معایب | افزایش میزان کانال کشی و پیچیدگی سیستم. کاربرد برای تعداد طبقات کم. | |
| ۲۰۱۵ | مطالعه CFD و تونل باد از عملکرد بادیگر یک طرفه با دستگاه انتقال حرارت | |  |
| | مزایا | کاهش دمای دریافتی در محیط داخل | |
| | معایب | افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری. افزایش هزینه‌های ساخت و اجرا. | |
| ۲۰۱۵ | آنالیز عددی یک بادگیر به کمک فناوری سرمایش غیرفعال برای محیط ساخته شده | | |
| | مزایا | از بین بردن جریان کوتاه جریان هوا.[۳۲] کاهش دمای دریافتی در محیط داخل. | |
| | معایب | عدم مشخص بودن سیستم تأمین آب. افزایش هزینه‌های تعمیر، نگهداری و ساخت و اجرا. | |

[32] Airflow Short-Circuiting: Typically occurs in multi-channel wind towers. Short-circuiting occurs when an inlet of supply airflow is located near the exhaust channel and the airflow exits immediately without entering the building (Chaudhry et al., 2015: 16).

**جدول ۳:** ادامه جدول ۲.

| | | | |
|---|---|---|---|
| ۲۰۱۷ | آسایش حرارتی و آنالیز کیفیت هوای داخلی بادگیر سرمایشی کم مصرف | |  |
| | مزایا | کاهش دمای دریافتی در محیط داخل. | |
| | معایب | افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری. افزایش هزینه‌های ساخت و اجرا. | |
| ۲۰۱۷ | بررسی تجربی یک بادگیر مدولار در اقلیم گرم و خشک | |  |
| | مزایا | کاهش دمای دریافتی در محیط داخل. افزایش رطوبت نسبی محیط. | |
| | معایب | به دلیل سرمایش تبخیری، رطوبت سبب تخریب مصالح می‌شود. افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری به جهت تعویض پوشال‌ها. ظاهر نه چندان جالب در محیط داخل و خارج. | |
| ۲۰۱۸ | بررسی الگوهای جریان هوا در طراحی جدید بادگیر همراه با سطوح مرطوب | |  |
| | مزایا | کاهش دمای دریافتی در محیط داخل. افزایش رطوبت نسبی محیط. | |
| | معایب | به دلیل وجود سرمایش تبخیری و پاشش آب بر روی پوشال‌ها، سبب تخریب مصالح در طول عمر ساختمان می‌شود. افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری به جهت تعویض پدهای سلولزی. ایجاد آلودگی صوتی با توجّه به متحرک بودن کلاهک بادگیر امکان رشد قارچ و باکتری داخل پدها. | |
| ۲۰۱۸ | ارزیابی حرارتی ترکیب نوآورانه سرمایش تبخیری بادگیر | |  |
| | مزایا | کاهش دمای دریافتی در محیط داخل. افزایش رطوبت نسبی محیط. | |
| | معایب | به دلیل سرمایش تبخیری، رطوبت سبب تخریب مصالح می‌شود. افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری به جهت تعویض پوشال‌ها. | |
| ۲۰۱۹ | ترکیب PCM با جداره بادگیر جهت افزایش نرخ انتقال حرارت | |  |
| | مزایا | کاهش دمای دریافتی در محیط داخل. | |
| | معایب | افزایش چشمگیر هزینه اجرا و ساخت. مشکلات اجرایی و ساخت. افزایش هزینه تعمیر و نگهداری. | |

# مراجع

[1] Bahadori, Mehdi N. Passive cooling systems in iranian architecture. *Scientific American*, 238(2):144–155, 1978.

[2] Liu, Shichao, Mak, CM, and Niu, JianLei. Numerical evaluation of louver configuration and ventilation strategies for the windcatcher system. *Building and environment*, 46(8):1600–1616, 2011.

[3] Yaghoubi, MA, Sabzevari, A, and Golneshan, AA. Wind towers: measurement and performance. *Solar energy*, 47(2):97–106, 1991.

[4] Saadatian, Omidreza, Haw, Lim Chin, Sopian, Kamaruzzaman, and Sulaiman, Mohamad Yusof. Review of windcatcher technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3):1477–1495, 2012.

[5] Li, Liu and Mak, CM. The assessment of the performance of a windcatcher system using computational fluid dynamics. *Building and environment*, 42(3):1135–1141, 2007.

[6] Bouchahm, Yasmina, Bourbia, Fatiha, and Belhamri, Azeddine. Performance analysis and improvement of the use of wind tower in hot dry climate. *Renewable Energy*, 36(3):898–906, 2011.

[7] Montazeri, Hamid and Azizian, Ruhollah. Experimental study on natural ventilation performance of a two-sided wind catcher, 2009.

[8] Bahramzadeh, Mohammad, Sadeghi, Bahador, and Rou, S. Sabok. Identifying the identity of iranian wind catchers and their types. *Basic and Applied Scientific Research*, 3(2):12–19, 2013.

[9] Pirhayati, M., Ainechi, Sh., M., Torkjazim, and Ashrafi, E. Ancient iran, the origin land of wind catcher in the world. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 5(8):433–439, 2013.

[10] Mahmoudi, Mahnaz. *Windcatcher is a symbol of Iranian architecture*. Yazda, 1388 (in Persian).

[11] Bahadourinejad, Mehdi and Dehghani, Ali Reza. *Wind Catcher, Iranian engineering masterpiece*. Yazda, 1391 (in Persian).

[12] Pirnia, Mohammad Karim. *Iranian Architecture*. Memarian, 1395 (in Persian). Collected by Memarian, Gholam Hossein.

[13] Abousabaa, Mohammad Reza and Khodakarami, Jamal. Investigating the physics of traditional windcatcher and their disadvantages with a ffunctional optimization approach. in *1th international conference on new energy maintenance approaches*, Tehran, 1390 (in Persian). Amirkabir University of Technology.

[14] Escandari, Mohsen and Kamran Kasmaei, Hadiseh. Investigating the typology of windcatchers, their advantages, disadvantages and correcting them in terms of sustainability. in *Third annual conference on architectural, urban planning and urban management research*, Shiraz, 1390 (in Persian). Mehrazi Road Ambassadors Architecture and Urban Planning Institute.

[15] Ardakan one-sided windcatcher. Online, 1398 (in Persian). https://www.isna.ir/news/yazd-62106/.

[16] Six wind-catchers reservoir in yazd. Online, 1398 (in Persian). https://bit.ly/2Vbnntf.

[17] Patel, D and Rajan, ST. Design of a passive and wind speed responsive wind catcher for energy efficient buildings. *IJIRST–International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1(8), 2015.

[18] Calautit, John Kaiser, Hughes, Ben Richard, and Shahzad, Sally Salome. Cfd and wind tunnel study of the performance of a uni-directional wind catcher with heat transfer devices. *Renewable Energy*, 83:85–99, 2015.

[19] Maleki, B Ahmadkhani. Wind catcher: passive and low energy cooling system in iranian vernacular architecture. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 8:130–137, 2011.

[20] Hosseini, SH, Shokry, E, Hosseini, AJ Ahmadian, Ahmadi, G, and Calautit, JK. Evaluation of airflow and thermal comfort in buildings ventilated with wind catchers: Simulation of conditions in yazd city, iran. *Energy for Sustainable Development*, 35:7–24, 2016.

[21] Bahadori, Mehdi N. An improved design of wind towers for natural ventilation and passive cooling. *Solar Energy*, 35(2):119–129, 1985.

[22] Bahadori, MN, Mazidi, M, and Dehghani, AR. Experimental investigation of new designs of wind towers. *Renewable Energy*, 33(10):2273–2281, 2008.

[23] Jafarian, SM, Jaafarian, SM, Haseli, P, and Taheri, M. Performance analysis of a passive cooling system using underground channel (naghb). *Energy and Buildings*, 42(5):559–562, 2010.

[24] Soutullo, S, Sanjuan, C, and Heras, MR. Energy performance evaluation of an evaporative wind tower. *Solar energy*, 86(5):1396–1410, 2012.

[25] Abdallah, Amr Sayed Hassan, Hiroshi, Yoshino, Goto, Tomonobu, Enteria, Napoleon, Radwan, Magdy M, and Eid, M Abdelsamei. Parametric investigation of solar chimney with new cooling tower integrated in a single room for new assiut city, egypt climate. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(2-3):92, 2014.

[26] Benhammou, M, Draoui, B, Zerrouki, M, and Marif, Y. Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate. *Energy conversion and management*, 91:1–11, 2015.

[27] Jassim, JAAW. Sustainable design of wind-catcher of an earth-to-air heat exchanger in hot dry areas. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(4):582–589, 2015.

[28] Chaudhry, Hassam Nasarullah, Calautit, John Kaiser, and Hughes, Ben Richard. Computational analysis of a wind tower assisted passive cooling technology for the built environment. *Journal of Building Engineering*, 1:63–71, 2015.

[29] Khani, SMR, Bahadori, MN, and Dehghani-Sanij, AR. Experimental investigation of a modular wind tower in hot and dry regions. *Energy for Sustainable Development*, 39:21–28, 2017.

[30] Calautit, John Kaiser, Aquino, Angelo I, Shahzad, Sally, Nasir, Diana SNM, and Hughes, Ben Richard. Thermal comfort and indoor air quality analysis of a low-energy cooling windcatcher. *Energy Procedia*, 105:2865–2870, 2017.

[31] Soltani, Madjid, Dehghani-Sanij, Alireza, Sayadnia, Ahmad, Kashkooli, Farshad M, Gharali, Kobra, Mahbaz, SeyedBijan, and Dusseault, Maurice B. Investigation of airflow patterns in a new design of wind tower with a wetted surface. *Energies*, 11(5):1100, 2018.

[32] Seidabadi, Leila, Ghadamian, Hossein, and Aminy, Mohammad. A novel integration of pcm with wind-catcher skin material in order to increase heat transfer rate. *International Journal of Renewable Energy Development*, 8(1):1–6, 2019.