DOR: 20.1001.1.24234931.1400.8.1.4.8

سال هشتم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۰، ص ص ۳۳- ۴۰

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۹/۱۹

بررسی عددی عملکرد حرارتی بادگیر در ایجاد تهویه طبیعی در اقلیم گرم و خشک

نگار صادقی[۱]، یوسف گرجی مهلبانی[۲*]، حمیدرضا نظیف[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد معماری و انرژی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)

۲- استاد دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)

۳- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)

*ایران، قزوین، کدپستی، ۳۴۱۴۹-۶۷۷۴، gorji@arc.ikiu.ac.ir

چکیده

در معماری مدرن علاوه بر نیازهای اولیه و در نظر گرفتن زیبایی فضا و نمای ساختمان، توجّه به طرح‌هایی برای جلوگیری از اتلاف انرژی عاملی مهم و تعیین‌کننده به شمار می‌رود. یکی از روش‌های جامع جهت پوشش تمامی فاکتورهای مذکور، تهویه‌ی طبیعی است که یکی از مؤثرترین عوامل در ایجاد آسایش حرارتی شناخته شده است. این عامل بالاخص در اقلیم گرم و خشک همواره مورد توجّه بوده است و معماران راه‌حل‌های متفاوتی را بسته به شرایط اقلیمی منطقه برای آن یافته‌اند. در این مطالعه به بررسی نمونه‌هایی عناصر تهویه‌ی طبیعی معماری سنتی، از جمله حیاط مرکزی و بادگیر، در اقلیم گرم و خشک پرداخته می‌شود. از این‌رو هدف اصلی این پژوهش، بررسی و مطالعه‌ی ایده‌ها و دیدگاه‌های معماری سنتی در حوزه‌ی تهویه‌ی طبیعی و تأثیر عناصر به کار رفته در ابنیه‌ی سنتی جهت آسایش حرارتی و متعادل سازی دمای محیط از این طریق، در اقلیم گرم و خشک بوده تا بتوان با الگوگیری از این عناصر در طراحی ساختمان‌های مدرن، آسایش حرارتی را در یک بنای معاصر بهبود بخشیم. به این منظور با بهره‌گیری از علم دینامیک سیالات و بر پایه‌ی شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت به تحلیل عددی عملکرد بادگیر پرداخته شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد بهره‌گیری از بادگیر می‌تواند منجر به کاهش دما تا حدود ۹درجه سانتی‌گراد در اقلیم گرم و خشک شود. همچنین وجود حیاط مرکزی می‌تواند شرایط آسایش حرارتی را در فضای باز ساختمان تا حد مطلوبی مهیا سازد.

کلیدواژگان: تهویه‌ی طبیعی، اقلیم گرم و خشک، معماری سنتی، بادگیر، حیاط مرکزی

Numerical investigation on thermal performance of a wind catcher for natural ventilation in hot and dry climate

Negar Sadeghi[1], Yousef Gorji Mahlabani[2*], Hamid Reza Nazif[3]

۱- MSc Student in Energy and Architecture, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

۲- Professor, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin.

۳- Associate Professor, Faculty of mechanical engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin.

* P.O.B. 34149-6774 Qazvin, Iran, gorji@arc.ikiu.ac.ir

Received: 14 October 2019 Accepted: 10 December 2019

Abstract

In modern architecture, in addition to the basic needs and consideration of the beauty of spaces and facades of buildings, attention to designs to prevent energy loss is an important factor. One of the most comprehensive methods to cover all of these factors is natural ventilation, which is known to be one of the most effective factors in providing thermal comfort. This factor has always been considered especially in hot and dry climates, and architects have come up with different solutions depending on the climatic conditions of the area. This study investigates one of the most commonly used natural ventilation elements of traditional, wind-driven architecture in warm and dry climates. Therefore, the main purpose of this research was to study and study the ideas and perspectives of traditional architecture in the field of natural ventilation and the influence of elements used in traditional buildings for thermal comfort and temperature equilibrium in hot and dry climate in order to be modeled. From traditional architectural elements to the design of modern buildings, we improve thermal comfort in a contemporary building. For this purpose, numerical analysis of deflector performance has been performed by applying fluid dynamics science and based on simulation in Ennis Fluent software. The results show that the use of windscreen can reduce the temperature to about 9 ° C in hot and dry climate.

Keywords: Natural Ventilation, Hot and dry Climate, Traditional Architecture, windcatcher, Central Courtyard

[۱] این پژوهش برگرفته از پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، مهندس نگار صادقی به راهنمایی: دکتر یوسف گرجی مهلبانی و به مشاوره: دکتر حمیدرضا نظیف در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) می‌باشد.

مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص ۴ کریتیو کامنز محفوظ است

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش آلودگی‌های زیست محیطی به علت مصرف بی‌رویه‌ی انرژی، استفاده از سامانه‌های تهویه طبیعی را به منظور بهبود شرایط ضروری ساخته است. معماری سنتی ایران دارای پشتوانه‌ای قوی و پر بار از جنبه‌های گوناگون پایداری، هنر و فرهنگ ایرانی است و خود سهم و ارزش ویژه‌ای را از این هنر و فرهنگ نمایش می‌دهد. بهره‌گیری از کوران هوا، افزایش رطوبت نسبی و کاهش تبخیر سطحی موجب ایجاد شرایط آسایش در اقلیم‌های گرم و خشک می‌شود. تهویه‌ی طبیعی در معماری سنتی ایران با تأکید بر عملکرد عناصر شاخص معماری، همچون بادگیرها، پوشش گیاهی و وجود حوض‌ها و حیاط‌های مرکزی که مشخصه‌ی اقلیمی معماری این مناطق است مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. عدم توجّه به بنیادهای پایدار معماری سنتی ایران و عوامل گوناگون مؤثر بر آن، پیکری فرسوده و ناپایدار از ساخت شهری به جای گذارده است. بدون شک پیشرفت تکنولوژی ضرورتی است که از آن نمی‌توان چشم پوشید ولی این عامل نباید ارزش‌های ما را خصوصاً در زمینه پایداری محیط زیست دستخوش مخاطره نماید. درهمین راستا می‌بایست راهکارهای فراموش شده در طراحی محیط مسکونی پایدار شناسایی شده و با به روز نمودن آنها با توجّه به تکنولوژی‌های موجود، از آن‌ها در طراحی ساختمان‌های پایدار استفاده نمود[۱].

از این‌رو هدف اصلی این پژوهش، بررسی و مطالعه‌ی ایده‌ها و دیدگاه‌های معماری سنتی در حوزه‌ی تهویه‌ی طبیعی و تأثیر عناصر به کار رفته در ابنیه‌ی سنتی جهت آسایش حرارتی و متعادل‌سازی دمای محیط از این طریق، در اقلیم گرم و خشک بوده است، تا از این طریق بتوانیم علاوه بر فهم بیشتر مفاهیم معماری سنتی، راه‌حل‌هایی اقلیمی و البته کارا برای معماری عصر حاضر بیابیم. این مساله که ساختمان‌های سنتی در اقلیم مورد نظر چگونه و تا چه اندازه آسایش ساکنان خود را تأمین می‌کرده است نیاز به تحلیل و بررسی دارد و هرگونه اصلاح و صرفه‌جویی از طریق شناخت این سنت‌های بومی، سنت‌هایی که طی صدها سال با تجربه ارزشمند حاصل شده است، می‌تواند برای کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی بسیار مناسب بوده و در جهت پایداری محیط و منابع کشور به کار گرفته شود. فرضیه‌ی اصلی در این پژوهش پس از قبول آن که مراد از شناخت گذشته، بازگشت به گذشته نیست؛ بازگشت به گذشته ممکن نیست و اگر به هر طریقی به گذشته بازگردیم جز تقلیدی صوری چیزی عایدمان نخواهد شد؛ این است که با نقد و ارزیابی ویژگی‌ها، تکنیک‌ها و مفاهیم معماری اقلیمی، و پی‌بردن به این موضوع که چگونه شرایط آسایش با مصرف اندک انرژی حاصل می‌شده است؛ می‌توان در جهت به کارگیری این اصول در ساختمان‌های نوین و با متراژ بالا قدم برداشت و از تجربیات گذشتگان به شکلی اصولی و نه تقلید ظاهری صرف بهره برد. محیط زندگی ما در حال حاضر دستخوش تغییراتی شده است که تأمین شرایط آسایش حرارتی در ساختمان‌ها را تا حدودی دشوار کرده است، عواملی چون گرمای بیش از حد هوا، آلودگی هوا و محیط زیست و کاهش منابع فسیلی هر یک نیاز به مطالعات گسترده‌ای جهت ارائه‌ی راهکار جهت تعدیل آن در حوزه‌ی ساختمان دارد. درک این مساله می‌تواند زمینه‌ی ابداع تکنیک‌های تهویه با رویکرد طبیعی و با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی و تامین حداکثری شرایط آسایش در ساختمان را مهیا سازد.

روش تحقیق در این پژوهش، با توجّه به ماهیت میان رشته‌ای آن، یک روش ترکیبی است؛ به این ترتیب که پس از مشاهدات اولیه و انتخاب نمونه‌ی موردی با استفاده از یک راهبرد تجربی، متغیرهای مستقل تأثیرگذار شناسایی و متغیرهای وابسته(دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و...) توسط داده‌های هواشناسی و نتایج شبیه‌سازی‌ها اندازه‌گیری می‌شوند؛ سپس در روند تحلیل و شبیه‌سازی نمونه‌ی به کار گرفته خواهند شد. مدل‌سازی در این پژوهش با استناد بر شبیه‌سازی در نرم افزارهای آنالیز دینامیک سیالات اتودسک سی‌اف‌دی و فلوئنت و تحلیل همزمان آن‌ها شکل خواهد گرفت. به طور خلاصه روند کلی طرح به این صورت بوده است که با کمک شبیه‌سازی رایانه‌ای و حل عددی معادلات توسط نرم‌افزار، به بررسی نمونه‌ای از معماری سنتی اقلیم گرم و خشک و به طور خاص استان اصفهان پرداخته می‌شود و عملکرد یکی از اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار در تهویه‌ی طبیعی معماری سنتی این اقلیم، که بادگیر نام دارد، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته می‌شود.

۲- معماری بومی

معماری گذشته ما دارای ریشه‌ای قوی متناسب با فرهنگ و اقلیم، مردم و منطقه می‌باشد. ولی متأسفانه امروزه با وجود تکنولوژی‌های گوناگون هیچ رنگ و بویی از این معماری و خطوط در ساختمان‌ها مشاهده نمی‌شود[۲]. معماری بومی یعنی مجموعه واحدهای معماری- شهری که در سرزمینی گردهم آمده و با هماهنگی‌هایی که در زمینه‌ی شکل، حجم‌گذاری یا کاربردی، رنگ‌آمیزی و آهنگ سطوح پروخالی و همچنین در زمینه‌ی مصالح و نظام‌های ساختمانی در آن‌ها پدیدار گشته انسجام یافته‌اند. این هماهنگی مبتنی بر ضوابط، رسوم و سلیقه‌های زاده از فرهنگ و رفتار محیطی است[۳]. رابطه‌ی معماری پایدار و معماری بومی، به طور کلی امری بدیهی فرض می‌شود. امّا عدم وجود یک چارچوب ساختاریافته‌ی نظری برای این دو موضوع، کاربرد معماری بومی را برای ایجاد پایداری در معماری معاصر با چالش مواجه کرده است. ترجیح معماران در این است که قواعد سودمند از معماری بومی را در کارهای نو به کار گیرند. دست یافتن به این اصول نیازمند بررسی ساختاریافته رابطه‌ی معماری پایدار و معماری بومی است[۴]. شاید بتوان مشهورترین شاخصه‌ی ابنیه گرم و خشک را پس از حیاط مرکزی، استفاده از بادگیر دانست. بناهایی که با جهت‌گیری و استفاده از حیاط مرکزی خود را از شرایط نامساعد و بادهای نامطلوب خارج مصون داشته‌اند، به طور استادانه‌ای به وسیله‌ی بادگیرها، از بادهای مطلوب جهت بهبود شرایط محیطی و تهویه مناسب هوای داخل خود بهره می‌برند. ترکیب استفاده از بادگیر و حوضچه‌های آب جهت افزایش رطوبت بسیار کارآمد بوده است. از سوی دیگر محیط به وجود آمده در زیر بادگیرها به نقطه‌ی مناسبی جهت گردهمایی اعضای خانواده‌ها تبدیل شده است[۵].

۲-۱- حیاط مرکزی

یکی از مهم‌ترین عناصر در طراحی خانه‌های سنتی ایرانی، حیاط مرکزی است. حیاط محل کانونی و اصلی‌ترین فضای مشترک در خانه است و توسط اعضای خانه برای انواع کارها و فعالیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. عناصر اصلی یک حیاط معمولی ایرانی، یک استخر کوچک و درختانی است که سایه ایجاد کرده و به خنک نگه داشتن فضا کمک می‌کنند[۶]. به غیر از حیاط، درخانه‌های ایرانی طیف متنوعی از فضاهای قابل شناسایی هستند. فضاهای باز این خانه‌ها از سطح حیاط شروع می‌شوند و به سمت آسمان در سطوح مختلف شکل می‌گیرند. کمی بالاتر از حیاط، صفه قرار دارد که به آن بهارخواب هم می‌گویند،کمی بالاتر از صفه، شارمی که پیاده‌رو سربازی است برای تأمین دسترسی فضاهای واقع در بالاخانه قرار دارد. کمی بالاتر از شارمی، ونخانه واقع شده است[۷]. امّا حیاط در مرکز و قلب همه ساختارهای فضایی قرار می‌گیرد. حیاط مرکزی در گونه‌های مسکونی بزرگتر به دو حیاط اندرونی و بیرونی تبدیل می‌شد و با توجّه به کارکردهای خانه چهار حیاط دیگر(حیاط اصطبل، خدمه،

خواجگان، نارنجستان) نیز به آن اضافه می‌شده است[۸]. حیاط مرکزی در اقلیم گرم و خشک، کانون مرکزی خانه‌ها محسوب می‌شود و فضایی اجتماعی با رویکرد محیطی به شمار می‌آید. در زمین‌های با ابعاد مختلف، حیاط مرکزی به گونه‌ای طراحی می‌شده است که دارای فرمی باریک و کشیده باشد تا در طول روزهای تابستان سایه لازم را برای این فضا فراهم آورد، در عین حال عرض آن نیز بایستی به اندازه‌ای طراحی می‌شد که در زمستان‌های سرد قادر به دریافت تشعشعات خورشید باشد. حیاط مرکزی از یک طرف امنیت و حریم خصوصی و از طرف دیگر آسایش را برای ساکنین تأمین می‌کرده است. معمولاً در حیاط مرکزی گودال باغچه‌هایی با انواع گل‌ها و درختان و همین‌طور حوض یا استخرهای کم عمقی نیز وجود داشته که علاوه بر زیبایی با سایه‌اندازی و افزایش رطوبت نسبی به شرایط آسایش فضای حیاط کمک کرده و خود از عناصر اصلی سیستم سرمایش طبیعی در این نوع خانه‌ها به شمار می‌آمده است. درجه‌ی حرارت هوا در فضای حیاط مرکزی بسیار خنک‌تر از درجه حرارت هوا در بالای حیاط مرکزی و همین طور اطراف ساختمان می‌باشد[۹].

حیاط‌ها و عناصر داخلی آن به دو صورت ساخته شده است:

۱) حیاط‌های مسطح که معمولاً در محور طولی آن حوض و به موازات آن دو یا چهار باغچه قرار گرفته است. حوض‌ها و باغچه‌ها نیز بسیار متنوع و زیبا طراحی شده‌اند.

۲) حیاط‌هایی با گودال باغچه؛ نمونه این حیاط در نایین،کاشان و شهرهای دیگر مناطق کویری دیده می‌شود. گودال باغچه و فضاهای دور آن عملاً نقش عملکردی بخشی از فضاهای زیرزمین دارد. در این حالت فضاهای طبقه همکف دور تا دور مهتابی استقرار یافته است و گودال باغچه همراه با درختان سرسبز، به دلیل گود بودن آن، فضایی خنک را به وجود می‌آورده است[۱۰]. نواحی مرکزی ایران معمولاً حیاط‌ها به اندازه‌ی یک طبقه قدیم (حدود شش متر) در سطحی پایین‌تر از معابر قرار داشته‌اند. ورود به این خانه‌ها می‌بایست از طبقه‌ی بالاتر از حیاط صورت گیرد، در یزد به این خانه‌ها گودال باغچه می‌گفتند[۷]. سطح حیاط این خانه‌ها از سطح طبیعی زمین و کوچه پایین‌تر است. وسعت خانه و تعداد حیاط‌های آن بستگی به توان مالی و موقعیت اجتماعی مرد خانه داشته است[۱۱].

۱-۱-۲- حیاط مرکزی و حفظ انرژی

معماری بومی در مناطق کویری ایران بدون اتکا به سوخت‌های فسیلی و با صرفه‌جویی در مصرف انرژی شکل گرفته و فضای باز حیاط مرکزی با محوریت خود، ابعاد معین، جهت‌گیری و مکان‌یابی هدفمند، عنصری تعیین کننده در حفظ انرژی بوده است. در این مناطق بافت متراکم موجبات همسازی با اقلیم را فراهم آورده است و صرفه‌جویی در مصرف انرژی به واسطه تقلیل سطوح در معرض تابش میسر شده است. حفظ انرژی از طریق درهم فشرده بودن واحدهای مسکونی فراهم آمده به گونه‌ای که بعضاً برخی از واحدهای مسکونی حتی از چهار جانب به واحدهای دیگر متصل هستند. در این خانه‌ها استفاده از منابع و انرژی‌های طبیعی نظیر باد و خورشید یکی از اصول ساخت و سازمان فضایی است. فضاهای باز مرکزی در دل هر تک بنا دستیابی به این اصل را هموار کرده‌اند به گونه‌ای که بدون استفاده از سوخت‌های فسیلی، ساکنان در فصل گرم در برابر گرما حفظ شده و در فصل سرد بیشترین بهره را از انرژی لایزال خورشید ببرند. حیاط مرکزی اصلی‌ترین فضای خانه‌های کویری است، این خانه‌ها از نظر وضعیت استقرار نوعاً در جهت قبله قرار دارند و فضاها حول حیاط مرکزی سازماندهی شده‌اند. حیاط با حرکات خورشید هماهنگ است، صفه جنوبی منزلگاه سایه و صفه شمالی شاه‌نشین و جایگاه خورشید است. این نوع سازماندهی و جهت‌گیری، فضاهای تابستانی و زمستانی را به طور منطقی پیرامون حیاط مرکزی قرار داده است. سازندگان خانه با توجّه به تأثیر گردش خورشید بر جبهه‌های مختلف، هر جبهه را به فصلی و ساعتی اختصاص داده‌اند. با عنایت به این موضوع، جبهه‌ی رو به آفتاب، بخش زمستان نشین، جبهه پشت به آفتاب، بخش تابستان‌نشین و جبهه‌ی غربی برای ساعاتی از روزهای سرد زمستان در نظر گرفته شده و برای پرهیز از تابش گزنده آفتاب به جبهه شرقی، در بیشتر موارد در این قسمت طاق نما ساخته‌اند[۱۲].

۲-۲- بادگیر

تفاوت آب و هوا در سراسر کشور از خشک یا نیمه خشک تا نیمه گرمسیری متفاوت است، این در حالی‌ست که در بیشتر مناطق، تابستان‌ها گرم و همراه با آفتاب تقریباً مداوم است. بنابراین افزایش ظرفیت حرارتی پوسته‌ی ساختمان و ایجاد جریان هوا در طول روز برای دستیابی به "محدوده‌ی آسایش" یک ضرورت اساسی بوده و استفاده از پوسته‌های سنگین آجری (برای دیوارها و سقف) و نوآوری "بادگیر" پاسخی هوشمندانه به این ضروریات بوده است. طبق نظر رواف[۱۳]. بادگیر، یک ساختار سنتی است که برای تهویه‌ی هوای منفعل ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بلندترین بادگیر جهان با ارتفاع ۳۳,۳۵ متر در یزد قرار داد. با این حال به نظر می‌رسد که ساخت بادگیرها به دلیل فراگیر شدن سیستم‌های تهویه‌ی مطبوع متوقف شده‌اند امّا شکل ساختاری آن هنوز هم مشهور بوده و به عنوان یک عنصر نمادین در پروژه‌های معاصر به کار گرفته می‌شوند[۱۴].

بادگیرها سیستم‌های خنک کننده غیرفعال ساختمانی هستند که از آنها برای تأمین آسایش افراد در مناطق گرم و خشک استفاده می‌شود. بادگیرها از طریق دریافت هوای تازه فضاهای داخلی را خنک می‌کنند. گاهی آنها به صورت دودکش عمل کرده و هوای با طراوت حیاط در طبقه همکف را به سمت بالا هدایت می‌کنند. نمونه‌های موفق سرمایش طبیعی را می‌توان در بادگیرها، حیاط‌ها، سرداب‌ها، آب انبارها و یخچال‌های طبیعی مشاهده نمود. عملکرد درست و دقیق این نمونه‌ها حاکی از کاربرد و حاکم بودن اصول ترمودینامیک، آیرودینامیک، انتقال حرارت، مقاومت مصالح و شرایط آسایش گرمایی انسان در طراحی آن‌ها می‌باشد. بادگیر یکی از سیستم‌های غیرفعال است که در همین راستا به عنوان یک سیستم خنک‌کننده و تهویه برای قرون متمادی در ایران در مناطق مرکزی مانند کاشان، یزد، کرمان و نیز قسمت جنوبی کشور در حاشیه خلیج فارس و در کشورهای مختلف در خاور میانه و شمال آفریقا مورد استفاده قرار گرفته است[۱۵]. با گذشت زمان قابلیت‌ها و کاربردهای بادگیر فراموش شده است و لازم است به منظور آشنایی بیشتر با ویژگی‌های مثبت آن در جهت تداوم و در مواردی باز زنده‌سازی آن مطالعاتی انجام گیرد. بدین منظور در این تحقیق به بررسی روش‌های ساخت بادگیرها، تقسیم‌بندی آن‌ها بر مبنای مکانی و براساس تعداد جهت‌های دریافت باد، عملکرد سرمایشی و تأثیر عواملی نظیر جهت و سرعت وزش باد، ارتفاع بادگیر و تأثیر ارتفاع در آسیب‌پذیری آن در مقابل زلزله پرداخته می‌شود[۱۶].

۳-۲- پیشینه‌ی پژوهشی ارزیابی عملکرد بادگیر

کاراکاتسانیس[۱۷] به بررسی آیرودینامیکی بادگیرها پرداخته‌اند، به این صورت که جهت جریان هوا را در سه بادگیر به شکل تک، متصل به فضای خانه و متصل به فضای داخلی خانه و حیاط مورد ارزیابی قرار داده و دریافتند در هندسه‌ی بادگیر- خانه، جریان هوا از خانه به سمت بادگیر است در حالی که در هندسه‌ی بادگیر- خانه- حیاط، بادگیر جریان هوای خارجی را به داخل

ساختمان هدایت می‌کند. منتظری[۱۸] به بررسی تأثیر تعداد دریچه‌های بادگیر با سطح مقطع دایره‌ای پرداخته است. نتایج وی نشان داده است که حساسیت بادگیر نسبت به تغییر جهت باد با افزایش تعداد دریچه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین منتظری و دهقان (۱۳۸۵) با مدلسازی یک بادگیر دوطرفه اثبات کرده‌اند که علت جدایش جریان از لبه‌ی پایینی بادگیر، تشکیل یک گردابه‌ی کوچک درست در مجاورت آن می‌باشد. آوبی[۱۹] در پژوهش خود با عنوان "مفاهیم پایه برای تهویه طبیعی ساختمان‌ها" بیان می‌کند که سیستم‌های مکانیکی تهویه و اجزای آن‌ها به عنوان یک منبع آلودگی در رابطه با بیماری سندروم ساختمان، شناخته شده‌اند، همچنین از نظر وی برای سنجش میزان آسایش حرارتی ساکنان شبیه‌سازی CFD لازم و دارای اهمیت بالایی است. در پژوهشی دیگر الموعلیم[۲۰] به مقایسه‌ی عملکرد دو بادگیر با سطح مقطع مربعی و دایره‌ای پرداخته است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که کارآیی یک بادگیر چهارطرفه بسیار بهتر از عملکرد یک بادگیر دایره‌ای به ازای همان سرعت باد در دهانه‌ی بیرونی است. که علت آن لبه‌های تیز بادگیر مربعی است که سبب ایجاد اختلاف فشار بیشتر در جهت باد روی سطوح می‌شود.

فرخیار[۲۱] در زمینه تهویه و جابجایی هوای خانه‌های سنتی در اقلیم گرم و خشک عمده‌ترین عوامل را تهویه بادگیرها و بازشوهایی می‌داند که برفراز بام‌ها قرار دارند و در مطبوعیت هوای فضاها تأثیر شایانی دارند. اعظمی[۲۲] نیز یکی از مهم‌ترین عناصر معماری سنتی ایران در زمینه‌ی تهویه‌ی طبیعی و بهره‌مندی از جریان طبیعی هوا را بادگیرها می‌داند. که در قسمت شکاف‌های ورودی باد به درون کانال هدایت می‌شود و در طرف مقابل که هوا با سرعت از روی آن عبور می‌کند فشار کاهش می‌یابد و موجب مکش هوای گرم و آلوده از درون ساختمان می‌شود و هوای مطبوع و خنک را به درون ساختمان می‌آورد. هاگز[۲۳] به شبیه‌سازی عددی یک بادگیر چهار طرفه برای تهویه‌ی یک اتاق درس پرداخته‌اند. آن‌ها دریافته‌اند که بادگیر توانایی تأمین مقدار هوای مورد نیاز را حتی در سرعت‌های کم باد دارا می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که حتی در کاربری‌های شهری هم بادگیرها یک جایگزین مناسب برای تهویه مکانیکی می‌باشند؛ همچنین با افزودن تیغه‌هایی به آن‌ها می‌توان میزان جریان ورودی باد را به نسبت سرعت باد کنترل کرد. همچنین منتظری و همکاران[۲۴] به بررسی و شبیه‌سازی CFD جریان هوا در ساختمان‌هایی که از بادگیر استفاده شده پرداخته‌اند. آن‌ها با آنالیز کارکرد این بادگیرها در جهت‌گیری‌های متفاوت بازشوها، جریان هوا را در هر وضعیت مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش ابعاد بازشوها در بادگیرهای یک طرفه(نسبت سطح داخلی به سطح خارجی بیش از ۱)، کاهش سرعت القایی جریان باد و در نتیجه‌ی آن کاهش بازده بادگیر را به همراه دارد.

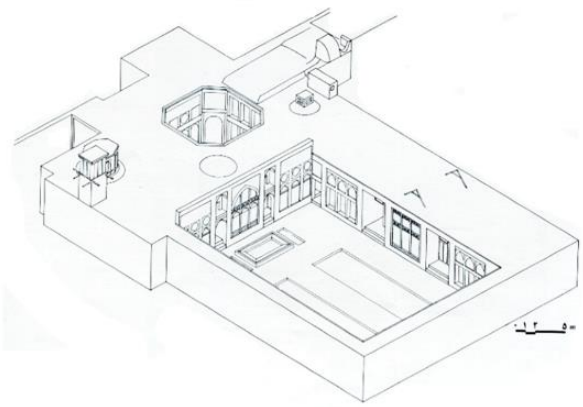
تمامی این پژوهش‌ها به اهمیت و لزوم پرداختن به موضوع این تحقیق بیش از پیش اشاره می‌کند زیرا بحث معماری امروز مقابله و تعدیل معضل استفاده بی‌رویه از منابع تجدیدناپذیر انرژی بوده است که مهندسان مکانیک و معماران باید حداکثر تلاش را در جهت ایفای نقش و وظیفه‌ی خود در این امر خطیر به کار گیرند. البته نمی‌توان این موضوع را انکار کرد که نیل به این هدف با سادگی و در زمان محدود میسر نبوده و نیازمند توجّه بیشتر از سوی صاحب‌نظران، دولت‌ها و مردم می‌باشد.

۳- خانه کریمی

از آنجایی که مطالعه‌ی نمونه‌های موردی به عنوان ابزاری برای دستیابی به اهداف و همچنین روش کار می‌تواند به محقق کمک کند. بنابراین، انتخاب مطالعات موردی از مهم‌ترین عواملی است که می‌تواند موفقیت هر پروژه تحقیقاتی را تحت تأثیر قرار دهد. در این تحقیق چهار معیار اصلی منجر به انتخاب خانه کریمی به عنوان نمونه مورد بررسی شده است. این معیارها عبارتند از:

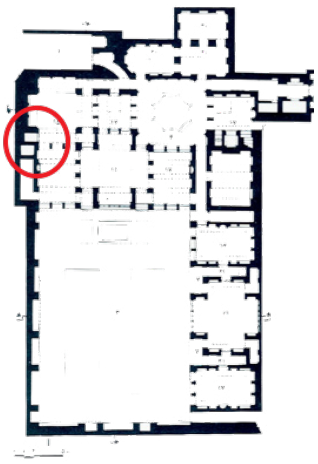
- دسترسی به منابع اطلاعاتی از جمله نقشه‌ها و هرگونه اطلاعات ضروری
- دسترسی به بنای اصلی
- قرارگیری ساختمان در اقلیم گرم و خشک و به طور خاص شهر اصفهان
- وجود المان‌های تهویه طبیعی در ساختمان
- طرح حیاط مرکزی ساختمان

خانه کریمی از یک حیاط مستطی شکل و فضاهایی در جبهه‌های شمالی و شرقی آن تشکیل شده است که مجموعه مهم‌تر خانه در جبهه‌ی شمالی آن واقع است. این مجموعه شامل تالار صلیبی شکل در میانه و دو اتاق سه‌دری در طرفین است. این اتاق‌ها علاوه بر حیاط اصلی خانه از ضلع دیگر خود به فضاهای دیگری مشرف‌اند. به طوریکه اتاق سه دری شرق تالار با یک حیاط کوچک هشت ضلعی و اتاق غربی تالار با یک حوضخانه ارتباط دارد. علاوه بر این دو، یک اتاق سه‌دری دیگر در در انتهای تالار، بین دو فضای حوضخانه و حیاط هشت‌ضلعی نشسته است[۲۵]. حوضخانه در گوشه‌ی شمال غربی تالار واقع و صلیبی شکل می‌باشد. این فضا حوضی هشت ضلعی در میانه و نورگیری با پنجره‌های مشبک و شیشه‌های رنگی در سقف خود دارد که انعکاس زیبایی از بازی نور و رنگ بر روی سطح آب به وجود می‌آورد.



شکل۱ تصویر سه‌بعدی خانه‌ی کریمی[۲۵].

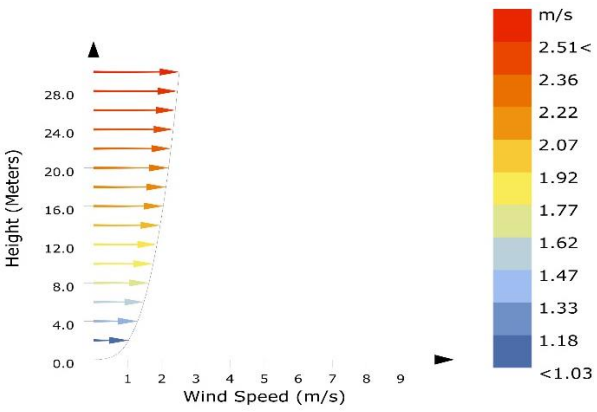
بنا دارای یک حیاط مرکزی مستطیل شک با کشیدگی شمالی- جنوبی بوده است. این حیاط در اضلاع غربی و جنوبی خود با اتاق‌های سه‌دری دیگر در ضلع شرقی و سه اتاق متصل به هم در جبهه‌ی شمالی این حیاط واقع‌اند. سه اتاق اخیر فاقد نور و دید به حیاط هستند. سقف این اتاق‌ها تزئینات یزدی‌بندی دارد امّا نمای این جبهه حیاط تنها دیواری طاق‌نما سازی شده است[1]. شکل۲ پلان خانه‌ی کریمی را با مشخص کردن محل قرارگیری عنصر بادگیر نشان می‌دهد. بادگیر در این خانه به صورت تکی و در جبهه‌ی غربی بنا قرار گرفته است. بادگیرهای خانه‌های قاجاری معمولاً به صورت جفت و متقارن است ولی در نمونه‌های صفوی تک و در مرکز محور میانی بنا قرار گرفته است. نکته‌ی مهم دیگر قرارگیری حوض در اتاق بادگیر در این خانه می‌باشد.



شکل۲ تصویر پلان خانه‌ی کریمی[۲۵].

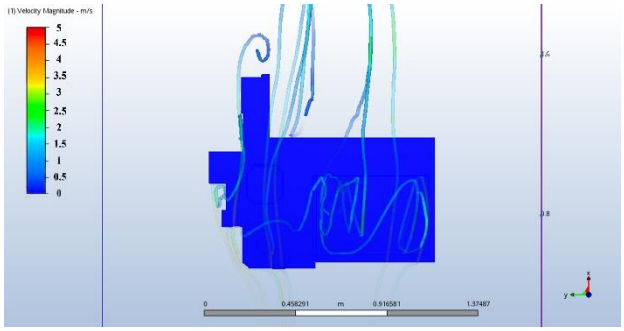
۴- شبیه‌سازی بادگیر و فضای حوضخانه(اتاقک بادگیر)

پس از مدلسازی بنای خانه‌ی کریمی در نرم‌افزار اتوکد، مدل را وارد نرم افزار اتودسک سی‌اف‌دی کرده و جهت نمایش هرچه دقیق‌تر جریان هوا و تغییرات سرعت و آشفتگی آن، لازم است به ترسیم فضای شبیه‌سازی جریان هوا در اطراف ساختمان پرداخته شود. این فضا با تناسبات ۵برابر، ۳برابر و ۱۵برابر بیشترین ارتفاع ساختمان برای جبهه‌های ورودی جریان هوا، اطراف بنا و جبهه‌ی مخالف جهت جریان هوا ترسیم شده است. شکل ۵ توزیع جریان و تغییر سرعت هوا را در برخورد با ساختمان نشان می‌دهد. سرعت ورودی جریان هوا برای روز ۲۳ جولای سال ۲۰۱۸ با پلاگین لیدی‌باگ محاسبه گردید که در ارتفاع ۱۰متری از سطح زمین ۱,۹۲ متر بر ثانیه بوده است(شکل۶).

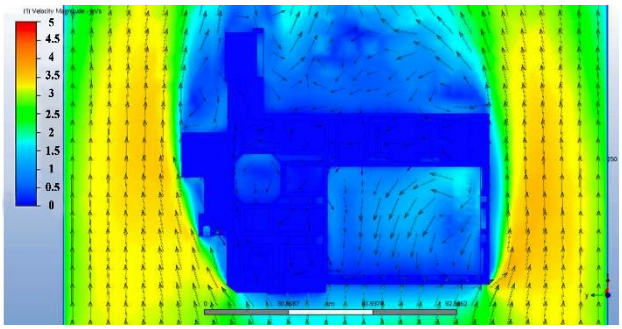


شکل۳ تغییرات سرعت باد در ارتفاع

همانطور که مشخص است سرعت جریان هوا در حیاط‌ها کاهش یافته و به کمتر از ۱متر بر ثانیه تقلیل پیدا می‌کند، این امر در ترکیب با سایر عوامل تأثیرگذار بر میزان آسایش حرارتی ساکنان، همچون دما، رطوبت نسبی و میانگین دمای تابشی، پتانسیل بالایی در جهت بهبود و افزایش محدوده‌ی آسایش دارد. شکل۴ عملکرد تهویه‌ی طبیعی و گردش هوا را در حیاط مرکزی نشان می‌دهد.



شکل۴ هندسه‌ی گردش هوا در حیاط مرکزی خانه کریمی



شکل۵ جهت و سرعت باد در برخورد با بنای خانه کریمی

۵- شبیه‌سازی بادگیر و فضای حوضخانه(اتاقک بادگیر)

به جهت بررسی نحوه‌ی عملکرد بادگیر در تهویه‌ی طبیعی بنای خانه‌ی کریمی ابتدا به بررسی و شبیه‌سازیCFD بادگیر و حوضخانه به عنوان یکی از الگوهای معماری بومی پرداخته شده است. در مرحله‌ی نخست شبیه‌سازی، به مدلسازی بنا بر اساس اسناد و مدارک موجود در کتب و سازمان میراث فرهنگی شهر اصفهان پرداخته شده است. در خانه‌ی کریمی ضخامت دیوارهای باربر متناسب با پوشش سقف و میزان باربری جداره تفاوت دارد.

ضخامت دیوارهای خارجی از ۳۰ تا ۲۳۰ سانتی‌متر متغیر می‌باشد. مصالح مورد استفاده در این بنا مصالح بوم آورد منطقه و متناسب با اقلیم مورد نظر بوده که شامل خشت، آجر، سنگ(ازاره) و ملات گل و گچ می‌باشد. با شبیه‌سازی مشخصات جداره‌های بنا در نرم‌افزار دیزاین بیلدر مشخصات مکانیکی و حرارتی هریک محاسبه گردید و در مراحل شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس مورد استفاده قرار گرفته شده است. پیش از شبیه‌سازی خانه‌ی کریمی در نرم‌افزارهای تحلیل سیالات و آنالیز انرژی ابتدا نقشه و پلان خانه را، با جزئیات موجود در اسناد مدارک سازمان میراث فرهنگی استان اصفهان و سایر منابع مطالعاتی، در نرم افزار اتوکد ترسیم کرده و به مدلسازی سه‌بعدی اتاق بادگیر در آن پرداخته‌ایم. ابعاد کلی و ریز فضاهای این بخش از بنا در جدول۱ قابل مشاهده است.

جدول۱ مشخصات بادگیر و حوضخانه در خانه کریمی

ابعاد فضاهای اصلی خانه‌ی کریمی				
اتاق بادگیر (m^2)	سطح مقطع بادگیر (m^2)	ارتفاع بادگیر (از بام) (m)	دریچه‌های بادگیر (m^2)	
۵۲,۰۲	۳,۶	۴,۷۳	۷,۶	

(khashei.2010)

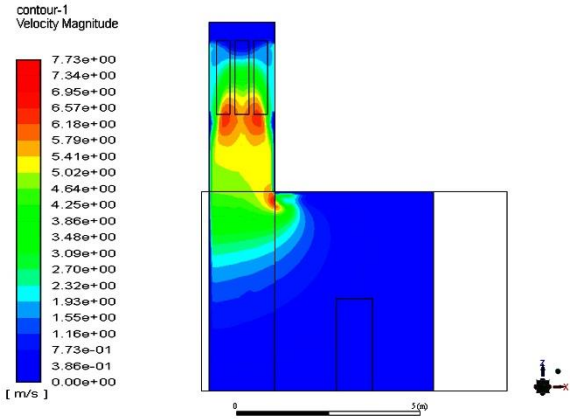
مش‌زنی مدل در این پژوهش با بهره‌گیری از نرم‌افزار دیزاین مدلر صورت گرفته است. پیش از ورود مدل به نرم‌افزار انسیس فلوئنت، ابتدا با شبیه‌سازی آن در نرم‌افزارهای دیزاین بیلدر و انرژی پلاس ضریب انتقال حرارت جداره‌ها و تبادل گرمای آب حوض را محاسبه و سپس نتایج حاصل برای نرم‌افزار انسیس فلوئنت تعریف شده و با انجام مراحل رفت و برگشتی در نرم‌افزار شبیه‌ساز جریان هوا به بررسی تأثیر بار برودتی و سرمایش حوض آب و سرعت باد پرداخته شده است. داده‌های اقلیمی مورد نیاز این نرم‌افزار نیز از داده‌های ساعتی سازمان هواشناسی برای روز ۲۳ جولای سال ۲۰۱۸، به عنوان گرم‌ترین روز سال، و همچنین نتایج پلاگین لیدی‌باگ در نرم‌افزار راینو به دست آمده است. ارتفاع بادگیر در این بنا ۹,۳۲ سانتی‌متر بوده و در هر جهت سه دریچه‌ی ورودی دارا می‌باشد.

۱-۴- تعریف شرایط مرزی

فضای زیر بادگیر یکی از شاخص‌ترین فضاهای معماری بومی در زمینه‌ی تهویه‌ی طبیعی می‌باشد. جریان هوا از طریق دهانه‌های بادگیر وارد شده و پس از عبور از روی حوض و تبادل حرارت با آب موجب سرمایش فضای داخلی می‌شود. شبیه‌سازی مدل آشفتگی از مدل استاندارد کا-اپسیلون بهره گرفته شده است. دمای هوای ورودی سیال، بیشترین دمای روز ۲۳ جولای ۲۰۱۸ برابر با ۳۸,۸ درجه‌ی سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب هدایت حرارتی هر یک از جداره‌های داخلی و خارجی و رفتار ساختمان در شرایط اقلیمی روز بحرانی تابستان، از شبیه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر و انرژی پلاس استخراج و وارد نرم‌افزار فلوئنت گردیده است.

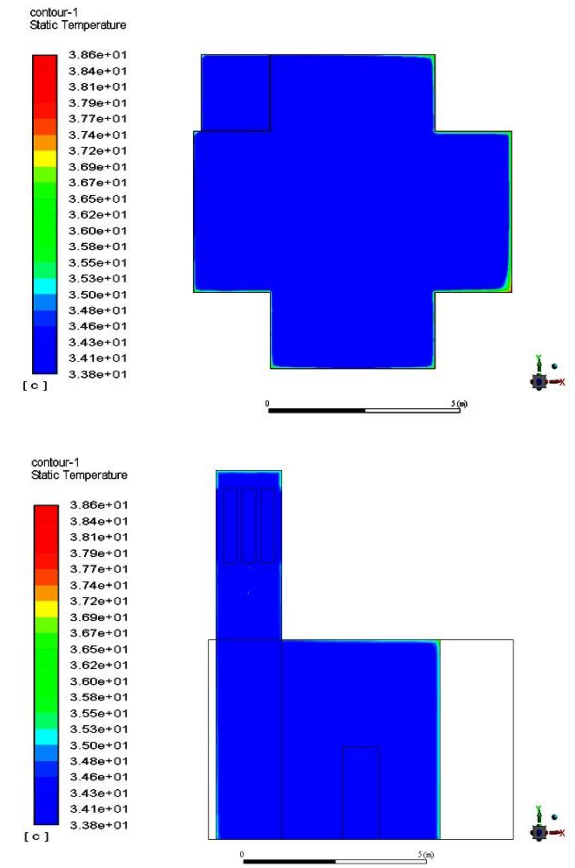
۶- بحث و تفسیر نتایج

در مرحله‌ی نخست طراحی شبیه‌سازی اتاق بادگیر بدون در نظر گرفتن حوض و تأثیرات سرمایش تبخیری صورت گرفته است. سرعت اولیه‌ی باد در ارتفاع ۱۰ متری با توجّه به نتایج مستخرج از پلاگین لیدی‌باگ ۱,۹۲ متر بر ثانیه تخمین زده شده است. در این تحلیل برای نمایش تغییرات سرعت و دمای هوا از دو مقطع، یکی در راستای محور Z و دیگری در راستای محور Y و هر دو با عبور از فضای بادگیر، بهره گرفته شده است. مقطع افقی در ارتفاع ۱,۵ متری از سطح زمین قرار دارد تا علاوه بر پوشش نسبی ارتفاع انسانی از کانال خروجی بادگیر نیز عبور کند. جهت برقراری جریان مکشی و خروجی هوا ار اتاق از دو جبهه‌ی مرتبط با فضای داخلی مجاور یک در را به عنوان خروجی هوا در نظر گرفته‌ایم. بر اساس نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلوئنت سرعت باد، که حاصل اختلاف فشار بوده است، در طول ستون بادگیر تغییر یافته است. با ورود جریان هوا با سرعت ۱,۹۲متر بر ثانیه یک حلقه‌ی هوا در ستون بادگیر تشکیل شده است که سرعت را تا ۶ متر بر ثانیه افزایش می‌دهد. این حلقه که تأثیر چندانی بر جریان داخلی اتاق بادگیر ندارد، هوای درون بادگیر را به سمت فضای داخلی به حرکت در می‌آورد. شکل۶ هندسه‌ی جریان سال را در برش عمودی ستون بادگیر نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که سرعت جریان هوا در محل‌های خروج باد از فضای اتاق نیز افزایش پیدا کرده است.



شکل۶ کانتور مقطع عمودی سرعت باد در اتاق بادگیر در حالت بدون حوض.

از سوی دیگر با توجّه به شکل۷ مشاهده می‌شود که دمای هوای ورودی به ساختمان از طریق بادگیر ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد کمتر از دمای محیط خارجی می‌باشد. با تغییر سرعت جریان هوا مشاهده می‌شود که دمای هوای داخلی تغییری نکرده و علت کاهش دمای عملکرد جداره‌ها و مقاومت حرارتی مصالح ساختمان می‌باشد. که با انتقال حرارت ذخیره شده در طی روز، در ساعات پایانی روز و شب هنگام، موجب کاهش دمای محیط در ساعات ابتدایی روز می‌شود.

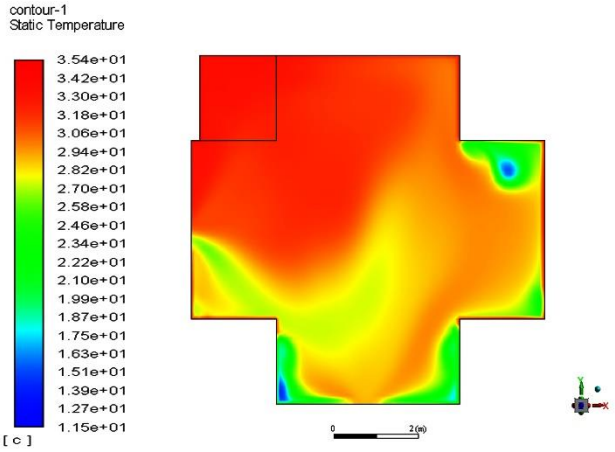


شکل۷ تغییرات دمای هوای اتاق بادگیر در حالت بدون حوض.

فضای زیر بادگیر یکی از شاخص‌ترین فضاهای معماری بومی در زمینه‌ی تهویه‌ی طبیعی می‌باشد. جریان هوا از طریق دهانه‌های بادگیر وارد شده و پس از عبور از روی حوض و تبادل حرارت با آب موجب سرمایش فضای داخلی می‌شود. در ادامه‌ی بررسی‌ها در نظر داریم مطالعات را فراتر از فاکتور سرعت و

جهت حرکت سیال برده و در شبیه‌سازی این مرحله را با در نظر گرفتن تأثیر حوض بر کاهش بار برودتی ساختمان صورت دهیم. همانطور که پیشتر اشاره گردید فضای اتاق بادگیر در خانه‌ی کریمی دارای یک حوض در وسط اتاق می‌باشد. برای شبیه‌سازی حوض و سنجش تأثیر آن در کاهش بار سرمایشی فضا می‌بایست شبیه‌سازی با در نظر گرفتن معادلات سنگین انتقال جرم انجام شود. از آنجایی که این امر پیچیدگی‌های بسیار داشته و نیازمند رایانه‌های بسیار قوی و زمان محاسباتی طولانی مدت برای حل و تحلیل می‌باشند، لذا با تغییر مساله انتقال جرم به یک مساله‌ی انتقال حرارت این امر تسهیل داده شده است. با توجّه به داده‌های هواشناسی استان نرخ حدودی تبخیر برای شهر اصفهان ۰،۵۶۳ میلی‌متر بر ساعت به دست آمده است. همچنین با توجّه به میزان آنتالپی تبخیر آب در دمای ۳۸،۸۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، میزان گرمای جذب شده توسط هر مترمربع آب به واسطه‌ی فرآیند تبخیر ۳۴۳،۵ وات بر مترمربع محاسبه شده است. بنابر این با تعریف شار برودتی حوض و ضریب هدایت حرارتی جداره‌ها در نرم‌افزار انسیس فلوئنت، شبیه‌سازی‌های مربوط به این بخش را انجام داده‌ایم.

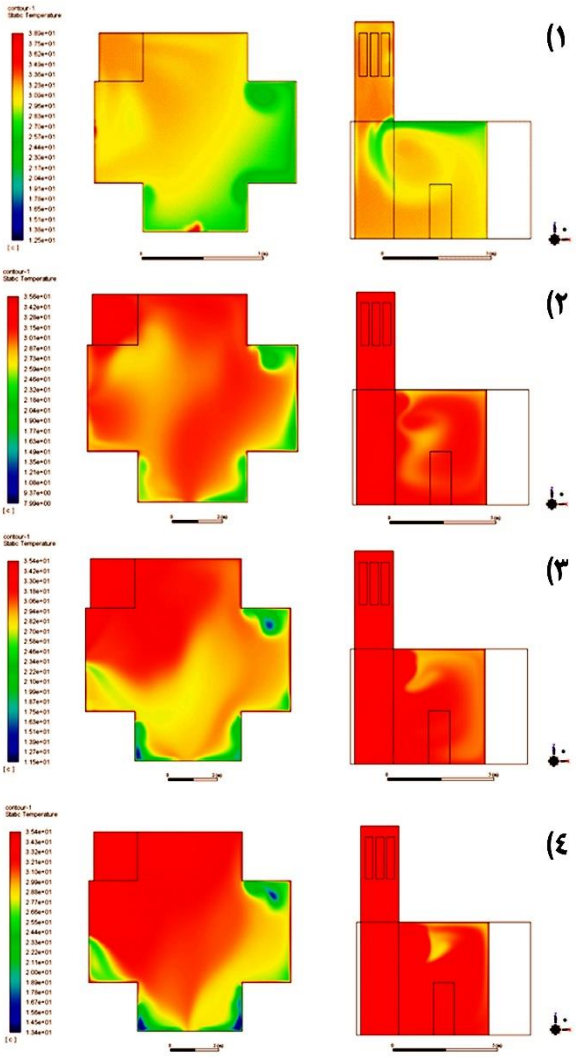
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد جریان هوا پس از عبور از حوض با کاهش دما مواجه شده و پس از آن با چرخش در محیط دمای کل اتاق را کاهش می‌دهد. شکل۵ کانتور دمای اتاق را در دو مقطع عمودی و افقی نشان می‌دهد. بر این اساس مشخص است که دمای اتاق در حالتی که سرعت جریان هوای ورودی ۱،۹۳متر بر ثانیه بوده است به مقدار میانگین ۳۲ درجه‌ی سانتی‌گراد در مرکز اتاق رسیده است.



شکل۷ تغییرات دمای هوای اتاق بادگیر با وجود حوض و سرعت جریان هوای ۱،۹۳متر بر ثانیه.

در ادامه جهت بررسی سرعت جریان ورودی هوا، این متغیر را در بازه‌ی ۱متربرثانیه از سرعت ۵ متر برثانیه تا ۰،۱متر بر ثانیه در نرم‌افزار تعریف کرده‌ایم. همانطور که در تصاویر ذیل مشاهده می‌شود با افزایش سرعت هوا اختلاف دمای هوای ورودی و دمای هوای داخل کاهش می‌یابد. به صورتی که در سرعت جریان هوای ۰،۱ متر بر ثانیه بیشترین میزان کاهش دما به مقدار ۹درجه‌ی سانتی‌گراد را شاهد هستیم(شکل۸ شماره۱). این اختلاف در سرعت ۵متر بر ثانیه به عدد ۵،۶ درجه‌ی سانتی‌گراد تقلیل یافته است(شکل۸ شماره۴).

علت این امر آن است که در سرعت بالا به علت کوچک بودن فضای اتاق بادگیر جریان هوا به سرعت از محیط خارج شده و عملاً زمانی برای انتقال حرارت میان سیال هوا و آب حوض وجود ندارد. این در حالی‌ست که در هنگام جریان آرام انقال حرارت آسان‌تر صورت گرفته و با گذشت زمان شاهد کاهش نسبی دما و افزایش رطوبت‌نسبی هوا خواهیم بود. این امر به طور مستقیم بر افزایش آسایش حرارتی ساکنان تأثیر داشته و بار برودتی و میزان مصرف انرژی کلی ساختمان را نیز کاهش می‌دهد.



شکل۸ تغییرات دمای هوای اتاق بادگیر با وجود حوض و سرعت جریان هوا به ترتیب ۱)۰،۱ متر بر ثانیه ۲) ۳متر بر ثانیه ۳) ۴متر بر ثانیه ۴) ۵متر بر ثانیه

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجّه به اهمیت روز افزون مباحث انرژی در تمامی حوزه‌ها، معماران نیز باید در طراحی ساختمان‌ها با بهره‌گیری از پتانسیل‌های موجود در زمینه‌ی طرح و همچنین بهره‌مندی حداکثری از منابع تجدیدپذیر به کاهش میزان مصرف انرژی جوامع یاری رسانند. در این میان نکته‌ی حائز اهمیت آن است که کاهش میزان مصرف انرژی بدون توجّه به آسایش کاربران و ساکنان، عملاً بی‌فایده است. ارزش کار معمار زمانی مطرح می‌شود که علاوه بر یک طراحی زیبا و کارآ، راحتی و آسایش ساکنان را نیز مد نظر قرار دهد. معماران سنتی همواره به شکل تجربی پربازده‌ترین و پایدارترین شکل ساختمان‌ها را متناسب با اقلیم خود بنا می‌کردند. با پیشرفت جوامع الگوهای معماری بومی یا به دست فراموشی سپرده شد و یا طراحان تنها به الگوبرداری ظاهری از عناصر آن اکتفا کردند. یکی از مهم‌ترین راهکارهای معماری بومی در اقلیم گرم و خشک، استفاده از جریان هوا و تهویه‌ی طبیعی بوده است. بنابر این در این پژوهش به

دنیال دستیابی به تجارب معماران سنتی این اقلیم و الگوها و عناصر بکار گرفته شده در جهت افزایش بهبود شرایط حرارتی و بالاخص المان بادگیر، بوده‌ایم. بادگیرها سازه‌های معماری بومی هستند که در آن‌ها بر اثر اختلاف فشار و وزش باد، جریان هوا وارد ستون بادگیر شده و پس از تبادل حرارت با سطوح داخلی جداره‌ها وارد فضای داخلی ساختمان می‌شود. همانطور که بررسی گردید در هنگام وزش باد، بادگیر دو رفتار متناسب با زمان وزش و بکارگیری بادگیر از خود نشان می‌دهد. در شب بر پایه‌ی عملکرد ظرفیت گرمایی مصالح و جداره‌ها، هوای خنک وارد ساختمان شده و علاوه بر کاهش دمای محیط داخلی موجب کاهش دمای مصالح نیز می‌شوند. در ساعات ابتدایی روز هوا با عبور از ستون بادگیر که دمای جداره‌های آن همچنان پایین‌تر از دمای هواست، خنک شده و موجب کاهش بار برودتی ساختمان می‌شود. عملکرد دیگر بادگیر مربوط به زمانی است که وزش وجود ندارد و در این حالت درشب به علت پایین بودن دمای محیط و تشعشع حرارتی از سطح جداره‌های خارجی بادگیر، دمای جداره‌ها و جرم حراری ساختمان کاهش می‌یابد. در ساعات اولیه‌ی صبح، در اثر نیروی شناوری هوا وارد ساختمان می‌شود. با کاهش دمای هوا در ساعات ابتدایی شب به علت گرم بودن جداره‌های بادگیر، چگالی هوای داخل ستون بادگیر نسبت به چگالی هوای محیط کم‌تر شده و در اثر این اختلاف چگالی و فشار، هوا از داخل بادگیر به محیط هدایت می‌شود. در اثر تشعشع خورشید در طی روز، دمای جداره‌های بادگیر افزایش یافته و هوای داخل ستون بادگیر نسبت به هوای محیط سبک‌تر می‌گردد. بنابراین هوای داخل ساختمان از طریق بادگیر به محیط هدایت شده و بادگیر مانند یک دودکش خورشیدی عمل می‌کند.

نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که اجرای استراتژی‌های تهویه‌ی طبیعی در ساختمان‌های مسکونی اقلیم گرم و خشک و تأمین آسایش حرارتی ساکنان بدون استفاده از خنک‌کننده مکانیکی امکان‌پذیر است. پتانسیل استراتژی‌های کاهش مصرف انرژی در نمونه‌ی موردی از طریق شبیه‌سازی‌های CFD به اثبات رسید. بر اساس نتایج شبیه‌سازی نمونه‌ی موردی بادگیر می‌توان دمای هوای داخلی تا ۹ درجه نسبت به دمای هوای بیرون کاهش دهد. سؤالی که در این مقطع مطرح می‌شود علت کاربرد کم این عنصر در معماری سنتی شهر اصفهان بوده است. که به نظر می‌رسد با توجّه به اقلیم معتدل شهر اصفهان در دوره‌ی قاجار و صفوی و جاری بودن همیشگی زاینده‌رود نیاز اقلیمی به این عنصر إحساس نمی‌شده است و تنها ثروتمندان جهت نمود قدرت از آن بهره می‌گرفته‌اند.

۸- مراجع

[1] ملت‌پرست، محمد (۱۳۸۸). معماری پایدار در شهرهای کویری ایران، معماری و شهرسازی آرمان شهر، ۲(۳)، ۱۲۸-۱۲۱.

[2] قاسمی اصفهانی، مروارید (۱۳۸۳). اهل کجا هستیم: هویت بخشی به بافت‌های مسکونی، انتشارات تهران.

[3] فلامکی، محمدمنصور؛ آلپاگونوولو، آدریانو و دیگران (۱۳۸۴). معماری بومی، تهران، نشریه‌ی مؤسسه علمی فرهنگی فضا، چاپ دوم.

[4] کرمی، غلامرضا و دامیار، سجاد (۱۳۹۶). رویکردی نو به معماری بومی در رابطه‌ی ساختاری آن با معماری پایدار، نشریه هنرهای زیبا-معماری و شهرسازی، دوره ۲۲،(۱)، ۴۰-۲۹.

[5] محمدی سنگ لی، خشایار و قرشی، سیده صدیقه (۱۳۹۵). توسعه پایدار شهری، رویکرد جهانی با راهکارهای محلی مطالعه مورد: بررسی معیارهای پایداری در معماری سنتی شهر یزد.

[6] Mollayousef, S. S. (2015). Local Architecture: Using Traditional Persian Elements to Design for Climate in Yazd, Iran (Doctoral dissertation, Carleton University).

[7] حائری، محمدرضا (۱۳۸۸). خانه، فرهنگ، طبیعت (بررسی خانه‌های تاریخی و معاصر به منظور تدوین فرآیند و معیارهای طراحی خانه)، مرکز مطالعاتی و تحقیقاتی شهرسازی و معماری، تهران.

[8] قبادیان، وحید (۱۳۹۳). بررسی اقلیمی ابنیه سنتی ایران، انتشارات دانشگاه تهران،۱۲۱-۱۲۳.

[9] نصرت‌پور، دریا (۱۳۸۹). بازشناسی فرم‌های معماری جهت سبک‌سازی ساختمان، کنفرانس بین‌المللی سبک‌سازی و زلزله.

[10] قبادیان، وحید و ایلکا، شهاب (بی تا). میزان سنجش انگاشت‌های ادراک شهروندی از معماری و فضاهای شهری تاریخی با تأکید بر اجتهاد از آنها در معماری معاصر؛ موردپژوهی: فضاهای شهری و معماری تاریخی شهر تهران.

[11] معماریان، غلامحسین؛ محمدمرادی، اصغر؛ حسینعلی‌پور، سیدمصطفی؛ حیدری، ابوالفضل و دودی، سعیده (۱۳۹۶). تحلیل رفتار باد در تهویه طبیعی مسکن بومی روستای قلعه‌نوی سیستان به کمک CFD مسکن و محیط روستا؛ ۳۶ (۱۵۷) :-۲۱ ۳۶

[12] معماریان، غلامحسین (۱۳۸۶). سیری در مبانی نظری معماری، انتشارات سروش دانش، تهران.

[13] Roaf, S. (1988). The windcatchers of Yazd (Doctoral dissertation, Oxford Polytechnic).

[14] Behnejad, S. A., Mottaghi Rad, A. R. M. I. N., & Jamili, H. (2012). Traditional Components of Iranian Vernacular Architecture in Contemporary Projects. The Journal of the International Society for Interdisciplinary Study of Symmetry (ISIS-Symmetry), (1-2), 24-29.

[15] Yarshater, E. (1989). Persia or Iran. Iranian Studies, 22(1).

[16] Hejazi, M., & Hejazi, B. (2012, September). Cooling performance of Persian wind towers. In Proceedings of the 4th International Conference on Harmonisation between Architecture and Nature (Echo-Architecture 2012) (pp. 197-207).

[17] Karakatsanis, C., Bahadori, M. N. & Vickery, B. J. (1986). Evaluation of Pressure Coefficients and Estimation of Air Flow Rates in Buildings Employing Wind Towers. Solar Energy, 37(5), 363-374.

[18] منتظری، مرجان؛ جهانشاه‌لو، لعلا و ماجدی، حمید (۱۳۹۶). تأثیر مؤلفه‌های فرم کالبدی شهری بر آسایش حرارتی فضاهای باز شهری (مطالعه موردی: اراضی پشت سیلو شهر یزد)، نشریه جغرافیا و مطالعات محیطی، تابستان ۱۳۹۶ شماره۲۲.

[19] Awbi, H. (2010). Basic Concepts for Natural Ventilation of Buildings. In CIBSE BSG Seminar: Natural and Mixed-Mode Ventilation Modelling.

[20] Elmualim, A. A. & Awbi, H. B. (2002). Wind Tunnel and CFD Investigation of the Performance of "Windcatcher" Ventilation Systems. International Journal of Ventilation, 1(1), 53-64.

[21] فرخیار، حسین (۱۳۹۰). ویژگی‌های معماری خانه‌های قدیمی در اقلیم گرم و خشک، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد کاشان.

[22] A'zami, A. (2005). Badgir in Traditional Iranian Architecture. In International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", Santorini, Greece (pp. 1021-1026).

[23] Hughes, B. R. & Ghani, S. A. (2008). Investigation of a Windvent Passive Ventilation Device Against Current Fresh Air Supply Recommendations. Energy and Buildings, 40(9), 1651-1659.

[24] Montazeri, H., & Montazeri, F. (2018). CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: Impact of outlet openings. Renewable Energy, 118, 502-520.

[25] حاجی‌قاسمی، کامبیز (۱۳۹۳). گنجنامه دفتر چهارم: خانه‌های اصفهان، تهران: مرکز اسناد و تحقیقات دانشکده معماری و شهرسازی؛ انتشارات سازمان میراث فرهنگی کشور.