

بررسی رفتار حرارتی شوادان، نمونه موردی: خانه سوزنگر دزفول*

مصطفی مسعودی نژاد**

منصوره طاهباز***

سید مجید مفیدی شمیرانی****

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۲۰



چکیده

تنوع و سختی وضعیت اقلیمی در مناطق مختلف ایران، لزوم شناخت و استفاده از راهکارهای معماری بومی را که با کمترین مصرف انرژی پاسخ‌گوی نیاز به آسایش حرارتی هستند، روشن می‌سازد. بر این اساس، مطالعه شگردهای به‌کاررفته در معماری بومی می‌تواند راهگشای طراحی معاصر باشد. پژوهش حاضر با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی، در پی شناخت رفتار حرارتی سکونتگاه زیرزمینی (شوادان)، که به‌صورت گسترده در معماری بومی دزفول و شوشتر خوزستان استفاده شده، و تحلیل شرایط آسایش حرارتی در این فضای زیرزمینی می‌باشد. با استفاده از تحلیل نمودار متغیرهای دما، رطوبت نسبی، سرعت جابه‌جایی هوا و میانگین دمای تابشی، رفتار حرارتی شوادان خانه سوزنگر دزفول بررسی خواهند شد. همچنین تحلیل CFD شوادان مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر، براساس داده‌های شرایط مرزی به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده است. نتایج بیانگر وجود شرایط آسایش حرارتی در فصول مختلف در این فضا و ثبات میانگین دمای تابشی تحت تأثیر ظرفیت حرارتی جداره‌ها به‌خصوص در فصل گرم تابستان است. همچنین سرعت جابه‌جایی هوا بسیار اندک و نزدیک صفر است که رطوبت را از در ورودی شوادان خارج می‌کند.

کلیدواژه‌ها:

رفتار حرارتی، شوادان، تهویه طبیعی، دزفول.

*مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری نگارنده اول در دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات با عنوان تأثیر ترکیبی ویژگی‌های کابندی فضای باز عمومی - خصوصی در رفتار حرارتی فضاها، مسکونی اقلیم گرم و نیمه‌مرطوب، ایران، دزفول است.

** دانشجوی دکتری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

*** دانشیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، نویسنده مسئول، m58tahbaz@yahoo.com

**** استادیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران

پرسش‌های پژوهش

۱. روند تغییرات و رفتار حرارتی شوادان در فصول (زمستان، بهار و تابستان) چگونه است؟
۲. روند تغییرات متغیرهای دما، رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا و میانگین دمای تابشی در فضای زیرزمینی شوادان چه ارتباطی با روند تغییرات متغیرهای مذکور در محیط خارجی مجاور دارد؟

مقدمه

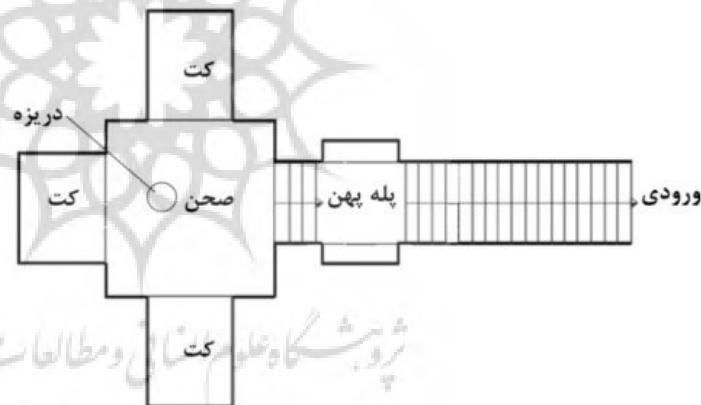
امروزه بشر با بحران‌های متعددی از جمله محدود بودن و قیمت منابع انرژی، آلودگی‌ها، گرم شدن کره زمین و ایجاد جزایر حرارتی در شهرها روبه‌روست. می‌توان بین این بحران‌ها و استفاده از سوخت‌های فسیلی به‌شکلی گسترده از یک سو و بی‌توجهی به معماری بومی و راهکارهای غیرفعال ایجاد وضعیت آسایش حرارتی در ساختمان‌ها از سوی دیگر، رابطه معناداری یافت؛ چراکه ساختمان‌ها از جمله بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی هستند. تنوع اقلیمی و سابقه طولانی سکونت در ایران، سبب شده تا این سرزمین در زمینه معماری و شهرسازی، دستاوردهای درخور توجه و ارزشمندی داشته باشد (طاهباز و دیگران ۱۳۹۲). بر این اساس، مطالعه راهکارهای استفاده‌شده به‌منظور تأمین شرایط آسایش حرارتی در ساختمان‌های معماری بومی مناطق مختلف می‌تواند راهنمای برون‌رفت از بحران‌های مذکور باشد. با توجه به موضوع پژوهش، در آغاز به بیان تعاریف در ارتباط با فضای زیرزمینی و «شوادان» پرداخته خواهد شد. سپس، روش‌های مناسب برای انجام پژوهش بر مبنای پیشینه تحقیق مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. در بخش روش تحقیق، نمونه مورد مطالعه و ابزارهای دقیق اندازه‌گیری معرفی و همچنین نحوه اندازه‌گیری متغیرهای تحقیق بیان خواهد شد. گفتنی است خانه سوزنگر واقع در بافت سنتی دزفول، با توجه به سلامت بنا و امکان دسترسی به اطلاعات و اندازه‌گیری‌های میدانی انتخاب شد.

۱. تاریخچه استفاده از سکونتگاه‌های زیرزمینی و شوادان

در طول تاریخ، استفاده از سکونتگاه‌های زیرزمینی در اکثر نقاط جهان از جمله مناطق مدیترانه‌ای و بخش‌های مختلف آسیا مشاهده می‌شود (Hazbei & et al. 2015). قدمت خانه‌های غاری یادونگ^۱، در چین به بیش از چهار هزار سال می‌رسد. علاوه بر این، خانه‌های صخره‌ای در کندوان ایران که در دل کوه کنده شده‌اند، در روستای مس^۲ (مربوط به ساکنان سرخپوست کلرداو^۳ آمریکا) و خانه‌های غاری شکل در اقیانوسیه در کوبر پدی^۴ قابل مشاهده است (Hazbei & et al. 2015; Benardos, Athanasiadis and Katsoulakos 2014). می‌توان گفت در طول تاریخ، سکونتگاه‌های زیرزمینی به‌منظور ایجاد سرپناه، آسایش، امنیت و ایجاد شرایط آسایش حرارتی در نقاط مختلف دنیا ایجاد شده‌اند (Erdem 2008). امروزه، با توجه به بحران‌های معاصر، نیاز برای صرفه‌جویی انرژی و نیاز به ساخت ابنیه با بهره‌وری بالای انرژی، بیشتر احساس می‌شود. این عوامل توجه بشر را به فضاهای زیرزمینی و استفاده از ظرفیت حرارتی مصالح و زمین جلب کرده است (Hazbei & et al. 2015). همچنین، سکونتگاه‌های زیرزمینی می‌توانند علاوه بر مزایای اقلیمی و صرفه‌جویی انرژی، میزان و نحوه استفاده از فضاهای روی سطح زمین را دگرگون سازد (Anselm 2008). به‌طور کلی سکونتگاه‌های زیرزمینی دارای مزایایی چون کاهش سطح خارجی پوسته ساختمان، میرایی بهتر امواج صوتی، لرزشی و مقاومت بهتر در برابر زلزله، تأثیرپذیری کمتر از وضعیت جوی و پدیده‌های آب‌وهوایی و معماری شاخص و جذاب هستند (Staniec and Nowak 2011). اما استفاده از سکونتگاه‌های زیرزمینی مشکلاتی نیز دارد. از جمله دسترسی کم به نور طبیعی و تهویه طبیعی، همچنین رطوبت بالای این فضاها. بنابراین سکونتگاه‌های زیرزمینی عمدتاً برای انباری یا سکونت‌های موقت در خانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Hazbei & et al. 2015).

در دوران گذشته، در نقاط مختلف ایران روش‌های متفاوتی به‌منظور بهبود وضعیت حرارتی و کیفیت زندگی در ساختمان‌ها استفاده شده است. یکی از این راهکارها در مناطق جنوبی ایران، ایجاد فضای زندگی در عمق زمین

می‌باشد که در معماری بومی مناطقی مثل دزفول و شوشتر تکامل یافته است (Mohammadshahi, Nili-Ah-). شوادان از زمان‌های قدیم، مأمّن مناسب برای فرار از تنگنای شدید اقلیمی بوده که تا به امروز در شهرهایی همچون دزفول در خانه‌های مسکونی مورد توجه و استفاده بوده است (بینا ۱۳۸۷). ریشه کلمه شوادان، واژه ساسانی «شوتاپواتا» است (عنایت اله ۱۳۷۷، ۲۹۲). همچنین براساس متون قدیمی شوادان به معنای فضای زیرزمینی در زبان پهلوی است (بینا ۱۳۸۷). این فضاهای زیرزمینی عمقی بیش از ۱۰ متر دارند که به منظور ایجاد شرایط آسایش حرارتی در فصول مختلف سال، با استفاده از ظرفیت حرارتی زمین ایجاد شده‌اند (Mo- hammadshahi, Nili-Ahmadabadi and Nematollahi 2016). از این فضا به منظور استراحت روزانه در فصل تابستان، نگهداری مواد غذایی و همچنین نیازهای برورتنی و سرمایه‌ی ساختمان استفاده می‌شود. به جرئت می‌توان گفت چنین فضایی علی‌رغم تشابهات، تفاوت‌های زیادی با فضاهای زیرزمینی در مناطق دیگر همچون سرداب‌های یزد و دیگر مناطق کویری دارد. شوادان‌ها براساس عمق و حجم فضای زیرزمینی وضعیت حرارتی و توانایی سرمایه‌ی متفاوتی دارند (بینا ۱۳۸۷). بر این اساس، با توجه به نوع فضا، شکل زندگی در این ناحیه مطابق با اقلیم شکل گرفته است. بنابراین در مواقعی از روز که فضاهای بالاتر از سطح زمین توانایی مقابله با شرایط محیطی را ندارند، افراد در شوادان به استراحت می‌پردازند (Mohammadshahi, Nili-Ahmadabadi and Nematollahi 2016). در یک جمع‌بندی، شوادان یکی از فضاهای زیرزمینی است که در معماری بومی دزفول و شوشتر به منظور ایجاد فضای زندگی و ایجاد شرایط آسایش در فصول مختلف این اقلیم به وجود آمده و تکامل یافته است.



تصویر ۱: اجزای شوادان (بینا ۱۳۸۷)

اجزای شوادان‌ها عبارت‌اند از:

ورودی: شوادان‌ها معمولاً ورودی نسبتاً عریضی (۱٫۲ تا ۱٫۸ متر) دارند. گفتنی است محل قرارگیری ورودی در سطح حیاط می‌باشد.

پلکان: که بعد از ورودی آغاز و به اولین صحن می‌رسد. ارتفاع این پله‌ها زیادتر از استانداردهای امروزی است. پله پهن: غالباً بعد از هر ۱۲ پله، پله‌ای عریض همانند پاگرد وجود دارد که عملکرد آن فراتر از پاگرد بوده و در مواقعی که تعداد افراد استفاده‌کننده از فضا بیش از ظرفیت شوادان باشد از آن استفاده می‌شود. صحن: بخش اصلی هر شوادان است که معمولاً پلانی نزدیک به مربع دارد. در برخی شوادان‌ها چند صحن با ارتفاع و عمق‌های متفاوت وجود دارد.

کت: به جز وجه اول هر صحن که به پلکان متصل است، سه وجه دیگر صحن به اتاق‌هایی به نام کت متصل است. کت‌ها عمدتاً با یک اختلاف سطح کوچک از صحن تفکیک می‌شوند.

تال: در برخی شوادان‌ها کت‌ها از طریق یک تونل به کت‌های شوادان‌های همسایه متصل و تشکیل‌دهنده یک شبکه ارتباطی زیرزمینی می‌شدند که امروزه عمده این تال‌ها مسدود شده‌اند. علاوه بر این تال، در خانه‌هایی که در نزدیکی رودخانه یا قنات قرار دارند، در گذشته به نزدیکی رودخانه راه پیدا کرده و به جریان و کوران هوای خنک کمک می‌کرد.

دریچه یا دریزه: داکت یا کانال ارتباطی عمودی است که کت‌ها را به فضاهای زندگی در بالای سطح زمین و پشت بام متصل است (تصویر ۱). به‌طور کلی می‌توان گفت در فضاها و عمق‌های مختلف شوادان، شرایط حرارتی و آسایش کاملاً متفاوت است، به‌نحوی که در فصول مختلف از فضاها با اعماق متفاوت استفاده می‌شد (بینا ۱۳۸۷؛ Mohammadshahi, Nili-Ahmadabadi and Nematollahi 2016؛ Hazbei, M. & et al. 2015). با توجه به مطالعات، این فضای زیرزمینی راهکاری مبتکرانه و هوشمندانه برای بهره‌گیری از شرایط محیط در ایجاد آسایش می‌باشد؛ چراکه ارتباطات و کیفیات کالبد، از جمله فضاها، صحن، تال و دریزه‌ها همچنین پیچیدگی ارتباطات زیرزمینی بین شوادان خانه‌های مجزا و نحوه حفر و ساخت، همگی نشان از ابتکار و فهم عمیق وضعیت اقلیمی و مسائل مربوط به تبادل حرارت دارد.

۲. پیشینه تحقیق

به‌طور کلی، در مقالات و منابع اندکی در ارتباط با شوادان سخن گفته شده است. از جمله محسن بینا به معرفی اجزای شوادان و همچنین اندازه‌گیری میدانی دما و رطوبت و تحلیل تغییرات دما در پنج شوادان در خانه‌های مختلف پرداخته است (بینا ۱۳۸۷). در پژوهشی دیگر، علاوه بر معرفی اجزای شوادان، تهویه طبیعی و نحوه انتقال حرارت در ماه آگوست میلادی در شوادان خانه غفاری دزفول با استفاده از نرم‌افزار، شبیه‌سازی و تحلیل شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد درحالی‌که دمای بیرونی حدود ۴۵ درجه سانتی‌گراد است، دمای هوای شوادان در حدود ۲۸ درجه سانتی‌گراد است؛ که دمای مناسبی برای شرایط آسایش می‌باشد. همچنین با ایجاد تغییراتی در فرم کانال خروجی (دریزه) می‌توان شرایط تهویه این فضا را بهبود بخشید و در معماری معاصر به‌منظور کاهش مصرف انرژی بهره برد (Mohammadshahi, Nili-Ahmadabadi and Nematollahi 2016). همچنین، مرادی و اسکندری، به‌صورت آزمایشگاهی و عددی به بررسی عملکرد سرمایشی و گرمایشی شوادان پرداخته‌اند (Moradi and Eskandari 2012). امید رهایی به بررسی هویت فرهنگی و تأثیر آن در راهکارهای بومی استفاده از تهویه طبیعی در بازار قدیم دزفول، راسته مسگران پرداخته است. گفتنی است تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی فلوینت^۵ و گامبیت^۶ انجام شده است (رهایی ۱۳۹۲). همچنین، در پژوهشی دیگر به بررسی روند و جریان تهویه طبیعی در شوادان‌های دزفول با استفاده از روش CFD پرداخته شده است (حزبی، ادیب، و نصراللهی ۱۳۹۳). گلانی^۷ و اوجیما^۸ فضاهای زیرزمینی را به پنج دسته عمده که به ده شیوه مختلف مورد استفاده بوده‌اند، تقسیم‌بندی کرده‌اند. در این پژوهش، تأثیرات استفاده از فضاهای زیرزمینی بر محیط طبیعی و آسایش حرارتی افراد مورد بررسی قرار گرفته است؛ نتایج بیانگر تأثیر مثبت استفاده از فضاهای زیرزمینی بر دو عامل مذکور است (Golany and Ojima 1996). مرتضی حزبی و همکاران پس از دسته‌بندی چندین شوادان در خانه‌های دزفول، به تحلیل جریان هوا در شوادان خانه قمصری به‌عنوان نماینده این شوادان‌ها پرداخته‌اند (Hazbei & et al. 2015). در پژوهشی دیگر، تأثیر جرم حرارتی خاک در کنترل وضعیت محیطی ساختمان از طریق اندازه‌گیری میدانی شرایط حرارتی زیرزمین‌ها با عمق‌های متفاوت در شهر کاشان مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق بیانگر تأثیر فراوان ظرفیت حرارتی جداره‌های زیرزمین در کاهش نوسان دمایی زیرزمین‌های مورد مطالعه و قرارگیری در محدوده آسایش حرارتی در فصول تابستان و زمستان است (طاهباز، جلیلیان و موسوی ۱۳۹۳). علاوه بر این‌ها، گرپیل^۹ به بررسی تهویه طبیعی در مقبره‌های زیرزمینی در مصر باستان پرداخته است. مطالعات گرپیل بیان می‌دارد که زمانی که در بیابان، دمای هوا با غروب خورشید به‌سرعت افت پیدا می‌کند، جریان هوای خنکی به درون

مقابر زیرزمینی جریان می‌یابد که جایگزین هوای کهنه و گرد و غبار می‌شود (Gribble 2009). در برخی از این پژوهش‌ها به معرفی اجزای شوادان و همچنین شبیه‌سازی جریان تهویه طبیعی با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیلی پرداخته شده و اندازه‌گیری میدانی صورت نگرفته است.

۳. روش پژوهش و محدوده مطالعه

روش پژوهش در این مطالعه، روش پژوهش موردی بر پایه مشاهده و اندازه‌گیری‌های کمی و میدانی و استفاده از ابزار شبیه‌سازی رایانه‌ای در نرم‌افزار دیزاین بیلدر^{۱۱} است. شایان ذکر است نرم‌افزار دیزاین بیلدر از موتور مدل‌سازی انرژی پلاس^{۱۱} استفاده می‌کند. مدل‌سازی شبکه جریان هوای نرم‌افزار انرژی پلاس با استفاده از مقایسه نتایج مدل‌سازی با سری زیادی از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی با کیفیت بالا توسط لابراتوری ملی اوک^{۱۲} ریگ اعتبارسنجی شده است. همچنین، اعتبارسنجی مدل‌سازی شبکه جریان هوای نرم‌افزار انرژی پلاس با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط لابراتوری علوم ساختمانی^{۱۳} در مرکز انرژی خورشیدی فلوریدا^{۱۴} انجام شده است (Lixing 2007). دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^{۱۵} یکی از شاخه‌های مکانیک سیالات است که با استفاده از آنالیز عددی و الگوریتم‌های عددی، مسائل مشتعل بر شاخه‌های سیالاتی را تجزیه و تحلیل می‌کند. از کامپیوترها برای شبیه‌سازی برهم‌کنش سیالاتی چون مایعات و گازها با سطوح شرایط مرزی استفاده می‌شود (رهای ۱۳۹۲). فارغ از اعتبارسنجی انجام شده توسط اطلاعات اندازه‌گیری توسط لابراتوری ملی اوک ریگ و مرکز انرژی خورشیدی فلوریدا، برای بررسی میزان دقت و اعتبارسنجی مدل‌سازی CFD نرم‌افزار DesignBuilder، در یک مطالعه نتایج مدل‌سازی این نرم‌افزار با نرم‌افزار بسیار تخصصی CFD فونیکس مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد در چهار مدل مقایسه شده در بین این دو نرم‌افزار، سرعت جریان هوا و دمای هوا یا کاملاً مشابه بوده یا تفاوت بسیار اندکی داشته است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که دقت مدل‌سازی CFD نرم‌افزار DesignBuilder بسیار بالا و قابل اعتبار است (North Umbria University 2011).

به‌منظور سنجش معیارهای به‌دست‌آمده، با توجه به غنای معماری بومی شهرستان دزفول که در اقلیم گرم و نیمه‌مرطوب قرار گرفته و دارای وضعیت اقلیمی و آب‌وهوایی حاد می‌باشد، به‌عنوان محدوده انجام پژوهش انتخاب شد. دزفول مرکز شهرستانی به همین نام در شمال شرقی استان خوزستان است. شهرستان دزفول با مساحت ۴۷۷۰ کیلومتر مربع، در عرض شمالی ۳۲ درجه و ۲۴ دقیقه و طول شرقی ۴۸ درجه و ۲۳ دقیقه و در ارتفاع ۱۴۳ متر از سطح دریا قرار گرفته است (تصویر ۲).



تصویر ۲: موقعیت دزفول در خوزستان (Hazbei & et al. 2015)

همچنین، محدوده‌ای از بافت سنتی دزفول واقع در محله قلعه و خانه سوزنگر که تغییرات کمتری به نسبت سایر نقاط بافت در آن صورت گرفته است، برای انجام تحقیق انتخاب شد. پس از بررسی محدوده مورد مطالعه، خانه سوزنگر به دلیل آنکه به خوبی معرف ویژگی‌های شاخص معماری دزفول است و عدم استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع در این بنا امکان اندازه‌گیری عملکرد حرارتی بنا به شیوه غیرفعال را فراهم می‌کند، به‌عنوان نمونه مورد مطالعه انتخاب شد (تصویر ۳ و ۴). در ادامه برداشت‌ها و اندازه‌گیری‌ها در ۷ نقطه در بام، حیاط، ورودی، راه پله، صحن‌ها و کت‌های شوادان خانه سوزنگر انجام گرفت (تصویر ۵).



تصویر ۴: خانه سوزنگر

تصویر ۳: محدوده مورد مطالعه (محله قلعه و خانه سوزنگر)

گفتنی است اندازه‌گیری‌ها طی سه مرحله ۲۴ ساعته با فاصله‌های زمانی سه‌ساعته و به‌صورت متوالی در روزهای ۵ و ۶ بهمن ۱۳۹۴ به‌عنوان نماینده فصل سرد، روزهای ۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۵ به‌عنوان نماینده فصل معتدل و روزهای ۲۴ و ۲۵ تیر ۱۳۹۵ به‌عنوان نماینده فصل گرم، از ساعت ۱۲ ظهر روز اول شروع و تا ساعت ۹ صبح روز بعد صورت گرفت. متغیرهای اقلیمی شامل دما، رطوبت، دمای کروی و سرعت باد با استفاده از ایستگاه سنجش قابل حمل اندازه‌گیری شد. همچنین متوسط دمای تابشی^{۱۶} محیط بر مبنای اندازه‌گیری‌ها با استفاده از رابطه ۱ و ۲ محاسبه شد. گفتنی است در اندازه‌گیری‌ها، از یک ایستگاه اندازه‌گیری به‌منظور سنجش ویژگی‌های اقلیمی محلی که در بام خانه سوزنگر به‌صورت ثابت نصب شده بود و از یک ایستگاه اندازه‌گیری دیگر به‌صورت متحرک در سایر نقاط استفاده شده است. همچنین، اختلاف زمان اندازه‌گیری نقاط از طریق مقایسه زمان ثبت اطلاعات توسط ابزار و دستگاه‌های اندازه‌گیری مستقر در بام و ایستگاه متحرک تصحیح شد.

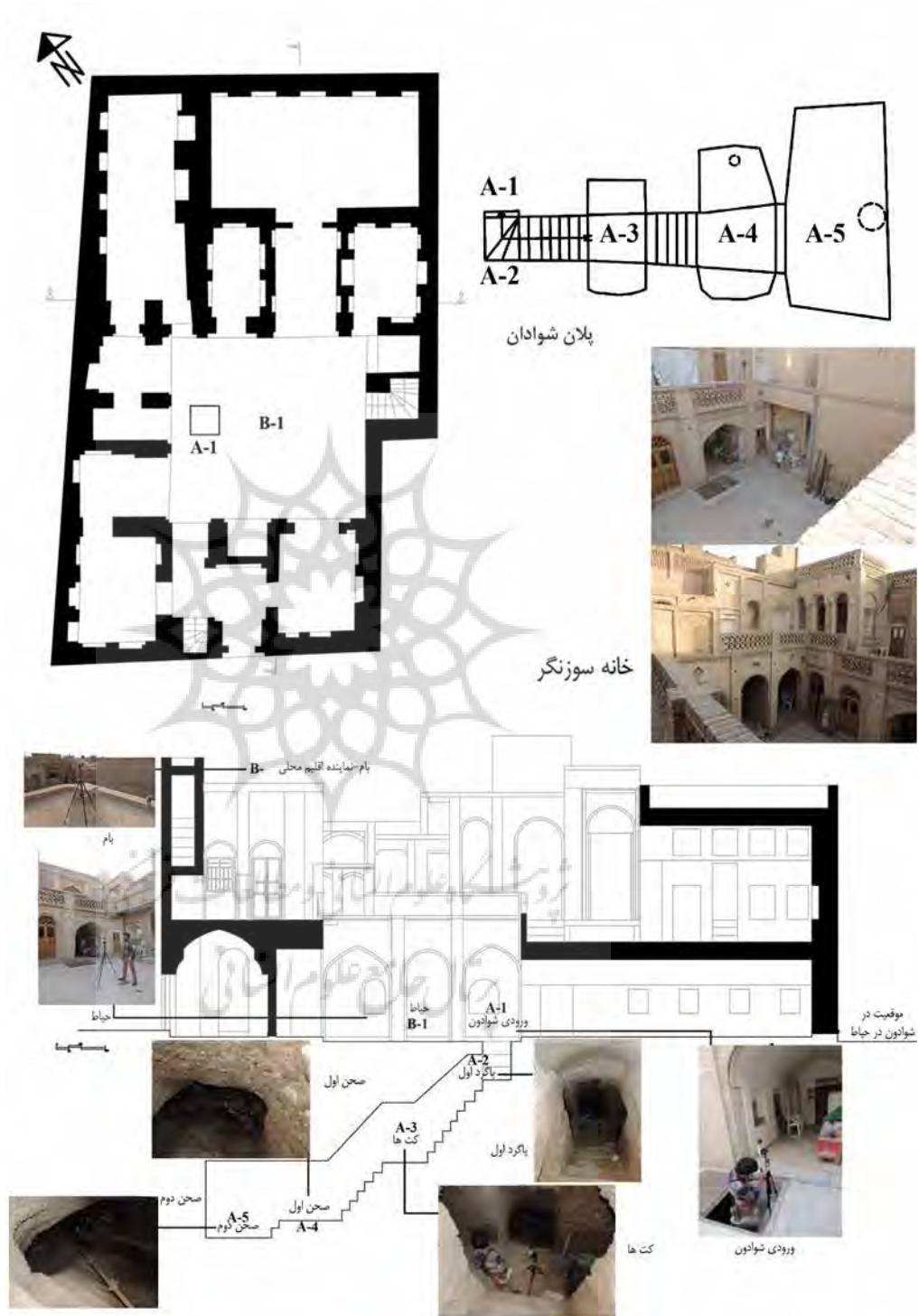
$$T_{mrt} = [(T_G + 273.15)^4 + \left(\frac{1.10 \cdot 108 V_a^{0.6}}{\epsilon_D^{0.4}}\right) * (T_G - T_A)]^{\frac{1}{4}} - 273.15 \quad \text{رابطه ۱}$$

$$T_{mrt} = [(T_G + 273.15)^4 + (3.33 * 108 V_a^{0.6}) * (T_G - T_A)]^{\frac{1}{4}} - 273.15 \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه، V_a سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، T_A معادل دمای هوا برحسب درجه سانتی‌گراد، T_G دمای کره سیاه برحسب درجه سانتی‌گراد و ϵ برابر ضریب تشعشع است. این ضریب برای گوی سیاه‌رنگ مسی با توجه به مشخصات دستگاه اندازه‌گیری دمای کروی^{۱۷} برابر ۰٫۹۵ است (ASHRAE Standard ۵۵P ۲۰۰۲). با توجه به اینکه دمای کروی، با نمونه استاندارد آن شامل گوی با رنگ مشکی و قطر ۷۵ میلی‌متر (www.Lutron.com) اندازه‌گیری

مطالعات معماری ایران

دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۱۳ - بهار و تابستان ۹۷



تصویر ۵: خانه سوزنگر و نقاط اندازه‌گیری وضعیت اقلیمی

شد، رابطه (۱) به صورت رابطه (۲) خلاصه گردید. دمای کروی (T_G) نشان دهنده تأثیر باد و تابش به صورت توأمان است که به وسیله دماسنج کروی اندازه گیری شد (تصویر ۶ و ۷). در ادامه، به منظور تحلیل اطلاعات دستگاه‌ها با استفاده از نرم‌افزار اکسل^{۱۸} و نمودار سایکرومتریک رفتار حرارتی نقاط اندازه‌گیری شده تحلیل خواهند شد.



تصویر ۷: ابزارهای اندازه‌گیری روی سه‌پایه بام خانه سوزنگر (نماینده اقلیم محلی)



مدل: بادسنج مدل: ST:3880-Hot Wire Anemometer

دستگاه اندازه‌گیری شاخص‌های اقلیمی مدل: HEAT INDEX WBGT METER, Model: WBGT-2010SD

تصویر ۶: ابزارهای اندازه‌گیری

جدول ۱: مشخصات دستگاه‌های اندازه‌گیری متغیرهای اقلیمی

شرکت کالیبره کننده	فاصله زمانی	روش ذخیره	میزان خطا	دستگاه	واحد	متغیر
Lutron Eletronic Enterprise co., LTD.	۳ ساعت	اتوماتیک	± 0.8	HEAT INDEX WBGT METER, Model : WBGT-2010SD	C°	دمای هوا (Ta)
Lutron Eletronic Enterprise co., LTD.	۳ ساعت	اتوماتیک	70% RH : \pm (3% reading + 1% RH). < 70% RH : \pm 3% RH.	HEAT INDEX WBGT METER, Model : WBGT-2010SD	%	رطوبت نسبی (RH)
Lutron Eletronic Enterprise co., LTD.	۳ ساعت	اتوماتیک	± 0.6	HEAT INDEX WBGT METER, Model : WBGT-2010SD	C°	دمای کره سیاه (Tg)
Lutron Eletronic Enterprise co., LTD.	۳ ساعت	اتوماتیک		HEAT INDEX WBGT METER, Model : WBGT-2010SD	C°	Wet bulb Temp
Standard Instrument Company. NO: 50413104	۳ ساعت	دستی		ST:3880-Hot Wire Anemometer	m/s	سرعت باد

۴. روش و ابزار اندازه‌گیری

به منظور سنجش رفتار حرارتی فضای زیرزمینی شوادان خانه سوزنگر، مؤلفه‌های اقلیمی نظیر دما، رطوبت، دمای کروی و سرعت باد، در هریک از نقاط جدول ۳ به کمک ابزارهای دقیق اندازه‌گیری وضعیت اقلیمی (تصویر ۶)، به شرح جدول (۱) اندازه‌گیری شد. گفتنی است همهٔ وسایل بر روی سه‌پایه‌ای به ارتفاع ۱٫۵ متری از سطح زمین نصب شد (تصویر ۸). دمای هوا، رطوبت نسبی و دمای کروی در هر نقطه، به صورت اتوماتیک و به فاصلهٔ زمانی سه‌ساعته اندازه‌گیری و ثبت شد. میزان سرعت باد به صورتی دستی، روی برگه در همان فاصلهٔ زمانی ثبت شد. گفتنی است سنجش دمای کروی (T_G) به دلیل تثبیت دمای اندازه‌گیری، ۵ دقیقه پس از استقرار در هر نقطه، ثبت شده است.

جدول ۲: مقایسه آمار بلندمدت سازمان هواشناسی با آمار ساعتی ایستگاه هواشناسی دزفول در روزهای اندازه‌گیری

دزفول	متوسط سرعت باد	متوسط حداقل دما	متوسط حداکثر دما	حداقل رطوبت نسبی	حداکثر رطوبت نسبی
	m/s	C°	C°	%	%
روز مشاهده					
۵ بهمن ۱۳۹۴	۲,۳۷	۱۱,۸۶	۱۴,۷۶	۳۰	۹۳
۶ بهمن ۱۳۹۴	۰,۸۷	۹,۲	۱۱,۷۶	۳۰	۸۴
متوسط آمار بهمن ۲۰۱۰-۲۰۰۱	۱,۲۸	۵,۵۶	۱۷,۵۲	۴۹,۲	۹۳,۱۱
۲ اردیبهشت ۱۳۹۵	۱	۱۹,۳۳	۲۷,۶۴	۱۹	۷۰
۳ اردیبهشت ۱۳۹۵	۰,۳۷	۱۹,۶	۲۷,۸۴	۲۱	۶۹
متوسط آمار اردیبهشت ۲۰۱۰-۲۰۰۱	۱,۹	۱۰,۸۱	۲۵,۸۷	۳۰,۹	۸۱,۴۴
۲۴ تیر ۱۳۹۵	۱,۵	۳۰,۸	۴۰,۵۶	۱۰	۵۱
۲۵ تیر ۱۳۹۵	۲,۱۲	۳۱,۶۶	۴۰,۸۸	۱۱	۵۳
متوسط آمار تیر ۲۰۱۰-۲۰۰۱	۲,۴۶	۲۵,۹۸	۴۴,۱	۱۳,۸	۴۰,۷۷

۵. بحث

۱.۵. بررسی رفتار حرارتی در شوادان خانه سوزنگر

به‌منظور مقایسه وضعیت اقلیم کوتاه‌مدت با شرایط اقلیم بلندمدت شهری، داده‌های ساعتی ایستگاه هواشناسی دزفول در روزهای اندازه‌گیری و داده‌های آماری بلندمدت آن از سایت سازمان هواشناسی استخراج شده است (سازمان هواشناسی دزفول - صفی‌آباد، ۱۳۹۵). مقایسه آمار ساعتی و آمار بلندمدت، وضعیت اقلیمی روزهای اندازه‌گیری نسبت به وضعیت عمومی اقلیم دزفول را نمایش می‌دهد. این مقایسه نشان داد که متوسط آمار در تیرماه (نماینده فصل گرم) سال ۲۰۰۱-۲۰۱۰ کمی گرم‌تر از زمان اندازه‌گیری است. این در حالی است که در روز اندازه‌گیری در فصل بهار کمی گرم‌تر و در زمستان کمی سردتر از وضعیت عمومی آب‌وهوای این شهر بوده است (جدول ۲). مقایسه آمار ساعتی ایستگاه هواشناسی با داده‌های دستگاه نصب‌شده روی بام و دستگاه داخل حیاط، به‌ترتیب، وضعیت اقلیم شهری، اقلیم محلی و اقلیم خرد را نسبت به یکدیگر نشان می‌دهد. در تابستان، اقلیم محلی مرطوب‌تر از اقلیم شهری (ایستگاه هواشناسی) است و بر این اساس، نوسان دمای کمتری دارد. همچنین، در لایه اقلیم محلی به دلیل وجود مصالح با جرم حرارتی بالا که جذب آفتاب و بازتابش آن را افزایش می‌دهد، روزهایی گرم‌تر دارد. در زمستان، به دلیل وجود ظرفیت حرارتی جدارها در شب‌ها و روزها فضاها باز گرم‌تر از وضعیت اقلیم شهری هستند. در ادامه با توجه به نمودارهای تحلیل شرایط حرارتی فضاها باز و بسته اندازه‌گیری شده نسبت به لایه اقلیمی محلی به‌منظور درک تأثیر معماری بومی، نمونه مورد مطالعه در رفتار حرارتی فضاها مذکور سنجیده خواهند شد.

۱.۱.۵. بررسی تغییرات دما

با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، به‌طور کلی در فصول بهار و تابستان، متوسط دمای هوای حیاط خانه سوزنگر از دمای هوای بام اندکی بیشتر و در زمستان کمتر است. همچنین، در طول شبانه‌روز میانگین دمای بام خانه سوزنگر در زمستان بالاتر از حیاط است. این در حالی است که در فصول بهار و تابستان این روند معکوس می‌شود. در فصل زمستان، با حرکت از در شوادان به سمت پایین، میانگین دمای هوا افزایش خواهد یافت. به‌طوری که در روز اندازه‌گیری (۵ و ۶ بهمن ۱۳۹۴)، میانگین دمای هوای صحن دوم ۲,۳۷ درجه سانتی‌گراد بیش از ورودی شوادان است. همچنین میانگین دمای هوای شوادان از دمای هوای بام (نماینده اقلیم محلی) نیز بالاتر است. اختلاف حداکثر و حداقل دما در طول شبانه‌روز، در این فصل، ۱۳,۶ درجه سانتی‌گراد در بام، ۸,۸ درجه سانتی‌گراد در حیاط و ۵ درجه سانتی‌گراد



تصویر ۸: اندازه‌گیری وضعیت حرارتی در حیاط و شوادان خانه سوزنگر

مطالعات معماری ایران

دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۱۳ - بهار و تابستان ۹۷

در صحن دوم می‌باشد. در فصل بهار نیز، متوسط دمای هوای حیاط، اندکی بیشتر از متوسط دمای هوای بام است. با وجود این، در روز اندازه‌گیری فصل بهار (۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۵)، با افزایش عمق از سطح حیاط، متوسط دمای هوا کاهش پیدا کرد. شایان ذکر است این تفاوت دما در فصل بهار به نسبت فصول زمستان و تابستان کمتر است. علاوه بر این، اختلاف حداقل و حداکثر دما در بهار، ۱۴٫۶ درجه سانتی‌گراد در بام، ۱۴٫۴ درجه سانتی‌گراد در حیاط و ۹٫۱ درجه سانتی‌گراد در صحن دوم است. همچنین، میانگین دمای هوای حیاط در تابستان (۲۳ و ۲۴ تیر ۱۳۹۵)، حدود ۰٫۱۲ درجه بالاتر از بام است که به‌نظر ناچیز می‌باشد. با وجود این همانند فصل بهار، با افزایش عمق، میانگین دمای هوا کاهش می‌یابد. در گرم‌ترین زمان اندازه‌گیری در تابستان، دمای ورودی شوادان ۴۸٫۶، راه‌پله ۳۸٫۵۵، پاگرد اول (کت‌ها) ۳۳٫۸۴، صحن اول ۳۰٫۳۹ و صحن دوم ۲۷٫۴ درجه سانتی‌گراد است. گفتنی است اختلاف حداکثر و حداقل دمای اندازه‌گیری شده در تابستان، ۱۳٫۴ درجه سانتی‌گراد در بام، ۱۴٫۲ درجه سانتی‌گراد در حیاط و ۱٫۳ درجه سانتی‌گراد در صحن دوم است. به‌نظر می‌رسد صحن دوم در تابستان به نسبت سایر فصول از شرایط متعادل‌تری از نظر شرایط حرارتی در طول شبانه‌روز برخوردار است (جدول ۳).

جدول ۳: میانگین میزان متغیرهای اقلیمی - محیطی اندازه‌گیری شده نقاط منتخب

محل اندازه‌گیری	میانگین دمای تابشی (T_{m-t})	متغیر													
		دمای هوا (T_a)			رطوبت نسبی (RH)			دمای کروی (T_g)			سرعت باد (m/s)				
		حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر		
بام خانه سوزنگر (اقلیم محلی)	۱۰	۲۳٫۶	۱۵٫۵	۲۶٫۵	۶۱٫۲	۴۷٫۶	۸٫۹	۲۴	۱۴٫۹	۰٫۳۳	۰٫۵۴	۰٫۴۱	۸٫۹	۲۴	۱۴٫۹۱
بهار	۲۱٫۶	۳۶٫۲	۲۷٫۶	۹	۴۳٫۲	۲۶٫۸	۱۹	۲۶٫۷	۲۷٫۳	۰٫۰۶	۲٫۳۷	۰٫۶۱	۱۹	۳۶٫۷	۲۷٫۲۹
تابستان	۳۵٫۷	۴۹٫۱	۴۱٫۹	۴٫۸	۲۱٫۲	۱۱٫۲	۲۶٫۳	۵۰٫۲	۴۲٫۸	۰٫۳۳	۳٫۷۶	۱٫۲۸	۲۶٫۳	۵۳	۴۲٫۷۶
حیاط خانه سوزنگر	۱۰٫۹	۱۹٫۷	۱۴٫۲	۲۹٫۷	۶۱	۴۹٫۸	۱۰٫۷	۲۰٫۳	۱۴	۰٫۰۳	۰٫۶۱	۰٫۳۳	۱۰٫۷	۲۰٫۳	۱۴
بهار	۲۱٫۷	۳۶٫۱	۲۸٫۲	۱۲٫۳	۴۵٫۶	۲۸٫۳	۱۹٫۳	۳۹٫۹	۲۸٫۱	۰٫۱۴	۰٫۴۸	۰٫۲۹	۱۹٫۳	۳۹٫۹	۲۸٫۰۹
تابستان	۳۵٫۳	۴۹٫۵	۴۲٫۱	۵٫۱	۱۷٫۳	۱۲٫۶	۳۵٫۳	۵۳٫۸	۴۲٫۳	۰٫۲۲	۰٫۵۱	۰٫۴۰	۳۷٫۷	۵۳٫۸	۴۲٫۲۶
ورودی شوادان	۱۰٫۷	۱۸٫۵	۱۳٫۸	۳۴٫۱	۶۱٫۶	۵۱٫۷	۹٫۶	۱۸٫۵	۱۳٫۸	۰٫۰۱	۰٫۳۴	۰٫۱۳	۹٫۶	۱۸٫۵	۱۳٫۸۳
بهار	۲۱٫۵	۳۶٫۸	۲۸٫۱	۱۴٫۸	۵۲٫۷	۳۲٫۱	۲۳٫۱	۳۸٫۲	۲۳٫۱	۰٫۱۵	۰٫۳۵	۰٫۲۴	۲۳٫۱	۳۸٫۲	۲۸٫۹۸
تابستان	۳۵٫۴	۴۸٫۶	۴۱٫۶	۶٫۱	۳۰٫۷	۱۶٫۴	۳۵٫۹	۵۳٫۲	۴۲٫۳	۰٫۱۶	۰٫۱۶	۱٫۲۱	۳۵٫۹	۵۳٫۲	۴۲٫۲۷
راه‌پله شوادان	۱۱٫۷	۱۸٫۷	۱۴٫۷	۴۵٫۶	۷۸٫۳	۶۲٫۱	۹٫۹	۱۸٫۵	۱۴	۰	۰٫۱۲	۰٫۰۶	۹٫۹	۱۸٫۵	۱۳٫۹۶
بهار	۲۱٫۸	۳۶٫۳	۲۷٫۶	۱۹٫۲	۵۰٫۶	۳۶٫۵	۲۲٫۶	۳۹٫۲	۲۸٫۴	۰٫۰۴	۰٫۳۵	۰٫۱۹	۲۲٫۶	۳۹٫۲	۲۸٫۴۴
تابستان	۳۴٫۲	۴۲٫۸	۳۸٫۵	۱۱٫۵	۲۸٫۱	۲۰٫۵	۳۴٫۷	۴۳٫۸	۳۴٫۷	۰٫۰۶	۰٫۳۲	۰٫۱۵	۳۴٫۷	۴۳٫۸	۳۹٫۴۵
پاگرد اول (کت)	۱۳٫۵	۱۸٫۶	۱۵٫۶	۵۳٫۵	۷۳٫۱	۶۵	۱۲	۱۸٫۶	۱۴٫۹	۰	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۱۲	۱۸٫۶	۱۴٫۸۷
بهار	۲۴٫۱	۳۴٫۹	۲۷٫۵	۲۵٫۷	۵۷٫۳	۴۰٫۵	۲۰٫۱	۲۷٫۱	۲۷٫۱	۰٫۰۵	۰٫۳۹	۰٫۱۳	۲۰٫۱	۳۷٫۱	۲۷٫۱
تابستان	۳۹٫۱	۴۸٫۶	۳۳٫۸	۱۹٫۳	۳۱٫۱	۲۵٫۱	۳۲٫۵	۳۸٫۲	۳۲٫۵	۰٫۱	۰٫۲۸	۰٫۱۷	۳۲٫۵	۳۸٫۲	۳۵٫۸۱
صحن اول	۱۹٫۲	۱۴	۱۶	۵۴٫۸	۷۲٫۸	۶۴٫۶	۱۲٫۳	۱۸٫۶	۱۵٫۱	۰	۰٫۰۷	۰٫۰۲	۱۲٫۳	۱۸٫۶	۱۵٫۱
بهار	۲۳٫۹	۳۳٫۶	۲۶٫۹	۳۰٫۲	۶۲٫۱	۴۶	۱۹٫۹	۳۵٫۲	۳۶٫۳	۰٫۰۶	۰٫۱۵	۰٫۱۰	۱۹٫۹	۳۵٫۲	۲۶٫۲۵
تابستان	۳۹٫۱	۴۴٫۵	۳۰٫۲	۲۲٫۶	۳۲٫۳	۲۷٫۳	۳۰٫۸	۳۴٫۳	۳۴٫۳	۰٫۱۱	۰٫۲۴	۰٫۱۸	۳۰٫۸	۳۴٫۳	۳۲٫۳۷
صحن دوم	۱۴٫۳	۱۹٫۳	۱۶٫۲	۵۶٫۱	۷۲	۶۵٫۱	۱۲٫۵	۱۸٫۷	۱۵٫۳	۰	۰٫۰۹	۰٫۰۳	۱۲٫۵	۱۸٫۷	۱۵٫۳۳
بهار	۲۳٫۸	۳۲٫۹	۲۶٫۵	۳۱٫۱	۶۳٫۵	۴۷٫۵	۱۹٫۶	۳۳٫۵	۳۳٫۵	۰	۰٫۱۴	۰٫۰۵	۱۹٫۶	۳۳٫۵	۲۵٫۵۱
تابستان	۲۶٫۱	۳۷٫۴	۲۶٫۶	۳۳٫۱	۳۲٫۳	۲۸٫۹	۳۰	۳۱	۳۰	۰٫۰۵	۰٫۲۶	۰٫۱۴	۳۰	۳۱	۳۰٫۶۳

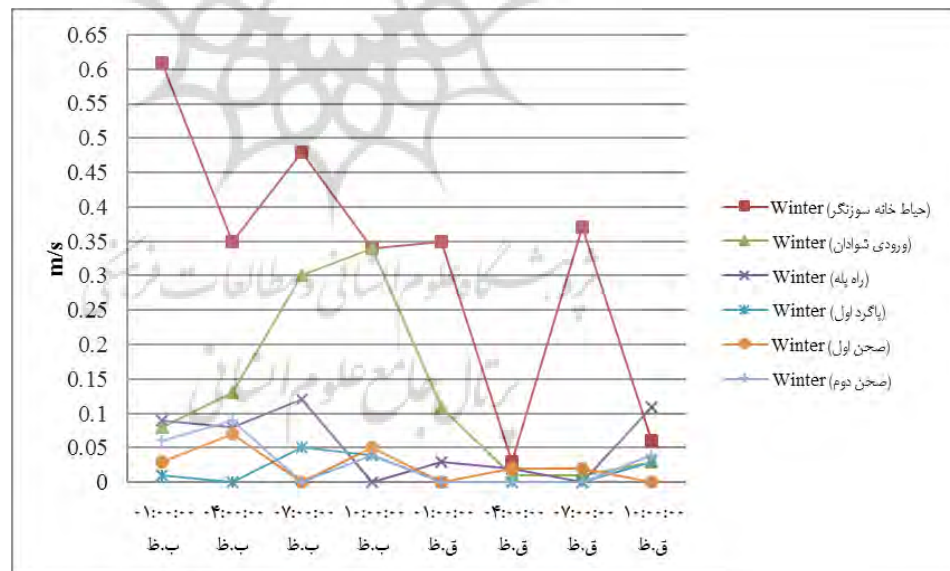
۲.۱.۵. بررسی تغییرات رطوبت نسبی

با افزایش عمق در شوادان در تمامی فصول، رطوبت نسبی موجود در هوا افزایش می‌یابد. به‌نظر می‌رسد میزان رطوبت نسبی در احساس حرارتی افراد در شوادان، تأثیر فراوانی خواهد داشت. گفتنی است تغییرات رطوبت در فصول مختلف و در طول شبانه‌روز در شوادان متفاوت است. به‌گونه‌ای که دامنه این تغییرات در فصل زمستان، ۲۷٫۵ درصد در ورودی

شوادان، ۱۹٫۸ درصد در پاگرد اول و ۱۵٫۹ درصد در صحن دوم در طول شبانه‌روز است. تغییرات یادشده در فصل بهار، ۳۷٫۹ درصد در ورودی شوادان، ۱۰٫۸ درصد در پاگرد اول و در صحن دوم ۳۲٫۳۴ درصد متغیر است. در فصل تابستان، وضعیت دگرگون شده و در ورودی شوادان ۲۴٫۶ درصد، پاگرد اول ۱۱٫۸ درصد و ۹٫۲ درصد در صحن دوم شوادان تغییرات رطوبت نسبی صورت می‌گیرد. به‌نظر می‌رسد به‌طور کلی صحن دوم تغییرات کمتری در طول شبانه‌روز در تمام فصول از لحاظ رطوبت نسبی دارد. نکته قابل توجه دیگر این است که در نمونه مورد مطالعه، ورودی شوادان در تمامی فصول رطوبت نسبی بالاتری از تمام نقاط شوادان و حتی حیاط و بام که نماینده اقلیم خرد و محلی است، دارد (جدول ۳). گفتنی است بررسی شرایط آسایش حرارتی در نمودارهای زیست‌اقلیمی با استفاده از روش گیوانی نقاط اندازه‌گیری‌شده در تصاویر ۱۵ تا ۱۹ آمده است.

۳.۱.۵. بررسی تغییرات سرعت جریان هوا

در بررسی تغییرات سرعت جریان هوا در نمونه مورد مطالعه، مشاهده شد که در تمامی روزهای اندازه‌گیری، سرعت جریان هوا در حیاط نسبت به بام کمتر است. به‌نظر می‌رسد محصور بودن حیاط تأثیر بسزایی در این امر خواهد داشت. در ادامه، همان‌طور که پیش‌تر آمد، به‌نظر می‌رسد عمده تحقیقات پیشین به بررسی تهویه طبیعی از طریق شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی تهویه طبیعی همچون CFD و Fluent پرداخته‌اند و به جریان تهویه طبیعی هوا در نمونه‌های مورد بررسی اشاره کرده‌اند (Moradi and Eskandari 2012؛ Hazbei & et al. 2015؛ Gribble 2009). از این‌رو با توجه به اهمیت موضوع، به بررسی تهویه طبیعی در نمونه مورد مطالعه پرداخته خواهد شد.



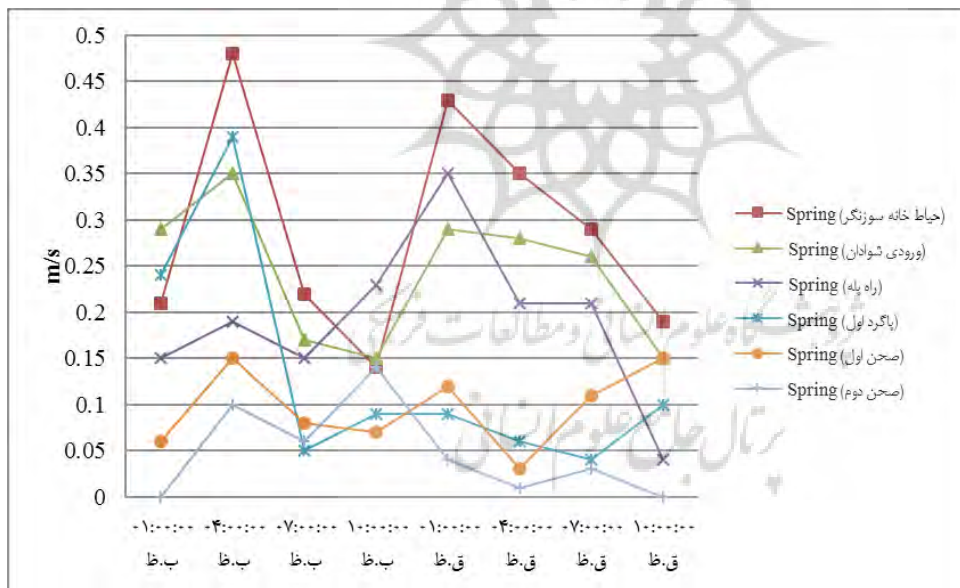
تصویر ۹: نمودار تغییرات سرعت جابه‌جایی هوا (m/s) در شوادان خانه سوزنگر، ۵ و ۶ بهمن ۱۳۹۴

براساس اندازه‌گیری‌ها و اختلاف قابل ملاحظه بین سرعت لحظه‌ای باد در بام و سایر نقاط اندازه‌گیری‌شده در حیاط و شوادان خانه سوزنگر در تمامی زمان‌های اندازه‌گیری، روند تغییرات سرعت جابه‌جایی هوا در بخش‌های مختلف شوادان در اندازه‌گیری فصل زمستان از روند تغییرات این متغیر در بام خانه سوزنگر (نماینده اقلیم محلی) و حیاط خانه سوزنگر (نماینده اقلیم خرد) در هیچ‌یک تبعیت نمی‌کند (جدول ۳). علاوه بر این، متوسط سرعت جابه‌جایی هوا با

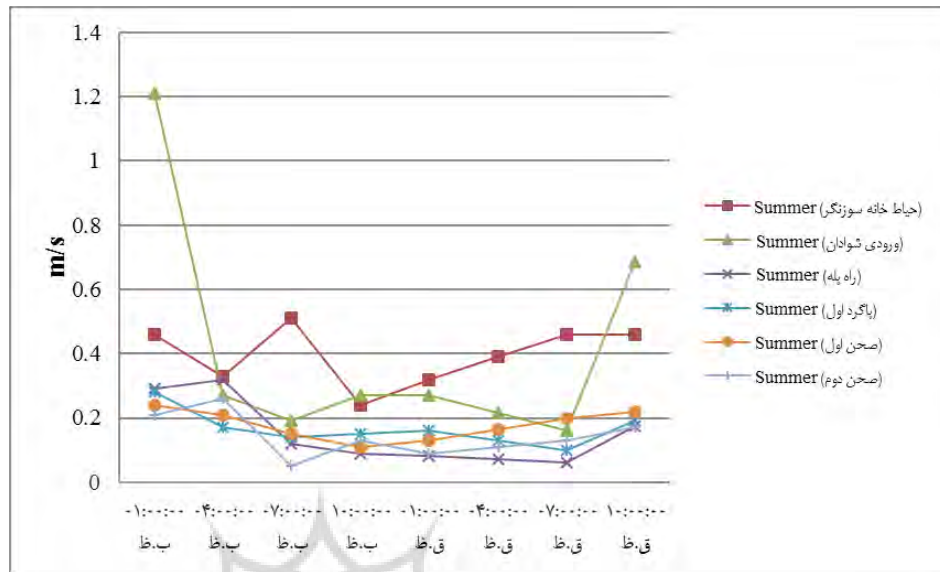
از دیاد عمق از ورودی به سمت صحن‌های شوادان کاهش می‌یابد و در صحن آخر، اندکی افزایش در سرعت جریان هوا مشاهده می‌شود. بر این اساس به نظر می‌رسد دلیل افزایش سرعت جریان هوا در این قسمت، وجود دریزه (دریچه) شوادان در بالای صحن دوم است. به‌طور کلی، ورودی شوادان دارای بیشترین جابه‌جایی هوا از نظر سرعت و نوسان سرعت است. این در حالی است که در فصل زمستان، اندازه‌گیری سرعت جابه‌جایی هوا در ورودی شوادان، به‌طور میانگین برابر ۰,۱۳ متر بر ثانیه و در صحن دوم برابر ۰,۰۲ متر بر ثانیه است (تصویر ۹).

در اندازه‌گیری فصل بهار نیز، روند تغییرات سرعت جابه‌جایی هوا، از روند تغییرات این متغیر در بام خانه سوزنگر (نماینده اقلیم محلی) تبعیت نمی‌کند. این در حالی است که روند یادشده شباهت‌هایی به روند تغییرات سرعت جریان هوا در حیاط خانه سوزنگر (نماینده اقلیم خرد) دارد. این شباهت در ورودی و راه‌پله شوادان بیشتر مشاهده شد که به‌نظر می‌رسد به‌دلیل مجاورت این دو فضا با وضعیت حیاط باشد. گفتنی است در ورودی و راه‌پله، ساعت ۰۱:۰۰:۰۰ نیمه‌شب و ساعت ۱۶:۰۰:۰۰ سرعت جابه‌جایی هوا افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این دو نقطه، در سایر نقاط در ساعت ۰۱:۰۰:۰۰ افزایش اندکی در سرعت جابه‌جایی هوا مشاهده شد. در فصل بهار، صحن دوم آرام‌ترین نقطه از نظر جابه‌جایی هوا می‌باشد. به‌طور کلی اندازه‌گیری‌ها در این فصل، حاکی از وجود جریان هوای بسیار اندک (به‌طور میانگین، ۰,۲۴ متر بر ثانیه در ورودی شوادان و ۰,۰۵ متر بر ثانیه در صحن دوم) است (تصویر ۱۰).

اندازه‌گیری تابستان نیز همانند زمستان و بهار، بیانگر عدم تبعیت روند تغییرات سرعت جابه‌جایی هوا در فضاهای شوادان در اندازه‌گیری تابستان از روند تغییرات این متغیر در بام خانه سوزنگر (نماینده اقلیم محلی) است.



تصویر ۱۰: نمودار تغییرات سرعت جابه‌جایی هوا (m/s) در شوادان خانه سوزنگر، ۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۵



تصویر ۱۱: نمودار تغییرات سرعت جابه‌جایی هوا (m/s) در شوادان خانه سوزنگر، ۲۳ و ۲۴ تیر ۱۳۹۵

با توجه به تصویر ۱۱، به نظر می‌رسد دلیل افزایش قابل ملاحظه در سرعت جریان هوا در ورودی شوادان از ساعت ۱۰ صبح تا ۱۳ ظهر (۰/۶۹ متر بر ثانیه در ساعت ۱۰ و ۱/۲۱ متر بر ثانیه در ساعت ۱۳ و میانگین ۰/۴۱ متر بر ثانیه در طول شبانه‌روز در ورودی شوادان) با توجه به کاهش سرعت جریان هوا در بام (۰/۹۴ متر بر ثانیه در ساعت ۱۰ و ۱/۳ متر بر ثانیه در ساعت ۱۳ و میانگین ۱/۲۸ متر بر ثانیه در طول شبانه‌روز در بام خانه سوزنگر)، اختلاف فشار هوای بین فضای داخلی شوادان و فضای خارج از شوادان است که در گرم‌ترین ساعت روز تشدید می‌شود. با وجود این در تمام نقاط شوادان در ساعت ۱ نیمه‌شب، افزایش اندکی در سرعت جابه‌جایی هوا مشاهده می‌شود. این افزایش سرعت در مقایسه با افزایش سرعت در ظهر ناچیز به نظر می‌رسد. با این حال، در فصل تابستان و در روزهای اندازه‌گیری اطلاعات، به‌طور کلی اندازه‌گیری‌ها از وجود جریان هوای اندک (به‌طور میانگین، ۰/۴۱ متر بر ثانیه در ورودی شوادان و ۰/۱۴ متر بر ثانیه در صحن دوم) خبر می‌دهد.

در یک جمع‌بندی به نظر می‌رسد سرعت و روند جابه‌جایی هوا در شوادان خانه سوزنگر به جریان هوای خارج از بنا و اقلیم محلی ارتباطی ندارد. در گرم‌ترین و سردترین ساعات شبانه‌روز به دلیل اختلاف فشار هوا بین هوای داخل خارج شوادان، سرعت جابه‌جایی هوا افزایش می‌یابد. همچنین، با توجه به جدول ۳ به نظر می‌رسد به‌طور کلی در فضاهای شوادان در فصل تابستان بیشترین جابه‌جایی هوا و در فصل زمستان کمترین جابه‌جایی هوا صورت می‌گیرد. نظر به پایین‌تر بودن رطوبت نسبی در تابستان‌ها به نسبت سایر فصول، همچنین افزایش سرعت جابه‌جایی هوا در شوادان، پایین‌تر بودن میانگین دمای هوای این فضاها منطقی به نظر می‌رسد؛ که آمار و اندازه‌گیری‌های دمای هوا این امر را تأیید می‌کند. در عمده پژوهش‌ها، روند جابه‌جایی هوا در شوادان را در شب‌ها از ورودی شوادان به سمت پایین و در طول روز از شوادان به سمت در خروجی شوادان و بیرون است. این در حالی است که همان‌طور که پیش از این آمد، اندازه‌گیری‌ها نشان داد که روند این تغییرات متأثر جابه‌جایی هوا در حیاط نیستند. علاوه بر این، پایین بودن سرعت این جریان (نزدیک به صفر) در اکثر اوقات به نظر می‌رسد جابه‌جایی هوا بیشتر به تغییر میان رطوبت نسبی کمک کند تا تغییر دما.

۴.۱.۵. بررسی تغییرات میانگین دمای تابشی

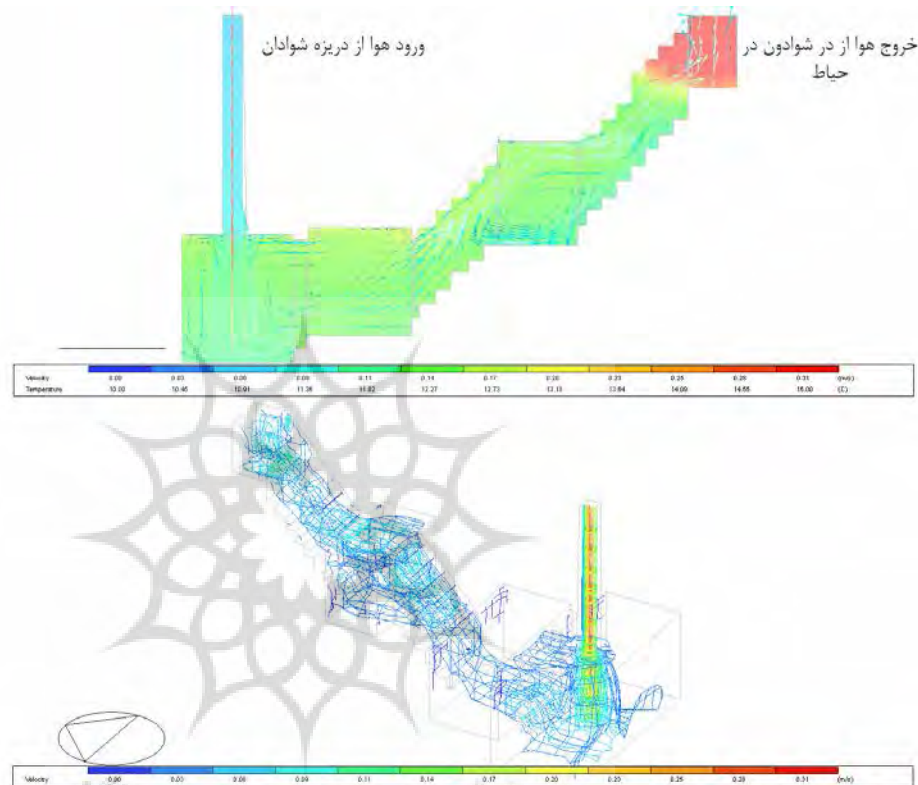
با توجه به تأثیرپذیری میانگین دمای تابشی محیط، از دمای کروی (رابطه ۱ و ۲)، در اینجا تغییرات میانگین دمای تابشی، مبنای تحلیل‌ها می‌باشد. گفتنی است با توجه به محاسبات انجام‌شده، متوسط میانگین دمای تابشی محیط در حیاط اندکی کمتر از بام می‌باشد. این در حالی است که اختلاف حداکثر و حداقل میانگین دمای تابشی بام و حیاط در اندازه‌گیری زمستان، برابر با ۱۵,۱ درجه در بام و ۹,۶ درجه در حیاط می‌باشد. بر این اساس، نوسان میانگین دمای تابشی در بام بیش از حیاط است. به این معنا که در ظهر گرم‌تر و در شب سردتر از حیاط خواهد بود. نظر به وجود ظرفیت حرارتی جداره‌های حیاط، تناسب جداره‌ها و محصوریت حیاط به نظر می‌رسد در طول روز زمستانی به دلیل زاویه مایل تابش خورشید، حیاط سردتر از بام خواهد شد. از طرفی محصوریت و ظرفیت حرارتی جداره‌های حیاط در شب‌های زمستان مانع از کاهش ناگهانی دما از طریق تابش به آسمان در حیاط می‌شود. این روند در اندازه‌گیری بهار و تابستان دچار دگرگونی می‌شود، به نحوی که متوسط میانگین دمای تابشی حیاط بیشتر از بام است. به نظر می‌رسد این تغییر ناشی از تغییر زاویه تابش خورشید فصول گرم است؛ چراکه اختلاف میزان نوسان متوسط دمای تابشی حیاط و بام در طول شبانه‌روز در فصل تابستان برابر ۰,۶ درجه و در بهار برابر ۲,۳ درجه اندازه‌گیری شد. این در حالی است که این اختلاف در فصل زمستان برابر ۵,۵ درجه بود. علاوه بر این‌ها، در اندازه‌گیری زمستان، با افزایش عمق در شوادان متوسط میانگین دمای تابشی افزایش و اختلاف بین حداکثر و حداقل این متغیر در طول شبانه‌روز کاهش می‌یابد. ثابت بودن حداکثر میانگین دمای تابشی در تمامی نقاط اندازه‌گیری (۱۸,۶ درجه) در شوادان و بالا رفتن میزان حداقل میانگین دمای تابشی در نقاط اندازه‌گیری (۹,۶ درجه در ورودی شوادان و ۱۲,۵ درجه در صحن دوم) قابل توجه است. به جز ورودی و راه‌پله شوادان در زمستان تقریباً تمامی قسمت‌های شوادان در فصل زمستان از حیاط و بام گرم‌ترند. به نظر می‌رسد دلیل این امر، وجود ظرفیت حرارتی بالای جداره‌ها و پایین بودن سرعت جریان هوا در شوادان (در بسیاری مواقع فاقد جریان) است.

در فصل بهار، با افزایش عمق، متوسط میانگین دمای تابشی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد دلیل کم شدن متوسط دمای تابشی با افزایش عمق و تغییر آن بین حداکثر و حداقل‌ها، تغییرات جریان‌های هوایی در خارج از شوادان و تفاوت زیاد بین دمای شب و روز در این فصل است؛ که به دلیل وجود ظرفیت حرارتی بالای جداره‌ها باعث ایجاد اختلاف فشار و در پی آن جابه‌جایی هوا می‌شود. به طور کلی تمامی فضاهای شوادان دارای متوسط دمای تابشی پایین‌تری نسبت به بام و حیاط هستند. همچنین در فصل تابستان، همانند فصل بهار با افزایش عمق میانگین متوسط دمای تابشی و نوسان این متغیر در طول شبانه‌روز، کاهش چشمگیری می‌یابد. نکته قابل توجه این است که در اندازه‌گیری تابستان تغییر اختلاف بین حداکثر و حداقل میانگین دمای تابشی در طول شبانه‌روز، در ورودی شوادان برابر ۱۷,۳ درجه که از تمامی فصول بالاتر است (۸,۹ درجه در زمستان و ۱۵,۱ درجه در بهار برای ورودی شوادان). این در حالی است که این اختلاف در پایین‌ترین نقطه شوادان (صحن دوم) برابر ۱ درجه می‌باشد که به نسبت سایر فصول تغییرات به مراتب کمتری دارد (۶,۲ برای زمستان و ۱۳,۹ برای بهار). همان‌طور که قابل پیش‌بینی است، میانگین متوسط دمای تابشی فضاهای شوادان در تابستان از حیاط و بام خانه سوزنگر کمترند. همچنین، میزان اختلاف بین حداکثر و حداقل میانگین دمای تابشی در عمده فضاهای شوادان به جز ورودی و راه‌پله شوادان، تغییرات کمتری نسبت به بام و حیاط دارند. به نظر می‌رسد دلیل این امر کیفیات کالبدی ورودی و محل ورود و خروج هوا (با توجه به سرعت جابه‌جایی هوا در این قسمت) است. (جدول ۳)

۲.۵. تحلیل CFD عملکرد حرارتی شوادان خانه سوزنگر

با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری میدانی که شامل دمای تابشی سطوح، دمای هوا در هریک از قسمت‌های شوادان و دمای هوای بیرون و سرعت جریان ورودی و خروجی هوا در شوادان می‌شود (جدول ۳) تحلیل CFD عملکرد حرارتی شوادان خانه سوزنگر در نرم‌افزار دیزاین بیلدر صورت گرفته است. این تحلیل در زمان‌های

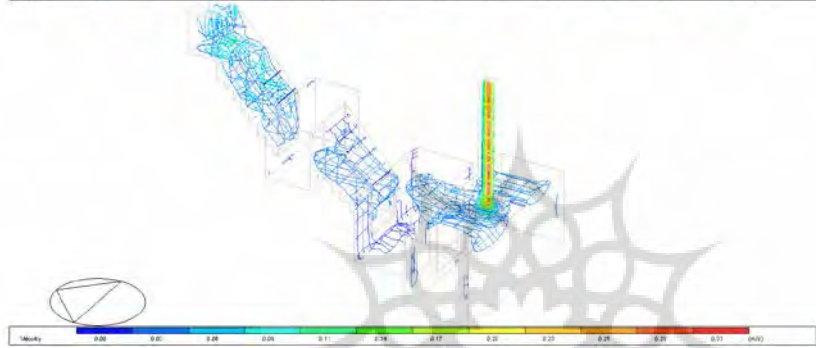
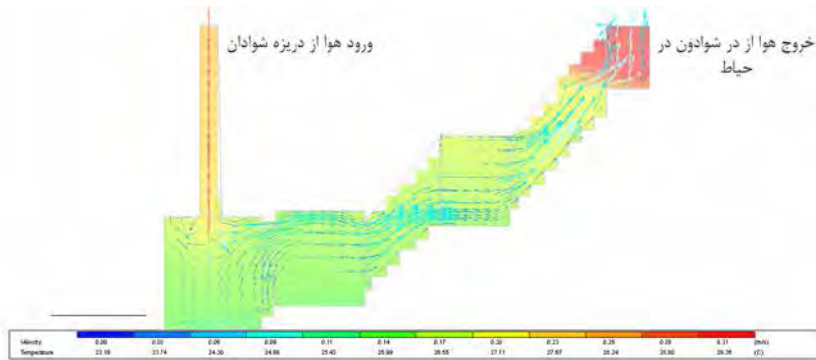
حداقل دمای محیط در زمستان، دمای اعتدالی در بهار و حداکثر دمای محیط در تابستان صورت گرفته است. براساس تحلیل‌های تصویر ۱۲، در زمستان، هنگامی که دمای هوای بیرون ۱۰٫۹ درجه سانتی‌گراد است، دمای هوای شوادان از ۱۰٫۸ درجه در پاگرد ورودی به حدود ۱۳ درجه در پاگرد اول و ۲۱ درجه در صحن دوم می‌رسد.



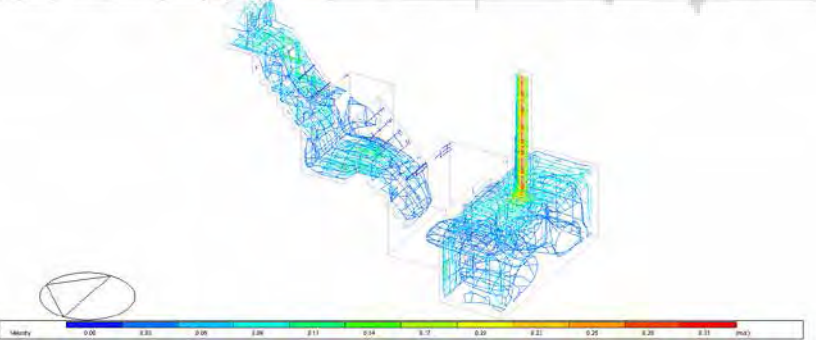
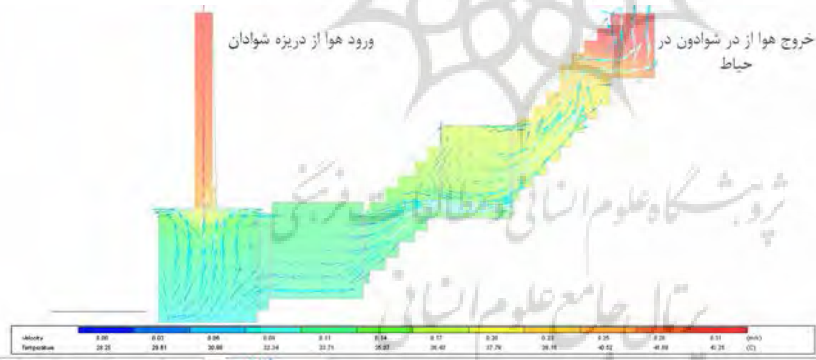
تصویر ۱۲: تحلیل CFD شوادان خانه سوزنگر در حداقل دمای محیط در زمستان، نرم‌افزار دیزاین بیلدر

همان‌طور که در تحلیل‌های تصویر ۱۳ نشان داده شده، در دمای اعتدالی و فصل بهار هنگامی که دمای هوای بیرون ۳۶٫۱ درجه سانتی‌گراد است، دمای هوای شوادان از ۲۰٫۶۴ درجه در پاگرد ورودی به حدود ۲۳٫۶۷ درجه در پاگرد اول و ۲۵٫۹۴ درجه در صحن دوم می‌رسد. همچنین، سرعت جریان ورودی و خروجی هوا به شوادان تفاوت محسوسی با حالات قبلی ندارد. علاوه بر این، در تابستان، هنگامی که دمای هوای بیرون ۴۹٫۵ درجه سانتی‌گراد است، دمای هوای شوادان از ۴۳ درجه در پاگرد ورودی به حدود ۳۶ درجه در پاگرد اول و ۲۹ درجه در صحن دوم می‌رسد. جریان هوا با سرعت کم (بین ۰٫۰۶ تا ۰٫۰۹ متر بر ثانیه) از سمت دریزه (دریچه) ورودی وارد شوادان شده و با سرعت ۰٫۲۳ از در شوادان واقع در حیاط خانه سوزنگر خارج می‌شود (تصویر ۱۴).

با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی و تغییرات دما، رطوبت نسبی و سرعت جابه‌جایی هوا در نقاط اندازه‌گیری شده، به نظر می‌رسد جریان هوای گرم بالا رونده که از عمق شوادان در اثر پدیده دودکش و اختلاف فشار هوا ایجاد می‌گردد، سبب جابه‌جایی هوا شده و در پی آن به سبب خروج رطوبت از در ورودی شوادان کمک می‌شود. تراکم و تنش‌های موجود در نشانگرهای جهت جابه‌جایی هوا در تصاویر تحلیل CFD در ورودی شوادان، نشان‌دهنده افزایش سرعت جابه‌جایی هوا می‌باشد که مؤید نتایج اندازه‌گیری است (تصویر ۱۲، ۱۳ و ۱۴).



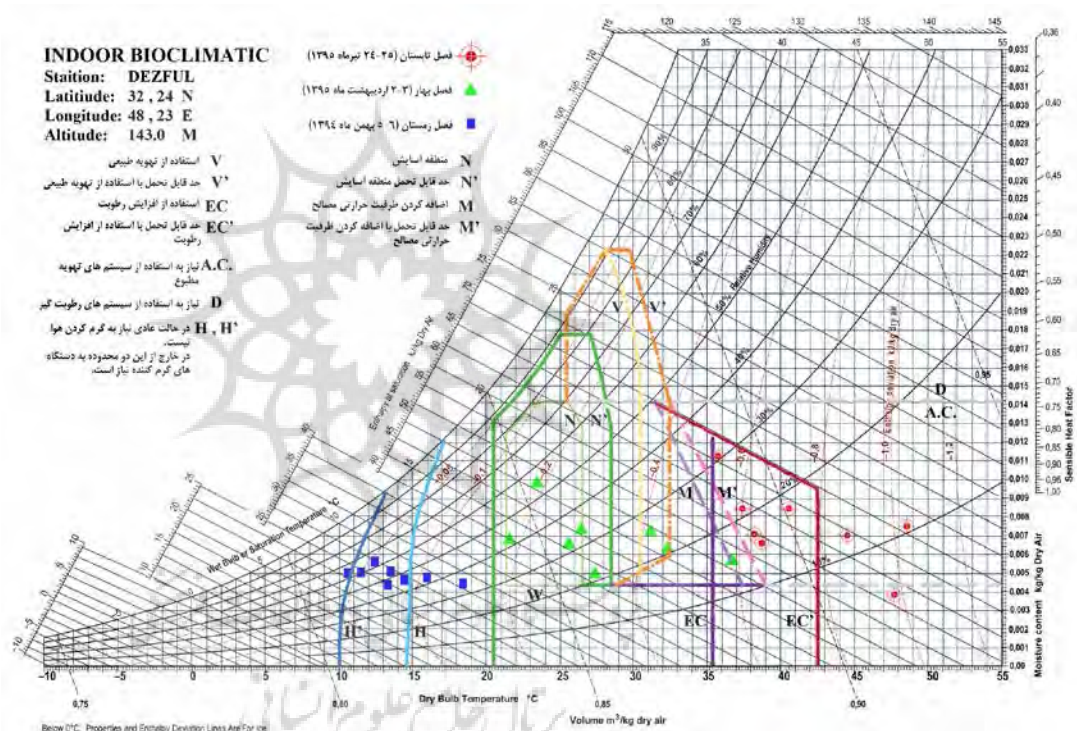
تصویر ۱۳: تحلیل CFD شوادان خانه سوزنگر در دمای اعتدالی بهار، نرم افزار دیزاین بیلدر



تصویر ۱۴: تحلیل CFD شوادان خانه سوزنگر در حداکثر دمای محیط در تابستان، نرم افزار دیزاین بیلدر

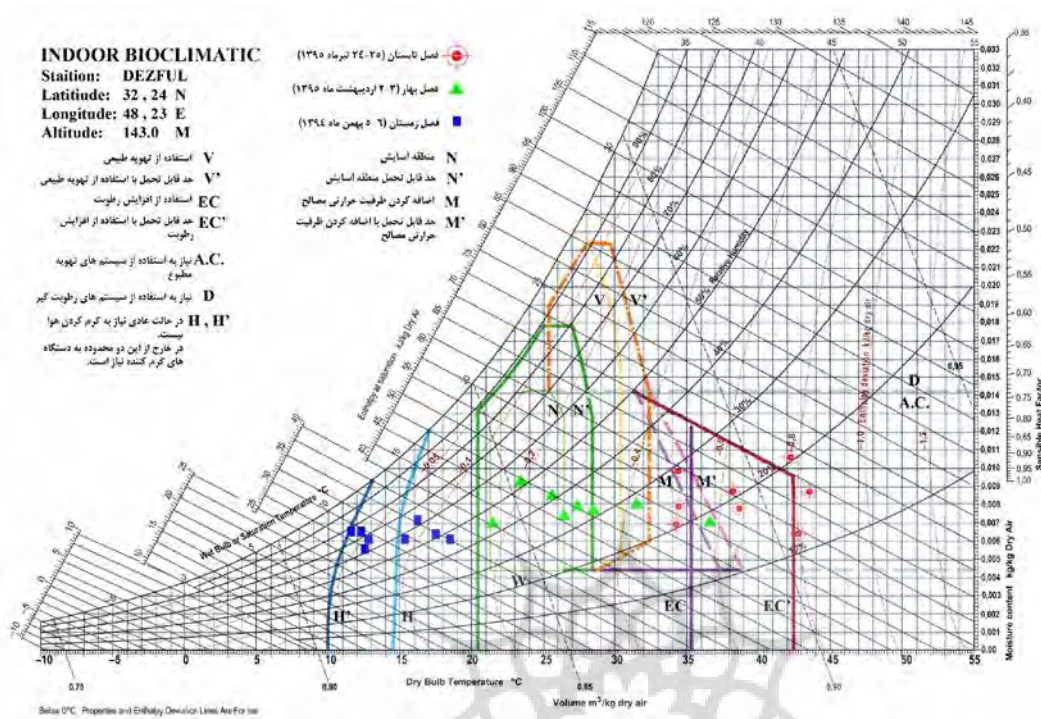
۳.۵. بررسی شرایط آسایش حرارتی در شوادان خانه سوزنگر

به منظور بررسی شرایط آسایش حرارتی در فضاهای شوادان از نمودار سایکرومتریک استفاده شد. گفتنی است تحلیل‌ها بر مبنای شاخص آسایش حرارتی گیوانی^{۱۹} انجام شده است. با توجه به تصویر ۱۵، ورودی شوادان در اکثر ساعات اندازه‌گیری زمستان در محدوده آسایش حرارتی قرار دارد. همچنین در فصل بهار در اکثر ساعات، در ورودی شوادان شرایط آسایش حاکم است و در سه برداشت که خارج از محدوده آسایش‌اند، وجود ظرفیت حرارتی جدارها باعث ایجاد شرایط آسایش خواهد شد. با وجود این، در فصل تابستان همان‌طور که پیش از این آمد، ورودی شوادان، خارج از محدوده آسایش حرارتی قرار دارد. بررسی نمودار سایکرومتریک راه‌پله شوادان شباهت زیادی به ورودی شوادان دارد و به جز برخی ساعات در تابستان در محدوده آسایش حرارتی قرار دارد. به نظر می‌رسد مجاورت این دو فضا با هم و شوادان دلیل این شباهت است.

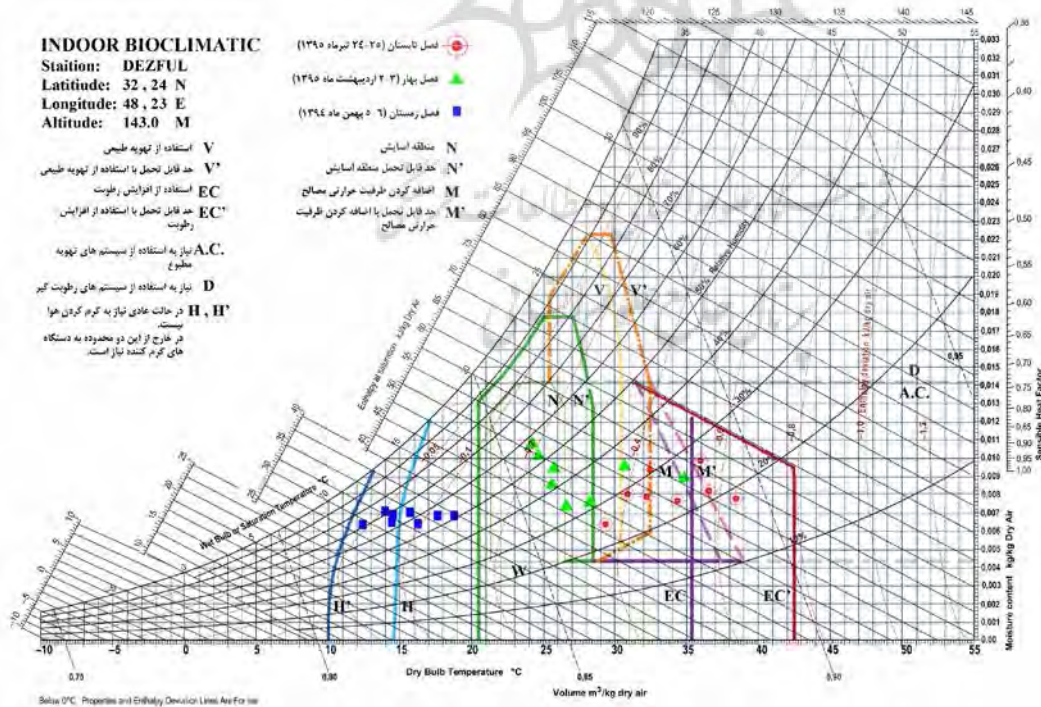


تصویر ۱۵: نمودار سایکرومتریک (زیست‌اقلیمی) ورودی شوادان

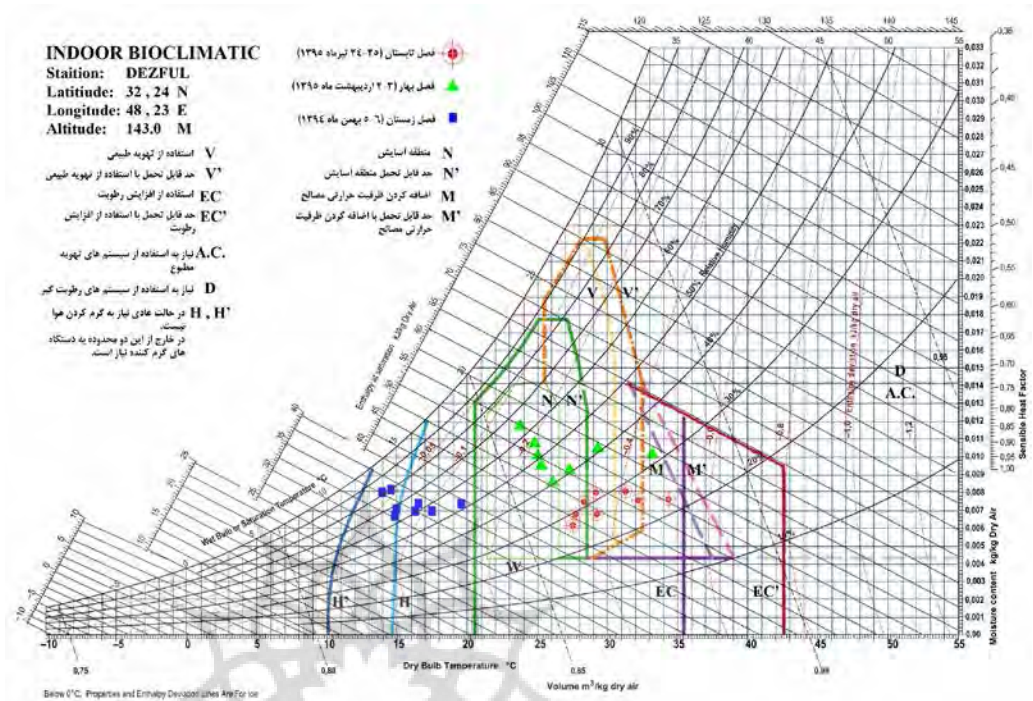
با افزایش عمق در شوادان در فصول مختلف، رفتار حرارتی بیشتر در محدوده آسایش قرار می‌گیرد (تصویر ۱۶ و ۱۷). همچنین بررسی نمودارهای سایکرومتریک فضاهای صحن اول و صحن دوم شوادان که فضاهای مکث و استراحت هستند، بیانگر برقراری شرایط آسایش حرارتی در تمام فصول به‌شکلی پایدار است. با وجود این، میزان این آسایش در فصول مختلف اندکی تفاوت دارد. به نظر می‌رسد دگرگونی‌های فصلی دلیل این امر باشد (تصویر ۱۸ و ۱۹). شایان ذکر است با افزایش عمق، نوسان حرارتی در تمامی فصول کاهش می‌یابد که این خود متأثر از ظرفیت حرارتی جدارهاست.



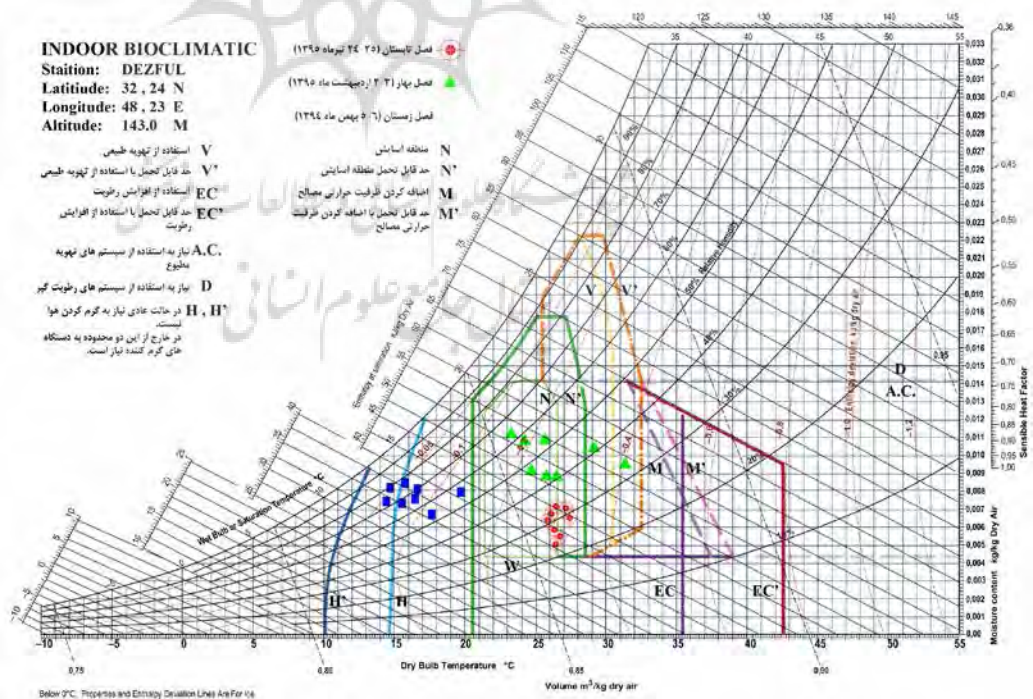
تصویر ۱۶: نمودار سایکرومتریک (زیست اقلیمی) راهپله



تصویر ۱۷: نمودار سایکرومتریک (زیست اقلیمی) پاگرد اول



تصویر ۱۸: نمودار سایکرومتریک (زیست‌اقليمی) صحن اول



تصویر ۱۹: نمودار سایکرومتریک (زیست‌اقليمی) صحن دوم

نتیجه

درک و شناخت پیشینیان از وضعیت محیطی و اقلیمی دزفول، سبب خلق فضای زیرزمینی شوادان با هدف ایجاد آسایش حرارتی شده است. به منظور شناخت و بررسی وضعیت آسایش حرارتی و رفتار حرارتی این فضا، شوادان خانه سوزنگر از جوانب مختلف مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اندازه‌گیری‌ها و تحلیل‌های انجام شده در محدوده مطالعه، مشخص شد فضای شوادان منطبق با نیازهای حرارتی در فصل گرم تابستان طراحی شده است. بر اساس اندازه‌گیری‌ها در فصل زمستان، با افزایش عمق در شوادان، میانگین دمای هوا افزایش و در فصل بهار و تابستان، با افزایش عمق در فضای شوادان، متوسط دمای هوا کاهش خواهد یافت. به گونه‌ای که در گرم‌ترین حالت اندازه‌گیری شده در تابستان، دمای ورودی شوادان ۴۸٫۶، راه‌پله ۳۸٫۵۵، پاگرد اول (کت‌ها) ۳۳٫۸۴، صحن اول ۳۰٫۳۹ و صحن دوم ۲۷٫۴ درجه سانتی‌گراد ثبت شد؛ که با توجه به سایر متغیرهای اندازه‌گیری شده نظیر رطوبت نسبی و سرعت جابه‌جایی هوا، در صحن دوم در فصل گرم، وضعیت آسایش حرارتی حاکم است. همچنین، اندازه‌گیری‌ها بیانگر کاهش تغییرات رطوبت و دما با افزایش عمق است. در اندازه‌گیری تابستان نسبت به فصل بهار و زمستان، نوسان دمایی کمتری در طول شبانه‌روز مشاهده شد. به‌طور کلی صحن دوم تغییرات کمتری در طول شبانه‌روز در تمام فصول از نظر رطوبت نسبی به نسبت سایر نقاط اندازه‌گیری در شوادان دارد (با توجه به اختلاف حداقل و حداکثر رطوبت نسبی در پایین‌ترین نقطه (صحن دوم)، در اندازه‌گیری زمستان، بهار و تابستان، به ترتیب برابر ۱۵/۹، ۳۲/۴ و ۹/۲ درصد و در صحن دوم به ترتیب برابر ۲۷/۵، ۳۷/۹ و ۲۴/۶ درصد).

در حالی که پژوهش‌های پیشین، عمدتاً از طریق شبیه‌سازی رایانه‌ای، به وجود تهویه طبیعی قابل توجه در شوادان‌ها اشاره داشته‌اند، اندازه‌گیری‌ها بیانگر پایین بودن سرعت جابه‌جایی هوا در نقاط مختلف شوادان خانه سوزنگر می‌باشند. (متوسط سرعت جابه‌جایی هوا در تمام نقاط اندازه‌گیری شده در شوادان خانه سوزنگر در اندازه‌گیری‌های زمستان، بهار و تابستان به ترتیب برابر ۰/۰۵ m/s، ۰/۱۴ m/s و ۰/۲۱ m/s است). گفتنی است سرعت جابه‌جایی هوا در شوادان ارتباطی با این متغیر در حیاط (نماینده اقلیم خرد)، بام (نماینده اقلیم محلی) و ایستگاه هواشناسی (نماینده اقلیم منطقه‌ای) ندارد. اندازه‌گیری‌ها و نتایج تحلیل CFD، بیانگر جریان خروجی بالارونده هوای گرم از در ورودی شوادان در تمام فصول است که ناشی از اختلاف فشار هوا در قسمت‌های مختلف شوادان و در اثر پدیده دودکش می‌باشد. همچنین، در شوادان محل خروج گرما و رطوبت بوده و در ریزه مرتبط با بام با افزایش اختلاف فشار برای کمک به خروج هوای گرم از در شوادان است. این در حالی است که در عمده پژوهش‌های پیشین، در شوادان به‌منزله ورودی هوا و برای شوادان عملکردی مشابه بادگیر در نظر گرفته شده بود.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده و ارتباط اندک وضعیت اقلیمی شوادان در فصول مختلف با وضعیت اقلیم خرد، اقلیم محلی و اقلیم منطقه‌ای، به نظر می‌رسد بزرگ‌ترین اختلاف محیط‌های یادشده، میانگین دمای تابشی محیط است. به گونه‌ای که در تابستان، تغییر اختلاف بین حداکثر و حداقل میانگین دمای تابشی در شبانه‌روز، در ورودی شوادان برابر ۱۷٫۳ درجه و بالاتر از تمامی فصول (۸٫۹ درجه در زمستان و ۱۵٫۱ درجه در بهار برای ورودی شوادان) است. این اختلاف در پایین‌ترین نقطه شوادان برابر ۱ درجه است که به نسبت سایر فصول، تغییرات به مراتب کمتر (۶٫۲ برای زمستان و ۱۳٫۹ برای بهار) است. همچنین، میانگین متوسط دمای تابشی فضاهای شوادان در تابستان از حیاط و بام خانه سوزنگر کمترند که نقشی مهم در ایجاد وضعیت آسایش حرارتی در شوادان‌ها دارد. نظر به رابطه محاسبه میانگین دمای تابشی و متغیر دمای کروی که متأثر از میزان انرژی گرمایی دریافتی از محیط به دستگاه اندازه‌گیری است، همچنین نبود تابش خورشید در فضای زیرزمینی شوادان، به نظر می‌رسد انرژی گرمایی ذخیره شده در جداره‌های شوادان که متأثر از ظرفیت حرارتی جداره‌های مذکور است، عامل اصلی ثبات وضعیت حرارتی و در پی آن وضعیت آسایش حرارتی در شوادان می‌باشد که در پژوهش‌های آتی باید بیشتر مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد.

1. Yaodong
2. Mesa
3. Colorado
4. Coober Pedy
5. Fluent
6. Gambit
7. Golany
8. Ojima
9. Gribble
10. DesignBuilder
11. EnergyPlus
12. Oak Ridge National Laboratory
13. Building Science Lab
14. Florida Solar Energy Center
15. Computational fluid dynamics
16. *T_{mrt}*
17. HEAT INDEX WBGT METER, Model: WBGT-2010SD
18. Microsoft Excel
19. Givoni

منابع

- بینا، محسن. ۱۳۸۷. تجزیه و تحلیل اقلیمی شوادان‌ها در خانه‌های دزفول. نشریه هنرهای زیبا (۳۳): ۳۷-۴۶.
- برگرفته از پرتال اینترنتی سازمان هواشناسی دزفول - صفی‌آباد به آدرس اینترنتی: www.havairan.com در تاریخ شنبه ۳۰ مرداد ۱۳۹۵.
- برگرفته از پرتال اینترنتی شرکت سازنده ابزار اندازه‌گیری Lutron. به آدرس اینترنتی: www.Lutron.com. در تاریخ دوشنبه ۲۱ تیر ۱۳۹۵.
- رهایی، امید. ۱۳۹۲. هویت فرهنگی و اثرات آن بر روش‌های بومی تهویه طبیعی بازار قدیم دزفول، راسته صنعتگران. باغ نظر (۲۴): ۲۹-۴۶.
- حزبی، مرتضی، زهرا ادیب، و فرشاد نصراللهی. ۱۳۹۳. تهویه طبیعی در شوادون‌های شهر دزفول با بهره‌گیری از مدل‌سازی CFD. باغ نظر (۳۰): ۳۸-۴۸.
- طاهباز، منصوره، شهربانو جلیلیان، فاطمه موسوی، و مرضیه کاظم‌زاده. ۱۳۹۲. نورپردازی طبیعی در خانه‌های سنتی کاشان، نمونه موردی: خانه عامری‌ها. دو فصلنامه معماری ایرانی (۳): ۸۸۷-۱۰۸۸۷.
- طاهباز، منصوره، شهربانو جلیلیان، و فاطمه موسوی. ۱۳۹۳. نقش جرم حرارتی در کنترل شرایط حرارتی ساختمان. نشریه علمی پژوهشی صفه، دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی (۶۶): ۳۱-۵۶.
- عنایت‌الله، رضا. ۱۳۷۷. شهرهای ایران در روزگار پارتیان و ساسانیان. تهران: علمی و فرهنگی.
- Anselm, Akubue. Jideofor. 2008. Passive annual heat storage principles in earth sheltered housing, a supplementary energy saving system in residential housing. *Energy Build* (40): 1214-1219.

- ASHRAE Standard 55P. 2002. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Benardos, A., Athanasiadis, I. and Katsoulakos, N. 2014. Modern earth sheltered constructions: a paradigm of green engineering. *Tunn. Undergr. Space Technol* (41): 46-52.
- Gribble, Don. 2009. Natural ventilation, harnessed by New Kingdom Egyptian tomb builders, may explain the changed floor levels in the Valley of the Kings tomb KV5. *Tunn. Undergr. Space Technol* (24): 62-65.
- Erdem, A. 2008. Subterranean space use in Cappadocia: the Uchisar example. *Tunn. Undergr. Space Technol* (23): 492-499.
- G.S. Golany, and T. Ojima. 1996. *Geo-space Urban Design*. John Wiley & Sons.
- Moradi, H. and Eskandari, H. 2012. An experimental and numerical investigation of Shovadan heating and cooling operation. *Renew. Energy* (48): 364-368.
- Hazbei, M. Nematollahi, O. Behnia, M. and Adib, Z. 2015. Reduction of energy consumption using passive architecture in hot and humid climates. *Tunn. Undergr. Space, Technol* (47) 16-27.
- Lixing, Gu. 2007. *Airflow Network Modeling in EnergyPlus*. Conference Proceedings 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition on September 3-6, in Beijing, China.
- Mohammadshahi, Sh., Nili-Ahmadabadi, Ma. and Nematollahi, O. 2016. Improvement of ventilation and heat transfer in Shavadoon via numerical simulation: A traditional HVAC system. *Renewable Energy* (96): 295-304.
- North Umbria University. 2011. *An Inter-program Analysis of Computational Fluid Dynamics Based on PHOENICS and DesignBuilder Software*. UK, Sheffield: School of Built and Natural Environment.
- Staniec, M., and Nowak, H. 2011. Analysis of the earth-sheltered buildings' heating and cooling energy demand depending on type of soil. *Arch. Civ. Mech. Eng* (11): 221-235.