نگرشی نو در بررسی جریان هوای متلاطم اطراف ساختمان‌های بلند برای مدیریت فضای برج‌سازی

نویسندگان: هوشیار ایمانی کله سر[۱]، بهناز نیکنام[۲]،یاشار ایمانی کله سر[۳]

[۱] استادیار، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران,hek@uma.ac.ir

[۲] *دانشجوی کارشناسی ارشد سازه،دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرمی،اردبیل،ایران، behnazniknam@gmail.com*

[۳] *دانشجوی کارشناسی ارشد سازه،دانشگاه آزاد اسلامی واحد میانه،اردبیل،ایران، yasharimani@gmail.com*

چکیده

در این مقاله،اشاره‌ای به آثار مخرب بادبر روی برج‌ها و ساختمان‌های بلند می‌شود و دو نوع مدل‌سازی در مورد ساختمان‌های بلند به‌صورت تنها و دوتایی در تونل باد انجام‌گرفته است که ضمن تائید پژوهش حاضر باکارهای قبلی میزان افزایش سرعت بازخورد باد به ساختمان‌های بلند در اطراف آن و در ارتفاع از سطح زمین اندازه‌گیری شده است. این بررسی نشان می‌دهد که سرعت باد در اطراف ساختمان‌های بلند به‌اندازه عرض ساختمان از بر ساختمان به‌اندازه ۱.۲ الی ۱.۴ نسبت به ارتفاع از سطح زمین افزایش‌یافته لذا فشار بر ساختمان‌های بلند یا کوتاه دیگر که در آن نواحی قرار بگیرند به‌اندازه ۱.۵ الی ۲ برابر افزایش می‌یابد. این بررسی نشان می‌دهد که محل قرار گرفتن وسایل کمکی مانند تاور کرین در کنار ساختمان‌ها در محدوده کمتر از عرض آن‌ها قرار گیرد، در این صورت آن وسایل ایمن خواهند بود. با توجه به گلباد منطقه، شهر سازان محترم، جهت تفکیک زمین‌های مسکونی، تجاری واداری باید مسائل ناشی از رزونانس باد را مدنظر قرار دهند.

کلمات کلیدی

تلاطم، آشفتگی،کنتور سرعت،پیچک،لایه‌مرزی،هم‌جواری،

۱- مقدمه

دلیل عدم ساخت کثیر ساختمان‌های بلند، افزایش تصاعدی احتمال آثار مخرب بادبر آن‌ها و مزاحمت حرکت هوای اطراف آن‌هاست. برای حذف این آثار مخرب و مزاحم، هزینه‌های گزافی خرج می‌شود ولی گاهی بشر به دلایل توجیهی و برآورد اقتصادی و توریستی و مقاصد چندمنظوره ناگزیر به ساخت آن‌هاست و اولین مکتوب در کتب در مورد باد و خلق آن توسط امام اول شیعیان علی (ع) درنهج البلاغه آمده است ولی استفاده علمی از آن به دلایل آئرودینامیکی و موارد دیگر به سلسله کان در مصر نسبت داده می‌شود؛ و اولین بار به‌صورت علم امروزی برای کارهای فنی و مهندسی،مهندس ایفل (۱۸۸۰) به اهمیت نیروی باد در طراحی سازه‌ها پی برد. شاید تا قبل از ساخته‌شدن سازه‌های بلند، اهمیت نیروی باد به‌درستی شناخته‌نشده بود. مثلاً ساختمان‌هایی که ۵۰۰ متر ارتفاع دارند باید ۵۰ برابر قوی‌تر از ساختمان‌های همنوع باشند که ارتفاع ۶۰ متر داشته و در طی سال‌های ۱۹۴۰ ساخته می‌شد، بنابراین توسعه‌دهنده‌ها به خاطر عدم اطمینان از پایداری و استقامت برج‌ها و آسمان‌خراش‌ها و ساختمان‌های بلند از ساختن ساختمان‌های بالای ۳۰ طبقه، دلسرد شدند.در حال حاضر مهندسان با پیشرفت‌های علمی و تکنولوژی، دست به شیوه نوین ساختمان‌سازی با ارتفاعات زیاد زده‌اند که مکانیسم این

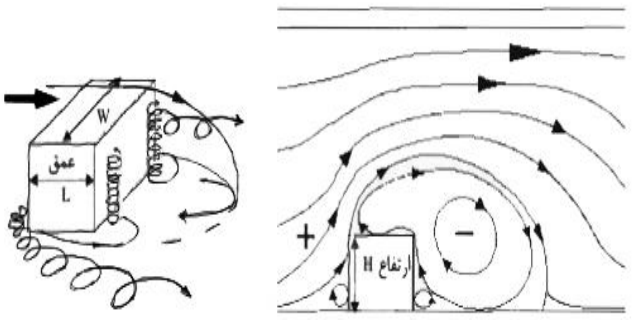
شیوه معماری آن‌ها بدین‌صورت است که این بناها به‌صورت کامل و مجزا در کارخانه شده و در محل نصب می‌شوند؛ یعنی واحدها به‌صورت مجزا با تمام تأسیسات الکتریکی، مکانیکی، تهویه مطبوع و ...، در کارخانه تکمیل و ساخته‌شده و سپس روی هسته مرکزی بتنی موجود در سایت نصب می‌شوند که با ساخت اولین بنای متحرک در دوبی توسط ایتالیایی‌ها بر اساس طرح دیوید فیشر، عصر تازه‌ای در معماری آغاز می‌شود. عنصر معماری دینامیک این ساختمان ۸۷ طبقه‌ای طوری سازمان‌یافته که هر طبقه به‌طور مجزا در اثر عوامل طبیعی از قبیل باد و خورشید حرکت می‌کند و مجموعه‌ی ساختمان هرلحظه به شکل تازه‌ای درمی‌آید.

در جریان آب رودخانه اگر هیچ مانعی در مسیر آن وجود نداشته باشد آب در خطی مستقیم و بسیار آرام حرکت می‌کند. این جریان لایه‌ای (آرام) است. چنانچه جسمی مانند سنگ، علف و یا شاخه در مسیر آب باشد، آب به چرخش و جست‌وخیز درآمده و جریان متلاطم (آشفته) به وجود می‌آید. حرکت‌های چرخشی آب،گردابه نام دارند. همین اتفاق هنگامی‌که باد در اطراف یک سازه‌ی بلند مانند ساختمان یا درخت می‌وزد رخ می‌دهد؛ بنابراین جریان هوای اطراف ساختمان‌ها و تأثیرگذاری فشار و مکش حاصل از آن بر روی دیگر سازه‌ها و بناها و محیط اطراف نیز بسیار حائز اهمیت است؛ که در شهرسازی خیلی حائز اهمیت است.

دیدن جریان تلاطم در هوا بسیار دشوارتر از دیدن جریان تلاطم آب است. گاهی دانشمندان آزمایش‌هایی کنترل‌شده‌ای با استفاده از دودهای رنگی انجام می‌دهند تا بتوانند جریان هوا را مشاهده و بررسی کنند.

۲- شرح موضوع

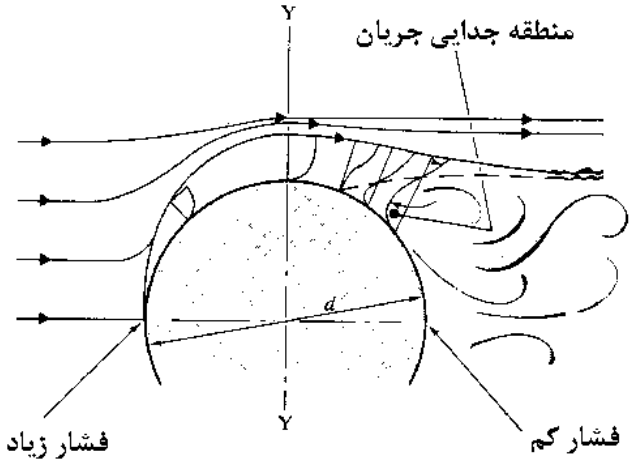
اختلاف فشار هوا بین دونقطه موجب حرکت هوا می‌شود. این اختلاف فشار می‌تواند حاصل تفاوت چگالی ناشی از تفاوت دمای هوا در این دونقطه و یا فشار مثبت و منفی ایجادشده در اثر باد باشد. حرکت افقی هوا را باد گویند. باد در برخورد با ساختمان‌های کوتاه تا ساختمان‌های بلند عملکرد متفاوتی دارد که باید شهر سازان محترم آن را مدنظر قرار دهند برای مثال در تفکیک اراضی شهری با کاربری‌های مختلف اساس کار را علاوه بر مسائل تخصصی خودشان،نحوه گردش هوا و باد و نحوه عملکرد آن را موردبررسی قرار داده و تصمیم بگیرند، چه‌بسا در بعضی موارد علاوه بر خسارات جبران‌ناپذیر، مسائل دیگری را باعث می‌شود چه، طوفان چند سال پیش تهران مؤید این مطلب است. نمونه‌ای از جریان هوا حول‌وحوش ساختمان‌ها در شکل (۱) مشاهده می‌شود. چون در شهرها،ساختمان‌ها به‌صورت تجمعی ساخته می‌شوند لذا اثر بادبر ساختمان‌ها را باید به‌صورت هم‌جواری آن‌ها نیز بررسی کرد که در این صورت‌مسئله را به دو حالت می‌توان بررسی کرد.۱-لرزش ساختمان‌ها و تأثیر متقابل آن‌ها.۲- گردش هوای اطراف آن‌ها. در این مقاله یک توضیح مختصری از هردو مورد داده و بعد جریان هوای اطراف برج‌ها و ساختمان‌ها چه ازنظر سرعت و چه ازنظر فشار موردبررسی قرار خواهد گرفت.



شکل (۱) توزیع فشار باد در اطراف ساختمان

۲-۱-آئرودینامیک لایه‌مرزی

هنگامی‌که جسم در معرض جریان سیالی قرار می‌گیرد، لایه‌ای نازک در جریان (و چسبیده به جسم) ایجاد می‌شود که خصوصیاتش با نواحی دیگر جریان سیال فرق می‌کند. این لایه در اثر خاصیت چسبندگی سیال (viscosity) به وجود می‌آید (شکل۲).

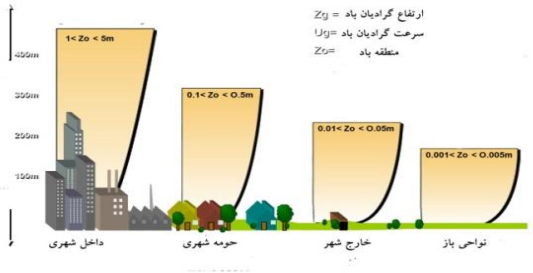


شکل (۲) نمایش منطقه جدایی جریان

در این ناحیه سرعت سیال از صفرتا ۹۹ درصد سرعت جریان آزاد، تغییر می‌کند. لایه‌مرزی خودش به دو بخش ناحیه آرام (laminar) و مغشوش یا آشفته (turbulent) تقسیم می‌شود که هرکدام دامنه گسترده‌ای از تحقیقات و مطالب علمی دارند. همچنین وضعیت پروفیل سرعت باد نیز بسته به منطقه قرارگیری و زبری و صافی منطقه اطراف تغییر می‌کند (شکل۳).

۲-۲-تلاطم

اگر بخواهند صفات یک باد را مدل کنند به تلاطم و پروفیل سرعت متوسط باد در ارتفاع از سطح زمین اشاره می‌کنند. در اینجا ابتدا از تلاطم سخن رانده می‌شود و سپس آثار بادبر ساختمان‌ها عنوان می‌شود. تلاطم عبارت است از جریانات آشفته هوائی که می‌تواند براثر عبور هوا از روی جسم جامد یا عبور یک سیال از روی سیال دیگر و یا جابجایی توده‌های مختلف هوا به وجود می‌آید. در دینامیک سیالات، تلاطم، آشفتگی یا جریان آشفته به‌نوعی رژیم جریان اطلاق می‌شود که مشخصه آن تغییرات تصادفی است.



شکل (۳) نمایش منطقه جدایی جریان در مناطق مختلف

بااین‌وجود اغلب ادعا می‌شود که تعریف دقیقی برای آشفتگی وجود ندارد و بسیاری از محققان از تعاریف ارائه‌شده درگذشته استفاده می‌کنند. یکی از بهترین تعاریف توسط تئودوره فون کارمن(۱۸۸۱-۱۹۶۳) ارائه‌شده است که می‌گوید، آشفتگی حرکت نامنظمی است که عموماً زمانی که سیالات از روی سطوح جامد عبور می‌کنند و یا حتی هنگامی‌که جریان‌هایی از یک نوع سیال در مجاورت سیال دیگر و یا عبور از روی یکدیگر، دیده می‌شود. برای به دست آوردن این مقدار از واحدی به نام عدد رینولدز که پارامتری بدون بعد است استفاده می‌کنند.

بیان توضیحی نظری برای آشفتگی یکی از قدیمی‌ترین مسائل حل نشده فیزیک است. ریچارد فاینمن (۱۹۱۸-۱۹۸۸) از این مسئله به‌عنوان مهم‌ترین مسئله حل‌نشده فیزیک کلاسیک یادکرده است. یکی از تفاوت‌های جریان‌های آشفته با آرام در نوع حرکت ذرات است که هرچه آشفتگی بیشتر باشد حرکت ذرات بی‌نظم‌تر خواهد بود. این تفاوت اولین بار توسط ازبورن رینولدز (۱۸۸۳) و از طریق پرتاب جوهر با سرعت‌های متفاوت در یک محفظه آب انجام شد و نتیجه حاکی از آن بود که هرچه سرعت جوهر بیشتر باشد حرکت جوهر در آب شکل بی‌نظم‌تری می‌گیرد. وجود آشفتگی با عدد بی‌بعد رینولدز طبق رابطه (۱) تعیین می‌شود:

$$R_e = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\upsilon} = \frac{QD}{\upsilon A} \qquad (۱)$$

که در آن v سرعت مشخصه سیال،D طول مشخصه،μ ضریب گرانروی ρ(kg/m^3) (ν=μ/ρ) یا ν ضریب گرانروی سینماتیکی (m^2/s) (s/m^2 • s or N • Pa) چگالی سیال،Q دبی حجمی (m^3/s) و A مساحت مشخصه جریان (m^2) است.

۲-۳-پاسخ ساختمان به باد

پاسخ ساختمان‌های بلند در برابر باد که دارای سیستم سه‌بعدی می‌باشند در سه امتداد رخ می‌دهد:

۱) پاسخ در امتداد وزش باد
۲) پاسخ در جهت عمود بر وزش باد
۳) پاسخ‌های پیچشی

که از میان این سه پاسخ، پاسخ عرضی سازه بسیار تأثیرگذار می‌باشد. پاسخ عرضی ساختمان‌های بلند بخصوص با پلان مربع یا مستطیلی شکل، زمانی که متوسط جهت وزش باد نسبت به یک سطح به حالت عمود نزدیک می‌شود، حساس می‌باشد. پاسخ ساختمان‌های بلند می‌تواند ناشی از پدیده‌های زیر باشد ساندرز (۱۹۷۴) :

۱) آشفتگی
۲) پدیده تازش
۳) ارتعاشات منطقه پشت
۴) پاسخ ضربه‌ای

در اثر برخورد باد با ساختمان دارای گوشه‌های تیز خطوط جریان هوا از محیط ساختمان جدا می‌شوند. این جدایی خطوط جریان که عموماً از شکل محیطی بدنه ساختمان تبعیت می‌کند، موجب بروز جریان‌های آشفته‌ای در اطراف ساختمان می‌گردد. به‌طورکلی شکل این جریان‌ها به‌صورت جریان‌های گردبادی می‌باشد که در هرلحظه تغییر جهت می‌دهند. به‌طور واضح‌تر در یک‌لحظه این گردبادها در جهت حرکت عقربه‌های ساعت و لحظه‌ای بعد در جهت خلاف آن دوران می‌کنند. تأثیر این‌گونه جریان‌های گردبادی بر روی سازه به‌صورت حرکت عرضی سازه ظاهر می‌شود که اصطلاحاً به این نوسانات، نوسان در جهت عمود بر باد گفته می‌شود؛ که یکی از مخرب‌ترین پاسخ‌هاست و اگر دقت کافی در این مورد صورت نپذیرد چه از طرف شهر سازان در موقع تفکیک زمین‌ها و درنتیجه جهت گذاری ساختمان‌ها با توجه به گل باد منطقه و چه ازنظر مهندسان سازه حوادث فاجعه باری به وجود خواهد آمد.

۲-۴-اثر هم‌جواری ساختمان‌ها در مقابل باد

درصورتی‌که بار باد وارد بر ساختمان‌های بلند هم‌جوار با ساختمان‌های دیگر می‌تواند باشد نسبت به حالتی که ساختمان به‌صورت تکی قرار دارد کاملاً متفاوت باشد. مجاورت ساختمان‌های بلند با یکدیگر می‌تواند به طرز چشمگیری باعث افزایش یا کاهش بار باد وارده بر پوسته خارجی ساختمان‌ها شود.

۳- مدل‌سازی

دراین تحقیق درکل سه نوع مدل که دوتا از آن‌ها به حالت تکی و در مدل سوم اثر هم‌جواری آورده شده است انجام شده است. منظور از ارائه این کار پژوهشی نشان دادن عملکرد متفاوت باد با توجه به اشکال مختلف ساختمان‌ها و قرابت آن‌ها است. برای بررسی سرعت و جریان‌های باد و تلاطم‌های اطراف ساختمان‌های واقع در منطقه شهری (α=۰.۲۶۴) اطراف ساختمان‌های بلند جزئیات مدل‌سازی حاضر به‌صورت جداول (۱ و ۲ و ۳) آورده شده‌اند. ارتفاع کلیه ساختمان‌ها ۱۸۰ متر می‌باشد. و سرعت‌های متوسط باد برای مدل گرد و ساختمان‌های با پلان مستطیلی هم‌جوار به ترتیب ۲۲.۵ و ۱۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد.

جدول (۱) مشخصات فیزیکی ساختمان گرد

چگالی ساختمان	ρ = ۱۲.۹۶ kg/m^3
فرکانس طبیعی	η = ۰.۱۹ Hz
ابعاد ساختمان	۱۸m ×۱۸۰m
مدول الاستیسیته مصالح	E=۷.۶۹۶ × ۱۰^{7}N/m^2
ضریب پواسون	υ =۰.۲۵
درصد میرایی	۱٪

جدول (۲) مشخصات فیزیکی ساختمان اصلی مستطیل شکل

چگالی ساختمان	ρ = ۱۶۰ kg/m^3
فرکانس طبیعی ساختمان	η = ۰.۲ Hz
ابعاد ساختمان	۳۰m×۴۵m×۱۸۰m
مدول الاستیسیته مصالح	E=۲.۳ × ۱۰^{8}N/m^2
ضریب پواسون	υ =۰.۲۵
درصد میرایی	۱٪

جدول (۳) مشخصات فیزیکی ساختمان‌های هم‌جوار

چگالی ساختمان بالادست	ρ = ۱۶۰ kg/m^3
چگالی ساختمان پایین‌دست	ρ = ۱۸۰ kg/m^3
فرکانس طبیعی ساختمان	η = ۰.۲ Hz
ابعاد ساختمان بالادست	۳۵m×۹۰m×۱۸۰m
ابعاد ساختمان پایین‌دست	۴۵m×۸۰m×۱۸۰m
مدول الاستیسیته مصالح هردو ساختمان	E=۲.۳ × ۱۰^{8}N/m^2
ضریب پواسون هردو ساختمان	υ=۰.۲۵
درصد میرایی هردو ساختمان	۱٪

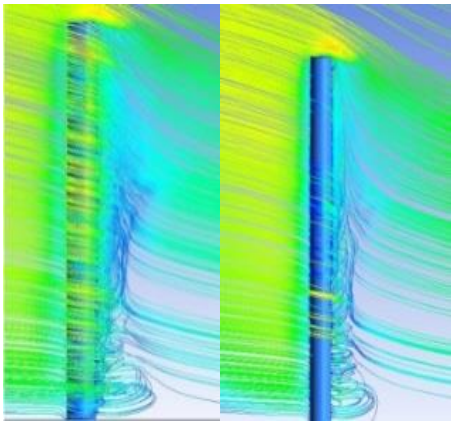
مدل‌سازی توسط نرم‌افزار ANSYS انجام و نوع تلاطم اعمالی جهت شبیه‌سازی، شبیه‌سازی به روش پیچک‌های بزرگ (LES) می‌باشد. ساختمان‌ها در منطقه شهری واقع‌شده‌اند و چگالی هوا بوده و لزجت غلظت هوا $\rho = 1.25\left[Kg/m^3\right]$ می‌باشد. $\mu = 7.03\times10^{-2}\left[N.s/m^2\right]$

۴- اعتبارسنجی

صحت و اعتبار سنجی تمامی مدل‌های فوق با استفاده از مدل Bruon و Awruch(۲۰۰۹) که بر روی ساختمان CAARC انجام‌شده بود، صحت سنجی گردیده بدین‌صورت که با مدل‌سازی‌های مختلف در نرم‌افزار ANSYSشبکه‌بندی بهینه به‌دست‌آمده که در جهت طولی خطایی برابر ۴.۲٪ و در جهت عرضی خطایی حدود ۷.۶٪ دارد وبر اساس این شبکه‌بندی بهینه بقیه مدل‌ها شبیه‌سازی گرده‌اید.

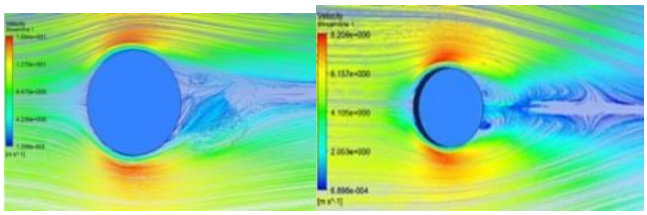
۵-تحلیل و بررسی نتایج

جهت فضاسازی ساختمان‌های بلند در شهرها نیروی باد بسیار تأثیرگذار می‌باشد لذا ضروری است جریان‌ها و مقدار سرعت باد در اطراف ساختمان‌های بلند شناسایی گردد تا فاصله مناسب بین ساختمان‌ها جهت جلوگیری از خرابی و فروریزش سازه‌ها در اثر گرداب‌های حاصل از باد جلوگیری شود. برای این کار ابتدا به بررسی و تحلیل سرعت رژیم جریان باد و سرعت آن در اطراف ساختمان‌های بلند می‌پردازیم.

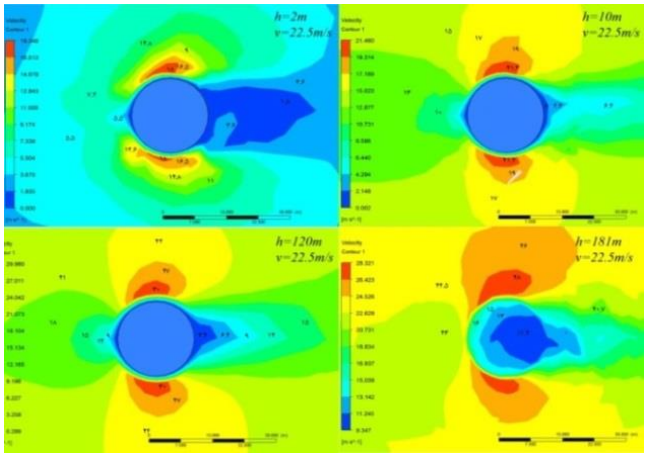


شکل (۴) تشکیل گردابه در پشت ساختمان گرد از دید جانبی برای سرعت ۵ متر بر ثانیه

در شکل‌های (۴ و ۵) پیچک‌های پشت سازه‌ها که باعث به وجود آمدن فشار مکشی پشت سازه شده و باعث به وجود آمدن حرکت‌های در جهت عمود بر باد برسازه می‌شود. مشاهده می‌شود که بسته به پلان شکل و شدت این پیچک‌ها تغییر می‌یابد. شکل ۴ برای پلان گرد رژیم جریان باد در اطراف ساختمان را به‌خوبی نشان می‌دهد.

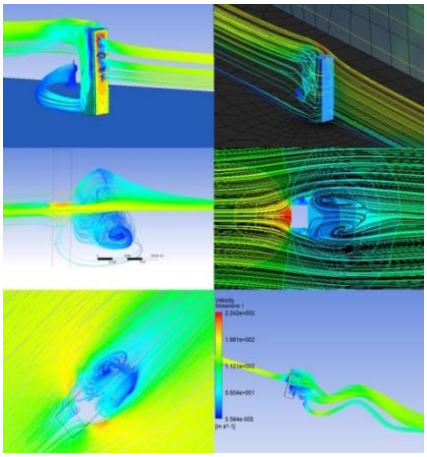


شکل (۵) نمایش خطوط جریان باد اطراف سازه گرد (۵ و ۱۸m/s)



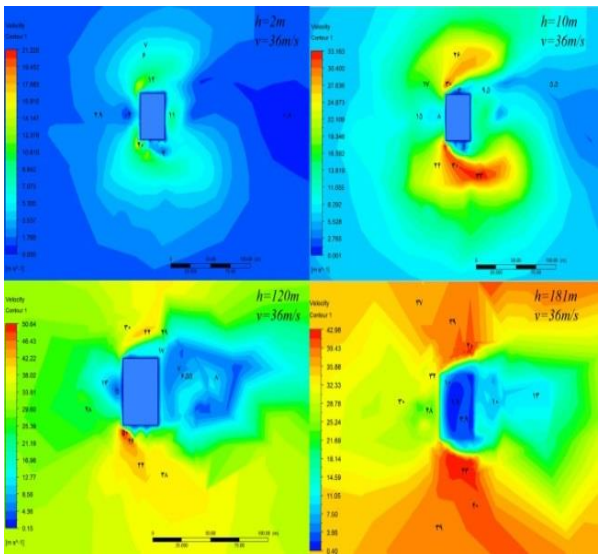
شکل (۶) تغییرات سرعت در ارتفاع‌های مختلف از پایه ساختمان گرد در سرعت ۲۲.۵ متر بر ثانیه

که به‌صورت گردبادی در پشت ساختمان عمل می‌کند چنانچه سرعت باد در این نواحی از حد مجاز بیشتر باشد به‌راحتی عبور و مرور و آسایش ساکنان را در ارتفاعات مختلف ساختمان من‌جمله در ارتفاعات زیست‌محیطی به مخاطره می‌اندازد. کنتور سرعت جریان باد در شکل (۶ و ۸ و ۱۰) در ارتفاع به ترتیب ۲،۱۰،۱۲۰ و ۱۸۱ متری برای مدلهای مختلف نشان داده‌شده است.



شکل (۷) نمایش خطوط جریان باد در اطراف سازه مستطیلی برای سرعت ۳۶ متر بر ثانیه

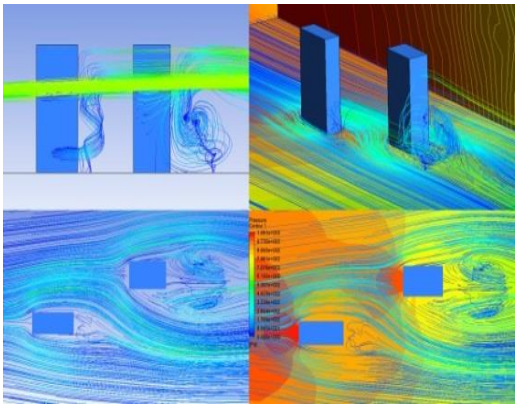
همان‌طوری که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد در دو طرف عرضی ساختمان گرد بیشترین سرعت باد برای ارتفاع ۲ متر از پای سازه ۱۸ متر بر ثانیه برای جریان ورودی سرعت باد ۵الی۷ متر برثانیه می‌باشد و سرعت جریان باد در ارتفاع ۲ متری از پای ساختمان در پشت سازه ۳.۶ متر بر ثانیه می‌باشد. در فاصله به‌اندازه قطر ساختمان از بر جانبی سازه درجهت عرضی سرعت باد به ۱۲.۸ متر بر ثانیه و سپس در فاصله به اندازه قطر ساختمان برای جریان متوسط سرعت باد ۵.۵ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد به سرعت ۷ متر بر ثانیه می رسد(حدود ۱.۳برابر سرعت ورودی در آن ارتفاع).



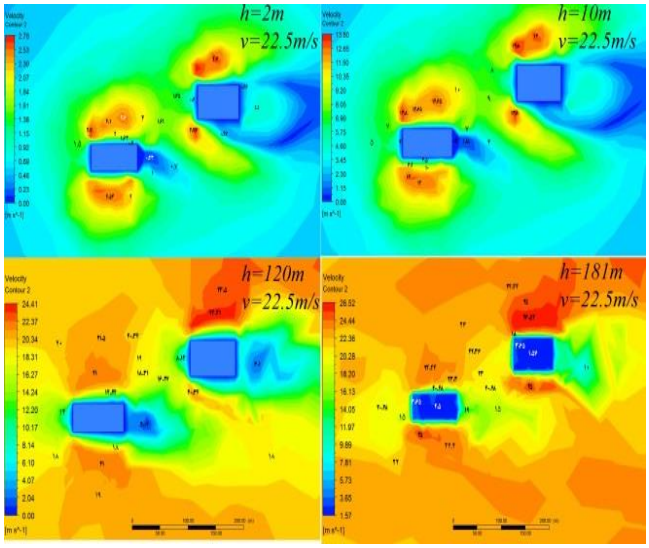
شکل (۸) تغییرات سرعت در ارتفاع‌های مختلف از پایه ساختمان مستطیلی در سرعت ۳۶ متر بر ثانیه

چنانچه از شکل‌های (۶ الی ۱۰) هویدا است در اطراف ساختمان‌های تکی و گروهی مسائل زیر دخیل هستند.

۱- شکل پلان
۲- نحوه قرارگیری ساختمان‌ها
۳- سرعت متوسط باد
۴- ارتفاع از سطح زمین
۵- مکان تأثیر باد درروی وجوه ساختمان و پشت‌بام و روی زمین.
۶- ارتفاع ساختمان.



شکل (۹) نمایش خطوط جریان باد به همراه کنتور فشار در اطراف سازه مستطیلی برای سرعت ۲۲.۵ متر بر ثانیه



شکل (۱۰) تغییرات سرعت در ارتفاع‌های مختلف از پایه ساختمان در سرعت ۲۲.۵ متر بر ثانیه

۵- نتیجه‌گیری

تعدادی از یافته‌های تحقیق حاضر به‌صورت زیر می‌باشند:

۱) در موقع تفکیک زمین با توجه به اثر بادبر ساختمان‌های بلند باید توجه کافی مبذول داشت تا ازنظر احتمالات امکان اثر مخرب بادبر پاسخ عرضی ساختمان از بین برود.

۲) با توجه به مدل‌سازی انجام‌گرفته، سرعت ماکزیمم باد پس از برخورد به ساختمان اصلی که در فاصله‌ی به‌اندازه عرض ساختمان از بر آن به وجود می‌آید باید وسایل کمکی اجرایی را یا بیرون از این فاصله یا در کمتر از آن مستقر کرد.

۳) ازآنجاکه بعد از برخورد باد به ساختمان‌های بلند سرعت آن افزایش می‌یابد لذا، فشار بادبر ساختمان‌های مجاور افزوده می‌شود لذا باید در شهرهایی مانند تهران و دیگر کلان‌شهرها به این مسئله توجه ویژه داشت و این اثر تا یک کیلومتر قبل و بعد از ساختمان نیز قابل احساس است.

۴) الحاقات به ساختمان‌ها را نباید ازنظر دور داشت که بیشتر آن‌ها آسیب‌پذیر بوده و اگرچه به‌صورت انفرادی کم‌هزینه هستند ولی در کل شهر در سرجمع هزینه گزافی به مردم شهر تحمیل می‌کند.

۵) در طراحی ساختمان‌های بلند اثر هم‌جواری ساختمان‌های بلند را نباید ازنظر دور داشت لذا در طراحی‌ها، باید اثر نیروهای مضاعف آن‌ها را نیز در نظر گرفت.

منابع

[۱] ایمانی کله سر. هوشیار؛ آقا علی زاده پیرا قوم. ر. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی عددی ساختمان‌های بلند و بررسی پاسخ آن‌ها در برابر بار باد با نرم‌افزار ANSYS. همایش ملی عمران و توسعه پایدار. مشهد، موسسه آموزش عالی خاوران.

[۲] ایمانی کله سر. هوشیار؛ Kumar.K ؛ P.N. Godbole. ۱۳۷۸ . شبیه‌سازی لایه‌مرزی جوی و کاربردی آن در پیش‌بینی پاسخ سازه‌ها. ششمین اجلاس دینامیک شاره‌ها. دانشگاه علم و صنعت ایران. تهران. سازمان هواشناسی کشور.

[۳] واژه‌نامه ژئوفیزیک و هواشناسی،۱۳۷۷، مرکز نشر دانشگاهی و پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران

[۴]Braun,A&Awruch,A.۲۰۰۹"Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation",elsevier science publisher. page ۵۸۱-۵۶۴.

[۵] Eimani-kalehsar; H. ۲۰۰۰. Experimental Aerodynamic studies on tall rectangular buildings", Ph.D. Thesis, Roorkee Indian Institute of Technology, Roorkee, India.