

## شبیه‌سازی جریان در تونل باد و بهینه‌سازی شکل آیرودینامیک ساختمان‌های بلند برای بهبود ضریب پسا تحت تأثیر نیروی باد

مهندس عبدالله بقائی دائمی\*، دکتر سید رحمان اقبالی\*\*، دکتر حسین معز\*\*\*، دکتر پیام بهرامی\*\*\*\*

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۳۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۸/۰۵

### چکیده

رفتارشناسی باد در اطراف ساختمان‌های بلند به‌عنوان یکی از مباحث بسیار مهم در طراحی معماری و طراحی سازه شناخته می‌شود. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تکنیک‌های آئروودینامیکی و بهینه‌سازی فرم در ساختمان‌های بلند برای کاهش نیروی پسا بود. برای شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و تونل باد از نرم‌افزار Autodesk Flow Design 2014 بهره‌گیری شد. این شبیه‌سازی بر روی مدل ساختمانی که با تکنیک‌های آئروودینامیکی طراحی شده بودند انجام شد. تکنیک‌های آئروودینامیکی به دو صورت اصلاحات آیرودینامیکی شامل پخ زدن، نرم کردن و دنداندار کردن و همین‌طور فرم‌های آئروودینامیکی نیز شامل مخروطی، عقب‌نشینی و پیچشی بودند که بر روی اشکال با سطح مقطع مربع، مثلث و دایره مدل‌سازی شدند. یافته‌ها نشان داد برای طراحی ساختمان‌های حدود ۱۵۰ متر، شکل پایه مثلث با اصلاح آئروودینامیکی پخ خورده و با فرم آئروودینامیکی مخروطی می‌تواند دارای کمترین میزان ضریب پسا و همین‌طور بهترین رفتار آئروودینامیکی را در برابر نیروی باد داشته باشد.

### واژه‌های کلیدی

شبیه‌سازی تونل باد، بهینه‌سازی آئروودینامیک، شکل ساختمان‌های بلند، ضریب پسا، نیروی باد، آئروودینامیک باد.

\* باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. (مسئول مکاتبات)  
 \*\* دانشیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین، ایران  
 \*\*\* استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران  
 \*\*\*\* Ph.D. Optim Design Inc., Illinois Office, 2700 Patriot Blvd., Suite 250, Glenview, IL 60026, USA

Email: payam@optimdesign.com

## مقدمه

مخروطی<sup>۹</sup> و پیچشی<sup>۱۰</sup> و همین‌طور به همراه اصلاحات آئرودینامیکی<sup>۱۱</sup> شامل پخ دادن<sup>۱۲</sup>، گرد کردن<sup>۱۳</sup> و دنداندار کردن گوشه‌ها<sup>۱۴</sup> برای کنترل و کاهش نیروی باد بر ساختمان‌های بلند در نظر گرفته شد. به این صورت که با استفاده از شبیه‌سازی عددی تونل باد، نیروی پسا وارد شده بر روی ۲۹ مدل ساختمانی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته شد. هدف از انجام این پژوهش، بهینه‌سازی فرم‌های آئرودینامیکی تحت اثر نیروی باد و پیشنهاد طراحی بهینه برای ساختمان‌های بلند بوده است.

## پیشینه پژوهش

بارونق گرفتن ساختمان‌های بسیار بلند در دهه ۱۹۹۰، تحقیقات بسیار گسترده‌ای در این زمینه انجام شد که شامل اصلاحات زوایای ساختمان با کاهش بالقوه نیروهای آئرودینامیکی بوده است (Kwok, 1988; Dutton & Isyumov, 1990; Kareem et al., 1999; Tamura & Miyagi, 1999) و نیز شامل اثرات ناشی از کم‌کاهی و پله بندی (Cooper et al., 1997; Kim & Kanda, 2010) اثرات ناشی از گشودگی و شکاف‌ها (Isyumov et al., 1989; Miyashita et al., 1993) و اثرات ناشی از پیچش است. اثرات بالقوه چنین اصلاحات آئرودینامیکی<sup>۱۲۰</sup> بر روی ابعاد اقتصادی (هزینه و فضای قابل استفاده) نیز بررسی شده است (Tse et al., 2009). از جمله مطالعات پیشگام در مورد آئرودینامیک ساختمان توسط دانپورت<sup>۱۵</sup> (۱۹۹۱) صورت گرفته که اقدام به تحقیق در مورد اثرات ناشی از شکل ساختمان با استفاده از آزمون‌های مدل آئرودینامیکی نموده است. مطالعات انجام شده توسط تاناکاکا<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۱۲) و تامورا<sup>۱۷</sup> و همکاران (۲۰۱۳) اقدام به انجام آزمایش‌های همه‌جانبه تونل باد برای پیکربندی‌های متعدد ساختمان نمود که از آن جمله می‌توان به مدل‌های پایه (مربعی، دایره‌ای، مستطیلی و بیضی)، مدل‌های اصلاح یافته زوایا، مدل‌های باریک شده (مخروطی و عقب‌نشینی)، مدل‌های مارپیچی (پیچشی) و مدل‌های مرکب اشاره نمود. این داده‌ها نه تنها برای طراحی مقدماتی سودمند بوده، بلکه منابع ارزشمندی را برای کارهای تحقیقاتی بیشتر در مورد آئرودینامیک ساختمان ارائه می‌کنند. همین‌طور هایاشیدا و ایواس<sup>۱۸</sup> (۱۹۹۰) مطالعه‌ای را در زمینه شکل‌های آئرودینامیکی و تأثیر آنها در گردابه‌های ایجاد شده در اطراف ساختمان‌های بلند انجام داده‌اند. در این پژوهش هشت نوع شکل با اندازه مساوی به صورت فرضی ۶۰۰ متر بررسی شده است. نتایج بر اساس شبیه‌سازی کامپیوتری شامل اطلاعاتی در مورد رفتار آئرودینامیکی و اثر گردابه این اشکال در ساختمان بلند را نشان می‌دهد. ایسیوموف و داتون<sup>۱۹</sup> (۱۹۹۰) نیز مطالعه مشابهی را در زمینه

جهت افزایش ایمنی و قابلیت پاسخ‌دهی ساختمان‌های بلند در برابر بادهای شدید، بهینه‌سازی فرم ساختمان به‌عنوان یک روش کارآمد مورد توجه قرار خواهد گرفت. طراحی آئرودینامیک باهدف حل مسئله بهینه‌سازی ساختمان‌های بلند صورت می‌گیرد که درصد افزایش پایداری ساختاری در برابر وزش باد است. می‌توان بیان کرد که نیروی باد نقش تعیین‌کننده‌ای در طراحی ساختمان‌های بلند ایفا کرده و حتی در پاره‌ای موارد از بارهای زلزله نیز حیاتی‌تر خواهد بود (Parker & Wood, 2013; Baghaei Daemei et al., 2016). روش‌های طراحی ساختمان‌های بلند برای کنترل نوسانات ناشی از نیروی باد را می‌توان به سه گروه اصلی «رویکرد طراحی معماری»، «رویکرد سازه‌ای» و «رویکرد مکانیکی» تقسیم‌بندی کرد. از نقطه نظر طراحی سازه‌ای، ساختمانهای بلند، به دلیل ارتفاع خیلی زیاد خود، حساسیت بیشتری در برابر بار زلزله و بار باد ناشی از نیروهای جانبی به نسبت ساختمان‌های کم ارتفاع دارند (Günel & Ilgin, 2014). طراحی آئرودینامیک معماری همواره در پی کم کردن «اثر باد» بر روی ساختمان و از طرفی کم کردن گردابه‌هایی<sup>۱</sup> که طبقات پایین، پهلوا و پشت ساختمان به وجود می‌آید، جلوگیری کند. باد به صورت کلی به سه طریق به ساختمان‌ها نیرو وارد می‌کند که شامل نیروی هم‌راستای جهت جریان<sup>۲</sup>، نیروی عمود بر جهت جریان<sup>۳</sup> و نیروی پیچشی<sup>۴</sup> (Moreno, 1989). الگوی رفتاری باد همواره به صورت افقی بوده که از دیدگاه ساختاری، بر روی ساختمان‌های بلند عمل کرده که با عنوان نیروی پسا شناخته می‌شود. ضریب پسا نیز عامل مهم در طراحی ساختاری آنها است. طراحان از لحاظ تاریخی به نتایج تونل باد<sup>۵</sup> و آزمایش‌های تجربی برای تخمین ضریب پسا متکی هستند (Baghaei Daemei et al., 2018)؛ اما استفاده از این فرایند هم گران و هم وقت‌گیر است. به همین سبب، می‌توان با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۶</sup> به ارزیابی مدل‌های ساختمانی پرداخت. توجه به طراحی آئرودینامیک و بهینه‌سازی فرم می‌تواند تبعات مختلفی داشته باشد که از این بین می‌توان به کاهش وزن سازه‌ای ساختمان، پاسخ مناسب‌تر ساختمان در مواجهه با باد و به طبع آن کاهش استرس ساکنین و همین‌طور توجه به منطقه دنباله<sup>۷</sup> و جانمایی صحیح ساختمان‌های همسایه اشاره کرد. این از طرفی است که در کشور ایران، توجه به این مسائل بسیار محدود بوده و مطالعات بسیار کمی در این حوزه انجام شده است (بقائی دائمی و اقبالی، ۱۳۹۶). پژوهش حاضر به دنبال شبیه‌سازی مدل‌های مختلف ساختمان‌های بلند و بررسی آنها به صورت آئرودینامیکی است. فرم‌های آئرودینامیکی بررسی شده شامل فرم‌های عقب‌نشینی شده<sup>۸</sup>،

روش محاسبه سیالات دینامیکی می‌تواند به‌طور مؤثری نیروی پسا و نیروهای حاصل‌شده از باد را که در جهت جریان سیال بوده و همچنین الگوی رفتاری گردابه‌ها را شبیه‌سازی کند (Wahrhaftig & da Silva, 2018). بقائی دائمی و همکاران (۲۰۱۸) نیز مطالعه‌ای را در زمینه اصول و راهبردهای طراحی معماری برای ساختمان‌های بلند در کانادا به‌صورت دیاگرام انجام داده‌اند.

بقائی دائمی و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه خود به ارزیابی اثر آیرودینامیک باد بر روی ساختمانهای بلند مثلی شکل به منظور کاهش ضریب پسا پرداخته‌اند. رویکرد مورد استفاده در این تحقیق نیز، اصلاحات آیرودینامیکی و همین‌طور فرم‌های آیرودینامیکی بود و شبیه‌سازی تونل باد نیز در نرم افزار Autodesk Flow Design انجام داده شد. نتایج نشان داد که اصلاحات آیرودینامیکی تقریباً ۷۴ درصد کارایی بیشتری در کاهش ضریب پسا در نسبت با فرمهای آیرودینامیکی دارد. همین‌طور در نسبت با موضوع طراحی آیرودینامیک ساختمان‌های بلند نیز از زوایای دیگری دیده‌شده است (Cermak, 1975; Tamura et al., 1998; Tamura & Miyagi, 1999; Hu et al., 2006; Mendis et al., 2007; Kikitsu et al., 2008; Gu et al., 2010; Tanaka et al., 2012). از نقطه‌نظر بررسی ضریب فشار باد در ساختمان‌های بلند نیز مطالعاتی صورت گرفته است. سایر پژوهشگران نیز بر روی تأثیر باد بر روی سطح عابر پیاده مطالعات گسترده‌ای انجام داده‌اند (Blocken et al., 2007; Tominaga et al., 2008; Mochida & Lun, 2008; Stathopoulos, 2009; Yasa, 2016; Amin & Ahuja, 2014; Kuo et al., 2015). از این رو می‌توان به پایان‌نامه‌ای اشاره کرد که توسط بقائی دائمی (۱۳۹۶) با عنوان «طراحی الگوی مناسب مسکن در ساختمان بلند با محوریت استفاده از فاکتورهای محیطی در اقلیم معتدل و مرطوب» انجام شد و در آن به بررسی ۱۶ مدل ساختمانی برای کاهش منطقه دنباله و ۲۴ مدل ساختمانی برای کاهش نیروی پسا و همین‌طور ارائه تکنیک‌های طراحی آیرودینامیکی برای ساختمان‌های تا ۱۵۰ متر پرداخته و معرفی‌شده است. نتایج تحقیق نشان داد که فرم با جاپای مثلث با گوشه‌های پخ زده و فرم آیرودینامیکی مخروطی، می‌تواند یکی از مناسب‌ترین فرم برای طراحی ساختمان بلند در اقلیم معتدل و مرطوب باشد. پژوهش دیگری نیز توسط بقائی دائمی (۲۰۱۹) انجام شد که به بررسی خصیصیات و اثر باد د سطح عابر پیاده به صورت شبیه‌سازی با نرم افزار Autodesk Flow Design انجام شده است. این مطالعه بر روی یک سایت مسکونی در خیابان گل‌سار در شهر رشت،

کاهش حرکت ساختمان بلند توسط راهبردهای آیرودینامیکی انجام داده است. این راهبردها استفاده از شکاف و بازشو در ساختمان بود. نتایج نشان داد که استفاده از شکاف یا بازشو می‌تواند حدود ۱۵ درصد فرکانس لرزش ساختمان در اثر باد را کاهش بخشد. به علاوه، مطالعه‌ای در مورد اثر تغییرات گوشه‌ای در بی‌ثباتی آئرولاستیسیته<sup>۲۰</sup> برای ساختمان‌های بلند را مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل ساختمانی مورد مطالعه به‌صورت مربعی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که بین سه حالت نرم کردن گوشه‌ها (گرد شدگی)، برش و دندان‌دار کردن، در حالت اول نرم کردن گوشه‌ها تأثیر بسیار زیادی را در مقابل باد در مقطع مربع دارد. رکوردهای بعدی نشان داد که اگر میزان طول به عرض (b/B) یعنی میزان درصد دندان‌دار کردن و برش، به مقدار ۰/۰۵ درصد باشد، می‌تواند برای مقطع مربع بسیار کارآمدتر باشد (Kawai, 1998).

در ادامه نیز مطالعه‌ای توسط تامورا و میاگی<sup>۲۱</sup> (۱۹۹۹) مورد بررسی قرار گرفت که به بررسی تأثیر آشفتگی<sup>۲۲</sup> در نیروهای آیرودینامیکی در شکل مربع با اصلاحات آیرودینامیکی در گوشه پرداخته شد. برای انجام این پژوهش، سه نوع مدل به‌صورت مربع کامل، گرد گوشه و پخ‌دار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حالت گرد و پخ‌دار می‌تواند نیروی پسا را کاهش داده و همین‌طور منطقه دنباله را نیز کاهش دهد. کیم و کاندا<sup>۲۳</sup> (۲۰۱۰) مطالعه‌ای را با ویژگی‌های نیروهای آیرودینامیکی، نقاط فشار بر ساختمان با مقطع مربع و تغییرات در ارتفاع انجام داده‌اند. روش انجام به این صورت بود که ساختمان با پلان مربع به‌صورت مخروطی و عقب‌نشینی در ارتفاع مدل‌سازی شد. به این صورت که در حالت عقب‌نشینی ۵ درصد و در حالت مخروطی ۱۰ درصد کاهش تدریجی پیدا کردند. نتایج نشان داد که حالت عقب‌نشینی نسبت به مخروطی، می‌تواند در حدود ۴۰ درصد کاهش ضرایب پسا را به دنبال داشته باشد. این از طرفی است که کیم و همکاران (۲۰۱۱) تحقیق مشابهی را در زمینه بررسی حرکت باد در ساختمان‌های بلند با تغییر سطح مقطع پلان مربع در ارتفاع انجام دادند. دو حالت مخروطی و یک حالت عقب‌نشینی نسبت به حالت مربع پایه معرفی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل‌های عقب‌نشینی و مخروطی دارای شتاب پیچشی کمتری نسبت به حالت مربعی را دارا هستند. همین‌طور در نسبت با موضوع طراحی آیرودینامیک ساختمان‌های بلند، از زوایای دیگری نیز مورد ارزیابی قرار داده شد. همین‌طور مطالعات جدیدتری در رابطه با ضریب پسا با استفاده از شبیه‌سازی محاسبه سیالات دینامیکی بر روی یک ساختمان بیشتر از ۹۳ متر پرداخته شد. در این مطالعه مشخص شد که بهره‌گیری از

تجربی و شبیه‌سازی عددی توسط Fluent، حدود ۶ درصد بوده که این نشان‌دهنده اعتبار این نرم‌افزار است. لازم به ذکر است که برای دریافت نرم‌افزار Autodesk Flow Design، از نسخه اصلی سه‌ساله دانشجویی آن بهره‌گیری شده است.

## چهارچوب نظری پژوهش

### نیرو و ضریب پسا

نیروی پسا، نامی است که در فیزیک و دینامیک سیالات به نیروهایی که در جهت بازداشتن اجسام، از حرکت در درون سیالات کار می‌کنند، داده می‌شود از دیگر سخن، نیروی پسا نیرویی است که با حرکت روبه‌جلوی اجسام مخالفت می‌کند. پسا، به نیرویی از باد و یا مقاومت هوا اطلاق می‌شود که در جهت مخالف حرکت جسم به آن فشار وارد می‌کند که با واحد N اندازه‌گیری می‌شود (Currie, 2012). طبق تعریفی که مرکز تحقیقاتی گلن ناسا<sup>۲۷</sup> (۲۰۱۵) ارائه داده است، پسا یک نیروی مکانیکی است که توسط تعامل و تماس با یک جسم جامد با یک سیال (مایع یا گاز) تولید می‌شود. برای اینکه پسا تولید شود، باید جسم جامد در تماس با سیال قرار گیرد. در صورتی که هیچ سیالی وجود نداشته باشد، هیچ نیروی پسایی نیز وجود نخواهد داشت. از طرفی، پسا توسط اختلاف سرعت، بین جسم جامد و سیال تولید می‌شود. به این صورت که باید حرکت بین جسم و سیال وجود داشته باشد. اگر هیچ حرکتی نباشد، هیچ نیروی پسایی تولید نخواهد شد. تفاوتی نمی‌کند که جسم از بین سیال حرکت کند و یا اینکه حرکت سیال از بین جسم جامد استاتیک باشد (Sathyajith, 2006, 26). به دیگر سخن، این‌طور می‌توان بیان کرد که نیروی پسا رابطه مستقیم با فرم و شکل جسم جامد (در اینجا ساختمان) دارد. هرچقدر سطح رو به باد کمتر و اینکه طول آن در راستای جریان سیال باشد، عدد رینولدز<sup>۲۸</sup> و اصطکاک بین هوا و ساختمان بیشتر و در نتیجه از نیروی پسا وارد بر ساختمان کاسته می‌شود (McCormick, 1979). باد در مواجهه با ساختمان بلند، می‌تواند در سه ناحیه پایه<sup>۲۹</sup>، میانه<sup>۳۰</sup> و بالای ساختمان<sup>۳۱</sup> یا بام آئروپینامیک را مورد تحریک قرار دهد. نوسانات ناشی از باد، یکی از مهم‌ترین مشکلاتی

به منظور ارزیابی پوشش گیاهی و درختان در کاهش میزان اثر باد در ارتفاع ده متری سطح زمین مورد مطالعه قرار داده شده است.

## روش پژوهش

روش انجام شبیه‌سازی با بهره‌گیری از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام شد. مدل‌سازی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Autodesk AutoCAD 2014 صورت گرفت. همین‌طور برای شبیه‌سازی نیز از نرم‌افزار Autodesk Flow Design 2014 استفاده شد و برای وارد کردن نمونه‌های سه‌بعدی، فایل‌ها با فرمت STL وارد نرم‌افزار شدند. سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه و برای نمایش بهتر جریان، تنظیمات مربوط به وضوح شبیه‌سازی و مش بندی بر روی ۱۲۰ درصد و جریان باد برای ارزیابی ضریب پسا به صورت 3D تنظیم شد. تناسبات مدل‌ها ۱/۷ عرض به ارتفاع آن در نظر گرفته شده است. منطقه دنباله به صورت صفحه‌ای و در ارتفاع ۲/۳ در نقطه رکورد<sup>۲۴</sup> ارزیابی گردید. ارتفاع ساختمان H ۱۵۰ متر (حدود ۵۰ طبقه) و عرض B ۲۵ متر در نظر گرفته شد. اندازه تناسبات ویرایشی در مدل‌های یخ خورده، دندانه‌دار و گرد گوشه به صورت b/B ۱/۱۰ مدل‌سازی شد (Günel & Ilgin, 2014). برای شبیه‌سازی نیز رفتار جریان و نیروی وارد بر ساختمان از نوع نیروی هم‌راستای جهت جریان<sup>۲۵</sup> بوده است. سایر اطلاعات مورد استفاده در شبیه‌سازی و نرم‌افزار در جدول ۱ مشخص شده است. برای اعتبارسنجی نرم‌افزار Autodesk Flow Design، شرکت اتودسک مطالعات مختلفی را به صورت شبیه‌سازی و مقایسه نتایج آن با آزمون تجربی مورد ارزیابی قرار داده است. طبق تحقیق انجام شده توسط شرکت اتودسک، تمرکز این نرم‌افزار بر روی شبیه‌سازی خودرو و مطالعات معماری است. برای اعتبارسنجی این نرم‌افزار در حوزه معماری، مطالعه‌ای به صورت مقایسه‌ای توسط آزمایشگاه اتودسک انجام شد و نتایج آن با تحقیق صورت گرفته توسط فضل و کارادلیس<sup>۲۶</sup> (۲۰۱۳) مورد مقایسه قرار داده شد (Autodesk, 2014). به این صورت که در شرایط یکسان، یک ساختمان واقعی در پردیس مرکزی دانشگاه کاونتری در نرم‌افزار Flow Design و Fluent مورد ارزیابی قرار داده شد. یافته‌ها نشان داد که انحراف خطای این نرم‌افزار با آزمون

جدول ۱. پیکربندی و مشخصات شرایط مرزی تونل باد

Mesh size (Resolution)(%)	Status	Time (s)	Analysis Type	Wind Tunnel Size (m)			Color	Wind speed (m/s)
				Length	Width	Height		
120	Stabilized	30	3D	1300	300	300	Standard	10

را با استفاده از طراحی و تغییرات آیرودینامیکی مبتنی بر تغییر الگوی جریان و شکستن باد مؤثر بر ساختمان کاهش داد. آیرودینامیک مبتنی بر طراحی به دو نوع «طراحی فرم‌های آیرودینامیک» و «اصلاحات آیرودینامیکی» و زیرگروه‌های خود تقسیم می‌شود. طراحی فرم‌های آیرودینامیک با در نظر گرفتن مسائلی مانند «جهت ساختمان (موقعیت)»، «تنوع طرح» و «بام آیرودینامیکی» به‌عنوان بخشی از طراحی اولیه باید مورد توجه قرار می‌گیرد (Günel & Ilgin, 2014).

### فرم‌های آیرودینامیک

استفاده از فرم‌های آیرودینامیکی، یک روش مؤثر برای کاهش بار باد در ساختمان است. در این زمینه، شکل‌های استوانه‌ای، بیضی، مخروطی و فرم‌های پیچ‌خورده نسبت به سایر اشکال کارآمدترند. برای ساختمان‌های دارای فرم طرح دایره‌ای، بار باد حدود ۲۰ درصد کمتر است در مقایسه با ساختمان‌هایی که دارای فرم پلان مستطیل شکل هستند (Taranath, 2004). ساختمان با فرم بیضوی نیز رفتار مشابه به ساختمان با دایره شکل را نشان می‌دهد. طبق تحقیق انجام شده توسط شولر (۱۹۷۷) بار باد می‌تواند ۲۷ درصد در ساختمان‌های با طرح‌های بیضوی کاهش یابد. فرم‌های آیرودینامیک را می‌توان به فرم‌های مخروطی، عقب‌نشینی شده، تغییر در سطح مقطع و ایجاد باز شو شکاف در ساختمان تقسیم‌بندی کرد (شکل ۲).

### فرم‌های عقب‌نشینی شده و مخروطی

در محیط‌های شهری، تأثیر توپوگرافی بر روی حرکت باد تأثیرگذار خواهد بود. از آنجایی که سطح زمین یک سطح ناهموار است، به دلیل نیروی اصطکاک چسبانگی<sup>۳۳</sup>، از سرعت باد در نزدیکی سطح زمین کاسته می‌شود. بافاصله گرفتن از سطح زمین، با کاهش توپوگرافی و ناهمواری‌ها بر جریان هوا در لایه مرزی<sup>۳۴</sup> شهری، نیروی اصطکاک نیز کاهش می‌یابد (Arakeri & Shankar, 2000). با افزایش ارتفاع،

است که طراحان ساختمان‌های بلند با آن مواجه هستند (Huang et al., 2007; Parker & Wood, 2013). نیروی پسا نیز همواره در جهت مخالف حرکت و در کاهش سرعت آن عمل می‌کند. شکل یک شیء نیز باعث تغییر در پسا می‌شود. به این صورت که سطوح مسطح دارای بیشترین مقدار نیروی پسا هستند (شکل ۱- الف). این از طرفی است که سطوح کشیده و باریک معمولاً در نسبت با سایر شکل‌ها دارای پسا کمتری می‌باشند. در اینجا به‌صورت تجربی با قرار دادن مدل‌هایی با فرم مختلف در یک دستگاه تونل باد، اندازه‌گیری میزان پسا برای مدل‌ها تعیین شده است (شکل ۱- ب).

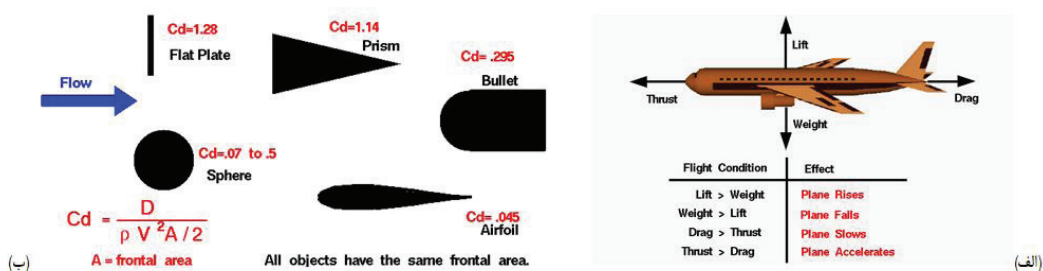
بر اساس آنچه در شکل ۱ ب مشاهده می‌شود، یک صفحه تخت دارای ضریب پسا ۱/۲۸ است یا یک منشور دارای ضریب پسا ۱/۱۴ است. کرووی دارای Cd از ۰/۰۷ به ۰/۵ بوده و یک گلوله دارای ضریب پسا ۰/۲۹۵ و یک جسم هواگرد ۳۲ معمولی نیز دارای ضریب پسا ۰/۴۵ است. (رابطه ۱)

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad \text{رابطه ۱. رابطه نیروی پسا}$$

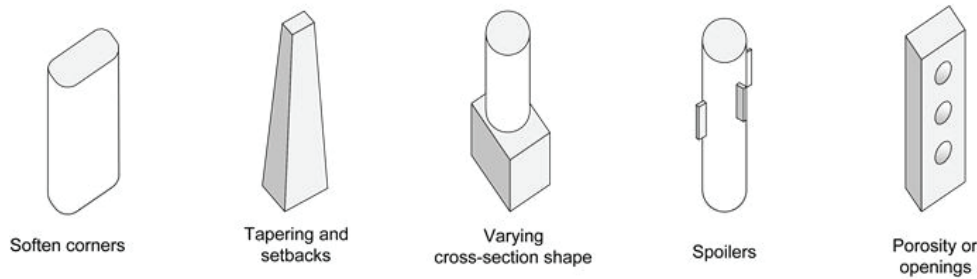
$\rho$	دانسیته یا چگالی سیال
$V$	سرعت جسم نسبت به سیال (در معماری، سرعت سیال محاسبه می‌شود)
$C_D$	ضریب پسا
$A$	مساحت سطح مقطع (سطح رو به باد)
$F_D$	نیروی پسا

### روش‌های طراحی معماری مبتنی بر آیرودینامیک

به دلیل اینکه در ساختمان‌های بلند و انعطاف‌پذیر، رفتار آیرودینامیکی به‌طور کلی مهم است، طراحی آیرودینامیک می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثر باد در ساختمان‌های بلند ایفا کند (Ali & Armstrong, 1995; Holmes, 2001; Irwin, 2009; Irwin et al., 2008; Irwin et al., 2009; Kareem et al., 1999; Schueller, 1977; Scott et al., 2005). پاسخ ساختمان‌های بلند ناشی از باد می‌توان



شکل ۱. الف) نمایش و مفهوم نیروی پسا و ب) تفاوت در ضریب پسا در نسبت با فرم‌های مختلف، (Source: Hall, 2015)



شکل ۲. معرفی انواع فرم‌های آئرو دینامیکی برای طراحی ساختمانی بلند (Source: Baghaei Daemei et al., 2019)

کاهش تدریجی، ۱۲۰ درجه از پایین به بالا زاویه خود را تغییر داده و در نتیجه با ارائه شکل و عرض‌های مختلف، اثر باد را در ارتفاع کاهش می‌دهد که نشان‌دهنده کاهش حدود ۱۵ درصد بار باد است (Xie, 2012). همان‌طور که بیان شد، این تکنیکها باعث شده که سطح مواجهه با باد کاسته شود. همین‌طور فرم به‌گونه‌ای طراحی خواهد شد که این امکان را فراهم کند تا ساختمان بتواند جریان باد را کنترل و هدایت کرده و از شدت اثر آن بر سازه کاهش دهد (جدول ۳).

#### اصلاحات آئرو دینامیک

شکل کلی ساختمان می‌تواند نقش مهمی در کاهش گردابه و همین‌طور اثرات آئرولاستیک داشته باشد. اصلاحات آئرو دینامیکی می‌توانند مقدار زیادی از اثر باد بر ساختمان را کاهش دهند. این اصلاحات در گوشه‌های ساختمان اعمال شده و در مقایسه با ساختمان‌های تیز گوشه<sup>۳۴</sup>، پاسخ آئرو دینامیکی مناسب‌تری می‌دهد (Kwok & Bailey, 1987; Kwok, 1988). انتخاب مناسب شکل ساختمان و اصلاحات آئرو دینامیکی مناسب می‌تواند منجر به کاهش حرکت یا تغییر الگوی جریان در اطراف یک ساختمان شود. از این‌رو محققان مطالعات مختلفی را بین ویژگی‌های آئرو دینامیکی و

سرعت باد نیز افزایش یافته که این را می‌توان یک رابطه مستقیم افزایش ارتفاع با افزایش سرعت باد دانست. از اقداماتی که طراحان آئرو دینامیک معماری می‌توانند برای کاهش اثر باد بر ساختمان انجام دهند، این است که سطح مواجهه با باد را کاهش دهند. در این حالت، سطح مقطع ساختمان در طبقات پایین بیشتر بوده و رفته‌رفته از مساحت آن کاسته خواهد شد. از آنجاکه سرعت باد در نقاط بالاتر، بیشتر است، این نوع تکنیک باعث می‌شود تا سطح ساختمان در مواجهه با باد کاهش یابد و در نتیجه، اثر باد ساختمان نیز کمتر شود. این تکنیک در ساختمان برج خلیفه با ارتفاع معماری ۸۲۸ متر صورت گرفت (Parker & Wood, 2013). نمونه‌های دیگر این‌گونه ساختمان‌ها در جدول ۲ قابل مشاهده است.

#### تغییر هندسه در سطح مقطع پلان<sup>۳۵</sup>

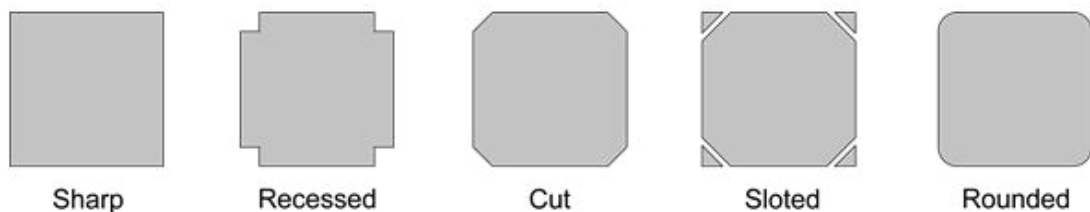
تغییر شکل سطح مقطع در ارتفاع، باعث می‌شود تا فرکانس اثر باد در ارتفاع تغییر کند. با توجه به هندسه‌های مختلف ساختمان در ارتفاع، خواص گردابه نیز در ارتفاع تغییر کرده و تحریک‌پذیری کمتری ناشی از باد بر روی ساختمان خواهد داشت. یک مثال خوب برج شانگهای با ارتفاع ۶۳۲ متر و سطح مقطع مثلث گرد گوشه است که علاوه بر

جدول ۲. ساختمان‌های طراحی شده مبتنی بر فرم‌های عقب‌نشینی شده و مخروطی

							
برج خلیفه	برج وینلیس	مرکز ترانز امریکا پیرامید	مرکز تجارت جهانی بحرین	برج جهانی لوته	برج شاردر	تبر سنت ماری ۳۰ (یا ساختمان سوئیس ری)	
برج و هتل بین‌المللی ترامپ							

جدول ۳. ساختمان‌های طراحی‌شده مبتنی بر تغییر هندسه در سطح مقطع پلان

							
برج‌های جهانی مطلق	ترینینگ تورسو (برج پیچنده)	برج کایان دبی	برج شانگهای	برج الماس جده	برج تکامل مسکو	برج دینامیک امارات متحده عربی	برج مود گا کوئن کوکون توکیو



شکل ۳. تغییرات در گوشه‌های اشکال هندسی و پلان (Source: Baghaei Daemei et al., 2019)

این مقدار باید در حدود ۱۰ درصد عرض ساختمان باشد. این تکنیک در ساختمان تایپه ۱۰۱ با ارتفاع ۵۰۹ متر استفاده از آزمایش تونل باد تست شد که نشان‌دهنده کاهش یافتن ۲۵ درصد از نیروی ناشی از باد بود (Xie, 2012; Ilgin & Günel, 2007). شکل ۴ نمایشی مفهومی از رفتار باد در مواجهه با نیروی باد به یک ساختمان تیز گوشه و گرد گوشه<sup>۳۹</sup> را نشان می‌دهد.

### آئرو‌دینامیک کردن بام

اساس رویکرد آئرو‌دینامیک کردن بام، به‌طور کلی ایجاد یک فرم آئرو‌دینامیکی در نزدیکی قسمت‌های فوقانی ساختمان بوده که به‌صورت تدریجی اثر باد بر ساختمان را کاهش دهد. همین‌طور در ساختمان‌های بسیار بلند می‌بایست جریان هوا را با سمت سقف آن هدایت کرد (Baskaran & Kashef, 1996). این خاصیت دینامیکی در واقع علاوه بر اینکه باد با حرکت هم‌راستا را منتقل می‌کند، بلکه باعث می‌شود تا ساختمان، رفتار مناسبی را در برابر بادهای با حرکت عمود و پیچشی (با کاهش اثر تلاطم<sup>۴۰</sup> باد ناشی از نیروهای گردابه) از خود نشان دهد (Dutton & Isyumov, 1990; Ho, 2007; Irwin, 2007).

پاسخ ساختمان نسبت به باد انجام داده‌اند (Dutton & Isyumov, 1990; Hayashida & Iwasa, 1990; Miyashita et al., 1993; Kareem, 1983; Kawai, 1998; Kim & You, 2002; Xie, 2012). این اصلاحات شامل دندان‌دار کردن، پخ دادن، شکاف دادن و گرد کردن تقسیم‌بندی کرد (شکل ۳).

تحقیقات نشان داده که اصلاحات در گوشه‌ها قادر خواهد بود تا نوسانات مربوط به لایه‌های برشی<sup>۳۷</sup> و جداسازی جریان<sup>۳۸</sup> را کاهش دهد و همین‌طور این امکان را فراهم می‌کند تا لایه‌های جداشده باد، برای اتصال مجدد به جریان آزاد در پشت ساختمان سریع‌تر رخ داده و در نهایت نیز باعث کاهش منطقه دنباله می‌شود. این از طرفی است که در این حالت، چون منطقه دنباله کاهش یافته، پدید اغتشاش و گردابه نیز در پشت ساختمان کاسته شده و در نتیجه، فشار ناشی از نیروی پسا به ساختمان به میزان قابل توجهی کاسته خواهد شد. این نوع اصلاحات همچنین برای جلوگیری از بی‌ثباتی آئرو‌الاستیسیته نیز مؤثر است (Amin & ahuja, 2010). پخ زدن، نرم کردن و شکاف دادن گوشه‌های ساختمان‌های مستطیل یا مربع شکل و همین‌طور دندان‌دار کردن به سمت داخل، در طراحی ساختمان‌های بلند بسیار شایع است.



شکل ۴. ساختمان‌های طراحی شده مبتنی بر آئرودینامیک کردن بام، (مأخذ: بقائی دائمی، ۱۳۹۶)

جدول ۴. ساختمان‌های طراحی شده مبتنی بر آئرودینامیک کردن بام (مأخذ: بقائی دائمی، ۱۳۹۶)



برج‌های دوقلوی پتروناس

مرکز مالی جهانی شانگهای

برج جین مائو

ساختمان مرکزی ادنوک ابوظبی

ساختمان سنترال پلازا

مرکز مالی بین‌المللی هنگ کنگ

برج پولی پازانو C2

ذکر است که در این پژوهش، تنها به بررسی نیروی پسا پرداخته شده است. انتخاب نمونه‌ها بر اساس فرم‌های پایه مثلث، مربع و استوانه‌ای بود. به این صورت که در ابتدا شبیه‌سازی باد بر روی این فرم‌ها انجام شد و سپس برای ارزیابی عملکرد فرم‌ها و اصلاحات آئرودینامیکی در جهت کاهش نیروی پسا، بر روی فرم‌های پایه مدل‌سازی و شبیه‌سازی شدند. فرم‌ها به این دلیل انتخاب شدند که در واقعیت نمونه‌های مشابه آنها اجرا شده و از طرفی خروجی این شبیه‌سازی بتواند قابلیت اجرایی نیز داشته باشد.

در جدول ۵ مشخصات مربوط به نتایج حاصل از شبیه‌سازی تونل باد بر روی مدل‌ها مشخص شده است. به صورت کلی مدل‌ها بر اساس چهار گروه اصلی طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفته شده‌اند که شامل گروه اول (فرم‌های پایه) مثلث، مربع و استوانه‌ای، گروه دوم (اصلاحات آئرودینامیکی) گرد کردن، پخ دادن و دنداندار کردن گوشه‌ها، گروه سوم (فرم‌های آئرودینامیکی) مخروطی و عقب‌نشینی و گروه چهارم (فرم‌های آئرودینامیکی) تغییر در سطح مقطع پلان و پیچش می‌باشند.

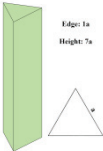
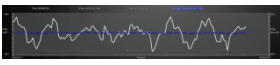
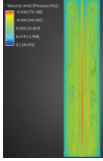
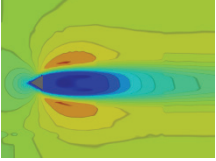
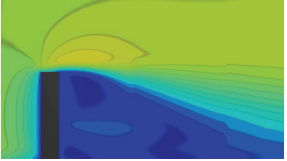
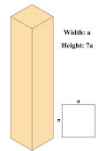
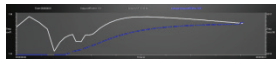
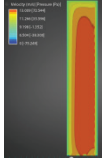
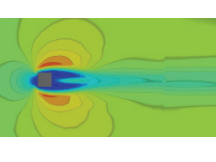
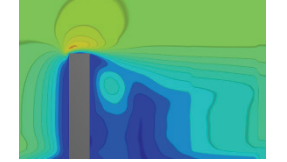
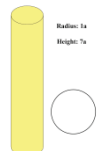
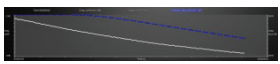
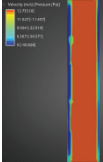
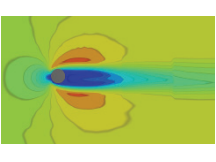
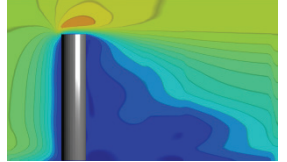
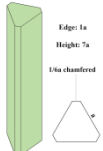
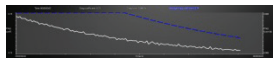
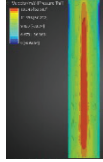
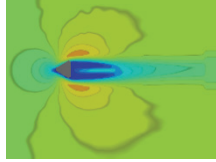
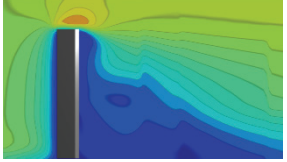
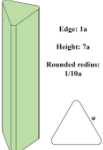
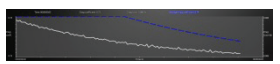
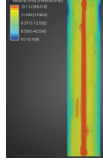
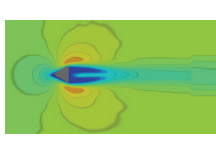
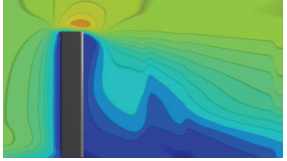
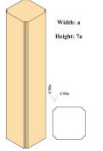
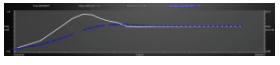
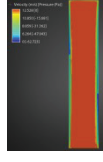
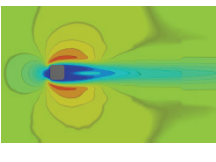
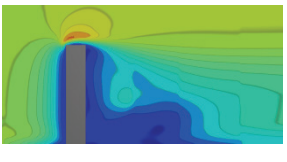

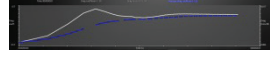
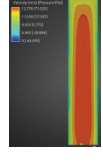
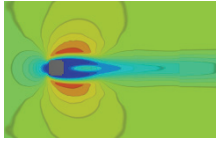
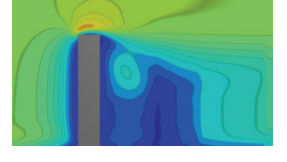
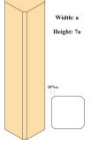
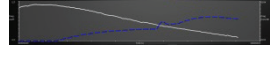

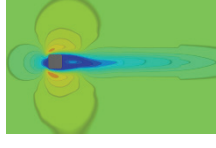
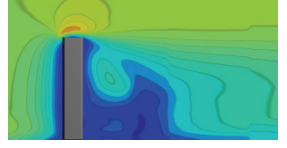
2009; Irwin et al., 2008; Irwin et al., 2009; Isyumov et al., 1992; Kareem et al., 1999). مکان بهینه برای ایجاد آئرودینامیکی بام، بین ۸۰ تا ۹۰ درصد (یا ۲/۳) ارتفاع ساختمان پیشنهاد شده که به عنوان نقطه رکورد شناخته می‌شود. ساختمان‌های مختلفی بر این اساس طراحی شده‌اند (جدول ۴).

#### تجزیه و تحلیل داده‌ها مبتنی بر شبیه‌سازی CFD

برای درک بهتر رفتار باد در ساختمان‌های بلند، با استفاده از اشکال پایه (مربع، دایره و مثلث) ۲۹ مدل ساختمانی مختلف با بهره‌گیری از تکنیک‌های آئرودینامیکی شامل فرم‌های عقب‌نشینی شده، مخروطی و پیچشی و همین‌طور به همراه اصلاحات آئرودینامیکی شامل پخ دادن، گرد کردن و دنداندار کردن گوشه‌ها مدل‌سازی شد و شبیه‌سازی CFD بر روی آنها صورت گرفت. در این شبیه‌سازی، علاوه بر ارزیابی نیروی پسا، نمایش رفتار باد در اطراف ساختمان در پلان و مقطع و همین‌طور نمایش نقاط پرفشار و کم‌فشار در جداره رو به باد (منطقه خیس<sup>۴</sup>) نیز مورد ارزیابی قرار گرفته شده است (جدول ۵). لازم به

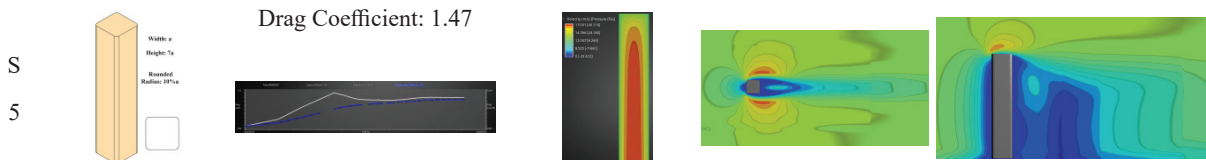


جدول ۵. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی تونل باد بر پایه CFD

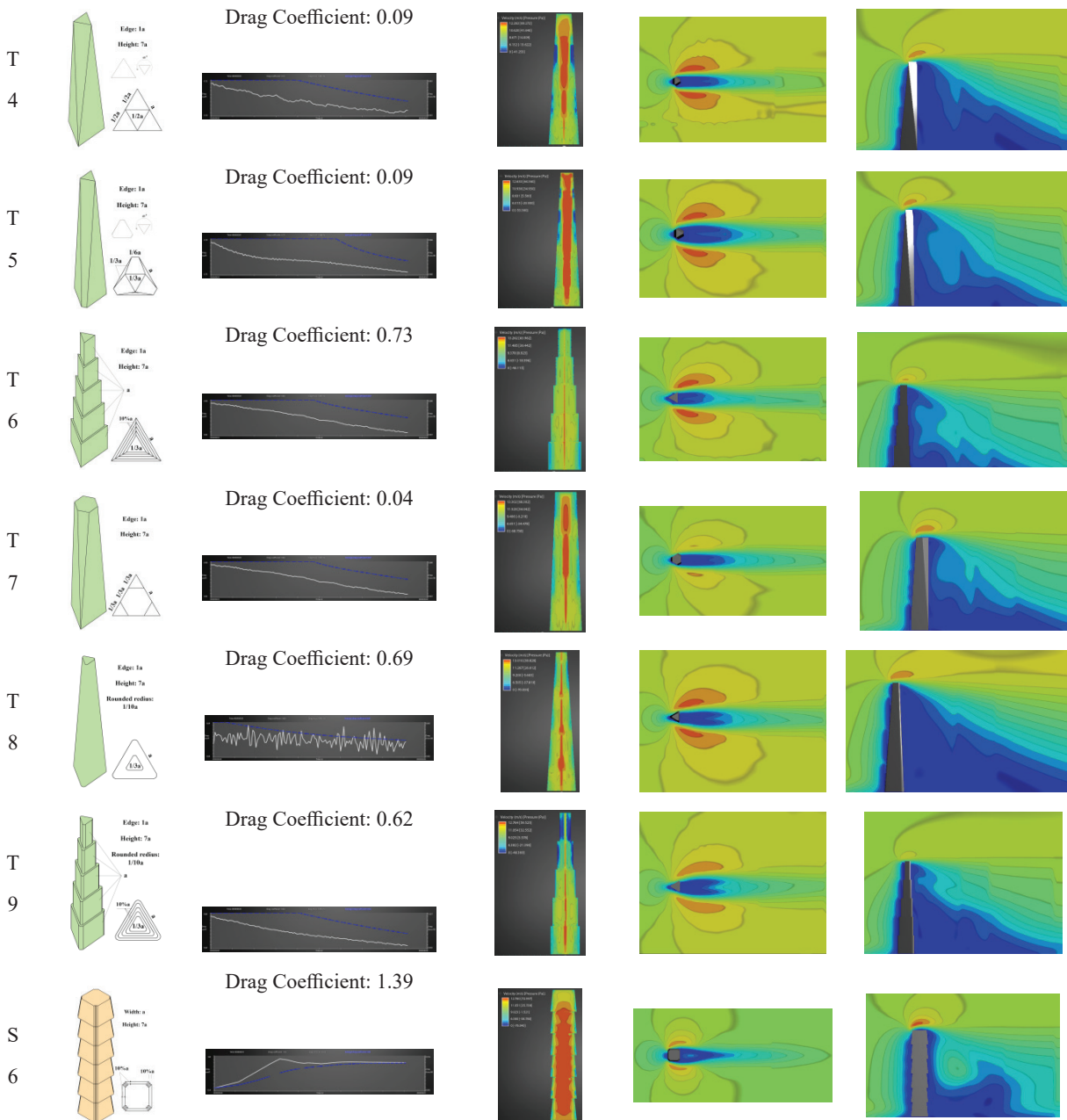
گروه اول-فرمهای پایه: مثلث، مربع و استوانه‌ای				
اشکال	ضریب پسا <sup>۴۲</sup>	منطقه خیس و نمایش فشار	منطقه دنباله در پلان (پشت ساختمان)	منطقه دنباله در مقطع (پشت ساختمان)
T1 	Drag Coefficient: 0.84 			
S1 	Drag Coefficient: 1.51 			
C1 	Drag Coefficient: 0.87 			
گروه دوم-اصلاحات آیرودینامیکی: گرد کردن، پخ دادن و دندانه‌دار کردن گوشه‌ها				
T2 	Drag Coefficient: 0.74 			
T3 	Drag Coefficient: 0.68 مشخصه: 			
S2 	Drag Coefficient: 1.15 			
S3 	Drag Coefficient: 1.34 			
S4 	Drag Coefficient: 1.21 			

ادامه جدول ۵. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی تونل باد برپایه CFD

گروه دوم-اصلاحات آنرودینامیکی: گرد کردن، پخ دادن و دنداندار کردن گوشه‌ها

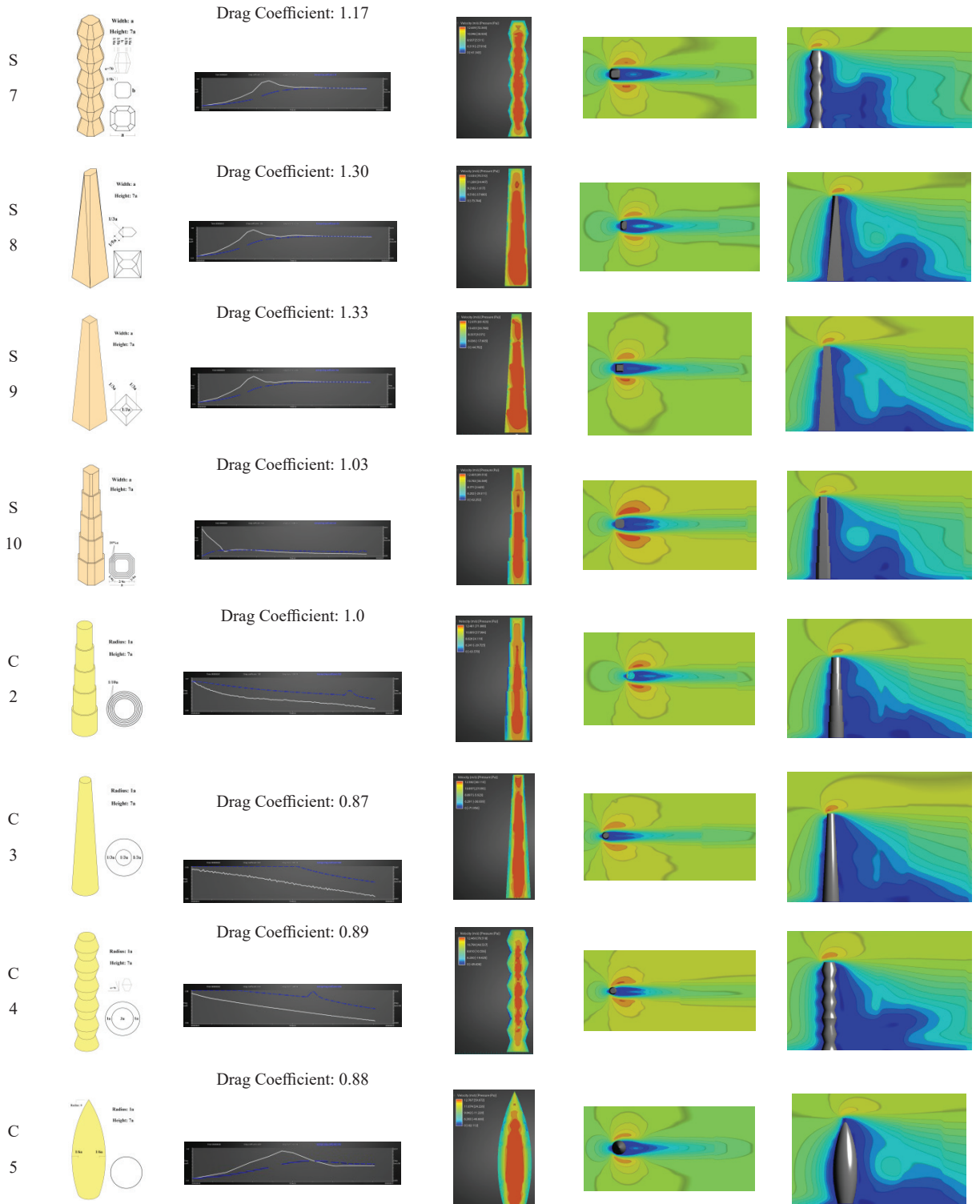


گروه سوم-فرمهای آنرودینامیکی: مخروطی و عقب‌نشینی

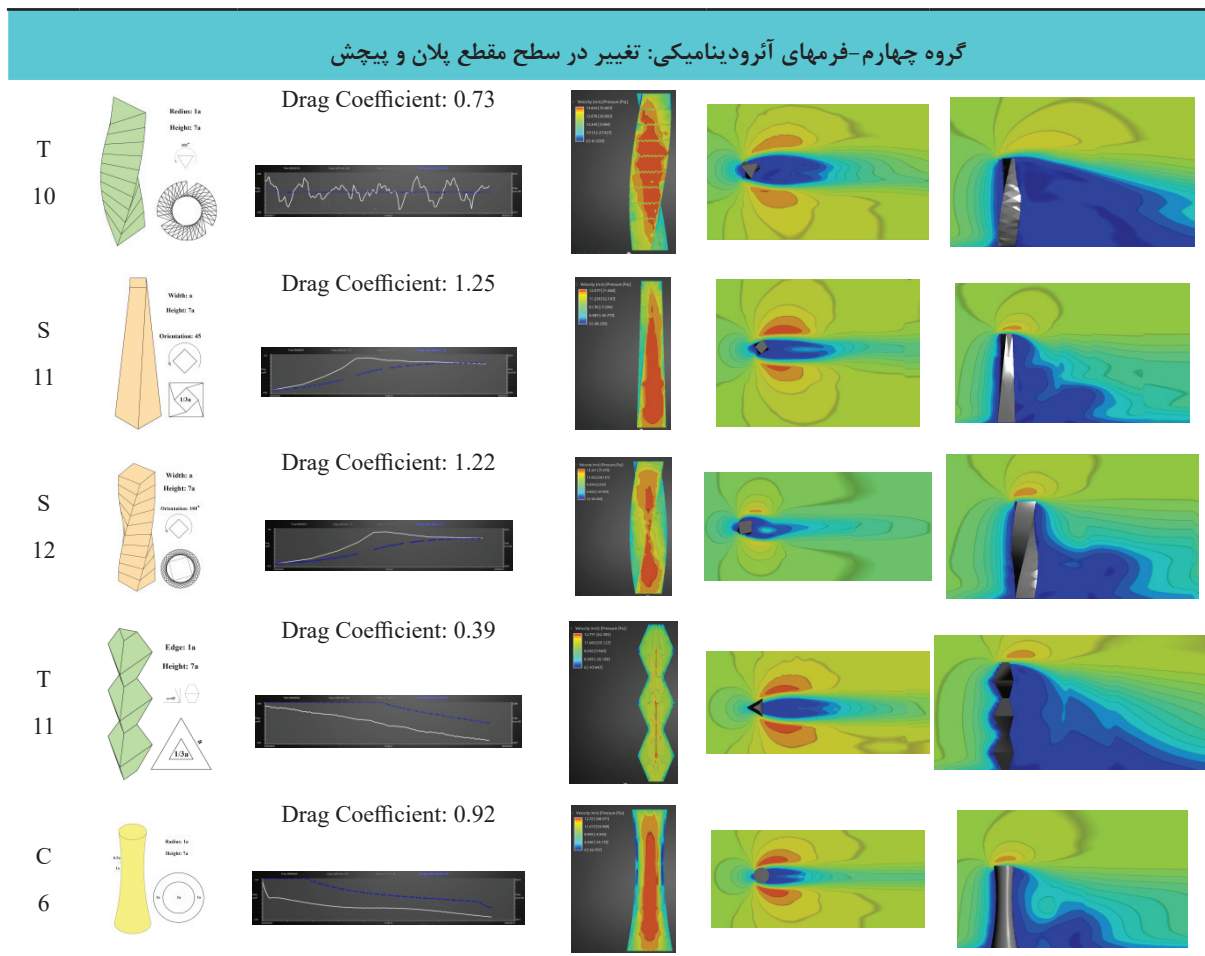


ادامه جدول ۵. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی تونل باد بر پایه CFD

گروه سوم- فرمهای آیرودینامیکی: مخروطی و عقب‌نشینی



ادامه جدول ۵. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی تونل باد بر پایه CFD

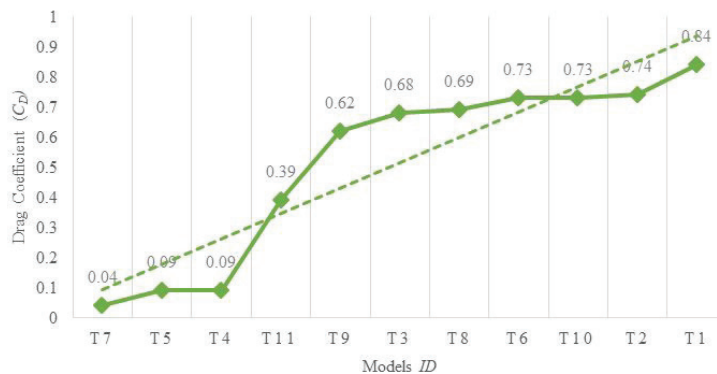


مدل‌های T2 به صورت Extrude شده و اصلاح آئروپنایمیکی پخ زده (۰/۷۴)، مدل T10 با فرم آئروپنایمیکی پیش‌پیشی با زاویه ۱۸۰ درجه (۰/۷۳)، مدل T6 با فرم آئروپنایمیکی عقب‌نشینی (۰/۷۳)، مدل T8 با فرم آئروپنایمیکی مخروطی و با اصلاح آئروپنایمیکی گرد گوشه (۰/۶۹)، مدل T3 به صورت Extrude شده و با اصلاح آئروپنایمیکی گرد گوشه (۰/۶۸)، مدل T9 با فرم آئروپنایمیکی عقب‌نشینی با اصلاح آئروپنایمیکی گرد گوشه (۰/۶۲)، مدل T11 با فرم آئروپنایمیکی تغییر سطح مقطع در پلان‌ها (۰/۳۹)، مدل T4 و T5 با فرم مخروطی با گوشه‌های پخ خورده (۰/۰۹)، مدل TV با فرم آئروپنایمیکی مخروطی با گوشه‌های پخ خورده دارای بیشترین تا کمترین مقدار ضریب پسا را تشکیل داده‌اند. در ادامه نیز در شکل ۶ مدل‌های نوع S با سطح مقطع مربع مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

### یافته‌های پژوهش

می‌توان بیان کرد که اصلاحات فرم‌های آئروپنایمیکی، هر کدام در رفتار ساختمان ناشی از نیروی هم‌راستای باد تأثیرگذار بوده و نیز تفاوت معناداری بین تأثیر فرم‌های آئروپنایمیکی در نسبت با ضریب پسا مشاهده می‌شود. به طور کلی بر اساس ارزیابی انجام شده، فرم‌های با سطح مقطع مثلث دارای عملکرد بهتری در جهت کاهش نیروی پسا در نسبت با مدل‌های مربعی و دایره‌ای هستند. در ادامه تغییر ضریب پسا در نسبت با تغییر در فرم‌های با سطح مقطع مثلث، مربع و دایره برای مدل‌های نوع T، S و C مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. در شکل ۵ مدل‌های نوع T با سطح مقطع مثلث مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

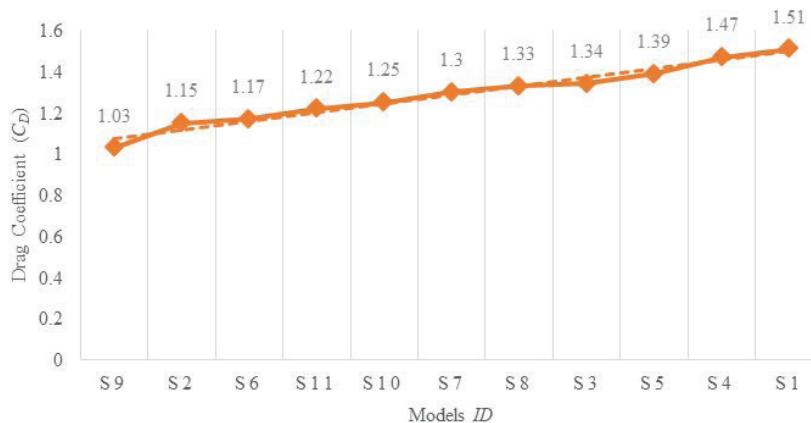
شکل ۵ نشان می‌دهد که برای مدل‌های نوع T دارای سطح مقطع مثلث، مدل با مشخصه T1 به صورت Extrude شده و با گوشه‌های تیز دارای بیشترین ضریب پسا (۰/۸۴) و همین‌طور به ترتیب



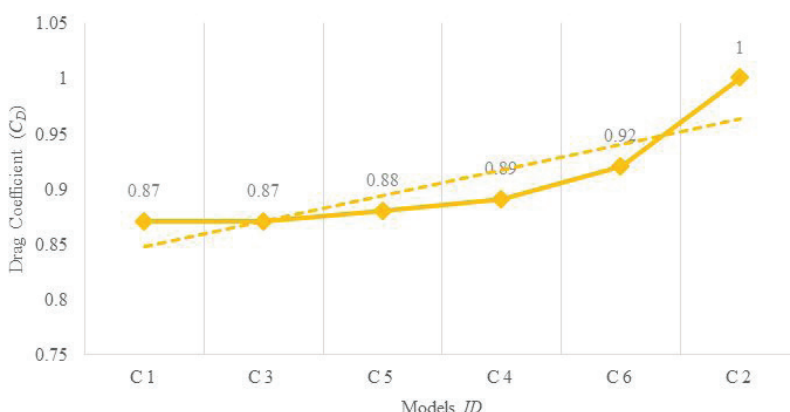
شکل ۵. نمایش تغییر ضریب پسا در نسبت با تغییر در فرم‌های با سطح مقطع مثلث

شکل ۶ نشان می‌دهد که برای مدل‌های نوع S دارای سطح مقطعی مربع، مدل با مشخصه S1 به صورت Extrude شده و با گوشه‌های تیز دارای بیشترین مقدار ضریب پسا (۱/۵۱) و همین‌طور به ترتیب مدل‌های S4 به صورت Extrude شده با اصلاح آیرودینامیکی پخ زده (۱/۴۷)، مدل S5 به صورت Extrude شده با اصلاح آیرودینامیکی گرد گوشه (۱/۳۹)، مدل S3 به صورت Extrude شده با اصلاح آیرودینامیکی دندان‌دار (۱/۳۴)، مدل S8 با فرم آیرودینامیکی مخروطی با گوشه‌های پخ خورده (۱/۳۳)، مدل S7 با فرم آیرودینامیکی تغییر سطح مقطع در پلان‌ها (۱/۳۰)، مدل S10 با فرم آیرودینامیکی عقب‌نشینی با اصلاح آیرودینامیکی پخ خورده (۱/۲۵)، مدل S11 با فرم آیرودینامیکی مخروطی با ۴۵ درجه چرخش (۱/۲۲)، مدل S6 با فرم آیرودینامیکی تغییر سطح مقطع در پلان‌ها (۱/۱۷)، مدل S2 به صورت Extrude شده با اصلاح آیرودینامیکی دو لبه (۱/۱۵) و مدل

S9 با فرم آیرودینامیکی مخروطی (۱/۰۳) دارای بیشترین تا کمترین مقدار ضریب پسا را تشکیل داده‌اند. در ادامه نیز در شکل ۷ مدل‌های نوع C با سطح مقطع دایره مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. شکل ۷ نشان می‌دهد که برای مدل‌های نوع C دارای سطح مقطع دایره، مدل با مشخصه C2 با فرم آیرودینامیکی عقب‌نشینی دارای بیشترین مقدار ضریب پسا (۱/۰۰) و همین‌طور به ترتیب مدل‌های C6 با فرم آیرودینامیکی تغییر سطح مقطع در پلان‌ها (۰/۹۲)، مدل C4 با فرم آیرودینامیکی تغییر سطح مقطع در پلان‌ها (۰/۸۹)، مدل C5 با فرم آیرودینامیکی تغییر سطح مقطع در پلان‌ها (۰/۸۸)، مدل C3 با فرم آیرودینامیکی مخروطی (۰/۸۷) و مدل C1 به صورت Extrude شده (۱/۰۳) دارای بیشترین تا کمترین مقدار ضریب پسا را تشکیل داده‌اند.



شکل ۶. نمایش تغییر ضریب پسا در نسبت با تغییر در فرم‌های با سطح مقطع مربع



شکل ۷. نمایش تغییر ضریب پسا در نسبت با تغییر در فرم‌های با سطح مقطع دایره

## نتیجه‌گیری

نیروی پسا هستند. در آخر نیز گروه چهارم فرم‌های آئرودینامیکی، تغییر در سطح مقطع پلان و پیچش به ترتیب T11، T10، C6، S12 و S11 دارای کمترین نیروی پسا هستند. بر اساس نتایج حاصل شده در این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که برای طراحی ساختمان‌های حدود ۱۵۰ متر، شکل پایه مثلث با اصلاح آئرودینامیکی پخ خورده و با فرم آئرودینامیکی مخروطی می‌تواند دارای کمترین میزان ضریب پسا و همین‌طور بهترین رفتار آئرودینامیکی را در برابر نیروی باد داشته باشد.

با توجه به شبیه‌سازی انجام‌شده در پژوهش حاضر مشاهده شد که بهره‌گیری از فرم‌ها و اصلاحات آئرودینامیکی، می‌تواند تأثیر بسیار زیادی را در میزان رفتار ساختمان در مقابل نیروی ناشی از باد نشان دهد. یافته‌های تحقیق نشان داد که در بین مدل‌های گروه T، مدل T7 دارای بهترین عملکرد با سطح مقطع مثلث است. همین‌طور برای مدل‌های گروه S، مدل S9 دارای بهترین عملکرد با سطح مقطع مربع و نیز برای مدل‌های نوع C، مدل C1 دارای بهترین عملکرد با سطح مقطع دایره، برای کاهش اثر باد بر ساختمان‌های بلند است. به این صورت که فرم آئرودینامیکی مخروطی برای مدل‌های با سطح مقطع مثلث و مربع و فرم استوانه‌ای برای مدل‌های با سطح مقطع دایره مناسب است. در ادامه نیز اصلاح آئرودینامیکی پخ خورده نیز برای مدل‌های با سطح مقطع مثلث و مربع در طراحی ساختمان‌های بلند در جهت کاهش نیروی پسا می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

## پی‌نوشت‌ها

1. Vortices
2. Along-wind motion
3. Across-wind motion
4. Torsion
5. Drag force
6. Computational fluid dynamic (CFD)
7. Wake region
8. Set-back
9. Tapered
10. Helical (twisted)
11. Aerodynamic modification

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی تونل باد در جدول ۵، بر اساس گروه‌بندی انجام‌شده مشخص شد که در گروه اشکال پایه (گروه اول)، به ترتیب مدل T1، C1، و S1 دارای کمترین نیروی پسا هستند. در ادامه گروه دوم اصلاحات آئرودینامیکی نرم کردن گوشه‌ها، پخ زدگی و دندانه‌دار کردن، به ترتیب مدل‌های T3، T2، S2، S3، S4، S5 دارای کمترین نیروی پسا هستند. همچنین گروه سوم فرم‌های آئرودینامیکی عقب‌نشینی شده و مخروطی به ترتیب T8، T9، T7، T4، T5، T7، T6، S6، S7، S8، S9، S10، C2، C4، C5، C3، T6، و S6 دارای کمترین

۲. بقائی دائمی، عبدالله؛ و اقبالی، سید رحمان (۱۳۹۶). مروری بر پیدایش و تحول ساختمان‌های بلند مسکونی از دریچه معماری معاصر جهان و ایران (نگاهی به وضعیت آماری و درخواست صدور پروانه)، کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، دانشگاه تبریز، ایران.
3. Ali, M., & Armstrong, P. (1995). *Architecture of Tall Buildings, Council on Tall Buildings and Urban Habitat Committee (CTBUH)*, New York: McGraw-Hill Book Company.
4. Amin, J. A., & Ahuja, A. K. (2010). Aerodynamic modifications to the shape of the buildings: a review of the state-of-the-art. *Asian journal of civil engineering (building and housing)*, 11(4), 433-450.
5. Amin, J. A., & Ahuja, A. K. (2014). Characteristics of wind forces and responses of rectangular tall buildings, *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 6(66), 1-14.
6. Arakeri, J. H., & Shankar, P. N. (2000). Ludwig Prandtl and boundary layers in fluid flow. *Resonance*, 5(12), 48-63.
7. Autodesk (2014). Retrieved January, 2014, from <http://www.simhub.autodesk.com/resources/flow-design-wind-tunnel-validation-brief>.
8. Baghaei Daemei, A. (2019). Wind Tunnel Simulation on the Pedestrian Level and Investigation of Flow Characteristics Around Buildings. *Journal of Energy Management and Technology*, 3(1), 58-68.
9. Baghaei Daemei, A., Ayoubi Mobarhan, S., Ansari Vaske, F., & Bahrami, P. (2018). A review of tall buildings architectural design consideration and guiding principles (Case study: City of Toronto), *International Interdisciplinary Conference "Russia and the East: the Interaction in Art"*, October 18-19, Russia, Moscow.
10. Baghaei Daemei, A., Aeinehvand, R., Kazemi, M., and Khotbehsara, E. M. (2019). Numerical Simulation of Wind Impacts on Building Blocks: Towards Sustainable Architecture Strategies. *European Journal of Sustainable Development Research*, 3(4), em0096. <https://doi.org/10.29333/ejosdr/5859>
12. Chamfered corner
13. Rounded corner
14. Recessed corner
15. Davenport, Alan Garnett
16. Tanaka, Hideyuki
17. Tamura, Yukio
18. Hayashida, Hidetoshi & Iwasa, Yoshiteru
19. Isyumov, Nicholas & Dutton, Ronald James
20. Aeroelasticity
21. Miyagi, Tetsuya
22. Turbulent
23. Kim, Yong Chul & Kanda, Jun
24. Stagnation point
25. Along-wind motion
26. Fadl, Mohamed Sakr & Karadelis, John
27. Glenn Research Center
28. Reynolds number
29. Base building (podium)
30. Middle (tower)
31. Tower top
32. Airfoil
33. Viscous friction
34. Boundary layer
35. Plan variation
36. Bluff body
37. Shear layers
38. Flow separation
39. Blunt body
40. Turbulence
41. Wetted area
42. Drag Coefficient

## فهرست مراجع

۱. بقائی دائمی، عبدالله. (۱۳۹۶). طراحی الگوی مناسب مسکن در ساختمان بلند با محوریت استفاده از فاکتورهای محیطی در اقلیم معتدل و مرطوب-بام رشت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رشت، ایران.

11. Baghaei Daemei, A., Khalatbari Limaki, A., & Safari, H. (2016). Opening Performance Simulation in Natural Ventilation Using Design Builder (Case Study: A Residential Home in Rasht). *Energy Procedia*, 100, 412-422.
12. Baghaei Daemei, A., Mehrinejad Khotbehsara, E., Malekian Nobarani, E., Bahrami, P. (2019). Study on wind aerodynamic and flow characteristics of triangular-shaped tall buildings and CFD simulation in order to assess drag coefficient. *Ain Shams Engineering Journal*, Available online 18 February, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.08.008>.
13. Baskaran, A., & Kashef, A. (1996). Investigation of air flow around buildings using computational fluid dynamics techniques. *Engineering Structures*, 18(11), 861-875.
14. Blocken, B., Carmeliet, J., & Stathopoulos, T. (2007). CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(9-11), 941-962.
15. Cermak, J. E. (1975). Applications of fluid mechanics to wind engineering a Freeman Scholar lecture. *Journal of Fluids Engineering*, 97 (1), 9-38.
16. Cooper, K. R., Nakayama, M., Sasaki, Y., Fediw, A. A., Resende-Ide, S., & Zan, S. J. (1997). Unsteady aerodynamic force measurements on a super-tall building with a tapered cross section. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 72, 199-212.
17. Currie, I. G. (2012). *Fundamental Mechanics of Fluids*. (4th ed.). New York: CRC Press.
18. Davenport, A. G. (1971). The response of six building shapes to turbulent wind, philosophical transactions of the royal society A, 269(1199), 385-394.
19. Dutton, R., & Isyumov, N. (1990). Reduction of tall building motion by aerodynamic treatments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 36, 739-47.
20. Fadl, M. S., & Karadelis, J. N. (2013). CFD simulation for wind comfort and safety in urban area: a case study of Coventry university central campus. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction (IAEC)*, 2(2), 131-143.
21. Gu, M., Huang, P., Tao, L., Zhou, X., & Fan, Z. (2010). Experimental study on wind loading on a complicated group-tower. *Journal of Fluids and Structures*, 26, 1142-1154.
22. Günel, M., & Ilgin, H. E. (2014). *Tall Buildings Structural Systems and Aerodynamic Form*. First published. Routledge, New York: Taylor & Francis Group.
23. Hall, N. (2015). Retrieved May, 2015, from [www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/drag1.html](http://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/drag1.html).
24. Hayashida, H., & Iwasa, Y. (1990). Aerodynamic shape effects on tall building for vortex induced vibration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 33(1-2), 237-42.
25. Ho, P. H. K. (2007). *Economics Planning of Super Tall Buildings in Asia Pacific Cities*, Strategic Integration of Surveying Services FIG Working Week, May 13-17, Hong Kong, China.
26. Holmes, J. D. (2001). *Wind Loading of Structures*. London: Spon Press.
27. Hu, J. C., Zhou, Y., & Dalton, C. (2006). Effects of the corner radius on the near wake of a square prism. *Experiments in Fluids*, 40(1), 106.
28. Huang, S., Li, Q. S., & Xu, S. (2007). Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(5), 612-627.
29. Ilgin, H. E., & Günel, M. H. (2007). The role of aerodynamic modifications in the form of tall buildings against wind excitation. *METU JFA*, 24(2), 17-25.
30. Irwin, P. A. (2009). Wind Engineering Challenges of the New Generation of Super-Tall Buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97, 328-334.
31. Irwin, P. A., Kilpatrick, J., Robinson, J., & Frisque, A. (2008). Wind and Tall Buildings: Negatives and Positives. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17, 915-928.
32. Isyumov, N., Dutton, R., & Davenport, A. G. (1989). *Aerodynamic methods for mitigating wind-induced building motions, Structural Design Analyze and Testing, American*



- Society of Civil Engineers* (ASCE library): 462–470.
33. Kareem, A. (1983). Mitigation of Wind-Induced Motions of Tall Buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 11(1–3), 273-284.
34. Kareem, A., Kijewski, T., & Tamura, Y. (1999). Mitigation of Motion of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications. *Wind and Structures*, 2(3), 201–251.
35. Kawai, H. (1998). Effects of corner modifications on aeroelastic instabilities of tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, 719-29.
36. Kikitsu, H., Okuda, Y., Ohashi, M., & Kanda, J. (2008). POD analysis of wind velocity field in the wake region behind vibrating three-dimensional square prism. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 2093–2103.
37. Kim, Y. C., Kanda, J., & Tamura, Y. (2011). Wind-induced coupled motion of tall buildings with varying square plan with height. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(5), 638-650.
38. Kim, Y. M., & You, K. P. (2002). Dynamic response of a tapered tall building to wind loads. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 1771-82.
39. Kim, Y., & Kanda, J. (2010). Characteristics of aerodynamic forces and pressures on square plan buildings with height variations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98(8–9), 449-465.
40. Kuo, C. Y., Tzeng, C. T., Ho, M. C., & Lai, C. M. (2015). Wind Tunnel Studies of a Pedestrian-Level Wind Environment in a Street Canyon between a High-Rise Building with a Podium and Low-Level Attached Houses. *Energies*, 8(10), 10942-10957.
41. Kwok, K. C. S. (1988). Effect of building shape on wind-induced response of tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 28, 381–390.
42. Kwok, K. C. S., & Bailey, P. A. (1987). Aerodynamic devices for tall building and structures. *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 4(111), 349-65.
43. Lin, N., Letchford, C., Tamura, Y., Liang, B., & Nakamura, O. (2005). Characteristics of wind forces acting on tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(3), 217-242.
44. McCormick, B. W. (1979). *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
45. Mendis, P., Ngo, T., Haritos, N., & Hira, A. (2007). *Wind loadings on tall buildings*. EJSE Special Issue: Loading on Structures, 41, 1–14.
46. Miyashita, K., Katagiri, J., Nakamura, O., Ohkuma, T., Tamura, Y., Itoh, M., & Mimachi, T. (1993). Wind induced response of high rise building: effects of corner cuts or opening in square building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 50, 319-28.
47. Mochida, A., & Lun Isaac, Y. F. (2008). Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10–11), 1498-1527.
48. Moreno, J. (1989). *Analysis and Design of High-Rise Concrete Buildings, ACI SP-97 Series*, Michigan: American Concrete Institute.
49. Parker, D., & Wood, A. (2013). *The Tall Buildings Reference Book*, First published. New York. Routledge: Taylor & Francis Group.
50. Sathyajith, M. (2006). *Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. (1th ed.). Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
51. Schueller, W. (1977). *High-Rise Building Structures*. New York: John and Wiley Sons Inc.
52. Scott, D., Hamilton, N., & Ko, E. (2005). Structural Design Challenges for Tall Buildings. *Structure Magazine*, 2, 20–23.
53. Stathopoulos, T. (2009). *Wind and Comfort, EACWE 5 - International Association for Wind Engineering*, Florence, Italy.
54. Tamura, T., & Miyagi, T. (1999). The effect of turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83, 135–145.
55. Tamura, T., Miyagi, T., & Kitagishi, T. (1998). Numerical prediction of unsteady pressures on a square cylinder with various corner shapes. *Journal of Wind Engineering and*

*Industrial Aerodynamics*, 74-76, 531-542.

56. Tamura, Y., Kim, Y. C., Tanaka, H., Bandi, E. K., Yoshida, A., & Ohtake, K. (2013). Aerodynamic and response characteristics of super-tall buildings with various configurations, *Proceedings of the Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, December 10-14, Chennai, India.

57. Tanaka, H., Tamura, Y., Ohtake, K., Nakai, M., & Kim, Y. C. (2012). Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 107-108, 179-191.

58. Taranath, B. S. (2004). *Wind and earthquake resistant buildings: Structural analysis and design*. CRC press.

59. Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10-11), 1749-1761.

60. Tse, K.T., Hitchcock, P.A., Kowk, K. C. S., Thepmongkorn, S., & Chan, C. M. (2009). Economic perspectives of aerodynamic treatments of square tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97, 455-467.

# Wind Tunnel Flow Simulation and Aerodynamic Shape Optimization of Tall Buildings to Improve the Drag Coefficient under Wind Forces

*Abdollah Baghaei Daemei\**, Young Researchers and Elite Club, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran.

*Seyed Rahman Eghbali*, Department of Architecture, Imam Khomeini International University, Room No. 273, Qazvin, Iran.

*Hossein Moez*, Department of Civil Engineering, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran.

*Payam Bahrami*, Ph.D. Optim Design Inc., Illinois Office, 2700 Patriot Blvd., Suite 250, Glenview, IL 60026, USA.

## Abstract

Aerodynamic behavior is an important characteristic of tall and ductile buildings, so aerodynamic design can play a key role in reducing the wind effect on these buildings. A tall building's response to wind can be controlled by application of aerodynamic improvements to building's design in order to manipulate the wind flow pattern and break the effective wind force acting on the structure. Traditionally the approach of structural engineers to mitigating wind loading and associated deflections and motions on tall buildings was to stiffen the building with the aim of increasing the natural frequency. Tall modern buildings are extremely sensitive to the wind. Thus, assessment of wind loads to design these buildings is essential. Monitoring the wind, which is forcing extraordinary tall buildings, is highly challenging. Due to increasing construction in recent decades, the study on wind flow over high-rise buildings has become a popular subject in theoretical research and applied engineering applications. By looking at recent constructions in Iran, it is obvious that despite the fact that constructing tall buildings is spreading, there is less concentration on environmental factors. In tall buildings, aerodynamic behavior generally becomes important. The wind-induced building response of tall buildings can be reduced by means of aerodynamic form design and modifications that change the flow pattern around the building or break up the wind affecting the building face. Aerodynamic-based design can be divided into two types, "aerodynamic architectural design" and "aerodynamic architectural modifications" and their subgroups. The accurate estimation of the critical response parameters, such as top floor accelerations and displacements, is of fundamental importance when ensuring reliable designs of tall buildings. Methods to this end are typically set in a modal analysis framework and therefore require the estimation of the generalized forcing functions. Tall buildings are particularly prone to dynamic excitations such as those from natural disasters like strong winds and earthquakes, and this has become an especially important design issue. One way to minimize wind-induced vibrations of tall buildings is to focus more on their shapes in the design stage. Investigated aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations. The proposed of this research, investigation of aerodynamic shape optimization on tall buildings in order to reduce drag force. The aerodynamic forms such as a set-back, tapered and helical (twisted) and also aerodynamic modifications such as a chamfered corner, rounded corner and recessed corner to control and reduce wind forces and vortices on tall buildings are considered. On this basis, the study was carried out with numerical simulation of wind tunnel test on 29 building models. In order to construct 3D models, AutoCAD 2014 software was deployed and also to numerically simulate wind tunnel Autodesk Flow Design 2014 is used. Building samples were entered into the software via format FBX. The results showed that for a tall building with a triangular footprint and height of about 150 meters, base shape with chamfered corners of aerodynamic modification and tapered of aerodynamic form can have the best aerodynamic behavior against wind forces.

**Keywords:** Wind Tunnel Simulation, Aerodynamic Optimization, Shape of Tall Buildings, Drag Coefficient, Wind Force, Wind Aerodynamics.

\* Corresponding Author: Email: baghaei@iaurasht.ac.ir