

بررسی تغییرات کالبدی حیاط‌های مرکزی بر الگوی جریان هوای داخل آنها در خانه های دوران قاجار اصفهان با روش CFD

(مورد پژوهی: خانه لباف)

امید رهایی¹

تاریخ دریافت: 1398/07/04

تاریخ پذیرش: 1399/01/02

چکیده: حیاط مرکزی در خانه‌های سنتی شهرهای کویری ایران، نقش بسیار مهمی در تلطیف و تعدیل هوای خانه دارد و به دلایل اقلیمی و فرهنگی، ترکیبات متفاوتی یافته است. حیاط مرکزی در خانه‌های اصفهان نیز ترکیب خاصی یافته و در دوره های مختلف متحول شده است. هدف اصلی این مقاله بررسی الگوی جریان هوای داخل حیاط‌های مرکزی خانه‌های اصفهان (جامعه آماری پژوهش)، تحت تأثیر تغییرات کالبدی اواخر دوره قاجاریه در حیاط، به دلیل سبک‌های وارداتی، بوده و خانه لباف به‌عنوان یک نمونه موردی تصادفی انتخاب شده است. تحقیق حاضر، ماهیتی میان‌شته‌ای دارد و از یک روش ترکیبی جهت انجام پژوهش استفاده شده است. در مرحله اول (پس از انتخاب خانه لباف به‌عنوان نمونه موردی) با استفاده از یک راهبرد تجربی، متغیرهای مستقل تأثیرگذار، شناسایی و متغیر وابسته (سرعت و جهت جریان هوای داخل) توسط دستگاه‌های دیجیتال و انجام آزمایش دود اندازه‌گیری شد. سپس داده‌ها با استفاده از راهبرد شبیه‌سازی، تحلیل شدند. شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش با روش دینامیک سیال محاسباتی (CFD)¹ و با استفاده از نرم افزارهای Gambit و Fluent صورت گرفت. نتایج نشان داد که جریان هوای داخل حیاط مرکزی، در تراز ساکنین (زیر 2 متر)، برخلاف جهت باد خارج است و در میانه حیاط، یک جریان گردابه‌ای نامنظم پدید می‌آید (موقعیت حوض) و پخش هوا به تمام نقاط خانه، از این نقطه انجام می‌شود. ضمن اینکه نیمه شمالی حیاط جریان هوای مطلوب‌تری نسبت به نیمه جنوبی دارد. همچنین بزرگتر شدن ابعاد حیاط‌های قاجاری نسبت به صفوی، موجب افت کیفیت تهویه طبیعی آنها شده است.

واژگان کلیدی: جریان هوای داخل، تهویه طبیعی، حیاط مرکزی، روش CFD.

¹استادیار، گروه معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران،

نویسنده مسئول (o.rahaei@sru.ac.ir)

1- مقدمه

در بسیاری از خانه‌های امروزی، حتی در موارد غیر ضروری نیز از تهویه مطبوع استفاده می‌شود که عمده‌ترین دلیل آن بی‌اعتمادی به تهویه طبیعی است (Kokh, Nilson and Hagger, 2006). سیستم‌های تهویه مطبوع امروزه به عنوان انتخاب نهایی در نظر گرفته می‌شود، اما یک دیدگاه متعادل‌تری نیز وجود دارد، همان‌گونه که در گذشته بوده است (Energy Information Administration, 1995). تهویه طبیعی یک جایگزین کارآمد برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها و دستیابی به آسایش حرارتی به حساب می‌آید (Busch, J.F. 1992)، (Zhao, R., Xia, Y., Finnegan, J.J., Pickering, C.A.C., Burge, 1998) و (P.S., 1994). به گونه‌ای که هزینه انرژی یک ساختمان با تهویه طبیعی مناسب، 40 درصد کمتر از یک ساختمان با تهویه مطبوع است (Consumption Guide 19, 1993). در معماری سنتی ایران، روش‌های تهویه طبیعی هوشمندانه‌ای وجود داشته که رفع مشکلات آنها می‌تواند امروزه کاربردی باشد (Rahaei, o., 2013).

اصفهان دارای تعداد فراوانی از خانه‌های سنتی حیاط مرکزی است. ویژگی مهم این خانه‌ها، درون‌گرایی آنهاست که تحت تأثیر اقلیم بوده و با آن سازگاری یافته است. فضاهای زندگی در اطراف حیاط مرکزی شکل گرفته و حیاط به عنوان مهمترین و عمدتاً تنها فضای تأمین نور، هوا و تهویه، ارتباطات درونی و منظر مناسب برای خانه محسوب می‌شود (Soltanzade, h., 2011). جهت وزش باد خارج، شیوه گردش هوا در حیاط مرکزی و روش هوادهی مناسب به فضاهای داخلی خانه از عوامل تأثیرگذار شکل‌گیری ترکیب حیاط مرکزی در این خانه‌ها بوده است؛ هرچند در دوره‌های مختلف، تحت تأثیر معماری بیگانه و وارداتی تغییراتی ایجاد می‌شد. از آنجا که عمده خانه‌های حفظ شده در اصفهان مربوط به دوران قاجاریه است، لذا بررسی خانه‌های این دوره، مد نظر این پژوهش قرار گرفت. نکته حائز اهمیت این است که معماری قاجاریه در اصفهان، تحت تأثیر سبک‌های وارداتی بوده و همین امر تغییرات کالبدی

متعددی را در الگو شکلی خانه‌های سنتی اصفهان ایجاد نمود و در حیاط‌های مرکزی نیز اثر خود را گذاشت به گونه‌ای که خانه‌ها به سوی برون‌گرایی و نیز تجملات پیش رفتند و همچنین تناسب کالبدی آنها همان‌گونه که در متن مقاله تشریح خواهد شد، تغییر نمود. این تغییرات بر روی فرایند تهویه طبیعی این خانه‌ها نیز تأثیراتی داشت که در این مقاله به بررسی این اثرات پرداخته می‌شود. بر این اساس، تحلیل جریان هوای داخل حیاط مرکزی تحت تأثیر باد خارج و مکانیزم تلطیف هوای داخلی آن در خانه‌های دوره قاجاریه اصفهان و بررسی نقاط ضعف و قوت آن هدف اصلی این پژوهش است. لذا پرسش اصلی این پژوهش این است که الگوی گردش جریان هوای داخل حیاط‌های مرکزی خانه‌های قاجاریه اصفهان تحت تأثیر باد غالب منطقه‌ای، چگونه بوده و تغییرات کالبدی این حیاط‌ها تحت تأثیر سبک‌های وارداتی دوره قاجار، چگونه فرایند تهویه این حیاط‌ها را تحت تأثیر قرار داده است؟ نتایج این تحلیل‌ها، در دست‌یابی به راهبردهای طراحی‌های اقلیمی و نیز مرمت آثار بسیار مؤثر است.

1-1- ادبیات موضوع

مروری بر نوشته‌ها و تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که در اواخر دهه 1930 علاقه فراوانی در زمینه مهندسی تهویه پدید آمد (Burgess, 1995) و (ACGIH, 1951). آگاهی از جریانات هوای داخلی در محیط‌های بسته به سه دلیل قابل توجه است: آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی ساختمان (Amidpoor, 2009). در مناطقی که در آن انرژی محدود و یا کمیاب است، تهویه مطبوع باید توسط تهویه طبیعی برای از بین بردن بار حرارتی ساختمان برای آسایش حرارتی جایگزین شود (Hassana, M.A. et al., 2007). امروزه استفاده از روش‌های تهویه طبیعی در ساختمان توصیه می‌شود. باز شو یکی از مهم‌ترین عناصر ساختمان است که تأثیر زیادی بر الگوی جریان هوای داخل دارد (Shetabivash, H. 2015). جریان هوای داخل در زمان تهویه طبیعی، تحت تأثیر دو عامل جریان باد خارج و

لایه مرزی نمایش داده شد. این یکی از معدود آزمایش‌هایی است که بر روی یک اتاق با ابعاد و شرایط تقریباً واقعی انجام شده است. از نتایج این آزمایش برای اعتبار بخشی به مدل سازی‌های محققین بعدی در تحقیقات مشابه استفاده شده است (Amidpoor, m., 2009:91). ناگانو و تاگاوا آزمایش اولسن را با استفاده از مدل صفر معادله ای و مدل $k - \epsilon$ شبیه سازی نمودند و برای اعتبار بخشی به محاسبات از نتایج آزمایش اولسن استفاده نمودند. نتایج محاسبات در هر دو مدل، مشابه بود (Nagano, Y., and Tagawa, 1990: 33-39).

تاکنون هنکز و همکارانش (Giel, P. W., and Schmidt, 1968: 1459-64)، لنخارست (F. W., 1986: 1459-64)، چن (Chen, Q., 1996) و هانجالیک (Markatos, N.C., and Pericleous, K.A., 1984) جریان جابه‌جایی طبیعی در داخل یک محفظه حاوی هوا را به صورت عددی شبیه سازی کرده‌اند. هنکز و همکارانش از مدل $k - \epsilon$ استاندارد و چندین مدل $k - \epsilon$ با عدد رینولدز پایین برای شبیه سازی جریان هوا در یک محفظه مربعی با دیوارهای گرم و عدد رایلی 10^{14} استفاده کرده‌اند. لنخارست و همکارانش از مدل $k - \epsilon$ استاندارد به همراه توابع دیوار برای شبیه‌سازی جریان هوا در یک اتاق با یک رادیاتور استفاده کردند. چن از مدل‌های مختلف تنش رینولدزی (RSM) 2 برای محاسبه جابه‌جایی طبیعی اجباری و توأم اتاق استفاده نمود (Chen, Q., 1996).

رهایی، ا. (2013) در زمینه تأثیر عناصر بومی معماری بر روش‌های تهویه طبیعی در بازار دزفول تحقیق جامعی به عمل آورد. او از مدل $k - \epsilon$ استاندارد برای شبیه سازی جریان هوا در فضای بازار استفاده کرد. بینا، م. (2008) در خصوص تهویه طبیعی شوادان‌ها تحقیقی تجربی به عمل آورد که در آن دمای محیط مورد ارزیابی واقع شد. حیدری و همکاران (2017) در خصوص تحلیل ساختار فضایی، به بررسی مقایسه‌ای خانه‌های سنتی یزد و کاشان و اصفهان پرداختند و حیاط به‌عنوان یک عنصر فضایی با روشی مقایسه‌ای مورد تحلیل واقع شد. فنایی و همکاران (2011) تزئینات خانه‌های قاجاری

شویه گذر آن از فضای داخلی ساختمان است (Chlela, F. et al., 2009).

دو روش برای تحلیل جریان هوا در ساختمان وجود دارد: روش تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی. (Loomans & Mook, 1995). شبیه‌سازی‌های عددی در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی بسیار ارزان‌تر، دقیق‌تر و سریع‌تر هستند. با این حال در این روش نمی‌توان تمامی شرایط فیزیکی را در نظر گرفت و همواره نیاز به یک سری تقریب وجود دارد. بنابراین ضرورت دارد تا شبیه‌سازی‌های عددی توسط نتایج آزمایشگاهی اعتبار بخشی شوند (Amidpoor, m., 2009).

در سه دهه گذشته مطالعات تجربی متعددی بر جریان جابه‌جایی طبیعی انجام شده است. جریان جابه‌جایی طبیعی و آشفتنه در محفظه اولین بار توسط الدر (Elder, J.W., 1965) و پس از آن توسط اسماید و گیل (Giel, P. W., and Schmidt, F. W., 1986) بررسی شد. در این آزمایش‌ها از آب به جای هوا استفاده شد، لازم به ذکر است که مقادیر آشفتگی در این آزمایش‌ها اندازه‌گیری نشده است. چیز رایت (Cheesewright, R., 1968) سرعت میانگین، دمای هسته و نوسانات آشفتگی را در یک محفظه حاوی هوا با اختلاف دما در دیوارها بررسی کرد. عدد رایلی جریان محفظه حدود 10^{10} و نسبت ابعاد محفظه 5 به 1 بوده است. دافاآلا و بتس (Dafa Alla, A. A, and Bets, P. V., 1996) جریان جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه بلند با نسبت منظر 28 به 0.2 و عدد رایلی 8.3×10^{10} را به صورت تجربی بررسی کرده‌اند، در این آزمایش از سرعت سنجی لیزر برای اندازه‌گیری سرعت و نوسانات آن و نیز از ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما و نوسانات آن استفاده شده است.

اولسن (Olsen, D. A., Glicksman, L.R. and Ferm, H. M., 1990: 640-647) در یک اتاقک حاوی هوا و درون یک محفظه مدل کوچک، آزمایشی را بر جریان جابه‌جایی طبیعی هوا با عدد رایلی حدود 10^{10} انجام داده است. ابعاد اتاق حدوداً به نسبت 1 به 3 بود. در این آزمایش جریان و دمای اندازه‌گیری شده در هسته و

اصفهان را تحلیل نمودند و سیچانی و معماریان (2010) خانه‌های قاجاریه اصفهان را گونه‌شناسی نمودند. رهروی پوده و همکاران (2019) به بررسی ویژگی‌های شکلی خانه‌های سنتی اصفهان تحت تأثیر الگوهای چهارصفه پرداختند و برخی نیز به تحلیل تزئینات خانه‌ها اصفهان به صورت موردی پرداخته‌اند (Nazeri, Mohtasham, a. , (a. and yazdanpanah, h., 2014 Pedram, B.) (et al, 2014 (Salek, s. et al., 2012)) و (and Hariri, a., 2016 مومنی، ک. (2018) به بررسی و تطبیق اصل شفافیت در خانه‌های سنتی اصفهان پرداخت و عنصر حیاط را مورد مطالعه قرار داد. مطابق ادبیات فوق، از آنجا که موضوع تهویه طبیعی دغدغه بسیاری از پژوهش‌های معاصر بوده و استفاده از آن در معماری امروز به شیوه‌های مختلف توصیه می‌گردد، لذا موضوعی به روز بوده و با توجه به اینکه الگوی جریان هوای داخل حیاط‌های مرکزی خانه‌های اصفهان در پژوهش‌های مشابه، بررسی نشده و خصوصاً اینکه این پژوهش به صورت اختصاصی به بررسی آثار سبک‌های وارداتی دوران قاجار بر فرآیند تهویه طبیعی حیاط‌های مرکزی خانه‌های اصفهان می‌پردازد، لذا موضوعی نوینی است و نوآوری آن در بررسی الگوی جریان هوای داخل حیاط‌های مرکزی خانه‌های اصفهان به منظور دستیابی به تناسبی مناسب در ابعاد این حیاط‌ها جهت بهبود فرآیند تهویه طبیعی آن است. بر

این اساس نتایج پژوهش می‌تواند در مرمت آثار و نیز طراحی‌های معاصر بسیار کاربردی باشد. همچنین جهت انجام این پژوهش بر اساس ادبیات فوق، از روشی مشابه پژوهش‌های یاد شده در زمینه تحلیل الگوی باد استفاده شد. لذا روش دینامیک سیال محاسباتی (CFD) و نرم‌افزارهای مربوطه (gambit , fluent) مد نظر این پژوهش بود و در تحلیل‌ها از مدل $k - \epsilon$ استاندارد به همراه توابع مربوط استفاده خواهد شد.

2-1- شرایط محیطی اصفهان و الگوی شکلی خانه‌ها

اصفهان به لحاظ اقلیمی، شهری نیمه‌بیابانی در مرکز ایران است که به واسطه زاینده رود، طراوت می‌یابد. بارندگی سالانه آن، کم و اقلیم آن گرم و خشک است. ارتفاع متوسط آن از سطح دریا حدود 1600 متر بوده و در دشتی نسبتاً صاف قرار دارد. بر اساس آمار 64 ساله اداره هوا شناسی (1951-2015)، میانگین سالانه دمای آن 16.4 درجه سلسیوس است و اختلاف دمای گرم‌ترین و سردترین ماه سال 26.5 درجه است. میانگین سرعت باد غالب اصفهان حدود 2.5 متر بر ثانیه و جهت آن غرب به شرق است. بخشی از اطلاعات اقلیمی بر اساس ایستگاه اصفهان در جدول 1 ارائه گردیده است. ضمناً جدول 2 بیانگر اطلاعات مربوط به بادهای اصفهان بوده که از ایستگاه اصفهان به دست آمده است (Isfahan's weather bureau, 2015).

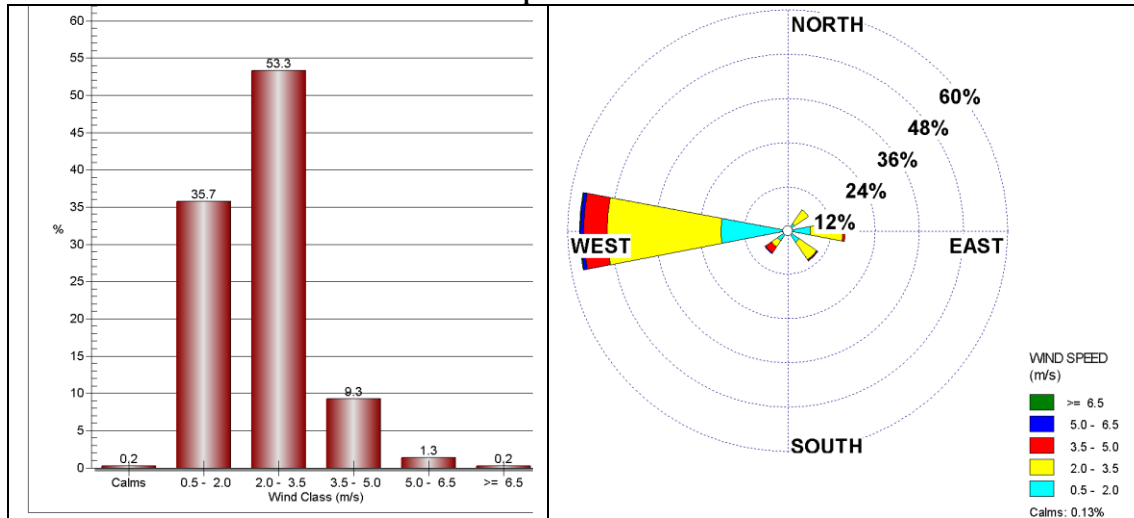
جدول 1- اطلاعات اقلیمی ایستگاه اصفهان در ماه‌های مختلف سال (1951-2015) (Isfahan's weather bureau, 2015)

Tab. 1- climatic data of Isfahan's station in all months of the year (1951-2015). (Isfahan's weather bureau, 2015)

ماه	ساعات آفتابیی	تعداد روزهای برفی	تعداد روزهای بارانی	جمع بارش ماهیانه (میلیمتر)	میانگین رطوبت نسبی (درصد)			میانگین درجه حرارت (درجه سانتی گراد)			تعداد روز یخبندان		
					حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین			
Jan	206	3	6.1	18.7	79.2	37.5	59	9.4	-2.5	3	20.8	-19.4	24.4
Feb	215	1.3	5.1	15.3	71.4	28.4	48.5	12.7	-0.1	6	23.4	-12.2	15.8
Mar	243	0.4	6.7	22.3	64.4	23.4	41.7	17.3	4.3	10.7	29	-8	4.6
Apr	249	0.1	6.7	20.3	60.2	21.6	38.3	22.8	9.4	16.1	32	-4	0.02
May	308	0	4.4	8.8	51.6	18.7	33	28.4	14	21.4	37.6	4.5	0
Jun	349	0	0.9	1.3	38.4	13.6	23.8	34.5	18.7	27.1	41	10	0
Jul	350	0	0.8	1.7	37.4	14.2	23.7	36.9	21.2	29.5	43	13	0
Aug	342.7	0	0.6	0.4	39	14.1	24.4	35.7	19.2	27.9	42	11	0
Sep	313.3	0	0.4	0.1	43	14.8	26.6	31.9	14.8	23.7	39	5	0
Oct	281.5	0	2.1	4	55.8	20.5	36.5	25.1	9.1	17.1	33.2	0	0
Nov	217.4	0.2	4.6	15	71.4	29.6	49.7	16.9	3.2	9.7	26.8	-8	6.4
Dec	199	1.5	5.7	19.3	79.4	37.5	59.4	11	-1	4.4	23.4	-13	20.5

جدول 1- اطلاعات سالانه بادهای اصفهان بر حسب متر بر ثانیه (1951-2015). چپ: گلباد سالانه باد غالب، راست: فراوانی پراکندگی باد غالب (Esfahan's weather bureau, 2015)

Tab. 1- Yearly data of Isfahan's winds (m/s) in 1951-2015. Left: wind vane of prevailing win, right: Abundance of dominant wind's dispersion. (Esfahan's weather bureau, 2015)




آماري اين پژوهش را شامل مي‌شوند. در جدول 3، مقايسه‌اي بين كليت خانه‌هاي اصفهان به عمل آمده است: خانه‌هاي دوره قاجار ساختار مشابهي دارند و نسبت به خانه‌هاي صفويه، حياط‌هاي بزرگتر با جبهه شمالي شاخص تري يافته‌اند و تا حدودي برون‌گراتر شده‌اند. همچنين در بسياري موارد جبهه غربي ضعيف‌تر شده و يا كلا حذف شده و به جاي آن ديوار پيراموني باقيمانده است. مطابق جدول 3 حياط‌هاي دوران صفويه کوچکتر و عميق‌ترند و چهارطرف آنها بنا ساخته شده است. شکل کلی آنها عمدتاً مربع شکل بوده و نسبت عرض به ارتفاع آنها حدود 2.5 تا 3 به 1 بوده است (Karapetian, k., 1974). مطابق جدول 3 حياط خانه‌ها در دوران قاجاريه مستطيلي‌تر و بزرگتر شده‌اند چنانکه نسبت عرض (اکس شرقي غربي) به ارتفاع آنها بيشتر از 3 به 1 شده و طول آنها (اکس شمالي جنوبي) متغير و بدون قاعده کم و زياد شده است. شايد اين تغييرات کالبدی، بدليل افزايش احساس امنيت ساکنين و گرايش به سمت برون‌گرايي بيشتر، تحت تأثير سبک‌هاي وارداتي در اين خانه‌ها باشد. هرچند بر اساس نتايج اين پژوهش، به لحاظ اقليمي مطلوب نبوده است.

شواهد تاريخي معماری اصفهان قبل از دوره صفويه نشان مي‌دهد الگوي رايج معماری خانه‌هاي اصفهان، درون‌گرا بوده است (Santelli, et al., 2001) در دوره قاجار، برون‌گرايي در اصفهان آغاز شد و عمدتاً به صورت نماهاي بيروني مجلل در حياط ظاهر گرديد و حياط‌ها بزرگتر شدند (Karapetian, k., 1974). لازم به ذکر است در نمونه‌هاي برون‌گرا هم با ساخت ديوارهاي پيرامون، عملا درون‌گرايي و حریم در آنها رعايت شده است. با توجه به اقليم، اصفهان بافتي متراکم و فشرده يافته است. بيشتر خانه‌هاي اصفهان به صورت حياط مرکزی و چهار فصل ساخته شده‌اند، جبهه شمالي مهمترين و شاخص‌ترين جبهه خانه به حساب مي‌آيد و بيشترين تزئينات و مهمترين فضای خانه (شاه نشين) در آن واقع شده است. در جبهه جنوبي، عمدتاً تزئينات چنداني وجود ندارد (Memarian, g.,) و (Ghasemi sichani, m., 2008) (1993).

در اواخر دوران قاجاريه خانه‌هاي مجلل‌تر ساخته شد که در آن با ارتفاع گرفتن جبهه اصلي از زمين، زیرزمین به طبقه همکف تبديل شد که اندکي نسبت به حياط فرورفته‌تر است. از جمله خانه‌هاي اين دوره مي‌توان به خانه دکتر اعلم، گلپور، لباف، امين، نيلفروشان و حبيب آبادی اشاره کرد (Jabalamei, a., 1996) که جامعه

جدول 2- معرفی نمونه‌های خانه‌های دوره قاجار و صفویه در اصفهان (Momeni, K., 2018)

Tab. 2- Introduction of some cases of Ghajar and Safavid houses in Esfahan (Momeni, K., 2018)

نام خانه	دوره	تصاویر
خانه مارتا پیترز	صفویه (شاه عباس)	
خانه داوید	صفویه (شاه عباس دوم)	
سوکایس	صفویه	
خواجه پطرس	صفویه	
خانه قدسیه	صفویه- قاجار	
خانه کریمی	صفویه- قاجار	
خانه شیخ الاسلام	اوایل قاجار	
خانه مصور الملکی	اوایل قاجار	
خانه عکافزاده و شریف	اواسط قاجار	
خانه قزوینی‌ها (غفوری)	اواسط قاجار	

	<p>اواسط قاجار</p>	<p>خانه وثیق</p>
	<p>اواسط قاجار</p>	<p>خانه اعلم</p>
	<p>اواسط قاجار</p>	<p>خانه چرمی</p>
	<p>قاجار - پهلوی</p>	<p>خانه لباف</p>

تجربی نیز جهت اعتباربخشی به شبیه‌سازی‌های عددی و نیز فراهم کردن داده‌های اولیه حائز اهمیت است. پیش‌پردازشگر Gambit به منظور مدل‌سازی‌های هندسی و ایجاد شبکه (مش‌بندی) مورد استفاده قرار گرفت و نرم‌افزار Fluent نیز به منظور تحلیل شبکه به کار گرفته شد. در این پژوهش از مدل $k - \epsilon$ استاندارد برای شبیه‌سازی جریان هوا استفاده شد (بر اساس نتایج به‌دست آمده در بخش ادبیات موضوع). مدل $k - \epsilon$ یکی از مدل‌های بسیار پرکاربرد آشفتگی و محاسبات مربوطه است که ضمن سادگی و بالا رفتن سرعت محاسبات، قابلیت تطابق بهتر با مدل‌های تجربی را دارد و همان‌گونه که در ادبیات موضوع این پژوهش مطرح شد، در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط جهت محاسبه آشفتگی جریان هوا در شبیه‌سازی‌های CFD، از این مدل استاندارد استفاده می‌شود. بدین ترتیب روش تحقیق این پژوهش، ترکیبی از راهبردهای تجربی، شبیه‌سازی و پژوهش موردی است. تدابیر مورد استفاده شامل مطالعات کتابخانه‌ای، مشاهدات و برداشت‌های میدانی، اندازه‌گیری‌های کارگاهی و شبیه‌سازی بوده است.

در این میان، خانه لباف به‌عنوان نمونه موردی خانه‌های دوره قاجار به با حیاط وسیع و بدون جبهه غربی، به‌صورت تصادفی در نظر گرفته شد.

2- روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش، با توجه به ماهیت بین‌رشته‌ای آن یک روش ترکیبی است؛ از آنجا که هدف شناسایی الگوی جریان هوای داخل حیاط مرکزی خانه‌های قاجاری اصفهان (جامعه آماری این پژوهش) است، لذا ساختار کالبدی حیاط مرکزی و عناصر آن به عنوان متغیرهای مستقل، و الگوی جریان هوای داخل حیاط به عنوان متغیر وابسته در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفتند. بر این اساس خانه لباف به‌عنوان یک نمونه موردی تصادفی سالم جهت انجام آزمون‌های پژوهش انتخاب شد. به منظور پیدا کردن جهت باد غالب، از آزمایش دود استفاده شد. م‌شاهدات تجربی نشان داد که باد غالب از غرب به شرق بوده است. در مرحله بعد به منظور تحلیل داده‌ها و نیز مداخله در معماری، از روش شبیه‌سازی استفاده شد (مطابق ادبیات موضوع). شبیه‌سازی‌ها با روش دینامیک سیال محاسباتی (CFD) انجام شدند. انجام آزمایش‌های

1-2- معرفی نمونه موردی

خانه لباف در اصفهان، در خیابان علامه مجلسی، واقع است. فضاهای خانه در سه جبهه حیاط و وسیع آن قرار گرفته‌اند که جبهه شمالی مهم‌ترین و مرتفع‌ترین آنها است. یک ایوان ستون‌دار سرا سری بین فضاهای این جبهه (به عرض 3 متر) و حیاط (به ابعاد 29 در 22 متر) واقع شده است. عرض ایوان شرقی نیز 2 متر است. جبهه جنوبی شامل فضاهای خدماتی خانه از جمله حمام، مطبخ و اصطبل است و ورود به خانه نیز از این جبهه صورت می‌گیرد. خانه دارای دو ورودی از دو معبر عمومی است که هر دو توسط یک دالان به گوشه حیاط راه می‌یابند. وجود ستون‌های متعدد در نمای جبهه شمالی و ایوان‌های جبهه شرقی، نماهای این دو ضلع حیاط را با یکدیگر پیوند داده است. حیاط خانه توسط یک حوض گرد و چهار باغچه پیرامون آن محوطه‌سازی شده است. در حال حاضر این حوض به قطر تقریبی 6.5 متر در مرکز حیاط قرار گرفته و 4 باغچه کوچک مطابق تصاویر 1 تا 4، حوض را احاطه نموده است.

2-2- آزمون‌های تجربی

در یک دوره شش ماهه، آزمایش‌های میدانی و مشاهدات تجربی در نقاط مختلف حیاط، روی بام و فضای خیابان در خارج محدوده خانه لباف به ثبت رسید. این دوره زمانی از فروردین 1397 ه.ش. شروع و تا شهریور 1397 ه.ش. (نیمه گرم سال که تهویه طبیعی بیشتر مورد استفاده ساکنین است) به طول انجامید. جهت باد غالب، سرعت آن و رفتار جریان هوا با آزمایش دود بررسی شد. این آزمون‌های دوره‌ای هر دو هفته یکبار حدود ساعات 10، 12 و 18 انجام می‌شد. به منظور اندازه‌گیری سرعت باد از دستگاه سرعت‌سنج مدل Lutron-AM4204 استفاده شد. این دستگاه با حسگر سیسم حرارتی خود، قابلیت اتصال به رایانه را داشته و نوسانات دما و سرعت باد را ثبت می‌کند. نتایج سرعت سنجی باد به صورت داده‌های میانگین در جدول 4 ثبت شده است. این داده‌ها با کانتورها و بردارهای مقاطع X در اشکال 7 تا 12 قابل مقایسه است.

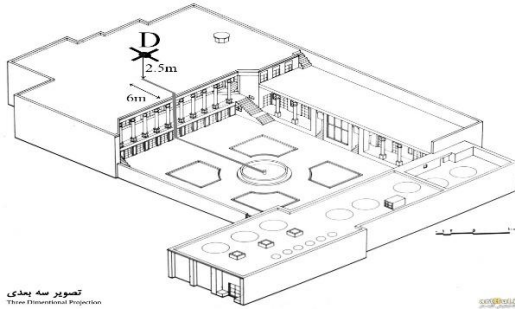
آزمون باد سنجی نشان داد که به‌طور متوسط سرعت وزش باد غالب محلی، حدود 3 متر بر ثانیه است و جهت آن عمدتاً غرب به شرق و بعضاً جنوب غرب به شمال شرق بوده است. تطابق این داده‌ها با اطلاعات هواشناسی ایستگاه اصفهان (جدول 2) نشان از اعتبار تحقیق دارد. ضمن اینکه در تراز کف حیاط سرعت باد تا نیم متر بر ثانیه افت می‌کرد و در تراز بام (در ارتفاع دومتری از سطح بام و 8 متری کف حیاط) به 4 متر بر ثانیه نیز می‌رسید. همچنین در فضای حیاط نوعی جریان معکوس شرق به غرب نیز برقرار بود. بر فراز حوض یک آشفتگی هوایی وجود داشت که رفتار آن، با آزمون‌های تجربی قابل شناسایی نبود. همچنین توربولانس هوای اطراف باغچه‌ها بدلیل درختچه‌های تنک آن باعث ایجاد آشفتگی مختصری در الگوی جریان هوای حیاط می‌شود. لذا شبیه‌سازی‌های کامپیوتری به منظور تدقیق مشاهدات، کاهش خطاها و نتیجه‌گیری ضروری بود.

2-3- معادلات حاکم

در حالت کلی معادلات حاکم بر حرکت سیال شامل معادله بقاء جرم (معادله پیوستگی) و معادلات بقاء مومنتوم (معادلات ناویر استوکس) هستند. معادله پیوستگی، اصل بقاء جرم را توصیف می‌کند. برای حجم ثابت سیال، بقاء جرم بیان می‌دارد که شار جرمی خالص کل در حجم باید با تغییرات چگالی متعادل گردد. معادله بقاء جرم (Blake G, Schlichting E, Zimmermann U., 1973) معادله (1):

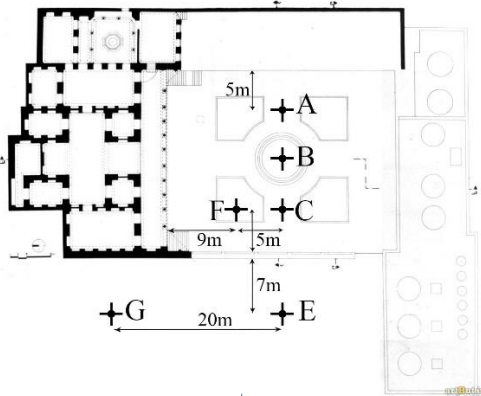
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \hat{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \hat{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \hat{w})}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق \hat{u} ، \hat{v} و \hat{w} به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در راستای x، y و z هستند. در صورتی که چگالی سیال (ρ) ثابت فرض شود معادله (1) را می‌توان به شکل تانسوری مطابق معادله (2) در نظر گرفت (Chen Q., 1995).



شکل 2- تصویر سه بعدی از خانه لباف اصفهان و موقعیت نقطه D در تراز 8.5 متری کف حیاط

Fig. 2- 3D View of Labbaf's house and position of point B in level +8.5m from yard's floor



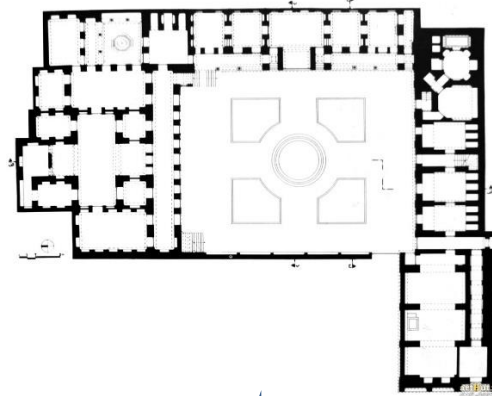
شکل 4- پلان طبقه اول خانه لباف و موقعیت نقاط آزمون در پلان

Fig. 4- First floor plan of the of Labbaf's house and the test points



شکل 1- جبهه شمالی حیاط خانه لباف اصفهان

Fig. 1- Northern façade of Labbaf's house's Yard (Esfahan)



شکل 3- پلان طبقه همکف خانه لباف

Fig. 3- Ground floor plan of the of Labbaf's house

جدول 4- میانگین داده‌های ثبت شده سرعت و جهت جریان هوا در نقاط آزمون، در دوره آزمون (حسب متر بر ثانیه، تراز کف حیاط: 0.00)

Tab. 4- average of registered data for velocity and direction of airflow in test points, during the test period (m/s, yard's floor level: 0.00)

تراز ارتفاعی	نقطه A	نقطه B	نقطه C	نقطه D	نقطه E	نقطه F	نقطه G
+0.70 (متر)	1 (شرق به غرب)	1.5 (شرق به غرب)	2 (شرق به غرب)	-	3 (غرب به شرق)	2 (شرق به غرب)	2.9 (شرق به غرب)
+1.5 (متر)	1.5 (شرق به غرب)	2 (شرق به غرب)	1.7 (شرق به غرب)	-	3.1 (غرب به شرق)	1.5 (شرق به غرب)	3 (شرق به غرب)
+8.50 (متر)	-	-	-	4.2 (غرب به شرق)	-	-	-

معادلات بقاء مومنتوم در سیستم مختصات کارتزین وقتی محورهای قائم و با جهت مثبت به سمت بالا قرار داشته باشد به شکل روابط ذیل به دست می‌آید (Versteeg H., Malalasekera W., 1995)

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial(\hat{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

در این رابطه، ν ویسکوزیته سینماتیک سیال است. فرمول 3 تا 5 را با توجه به فرمول (6) و ثابت فرض کردن چگالی سیال، می‌توان به شکل تانسوری به صورت ذیل بازنویسی کرد (Schlichting H, Truckenbrodt E.,) (1979).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\hat{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\hat{u}_i \hat{u}_j) & \quad (7) \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{P}}{\partial x_i} & \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{f_i}{\rho} & \end{aligned}$$

فرمول‌های (3 و 7) به‌عنوان معادلات بقاء مومنوم (ناویر استوکس) و معادلات بقاء جرم (پیوستگی) نامیده می‌شوند. از حل 3 معادله ذکر شده یک معادله پیوستگی، چهار مجهول سرعت و فشار در تمام نقاط به دست می‌آید. نماد (\wedge) نشان‌دهنده لحظه‌ای بودن متغیرهاست.

در اینجا جذر انرژی جنبشی به‌عنوان مقیاس سرعت در نظر گرفته شده است و معادله 8 به دست می‌آید.

$$v_t = c'_\mu \sqrt{k} \cdot L \quad (8)$$

در رابطه کلموگروف-پرانتل³ (معادله (8)) c'_μ یک ثابت تجربی است. برای محاسبه توزیع k از حل معادله انتقال این کمیت استفاده شده است (Rudy, W. 1984).

در رابطه فوق σ_k ، σ_T و C_D ضرایب تجربی هستند. β ضریب توسعه حجمی Φ^4 مقدار عددی شناوری است. با توجه به مشخص شدن مقدار k از معادله (9) هر ترکیبی به شکل $Z = k^m \cdot l^n$ انتخاب شده و برای آن یک معادله انتقال حل شده است، نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی از رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \hat{u})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \hat{u}^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \hat{v} \hat{u}) & \quad (3) \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \hat{w} \hat{u}) & \\ = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} & \\ + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} & \\ + f_x & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \hat{v})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \hat{u} \hat{v}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \hat{v}^2) & \quad (4) \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \hat{w} \hat{v}) & \\ = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} & \\ + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} & \\ + f_y & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \hat{w})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \hat{u} \hat{w}) & \quad (5) \\ + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \hat{v} \hat{w}) & \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \hat{w}^2) & \\ = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} & \\ + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} & \\ + f_z & \end{aligned}$$

در رابطه‌ی فوق، \hat{p} فشار، g شتاب ثقلی، t زمان، f_i نیروهای بدنه‌ای و τ_{ij} تنش‌های حاصل از لزجت سیال هستند که با توجه به شکل المان‌های سیال به صورت زیر بیان می‌شوند (Versteeg H, Malalasekera W.,) (1995):

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = \nu \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$



$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \quad (14) \\ & + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \left(v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_{3\epsilon} \\ & \cdot \beta \cdot g_i \cdot \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \\ & - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned}$$

در رابطه فوق $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}, \sigma_k, \sigma_\epsilon, \sigma_T$ ضرایب تجربی هستند. مقادیر ضرایب تجربی مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ در جدول 5 ارائه شده است (Rudy, w. 1984).

جدول 3- ضرایب تجربی مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$

Tab. 3- experimental coefficients of model of dual equation of k-e

C_μ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	$C_{3\epsilon}$	σ_k	σ_ϵ	σ_T
0.09	1.44	1.92	0	1	1.3	0.9

(Rudy, w. 1984)

معادله استفاده شده برای فشار نهایی:

$$p_{total} = \frac{1}{2} \rho v^2 + p_{static} \quad (15)$$

در اینجا ρ چگالی هوا در دمای 33 درجه سلسیوس، v سرعت جریان هوا و p_{static} فشار استاتیکی است.

3- نتایج و بحث

3-1- شبیه‌سازی با روش CFD

به منظور تحلیل داده‌ها و نیز مداخله در محیط، استفاده از روش شبیه‌سازی ضروری است. در این پژوهش (مطابق ادبیات موضوع) از روش CFD برای انجام محاسبات، و از نرم‌افزارهای Gambit و fluent به منظور شبیه‌سازی جریان هوای داخل حیاط استفاده شد. آزمایش‌ها تجربی که میانگین آنها در جدول 4 ثبت شد، جهت اعتباربخشی به شبیه‌سازی‌های عددی و نیز

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (9) \\ & + v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right. \\ & \left. + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta \\ & \cdot g_i \cdot \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \\ & - C_D \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \end{aligned}$$

$$\epsilon \propto \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (10)$$

بنابراین مقیاس طول آشفتگی به صورت زیر است.

$$l = C_D \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\epsilon} \quad (11)$$

C_D یک ثابت تجربی است؛ و مقدار لزجت گردابه‌ای مطابق معادله 12 است.

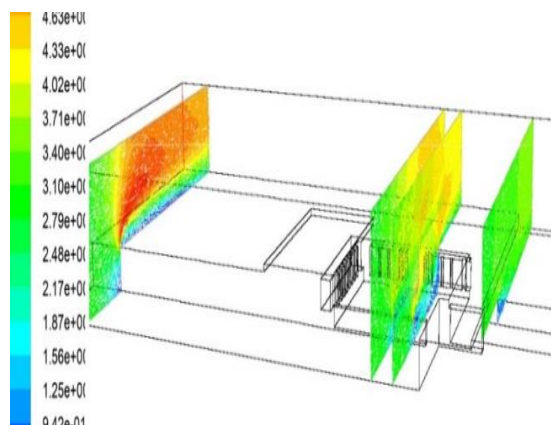
$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (12)$$

در نتیجه شکل نهایی معادلات $k-e$ به صورت زیر است (Wilcox DC. 1998).

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (13) \\ & + v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right. \\ & \left. + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta \cdot g_i \\ & \cdot \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} - \epsilon \end{aligned}$$

جدول 5 مبنای محاسبات در سلول‌های مربوطه قرار گرفت (به منظور بررسی تأثیر عناصر محیطی خصوصاً درختان در شبیه‌سازی‌ها). همچنین انتخاب معادله توربلانس (معادله 13 و 14) مشابه پژوهش‌های مربوطه و نیز به منظور تطبیق نتایج آزمون‌های تجربی با شبیه‌سازی صورت گرفت. جهت وزش باد از غرب به شرق و سرعت آن 3 متر بر ثانیه (مطابق نتایج مطالعات تجربی و جدول 4) و در امتداد عرضی حیاط در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی‌های وضع موجود با اعداد به دست آمده از آزمون‌های تجربی (جدول 4 و اشکال 8 و 10 و 11) قابل مقایسه بود و اختلاف بسیار اندکی دیده می‌شد (حدود 4 درصد). این اختلاف نیز به دلیل خطای آزمون، طبق استاندارد اشنری، قابل اغماض است.

فراهم کردن داده‌های اولیه (ورودی) مبنای محاسبات قرار گرفت. پیش پردازشگر Gambit به منظور مدل‌سازی‌های هندسی و ایجاد شبکه (مش) مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب تعداد 385923 سلول به شکل شش وجهی سه بعدی (tet-pyramid) پدید آمد. شبکه یا مش ایجاد شده در این پژوهش مطابق پژوهش‌های مشابه، با روش TET (مدل استاندارد شبکه‌های پیچیده) اجرا شد. در این شیوه هر واحد دوبعدی، دارای سه گوش بوده و کل شبکه سه بعدی فضای شبیه‌سازی شده، را به سلول‌های هرمی سه بعدی بسیار زیادی تقسیم می‌نماید و هر سلول نماینده یک بردار جریان هوایی خواهد بود. نرم‌افزار Fluent نیز به منظور تحلیل شبکه به کار گرفته شد و معادله توربلانس (ویسکوزیته $k-\epsilon$) فعال شد. گرانش زمین 9.8 متر بر مجذور ثانیه، و مقادیر تجربی

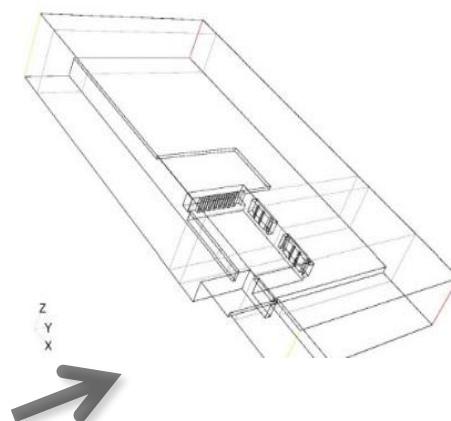


شکل 6- مقاطع شبیه سازی شده خانه لبا ف (بردارهای جریان هوای خارج). برش‌ها به ترتیب از راست به چپ عبارتند از:

x1, x2, x3, x4

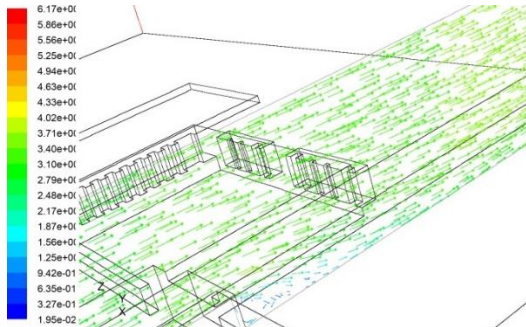
Fig. 6-Simulated sections of the Labbaf's house's, frame right to left:

x4, x3, x2, x1



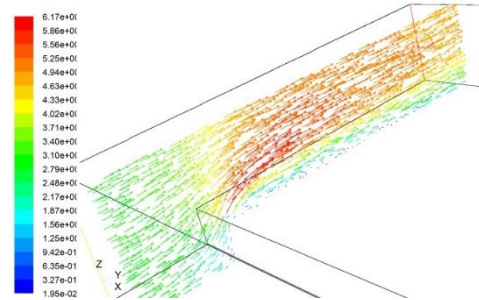
شکل 5- حجم کلی (سه بعدی). جهت فلش، مسیر باد ددغالب را نشان می

Fig. 5- Total 3d. the vector shows the direction of the dominant wind



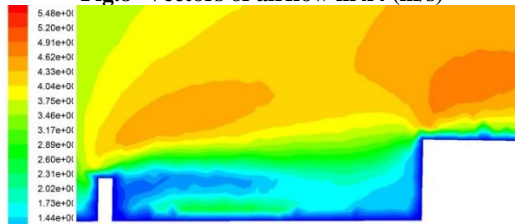
شکل 8- بردارهای جریان هوا در مقطع x4 (m/s)

Fig.8- Vectors of airflow in x4 (m/s)



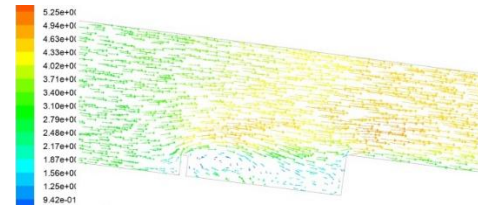
شکل 7- بردارهای جریان هوا در مقطع x1 (m/s)

Fig.7- Vectors of airflow in x1 (m/s)



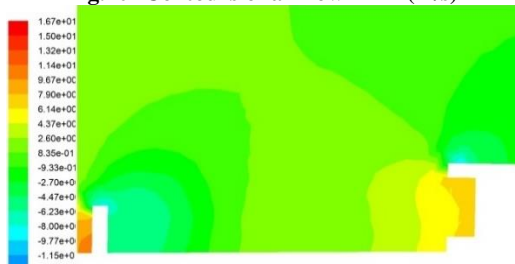
شکل 10- کانتورهای سرعت جریان هوا در مقطع x2 (m/s)

Fig.10- Contours of airflow in x2 (m/s)



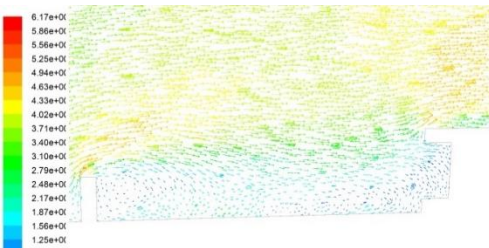
شکل 9- بردارهای جریان هوا در مقطع x2 (m/s)

Fig.9- Vectors of airflow in x2 (m/s)



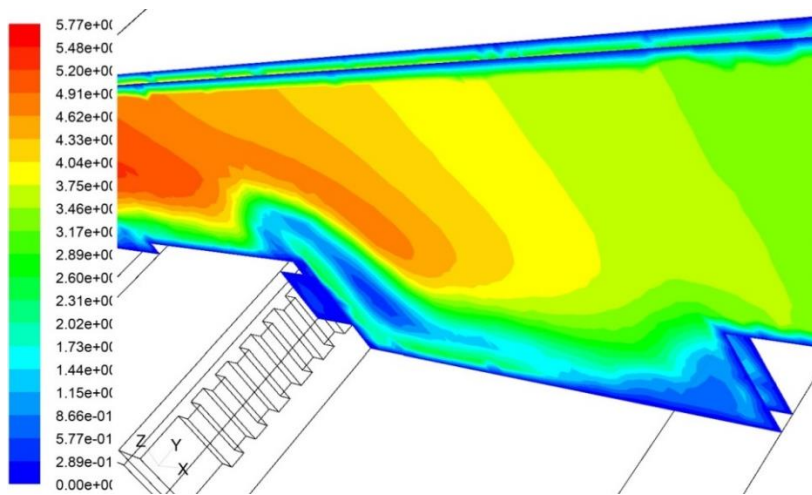
شکل 12- کانتورهای فشار هوا در مقطع x3

Fig.12- Contours of air pressure in x3 (m/s)



شکل 11- بردارهای جریان هوا در مقطع x3 (m/s)

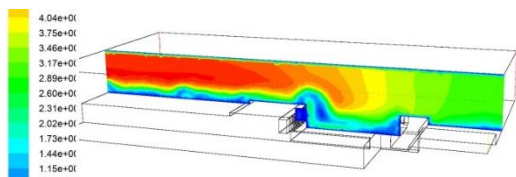
Fig.11- Vectors of airflow in x3 (m/s)



شکل 13- تصویر مقاطع شبیه سازی شده (کانتورهای سرعت باد) خانه لباف. برش ها به ترتیب از پایین به بالا عبارتند از:

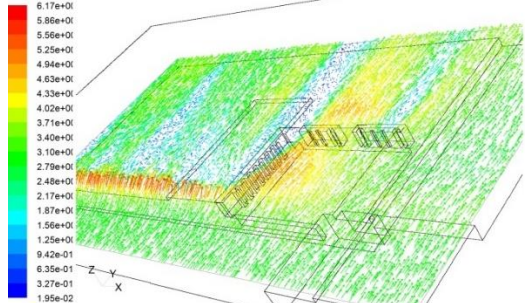
(m/s) y1, y2

Fig.13- Simulated sections (contours of velocity). Labbaf's house's



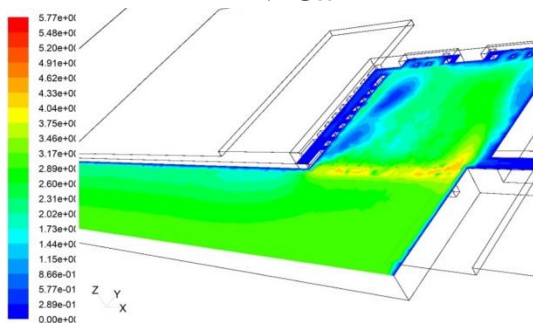
شکل 15- کانتورهای سرعت باد در مقطع y1 (m/s)

Fig. 15- Contours of air velocity in section y1 (m/s)



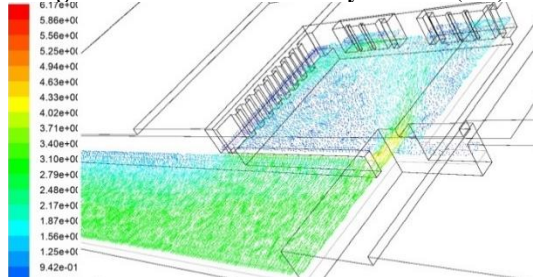
شکل 17- بردارهای جریان هوا در تراز 9 متری از سطح حیاط (روی بام) (m/s)

Fig. 17- Vectors of airflow in level +9.00m (roof-m/s)



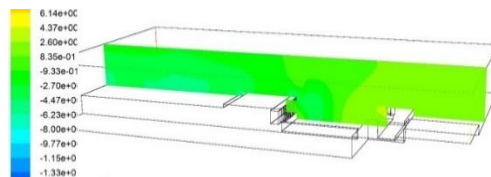
شکل 19- کانتورهای سرعت باد در تراز 5 متری از سطح حیاط (m/s)

Fig. 19- Contours of air velocity in +5.00 (m/s)



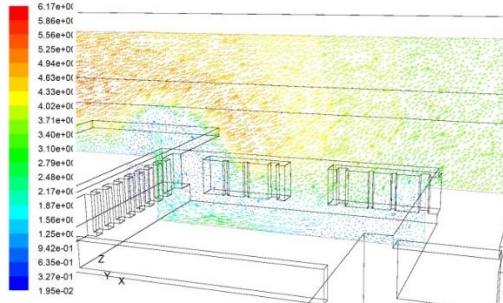
شکل 21- بردارهای جریان هوا در تراز 3 متری از سطح حیاط (m/s)

Fig. 21- Vectors of airflow in +3.00 (m/s)



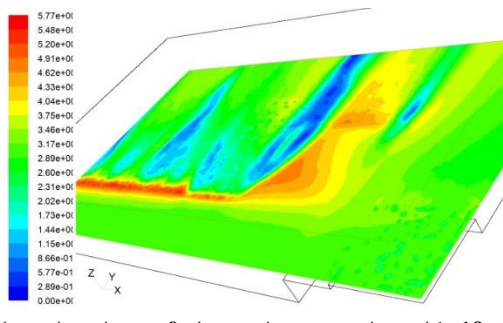
شکل 14- کانتورهای فشار هوا در مقطع y1 (پاسکال)

Fig. 14- Contours of air pressure in section y1 (pa)



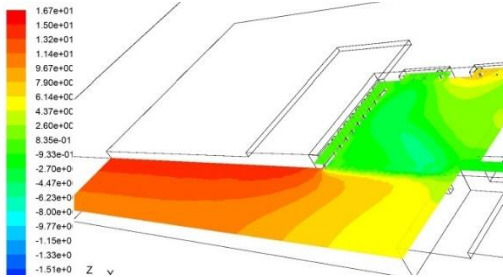
شکل 16- بردارهای جریان هوا در مقطع y2 (m/s)

Fig. 16- Vectors of airflow in section y2 (m/s)



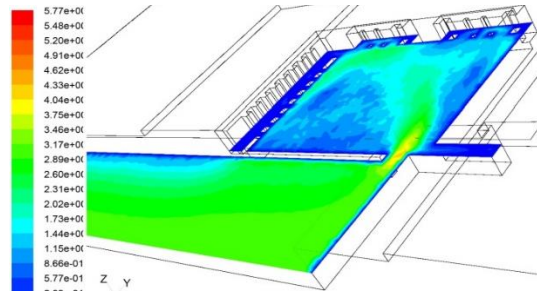
شکل 18- کانتورهای سرعت باد در تراز 9 متری از سطح حیاط (روی بام) (m/s)

Fig. 18- Contours of air velocity in +9.00 (roof- m/s)



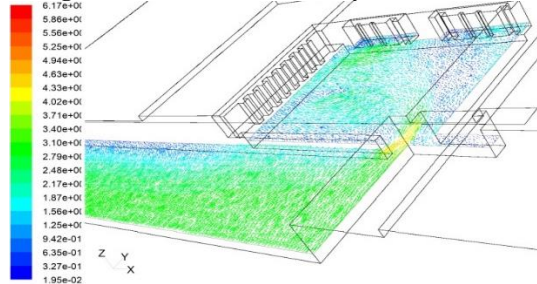
شکل 20- کانتورهای فشار هوا در تراز 5 متری از سطح حیاط (m/s)

Fig. 20- Contours of air pressure in +5.00 (pa)



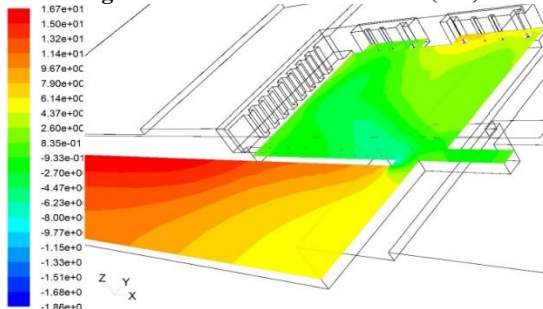
شکل 23- کانتورهای سرعت باد در تراز 3 متری از سطح حیاط (m/s)

Fig. 23- Contours of air velocity in +3.00 (m/s)



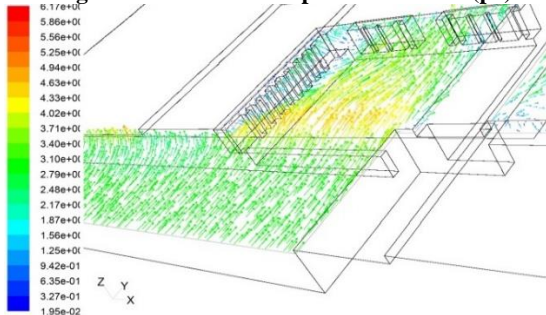
شکل 25- بردارهای جریان هوا در تراز 1.5 متری از سطح حیاط (m/s)

Fig. 25- Vectors of airflow in +1.5 (m/s)



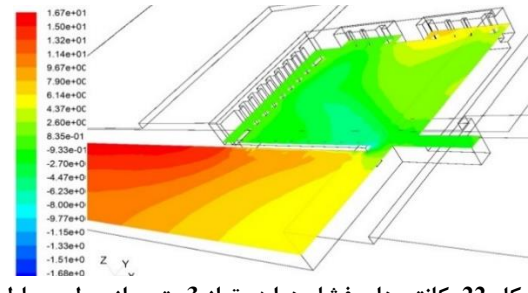
شکل 27- کانتورهای فشار هوا در تراز 1.5 متری از سطح حیاط (پاسکال)

Fig. 27- Contours of air pressure in +1.5 (pa)



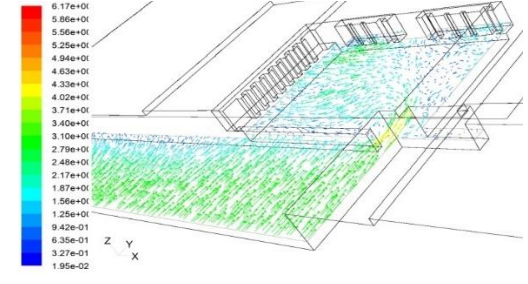
شکل 29- بردارهای جریان هوا در تراز 6 متری از سطح حیاط (m/s)

Fig. 29- Vectors of airflow in +6.00 (m/s)



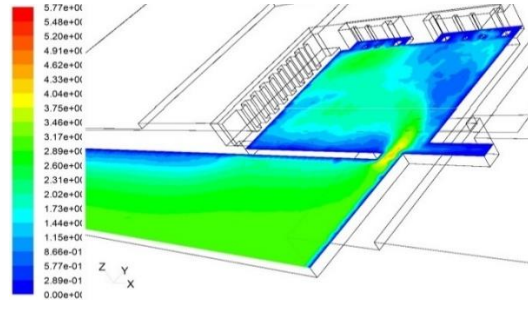
شکل 22- کانتورهای فشار هوا در تراز 3 متری از سطح حیاط (پاسکال)

Fig. 22- Contours of air pressure in +3.00 (pa)



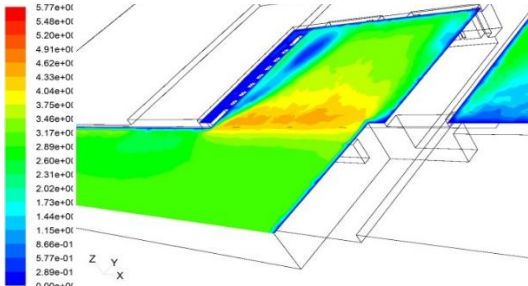
شکل 24- بردارهای جریان هوا در تراز 1.5 متری از سطح حیاط (m/s)

Fig. 24- Vectors of airflow in +1.5 (m/s)



شکل 26- کانتورهای سرعت باد در تراز 1.5 متری از سطح حیاط (m/s)

Fig. 26- Contours of air velocity in +1.5 (m/s)



شکل 28- کانتورهای سرعت باد در تراز 6 متری از سطح حیاط (m/s)

Fig. 28- Contours of air velocity in +6.00 (m/s)

3-2- یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، همان‌گونه که در اشکال 7 تا 30 مشاهده می‌شود (در تمام تصاویر، کلیه واحدهای سرعت جریان هوا بر حسب متر بر ثانیه و فشار بر حسب پاسکال است)، نشان داد که باد خارج پس از برخورد به دیوار غربی خانه، شکسته شده و به سمت بالا حرکت می‌کند. این برخورد توام با افزایش فشار هوای خارج در پشت دیوار و بالای دیوار خواهد بود. جریان هوا در بالای دیوار، سرعتی بیش از سرعت باد غالب پیدا می‌کند و تا 5 متر بر ثانیه نیز افزایش می‌یابد. بر روی بام شرقی نیز این افزایش فشار و سرعت باد محسوس است. اما اختلاف فشار یا سرعتی، تا ارتفاع 1.5 متری روی بام شرقی وجود ندارد. به عبارتی بر روی بام، شخص احساس آسایش نموده و از تراز 2 متری بام به بالا، اختلاف فشار و سرعت باد محسوس خواهد بود (این نتایج با داده‌های تجربی تطابق دارد). با بررسی اشکال 23 تا 28 مشخص می‌شود که ورودی اصلی خانه در جنوب غربی حیاط، نقش تنظیم‌کننده شدت جریان هوای داخل را دارد. باز بودن یا بسته بودن آن شدت جریان هوای داخل حیاط را تنظیم می‌نماید. بدین ترتیب که اگر سرعت باد خارج افت نماید، باز بودن درب خانه می‌توان شدت جریان هوای داخل حیاط را افزایش دهد و یا برعکس.

در محدوده حیاط حداکثر سرعت باد، 3 متر بر ثانیه است که به صورت بسیار جالبی بر فراز حوض می‌وزد. به عبارتی موقعیت حوض چنان است که در محدوده حیاط، بیشترین سرعت باد بر روی آن خواهد بود. ضمن اینکه بر اساس شبیه‌سازی‌ها در مقاطع y_1 , y_2 همان‌گونه که در اشکال 14 تا 17 دیده می‌شود بیشترین محدوده سرعت باد، در نزدیکی ایوان شمالی و از جنوب به شمال و همچنین در محدوده تراز ارتفاعی 1.5 تا 3 متری است. در این موقعیت، حوض بسیار بزرگی قرار گرفته که دارای فواره است. باد پس از برخورد به محدوده حوض، بیشترین مقدار رطوبت را در خود ذخیره کرده و دمای آن تلطیف می‌شود. بر اساس نمودارهای ارائه شده، حوض در موقعیتی قرار گرفته است که سرعت هوای باد در تراز کف حیاط به بیشترین

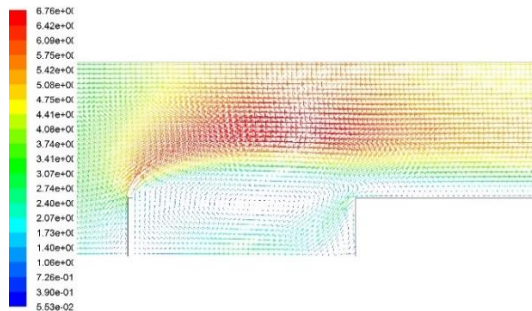
مقدار خود می‌رسد و جهت جریان هوای تراز پایین در حیاط نیز به سمت شمال تغییر می‌کند. در نیمه جنوبی حیاط جهت باد از شرق به غرب (بر خلاف جهت باد غالب) بوده و با جریاناتی که از درب حیاط وارد می‌شود، در میانه حیاط تداخل می‌نماید و جهت رو به شمال (به سمت ایوان اصلی) به خود می‌گیرد. حوض دقیقاً در محل این تداخل است و به دلیل کم فشار بودن نسبی این ناحیه، رطوبت بیشتری جذب هوای متلائم بالای حوض می‌شود و فشار هوای ناشی از این تداخل، جریان باد را به سمت شمال می‌راند. سپس با گذر از محدوده حوض، با سرعتی آرام در نیمه شمالی حیاط پخش می‌شود. جریانات برگشتی نیز پس از برخورد با ایوان شمالی، هوای مطلوب را در تمام نقاط حیاط پخش می‌کند. همان‌گونه که در مقاطع X در اشکال 8 تا 13 مشاهده می‌شود، جریان هوا در تراز ناظر در سطح حیاط، در خلاف جهت باد غالب بوده و سرعتی بسیار ملایم دارد و آرام آرام به محدوده ایوان‌های شرقی و شمالی کشیده می‌شود. بررسی مقاطع Z (اشکال 18 تا 30) نشان می‌دهد که جریان باد در ایوان‌ها بسیار مطلوب و ملایم بوده و اختلاف فشاری برقرار نیست. بررسی مقاطع شبیه‌سازی شده در تراز 1.5 متری تا 3 متری نشان می‌دهد که چگونه بر اساس موقعیت درب جنوب غربی ساختمان، جریان هوا در داخل حیاط عوض می‌شود و به بهترین نحو پس از تلطیف دمایی و رطوبتی به محدوده ایوان‌ها و سپس فضای داخلی خانه می‌رسد (اشکال 22 تا 28). این فرایند بهترین مدل تهویه در اقلیم نسبتاً خشک اصفهان در فصول گرم است.

با این حال بررسی مقاطع Y در اشکال 13 و 15 نشان از رکود نسبی جریان هوا در نزدیکی ایوان شمالی و جبهه جنوبی ساختمان دارد. برخلاف اینکه فرایند گردش جریان هوا در حیاط مرکزی تابع یک الگوی منظم برگشت هوای مطلوب، تحت تأثیر حوض میانی است، با این حال به دلیل بزرگ شدن حیاط و کاهش نسبت ارتفاع بنا به ابعاد حیاط در مقایسه با الگوهای قدیمی‌تر (جدول 3)، در مجاورت جبهه جنوبی، جریان مطلوبی برقرار نمی‌شود. ممکن است این ایراد به دلیل افت ارزش

سازی اجزای محیطی حیاط به جهت محاسبات (ادبیات پژوهش)، با ثابت در نظر گرفتن ارتفاع حیاط، عرض حیاط متغیر گشت و مقاطع عرضی شبیه سازی شده، بر مبنای تغییرات در عرض مقطع حیاط بررسی شدند. مقاطع متغیر مذکور مطابق اشکال 30 تا 33 شبیه سازی شدند. در شبیه سازی‌های مذکور طول حیاط ثابت فرض شد.

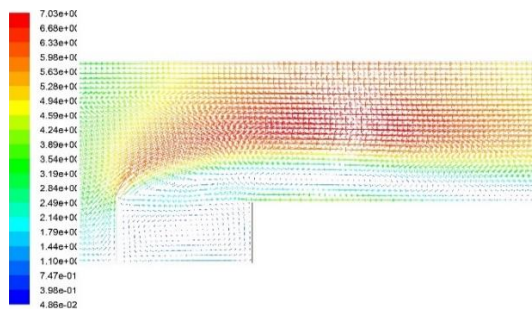
شکل 31 مقطع عرضی از وضع موجود است که جریان باد نسبتاً شدیدی را در درون حیاط نشان می‌دهد. آشفستگی جریان نسبتاً زیاد بوده و می‌تواند قابل تحمل نباشد. در شکل 30 طول مقطع، 5 متر بزرگتر شده است. طبق آن جریان برگشتی بسیار شدید و آشفستگی جریان در تراز کمتر از 3 متر، بسیار زیاد است.

فضاهای این جبهه در مقابل فضاهای اصلی‌تر موجود در جبهه شمالی باشد و یا بی‌توجهی معماران بنا به الگوی اقلیمی منطقه، تحت تأثیر سبک‌های وارداتی باشد. هرچه که باشد، بزرگ شدن ابعاد حیاط موجب شده است که الگوی جریان ایده‌آلی در درون حیاط برقرار نشود. برای بررسی این موضوع یک مقطع فرضی موردی، از وسط حیاط خانه و در امتداد شرقی غربی آن (در مسیر باد غالب) و موازی مقاطع X (مقطع X3 در شکل 6) در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که شیوه مش‌بندی و پیش فرض‌های مقطع فرضی مذکور، بر اساس روش اعتبارسنجی شده این پژوهش انجام شده است (شبکه Tet استاندارد، جدول 5 و معادلات توربولانس ذکر شده در این پژوهش). پس از ساده



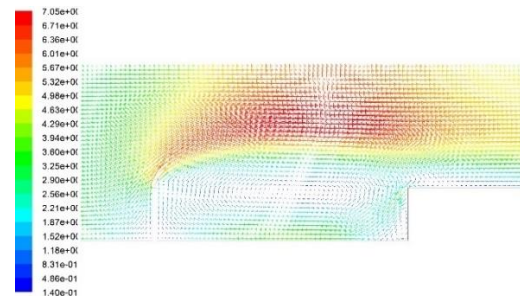
شکل 31- بردارهای سرعت باد (m/s) در مقطع واقعی شرقی غربی موردی خانه لباف

Fig. 31- Vectors of air velocity (m/s) in real random east-west section of Labbaf's house's



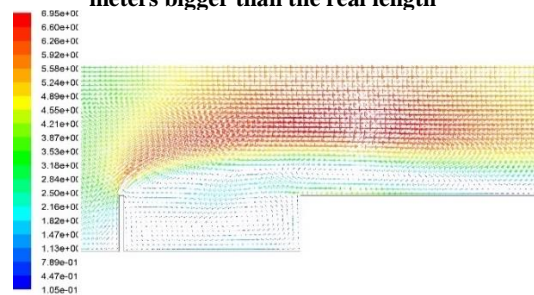
شکل 33- بردارهای سرعت باد (m/s) در مقطع شرقی غربی موردی خانه لباف که طول آن 10 متر از اندازه واقعی کوچکتر است

Fig. 33- Vectors of air velocity (m/s) in a random east-west section of Labbaf's house's: the length is 10 meters smaller than the real length



شکل 30- بردارهای سرعت باد (m/s) در مقطع شرقی غربی موردی خانه لباف که طول آن 5 متر از اندازه واقعی بزرگتر است

Fig. 30- Vectors of air velocity (m/s) in a random east-west section of Labbaf's house's: the length is 5 meters bigger than the real length



شکل 32- بردارهای سرعت باد (m/s) در مقطع شرقی غربی موردی خانه لباف که طول آن 5 متر از اندازه واقعی کوچکتر است

Fig. 32- Vectors of air velocity (m/s) in a random east-west section of Labbaf's house's: the length is 5 meters smaller than the real length

اما در اشکال 32 و 33 سرعت جریان بسیار مطلوب تر است. در شکل 32، طول مقطع 5 متر کوتاه تر شده است. در این حالت جریان آشفته بسیار کم است و در تراز انسانی، سرعت حدود 1 تا 1.5 متر بر ثانیه در تمام نقاط حیاط برقرار است و جریان مطلوب در تمام آن پخش می شود. در شکل 32 که طول مقطع، 10 متر از طول واقعی کمتر شده، با وجودی که آشفتگی چندانی در جریان هوا وجود ندارد، اما هوای داخل حیاط تقریباً راکد شده است و سرعت آن در مواردی به کمتر از 0.5 متر بر ثانیه می رسد که شرایط مطلوبی برای تهویه فضاهای دیگر نخواهد بود. بر این اساس می توان دریافت که عملاً گرایش به برون گرایی بیشتر در دوران فاجاریه، عملاً گردش هوای داخل حیاط های مرکزی را با مشکل روبرو ساخته است. هر چند در بسیاری موارد قابل تحمل است. بر اساس نتایج به دست آمده از محاسبات و شبیه سازی های فوق، نسبت مورد تأیید این پژوهش در دریافت باد مناسب در فضای حیاط، حدود 1 (ارتفاع بنا یا دیوار) به 3 (طول شرقی غربی حیاط در امتداد باد غالب) خواهد بود که عمدتاً در نمونه های قدیمی تر خانه های اصفهان (دوران صفویه) رعایت شده است.

4- نتیجه گیری

شبیه سازی ها نشان داد که جریان برقرار شده در حیاط که با رواق هایی از سه طرف محصور است، با وجود دیوار (باد شکن) غربی که ارتفاع آن 3 متر بوده و نصف ارتفاع کلی ساختمان در جبهه شمالی است، در حد قابل قبولی برقرار است. ارتفاع ایوان شرقی 1.5 برابر ارتفاع دیوار بوده و حوض در وسط حیاط مرکزی بنا شده است. ورودی خانه نیز در گوشه جنوب غربی همانند یک دریچه تنظیم هوای خارج عمل می کند که اگر چه در حالت بسته شبیه سازی شده است، بنظر می رسد در زمانی که سرعت باد خارج کاهش می یابد، می تواند در حالت باز، جریان هوای داخل را بهبود دهد که البته نیاز به پژوهش های دقیق تر آتی دارد و احتمالاً موجب تنظیم فشار هوای داخل حیاط می شود. اشکال 21 و 23 و 28 نشان می دهند که نیمه شمالی حیاط در همه ترازهای ارتفاعی، بخش کم فشارتری نسبت به نیمه

جنوبی آن است و از آنجا که جریان هوا از منطقه پر فشار به کم فشار می رود، در حیاط جریان ملایمی از سمت جنوب به شمال برقرار می شود. همین مسأله اهمیت درب گوشه جنوب غربی را نشان می دهد. پیش بینی حوض در مرکز حیاط بسیار مناسب بوده و با عبور جریان های هوایی از نیمه جنوبی حیاط به نیمه شمالی آن و عبور از روی حوض میانی و نیز برقراری جریان های گردابه ای بالای حوض (eddy currents) موجب تلطیف و رطوبت گیری مناسب هوای خشک خارج در این ناحیه شده و سپس فشار هوای ناشی از جریان های گردابه ای داخل حیاط، هوای مطلوب را به ایوان شمالی خانه می فرستد. ضمناً نیمه شمالی حیاط نسبت به نیمه جنوبی آن رطوبت نسبی بیشتری دارد. بدین ترتیب راهکاری هوشمندانه در این خانه جهت تلطیف و پالایش هوای خشک خارج و تزریق آن به فضاهای اصلی خانه با کمک نیروی باد خارج و برقراری جریان های گردابه ای داخل خود حیاط، پیاده شده است. همان گونه که در اشکال 21 و 23 و 28 مشاهده می شود، در محل ایوان شمالی، یک ناحیه کم فشار نسبی ایجاد شده که همین امر موجب مکش هوای تلطیف شده داخل حیاط به بخش داخلی ساختمان می شود. لذا هوا از طریق اختلاف فشار نسبی بوجود آمده که حاصل طراحی اقلیمی بر اساس تجارب گذشته است، به سمت فضاهای اصلی مکش شده و از طریق دریچه های سقفی و سایر پنجره های خانه از طریق بام به همراه باد، از ساختمان خارج می شود.

با این حال بر اساس تحلیل ها و شبیه سازی های صورت گرفته نکات زیر به دست می آید:

1- بزرگ شدن ابعاد حیاط مرکزی و نیز گرایش به برون گرایی بیشتر، تحت تأثیر سبک های وارداتی در خانه های این دوره، سبب شده تا فرایند گردش هوای داخل حیاط مرکزی به خوبی خانه های دوره صفویه انجام نشود؛ مطابق تحلیل ها و نیز آنچه در بخش یافته ها تشریح شد، این نتیجه به دست آمد که بزرگتر شدن ابعاد حیاط موجب شده است تا الگوی جریان ایده آلی در درون حیاط برقرار نگردد و مطابق نمودارهای تحلیلی، آشفتگی بیشتری در هوای داخل حیاط پدید

در امتداد عرضی حیاطها بوزد (طول آن اهمیت چندانی ندارد)، حدود 1 به 3 پیشنهاد می‌شود.

همان‌گونه که در بخش معرفی خانه‌های اصفهان، نشان داده شد، حیاط خانه‌های دوران صفوی چنین تناسبی دارند (2.5 تا 3 به 1). با اینحال شبیه سازی‌های موجود در اشکال 30 تا 33 نشان داد که نسبت 1 به 3 بهینه بوده است (شکل 34)، هرچند بر اساس نتایج شبیه سازی‌ها، نسبت موجود در ابعاد حیاط خانه لباف غیر قابل قبول نیست، با این حال از حالت بهینه خارج شده است.

مطالب مذکور در شکل 34 به صورت تصویری خلاصه شده است. به لحاظ ساختاری سایر خانه‌های اواخر دوره قاجاریه در اصفهان، نظیر خانه امین، نیلفروشان و ... مشابه خانه لباف ساخته شده‌اند: ساختمان اصلی در جبهه شمالی واقع شده و در جبهه غربی فضای به خصوصی پیش بینی نشده است. ورودی خانه‌ها نیز در جنوب و جنوب غرب حیاط پیش بینی شده است. لذا این نتایج قابل تعمیم به خانه‌های مشابه هم‌عصر بوده و مطالب به دست آمده هم در مرمت این خانه‌ها و هم در طراحی خانه‌های امروزی مؤثر است.

آید که در اثر آن نه تنها هوای مطلوب محبوس در حیاط مرکزی عمر چندانی ندارد، بلکه بخش‌بهای بیشتری از فضای حیاط، به نسبت حیاطهای کوچکتر و عمیق تر دوران صفویه، دارای هوای ساکن و تهویه نامطلوب تری هستند. اگرچه نمودارها نشان از وضعیت قابل قبول تهویه در حیاط‌های این دوره دارند، با اینحال به نسبت حیاط‌های دوران صفویه، تهویه ضعیف تری دارند.

2- مطابق تحلیل‌های این پژوهش، تغییرات کالبدی حیاط مرکزی خانه‌های قاجاری اصفهان تحت تأثیر سبک‌های وارداتی، موجب شده است تا جریانات آشفته و نامنظمی در فضای حیاط ایجاد شود که نه تنها هوادهی به فضاهای پیرامونی را دچار مشکل می‌نماید، بلکه به علت سرعت گرفتن جریانات داخل حیاط، میزان ذخیره هوای مطلوب در فضای داخل حیاط مرکزی کاهش یافته و به سرعت تحت تأثیر جریانات برگشتی از فضای داخل حیاط خارج می‌شود. ضمن اینکه بخش‌هایی از حیاط نیز تهویه مطلوب ندارند.

3- مطابق تحلیل‌های این پژوهش نسبت ارتفاع به عرض حیاط‌های مرکزی خانه‌های اصفهان جهت برقراری جریانات مطلوب هوایی داخلی، به شرطی که باد غالب

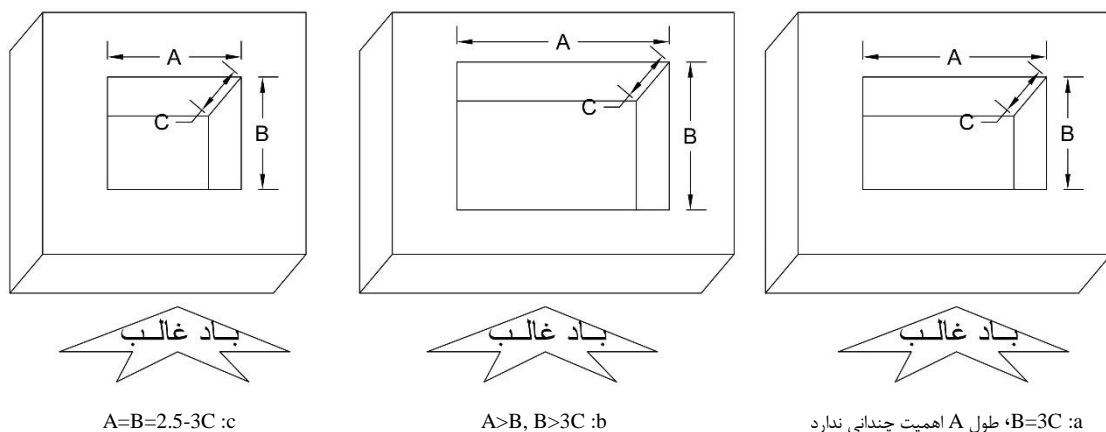


Fig. 34- a comparison between the dimensions of Esfahan's central courtyards in terms of natural ventilation desirability in total 3 forms of: Safavid era (c), Ghajar (b), and the proposed lay out of this article (a). so the b and c are better and a is the best.

شکل 34- مقایسه ابعاد حیاط‌های مرکزی در خانه‌های اصفهان از لحاظ مطلوبیت تهویه طبیعی در سه شکل کلی دوران صفویه (c)، قاجاریه (b) و وضعیت بهینه این مقاله (a). بر این اساس وضعیت الف و ج مناسب ترند و البته الف از ج بهینه تر است.

- ¹ Computational fluid dynamic
- ² Reynolds stress model
- ³ Kolmogorov-Prandtl
- ⁴ Volume Expansion Coefficient

منابع

- Dafa Alla, A.A. and Bets, P.V. (1996) "Turbulent natural convection in a tall cavity", Experimental heat transfer, No. 9: 165-194.
- Elder, J.W. (1965) Turbulence free convection in a vertical slot, J. Fluid Mech, report 23: 99-111.
- Energy Consumption Guide 19 (1993). Energy Efficiency in Offices, Energy Efficiency Office/HMSO, London.
- Energy Information Administration (1995). State Energy Data Report, 3-7 Tables.
- Esfahan's weather bureau (2015) Esfahan's climatic profile, 50 years report of Esfahan station. [in Persian]
- Fanaei, z. et al., (2011) comparative consideration and analyses of the plastering in Ghajarid houses of Esfahan, Naghsh Maye, No. 8, autumn: 43-56. [in Persian]
- Finnegan, J.J., Pickering, C.A.C., Burge, P.S. (1994). The sick building syndrome: prevalence studies, British Medical Journal 289. 1573-1575.
- Ghasemi Sichani, m. (2008) recognition of a part of Iranian architectural identity by typological analyses of Esfahan houses in Ghajar era, PhD. thesis in architecture, Islamic Azad university of science and research. [in Persian]
- Ghasemi Sichani, m. (2010), typology of Ghajarid Esfahan's houses, Hoviat Shahr, No. 7, winter: 87-94. [in Persian]
- Giel, p. w. and Schmidt, F. W. (1986) "all experiment study of high Rayleigh number natural convection". In: an enclosure proceeding of the 8th International heat transfer conference, Vol. 4:1459-1464.
- Hassana. M.A, et al., (2007). Investigation of effects of window combinations on ventilation characteristics for thermal comfort in buildings. 209: 251-260.
- ACGIH (2011) The Industrial Ventilation Manual. USA: The American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) Ltd.
- Amidpoor, m. (2009) survey of the usage of no chimney heaters on indoor air quality, a research project, Khaje Nasir university, mechanic department: Iran's consumption improvement co. [in Persian]
- Bina, m. (2008) climatic analyzes of undergrounds in Dezful's houses, Honaryhaye Ziba, no.33: 37-46 [in Persian]
- Burgess, W. A. (1995) Recognition of Health Hazards in Industry. New York: Wiley Ltd.
- Busch, J.F. (1992). A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand, Energy and Buildings 18 (3/4) 235-249.
- Chlela, F., et al. (2009). A new methodology for the design of low energy buildings, Energy Build. 41 982-990.
- Cheese wright, R. (1968) "turbulent natural convection from a vertical plane surface", journal of heat transfer, Transaction of ASME: 1-9.
- Chen Q. (1995) Comparison of different k-ε models for indoor air flow computations. Numerical Heat Transfer, Part B Fundamentals.;28: 353-369.
- Chen, Q. (1996) "Prediction of room air motion by Reynols-Stress models", Building and Environment, No. 31: 233-244.



Olsen, D. A., Glicksman, L.R., and Ferm, H. M. (1990) "Steady state natural convection in an empty and partitioned enclosure at high Rayleigh numbers", *J. Heat Transfer, Trans. ASME* 112: 640-647.

Pedram, B. and Hariri, a. (2016) historical houses with a role more than a shelter in Esfahan, *Pajooresh-haye Memari Islami*, No. 11, Summer: 92-74 [in Persian]

Rahaei, o. (2013) cultural identity and its effects on natural ventilation's method in traditional Bazaar of Dezfoul, *Bagh-e-Nazar*, 2013:39-46. [in Persian]

Rahravi poode, s. et al. (2019) analyses of morphed characteristics of Chaharsoffe houses of Esfahan, *Bagh-e-Nazar*, Spring:5-20. [in Persian]

Rudy W. (1984) *The Universities of Europe, 1100-1914: a history*: Rutherford [NJ]: Fairleigh Dickinson University Press; London; Cranbury, NJ.

Salek, s. et al., (2012) comparative studies in Esfahan's houses of Armenian and Moslem's businessmen, No. 4, Autumn: 53-68. [in Persian]

Santelli, et al., (2001), "Maisons d Ispahan", *Maisnneuve Larose*.

Schlichting H, Truckenbrodt E. (1979) *Aerodynamics of the Airplane*: McGraw-Hill Companies.

Shetabivash, H. (2015). Investigation of opening position and shape on the natural cross ventilation. *Energy and Buildings* 93. 1–15.

Soltanzade, h. (2011) the role of geography in formation of variety of traditional courtyards of Iran, *Pajooreshhaye Geography-Ensani*, No. 75. [in Persian]

Versteeg H, Malalasekera W. (1995) *An introduction to computational fluid dynamics. Finite Volume Method*, Essex, Longman Scientific & Technical.

Heydari, a. et al., (2017) analyses of structure of traditional Iranian houses, *Shahr-e-Irani Islami*, No. 21, Summer: 21-33. [in Persian]

Jabalamei, a. (1996) Esfahan's houses in contemporary era, congress of Iran's historical architecture and urbanism, Arg-e-bam, Kerman, 4th volume. Tehran: Department of cultural heritage. [in Persian]

Karapetian, K. (1974), "Isfahan 'New Julfa: The Houses of the Armenians", Roma, Ismeo.

Kokh, nilson and hagger (2006) natural ventilation. Translated by Ahmadijad, m. first publish. Esfahan: Nashr-e-Khak: 1. [in Persian]

Loomans, M. and Mook, F. van (1995) Survey on measuring indoor airflows FAGO, report 95.25.W., Eindhoven University of Technology Sweden.

Markatos, N.C. and Pericleous, K.A. (1984) "Laminar and turbulent natural convection in enclosed cavity", *Int. J. Heat mass transfer*, Vol. 27, No. 5: 755-772.

Memarian, G. (1993) getting acquaintance with Iranian domestic architecture, typology of introverted. Tehran: Science and Technology University ltd. [in Persian]

Mohtasham, a. et al (2014) technical consideration of plastering ornaments in Shahshahan house, developed technology and materials mag. No.2, summer: 37-49. [in Persian]

Momeni, K. (2018) comparative analogy of transparency in body and design of Ghajarid and Safavid houses of Esfahan, *Islamic architecture researches mag.* No. 18, spring: 23-41. [in Persian]

Nagano, Y., and Tagawa (1990) "An improved k- ϵ model for Boundary layer flows", *J. Fluid Engng Asme Trans*, 112: 33-39.

Nazeri, a. and Yazdanpanah, h. (2014) aesthetics values of ornaments of Akhavan house in Esfahan, No. 7, Summer: 53-76. [in Persian]

Zhao, R., Xia, Y. (1998). Effective non-isothermal and intermittent air movement on human thermal responses, Roomvent 2. 351–357.

Wilcox DC. (1998) Turbulence modeling for CFD: DCW industries La Canada, CA.



سال نهم شماره دوم ایسروزستان 1400

