

بررسی نقش جریان و رطوبت نسبی هوا در فرسایش قلعه تاریخی والی شهر ایلام به روش محاسباتی دینامیک سیالات*

فاطمه برمنش**

کارن فتاحی***

مجتبی نوراللهی****

احمد ملکشاهی*****

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۲۷

علمی پژوهشی

چکیده

امروزه حفاظت از بناهای تاریخی در جوامع علمی جهان، موضوعی مهم و حیاتی شناخته شده است؛ لذا تحلیل ابعاد زیستی و عملکردی بناهای تاریخی هم از نظر معماری و هم از دیگر مناظر مهندسی، یکی از ضروریات پژوهشی است. برای پرداختن به تأثیر رطوبت بر آسایش حرارتی در ساختمان‌های تاریخی، اجرای راهبردهایی مانند تهویه مناسب، اقدامات کنترل رطوبت و نگهداری دوره‌ای در طول پروژه‌های مرمت یا نوسازی ضروری است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از روش دینامیک سیالات محاسباتی، توسط نرم‌افزار فلونت، جریان و رطوبت نسبی هوا در فضای داخلی یک بنای تاریخی (قلعه والی شهر ایلام) را شبیه‌سازی و مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است. با توجه به اینکه رطوبت یکی از عوامل مخرب بر بافت تاریخی قلمداد می‌شود و این عامل تخریبی با برودت هوا در زمستان اهمیت بیشتری نیز پیدا می‌کند، ابتدا به روش تجربی با استفاده از تجهیزات داده‌نگار، متغیرهای دما، رطوبت نسبی، فشار و سرعت جریان هوا، در یکی از بحرانی‌ترین بازه‌های سرد دمایی در فصل زمستان از نظر دما و رطوبت نسبی، اندازه‌گیری شده و سپس با مدل‌سازی بنا در نرم‌افزار راینو و تحلیل مدل در نرم‌افزار فلونت، به مقایسه نتایج روش تجربی و روش تحلیل عددی در دو سناریوی مختلف پرداخته شده است. براساس تحلیل قیاسی این مدل پژوهشی، در جهت تحلیل جریان و رطوبت نسبی هوا در زمستان و جلوگیری از اثرات مخرب رطوبتی، می‌توان با بهره‌گیری از یک سیستم گرمایش با شار حرارتی محاسبه‌شده، کاهش رطوبت نسبی و درعین حال حفظ اثر تاریخی را حاصل نمود. نتایج پژوهش حاضر براساس اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی شده نرم‌افزار فلونت نشان داد شدت جریان هوا و میزان بالای رطوبت نسبی هوا در فصل زمستان با میانگین خطای ۲/۹ درصد از جمله عوامل مهم در فرسایش داخلی بنای قلعه والی شهر ایلام است که منجر به مرمت چندباره فضای داخلی این بنا طی سال‌های اخیر بوده است.

کلیدواژه‌ها:

بنای تاریخی، دینامیک سیالات محاسباتی، جریان هوا، رطوبت نسبی هوا، قلعه والی شهر ایلام.

* مقاله حاضر برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول است که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایلام به انجام رسیده است.

** دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی

*** استادیار، گروه معماری، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، نویسنده مسئول، Karen.fatahi@iau.ac.ir

**** استادیار، گروه معماری، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی

***** استادیار، گروه مکانیک، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی

مطالعات معماری ایران

دو فصلنامه معماری ایرانی

شماره ۲۵ - بهار و تابستان ۱۴۰۳

۷۹

صفحات ۷۹-۹۵

پرسش‌های پژوهش

۱. چگونه شدت جریان و میزان رطوبت نسبی هوا بر فرسایش داخلی بنای قلعه‌ء والی شهر ایلام اثرگذار است؟
۲. چگونه می‌توان با استفاده از روش محاسباتی دینامیک سیالات احتمال بروز فرسایش بناهای ارزشمند تاریخی از نظر شدت جریان و میزان رطوبت نسبی هوا را پیش‌بینی کرد و این نتایج چه مقدار با واقعیت (نتایج تجربی در اندازه‌گیری‌های میدانی) تطابق دارد؟

مقدمه

بناهای تاریخی جزو هویت فرهنگی شهرها و کشورها هستند؛ اما بعضی از آن‌ها فاقد عملکرد عالی از نظر انرژی و پایداری هستند. رطوبت^۱ یکی از عوامل مخرب محیطی برای بناهای تاریخی است که به‌عنوان کاتالیزور^۲ در جهت تخریب بنا عمل می‌کند. کمیت رطوبت نسبی (RH)^۳، مقدار رطوبت موجود در یک حجم هوا با دمای مشخص به حداکثر رطوبتی است که آن هوا می‌تواند در همان دما داشته و مقدار آن به دمای محیط بستگی دارد؛ یعنی اگر دما کاهش یابد، رطوبت نسبی افزایش می‌یابد و در صورت کاهش زیاد دما، مقدار رطوبت نسبی ممکن است تا نقطه شبنم^۴ (DPT) افزایش یابد و به شبنم یا قطرات آب تبدیل شود. تشکیل شبنم به‌دلیل برودت زیاد یکی از دلایل مهم در فرسودگی بافت داخلی بنا محسوب می‌شود. با توجه به تنوع اقلیمی در ایران، معماران سنتی تلاش کرده‌اند راه‌حل‌هایی منطقی برای تأمین آسایش انسان ابداع کنند. یکی از مصادیق معماری پایدار در ایران، معماری سنتی است که متناسب با اقلیم مربوط، با در نظر گرفتن قیمت اولیه پایین و کاربری ساختمان تا حدودی به مسائل زیست‌محیطی و بهره‌وری انرژی پاسخ داده است؛ اما در شرایط معاصر، مشکل حفظ ارزش میراثی بنا به‌دلیل قدمت و شرایط متغیر اقلیمی و آب‌وهوایی به‌شدت محسوس است.

۱. مروری بر پژوهش‌ها

بسیاری از پژوهش‌های اخیر بر تأثیر مخرب رطوبت روی بافت انواع بناها به‌ویژه بناهای میراثی تأکید کرده‌اند (Akkurt et al. 2020; Alfano et al. 2023; Bajno et al. 2020; Cho et al. 2020; Hoła and Czarnecki 2022; Huerto-Cardenas et al. 2020; Liu et al. 2023). در برخی از این مطالعات، کیفیت هوای داخلی و پایش خرد اقلیم^۵ یا مقاوم‌سازی رطوبتی ساختمان‌های تاریخی بررسی شده است (Akkurt et al. 2020; Alfano et al. 2020; Alfano et al. 2023; Bajno et al. 2020; Cho et al. 2020). برخی از این مطالعات به‌طور خاص بر ارزیابی رطوبت به‌عنوان یک عامل مضر متمرکز شده و فن‌هایی برای حفظ آثار تاریخی پیشنهاد کرده‌اند (Alfano et al. 2023; Bajno et al. 2020; Hoła and Czarnecki 2022; Liu et al. 2023; Rosina 2018). بر مبنای این مطالعات، مدل‌سازی هرچه دقیق‌تر رفتار رطوبت، بسیار ضروری است، زیرا هم روی دوام بافت بنا و هم تأمین آسایش حرارتی هوای داخل مؤثر است (Calautit et al. 2017; D'Agostino and Congedo 2014; Fatahi et al. 2021; Martinez-Molina et al. 2018). در سال‌های اخیر، بسیاری از محققان بر روی بهره‌وری انرژی و آسایش حرارتی در ساختمان‌ها تمرکز کرده‌اند. این ویژگی‌ها در بناهای تاریخی به‌دلیل ضرورت حفاظت از بنا از نظر معماری و باستان‌شناسی حائز اهمیت است. تحقیقات نشان داده است که مقاوم‌سازی ساختمان‌ها با آخرین استانداردهای بهره‌وری انرژی و آسایش حرارتی برای بهبود پایداری و عملکرد انرژی و حفظ آثار تاریخی ضروری است (Ascione et al. 2011; Balocco and Grazzini 2007; Bay et al. 2022). به‌نحوی که برخی از این مطالعات بر استفاده مجدد از ساختمان‌های میراثی متمرکز شده و راه‌حل‌های فنی مناسبی برای افزایش بهره‌وری انرژی با حفظ ارزش میراثی ساختمان پیشنهاد کرده‌اند (Bonomo and De Berardinis 2014; Cantin et al. 2010). بررسی ساختمان‌های تاریخی از جمله کلیساها، قلعه‌ها، کاخ‌ها، موزه‌ها، مساجد و... می‌تواند اهداف متفاوتی داشته باشد (Martínez-Molina et al. 2016). تعداد زیادی از ساختمان‌های تاریخی در سرتاسر جهان به‌عنوان موزه،

مکان عبادت، ساختمان‌های دولتی یا مراکز فرهنگی استفاده می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که الگوی حضور افراد در آن‌ها از قوانین خاصی پیروی کرده و به‌دلیل امکان آسیب احتمالی به بنا، از هیچ سیستم یا روش تهویه‌ای (HVAC)^۶ استفاده نمی‌شود. همچنین عملیات تعمیر و نگهداری ساختمان و یا آثار هنری موجود در آن‌ها بسیار محتاطانه انجام می‌شود. این قوانین ویژه، یکی از عوامل اصلی الزام کنترل رطوبت داخلی و ویژگی‌های حرارتی این نوع ساختمان‌هاست. برخی از دیگر ویژگی‌های تأثیرگذار عبارت‌اند از: دمای هوای بیرون، رطوبت نسبی، بار گرمایی، اندازه و تصویر ساختمان (Camuffo et al. 2010; Fanger et al. 1988; Michalski 1998). به‌دلیل اهمیت بالای حفظ این بناها که در این مطالعات (Camuffo et al. 2010; Fanger et al. 1988; Michalski 1998) بررسی شده، حتی‌الامکان در این بناها، از حداقل سیستم‌های سرمایشی یا گرمایشی استفاده می‌شود (Aflaki et al. 2015; Cheung and Liu 2011). به‌این‌ترتیب، افزودن برخی سیستم‌ها و روش‌های تهویه می‌تواند اثرات منفی بر حفظ میراث فرهنگی داشته باشد؛ زیرا این سیستم‌ها معمولاً برای بهبود آسایش حرارتی ساکنان فقط هنگام بازدید یا سرویس‌دهی ساختمان استفاده می‌شوند. با این حال، استفاده کنترل‌نشده از این تجهیزات، خود می‌تواند اثربخشی هرگونه راهبرد حفاظتی برای ساختمان و آثار هنری آن را کاهش دهد (Bordass and Bemrose 1996; Camuffo et al. 2010; Corgnati and Perino 2013; Fikry and Elsayed 2021; López and Frontini 2014). در برخی دیگر از بناهای تاریخی از دمنده و رادیاتور آب گرم استفاده می‌شود؛ زیرا سرمایه‌گذاری اولیه مالی نسبتاً کمی داشته و برای سرمایش و گرمایش حجم زیادی از هوای داخلی، الزام پاسخ‌گویی در یک بازه زمانی کوتاه را دارند؛ اما از طرفی به‌دلیل محدودیت‌های ناشی از الزام نصب و لوله‌کشی این سیستم‌ها، امکان آسیب به بناها محتمل است.

براساس ضوابط و استانداردهای مکانیکی، حرکت یا جریان هوا به‌عنوان یک نیاز کلیدی در فرایند کلی تهویه در نظر گرفته می‌شود (Mardani 2021). در سال‌های اخیر، روش دینامیک سیالات محاسباتی^۷ برای تحلیل و بهینه‌سازی پارامترهای رطوبت داخلی تحت تأثیر تهویه طبیعی در ساختمان‌های تاریخی استفاده شده است (Cheung and Liu 2007). برخی از مطالعات انجام‌شده به‌طور خاص به مقوله رطوبت به‌عنوان یک پارامتر مهم و اثرگذار بر تخریب ساختمان پرداخته‌اند. برای مثال، دی‌آگوستینو و همکاران مکانیسم دینامیکی تشکیل رطوبت و تأثیر آن بر بافت بنای تاریخی را با روش دینامیک سیالات محاسباتی و با طراحی سناریوهای مختلف تهویه مطبوع بررسی کردند (D'Agostino and Congedo 2014). آن‌ها همچنین بر تأثیر رطوبت به‌عنوان یک عامل مهم در تخریب ساختمان تأکید کردند. مکانیسم این فرایند پیچیده است و نیاز به مطالعه بسیار دقیق‌تری دارد (D'Agostino et al. 2013). ادیس^۸ و همکاران (۲۰۱۵) نیز به روش تحلیل مؤلفه اصلی یا PCA^۹، به نیاز به تشخیص میزان رطوبت و اثر مخرب آن بر ساختمان پرداخته و با بررسی یک رویکرد شبه‌کمی نشان دادند که رویکرد شبه‌کمی با استفاده از PCA پتانسیل بالایی برای تشخیص تغییرات در ساختمان دارد.

در ادامه پژوهش حاضر، ابتدا محدوده مورد مطالعه و موقعیت جغرافیایی و اقلیمی آن معرفی و سپس داده‌های میدانی با تجهیزات مناسب در محل اندازه‌گیری می‌شوند. این تجهیزات شامل دو دسته‌اند: یک دسته برای اندازه‌گیری ابعاد و اندازه‌ها به‌منظور مدل‌سازی هندسی بنا در نرم‌افزار راینو و دسته دوم تجهیزات اندازه‌گیری متغیرهای حرارتی مانند دما، رطوبت نسبی، سرعت جریان و... در بازوها و فضای داخلی به‌منظور مدل‌سازی در نرم‌افزار فلوئنت. پس از جمع‌آوری داده‌ها کار شبیه‌سازی رایانه‌ای فرایند تهویه و عملکرد حرارتی با استفاده از معرفی معادلات حرارتی-سیالاتی حاکم و حل آن‌ها توسط نرم‌افزارهای مدل‌سازی و تحلیلگر در رایانه انجام خواهد شد. پس از حصول نتایج و مقایسه دو روش و اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی، به نصب هیترهایی با تنظیم شار حرارتی مناسب برای کاهش حتی‌المقدور رطوبت نسبی و جلوگیری از آسیب رسیدن به بنا در فصل سرد پرداخته خواهد شد.

۲. روش شناسی پژوهش

روش پژوهش در این مطالعه، بر پایه مشاهده و اندازه‌گیری‌های کمی و میدانی و استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای در نرم‌افزار فلونتت که زیرمجموعه نرم‌افزار Workbench Ansys است، به‌عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل رفتار سیال با بهره‌گیری از روش حجم محدود^{۱۱} است. برای این منظور، قسمت تالار شاه‌نشین قلعه والی شهر ایلام که براساس گزارش‌های اداره کل میراث‌فرهنگی و امور گردشگری استان ایلام، دارای بیشترین بازدیدکننده است انتخاب گردید. این بخش از بنا در ضلع شمالی قلعه و رو به حیاط مرکزی قرار دارد. در تصویر ۱ نمای روبه‌روی قسمت شاه‌نشین و موقعیت جغرافیایی قلعه داخل شهر ایلام ارائه شده است.



تصویر ۱: موقعیت برداشت داده‌های اقلیمی و تصاویر ماهواره‌ای محدوده بنای قلعه والی شهر ایلام (میراث‌فرهنگی ایلام)

۲.۱. اندازه‌گیری متغیرهای اقلیمی در محدوده قلعه والی شهر ایلام

برای برداشت متغیرهای آسایش حرارتی که شامل دما، رطوبت نسبی و سرعت جریان سیال است، از دستگاه‌های داده‌نگار^{۱۱} در ضلع شمالی تالار در مقابل بازشوها و فضای داخلی استفاده شده است. داده‌های مذکور در طول یک روز منتخب خیلی سرد زمستان (۲۵ دی ۱۴۰۲) به فواصل زمانی ۱۰ دقیقه‌ای ثبت و در محل ورودی و خروجی بازشوها اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است که این مقادیر تحت عنوان شرایط مرزی برای تعریف در شبیه‌سازی رایانه‌ای مورد نیاز است. به‌منظور ثبت داده‌های مربوط به متغیرهای آسایش حرارتی هوای داخل (دمای هوا، رطوبت نسبی هوا و سرعت جریان هوا) از تجهیزات سه‌گانه به شرح زیر استفاده شده است:

۱. دستگاه داده‌نگار (دیتالاگر) دما و رطوبت نسبی مدل MIC 98586؛

۲. دستگاه دماسنج لیزری و تماسی TES-1327K؛

۳. دستگاه داده‌نگار delta ohm مدل HD32.1 THERMAL MICROCLIMATE.

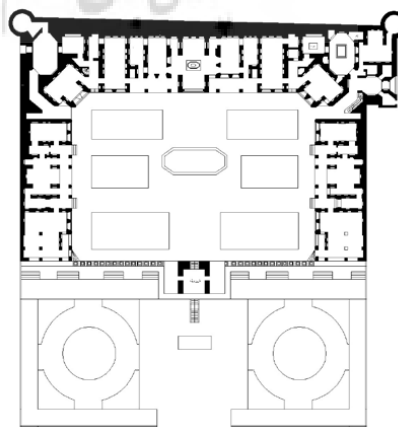
در تصویر ۲، نحوه نصب تجهیزات مذکور در محل پژوهش قابل مشاهده است.



تصویر ۲: دستگاه‌های داده‌بردار، دیتالاگر دما و رطوبت مدل MIC 98586، دماسنج لیزری TES-1327 و دستگاه داده‌بردار Delta-ohm

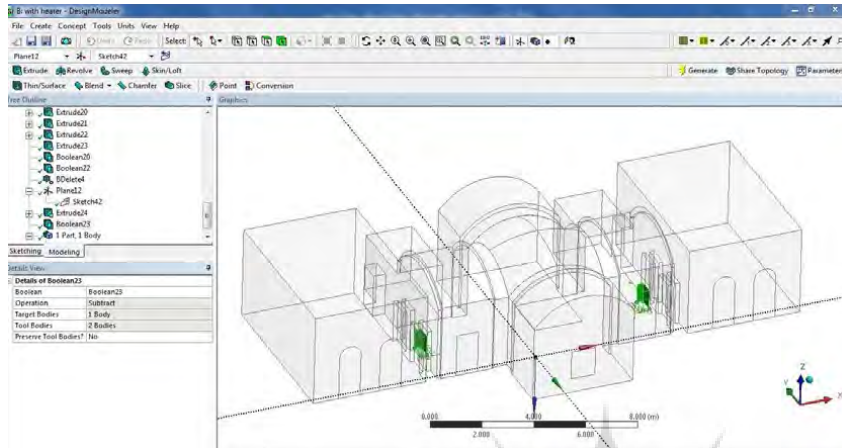
۲.۲. مدل‌سازی هندسی فضای داخلی شاه‌نشین قلعه‌والی

مطابق با روش‌شناسی پژوهش حاضر، اولین گام در جهت انجام مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، برداشت دقیق هندسه بنا اعم از پلان، مقطع، نما و حجم فضاست. با توجه به موجود بودن نقشه‌های بنای قلعه‌والی، در اسناد اداره میراث فرهنگی و امور گردشگری شهر ایلام، برداشت‌های هندسی برای تدقیق ابعاد مندرج در نقشه‌ها صورت گرفته و سپس مدل‌سازی هندسی پلان در نرم‌افزار اتوکد انجام پذیرفته است. در تصویر ۳، نقشه ماهواره‌ای و همچنین پلان اتوکد کل بنای قلعه، شامل همه ابعاد، اندازه‌ها و موقعیت اجزای بنا شامل درب، پنجره و ضخامت دیوارها و...، به تفصیل ارائه شده است.

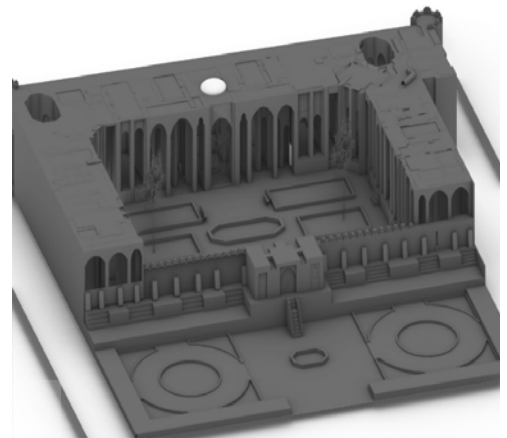


تصویر ۳: پلان قلعه‌والی شهر ایلام (میراث فرهنگی ایلام)

مدل هندسی سه‌بعدی کل بنا در نرم‌افزار راینو ۶ تهیه شد که در تصویر ۴ نمایش داده شده است.



(ب)



(الف)

تصویر ۴: مدل‌سازی سه‌بعدی قلعه‌ی والی: (الف) مدل‌سازی کل بنا در نرم‌افزار راینو؛ (ب) مدل‌سازی فضای داخل قسمت شاه‌نشین برای تحلیل جریان سیال در نرم‌افزار فلوئنت

۳.۲. مبانی نظری روش دینامیک سیالات محاسباتی و پیاده‌سازی در نرم‌افزار فلوئنت

پس از تهیه مدل سه‌بعدی بنا در نرم‌افزار راینو، پژوهشگران اقدام به شبیه‌سازی جریان هوا در نرم‌افزار فلوئنت کردند. همان‌گونه که در مقدمه به تفصیل بیان شده است، این نرم‌افزار از روش دینامیک سیالات محاسباتی بهره می‌گیرد. دینامیک سیالات محاسباتی، یکی از شاخه‌های مکانیک سیالات است که با استفاده از آنالیز عددی و الگوریتم‌های عددی، مسائل سیالاتی را تجزیه و تحلیل می‌کند. فلوئنت یک حل‌گر سیالاتی قدرتمند است که در بسته نرم‌افزاری Ansys Workbench گنجانده شده است. دقت و قابلیت اطمینان نتایج شبیه‌سازی این نرم‌افزار، به شدت به اجرای صحیح خواص و شرایط جریان سیال بستگی دارد. همچنین یادآور می‌گردد که حلگر فلوئنت با استفاده از یک الگوریتم عددی کارآمد، قابلیت حل معادلات دیفرانسیل حرارتی-سیالاتی کوپل^{۱۲} را با مشخص بودن شرایط مرزی در نواحی بازشوها، به‌طور هم‌زمان داراست. برای درک بهتر فرایند پردازش مسئله، تصویر کلی این معادلات در ادامه ارائه شده است. به‌طور کلی، این معادلات از سه قانون اساسی و با تجزیه و تحلیل یک جزء دیفرانسیلی سیال در یک سیستم مختصات مرجع به دست می‌آیند؛ این قوانین عبارت‌اند از: قانون بقای جرم، قانون بقای اندازه حرکت سیال و قانون بقای انرژی سیال. با توجه به اینکه اثبات این معادلات نیازمند بهره‌گیری مضاعف از ادبیات تخصصی رشته مکانیک است و امکان بیگانه بودن جامعه معماری با این مقوله فراوان است، برای اثبات آن‌ها می‌توان به کتاب‌های مکانیک سیالات و دینامیک سیالات محاسباتی در مراجع (White 1994) مراجعه کرد. بیان ریاضی معادله اول که به معادله پیوستگی نیز معروف است به‌صورت زیر است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

که در آن چگالی سیال، \vec{V} بردار سرعت سیال و t زمان است. معادله دوم درحقیقت همان نتیجه قانون دوم نیوتن است و اصل بقای حرکت یا بقای مومنتوم^{۱۳} نامیده می‌شود. بیان ریاضی کامل و فشرده آن به شرح زیر است:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_{ij} \quad (2)$$

که در آن $\bar{V}p$ گرادیان فشار سیال و $\bar{V} \cdot \bar{\tau}_{ij}$ تانسور تنش برشی در سیال است. برای جزئیات بیشتر به مرجع وایت^{۱۴} (۱۹۹۴) مراجعه شود. معادله سوم که به معادله انرژی معروف است، از اصل بقای انرژی حاصل می‌شود. تصویر بسته معادله مذکور به صورت زیر است:

$$\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + p(\bar{V} \cdot \bar{V}) = \bar{V} \cdot (k \bar{\nabla} T) + \Phi \quad (۳)$$

که در آن، \hat{u} انرژی داخلی سیال است. اگر هوا را به عنوان یک گاز کامل در نظر بگیریم، مقدار \hat{u} فقط تابعی از دما خواهد بود، اما به طور کلی روابطی برای آن در این مراجع (Fox et al. 2020; Graebel 2007; White 1994) وجود دارد. k مقدار ضریب هدایت حرارتی، $\bar{V}T$ گرادیان دما و نیز Φ تابع تلفات ریلی است. علاوه بر معادلات سیال، معادلات انتقال حرارت نیز برای تعیین شار حرارتی عبوری از دیواره‌ها و انتقال حرارت بین سیال و جسم جامد نیز ضروری است. به طور کلی سه نوع روش انتقال حرارت وجود دارد که عبارت‌اند از: انتقال حرارت هدایتی (گذر حرارت از ضخامت دیواره‌ها)، انتقال حرارت جابه‌جایی یا جابه‌جایی (انتقال حرارت بین دیوار و سیال) و انتقال حرارت تابشی یا تشعشع (عمدتاً ناشی از تابش نور خورشید بر سطح بیرونی دیواره‌ها). این معادلات را نیز می‌توان با مراجعه به کتب انتقال حرارت (Anderson et al. 2016; Bergman et al. 2011; Kaviany and Kanury 2002) اثبات کرد. این سه معادله به ترتیب (معادله رسانایی، همرفت و انتقال حرارت تشعشع) مقدار شار گرما را به دما به صورت زیر مرتبط می‌کنند:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}; \left(\frac{\bar{q}}{dA} = -k \bar{\nabla} T \right) \quad (۴)$$

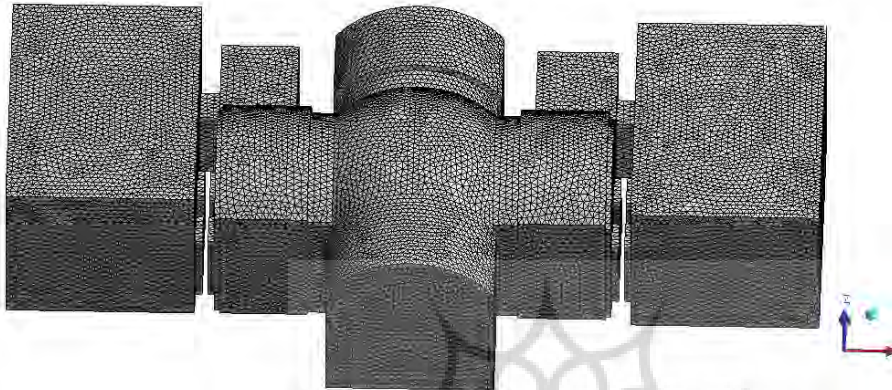
$$\frac{\bar{q}}{dA} = h(T_s - T_\infty) \quad (۵)$$

$$q = \sigma A(T_h^4 - T_c^4) \quad (۶)$$

که در آن q شار حرارتی عبوری (رسانایی، همرفت یا تابش) است. c_p ظرفیت گرمایی سیال در فشار ثابت، T_s دمای سطح جامد، T_∞ دمای محیط یا سیال اطراف سطح جامد، T_h دمای جسم داغ (در تابش)، T_c دمای جسم سرد است (در تابش) و σ ضریب استفان بولتزمن^{۱۵} است. نکته مهمی که در رابطه با انتقال حرارت تابشی وجود دارد، این است که بسته به اینکه یک جسم چه کسری از انرژی تابشی را منتقل، منعکس یا جذب می‌کند، ضریب مربوطه به ترتیب به عنوان ضریب انتقال، ضریب بازتاب یا ضریب جذب تعریف می‌شود. برای مثال، هرچه یک جسم شفاف‌تر باشد، قابلیت انتقال آن بیشتر و هرچه مات‌تر باشد، قابلیت جذب آن بیشتر خواهد بود و... مجموع این ضرایب برابر با یک است. برای مواد مختلف مانند شیشه، آجر، گچ و... این ضرایب از جداول مربوط استخراج شده و در شبیه‌سازی CFD اعمال می‌شود (Anderson et al. 2016; Bergman et al. 2011).

به طور کلی، معادلات سیالاتی-حرارتی جفت‌شده در معادلات (۱) تا (۶) را نمی‌توان با روش‌های تحلیلی معمول حل کرد. برای حل آن‌ها باید از یک راهبرد حل عددی مناسب استفاده شود. در این روش عددی، کل محدوده محاسباتی (در اینجا فضای داخلی شاه‌نشین قلعه والی شهر ایلام) به عناصر حجمی ریزتر با تصویر و اندازه هندسی مناسب تقسیم می‌شود. کاری که فلوئنت به عنوان یک حلگر انجام می‌دهد، این است که ابتدا کل فضای داخلی شبکه‌بندی شده و با مشخص بودن شرایط مرزی (مقادیر دما، رطوبت، فشار و سرعت هوا در بازشوها و دیواره‌ها) با گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیلی (۱) تا (۶) و تبدیل آن‌ها به دستگاه معادلات جبری، تمام مقادیر مجهول را برای همه گره‌ها یا نودها محاسبه می‌کند و این کار را تا همگرایی پاسخ‌ها ادامه می‌دهد. بنابراین کاری که انجام می‌شود این است که ابتدا مدل هندسی سه‌بعدی تهیه شده در نرم‌افزار راینو را وارد فلوئنت کرده، سپس بر مبنای یک راهبرد مناسب، شبکه‌بندی یا

مش‌بندی می‌شود. نوع و تعداد المان‌ها نیز مهم است. برای این منظور با توجه به هندسه فضا از المان چهاروجهی (تتراهدرال^{۱۷}) به صورت پیش‌فرض فلونت و تعداد المان ۱۶۰۰۰۰۰ عدد استفاده می‌شود که نتیجه آن در تصویر ۵ مشاهده می‌شود. تعداد المان‌ها به نحوی است که با ریزتر کردن آن‌ها تغییر چندانی در دقت جواب‌ها حاصل نشود و به اصطلاح، استقلال از شبکه‌بندی حاصل گردد.



تصویر ۵: شبکه‌بندی فضای داخلی شاه‌نشین قلعه والی شهر ایلام

تمامی تنظیمات مورد نیاز در ماژول setup تعریف می‌شود. این مراحل شامل تخصیص خواص ماده به مصالح بنا (دیوارها، سقف، درها، پنجره‌ها و...)، تخصیص ویژگی‌ها و مدل رفتار به سیال هوا، مدل‌سازی رطوبت با استفاده از مدل انتقال گونه‌ها (model transfer species) با در نظر گرفتن بخار آب موجود در هوای خشک به صورت مخلوط، تعریف شرایط مرزی و دادن خواص حرارتی به آن‌ها (برای مثال ورودی، خروجی، سطوح و...) برای تعریف مواد و... است. شایان ذکر است که نرم‌افزار فلونت کتابخانه‌ای از مواد و متریا ل مختلف دارد که شامل بسیاری از مصالح مهندسی، اعم از جامد و سیال است. خواص حرارتی دیوارها، از جمله ضرایب انتقال حرارت، حرکت هوا بین دیوارها، سقف و کف، با توجه به مقادیر موجود در منابع و کتاب‌های راهنما تنظیم گردیده‌اند (Anderson et al. 2016; Bergman et al. 2011). در جدول ۱، فهرست مصالح به کاررفته در بنا و مقادیر آن‌ها آورده شده است. براساس اسناد اداره کل میراث فرهنگی و امور گردشگری شهر ایلام و مشاهدات عینی پژوهشگران، عمده مصالح به کاررفته در دیوارهای بنای قلعه والی شهر ایلام خشت است. لایه ملات گل و آهک نیز در دیوارها در نظر گرفته شده است. لایه نهایی دیوارهای داخلی گچ است. همچنین از قیر و آسفالت (صرف نظر از اینکه این پوشش در مرمت‌های ادواری چه دوره‌ای به بنا اضافه شده‌اند) به ضخامت ۳ سانتی‌متر در پشت‌بام به کار رفته که با احتساب همه این موارد متناسب با حجم و ضخامت لایه به کاررفته، مقادیر معادل مربوط به خواص حرارتی و مقاومت حرارتی دیوارها که در جدول ۱ آورده شده، استخراج و در معادلات استفاده شد.

جدول ۱: خواص فیزیکی و حرارتی مصالح به کاررفته در بنا (Anderson et al. 2016; Bergman et al. 2011)

| مصالح | ظرفیت گرمایی | ضریب هدایت | چگالی | ضریب جابجایی با هوا |
|---------------|--------------|------------|-------|---------------------|
| خشت | 840 | 1 | 1600 | 5.5 |
| پلاستر گچ | 960 | 0.25 | 750 | 6.5 |
| ملاط گل و آهک | 910 | 0.6 | 1450 | 6 |
| قیر و آسفالت | 820 | 0.2 | 2100 | 5 |

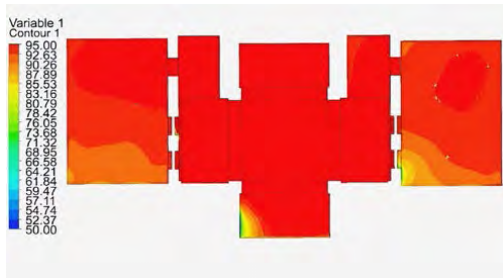
پس از تعریف همه خواص و داده‌های مورد نیاز، نرم‌افزار فلوتنت قادر به حل مسئله بوده و می‌توان نتایج را پس از حل معادلات استخراج نمود؛ که در ادامه به بررسی این تحلیل‌ها خواهیم پرداخت.

۳. یافته‌ها و بحث درباره اثر میزان رطوبت نسبی هوا و شیوه کنترل آن در فضای داخلی شاه‌نشین قلعه والی

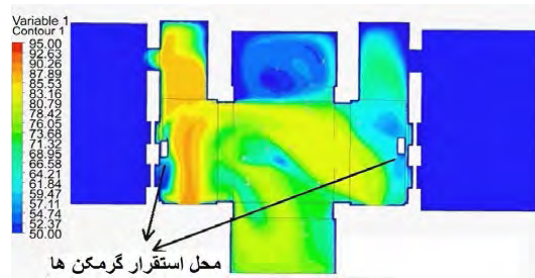
برای نشان دادن شرایط بحرانی رطوبت در فضای داخلی تالار شاه‌نشین بنای مورد مطالعه، ابتدا داده‌های مربوط به یک زمان بحرانی در طول روز، یعنی کمترین دمای ثبت شده و بیشترین میزان RH هوای بیرون که توسط دستگاه داده‌بردار ثبت گردیده، انتخاب می‌شود. در ۲۵ دی‌ماه که دمای هوا پایین و رطوبت نسبی خیلی بالا بود، در ابتدای صبح، دمای بیرون در هوای آزاد ۱- درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بیرون ۶۶/۵ درصد اندازه‌گیری شد.

برای شروع، شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلوتنت به صورت طبیعی، یعنی بدون استفاده از تجهیزات گرمایشی و تنها با حضور دو عامل اصلی در تهویه طبیعی یعنی جریان هوای وارد شده از بازشوها و تابش بر روی دیوارهای بیرونی ساختمان انجام شد. این شبیه‌سازی به عنوان سناریوی اول قلمداد گردیده و نتایج برای این شرایط با اجرای فرایند حل در فلوتنت استخراج گردید. برای تولید سناریوی دوم، به منظور کنترل یا کاهش رطوبت نسبی فضای داخل می‌توان از راهبرد تهویه مناسب با بناهای تاریخی با کمترین میزان آسیب به بنا استفاده کرد. با توجه به محدودیت در تغییر آرایش بازشوها به دلیل اینکه در فصل سرد وضع موجود بازشوها باید حفظ گردد - در وضع موجود بازشوها فقط یک درب ورودی و یک درب خروجی باز است - این سناریو، بهره‌گیری از تولید شار حرارتی مشخص برای کمک به کاهش رطوبت نسبی در فضای داخلی شاه‌نشین است. بنابراین پس از مشاهده نتایج تهویه طبیعی، با استفاده از دو هیتر برقی در مکان‌های مناسب با شار حرارتی قابل حصول و با ایجاد مصالحه بین آسایش حرارتی و کاهش رطوبت نسبی - شار حرارتی زیاد نیز می‌تواند منجر به آسیب شود و مصرف انرژی را بالا ببرد - مجدداً تحلیل انجام شده و نتایج حاصل از این سناریو دوباره مقایسه و ارزیابی گردید.

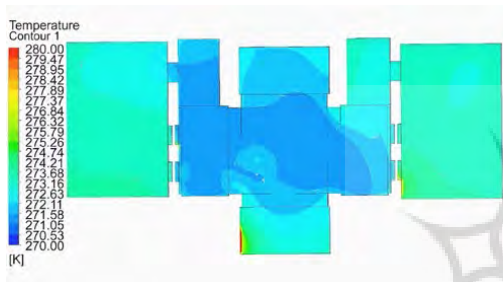
تصویر ۶ (الف) تا ۶ (د) پلان‌های رطوبت نسبی و دما را برای ارتفاع ۶۰ سانتی‌متری از کف در ساعت ۸ صبح روز سرد زمستانی برای دو حالت قبل و بعد از به کارگیری گرمکن‌ها نشان می‌دهد. کاهش رطوبت نسبی در مجاورت دیوارهای داخلی اهمیت بیشتری دارد، زیرا در صورت عدم کنترل این مورد ممکن است منجر به تشکیل شبنم و نفوذ آن به داخل دیوار در اثر عدم تهویه مناسب شود. همان‌طور که در تصویر ۶-الف مشاهده می‌شود، مقدار رطوبت نسبی در مجاورت دیوارهای داخلی پس از استقرار گرمکن‌ها از مقدار بحرانی ۹۰ درصد به مقدار ۵۰ درصد کاهش یافته است. مقدار شار حرارتی هر گرمکن ۳۰ کیلووات بر متر مربع تعیین شد. این مقدار با تغییر شار حرارتی منبع تولید حرارت در نرم‌افزار و متناسب با توان و ظرفیت حرارتی ممکن هیترهای موجود در بازار تعیین شد؛ به نحوی که کاهش رطوبت مربوط که مطلوب است به دست آید تا شرایطی که در تصاویر ۶-الف و ۶-ج ملاحظه می‌شود حاصل شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صورت عدم استفاده از گرمکن، بیشتر فضای داخلی دارای RH نزدیک به مقدار اشباع (حدود ۹۵ درصد) است که از نظر نگهداری و آسایش حرارتی ساختمان‌های واجد ارزش میراثی مناسب نیست؛ یعنی در صورت ادامه چنین شرایطی در طول فصل سرد امکان آسیب جدی به خاطر تشکیل شبنم روی دیوارهای داخلی وجود دارد. مقایسه کانتورهای دما در تصاویر ۶-ج و ۶-د نیز نشان می‌دهد در اتاق‌های کناری به دلیل بسته بودن بازشوها، مقدار دما نسبت به نواحی میانی که دارای بازشوها ورود و خروج جریان هواست، بیشتر افزایش یافته است. همچنین در محل ورودی‌ها، به رغم وجود گرمکن‌های مندرج در سناریوی دوم، به دلیل ورود جریان هوای سرد، دما کمتر افزایش یافته است. علاوه بر این، با مقایسه کانتورهای RH و دما، می‌توان مشاهده کرد که رابطه بین آن‌ها معکوس است؛ یعنی هر جا که مقدار RH زیاد باشد، دما پایین است و برعکس.



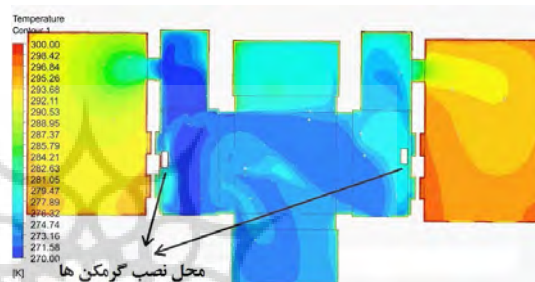
ب) پلان توزیع رطوبت نسبی قبل از استقرار گرمکن‌ها



الف) پلان توزیع رطوبت نسبی بعد از استقرار گرمکن‌ها



د) پلان توزیع دما قبل از استقرار گرمکن‌ها

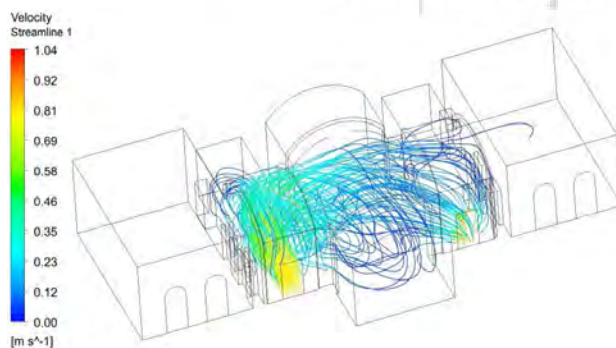


ج) پلان توزیع دما بعد از استقرار گرمکن‌ها

تصویر ۶: کانورهای رطوبت و دما قبل و بعد از نصب گرمکن‌ها در ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر از کف فضای شاه‌نشین

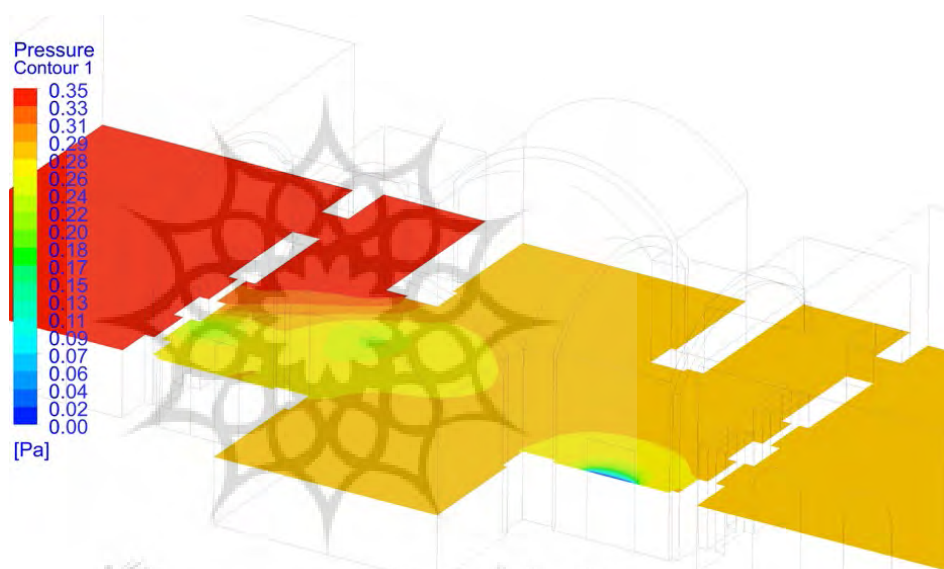
همچنین تحلیل‌ها نشان می‌دهند که نواحی مجاور درب‌ها و پنجره‌های بزرگ که در معرض تابش‌اند (رو به جنوب)، به‌علاوه مناطقی که در معرض جریان هوای سرد ورودی نیستند (به‌اصطلاح نقاط کور)، از نظر دما و رطوبت نسبی وضعیت مطلوب‌تری دارند.

برای نشان دادن الگوی گردش جریان هوای ورودی و خروجی از بازشوها و سرعت آن در نواحی مختلف که مسیر وزش باد را نمایش می‌دهد، باید خطوط جریان هوا را رسم کرد. تصویر ۷ الگوی جریان هوا و سرعت آن از ورودی به خروجی در فضای داخلی شاه‌نشین را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که این وضعیت بازشوها بر مبنای وضعیت موجود انتخاب شده و می‌توان سناریوهای بیشتری نیز بررسی کرد؛ ولی موضوع بحث حاضر بررسی رطوبت بوده و نه تأثیر بازشوها. سرعت ورودی جریان در نتایج تجربی حدود ۰/۸ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد که به‌عنوان شرایط مرزی سرعت ورودی در شبیه‌سازی درج گردید.



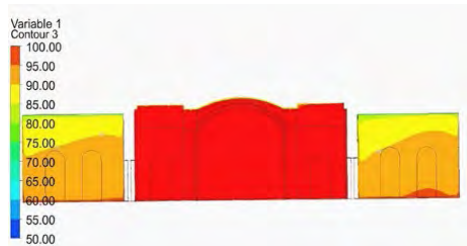
تصویر ۷: الگوی جریان هوا در حالت وضعیت موجود بازشوها

تصویر ۷ دلیل این را که چرا دمای نواحی میانی، کمتر از نواحی مجاور دیوارهاست توجیه می‌کند؛ زیرا این نواحی در معرض جریان هوای سرد از ورودی قرار دارند. همان‌طور که در تصویر ۷ نشان داده شده، سرعت جریان هوا در ورودی و خروجی بیشتر از نواحی داخلی است. با توجه به این مسئله که درب خروجی فضا بنا بر الگوهای معماری گذشته، به سمت فضا و به تبع هوای بیرون باز می‌شود، فرض می‌گردد که شرایط مرزی فشار خروجی برابر فشار جو محل (فشار نسبی صفر) باشد که این مهم قبلاً توسط ابزار اندازه‌گیری تأیید شده است. تصویر ۸ کانتور توزیع فشار نسبی را در یک صفحه در فضای داخلی ساختمان نشان می‌دهد. در واقع سرعت جریان هوا تابعی از تغییرات فشار است و هوا به صورت طبیعی از نواحی با فشار بالاتر به مناطق با فشار پایین‌تر حرکت می‌کند. همچنین تصویر ۸ نشان می‌دهد اگرچه تغییرات فشار ممکن است خیلی کوچک و ناچیز باشند (به دلیل اینکه چگالی هوا در حدود ۱/۲ کیلوگرم بر متر مربع است که این مقدار کم محسوب می‌شود)، می‌تواند باعث ایجاد جریان محسوس هوا گردد.

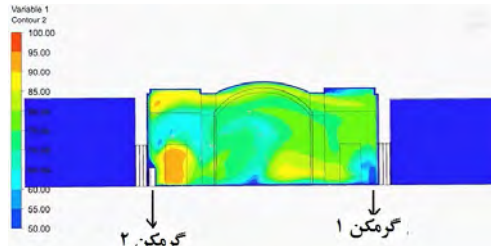


تصویر ۸: پلان فشار نسبی در یک ارتفاع نمونه (۱/۲ متر از کف)

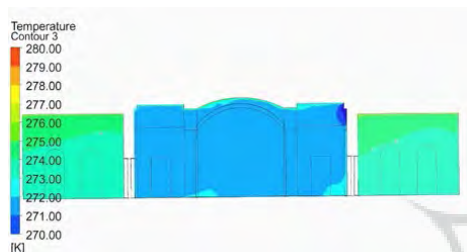
در ادامه، برای پایش و مقایسه الگوی تغییرات دما و رطوبت با تغییر ارتفاع از کف تا سقف، لازم است از یک مقطع عمودی برای نشان دادن توزیع دما و رطوبت در الگوی شبیه‌سازی سناریوها استفاده شود؛ که خوشبختانه این امکان نیز در نرم‌افزار فلوئنت قابل دسترسی است. این مقطع را می‌توان نه تنها در قالب تصاویر، بلکه به صورت انیمیشن نیز از هر دیوار تا دیوار مقابل نمایش داد. تصویر ۹ نرخ تغییرات RH را برحسب ارتفاع برای دو سناریوی با و بدون گرمکن‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر ۹-ب و ۹-د مشاهده می‌شود، در تمامی نواحی در حالت بدون گرمکن، RH بحرانی و دما کم و پس از نصب گرمکن‌ها، مقدار RH کاهش و دما افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که در ورودی‌ها یا دهانه‌های فضا، به دلیل جریان هوای سرد در این نواحی، دما کمتر و RH بیشتر است. همچنین مشاهده می‌گردد که در حالت استفاده از گرمکن، هوای نزدیک به سقف گرم‌تر است که توجیه این مسئله نیز چگالی کمتر هوا در هنگام گرم شدن است. در اتاق‌های کناری، هوا نسبت به ناحیه میانی تالار گرم‌تر، با RH پایین‌تر است که مسئله نیز نشان می‌دهد اتاق‌های کناری نسبت به زمانی که هوا به حالت پایدار می‌رسد گرم‌تر می‌شوند، زیرا هوای سرد در این قسمت‌ها گردش نمی‌کند؛ اما فضای داخلی سالن براساس خروجی تحلیل‌ها همچنان سرد است، زیرا به دلیل باز بودن بازشوها، گردش هوای سرد در فضا وجود دارد.



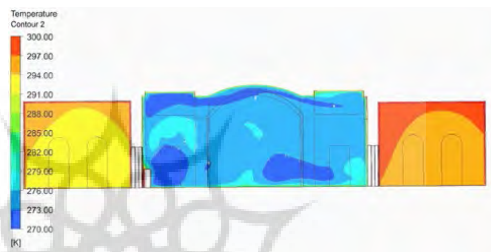
ب) مقطع توزیع رطوبت نسبی قبل از استقرار گرمکن‌ها



الف) مقطع توزیع رطوبت نسبی بعد از استقرار گرمکن‌ها



د) مقطع توزیع دما قبل از استقرار گرمکن‌ها



ج) مقطع توزیع دما بعد از استقرار گرمکن‌ها

تصویر ۹: مقطع‌های توزیع رطوبت نسبی (RH) و دما قبل و بعد از استقرار گرمکن‌ها

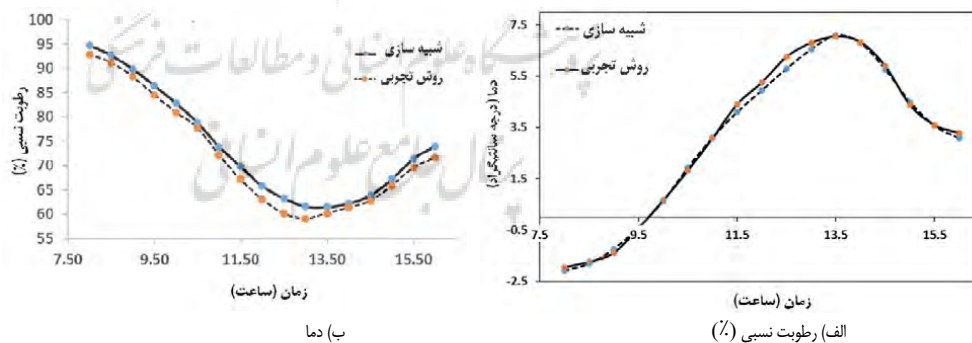
در گام پایانی، به منظور اعتبارسنجی نتایج خروجی فلونت، داده‌های مشاهدات تجربی که قبلاً در یک روز سرد (۲۵ دی ۱۴۰۲) در بازه زمانی بین ۸ صبح تا ۴ بعدازظهر ثبت شده بود، با نتایج شبیه‌سازی مربوط در نرم‌افزار فلونت مقایسه گردید. این مقایسه در جدول ۲ نشان داده شده است. براساس نتایج جدول ۲، در بدترین شرایط، میانگین RH پس از نصب گرمکن‌ها به کمتر از ۷۰ درصد رسیده است که این پدیده در اوایل صبح رخ داده است. این نکته نشانگر آن است که استفاده از کمترین مقدار ممکن شار حرارتی با سیستم‌های گرمایشی رایج و در دسترس، در فضای داخلی منجر به کاهش ۲۵ تا ۳۰ درصدی مقدار RH شده است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، اهمیت این امر به دلیل لزوم حفظ آثار تاریخی و استفاده حداقلی از تجهیزات مکانیکی است. براساس نتایج مقایسه‌ای حاصل از هر دو تحلیل تجربی و شبیه‌سازی، میانگین خطای محاسبات نرم‌افزار فلونت حدود ۲/۳ درصد است که این مقدار براساس رویکردهای آماری در پژوهش مقدار رضایت‌بخش و قابل اعتمادی قلمداد می‌شود و نشان‌دهنده انطباق مناسب بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی فلونت است. همچنین تحلیل‌ها نشانگر آن است که سناریوی طراحی شده دوم، از منظر مکانیک سیالات به‌خوبی عمل کرده و قابل اعمال در شرایط معاصر این بنای تاریخی است.

جدول ۲: مقایسه نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی با نتایج تحلیل دینامیکی سیالاتی در فلونت با و بدون گرمکن‌ها

| ساعت | مقدار RH فلونت بدون استقرار گرمکن‌ها (%) | مقدار RH تجربی بدون استقرار گرمکن‌ها (%) | مقدار RH فلونت بعد از استقرار گرمکن‌ها (%) | درصد خطای RH بین روش تجربی و روش محاسباتی (%) | درصد کاهش RH |
|-------|--|--|--|---|--------------|
| 8:00 | 94.82 | 92.90 | 70.34 | 2.03 | 24.48 |
| 8:30 | 92.73 | 91.25 | 69.00 | 1.59 | 23.73 |
| 9:00 | 89.90 | 88.32 | 67.77 | 1.77 | 22.13 |
| 9:30 | 86.46 | 84.56 | 66.06 | 2.19 | 20.4 |
| 10:00 | 82.89 | 80.99 | 63.85 | 2.28 | 19.04 |

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 10:30 | 78.82 | 77.75 | 61.26 | 1.35 | 17.56 |
| 11:00 | 73.89 | 72.18 | 59.30 | 2.31 | 14.59 |
| 11:30 | 69.82 | 67.12 | 56.96 | 3.88 | 12.86 |
| 12:00 | 65.76 | 63.04 | 55.99 | 4.13 | 9.77 |
| 12:30 | 63.30 | 60.14 | 56.13 | 4.99 | 7.17 |
| 13:00 | 61.58 | 59.06 | 57.01 | 4.10 | 4.57 |
| 13:30 | 61.47 | 60.15 | 58.38 | 2.15 | 3.09 |
| 14:00 | 62.23 | 61.33 | 60.37 | 1.43 | 1.86 |
| 14:30 | 63.85 | 62.68 | 62.49 | 1.82 | 1.36 |
| 15:00 | 67.20 | 65.76 | 63.74 | 2.14 | 3.46 |
| 15:30 | 71.42 | 69.53 | 64.74 | 2.65 | 6.68 |
| 16:00 | 74.03 | 71.62 | 65.62 | 3.25 | 8.41 |

همچنین، تصویر ۱۰ به ترتیب نمودارهای میانگین تغییرات مقادیر RH و دما در فضای داخل را با گذشت زمان در طول روز بین دو روش مورد بررسی یعنی روش تجربی (اندازه‌گیری میدانی) و شبیه‌سازی در فلوئنت (روش CFD) به تصویر می‌کشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رطوبت نسبی در صبح حداکثر بوده و با گذشت زمان (حوالی ساعت ۱۳:۳۰) به کمترین مقدار خود رسیده و دوباره به آرامی افزایش می‌یابد. این وضعیت برای دما تقریباً معکوس است اما از رفتار مشابهی پیروی می‌کند؛ یعنی در صبح دما نسبتاً پایین است و با گذشت زمان (حدود ساعت ۱۳:۳۰ بعدازظهر) به حداکثر مقدار خود، حدود ۷ درجه افزایش می‌یابد و سپس به آرامی در بعدازظهر و عصر بیشتر کاهش می‌یابد. مقدار خطای بین دو روش شبیه‌سازی و روش تجربی برای دما حدود ۰/۷۵ درجه و برای رطوبت نسبی حدود ۳ درصد است؛ که این نتایج نیز نشان‌دهنده دقت و پایایی روش شبیه‌سازی هستند. به این ترتیب می‌توان این‌گونه اذعان داشت که از روش شبیه‌سازی برای استخراج تغییرات دما و رطوبت نسبی برای استفاده از هر نوع سیستم گرمایش یا رطوبت‌گیر بدون استفاده فیزیکی از تجهیزات گرمایش واقعی استفاده کرد؛ که نه تنها این تجهیزات از نظر اقتصادی گران بوده و به‌صرفه نیستند، بلکه می‌توانند به بنای تاریخی نیز آسیب‌ها و لطمات جبران‌ناپذیری را وارد نمایند.



تصویر ۱۰: مقایسه میانگین تغییرات مقادیر RH و دما در فضای داخل با گذشت زمان در طول روز بین دو روش

یکی از مزیت‌های اصلی شبیه‌سازی پس از اطمینان از ارائه دقیق نتایج، این است که می‌توان آزمایش‌های بهره‌گیری از انواع تجهیزات مکانیکی در فضا را در قالب تعریف و طراحی سناریوهای جدید و بدون صرف هزینه تکرار کرد. مثلاً شار حرارتی گرمکن‌ها را می‌توان تغییر داد یا تنظیم کرد تا نتایج مطلوب از نظر آسایش حرارتی و کاهش رطوبت نسبی به دست آید.

نتیجه

حفظ بناهای تاریخی به عنوان یک میراث ارزشمند همواره مورد توجه مردم و مسئولان در سراسر جهان است. بازدید از این اماکن با هدف آشنایی و شناخت از این میراث و گنجینه غنی، سالانه گردشگران بسیاری را به خود جلب می کند؛ بنابراین مراقبت از بناهای تاریخی در شرایط حاضر مهم است تا نسل های آینده هم بتوانند با این گنجینه ارزشمند آشنا شوند. سالانه عوامل آشکار متعددی اعم از آسیب های عمدی و بحران های طبیعی مانند سیل، زلزله و... در کنار بی توجهی به حفظ و حراست از این بناها باعث بروز آسیب و تخریب بسیاری از این اماکن تاریخی شده است و دستگاه های متولی هر ساله در حال مرمت این اماکن هستند. در این میان توجه به نقش عوامل پنهان اقلیمی در فرسایش و تخریب این بناها کمتر مورد توجه بوده است. شدت جریان و میزان رطوبت نسبی هوا از جمله عوامل اقلیمی است که نقش مهمی در فرسایش این بناها دارد. فقدان تهویه مناسب و عدم کنترل رطوبت نسبی بالا (RH) به ویژه در هوای سرد زمستان، در اقلیم های سرد و کوهستانی همواره موجب آسیب به ساختار داخلی بناهای تاریخی و واجد ارزش میراثی شده است. نتایج شبیه سازی CFD در نرم افزار فلوئنت نشان داد میزان شدت جریان و رطوبت نسبی بالای هوا در زمستان سبب بروز فرسایش در فضای داخلی قلعه والی شهر ایلام شده است، عدم کنترل عوامل اقلیمی در شرایط بحرانی طی سال های اخیر منجر به مرمت چندباره داخلی در این بنا شده است. نتایج نشان داد مقایسه داده های تجربی با مدل روش محاسباتی دینامیک سیالات با میانگین خطای حدود ۲/۹ درصد برای مقادیر RH یک روش قابل استناد در پیش بینی احتمال بروز فرسایش در سایر بخش های این بنا و دیگر آثار ارزشمند تاریخی است. پس از تأیید نتایج شبیه سازی و حصول اطمینان از روش تحقیق، برای کنترل مقادیر RH بالا، پیشنهاد گردید که از یک سناریوی گرمایشی با به کارگیری هیترهایی با مقدار شار حرارتی کافی برای جلوگیری از مقادیر بحرانی RH و تشکیل شبنم بر روی دیوارهای داخلی استفاده شود. این شار که حدود ۳۰ کیلووات بر متر مربع برای هر گرمکن با استفاده از فرایند سعی و خطا در نظر گرفته شد، می تواند RH را مطابق مقادیری که در جدول ۲ نشان داده شده است کاهش دهد و از آسیب به بافت داخلی بنا در زمستان های سرد و مرطوب در بازه های بلندمدت جلوگیری کند. همچنین می توان ادعا کرد که رهیافت دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه این پژوهش، پس از صحت سنجی نتایج، قابلیت تکرار و طراحی دیگر سناریوهای مکانیکی در فضای داخلی بناهای تاریخی را بدون صرف هزینه، زمان طولانی و صرفاً با تکیه بر دانش نرم افزاری برای مطالعات آتی دارا می باشد. نوآوری پژوهش حاضر در پیش بینی احتمال بروز فرسایش داخلی بناهای تاریخی متأثر از عوامل اقلیمی در شرایط مختلف جغرافیایی است. از طریق تحلیل مکانیک سیالات محاسباتی می توان ضمن بررسی نقش متغیرهای اقلیمی در آسایش حرارتی، میزان و مکان دقیق اثر هر کدام از پارامترهای اقلیمی را بر فرسایش آثار تاریخی ارزیابی نمود.

بی نوشتها

1. Moisture
2. Catalyst
3. Relative Humidity
4. Dew Point Temperature
5. Micro-Climate
6. Heat, Ventilation And Air Conditioning
7. Computational Fluid Mechanics
8. Edis

۹. تحلیل مؤلفه های اصلی (Analysis Component Principal)، تبدیلی در فضای برداری است که تحلیل مجموعه داده های بزرگ با تعداد زیادی بُعد یا ویژگی، افزایش تفسیرپذیری داده ها با حفظ حداکثر مقدار اطلاعات و تجسم داده های چندبعدي را فراهم می کند.

10. Finite Volume Method (Fvm)
11. Data Logger
12. Coupling
13. Momentum
14. Whit
15. Stefan–Boltzmann
16. Node
17. Tetrahedral

منابع

- Aflaki, A., N. Mahyuddin, Z. A.-C. Mahmoud, and M. R. Baharum. 2015. A Review on Natural Ventilation Applications through Building Façade Components and Ventilation Openings in Tropical Climates. *Energy and buildings* 101: 153-162.
- Akkurt, G., N. Aste, J. Borderon, A. Buda, M. Calzolari, D. Chung, V. Costanzo, C. Del Pero, G. Evola, and H. Huerto-Cardenas. 2020. Dynamic Thermal and Hygrometric Simulation of Historical Buildings: Critical Factors and Possible Solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 118: 109509.
- Alfano, F. R. d. A., B. I. Palella, and G. Riccio. 2023. Moisture in Historical Buildings from Causes to the Application of Specific Diagnostic Methodologies. *Journal of Cultural Heritage* 61: 150-159.
- Anderson, D., J. C. Tannehill, and R. H. Pletcher. 2016. *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. Taylor & Francis.
- Ascione, F., F. De Rossi, and G. P. Vanoli. 2011. Energy Retrofit of Historical Buildings: Theoretical and Experimental Investigations for the Modelling of Reliable Performance Scenarios. *Energy and buildings* 43(8): 1925-1936.
- Bajno, D., L. Bednarz, Z. Matkowski, and K. Raszczuk. 2020. Monitoring of Thermal and Moisture Processes in Various Types of External Historical Walls. *Materials* 13(3): 505.
- Balocco, C., and G. Grazzini. 2007. Plant Refurbishment in Historical Buildings Turned into Museum. *Energy and buildings* 39(6): 693-701.
- Bay, E., A., Martinez-Molina, and W. A. Dupont. 2022. Assessment of Natural Ventilation Strategies in Historical Buildings in a Hot and Humid Climate Using Energy and Cfd Simulations. *Journal of Building Engineering* 51: 104287.
- Bergman, T. L., A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. De Witt. 2011. *Introduction to Heat Transfer*. John Wiley & Sons.
- Bonomo, P., and P. De Berardinis. 2014. Pv Integration in Minor Historical Centers: Proposal of Guide-Criteria in Post-Earthquake Reconstruction Planning. *Energy Procedia* 48: 1549-1558.
- Bordass, W., and C. Bemrose. 1996. *Heating Your Church*. Church House Publishing.
- Calautit, J. K., A. I. Aquino, S. Shahzad, D. S. Nasir, and B. R. Hughes. 2017. Thermal Comfort and Indoor Air Quality Analysis of a Low-Energy Cooling Windcatcher. *Energy Procedia* 105: 2865-2870.
- Camuffo, D., E. Pagan, S. Rissanen, Ł. Bratasz, R. Kozłowski, M. Camuffo, and A. della Valle.

2010. An Advanced Church Heating System Favourable to Artworks: A Contribution to European Standardisation. *Journal of Cultural Heritage* 11(2): 205-219.
- Cantin, R., J. Burgholzer, G. Guarracino, B. Moujalled, S. Tamelikecht, and B. Royet. 2010. Field Assessment of Thermal Behaviour of Historical Dwellings in France. *Building and Environment* 45(2): 473-484.
- Cheung, J. O., and C.-H. Liu. 2011. Cfd Simulations of Natural Ventilation Behaviour in High-Rise Buildings in Regular and Staggered Arrangements at Various Spacings. *Energy and Buildings* 43(5), 1149-1158.
- Cho, H. M., S. Yang, S. Wi, S. J. Chang, and S. Kim. 2020. Hygrothermal and Energy Retrofit Planning of Masonry Façade Historic Building Used as Museum and Office: A Cultural Properties Case Study. *Energy* 201: 117607.
- Corgnati, S. P., and M. Perino. 2013. Cfd Application to Optimise the Ventilation Strategy of Senate Room at Palazzo Madama in Turin (Italy). *Journal of Cultural Heritage* 14(1): 62-69.
- D'Agostino, D., and P. M. Congedo. 2014. Cfd Modeling and Moisture Dynamics Implications of Ventilation Scenarios in Historical Buildings. *Building and Environment* 79: 181-193.
- D'Agostino, D., P. M. Congedo, and R. Cataldo. 2013. Ventilation Control Using Computational Fluid Dynamics (Cfd) Modelling for Cultural Buildings Conservation. *Procedia Chemistry* 8: 83-91.
- Edis, E., I. Flores-Colen, and J. de Brito. 2015. Quasi-Quantitative Infrared Thermographic Detection of Moisture Variation in Facades with Adhered Ceramic Cladding Using Principal Component Analysis. *Building and Environment* 94: 97-108.
- Fanger, P. O., A. K. Melikov, H. Hanzawa, and J. Ring. 1988. Air Turbulence and Sensation of Draught. *Energy and buildings* 12(1): 21-39.
- Fatahi, K., N. Nasrullahi, M. Ansarimanesh, J. Khodakarami, and A. Emranipour. 2021. Investigating the Role of Geometry and Type of Urban Open Space on Thermal Comfort and Environmental Quality (Case Study: Kashan Historical Part). *Motaleate Shahri* 10(39): 69-82.
- Fikry, A., and A. Elsayed. 2021. Improving the Indoor Air Quality (Iaq) in Naturally Ventilated Lecture Hall with a Single Facade by Solar Chimneys. *Journal of Engineering and Applied Science* 68(1): 1-18.
- Fox, R. W., A. T. McDonald, and J. W. Mitchell. 2020. *Fox and Mcdonald's Introduction to Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Graebel, W. 2007. *Advanced Fluid Mechanics*. Academic Press.
- Gülhan, Ö. 2019. *Natural Ventilation Design for Historic Libraries with Cfd (Computational Fluid Dynamics) Simulation* Izmir Institute of Technology].
- Hoła, A., and S. Czarnecki. 2022. Brick Wall Moisture Evaluation in Historic Buildings Using Neural Networks. *Automation in Construction* 141: 104429.
- Huerto-Cardenas, H., F. Leonforte, N. Aste, C. Del Pero, G. Evola, V. Costanzo, and E. Lucchi. 2020. Validation of Dynamic Hygrothermal Simulation Models for Historical Buildings: State of the Art, Research Challenges and Recommendations. *Building and Environment* 180: 107081.

- Kaviany, M., and A. Kanury. 2002. Principles of Heat Transfer. *Appl. Mech. Rev.* 55(5): B100-B102.
- Liu, F., X. Zhang, J. Zeng, Y. Li, and G. Wang. 2023. The Numerical Study on Indoor Heat and Moisture Transfer Characteristics of an Ancient Palace Building in Beijing. *Processes* 11(7): 1900.
- López, C. S. P., and F. Frontini. 2014. Energy Efficiency and Renewable Solar Energy Integration in Heritage Historic Buildings. *Energy Procedia* 48: 1493-1502.
- Mardani, A. 2021. The Pattern Effect of Central Courtyard Geometric on the Air Flow in Traditional Houses of Shushtar. *Iranian Islamic city studies* 43(11): 71-80. <http://rimag.ricest.ac.ir/fa/Article/16349>
- Martinez-Molina, A., P. Boarin, I. Tort-Ausina, and J.-L. Vivancos. 2018. Assessing Visitors' Thermal Comfort in Historic Museum Buildings: Results from a Post-Occupancy Evaluation on a Case Study. *Building and environment* 132: 291-302.
- Martínez-Molina, A., I. Tort-Ausina, S. Cho, and J.-L. Vivancos. 2016. Energy Efficiency and Thermal Comfort in Historic Buildings: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 61: 70-85.
- Michalski, S. 1998. Climate Control Priorities and Solutions for Collections in Historic Buildings. Forum (Historic Preservation Forum),
- Nielsen, P. V., F. Allard, H. B. Awbi, L. Davidson, and A. Schälín. 2007. Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design Rehva Guidebook No 10. In: Taylor & Francis.
- Rosina, E. 2018. When and How Reducing Moisture Content for the Conservation of Historic Building. A Problem Solving View or Monitoring Approach? *Journal of Cultural Heritage* 31: S82-S88.
- White, F. M. 1994. *Fluid Mechanics, Mcgraw-Hill*. New York.

■ Impact of Air Flow and Humidity on the Erosion of Walli Castle in Ilam: A CFD Approach

Fatemeh Barmansh

Master of Architecture, Department of Architecture, Ilam Branch, Islamic Azad University

Karen fatahi

Assistant Professor, Department of Architecture, Ilam Branch, Islamic Azad University

Mojtaba Noorollahi

Assistant Professor, Department of Architecture, Ilam Branch, Islamic Azad University

Ahmad Malekshahi

Master of Science in Mechanics Department, Ilam Branch, Islamic Azad University

The preservation of historical monuments is increasingly recognized as a critical and vital concern within global scientific communities. Therefore, analyzing the biological and functional dimensions of historical buildings, both from an architectural perspective and across other engineering disciplines, is an essential research priority. Addressing the impact of relative humidity (RH) on thermal comfort and structural integrity in historic buildings necessitates strategies such as proper ventilation, humidity control measures, and periodic maintenance during restoration or renovation projects. This study simulates and analyzes air flow and relative humidity inside a historical building (Walli Castle in Ilam) using the Computational Fluid Dynamics (CFD) approach in Fluent software. Since moisture is one of the main destructive factors for historical structures —particularly in cold winters— the study first conducted experimental measurements of air temperature, relative humidity, pressure and flow velocity during a critical low-temperature winter day using data-recording equipment. Subsequently, a 3D geometric model of the building was created in Rhino software and CFD analyses were performed in Fluent. The experimental and numerical results were compared under two distinct scenarios. Based on the comparative analysis, to mitigate the adverse effects of humidity while preserving the historical fabric, it is recommended to implement a heating system with an optimally calculated heat flux to reduce relative humidity. The results indicate that intense air flow and the high relative humidity during winter are key factors contributing to the interior erosion of the Walli Castle in Ilam, necessitating repeated restorations in recent years. The novelty of this research lies in validating the Fluent software simulation model and demonstrating its capability to predict the potential erosion of valuable historical buildings based on air flow intensity and relative humidity, achieving an average error margin of 2.9% under varying climatic conditions.

Keywords: Historical monument, computational fluid dynamics, air flow, relative humidity, Walli Castle, Ilam city.