

آسیاهای بادی سیستان، بررسی تجارب معماری پایدار دشت‌های بادخیز با تأکید بر تحلیل اجزای کالبدی آسباد شماره 2 مچی «قلعه چه رئیس»

غلامحسین غلامی^{*}، مجتبی کاویان^{**}، نیکی رضازاده^{***}

1394/06/12

تاریخ دریافت مقاله:

1394/11/17

تاریخ پذیرش مقاله:

چکیده

آسبادهای سیستان به‌عنوان قدیمی‌ترین نوع آسیای بادی در ایران و جهان شناخته می‌شود. آسبادهای سیستان پیرامون شهر زابل و در مسیر بادهای 120 روزه، بیشتر به‌صورت منفرد و گاه به‌صورت دوقلو ساخته شده است. بررسی پیشینه پژوهش در مورد آسبادها، نشان‌دهنده کمبود و نقص در مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آسبادها و مبین ضرورت انجام چنین تحقیقی است. هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر ساختار کالبدی جبهه رو به باد آسبادها، بر میزان بهره‌وری از انرژی پایدار باد است. روش تحقیق، شامل آزمایش تجربی در تونل باد و شبیه‌سازی رایانه‌ای بوده است و همچنین روش جمع‌آوری اطلاعات، مطالعه منابع کتابخانه‌ای است. بدین منظور ابتدا ماکت سالم‌ترین آسباد منطقه سیستان، یعنی آسباد شماره 2 مچی در مقیاس کوچک ساخته شد و براساس آن، چهار آزمایش در تونل باد انجام شد. در آزمایش اول و دوم، دلایل جابجایی فضای پرخانه و آسخانه آسبادهای سیستان مورد بررسی قرار گرفت و در آزمایش دوم، سوم و چهارم با تغییر در ساختار کالبدی جبهه رو به باد آسباد تعداد دور پرها در سرعت‌های مختلف باد مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه جهت تأیید نتایج آزمایشگاهی شبیه‌سازی آسباد در نرم افزار COMSOL Multiphysics انجام شد و قدرت باد مؤثر بر پرها، در مدل‌های دوم، سوم و چهارم بررسی گردید. مقایسه نتایج آزمایش اول و دوم نشان می‌دهد عامل مهم و زمینه ساز در جابجایی فضای پرخانه (محل قرارگیری پرها) و آسخانه (محل قرارگیری سنگ‌های آسیا) در آسبادهای قدیمی سیستان، بهره‌گیری بهتر از انرژی باد بوده است. مقایسه آزمایش‌های دوم و سوم موید آن است که افزودن باله‌های هدایت‌کننده باد در نمای رو به باد آسبادها، منجر به افزایش و همگرایی باد و عملکرد مطلوب آسبادهای سیستان شده است. نتایج آزمایش چهارم نشان می‌دهد کانال کوچک به گونه‌ای طراحی شده که باعث تمرکز باد و افزایش قدرت باد بر روی پرها شود و این مسئله علاوه بر امکان کنترل باد و عملکرد بهینه آسباد، منجر به افزایش هر چه بیشتر راندمان آسباد شده است.

واژگان کلیدی: تحلیل کالبدی، شبیه‌سازی، تونل باد، آسیاهای بادی، پهنه شرقی ایران.

^{*} عضو هیئت علمی دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده معماری و شهرسازی، گروه مرمت، gh.gholami@hsu.ac.ir

^{**} عضو هیئت علمی دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده معماری و شهرسازی، گروه مرمت.

^{***} عضو هیئت علمی دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده فنی مهندسی، گروه مکانیک.

مقدمه

توسعه پایدار که یکی از مهم‌ترین مباحث جوامع علمی دنیاست، اصول معماری پایدار را در حفظ انرژی، هماهنگی با اقلیم، کاهش استفاده از منابع جدید، برآوردن نیازهای ساکنین، هماهنگی با سایت و کل‌گرایی تبیین می‌کند. (زندیه، پروردی‌نژاد، 1390، 6) از طرفی با پیش‌بینی افق‌های نسبتاً کوتاه برای سوخت فسیلی (40 سال برای نفت و 65 سال برای گاز)، بشر نیاز دارد که به سرعت از سوخت فسیلی به سمت وابستگی بیشتر به انرژی تجدید شونده پاک حرکت کند. (نوروزیان‌ملکی، حسینی، رضایی، 1390، 22) بر این اساس معرفی مصادیق و تبیین تجاری از معماری ایرانی که واجد اصول معماری پایدار باشد و به نحو مناسبی از انرژی‌های پایدار طبیعت بهره‌برداری نماید از ضرورت‌های زندگی امروزی است. آسیاهای بادی را می‌توان یکی از این مصادیق معرفی کرد. انسان بیش از 3000 سال است که از انرژی باد به‌منظور تولید انرژی مکانیکی برای پمپ آب یا آسیای غلات استفاده کرده است (بمانیان، محمودی‌نژاد، 1389، 23) و اغلب محققین و مورخین در این که سیستان زادگاه آسیای بادی است متفق‌القول‌اند (مدرس رضوی، 1372، 83). ناحیه سیستان که قسمت شمالی استان سیستان و بلوچستان را در بر می‌گیرد، با 8117 کیلومتر مربع وسعت، دشتی است که در گروه اقلیمی بیابانی میانه قرار دارد. منطقه سیستان بر خلاف سایر مناطق بیابانی ایران و جهان دارای خصوصیتی منحصر بفرد با عنوان بادهای صد و بیست روزه می‌باشد (گل محمدی، 1390، 80 و 83) این بادهای فصل گرم سال وزیدن گرفته و از دو مشخصه، یکی سرعت و دیگری تداوم زیاد برخوردارند (حسین زاده، 1376، 105) و با تغییرات جوی به سرعت تغییر یافته و طوفان‌هایی با سرعت نسبتاً بالا در تمام طول سال را به دنبال دارند. (نگارش، لطیفی، 1388، 3) مجموعه این ویژگی‌های اقلیمی (خشکی و کم‌آبی، بادهای قوی و مداوم) را می‌توان دلیل

ساخت آسبادهای در منطقه سیستان دانست. با توجه به پیشینه و قدمت آسبادهای سیستان، ساخت چنین سازهای، علاوه بر انطباق با محیط زیست و برآوردن نیاز اساسی ساکنان منطقه به آرد، جهت تولید محصول استراتژیک نان، تکامل تجارب هزاران ساله معماری، توسط مردمانی است که محدودیت‌های اقلیمی را به یک فرصت استثنایی در تأمین انرژی، بدل کرده‌اند و ساختار کالبدی آسبادهای، بسان دستورالعمل‌های ارزشمند طراحی، جهت بهره‌مندی هر چه بیشتر از انرژی باد است. مقاله حاضر در پی تبیین این تجارب معماری و بررسی دلایل برخی تحولات کالبدی آسبادهاست. به‌همین دلیل در اولین گام، با ساخت ماکت از روی سالمترین آسباد منفرد در منطقه سیستان (آسباد شماره 2 مچی)، با تغییر در ساختار کالبدی جبهه رو به باد این آسباد و آزمایش‌های متعدد در تونل باد مکنده و در گام بعد، با شبیه‌سازی نرم افزاری آن، ساختار کالبدی آسبادهای سیستان، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

- سولاتی که در این پژوهش پاسخ داده خواهد شد:

1. عامل اصلی و مؤثر در بروز تحولات کالبدی و جابجایی فضای آسخانه و پرخانه در آسبادهای قدیمی سیستان چه بوده است؟
2. معماران ایرانی جهت بهره‌مندی بیشتر از انرژی باد، چه تمهیداتی را در ساختار کالبدی آسبادهای منفرد سیستان در نظر گرفته‌اند؟

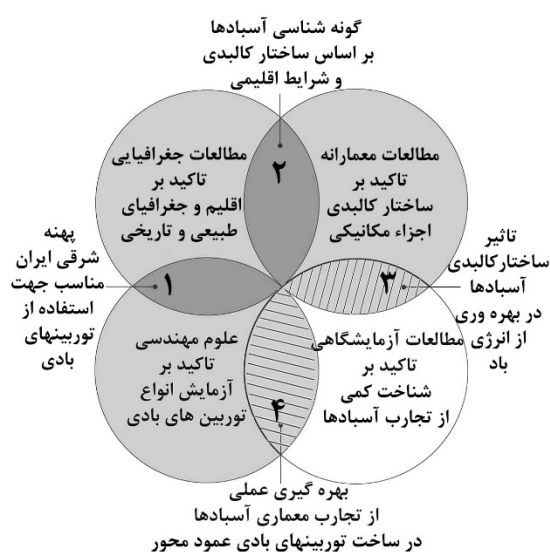
پژوهش حاضر، با هدف بررسی تأثیر ساختار کالبدی جبهه رو به باد آسبادهای بر میزان بهره‌وری از انرژی پایدار باد و تبیین تجارب معماری آسبادهای منفرد سیستان، به رشته تحریر در آمده است.

پیشینه تحقیق

بررسی پیشینه پژوهش‌های مرتبط با آسباد، بیانگر مطالعاتی است که در حوزه‌های جغرافیا، معماری و علوم مهندسی انجام شده است. یکی از قدیمی‌ترین پژوهش‌های معاصر در

ضرورت بهره‌گیری از این تجربه ارزشمند سخن به میان آورده است. خضری، ایمانی (1388، 111-123) به معرفی کالبدی و اجزای آسبادهای نشتیفان می‌پردازند. گاش² (2012، 15) در کتاب نیروگاه‌های بادی، تاریخ توسعه آسیاهای بادی را شرح داده و آسیاهای بادی ایرانی را افغانستانی نامیده و در تأیید سخن خود، همان تصویر آسباد در کتاب بزرگان سیستان را ارائه کرده است. سعیدیان، قلی و زمانی (2012، 30-19) نیز ضمن بیان استفاده‌های مختلف از باد در سیستان، با ترسیم پلان، آسبادهای سیستان (آسباد لوتک) و خراسان (نشتیفان) را معرفی می‌کنند. قهرمانی و بهادری (1392، 51-64) نیز ضمن بررسی اجزای کالبدی آسبادهای نشتیفان خواف و نحوه کارکرد آسبادهای، در جدولی کامل، تمامی قطعات مکانیکی آسبادهای نشتیفان را معرفی می‌کنند. مهدوی‌نژاد، بمانیان و مشایخی (1392، 53) ضمن گونه‌شناسی آسبادهای سیستان بزرگ، به سه دسته آسباد ساده، حلقوی و آسباد دالانی اشاره کرده و در یک تصویر شماتیک، اثرات باد را در سه مدل به تصویر کشیده‌اند. زیاتس³ (2015، 700 – 690) در بررسی سابقه آسیاهای بادی، به آسبادهای ایرانی در سیستان اشاره کرده و کاربردهای متعدد آن را ذکر می‌کند، سپس به شرح تصویر ارزشمند آسبادهای اولیه می‌پردازد که در کتاب دمشقی ارائه شده است. در حوزه علوم مهندسی، مطالعات و آزمایش‌های متعدد و بسیاری در خصوص نحوه طراحی انواع توربین‌های بادی و به‌کارگیری از نیروی باد در ایران و سایر کشورهای جهان انجام شده است که این مطالعات ارتباطی به تجارب معماری آسبادها ندارد. از آنجا که پژوهش حاضر به تبیین تجارب معماری ایران و ضرورت بهره‌گیری از این تجارب می‌پردازد لذا در این مجال، به اندک مطالعاتی پرداخته که اشاره‌ای گاه مختصر یا مفصل به آسبادها در زمینه علوم مهندسی شده است. کیهانی، گلزاریان، علیمردانی (1384، 229-237) ضمن اشاره مختصر به آسبادها و مناطق بادخیز ایران، در طراحی یک توربین کامل، عواملی چون سرعت،

خصوص آسباد، مقاله‌ای است از بقراط نادری (1356، 75-85) که به معرفی اجزای کالبدی و مکانیکی آسبادهای خواف، نحوه کارکرد آن‌ها و چگونگی تهیه سنگ آسیا می‌پردازد. این مقاله اساس بسیاری از پژوهش‌های آتی معماری در مورد آسبادهاست. افشار سیستانی در صفحات نخستین کتاب بزرگان سیستان به معرفی شرایط اقلیمی و بادهای منطقه سیستان پرداخته و ضمن اشاره به بازه زمانی وزش و سرعت بادهای 120 روزه سیستان، به کاربرد این باد در آسبادها اشاره کرده و تصویری از آسبادهای سیستان ارائه نموده است (1367، 20). شفر¹ (1990، 10-6) در کتاب سیر تحول تاریخی آسیاها، به توضیح در مورد آسیاهای بادی عمود محور و ساختار آسبادهای قدیمی سیستان براساس تصویر کتاب دمشقی پرداخته و در ادامه با ارائه تصاویر و نقشه‌هایی از آسبادهای نه‌بندان، به توصیف این آسبادها می‌پردازد. مدرس رضوی (1372، 82-115) با بررسی دقیق منابع تاریخی، بر ایرانی بودن تکنولوژی آسبادهای سیستان صحنه می‌گذارد و کاربردهای وسیعی را برای آن بر می‌شمارد، از جمله آرد کردن غلات، کشیدن آب از چاه، تهویه هوای درون خانه و جابجا نمودن شن‌های روان. در انتها با ذکر فرمولی ساده به‌صورت نظری، انرژی حاصله توسط آسبادها را که متأثر از سطح پره‌ها، سرعت باد، وزن مخصوص باد و سایر فاکتورها است، محاسبه می‌کند. احراری رود (1383، 28) در کتاب خواف در گذر تاریخ به شرح کامل نحوه کارکرد آسبادهای خواف، اجزا و ضرب المثل‌های مرتبط با آن پرداخته است. در مورد انواع آسیاهای بادی و نحوه عملکردشان، رحیمی (1386، 7-13) آسیاهای بادی را به دو دسته محور عمودی (آسبادهای ایرانی) و محور افقی (توسعه یافته در کشورهای غربی) تقسیم می‌کند و ضمن اشاره به دو مزیت آسیاهای بادی محور عمودی در مقایسه با آسیاهای بادی محور افقی که عبارتند از عدم نیاز به تنظیم مداوم برای قرار گرفتن در برابر باد و امکان قرارگیری در ارتفاع پایین‌تر و نزدیک سطح زمین، از برتری نمونه ایرانی و



ت 1. حوزه‌های مطالعاتی مرتبط با آسبادهای و نتایج آن‌ها.
بررسی و تحلیل آزمایشگاهی آسبادهای و نتایج آن، حلقه مفقوده در تحقیقات پیشین. مأخذ: نگارندگان.

روش‌شناسی تحقیق

این مقاله به بررسی منابع و اطلاعات معماری پرداخته و تأثیر اجزای کالبدی جبهه رو به باد آسبادهای منفرد سیستم را با تأکید بر ویژگی‌های کالبدی آسباد شماره 2 قلعه مچی به بحث می‌گذارد. روش بررسی عملکرد آسبادهای به صورت تجربی و شبیه‌سازی⁷ عددی (گروت، وانگ، 1394، 249 و 275) و شیوه جمع‌آوری اطلاعات، به روش مطالعه منابع کتابخانه‌ای است. در روش تجربی در سرعت‌های مختلف باد، تعداد دور پره‌های 4 مدل آسباد، که براساس آسباد شماره 2 مچی و در مقیاس 1/20 ساخته شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه مدل‌های 1 و 2 دلایل جابجایی پرخانه و آسبادهای کهن سیستم را مورد بررسی قرار می‌دهد و مقایسه مدل‌های 2 و 3 و 4، به تبیین شیوه‌های بهره‌وری از انرژی باد در معماری آسبادهای کنونی سیستم می‌پردازد. به منظور درک و شناسایی بهتر مکانیزم قدرت باد بر پره‌ها، شبیه‌سازی عددی جریان، برای مدل‌های 2 و 3 و 4 با نرم‌افزار شبیه‌ساز COMSOL Multiphysics، انجام

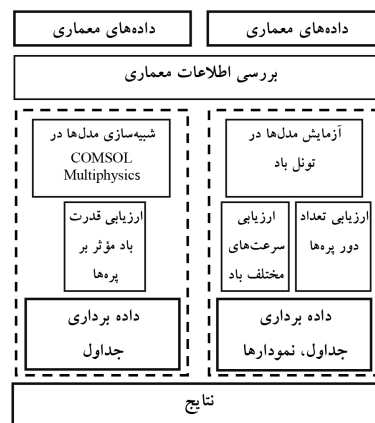
جهت، پروفیل و مدت باد را دخیل دانسته‌اند. مولر⁴، جنبش⁵، استودارت⁶ (2009، 1407-1412) ضمن اشاره به آسبادهای سیستان و خراسان به عنوان آسیای محور عمودی، محاسباتی را در خصوص انرژی حاصل از آسبادهای سیستان ارائه می‌کنند و در نهایت پیشنهاد استفاده از توربین بادی محور عمودی را در برج‌ها و ساختمان‌های بلند مرتبه ارائه می‌کنند. جمع‌بندی پیشینه مطالعات، مبین آن است که در حوزه جغرافیایی، تأکید بر جنبه‌های اقلیمی و جغرافیای طبیعی و تاریخی آسبادهای در پهنه شرقی ایران است. حوزه معماری به انطباق آسبادهای با محیط بادخیز شرق ایران، اجزا و ساختار کالبدی و مکانیکی، نحوه کارکرد و گونه‌شناسی آسبادهای اختصاص دارد. مطالعه در مورد آسبادهای در علوم مهندسی، به خصوص در مهندسی مکانیک و برق به ذکر مختصر قدمت و کاربرد آسیاهای بادی در ایران به عنوان مقدمه‌ای بر آزمایش توربین‌های بادی و یا محاسبات عددی، فارغ از بررسی جنبه‌های ارزشمند تجارب معماری، محدود شده است. نگارندگان با تأمل و بررسی مطالعات گذشته آسبادهای، بررسی‌های آزمایشگاهی و دقیق از نحوه کارکرد انواع آسباد را به عنوان حلقه‌ای گمشده در بهره‌گیری از تجارب معماری ایران، در این حوزه یافته‌اند. همان‌گونه که در تصویر شماره 1 مشاهده می‌شود، انطباق حوزه‌های مطالعاتی مرتبط با آسبادهای، نتایج ارزشمندی را به همراه خواهد داشت. بررسی آزمایشگاهی آسبادهای، علاوه بر شناسایی تأثیرات کمی و کیفی اجزای کالبدی آسباد در بهره‌وری از انرژی باد که اساس پژوهش حاضر را شکل می‌دهد زمینه کاربرد تجارب معماری آسبادهای را در ساخت توربین‌های بادی عمود محور به خصوص در مناطق شرقی کشور فراهم می‌آورد. توربین‌های بادی عمود محور دارای مزایای متعددی چون عدم وابستگی به جهت وزش باد، حساسیت کمتر نسبت به میزان آشفتگی جریان و صدای کمتر بوده و برای مناطق شهری مناسب است (اسفندیاری، بازارگان، 1393، 79).

بررسی منابع تاریخی گویای تحولات کالبدی آسبادهای پس از قرن 8 هـ.ق است. انصاری دمشقی (متوفی 727 هـ.ق) قدیمی‌ترین تصویر را از ساختار آسیاهای بادی منطقه سیستم ترسیم کرده است که با آنچه امروزه در ایران دیده می‌شود، مطابقت ندارد و در حقیقت ساختار اصلی، عکس آن چیزی است که امروزه وجود دارد. پره‌های آسیای بادی در آن زمان و احتمالاً پیش از آن در قسمت پایین و سنگ آسیا در بالا قرار داشته است (مدرس رضوی، 1372، 101). در توصیف معماری آسبادهای قدیمی سیستان، انصاری دمشقی ضمن ارائه تصویر شماره 3 می‌نویسد: این شکل یکی از آن آسیاها و دو اتاقک بالا و پایین آن است که می‌بینی. چون بنای دو اتاقک را بالا آورند، برای اتاقک پایین چهار دریچه می‌گذارند، همچون دم زگرگی که سوی گشاد آن به سوی دهان وی و سوی تنگ آن به درون کوره است، تا باد از هر سو که بوزد از میان آن‌ها با نیروی بیشتری به درون اتاقک آسیا وارد گردد و چون هوا به درون اتاقک آید به ستون یا دیرکی همانند پیکان دوک بافندگان که بر روی نخ می‌پیچند، بر می‌خورد و این دیرک دوازده تا شش پره دارد که بر روی آن پره‌ها از روپوش‌هایی از پوست دباغی نشده همچون روپوش فانوس واقع شده است که روی پره‌ها راست و مستقیم قرار گرفته و پهن شده است (همان، 102).

این توصیفات بیان‌کننده تفاوت‌های اساسی در معماری و اجزای کالبدی-مکانیکی آسبادهای قدیمی سیستان (قرن 8 هـ.ق) و آسبادهایی است که حداقل از دوره صفویه تا به امروز ساختار کنونی خود را حفظ کرده‌اند. این تفاوت‌ها عبارتند از:

1. مهم‌ترین تفاوت کالبدی، جابجایی فضای پرخانه با آسخانه است. در خصوص علت جابجایی فضای آسخانه با پرخانه، در منابع مکتوب تاریخی، دلیلی ذکر نشده است. برخی محققین گمانه‌هایی را در این باره مطرح کرده‌اند از جمله دشواری انتقال سنگ‌های وزین آسیا و وارد و خارج

گرفت. نتایج عددی با محاسبه قدرت باد بر پره‌ها، عملکرد بهبود یافته در نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد و نتایج آزمایشگاهی را تأیید می‌نماید (نمودار شماره 1).

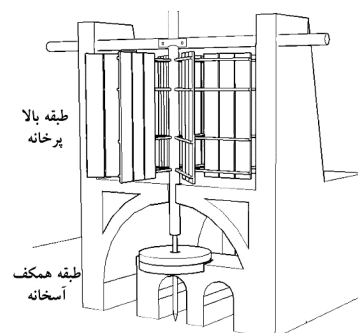


ن 1 مکانیزم نتیجه‌گیری و روش تحقیق. مأخذ: نگارندگان.

یافته‌های تحقیق

معماری و اجزاء آسبادهای منفرد سیستان

آسبادهای سیستان در محدوده شهر زابل به صورت منفرد و گاه دوتایی در دشت‌های وسیع، خارج از فضای مسکونی و پیرامون قلعه‌های تاریخی ساخته شده‌اند. ساختمان آسبادهای دارای دو طبقه است که طبقه فوقانی، پرخانه یعنی محل قرارگیری پره‌ها در قسمت بام و طبقه همکف، آسخانه یا محل قرارگیری سنگ آسیا، نام دارد (تصویر شماره 2). مصالح اصلی ساخت آسباد، خشت و گل می‌باشد.



ت 2. ساختار کنونی آسبادهای سیستان آسخانه طبقه همکف، پرخانه طبقه بالا. مأخذ: نگارندگان.

کردن گونی‌های آرد و غله به اتاقک بالایی (آسخانه) و به بیرون از آسیا را احتمالی برای این جابجایی دانسته‌اند. (مدرس رضوی، 1372، 103).

2. تفاوت در جنس پره‌ها: پره‌های قدیمی از پوست دباغی نشده بوده است، پره‌های کنونی از چوب یا نی‌های ریز.

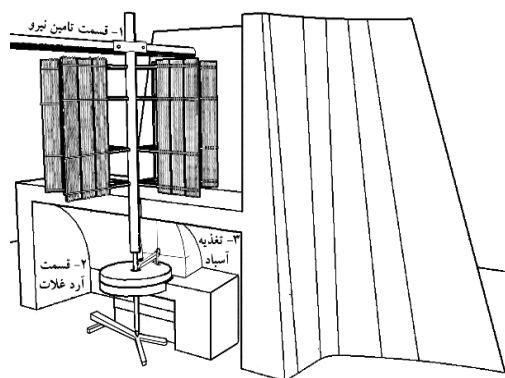
3. تفاوت در کانال‌های ورود باد: آسیادهای قدیمی 4 کانال ورود باد داشته اند، آسیادهای منفرد کنونی 2 کانال ورود باد دارند.

4. تفاوت در سنگی که می‌چرخد: به استناد انصاری دمشقی، سنگ زیرین آسیا با باد می‌چرخد در حالی‌که در آسیادهای کنونی، سنگ روین می‌چرخد.

(دیوارهای احاطه کننده پرخانه و دیوارهای رو به باد) و اجزای مکانیکی (چرخ باد) که در طبقه فوقانی (پرخانه) قرار می‌گیرد و در هنگام وزش باد، نیروی لازم جهت کار آسیاد را تأمین می‌کند.

2. قسمت آرد کردن غلات: اجزای این قسمت شامل سنگ‌های آسیا و اجزایی است که سرعت حرکت سنگ بالا را تنظیم می‌کند.

3. قسمت تغذیه آسیاد: قسمت ذخیره‌سازی و انتقال غله‌ها به داخل سنگ آسیا. کارکرد فسمت‌های مختلف آسیاد متأثر از نیروی باد است. در نمودار شماره 2 ارتباط این سه قسمت نمایش داده شده است.



ت 4. قسمت‌های اصلی آسیاد - پرخانه و آسخانه - که از نیروی باد بهره می‌گیرد. مأخذ: نگارندگان.



ت 3. ساختار آسیادهای سیستان در قرن 8 هـ.ق: 1. محفظه گندم، 2. سنگ زیرین آسیا که می‌چرخد، 3. آرد، 4. قیفی که گندم‌ها را به سنگ زیرین منتقل می‌کند، 5. دیرک اصلی، 6. پره‌ها، 7. دریچه‌های ورودی هوا. مأخذ: تصویر G. Shepherd، 1990، 7.

آسیاد شماره 2 مچی (قلعه چه رئیس) سالم‌ترین آسیاد در میان آسیادهای منفرد سیستان، در اسناد میراث فرهنگی، آسیاد شماره 2 مچی (قلعه چه رئیس) نام‌گذاری شده است. نگارندگان با توجه به جبهه رو به باد مشابه در آسیادهای منفرد و با توجه به ساختار کالبدی سالم و نقشه‌های مستندنگاری و دقیق آسیاد شماره 2 مچی، به بررسی اجزای کالبدی این آسیاد، شبیه‌سازی نرم‌افزاری و آزمایش‌های متعدد آن در تونل باد مکنده پرداخته‌اند (تصاویر شماره 5 و 6).

قسمت‌های اصلی آسیادهای کنونی سیستان که براساس عملکرد و ارتباط آن با باد در ذیل سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شود (تصویر شماره 4)، عبارتند از: 1. قسمت تأمین نیرو: مجموعه‌ای است از اجزای کالبدی

جهت‌گیری و بررسی اجزاء کالبدی جبهه رو به باد آسباد شماره 2 مچی (قلعه چه رئیس)

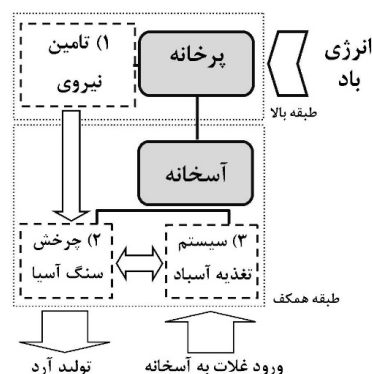
اولین نکته در طراحی این آسباد، جهت‌گیری آن به سمت شمال غرب است. از آنجا که جهت وزش بادهای سیستان در منطقه زابل (باد 120 روزه) دارای جهت شمالی متمایل به غرب است (مفیدی، حمیدیان، سلیقه، علی جانی، 1392، 88). جهت‌گیری دقیق آسباد به سمت این باد، بیانگر دقت نظر معماران آن است.

معماران ایرانی جهت بهره‌وری بیشتر از انرژی باد، تغییرات کالبدی متعددی را در ساختار آسبادهای منفرد سیستان اعمال کرده‌اند که نتیجه این تغییرات را می‌توان در آسباد شماره 2 مچی مشاهده کرد. در تصویر شماره 7، اجزای کالبدی مؤثر در تأمین نیروی این آسباد مشخص شده است. مبنای آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، بررسی تأثیر این اجزا بر عملکرد آسباد است که عبارتند از:

- قسمت 1. درباد یا کانال اصلی ورود باد به پرخانه که دهانه آن بازتر از قسمت انتهایی آن است تا بتواند سرعت برخورد باد به پره‌ها را افزایش دهد.
- قسمت 2. در طرفین آسباد دو باله به‌گونه‌ای ساخته شده است که بادهای شمال و شمال غرب را به دهانه درباد هدایت کند و موجب افزایش سرعت باد گردد.
- قسمت 3. طراحی درباد کوچک در کنار درباد اصلی، منحصر به آسبادهای منفرد سیستان بوده و به‌صورت زاویه‌دار، برای تمرکز باد روی پره‌ها ساخته شده است.

مدل‌های مورد آزمایش

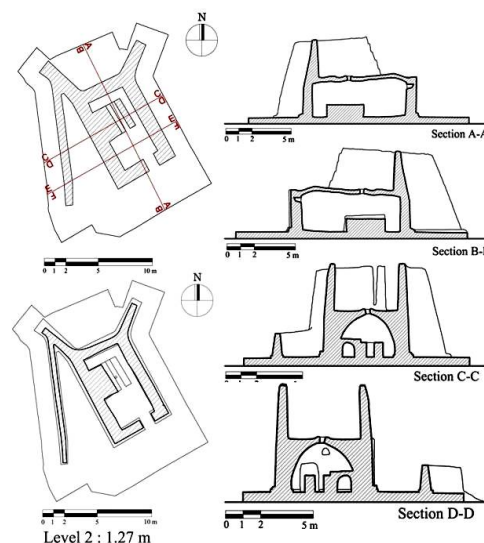
به‌منظور بررسی تأثیر اجزای کالبدی جبهه رو به باد آسباد شماره 2 مچی بر نحوه کارکرد آن، ماکت آسباد در مقیاس 1/20 و در چند مرحله، مطابق تصویر شماره 8 مورد آزمایش قرار گرفت. مراحل مختلف آزمایش در این تحقیق عبارتند از: مدل و آزمایش شماره 1: بررسی این مسئله که آیا بهره‌گیری از



ن 2. مکانیسم تأثیر و کار باد در آسباد سیستان. مأخذ: نگارندگان.

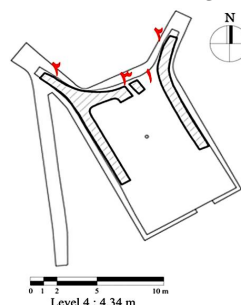


ت 5. نمای شمال غربی آسباد شماره 2 مچی. مأخذ: سازمان میراث فرهنگی استان سیستان و بلوچستان، 1389.



ت 6. نقشه‌های مستندنگاری آسباد شماره 2 مچی. مأخذ: سازمان میراث فرهنگی استان سیستان و بلوچستان، 1389.

انرژی باد در تحول ساختاری آسبادهای قدیمی سیستان در قرون میانی دوره اسلامی نقش داشته است یا خیر.



ت 7. اجزای کالبدی مؤثر در تأمین نیروی آسباد شماره 2 مچی 1. درباد اصلی، 2. باله‌های هدایت‌کننده باد، 3. درباد کوچک. مأخذ: سازمان میراث فرهنگی استان سیستان و بلوچستان، 1389.

برای آزمایش این مسئله ابتدا باید طرح آسبادهای قدیمی سیستان به دقت ترسیم و ماکت آن ساخته شود. اطلاعات ما در مورد جزییات کالبدی جبهه رو به باد آسبادهای قرن 8 هـ ق مربوط به توصیفات انصاری دمشقی و برخی جغرافی نویسان دوره اسلامی است. از آنجا که این توصیفات نمی‌تواند ابعاد و اندازه‌های دقیق پره‌ها، دریچه‌های رو به باد و موقعیت دقیق آن‌ها را مشخص کند، لذا تغییرات حاصل از جابجایی فضای پرخانه و آسخانه در آسبادهای سیستان، با جابجا کردن فضای

آسخانه و پرخانه در طرح ساده شده آسباد شماره 2 مچی، مورد بررسی قرار گرفت (تصویر شماره 8).

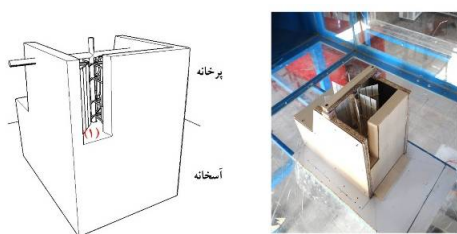
– مدل و آزمایش شماره 2: با حذف باله‌های هدایت‌کننده باد و درباد کوچک آسباد شماره 2 مچی، طرح ساده شده این آسباد مورد آزمایش قرار گرفت.

– مدل و آزمایش شماره 3: در این آزمایش با افزودن باله‌های هدایت‌کننده باد به طرح اولیه آسباد شماره 2 مچی عملکرد آن در سرعت‌های مختلف باد بررسی شده است.

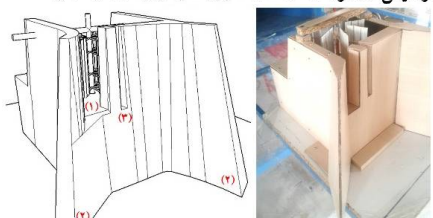
– مدل و آزمایش شماره 4: طرح کامل آسباد شماره 2 مچی (با درباد اصلی، باله‌های هدایت‌کننده و درباد کوچک) برای بررسی تأثیر اجزای مختلف این آسباد بر میزان بهره‌گیری از انرژی باد، مورد ارزیابی قرار گرفت.

آزمایش مدل‌ها در تونل باد

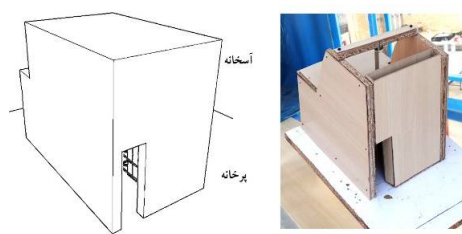
تمام آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه آیرودینامیک دانشگاه حکیم سبزواری انجام شد. تونل باد مورد استفاده در این آزمایش از نوع مدار باز و مکشی بوده است. تونل باد دارای اتاقک آزمایشی با طول 200، عرض 100 و ارتفاع 110 سانتیمتر است. سرعت تونل باد را با کنترل دور موتور تعبیه شده در آن، می‌توان از صفر تا 70 متر بر ثانیه تغییر داد (تصویر شماره 9).



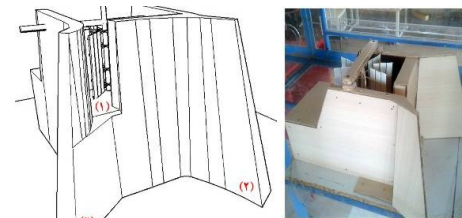
آزمایش شماره 2: آسباد شماره 2 مچی (قلعه چه رئیس) - (1) درباد اصلی



آزمایش شماره 4: آسباد شماره 2 مچی (قلعه چه رئیس)
(1) درباد اصلی، (2) باله‌های هدایت‌کننده باد، (3) درباد کوچک



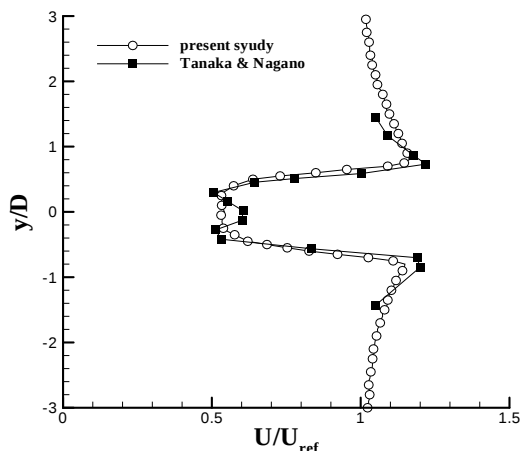
آزمایش شماره 1: جابجایی فضای پرخانه و آسخانه در طرح ساده شده آسباد شماره 2 مچی



آزمایش شماره 3: آسباد شماره 2 مچی (قلعه چه رئیس)
(1) درباد اصلی، (2) باله‌های هدایت‌کننده باد

ت 8. مراحل چهارگانه آزمایش و ساخت ماکت‌ها براساس آسباد شماره 2 مچی در تونل باد. مأخذ: نگارندگان.

سرعت میانگین کار حاضر در $x = 30 \text{ mm}$ در پشت یک سیلندر در سرعت 15 متر بر ثانیه و نتایج تحقیق تاناکا⁸ و ناگانو⁹ در شکل زیر مقایسه شده‌اند (نمودار شماره 3).



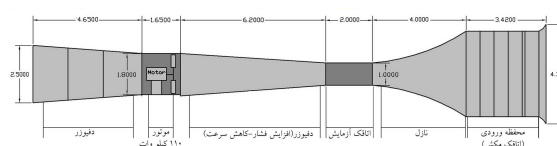
ن 3. مقایسه پروفیل بی بعد سرعت میانگین برای نتایج مطالعه حاضر و نتایج تاناکا و ناگانو. مأخذ: نگارندگان.

نتایج آزمایش مدل‌ها در تونل باد

اطلاعات ثبت شده در آزمایش مدل‌ها، شامل تعداد دور پرها (در دقیقه)، در سرعت‌های مختلف باد (بر حسب متر بر ثانیه) است که در جدول شماره 1 ارائه شده است. در نمودار شماره 4 این اطلاعات به تصویر کشیده شده که ستون عمودی گویای تعداد دور پرها در دقیقه و ستون افقی معرف سرعت‌های مختلف باد بر حسب متر بر ثانیه است.

تحلیل و ارزیابی نتایج تونل باد

نتایج آزمایش‌ها بیانگر آن است که تعداد دور پرها در تمامی نمونه‌ها با افزایش سرعت باد به صورت خطی افزایش می‌یابد. مقایسه آزمایش‌های شماره 1 و 2 می‌تواند به ابهام در خصوص چرایی جابجایی فضای آسخانه و پرخانه آسباده‌ها، بعد از قرن 8 ه.ق پاسخ گوید. با توجه به نمودار شماره 5 و مقایسه نتایج آزمایش‌های 1 و 2 به نظر می‌رسد مهم‌ترین عاملی که زمینه لازم جهت جابجایی فضای پرخانه و آسخانه را فراهم آورده است، فارغ از هر دلیلی، بهبود



ت 9. مراحل چهارگانه آزمایش و ساخت ماکت‌ها براساس آسباد شماره 2 مچی در تونل باد. مأخذ: نگارندگان.

در این تحقیق توان تولیدی برای هر کدام از آزمایش‌ها، به نحوی انتخاب شده که به توان اثرات طیف وسیعی از سرعت‌های باد را تا بیش از 60 کیلومتر بر ساعت (16.66 متر بر ثانیه)، روی تعداد دور چرخش پرها مورد ارزیابی قرار داد. برای اندازه‌گیری تعداد دور پرها از دور سنج لیزری - مکانیکی Tachometer DT2236B استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری دانسیته محیط از دستگاه Weather Station, Model: WH1081 که قابلیت اندازه‌گیری دما، رطوبت و فشار را دارد و جهت اندازه‌گیری سرعت از لوله پیتوت تیوب (Pitot Tube) و دستگاه اندازه‌گیری فشارسنج ساخت شرکت فراسنج صبا و مبدل الکترونیکی جهت تبدیل فشار به ولتاژ و در نهایت سرعت، که توسط نرم‌افزار Rake Flow کالیبره شده، استفاده شده است.

اعتبارسنجی

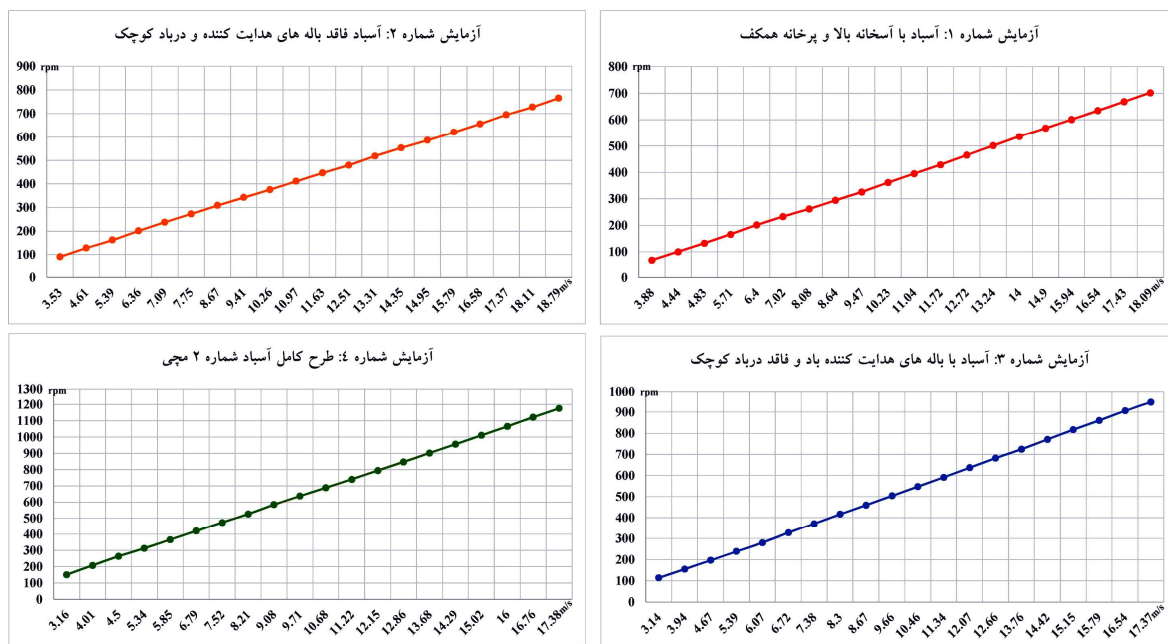
برای بررسی صحت عملکرد دستگاه تونل باد، در ابتدا لوله پیتوت تیوب و داده‌های آزمایش، پروفیل بی بعد

انرژی باد، ارتباط مستقیمی داشته است، به این معنی که هر تغییری، با هر علتی، زمانی مجال بروز یافته که یا خللی بر عملکرد و میزان استفاده از انرژی باد نگذاشته و یا در بهبود آن نقش داشته است. بنابراین سختی کار، دلیلی که برخی محققان به آن اشاره کرده‌اند، دلیل کافی برای تحول اساسی در ساختار آسبادهای نیست.

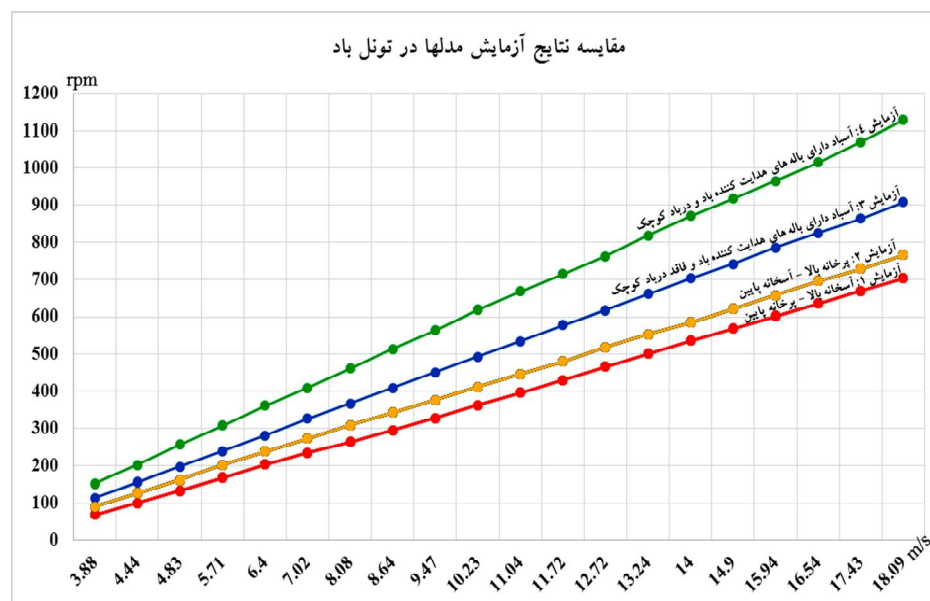
عملکرد آسباد و بهره‌برداری بیشتر از انرژی باد پس از این جابجایی است. مقایسه نتایج با توجه به نمودار شماره 5 مبین عملکرد ضعیف‌تر آسباد در آزمایش شماره 1 و بهبود نسبی آن در تغییر ساختار آسباد و انتقال پرخانه به طبقه بالا در آزمایش شماره 2 است. نگارندگان معتقدند انجام تغییرات کالبدی -ساختاری در آسبادهای، با عملکرد و میزان بهره‌وری از

آزمایش شماره 4 دارای باله‌ای هدایت کننده و دارای دریاد کوچک		آزمایش 3 دارای باله‌های هدایت کننده و فاقد دریاد کوچک		آزمایش 2 پرخانه بالا -آسخانه پایین فاقد باله‌های هدایت کننده و فاقد دریاد کوچک		آزمایش 1 آسخانه بالا -پرخانه پایین مطابق آسبادهای قدیمی سیستان (قبل از تغییرات کالبدی)	
دور پرها (در دقیقه) RPM	سرعت (متر بر ثانیه) m/s	دور پرها (در دقیقه) rpm	سرعت (متر بر ثانیه) m/s	دور پرها (در دقیقه) rpm	سرعت (متر بر ثانیه) m/s	دور پرها (در دقیقه) rpm	سرعت (متر بر ثانیه) m/s
152	3.16	115	3.14	91	3.53	69	3.88
201	4.01	156	3.94	128	4.61	101	4.44
256	4.5	197	4.67	162	5.39	133	4.83
307	5.34	239	5.39	201	6.36	167	5.71
361	5.85	281	6.07	238	7.09	202	6.4
409	6.79	326	6.72	273	7.75	234	7.02
462	7.52	367	7.38	309	8.67	263	8.08
514	8.21	409	8.3	343	9.41	295	8.64
565	9.08	451	8.67	376	10.26	327	9.47
618	9.71	493	9.66	412	10.97	362	10.23
668	10.68	536	10.46	447	11.63	396	11.04
714	11.22	579	11.34	480	12.51	430	11.72
762	12.15	617	12.07	519	13.31	466	12.72
818	12.86	660	12.66	554	14.35	502	13.24
871	13.68	702	13.76	586	14.95	537	14
918	14.29	741	14.42	621	15.79	569	14.9
965	15.02	786	15.15	657	16.58	602	15.94
1016	16	825	15.79	695	17.37	635	16.54
1071	16.76	864	16.54	728	18.11	669	17.43
1128	17.38	908	17.37	766	18.79	703	18.09

ج 3. نتایج آزمایش‌ها در تونل باد. مأخذ: نگارندگان.



ن 4. نتایج آزمایش مدلها در تونل باد بر حسب تعداد دور پره ها و سرعت باد. مأخذ: نگارندگان.



ن 5. مقایسه آزمایش های تونل باد. مأخذ: نگارندگان.

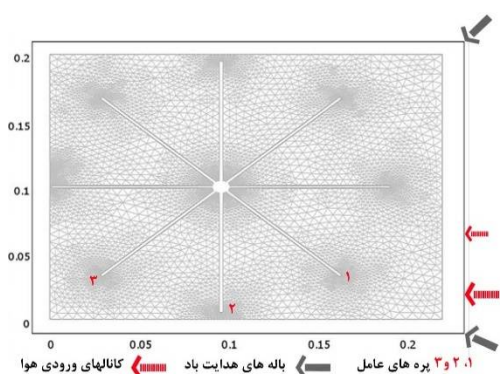
به علت اصطکاک بین باد و زمین، ناهمواری سطح زمین موجب کند شدن باد می شود. معماران ایرانی با درک این موضوع، علاوه بر استقرار آسبادها در مناطق مرتفع تر، فضای پرخانه را به طبقه بالا انتقال دادند و از این راه، ضمن بهبود راندمان آسبادهای بهره گیری بیشتر از نیروی باد به مزایای دیگری نیز دست یافته اند که عبارتند از:

1. جلوگیری از اختلال احتمالی عملکرد آسبادهای به واسطه انباشت شن، خاک و خاشاک در قسمت دریا و فضای پرخانه.
 2. کاستن از سختی کار.
 3. جلوگیری از بروز آسیب های ساختاری ناشی از لرزه های مداوم سنگ آسیا بر روی پوشش پرخانه، در زمانی که آسخانه در طبقه بالا قرار داشت.
 4. جلوگیری از اسکان حیوانات مختلف در فضای پرخانه و خرابی احتمالی پره ها. در آزمایش شماره 3 با افزودن باله های هدایت کننده باد در جبهه رو به باد آسباد، شاهد بهبود مناسب راندمان آسباد هستیم. نتایج آزمایش سوم شیب بیشتری را در مقایسه با دو آزمایش قبلی دارد. بدین معنی که تفاوت عملکرد نمونه سوم با دو نمونه قبلی در سرعت پایین باد، کم بوده و هر چه سرعت باد بیشتر می شود، این تفاوت به نحو بارزتری بیشتر می شود. این نتیجه با توجه به کارکرد مناسب دیوارهای هدایت کننده باد، در همگرایی باد و ایجاد فشار بیشتر به پره ها، حاصل شده است (مقایسه آزمایش 2 و 3 در نمودار شماره 5).
- در آزمایش چهارم با افزودن دریا کوچک در کنار دریا اصلی، شاهد ارتقای چشمگیر عملکرد آسباد هستیم. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش 4 و مقایسه آن با نتایج سایر آزمایش ها در نمودار شماره 5، می توان چنین نتیجه گرفت که طراحی و ساخت دریا کوچک در بدنه عریض آسباد، از دستاوردهای معماری آسبادهای منفرد سیستان است چرا که تأثیر آن بر بهره وری از انرژی باد بسیار قابل توجه است. به نظر می رسد معماران ایرانی دریا کوچک را به دو منظور در

کنار دریا اصلی طراحی و اجرا کرده اند: 1. تمرکز باد بر روی پره ها و بهره گیری بیشتر از نیروی باد 2. کنترل کارکرد بهینه آسباد در سرعت های کم و زیاد باد.

شبیه سازی نرم افزاری مدل ها

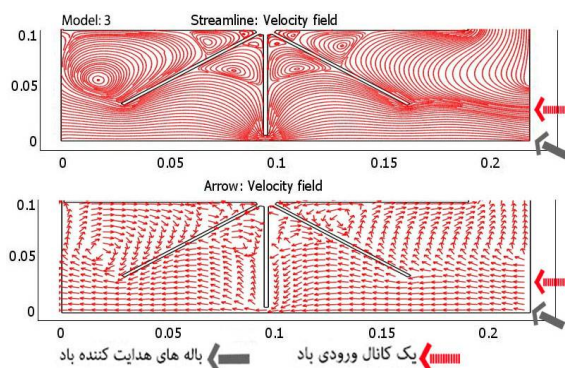
برای درک بهتر رفتار باد در مدل های مورد آزمایش و تأثیر ساختار کالبدی بر راندمان آسباد، شبیه سازی جریان باد برای مدل های 2 و 3 و 4 در نرم افزار COMSOL Multiphysics انجام شد. به منظور تحلیل سیستم پره ها از آنجا که نیروی باد با تأثیر بر سه پره از هشت پره آسباد، موجب حرکت پره ها می شود؛ لذا خطوط جریان باد و بردارهای سرعت حول پره های عامل 1، 2 و 3 مورد بررسی قرار گرفته است و از بیان نتایج در بخشهای مختلف سازه مانند باله های جانبی و دیواره خروجی صرف نظر شده است (تصویر شماره 10).



ت 10. تصویر شبکه بندی و شبیه سازی آسباد و موقعیت پره های عامل در محیط نرم افزاری. مأخذ: نگارندگان.

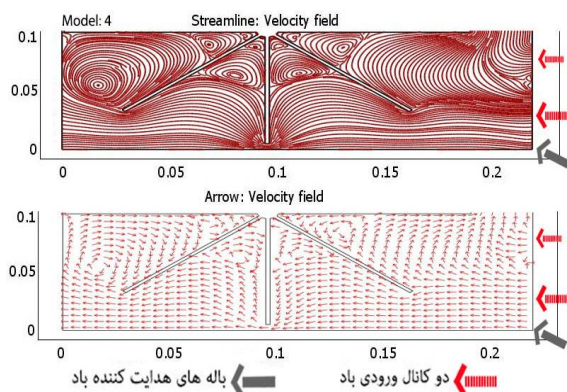
اعتبارسنجی روش عددی

برای ارزیابی تحلیل عددی، مدل پایه مانع استوانه ای در معرض جریان، برای جریان آرام سرعت پایین، ارزیابی شد و با نتایج تحقیق باچ ل¹⁰ در شکل زیر مقایسه شده اند (نمودار شماره 6).



ت 12. شبیه‌سازی خطوط جریان و بردارهای سرعت باد در مدل شماره 3. مأخذ: نگارندگان.

در مدل شماره 4 با ایجاد دو ورودی جریان، در مقایسه با مدل شماره 3، الگوی جریان تغییر یافته است و خطوط جریان و بردارهای سرعت باد، نشان دهنده افزایش فشار مثبت روی پرها است (تصویر شماره 13).

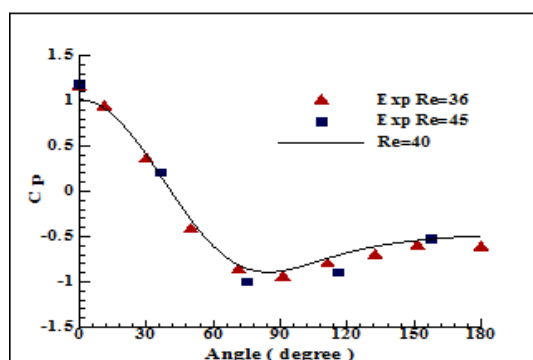


ت 13. شبیه‌سازی خطوط جریان و بردارهای سرعت باد در مدل شماره 4. مأخذ: نگارندگان.

بررسی قدرت باد روی پرهای عامل

در مدل‌های شبیه‌سازی شده، قدرت‌های عامل بر پرها به ترتیب پرهای (1) و (2) و (3) محاسبه شده‌اند. صفحه برخورد باد به پر را با صفحه اصلی مشخص کرده و اثر قدرت باد بر پر را با متغیر E به صورت زیر محاسبه و بیان شده است.

$$E = \int P ds$$



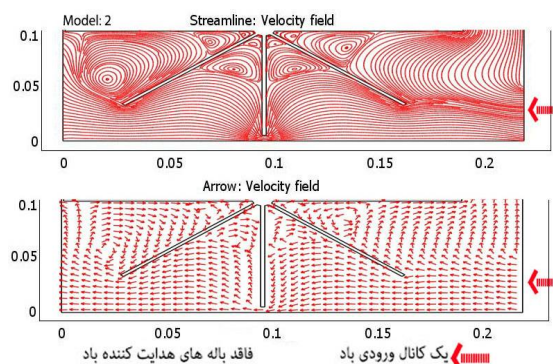
ن 6. مقایسه ضریب فشار آیرودینامیکی عددی روی سطح مانع استوانه‌ای پایه با نتایج تجربی. مأخذ: نگارندگان براساس Batchelor, 2002.

تشابه نتایج عددی و نتایج تجربی در محدوده رژیم جریان مشابه، دقت و اعتبارسنجی پژوهش حاضر را تأیید می‌کند.

نتایج شبیه‌سازی مدل‌ها

اولین شبیه‌سازی مربوط به مدل شماره 2 است که با یک کانال ورودی باد و فاقد باله‌های هدایت کننده باد، ساخته شده است (تصویر شماره 11).

در شبیه‌سازی نرم افزاری مدل شماره 3 با اجرای باله‌های جانبی، سرعت جریان ورودی به پرها افزایش یافته و همانطور که در خطوط جریان ساختار می‌بینیم، گردابه‌های تشکیل شده بین پرها کوچکتر شده‌اند (تصویر شماره 12). بنابراین با افزایش سرعت جریان باد، فشار بیشتری روی پرها وارد خواهد شد.



ت 11. شبیه‌سازی خطوط جریان و بردارهای سرعت باد در مدل شماره 2. مأخذ: نگارندگان.

نتیجه

مقایسه نتایج آزمایش 1 و 2 در تونل باد نشان می‌دهد معماران ایرانی با علم به اینکه ناهمواری سطح زمین، موجب کند شدن باد می‌شود علاوه بر استقرار آسبادها در مناطق مرتفع تر فضای آسبخانه و پرخانه را در آسبادهای قدیمی سیستم جابجا کرده‌اند تا ضمن بهره‌گیری بیشتر از انرژی باد، از اختلال احتمالی عملکرد آسبادهای ناشی از انباشت ماسه و خاشاک یا اسکان حیوانات در فضای پرخانه جلوگیری کنند، از سختی کار بکاهند و مانع بروز آسیب‌های ساختاری ناشی از لرزه‌های سنگ آسیا در طبقه بالا شوند.

آزمایش مدل‌های 2، 3 و 4 در تونل باد و شبیه‌سازی نرم‌افزاری آن‌ها نشان می‌دهد، در مدل شماره 2 که دارای یک کانال ورود باد بوده و فاقد باله‌های هدایت‌کننده باد است، سرعت جریان در کانال ورودی، قدرت باد بر روی پره‌ها و در نتیجه تعداد دور پره‌ها در دقیقه در مقایسه با مدل‌های 3 و 4 کمتر است.

نتایج مطالعات تونل باد و شبیه‌سازی نرم‌افزاری، بیانگر آن است که در مدل شماره 3 با افزودن باله‌های هدایت‌کننده باد، گردابه‌های جریان باد در مقایسه با مدل شماره 2 کاهش می‌یابد و همگرایی باد بیشتر شده، سرعت جریان باد در کانال ورودی و روی پره‌ها، نسبت به سرعت جریان آزاد باد، افزایش می‌یابد در نتیجه قدرت آسباد ارتقای قابل توجهی می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت باد، میزان بهره‌وری از انرژی باد به مراتب بیشتر می‌شود.

در مدل شماره 4 با دو کانال ورودی باد و باله‌های هدایت‌کننده باد، تراکم خطوط جریان سرعت باد و بردارهای سرعت، باز هم ساختار بهبود یافته آسباد را نمایش می‌دهد. شبیه‌سازی نرم‌افزاری و آزمایش مدل 4 در تونل باد به

قدرت باد مؤثر بر پره‌ها به ترتیب برای مدل‌های 2، 3 و 4 در جدول شماره 2 نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پره‌های 1، 2 و 3 به ترتیب در معرض باد قرار می‌گیرند، بنابراین به ترتیب قدرت‌های بیشتر برای پره اول و سپس دوم و سوم به‌دست می‌آید.

تحلیل و ارزیابی نتایج شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی انجام شده، مدل شماره 2 ساده‌ترین مدل است و شبیه‌سازی خطوط جریان باد، نشان‌دهنده گردابه‌های بیشتر و بردارهای سرعت، بیانگر شدت جریان کمتر در این مدل است. با توجه به ساختار کالبدی آسباد در این مدل، قدرت مؤثر برای پره‌های عامل (مطابق جدول شماره 2) بین 2800 تا 17000 می‌باشد.

در مدل 3 با افزودن باله‌ها به مدل شماره 2 مقدار قابل توجهی قدرت آسباد افزایش یافته که این بهبود در شبیه‌سازی خطوط جریان و بردارهای سرعت مشهود است. در این مدل بواسطه وجود باله‌ها، پتانسیل سرعت جریان در کانال ورودی و روی پره‌ها، بیشتر از سرعت جریان آزاد باد می‌باشد و قدرت مؤثر روی پره‌ها تا میزان 3000 تا 180000 بهبود می‌یابد.

در مدل شماره 4 با دو کانال ورودی باد و باله‌های هدایت‌کننده باد، تراکم خطوط جریان سرعت باد و بردارهای سرعت، باز هم ساختار بهبود یافته آسباد را نمایش می‌دهد و قدرت باد مؤثر بر پره‌ها به میزان 4200 تا 250000 افزایش شایانی را نشان می‌دهد.

	پره شماره 1	پره شماره 2	پره شماره 3
مدل 2	1.7929E4	1.7713E4	2.8446E2
مدل 3	18.5606E4	18.3091E4	30.47E2
مدل 4	25.2975E4	24.8601E4	42.27E2

ج 2. E قدرت باد بر پره‌های عامل. مأخذ: نگارندگان.

- زندیه، مهدی؛ پروردی نژاد، سمیرا. (1390)، توسعه پایدار و مفاهیم آن در معماری مسکونی ایران، مسکن و محیط روستا، شماره 130، تهران، ص 2-21.

- قهرمانی، بیتا؛ بهادری، علی اصغری. (1392)، آس بادهای نشیتفان مثالی برای مهندسی هوشمندانه ایرانی، صغه، شماره 60، ص 51-64.

- کیهانی، علیرضا؛ گلزاریان، محمودرضا؛ علیمردانی، رضا. (1384)، بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویه و تعداد پره در استحصال توان در توربین پره بادی، مجله علوم کشاورزی ایران، جلد 36، شماره 1، ص 229-237.

- گروت، لیندا؛ وانگ، دیوید. (1394)، روش‌های تحقیق در معماری، علیرضا عینی فر، چاپ هشتم، انتشارات دانشگاه تهران.

- گل محمدی، فرهود. (1390)، بررسی شیوه‌های آموزش و ترویج دانش بومی معماری روستایی (نمونه موردی: استان سیستان و بلوچستان)، مسکن و محیط روستا، شماره 136، ص 79-94.

- مدرس رضوی، مجتبی. (1372)، آسیاهای بادی، تحقیقات جغرافیایی، شماره 29، ص 82-115.

- مستند نگاری آسبادهای سیستان. (1389)، سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان سیستان و بلوچستان.
- مفیدی، عباس؛ حمیدیان پور، محسن؛ سلیقه، محمد؛ علی جانی، بهلول. (1392)، تعیین زمان آغاز، خاتمه و طول مدت وزش باد سیستان با بهره‌گیری از روش‌های تخمین نقطه تغییر، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره 8، ص 87، 112.

- مهدوی نژاد، محمدجواد؛ بمانیان، محمدرضا؛ مشایخی، محمد. (1391)، آسبادهای قدیمی‌ترین آسیاهای بادی در جهان، نقش جهان، شماره 2، صص 43، 54.

- نادری، بقراط. (1356)، آسبادهای خواف، هنر و مردم، تیر و مرداد، ص 75-85.

- نگارش، حسین؛ لطیفی، لیلا. (1388)، منشاء یابی نهشته‌های بادی شرق زابل از طریق مورفوسکپی و آنالیز فیزیکی و شیمیایی رسوبات، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال بیستم،

شناخت بهتر ما نسبت به یکی از دستاوردهای ارزشمند معماری ایران کمک شایانی می‌کند. نتیجه این آزمایش نشان می‌دهد معماران ایرانی با طراحی دربادی کوچک و زاویه دار، در کنار درباد اصلی، توانسته‌اند باد را به خوبی بر روی پره‌های آسباد متمرکز کنند و علاوه بر تضمین کارکرد بهینه آسباد در نوسانات بادهای 120 روزه، موجب ارتقای قابل توجه قدرت آسباد و راندمان آن شده‌اند.

پی‌نوشت

1. Shepherd
2. Gasch
3. Zayats
4. Müller
5. Jentsch
6. Stoddart
7. Simulation and Modeling
8. Tanaka
9. Nagano
10. Batchelor

فهرست منابع

- احراری رودی، عبدالکریم. (1383)، خواف در گذر تاریخ، انتشارات احمدجام، تربت جام.
- اسفندیاری، علی؛ بازارگان، مجید. (1393)، بررسی عددی اثر محل اتصال و گام اولیه پره بر عملکرد یک توربین بادی محور عمودی، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره 14، شماره 2، ص 79-84.
- افشار سیستانی، ایرج. (1367)، بزرگان سیستان، دیبا، تهران.
- بمانیان، محمدرضا؛ محمودی نژاد، هادی. (1389)، انرژی‌های نو و شهر خورشیدی، انتشارات هله، طحان، تهران.
- حسین‌زاده، سیدرضا. (1376)، بادهای 120 روزه سیستان، تحقیقات جغرافیایی، شماره 46، ص 103-127.
- خضری، زهره؛ ایمانی، نادیه. (1388)، آسباد تجلی‌گاه هنر و صنعت، نامه معماری و شهرسازی، شماره 2، ص 111-123.
- رحیمی، غلامحسین. (1386)، ایران زادگاه آسیاهای بادی عمود محور، کتاب ماه علوم و فنون، شماره 97، ص 7-13.

شماره پیاپی 33، شماره 1، ص 1-22.

- نوروزیان ملکی، سعید؛ حسینی، سیدباقر؛ رضایی، محمود.
(1390)، معماری در عصر تغییر اقلیم، مسکن و محیط روستا،

شماره 129، ص 20-31.

- Batchelor G.K (2002), an Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge Mathematical Library, United Kingdom.

- Dennis G. Shepherd, (1990), Historical Development of the Windmill, NASA (National Aeronautics and Space Administration), Contractor Report 4337, Cornell University, New York.

- Gasch, R, Twele. J (2012), Wind Power Plants Fundamentals, Design, Construction and Operation, 548 p. Springer Berlin Heidelberg, Berlin.

- Gerald Muller, Mark F.Jentsch, Euan Stoddart(2009), Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings, Renewable Energy, 34, pp 1407-1412.

- Saeidian, Amin, Gholi, Mojtaba Zamani, Ehsan (2012), Windmills (Asbads): Remarkable Example Of Iranian Sustainable Architecture, Architecture Civil Engineering Environment, The Silesian University Of Technology pp 19-30.

- Tanaka. H, Nagano. S (1973), "Study of flow around a rotating circular cylinder", Bulletin of JSME, Vol. 16, No. 92, pp. 234-243.

- Zayats. Inna (2015), The Historical Aspect of Windmills Architectural Forms Transformation, Procedia Engineering, 117, pp 690 – 700.