نشریه مطالعات هنر اسلامی
www.sysislamicartjournal.ir

جایگاه علم مهندسی سیالات در بلندترین گنبد آجری جهان (گنبد سلطانیه)

فهیمه میرحسینی [۱*]، رضا شعبانی صمغ آبادی [۲]، محمدرضا سعیدی [۳]، هایده خمسه [۴]

[*۱] (نویسنده مسئول) دانشجوی دکتری، گروه باستان شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، mirhoseinifahime@gmail.com
[۲] استاد، گروه تاریخ و باستان شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، shabanireza۱۹۹۹@gmail.com
[۳] دانشیار پژوهشی مرکز تحقیق و توسعه علوم انسانی سمت. saeedi@samt.ac.ir
[۴] گروه باستان شناسی، واحد ابهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ابهر، ایران، در حال حاضر مأمور در علوم و تحقیقات. hkhamseh۷۲@yahoo.com

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی
شماره ۴۷
دوره ۱۹
صفحه ۵۹۶ الی ۶۱۵

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۷
تاریخ داوری: ۱۴۰۰/۰۵/۰۱
تاریخ صدور پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۰۱

کلمات کلیدی
گنبد سلطانیه،
علم آیرودینامیک،
عدد رینولدز،
قانون برنولی،
فرسایش.

ارجاع به این مقاله
میرحسینی، فهمیه، شعبانی صمغ‌آبادی، رضا، سعیدی، محمدرضا، خمسه، هاییده. (۱۴۰۱). جایگاه علم مهندسی سیالات در بلندترین گنبد آجری جهان(گنبد سلطانیه). مطالعات هنر اسلامی، ۱۹(۴۷)، ۵۹۶-۶۱۹.

dorl.net/dor/20.1001.1.۱۷۳۵۷۰۸.۱۴۰۱.۱۹.۴۷.۳۵.۳

dx.doi.org/10.22034/IAS.۲۰۲۱.۲۷۱۸۹۷.۱۵۳۶

چکیده

شاخص‌ترین اثر تمدنی ایران در عصر اسلامی با عنوان بلندترین گنبد آجری جهان ۷۰۰ سال است که در بین دشت وسیع بادخیزی با اقلیم سخت با عظمت و پایدار خودنمایی می‌کند. راز پایداری این بنا در میان جریانات هوایی حاصل از جغرافیای منطقه، بدون تردید ناشی از به‌کارگیری سازه‌ای کاملاً مهندسی شده بر پایه علم آیرودینامیک در معماری آن است. این علم امروزه جهت استقامت و پایداری بناها در سازه‌های عمرانی به کار گرفته می‌شود. پژوهش حاضر با اتکا بر آسیب‌ها و فرسایش‌های ناشی از جریانات هوایی و شرایط اقلیمی بر روی بنای سلطانیه به طرح این موضوع پرداخته است. روش تحقیق به‌کار رفته در این پژوهش، تحلیلی-توصیفی همراه با مطالعات آزمایشگاهی و کتابخانه‌ای می‌باشد. روش و ابزار مورد استفاده، بررسی اسناد و مدارک مکتوب، مطالعات میدانی و آزمایشگاهی است. نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که انتخاب ایوان‌های تو در تو در طبقهٔ فوقانی بنا در طرحی ۸ هشت ضلعی در راستای باد غالب منطقه و حضور پنجره در هر ضلع از این ایوان کاملاً براساس شناخت اقلیم منطقه، مقاومت هوا و تأثیرات ناشی از آن طراحی گردیده و معماران بنای سلطانیه با آگاهی به قوانین و اصول آیرودینامیک این سازه عظیم را تا به امروز برقرار داشته است.

اهداف پژوهش:

۱. بررسی جایگاه علم مهندسی سیالات در بقای بلندترین گنبد آجری جهان(گنبد سلطانیه).

۲. آشنایی با هیئت ظاهری بنای گنبد سلطانیه و ملاحظات تأثیر جریانات جوی بر آن.

سؤالات پژوهش:

۱. جایگاه علم مهندسی سیالات در بلندترین گنبد آجری جهان (گنبد سلطانیه) چگونه است؟

۲. مختصات شکل ظاهری بنای گنبد سلطانیه و ملاحظات تأثیر جریانات جوی بر آن چگونه است؟

2676-7759/ © 2020 Islamic Art Press. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/BY/4.0/)

مقدمه

سازه‌های معماری، گویای مختصات یک تفکر و تمدن هستند گنبد سلطانیه یکی از آثار تاریخی مربوط به دوره حکومت ایلخانان بر ایران (۶۵۶-۷۳۶ه.ق) در استان زنجان واقع است. این بنا در شهر سلطانیه مرکز بخش، از توابع شهرستان ابهر در ۳۹ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان زنجان در جلگه‌ای در فاصله ۷ کیلومتری شمال کوه‌های سلطانیه و ۱۲ کیلومتری جنوب کوه‌های طارم با ارتفاع ۱۸۸۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است. بقای این بنا، علل مؤثر در آن و ضرورت آشنایی با مختصات این بنا و کاربست آن در معماری نوین سبب شده است تا این موضوع برای پژوهش حاضر انتخاب شود. این پژوهش بر مبنای تحقیقات میدانی و علمی طراحی و فعالیت‌های طرح علمی-پژوهشی مورد نظر به شرح زیر ضروری گردیده است: آشنایی با منطقه و گنبد سلطانیه؛ آشنایی با موقعیت جغرافیای منطقه و نقش آن در شکل‌گیری سیستم‌های جوی محیط؛ آشنایی با هیئت ظاهری بنا و ملاحظات تأثیر جریانات جوی بر آن؛ آسیب‌شناسی گنبد سلطانیه؛ شناسایی جهات وزش باد؛ شناخت عؤامل همدست باد در فرسایش؛ نمونه‌برداری از مصالح جهت آزمایشگاه؛ ساخت مدل و کانال آب، آزمایش و تست مدل در تونل آب؛ آزمایش و بررسی نتایج آزمایش‌ها و کاربردی کردن آنها در تحقیق؛ تحلیل و آنالیز گلبادها و بررسی تاثیر وزش باد بر میزان و فراوانی آسیب دیدگی‌ها؛ بررسی تطبیقی روش‌های میدانی، آزمون و شبیه‌سازی کامپیوتری در ابعاد گسترده؛ بررسی تطبیقی نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح و نمونه‌های طبیعی مشابه.

بررسی پیشینهٔ پژوهش حاضر حاکی از این است که هرچند تحقیقات متعددی درخصوص معماری گنبد سلطانیه و زمینه‌های تاریخی و فرهنگی مؤثر بر آن انجام شده است ولی عنوانی مستقل منطبق با عنوان پژوهش حاضر تاکنون به رشتهٔ تحریر درنیامده است. وفامهر و صنایعیان در مقاله‌ای با عنوان «بررسی فناوری اقلیمی در گنبد سلطانیه زنجان با نرم افزار ECOTECH» به بررسی سقف گنبدی این بنا و تغییرات حرارتی آن پرداخته اند. با این حال در اثر مذکور کالبد بنا و تأثیر سیستم‌های جوی بر آن بررسی نشده است. لذا در پژوهش حاضر به این مسئله پرداخته می شود.

روش تحقیق به‌کار رفته در این مقاله به صورت تحلیلی، توصیفی و مقایسه‌ای همراه با مطالعات آزمایشگاهی و کتابخانه‌ای بوده و همچنین روش و ابزار مورد استفاده در پژوهش؛ بررسی اسناد و مدارک مکتوب، مطالعات میدانی و آزمایشگاهی است. بدین منظور در بخش‌های نظری با استفاده از روش مطالعهٔ کتابخانه‌ای، ضمن مراجعه به منابع و مأخذ موجود سعی شده است تا تمامی وجوه ممکن مسئله مورد توجه قرار گیرد و در بخش‌های میدانی و آزمایشگاهی با مراجعه به محل و بررسی مکان‌های آسیب دیده و برداشتن نمونه‌ها، به اعمال آزمایشات لازم برای دستیابی به نتیجه و پاسخ به سؤالات مبادرت گردید. عمده کار بررسی حاضر براساس یک روش آزمایشگاهی و با تکنیک تحلیلی-مقایسه‌ای و همچنین انجام توصیف و تحلیل نسبت به اهداف تحقیق است. امروزه بر اساس جغرافیای مناطق از علم مهندسی سیالات جهت ارزیابی مقاومت سازه‌های بلند در مقابل جریانات هوایی استفاده و با رعایت استانداردهای بین‌المللی برای سازه‌ها، پرونده‌های آیرودینامیکی تعریف می‌شود. آیرودینامیک (دینامیک سیالات) علمی است که رفتار سیال (مایع، گاز) را در حالت سکون یا حرکت بر مرزهای جامد یا مایع بررسی و اثرات آن را بر این مرزها ارزیابی می‌نماید.

گستره مطالعاتی این علم بسیار وسیع بوده و امروزه به صورت پایه‌ای علمی برای ماندگاری اجسامی که در مقابل این جریانات قرار می‌گیرند درآمده است. ضرورت ایجاد پرونده‌های آیرودینامیکی برای سازه‌ها برپایه نقش نیروی افقی

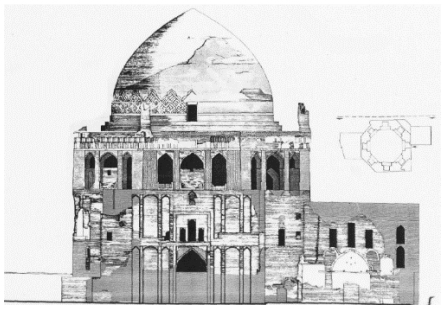
باد و تأثیرات محیطی فشار، درجه حرارت، یخ و برف، ذرات انتقالی حاصل از باد و انبساط گرمایی بوده و لازم است بیشترین سرعت تندباد ناگهانی، طیف انرژی باد در فرکانس‌های طبیعی سازه، تغییرات سالانه فرکانس سرعت باد، شکل‌های شبه ایرودینامیکی، تغییرات فشار در نقاط مختلف سطوح شیب دار نسبت به خطوط جریان باد در سازه، ممان تغییر جهتی، نیروی تقاطعی و نیروی پسا را در نظر گرفته تا بتوان پایداری بنا را تضمین کرد.

۱. گنبد سلطانیه

گنبد سلطانیه سازه معماری با عظمتی است که به دستور سلطان محمد خدابنده طی ۹ سال از ۷۰۴ تا ۷۱۳ ه.ق/ ۱۳۰۵ تا ۱۳۱۳ م ساخته شده است (القاشانی، ۱۳۴۸)، و به عنوان نقطه عطف تحول معماری قابل تأمل است و می‌تواند سرآغاز معرفی معماری ایلخانی باشد (جوادی، ۱۳۶۳). این بنا از نوع بناهای هشت ضلعی است که گنبد آن تا ارتفاع ۵۰ متر بر روی جرزهای عریض آن استوار شده است (تصویر ۱) (ثبوتی، ۱۳۸۰: ۶۹-۷۰).

تصویر ۱: نمای کلی از گنبد سلطانیه با مناره‌ها و نمایش مناره‌های آسیب‌دیده. مأخذ: (نگارندگان، ۱۳۹۸)

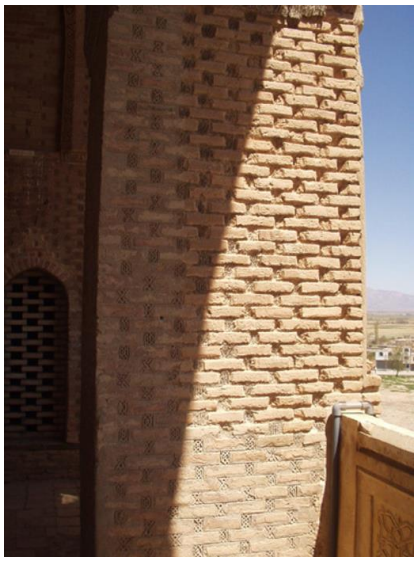
فضای زیر گنبد در سه طبقه با اجراء مهندسی دقیق با اتکاء به آجر حجم‌های زیادی را در خود تعبیه کرده و پایداری آن را در منطقه‌ای که به لحاظ موقعیت جغرافیایی خاص همواره جو ناآرامی در آن حاکم است، تضمین می‌کند. طبقه دوم این بنا با ارتفاع تقریبی ۱۹ متر از طبقه همکف شامل ایوان‌هایی است که بر روی هشت ضلعی خارجی بنا ایجاد گردیده و مشرف بر دشت پیرامون می‌باشد (مخلصی، ۱۳۶۴: ۴۲-۴۳). این ایوان‌ها به وسیله درگاه‌هایی که در زوایای هشت وجهی قرار دارند با هم در ارتباط هستند. در جلوی هر ضلع از این ایوان‌ها دو ستون با سطح مقطع مربعی شکل تقریباً به ابعاد ۱/۱۰ در ۱/۱۰ متر به‌وسیله سه طاق به دور جرز مجاور متصل شده‌اند. طاق میانی از دو طاق طرفین بزرگ‌تر و هر سه طاق دارای قوس جناغی شکل می‌باشند (تصویر ۲).



تصویر ۲: نمای خارجی بنای سلطانیه (مخلصی، ۱۳۶۴).

انحنای این قوس‌ها در هر طاق با یک مرز گچبری شده به عرض ۱۵ سانتیمتر آغاز می‌شود. این گچبری در ارتفاع ۳/۱۰ متری نسبت به کف ایوان طبقه دوم قرار گرفته است. در جلو این ایوان نرده‌هایی از سنگ با نقوش متفاوت به صورت مشبک به ارتفاع ۱/۲۰ متری تعبیه شده است، در این طبقه در هر یک از دیواره‌های داخلی ایوان‌ها در مقابل دهانه طاق بزرگ، پنجره کوچکی به داخل بنا باز می‌شود (ثبوتی، ۱۳۸۰: ۶۹-۷۰). به این ترتیب صورت خارجی طبقهٔ دوم بنای سلطانیه با حضور دو ستون و سه طاق جناغی که در مجموع یک ترکیب سه دهانه را تجسم داده، نماسازی شده است.

با آسیب دیدگی‌هایی که منحصرا بر روی مصالح بدنه‌های جانبی ستون‌ها و دیواره‌های طرفین هر ایوان ملاحظه می‌شود (تصویر ۳). همچنین مسأله تفاوت فراوانی آسیب دیدگی‌های این دیواره‌ها و مقایسه آن با نمونه مشابه در بنایی دیگر (تصویر ۴) بحث جدیدی بر پایه علم آیرودینامیک آغاز می‌شود و آنگاه که حرکت هوا در درون راهروهای ایجاد شدهٔ این طبقه مورد مطالعه قرار می‌گیرد، مشخص می‌گردد که از نظر آیرودینامیک (دینامیک سیالات) معمار همچنین قصد داشته است روند تخریبی بنا را در مقابل بادهای منطقه کند نماید.



تصویر ۳: نمونه آسیب دیدگی در دیوارهٔ جانبی ستون‌ها در بنای سلطانیه. مأخذ: (نگارندگان، ۱۳۹۸)

تصویر ۴: نمونه آسیب دیدگی دیوارهٔ شمالی ایوان جنوب غربی مدرسهٔ غیاثیهٔ خرگرد. مأخذ: (نگارندگان، ۱۳۹۸)

۲. آسیب‌شناسی دیواره طبقهٔ دوم گنبد سلطانیه و بررسی تطبیقی با نمونه‌های مشابه

مصالح اصلی دیواره‌های این طبقه آجر، ملاط و گچ می‌باشند. بر روی تزئینات و ملاط بین آجرهای دیوارهای جانبی ستون‌های جلوی هر ایوان و دیواره‌های طرفین هر ضلع از ایوان‌ها نوعی تخریب دیده می‌شود که خاص این نقاط بوده و در قسمت‌های دیگر بنا دیده نشده است. نحوهٔ تخریب و گستردگی آسیب‌ها روی تمامی دیوارها تقریباً یکسان می‌باشد، اما میزان تخریب آن‌ها تفاوت دارد. نحوهٔ تخریب آن‌ها به صورتی است که به نظر می‌آید بر روی تزئینات دیواره‌ها گربه چنگ انداخته است (تصویر ۵).

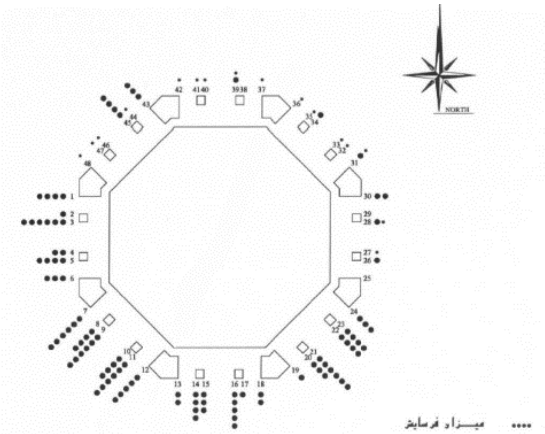
گستره آسیب‌ها روی هر دیواره در راستای عمودی از قسمت فوقانی آن، جایی که انحنای طاق زیاد می‌شود شروع و با شیب خاصی به طرف پایین دیواره تا بالای نرده‌ها افزایش می‌یابد و در راستای افقی روی هر دیواره از لبه خارجی شروع و به تدریج با نزدیک شدن به لبه داخلی دیوار میزان آن کم می‌شود (تصویر ۳).

تصویر ۵: نمونه آسیب دیدگی در بنای سلطانیه. مأخذ: (نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)

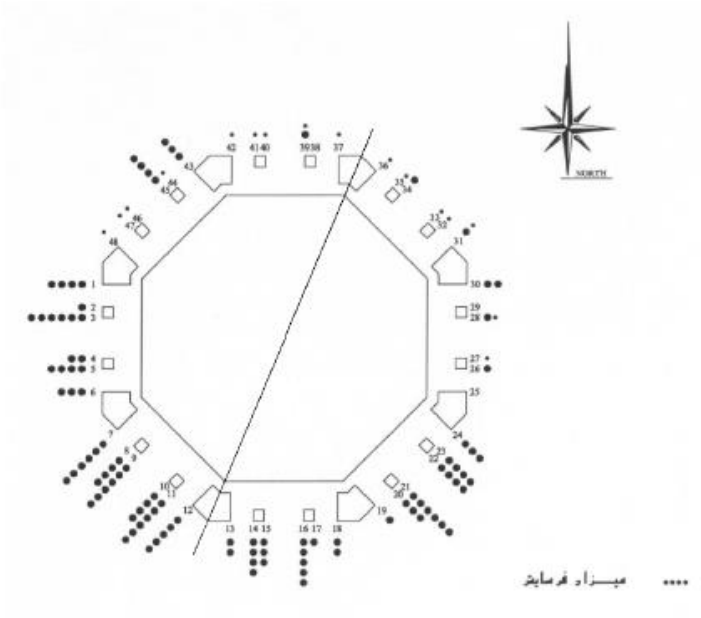
با ارزیابی میزان رفتگی‌های مصالح و وسعت آن روی هر دیوار ضرایبی به‌عنوان ضرایب خورندگی به هر دیوار داده شد.

این ضرایب بر روی نمایی از برش عرضی ایوان‌های مرتبط طبقه دوم بنا در مکان مخصوص خود به صورت دوایری نمایش داده شده و نموداری میله‌ای در نمایی هشت ضلعی (نمودار ۱) تهیه و بر اساس آن مشخص گردید:

- دیواره‌های ستون‌های ایوان‌های غرب، جنوب غربی، جنوب و جنوب شرقی در این طبقه بیشترین آسیب را دیده است.
- دیواره‌های ستون‌های ایوان‌های شرق، شمال شرقی، شمال و شمال غربی در این طبقه آسیب کمتری را شامل شده است.
- با احتساب ضرایب خوردندگی می‌توان خط تقارنی از گوشه (راس) شمال شرقی به گوشه جنوب غربی طرح هشت ضلعی ایوان‌های خارجی رسم کرد. این خط تقارن تحت زاویه ۲۲/۵ درجه نسبت به محور طولی بنا می‌باشد (نمودار ۲).



نمودار ۱: ضرایب آسیب‌دیدگی دیواره‌های ستون‌ها به‌صورت شماتیک. (مأخذ: نگارندگان ۱۳۹۸)



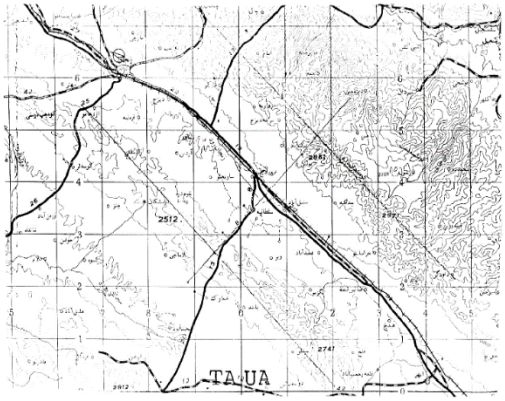
نمودار۲: نمایش خط متقارت براساس ضرایب آسیب‌دیدگی. (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)

نحوه و میزان این آسیب‌دیدگی‌ها مطابق نمودار نشان می‌دهد که عامل ایجاد این آسیب دیدگی‌ها باید کمیت برداری و متغیر بوده باشد، یعنی علاوه بر داشتن برد و جهت، اندازه‌های متفاوتی را نیز شامل باشد. همچنین نمونهٔ مشابه این تخریب‌ها و آسیب دیدگی‌ها نیز تنها در سازه‌هایی مشاهده گردیده که شرایط آب و هوایی، اقلیمی و جغرافیای یکسانی را متحمل هستند. از جمله این موارد می‌توان به مسجد زوزن، سنگ‌های افراشته در قبرستان نشتیفان مقابل آس بادها و مدرسه غیاثیه خرگرد اشاره نمود.

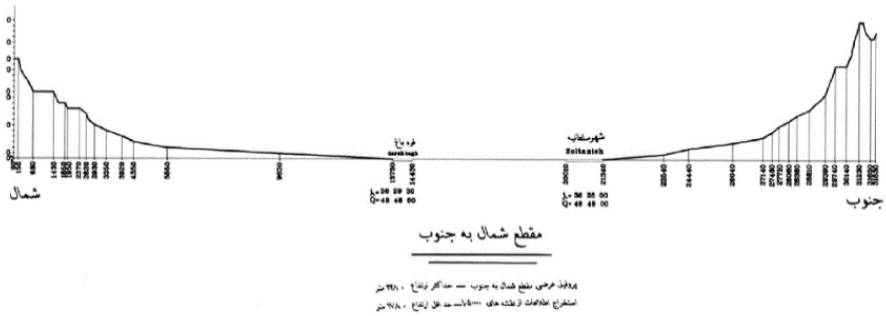
۳. باد در منطقه سلطانیه

ساختار جغرافیای حاکم در منطقه سلطانیه مشتمل بر دو بافت متفاوت دشت و کوهستان می‌باشد. با انتخاب نقشه توپوگرافی این منطقه (نقشه ۱) و براساس آن تهیه برش عرضی از این منطقه در راستای شمال به جنوب (تصویر ۶) و شمال شرقی به جنوب غربی (تصویر ۷)، مشخص گردید این منطقه به‌صورت دشتی وسیع در میان دو رشته کوه که به موازات یکدیگر و در امتداد شمال غربی به جنوب شرقی کشیده شده است، واقع می‌باشد. دشت ما بین این

ارتفاعات به صورت کانالی وسیع و طویل در همان راستای ارتفاعات که از طرف جنوب شرقی به فلات مرکزی و از طرف شمال غربی به ابتدای کوه‌های زاگرس منتهی می‌شود، منطقه‌ای خاص را شکل داده است و در عین حال تجمع انسانی در شهرها و روستاها در این کانال پویایی منطقه را به نمایش می‌گذارد. طی مطالعات محل‌یابی و بررسی اطلاعات مربوط به باد در شهرهایی که توسط اداره هواشناسی طی یک دوره ۱۰ ساله صورت گرفته است، مشخص گردید بر اساس تقسیم بندی پتانسیل باد[1] (ثقفی، ۱۳۷۲؛ وازرت نیرو و انرژی، ۱۳۷۵) این منطقه بعد از استان سیستان و بلوچستان دومین منطقه‌ای است که دارای پتانسیل باد بیشتری می‌باشد و از جمله مناطق بادخیز به شمار می‌آید. با هماهنگی اداره هواشناسی استان تهران دستگاهی به نام بادنگار[2] (منجمی، بی‌تا؛ جوادی، ۱۳۳۰) در ایستگاه اقلیم‌شناسی خیرآباد در ارتفاع استاندارد هواشناسی مطابق با نیاز منطقه در فاصله ۹ کیلومتری شمال غربی شهر سلطانیه که تقریباً شرایط اقلیمی یکسانی در این محدوده حاکم است نصب شد.



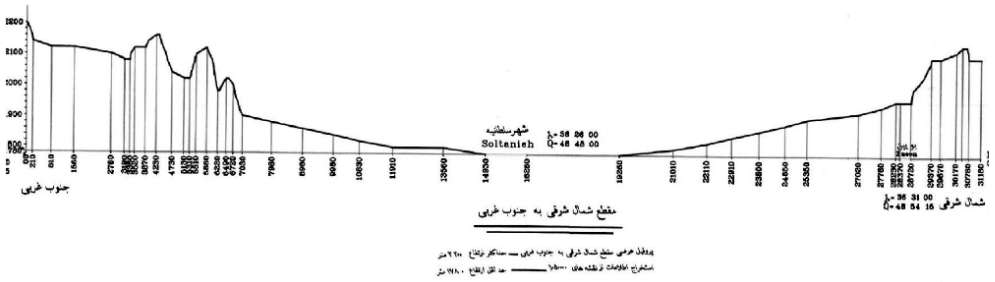
نقشه شماره۱: موقعیت دشت سلطانیه در میان ارتفاعات. (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)



تصویر ۶ : برش عرضی از دشت سلطانیه در راستای شمال به جنوب. (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)

[1] پتانسیل باد: میزان توانایی تولید انرژی توسط باد.

[2] بادنگار: دستگاهی است که مشخصات باد را در یک لحظه نشان می‌دهد و تغییرات جهت و سرعت باد را خود به خود ثبت نام می‌کند و بر روی نموداری به نام گلباد نمایش می‌دهد.



تصویر ۷: برش طولی از دشت سلطانیه در راستای شمال شرقی به جنوب غربی. (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)

به این ترتیب پس از نصب دستگاه به مدت یک سال در ایستگاه اقلیم شناسی خیرآباد در حدود ۱۱۰۰ دفعه آمار باد برداشته شد. آمار ثبت شده مربوط به داده های اندازه، سرعت و جهت باد در هر روز از ساعت‌های ۱۵، ۹، ۳ به وقت گرینویچ می‌باشد. بر اساس این داده ها نمودار گلباد[۳] (منجمی، ۱۶۶) برای هر ماه از ساعت‌های فوق به طور جداگانه تهیه شد. (نمودار ۳)

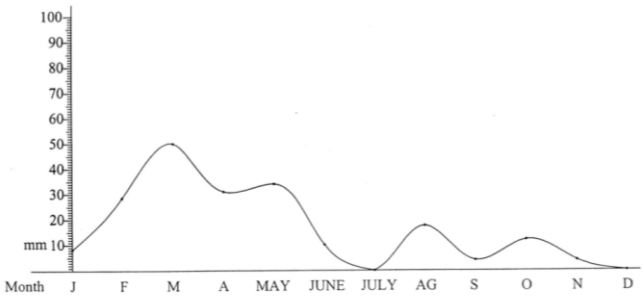
ردیف	ماهها	ساعت ۳	ساعت ۹	ساعت ۱۵	Total
1	JANUARY				
2	FEBRUARY				
3	MARCH				
4	APRIL				
5	MAY				
6	JUNE				
7	JULY				
8	AUGUST				
9	SEPTEMBER				
10	OCTOBER				
11	NOVEMBER				
12	DECEMBER				

نمودار ۳: مجموعه گلبادهای ایستگاه خیرآباد. (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)

[۳] گلباد: نموداری است که جهت و سرعت باد را در سه زمان استاندارد هواشناسی به وقت گرینویچ به طور جدا از هم نشان می‌دهد.

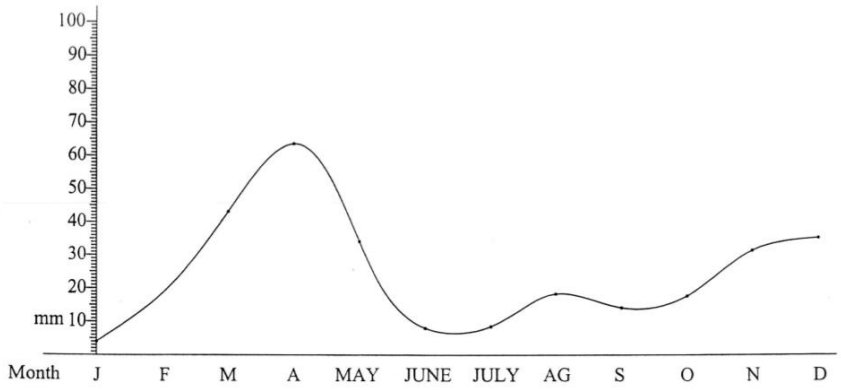
با تحلیل و بررسی آماری مربوط به دیده بانی‌های جریان هوا در سطح زمین در منطقهٔ سلطانیه معلوم گردید: الف- از هشت جهت اصلی و فرعی در منطقه باد می‌وزد، ولی وزش باد از طرف شمال شرقی از سایر جهات بیشتر است، ب- در عین آنکه از سایر جهات جغرافیایی بادهای خفیفی در منطقه می‌وزد اما بادهای شمال شرقی از ماه خرداد تا ماه مهر، بادهای شرقی، جنوب شرقی و جنوبی از آبان تا دی ماه و بادهای جنوب غربی و غربی از بهمن تا اردیبهشت در منطقه غالب است، پ- میانگین باد وزیده شده در هر فصل بدون در نظر گرفتن جهت آن بیش از همه اواخر بهار و تابستان و در مراحل بعدی به ترتیب نزولی اوایل بهار و اواخر زمستان و پاییز اتفاق می‌افتد، ت- با افزایش باد شمالی منطقه منجیل با گذر از ارتفاعات بر منطقه سلطانیه تأثیر گذاشته و در اواخر بهار، تابستان و اوایل پاییز باد خشک شمال شرقی از سمت منجیل بر منطقه غالب می‌شود. جریانات هوایی منطقه خدابنده همان بادهای مرطوبی است که به دلیل کم بودن فشار جو در منطقه ایران نسبت به فشار جو در اقیانوس اطلس در فصل زمستان، جریان باد غربی را از اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه به سمت ایران شکل داده است. این جریانات از ارتفاعات جنوبی دشت سلطانیه گذشته و این منطقه را در فصل زمستان از جهت غربی و جنوب غربی تحت شعاع قرار می‌دهند (نمودار ۴ و ۵).

شهر سلطانیه دارای ایستگاه باران سنجی می‌باشد، با توجه به داده‌های دریافتی از این ایستگاه در مدت یک سال نمودار فراوانی باران در منطقه سلطانیه تهیه و مشخص گردید این منطقه در اواخر پاییز، زمستان و اوایل بهار بیشترین ریزش جوی را داشته است. با توجه به نمودار(۶) معلوم گردید بنای سلطانیه در ماه‌های سرد سال در معرض جریانات هوایی مرطوب غربی و جنوب غربی قرار گرفته و پیرو آن ریزش‌های جوی با افزایش انرژی جنبشی با قدرت بالایی به بدنه بنا در همان راستا برخورد داشته‌اند. لذا ضرورت این امر موجب گردید جریان‌های آیرودینامیکی[۴] در این قسمت از سازه به سه روش تحقیق میدانی، تشابه مدل و تست آن در تونل آب و شبیه‌سازی کامپیوتری مورد بررسی قرار گیرد.

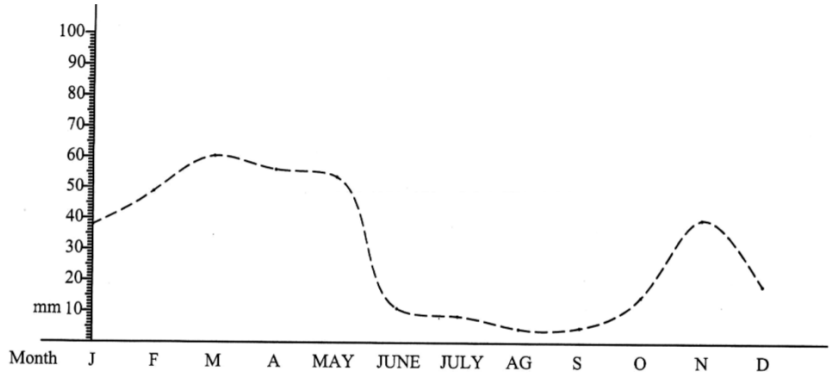


نمودار ۴: نمودار سالانه فراوانی باد جنوب غربی در سلطانیه، ساعت ۹ به وقت گرینویچ (GMT) (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)

[۴] علم آیرودینامیک: علمی است که مسئله عبور جریان سیال در اطراف جسم را مورد بررسی قرار می دهد (نصیری، ۱۳۷۵).



نمودار ۵: نمودار سالانه فراوانی باد غربی در سلطانیه، ساعت ۹ به وقت گرینویچ (GMT) (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)



نمودار ۶: نمودار سالانه فراوانی باران در منطقه سلطانیه. (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)

٤. بررسی جریان‌های آیرودینامیکی

هنگامی که یک جریان خارجی بدون مرز (سیال) در اطراف جسم جامدی حرکت کند، بدون محدودیت گسترش می‌یابد. در نقاطی که جریان به جسم برخورد می‌کند بر اساس میزان سرعت سیال و شکل هندسی جسم رفتارهایی از سیال ظاهر می‌شود. برای شناخت نوع رفتار سیال در علم آیرودینامیک از پارامتربی بعدی به عنوان عدد رینولدز و برای تحلیل رفتار جریان بیان تئوری لایه مرزی ضرورت دارد.

٥. عدد رینولدز[٥]

رفتار جریان در اطراف یک جسم در هر سرعت داده شده به نیروی اینرسی[٦] (پتانسیل) و نیروی چسبندگی[٧] (ویسکوزیته) بستگی دارد. نسبت نیروی اینرسی به نیروی چسبندگی را عدد رینولدز می‌نامند (نصیری، ۱۳۷۵) (Yuan,۱۹۸٦). اندازه عدد رینولدز مشخص کننده نوع جریان سیال است. اگر اندازه آن کمتر از ۱۰۵ ×۵ باشد

[٥] Reynolds Number

٦ اینرسی: اجسام تمایل دارند حالت اولیه خودشان را حفظ کنند. به این تمایل اجسام اینرسی گفته می‌شود.

٧ نیروی چسبندگی: نیروهای موجود بین مولکول‌های یک ماده است.

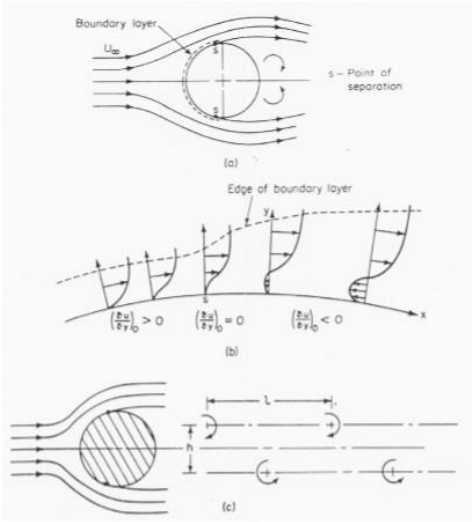
جریان آرام و اگر اندازه آن بیشتر از ۵×۱۰^{۵} باشد جریان سیال آشفته و در صورتی که عدد رینولدز برابر با ۵×۱۰^{۵} باشد جریان گذرا تعریف می‌شود (White,۱۹۸٦).

٦. تئوری لایه مرزی

هنگامی که یک سیال با سرعت یکنواخت با سطح جسمی تماس پیدا می‌کند اصطکاک ناشی از نیروی چسبندگی بین مولکول‌های سیال و مولکول‌های سطح جسم موجب می‌شود آهنگ سرعت مولکول‌های سیال با نزدیک شدن به سطح جسم کمتر شود، به طوری که در نزدیکی سطح، سرعت سیال به صفر میل می‌کند. به ناحیه‌ای که سرعت مماسی سیال مرتب در حال تغییر باشد و ضخامت آن در طول سطح جسم در مسیر حرکت افزایش می‌یابد، لایه مرزی گفته می‌شود.

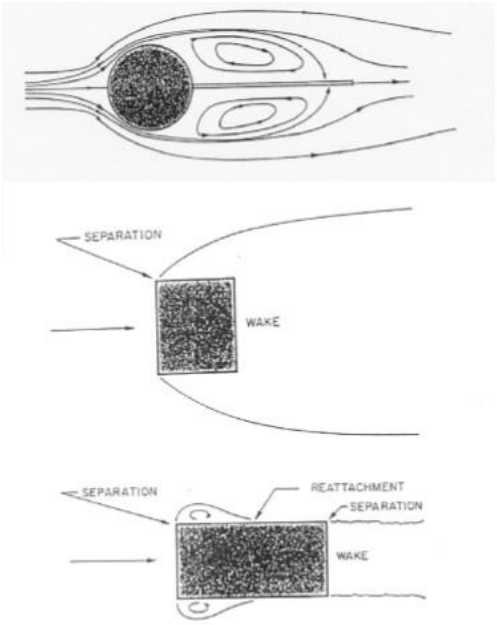
۷. جدا شده جریان از سطح

در هنگام عبور یک سیال از روی سطح یک جسم غیر مسطح ضخیم، تنش برشی اصطکاکی حاصل از جریان روی سطح به تبعیت از سرعت لایه‌های سیال در نزدیکی جداره جسم، تغییر می‌کند. در شرایطی که تنش برشی اصطکاکی روی سطح جسم به صفر برسد جریان از سطح جسم جدا می‌شود. عوامل کنترل کننده سرعت سیال در برخورد با جسم به شکل هندسی جسم و جنس سطح تماس جسم با سیال بستگی دارد (Shames,۱۹۸۵؛ تصویر ۸ و ۹). درسیال حقیقی به دلیل اینکه ذرات سیال دارای انرژی جنبشی می‌باشند، سیال قادر به تغییر ناگهانی مسیر نخواهد بود. این تغییر مسیر زاویه‌ای ناگهانی، نیاز به شتاب دورانی بسیار بالا و نیروهای شدید از لایه‌های مجاور دارد. که سیال قادر به تأمین این نیازها نبوده بنابراین سیال در عمل از لبه‌های جسم جدا شده و در پشت یک فضای خالی خلأ مانند[۸] ایجاد می‌کند. در برخورد لایه‌های سیال متحرک با قسمت کم سرعت، مولکول‌های سیال درون فضای خالی چرخ می‌زنند و جریان‌های گردابی در پشت جسم ایجاد می‌شود.



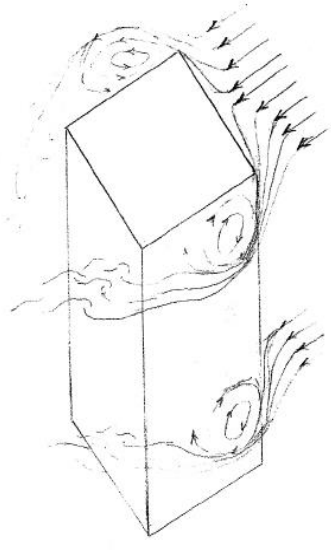
تصویر ۸: شکل‌گیری جدایش جریان سیال از سطح جسم (Shames,۱۹۸۵)

[۸] Wake

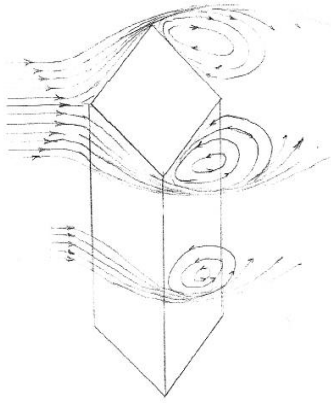


تصویر ۹: رفتار سیال در برخورد با اشکال هندسی مورد نظر. (نصیری، ۱۳۷۵)

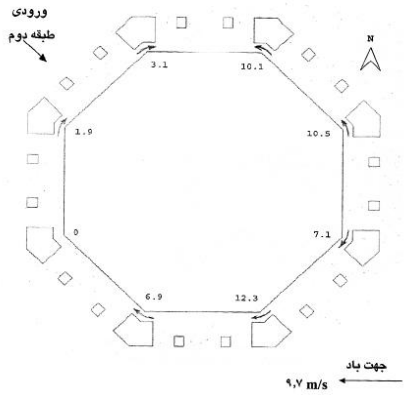
با توجه به خصوصیات سیال حقیقی و تئوری های مطرح شده از رفتار این سیال در برابر جسم، نحوه حرکت جریان‌های هوا پیرامون ستون‌های ایوان‌های خارجی بنای سلطانیه پیش‌بینی می‌شود در برخورد مستقیم سیال با ستون مکعبی شکل (تصویر ۱۰) جدایش جریان در دیواره‌های جانبی ستون موجب شود که جریان‌های نوساناتی و پیچشی در کناره‌های دیواره‌ها به وجود آید و در پشت ستون در فاصله دورتر فضای خالی به صورت جریان‌های گردابی تشکیل شود. البته هنگامی که سیال از گوشه با زاویه به ستون مکعبی شکل برخورد کند نیز تقریباً رفتاری مشابه رفتار قبلی بر روی ستون ملاحظه می‌شود. اما در اندازه نیروها و فشارهای وارده ناشی از جریان‌های حاصل در پیرامون هر ستون تفاوت‌های بسیاری وجود دارد (تصویر ۱۱). این پدیده کاملاً در تحقیقات میدانی با استفاده از مانومتر دیجیتالی با همکاری تعدادی از متخصصین رشته هوافضا با انتخاب مکان‌های مورد محاسبه، جهت و اندازهٔ بیشترین سرعت باد در زمان‌های معین در ماه اردیبهشت مورد ارزیابی و اندازه‌گیری قرار گرفت (تصویر ۱۲).



تصویر ۱۰: رفتار جریان سیال در برخورد مستقیم با ستون مربعی شکل. (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)



تصویر ۱۱: رفتار جریان سیال در برخورد به گوشه ستون مربعی شکل (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)



تصویر ۱۲: جهت و اندازه سرعت باد در دهلیزهای ایوان‌های خارجی طبقه فوقانی بنای سلطانیه در ماه اردیبهشت (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)

از مقایسه داده‌ها در این مدت نتایج زیر به دست آمد:

۱- در خارج از بنا باد شمال شرقی صبح هنگام به عنوان باد غالب شناخته شد، سرعت متوسط بیشترین مقدار آن ۱۱ m/s ثبت گردید.

۲- پشت‌بام تربت خانه، جریان بادغالب (باد برخوردی به بنا) در زمان زیادی از روز را از شرق با بیشترین سرعت ۹/۷ m/s در مدت اندازه‌گیری تایید کرد.

۳- الف- میزان سرعت باد در دهلیزهای که در جهت باد هستند بیشتر از میزان سرعت باد برخوردی به بنا و نیز بیشتر از میزان سرعت باد در دهلیزهای پشت بنا می باشد. این موضوع از قانون بقای جرم (دبی جریان سیال۹) تبعیت نموده است به طوریکه جریان ورودی باد از سطح یک وجه بنا که شامل سه دهنه می‌باشد، باید از دو دهلیز طرفین خارج شود. سطح دو دهلیز در مقایسه با سطح یک وجه بنا چندین برابر کوچک‌تر است، بنابراین سرعت جریان در دهلیزها می‌تواند در صورت توان کششی جریان تا چندین برابر سرعت باد وارده بر بنا، سرعت داشته باشد.

ب- جهت جریان باد در داخل دهلیزها به سمت پشت بنا می‌باشد.

٤- الف- بیشترین میزان سرعت باد در کناره های ستون‌ها (در قسمت فرسایش یافته) کمتر از باد غالب بوده است.

ب- مقدار سرعت باد و جهت آن در این مکان‌ها تحت راستای محور خورندگی مرتب در حال تغییر بود به طوری که سرعت مماسی بر دیواره تحت زاویه خورندگی شیار مانند، جریان رفت و برگشتی را نشان می‌دهد.

ج- میزان سرعت باد با فاصله گرفتن از ستون‌ها (به موازات نرده‌ها) به تدریج کم شده تا به صفر می‌رسد، سپس با افزایش فاصله در همان راستا به تدریج میزان سرعت باد افزایش می‌یابد و جهت آن نیز تغییر می‌کند. بیشترین فاصله تا ستون برای ملاحظه این رفتار تقریباً یک متر می‌باشد. این پدیده، چرخش دورانی جریان باد در کناره‌های ستون‌ها را ثابت می‌کند.

د- در کناره‌های بعضی از ستون‌ها که خورندگی دیده نمی‌شود، سرعت در هر زاویه‌ای از دیوار نزدیک به صفر می‌بود.

و- در کناره‌های ستون‌ها پشت نرده ها سرعت باد قابل ملاحظه نبود.

۸. بررسی نیروها و ضرایب آیرودینامیکی

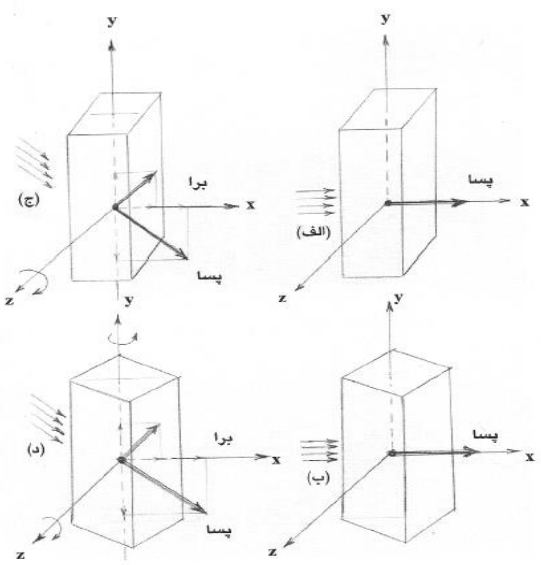
هنگامی‌که جسمی با هر شکل دلخواه در جریان یکنواخت سیالی واقع شود، تحت تأثیر نیروها و گشتاورهای اعمال شده از طرف سیال قرار خواهد گرفت. اگر جسمی دارای شکل و امتداد دلخواهی باشد در اثر جریان سیال، نیروها و گشتاورهای حول هر سه محور مختصات بر آن وارد می‌شود و معمولاً محوری را موازی با جریان آزاد انتخاب کرده و جهت مثبت آن را به سمت پایین دست جریان می گیرند. نیروی وارده بر جسم در امتداد این محور «پسا» و گشتاور حول این محور را «گشتاور غلتشی» می‌نامند. دومین نیروی بسیار مهم و عمود بر امتداد پسا را نیروی «برا» که معمولاً

---

۹ دبی جریان سیال: یعنی میزان جرم جریان سیال در یکای زمان.

وظیفه مهمی نظیر تحمل وزن جسم را بر عهده دارد و گشتاور حول محور آن را «گشتاور گردشی» می‌نامند. سومین مؤلفه نیروی جانبی است و گشتاور حول آن را «گشتاور پیچشی» می‌نامند.

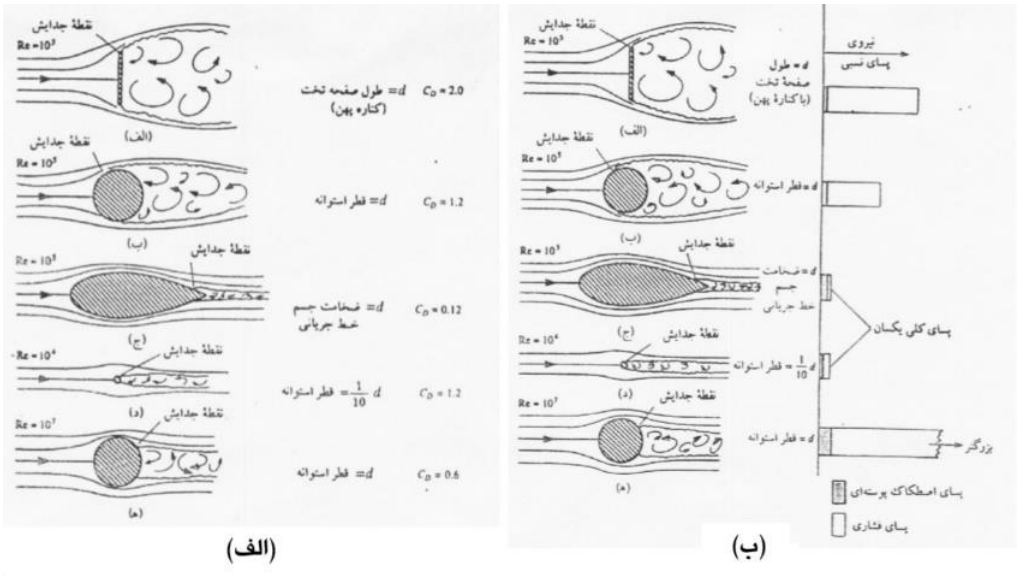
حالت سه بعدی بیشتر در مراحل پروازی و دینامیکی علم آیرودینامیک کاربرد دارد (Simiu,۱۹۷۸). در صورتی که حالت ایستایی شرایط پروژه حاضر ایجاب می‌کند که بحث تنها به نیروهای پسا و برا محدود شود. اجسامی که حول محورهای پسا و برا متقارن هستند (مانند ستون‌های ایوان‌های خارجی در مسیر جریان سیال) نیروی جانبی و گشتاورهای غلتشی و گردشی حذف می‌گردد و مسئله نیروها به صورت دو بعدی مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین به دلیل اینکه ستون‌های ایوان‌های خارجی بنای سلطانیه جزئی از بنا بوده و از بالا و پایین متصل به بنا می‌باشند، عملی از گشتاور پیچشی در ستون‌ها ملاحظه نمی‌شود (تصویر ۱۳).



تصویر ۱۳: نیروهای وارده بر یک ستون از طرف سیال در شرایط مختلف. (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)

در هنگام عبور سیال از سطح جسم نیروهای مقاومت در مقابل حرکت سیال به وجود می‌آیند، این نیروها شامل نیروی مقاوم فشاری (اختلاف فشار)، نیروی مقاوم اصطکاکی و نیروی مقاوم در اثر نیروی لیفت می‌باشد. تمام نیروهای مقاوم فوق به عنوان پسا یا نیروی درگ نام گرفته است که به شکل جسم و جنس سطح تماس بستگی دارد. تفاوت بین فشار زیاد در ناحیه سکون جلوی جسم و فشار کم در ناحیه جدا شده پشت جسم باعث ایجاد پسای بسیار زیادی می‌شود که به آن اصطلاحاً پسای فشاری می‌گویند. این پسا با مجموع تنش برشی روی سطح یا همان پسای اصطکاکی جمع شده، و پسای کل جسم را به وجود می‌آورد (White,۱۹۸٦؛ تصویر ۱۴).

$$C_D = (C_D)_{press} + (C_D)_{Fric}$$



تصویر ۱۴: تغییرات پسای اجسام با ضخامت های مختلف (White,۱۹۸٦)

۹. تئوری تشابه مدل

برای برقراری تشابه بین مدل و الگو باید اعداد بدون بعد حاکم در مدل و الگو با هم برابر باشند. برای تعیین ضرایب فشار برروی الگوی اصلی به وسیله اندازه‌گیری فشار در روی مدل نیاز به تشابه‌سازی می‌باشد که این تشابه‌سازی‌ها عبارتند از:

- تشابه هندسی که همان تشابه مرزهای هندسی می‌باشد.
- تشابه جنبشی که همان تشابه خطوط جریان سیال بر روی مدلی که تشابه هندسی دارد.
- تشابه دینامیکی که نیاز به تشابه نیروهای وارده بر نقطه‌ایی از الگوی اصلی و نیروهای وارده بر همان نقطه از مدل را دارد (White,۱۹۸٦).

۱۰. قانون برنولی و ضرایب فشار نیرو

برای یک المان جریان هوا که فشار کلی در تمام نقاط ثابت باشد، می‌توان نوشت که:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 = \text{Constant}$$

که P_1 و P_2 فشار استاتیک در دو نقطه جریان، V_1 و V_2 سرعت های هوا در نقاط مذکور و ρ چگالی سیال می‌باشد. در آیرودینامیک ضرایب نیرو و فشار نیز به ترتیب با روابط زیر قابل تعریف می‌باشد:

$$\text{ضریب نیرو} = \text{نیرو} / \frac{1}{2}\rho V^2 \longrightarrow C_f = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

$$\text{ضرایب فشار} = \text{اختلاف فشار} / \frac{1}{2}\rho V^2 \qquad C_p = \frac{P - P_2}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

قانون برنولی و ضرایب فشار نیرو در علم ایرودینامیک بسیار مهم به شمار می آیند (White,۱۹۸٦).

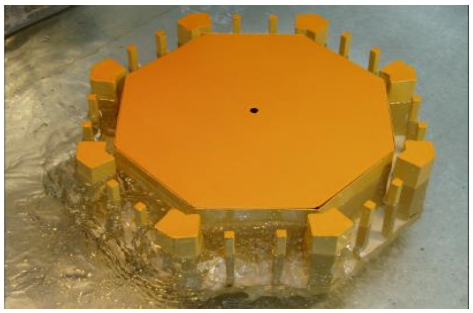
آزمایش مدل در تونل آب

موثرترین روش برای تحقیقات در زمینه آیرودینامیک تجربی آن است که جریان سیال (آب، هوا و یا هر نوع گاز یا سیال دیگر) را به صورت کنترل شده از روی نمونه و یا مدل جسم مورد نظری که در جای خود ثابت می‌باشد، عبور داده شود. دستگاهی که به تواند جریان سیال را کنترل کند و امکان بررسی خطوط جریان در پیرامون جسم را به دهد تونل آب و تونل باد می‌باشد.

در پروژه حاضر از تونل آب برای مشاهده عینی رفتار جریان سیال بر روی مدل بنای سلطانیه (مدل ایوان‌های طبقه فوقانی بنا) استفاده گردید. به این ترتیب نتایج بررسی مشاهدات پیرامون مدل بر اساس زاویه برخورد جریان به مدل، به شرح زیر است:

زاویه صفر درجه

۱. جریان در برخورد به وجه روبرویی مدل حالت ایستایی (فشار سکون) داشته و برگشت جریان پس از برخورد به این قسمت از مدل نمایان بود، بطوریکه حالت ضربانی در آن مشاهده گردید.
۲. سرعت جریان در حالت تمایل به سمت جانبی مدل (در بالا دست مدل) افزایش داشته و باعث ایجاد حرکت‌های دورانی و پیچشی[۱۰] در اطراف جرزها و ستون‌ها می‌شد. با تغییرات سرعت جریان آب جایگاه ورتکس‌ها نیز تغییر پیدا می‌کرد.
۳. سرعت جریان سیال بر روی وجه جانبی مدل بیشترین مقدار خود را داشته است و حرکت‌های دورانی و پیچشی جریان حول جرزها و ستون‌های جانبی نسبت به بالا دست مدل افزایش یافته و جایگاه تشکیل ورتکس‌ها نیز عوض شده بود.
٤. سرعت جریان سیال در تمایل به پشت مدل (در پایین دست مدل) به تدریج کاهش یافته که این حالت موجب کمتر شدن سرعت حرکت‌های دورانی پیرامون ستون‌ها می‌شد. با کاهش سرعت جریان، فضای خالی پشت مدل به تدریج پدیدار گشته که جدایش جریان از مدل را نشان می‌داد.
۵. جریان در پشت مدل کاملاً در حالت ایستا و بدون حرکت بوده و فضای خالی در پشت مدل کامل گردید. اما حرکت ضربه‌ای متناوب آرام پیرامون ستون‌های پشت مدل مشخص بود. این حرکت تناوبی از برخورد جریان آب از پشت مدل با فضای خالی ایجاد شده در همان محل تشکیل می‌شد (تصویر ۱۵).

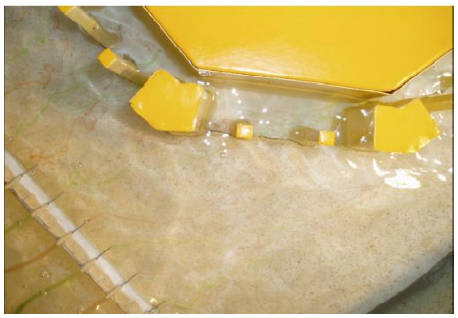


تصویر ۱۵: نمونه‌ای از رفتار جریان آب پیرامون مدل با زاویه صفر درجه. (مأخذ: نگارندگان ۱۳۹۸)

[۱۰] Vortex

زاویه ۲۲/۵ درجه

۱. جریان آب در برخورد به لبه یکی از جرزهای مدل (گوشه مدل) به دو قسمت تقسیم شده و به طرفین مدل هدایت پیدا می‌کرد. بر خلاف زاویه صفر درجه، فشار سکون و برگشت جریان مشاهده نمی‌شد.
۲. سرعت جریان در تمایل به سمت جانبی جرز روبرو، بیشتر شده و در برخورد به ستون‌های کناری، حرکت‌های دورانی و پیچشی (ورتکس) را در پیرامون ستون‌ها به وجود می‌آورد.
۳. سرعت جریان سیال در بیرون وجه جانبی به بیشترین مقدار خود رسیده و ورتکس‌ها در اطراف ستون‌های این وجه با شدت بیشتری در حال حرکت دورانی می‌بود.
٤. سرعت جریان در تمایل به وجه پشتی مدل، کاهش پیدا کرده و موجب کم شدن شدت حرکت دورانی سیال پیرامون ستون‌ها می‌شد.
٥. در پشت مدل فضای خالی ظاهر شده و جریان حالت ایستایی پیدا کرده، به طوری که در این ناحیه سرعت جریان به صفر می‌رسد (تصویر ۱۶).

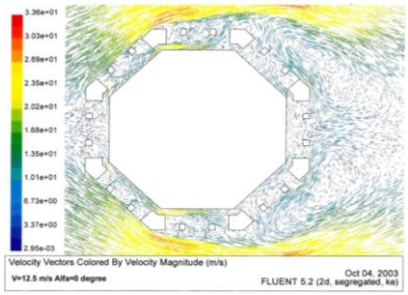


تصویر ۱۶: نمونه‌ای از رفتار جریان آب پیرامون مدل با زاویه ۲۲/۵ درجه. (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)

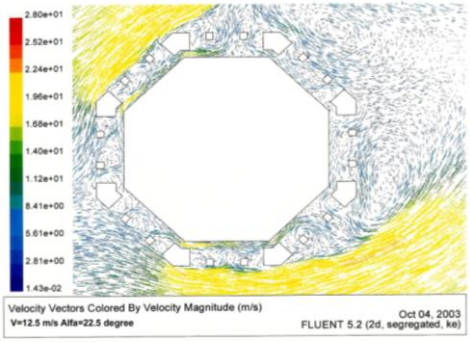
۱۱. روش شبیه‌سازی کامپیوتری برای جریان سیال پیرامون ایوان‌های طبقه فوقانی بنای سطانیه

در این روش از دو نرم افزار گمبیت[۱۱] و فلوئنت که مکمل یکدیگر هستند، برای شبیه‌سازی کامپیوتری جریان سیال بر روی مدل هندسی بنای سلطانیه استفاده شد. هندسه مدل در نرم افزار گمبیت ساخته شد. پس از تعیین شرایط مرزی با استفاده از نرمافزار فلوئنت، شرایط حرکت جریان سیال (باد و آب) بر روی مدل هندسی را با آنچه که در واقعیت رخ می‌دهد، مشابه‌سازی کرده و حالت‌های مختلف در نظر گرفته شد. تصاویر ۱۷ و ۱۸ نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت برای رفتار جریان سیال پیرامون مدل با سرعت ۱۲/۵ متر بر ثانیه در حالت آشفته و در دو زاویه برخوردی را نشان می دهد. هماهنگی تقارنی فرسایش دیواره‌های جانبی ایوان های فوقانی بنای سلطانیه با تقارن رفتار جریان سیال پیرامون مدل در زاویه برخورد ۲۲/۵ درجه به مدل محاسباتی موجب شد که از بین دو نمونه نهایی سرعت ۱۲/۵ متر بر ثانیه با حالت آشفته در زوایه برخورد ۲۲/۵ درجه به عنوان انتخاب نهایی تعیین شود.

[۱۱] Gambit



تصویر ۱۷: روش شبیه‌سازی کامپیوتری برای جریان سیال پیرامون ایوان‌های طبقه فوقانی بنای سطانیه. (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸).



تصویر ۱۸: روش شبیه‌سازی کامپیوتری برای جریان سیال پیرامون ایوان‌های طبقه فوقانی بنای سطانیه (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)

نتیجه گیری

انتظار می‌رود با توجه به قرار گرفتن این بنا در این منطقه و پایداری آن پس از ۷۰۰ سال سازه‌ای در این بنا دیده شود که توانسته باشد باد غالب منطقه بر روی بنا را مهار کند و بنا را تا به امروز پویا و پایا نگه دارد. با مطالعه و مقایسه نقش هر یک از اجزاء هندسی معماری بنا با یکدیگر، حضور ایوان‌های خارجی تو در تو به صورت طرح هشت ضلعی بر روی جرزهای قطور در ارتفاع، نمایشی جدید از ذهنیت معماری است که تلاش کرده تا عنصر پایداری بنا را با طبیعت هماهنگ کند. فرسایش‌های روی دیواره‌های جانبی ستون‌های این ایوان‌ها تاییدی بر نقش کاربردی این ایوان‌ها در مهار باد است.

انتخاب ایوان‌های خارجی تو در تو در ارتفاع ۱۹ متری از سطح زمین در بنای سلطانیه بر اساس نوعی شناخت با پدیده آهنگ افزایش سرعت باد، با ارتفاع، شکل گرفته، به طوری که این ایوان‌ها می‌تواند سرعت بالای جریان هوای برخوردی به بنا و نیروی ناشی از آن را کنترل و ایستایی بنا را تضمین کند.

حضور پنجره‌های کوچک در داخل ایوان‌ها نقش دیگری از کاربرد ایوان‌ها را مطرح می‌کند. جریان هوا با سرعت زیاد با بی‌نظمی خاص به داخل ایوان‌ها هدایت می‌شود به طوری که در دیواره‌های انتهایی ایوان‌های جانبی فزونی سرعت دیده می‌شود. افزایش سرعت، کاهش فشار به همراه داشته و موجب می‌شود، هوای داخل بنا متناسب با اختلاف فشار فضای بیرون و درون در این قسمت از بنا از پنجره‌ها خارج شود. این عملکرد نقش ساختار و جایگاه ایوان‌ها را در تهویه بنا مطرح می‌کند(اصل قانون برنولی).

اجرای طرح هشت ضلعی ایوان‌ها علاوه بر اینکه توانسته اجزاء معماری بنا را با یکدیگر هماهنگ کند با قرار گرفتن بر روی جرزهای قطور به جهت نزدیک شدن به طرح دایره کمترین ضریب پسای بازدارندگی در مقابل جریان هوا را شامل شده است (تصویر ۱۴). تقارنی که بر اساس میزان فرسودگی‌های دیواره‌های جانبی ستون‌های ایوان‌های خارجی بنای سلطانیه در نمودار (۲) ظاهر گردیده، این موضوع را بیان می‌دارد که ضرورتاً رفتاری متقارن از عملکرد جریانی در این قسمت از بنا صورت پذیرفته و نیز تقارن مشاهده شده تحت زاویه ۲۲/۵ درجه نسبت به محور طولی بنا در راستای گوشه شمال شرقی به گوشه جنوب غربی طرح هشت ضلعی ایوان‌های خارجی در جهت باد غالب منطقه می‌باشد. باد غالب در این منطقه از دو جهت شمال شرقی و جنوب غربی بوده به طوری که از اواخر بهار تا اوایل پاییز باد خشک شمال شرقی و از اوایل پاییز تا اواخر بهار باد جنوب غربی توام با ریزش‌های جوی منطقه را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. به این ترتیب می‌توان اطمینان حاصل کرد که معمار آن زمان با شناخت جریانات جوی طرحی را جهت پایداری و استقامت بنا در نظر گرفته که به تواند کمترین ضریب پسای بازدارندگی و بیشترین مقاومت را در مقابل جریانات هوایی داشته باشد.

طی بررسی‌های جریانات هوایی در کنار هر یک از دیواره‌های آسیب دیده مورد نظر به سه روش میدانی، آزمایشگاهی و شبیه‌سازی کامپیوتری و نیز مقایسه ترسیمات برداری، داده‌های عددی و نمودارهای مربوط به نیروهای عمودی و موازی با سطح، در کنار دیوارهٔ هر یک از ستون‌ها که به صورت نمودارهای ضریب اصطکاکی نمایش داده شده است؛ مطابق شکل (۱۹و۲۰) که به عنوان نمونه موردی یک ستون از مجموع کل دیاگرام‌ها، در اینجا آورده شده است؛ معلوم گردید :

- جهت و میزان نیروهای وارده به هر ستون تابع جهت بردار سرعت در آن مکان است.
- میزان نیروهای وارده به هر ستون بر اساس چگالی هوا، مجذور سرعت وارده، سطح تماس و ضریب باز دارندگی تعیین می‌شود و با افزایش هر یک از این پارامترهای تعیین کننده نیرو، مقدار نیروی وارده افزایش یافته و ستون بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به طوری که در هر ستون با توجه به محل برخورد (نیرو) نوع و میزان نیروی وارده، و نوع مصالح عکس‌العمل‌هایی تحت عنوان فرسایش ملاحظه شده است. نحوه و مقدار قسمت‌های فرسایش یافته بر اساس نوع نیروی وارده و نوع مصالح با یکدیگر تفاوت دارند.
- به طور کلی دیواره‌های ستون‌های ایوان‌های خارجی تحت تأثیر دو نوع نیروی حاصل از جریانات هوایی قرار گرفته‌اند.

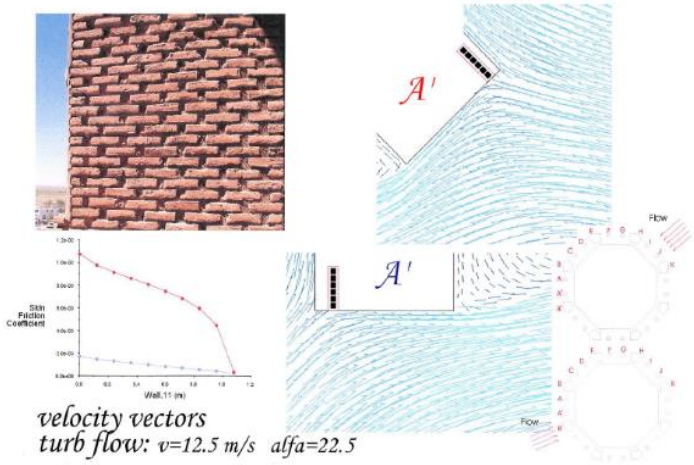
الف) نیروی عمود بر سطح (نیروی فشاری)؛

ب) نیروی موازی با سطح (نیروی اصطکاکی).

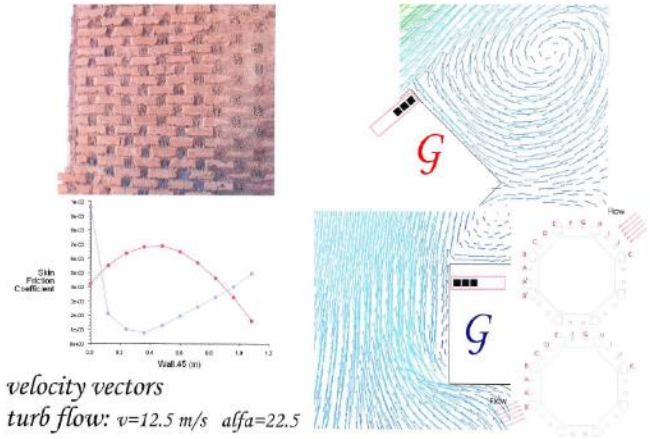
هر یک از این نیروها می‌تواند متاثر از حرکت جریان‌های هوایی کل منطقه و حرکت جریان های محلی (ناحیه ای) که در اثر موقعیت مکانی قسمت‌های مختلف بنا شکل گرفته است، باشد. جهت مثبت نیروهای عمودی هم جهت با حرکت جریان هوا عمود بر سطح ستون می‌باشد، خلاف این موضوع به عنوان نیروی عمودی منفی تلقی می‌شود و در صورتی که هر یک از نیروها زوایه‌دار با ستون باشد با تجزیه آن در راستای مختصات ستون به مطالعه نیروها پرداخته می‌شود.

نیروی موازی با هر ستون (نیروی اصطکاکی) تابع جهت و اندازه بردار سرعت به موازات سطح بوده و جهت مثبت آن از خارج به داخل ستون می باشد.

- در نقاطی که نیروهای عمودی مطرح است ضریب اصطکاکی کاهش و در نقاطی که نیروهای موازی مطرح باشد ضریب اصطکاکی افزایش می‌یابد.
- با بررسی و مقایسه نمودارهای ضریب اصطکاکی با فرسایش ستون‌ها ملاحظه می‌گردد لبه‌های ستون‌ها که بیشترین آسیب را دیده‌اند در معرض نیروهای عمودی قرار گرفته و قسمت‌هایی از ستون‌ها که نیروهای موازی با سطح بر روی آنها اعمال شده، آسیب دیدگی کمتری داشته‌اند. به این ترتیب از نقش تخریبی نیروهای موازی حاصل از جریان هوا بر روی ستون‌ها که بسیار ناچیز است صرف نظر می‌شود.
- جریان‌های هوا پیرامون ستون‌ها بر اساس ساختار هندسی ستون‌ها و برخورد جریان‌ها، حرکاتی دورانی و پیچشی در لبه‌های ستون‌ها اجرا می‌کنند. ابتدا و پایان برخورد حرکت‌های پیچشی جریان هوا در لبه ستون‌ها به صورت مستقیم یا زوایه‌دار، نیروهایی عمودی را در راستای محور مثبت یا منفی مختصات ستون، به ستون وارد می‌کنند که به عنوان نیروهای عمودی مکانی شناخته شده است. تأثیر نیروهای عمودی مکانی در نقاطی از ستون‌های ایوان‌ها قابل ملاحظه می‌باشد که در فصل زمستان تحت تاثیر نیروهای عمودی منطقه‌ایی ناشی از باران قرار گرفته باشند. نیروهای عمودی مکانی که در راستای محور مثبت مختصات ستون به ستون وارد می‌شوند به همراه انتقال انرژی به دیواره ستون‌ها، حرکاتی ضربه‌ای و لرزشی به لبه ستون‌ها اعمال می‌کنند. مصالحی که ذرات آن تراکم اولیه خود را از دست داده‌اند در مقابل ضربات و ارتعاشات ایجاد شده، امکان جایه جایی ذرات را فراهم می‌سازند. نیروهای عمودی مکانی که در راستای محور منفی مختصات ستون به ستون وارد می‌شوند، به علت کاهش سرعت در اثر اصطکاک و پیدایش فضای خالی در لبه‌های ستون‌ها، حرکاتی لرزشی و مکشی به ستون اعمال می‌کنند. مصالح آسیب‌پذیر در مقابل این عمل جدایش ذرات را به همراه خواهند داشت.
- با بررسی بر روی مجموع نیروهای وارده بر هر ستون، مسلم گردید با مصالح نقاطی از ستون‌ها که در معرض نیروهای عمودی حاصل از جریانات هوایی منطقه با چگالی بالاتر قرار گرفته‌اند، انسجام اولیه خود را از دست داده و با قرار گرفتن در مقابل نیروهای عمودی مکانی مثبت و منفی، به تدریج طی تکان‌ها و لرزش‌های مکرر ناشی از نیروهای فوق بر روی ذرات مصالح، جدایش ذرات براساس نوع مصالح عملکرد های متفاوتی را ارائه داده است.



شکل ۱۹: نیروی عمود بر سطح (نیروی فشاری). (مأخذ: نگارنده‌گان، ۱۳۹۸)



شکل ۲۰: نیروی عمود بر سطح (نیروی فشاری) (مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸)

پیشنهادها

برای پیشگیری از این فرسایش احتمالی می‌بایست طرحی را انتخاب کرد که بتواند نیروهای عمودی مکانی و نیروهای عمودی منطقه‌ای ناشی از باران را کنترل نماید. کنترل جریان هوا در ایوان ها می‌تواند نیروی عمودی مکانی را حذف کند اما نیروی عمودی منطقه‌ای به صورت نهفته عملکرد فرسایشی خود را انجام می‌دهد. بنابراین می‌بایست راهکاری اتخاذ کرد که بتواند نقش اولیه فرسایش یعنی نیروهای عمودی منطقه‌ای ناشی از باد و باران را کنترل نماید. این عمل تأثیر نیروهای عمودی مکانی را نیز تحت‌الشعاع قرار خواهد داد. روش‌های زیر پیشنهاداتی است که می‌تواند با تغییر در جهت و نوع جریانات جوی منطقه، بنا را از تدثیر نیروهای وارد بر آن مصون بدارد:

۱. ایجاد دیواره‌های مشبک متحرک در فاصله‌های دور از بنا، این سیستم‌ها به طور اتوماتیک عملکرد خود را جهت کنترل پروفیل سرعت جریان باد در برخورد به بنا با شدت و جهت باد برخوردی، هماهنگ می‌کنند.
۲. احداث تابلوهای تبلیغاتی بلند و متناسب با جایگاه علمی و باستانی بنا در مسیر جریان هوا به منظور کنترل پروفیل سرعت جریان باد غالب.

۳. کاشت درختان بلند (درخت تبریزی) به عنوان دیواری سبز جهت کنترل پروفیل سرعت جریان باد غالب.
٤. پوشش بنا توسط توری بزرگ مانند پوشش توری باغ پرندگان در اصفهان به منظور کم کردن سرعت و آرام نمودن جریان هوای برخوردی به بنا.
٥. نصب مکانیزم های چرخان در پشت بام بنا جهت ایجاد پوشش های رولی به منظور جلوگیری از برخورد مستقیم باد و باران به بنا. جنس این پوشش ها می تواند حصیری یا پلی اتیلن شفاف باشد.
٦. پوشش های نازک و چسبنده شفاف برروی مصالح.

علاوه بر پیشنهادات فوق هر عامل دیگری که بتواند جریان برخوردی به بنا را کنترل نماید به عنوان نقشی موثر در کاهش فرسایش تخریبی حائز اهمیت خواهد بود.

در صورتی‌که این روند فرسایشی پیشگیری نشود به زودی با تخریب ملاط‌ها شاهد ریزش‌های تدریجی آجرها بر روی یکدیگر خواهیم بود. با توجه به اهمیت جایگاه ریزش‌های آجرها بر روی یکدیگر در پایداری و استقامت بنا، می‌توان امروزه با انتخاب راهکارهایی از از تخریب این نقاط جلوگیری کرده و حفظ بنا را تضمین کرد. در غیر این صورت پس از گذشت مدتی عاملی که قابلیت کنترل دارد می‌تواند شیرازه بنا را فرو ریزد.

تقدیر و تشکر

دراینجا بر خود لازم می دانم تا مراتب سپاس و قدردانی خود را از مرحوم جناب آقای دکتر مسعود آذرنوش که اینجانب را در انجام این پروژه یاری نمودند، اعلام و این مقاله را به روح آن استاد بزرگوار و وارسته تقدیم نمایم.

منابع

القاشانی، ابوالقاسم عبدالله بن علی بن محمدبن ابی طاهر. (۱۳۴۸). *تاریخ الوجایتو*. به اهتمام مهین همبلی. تهران: بنگاه ترجمه و نشر کتاب.

پیرنیا، محمد کریم. (۱۳۷۸). *مصالح ساختمانی (آژند، اندود، آمود) در بناهای کهن ایران*. به کوشش زهره بزرگمهری. تهران: نشر سازمان میراث فرهنگی کشور(پژوهشگاه).

ثبوتی، هوشنگ. (۱۳۸۰). *معماری گنبد سلطانیه در گذرگاه هنر*. تهران: نشر پازینه.

ثقفی، محمود (۱۳۷۲). *انرژی باد و کاربرد آن در کشاورزی*. تهران: نشر دانشگاه تهران.

جوادی، آسیه (۱۳۶۳). معماری گنبد سلطانیه «معماری ایران». تهران: انتشارات مجد.

زمانیان، محمدتقی. (۱۳۸۲). *باد در سواحل ایران «مطالعه موردی بندرعباس»*. تهران: پروژه مطالعاتی وزارت راه و ترابری، سازمان هواشناسی کشور.

فروتنی، سام. (۱۳۷۹). *مصالح و ساختمان*. تهران: روزنه.

مخلصی، محمد علی. (۱۳۶۴). *جغرافیای تاریخی سلطانیه*. تهران: نشرمولف.

منجمی، محمد. (بی تا). *هواشناسی*. ج ۱. تهران: دانشگاه تهران.

نصیری، محمد. (۱۳۷۵). *بررسی جریان باد درسایت برج مخابراتی تهران(میلاد)*. تهران: مرکزتحقیقات آیرودینامیک دانشگاه علم و صنعت ایران.

نصیری، محمد. (۱۳۷۵). بررسی جریان باد در ساختمان جانبی و مدل های برج میلاد. تهران: مرکز تحقیقات آیرودینامیک دانشگاه علم و صنعت ایران.

ویلبر، دونالد نیوتن. (۱۳۴۶). *معماری اسلامی ایران در دوره ایلخانان*. ترجمه عبدالله فریار. تهران: بنگاه ترجمه و نشر کتاب.

Evens, H.L. (۱۹۸۸)." Laminar Boundary Layer Theory" Addison Wesley pub.

Goldstein, R.G. (۱۹۸۳). "Fluid Mechanics Measurements" Hemisphere pub, Nework.

Shames,L.H. (۱۹۸۵). " Mechanics of Fluids" MC Graw-Hill Book Co.

Simiu, E. (۱۹۷۸). "Wind Effects On Structures" John Wiley & Sons.

White, F.M. (۱۹۸٦). "Fluid Mechanics" ۲nded., MC Graw-Hill, Nework.

Yuan, S.W. (۱۹٦۷). "Fundamentals of Fluid Mechanics", Prentice Hall.