

## بررسی عددی و تحلیلی تاثیر هندسه‌های متفاوت معماری بر پدیده دودکشی و مصرف انرژی در ساختمان‌های بلند مرتبه

سعید وحیدی<sup>۱\*</sup>، سجاد کلیدری<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران  
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه سجاد، مشهد، ایران

### چکیده

با توجه به اهمیت پدیده‌های طبیعی در زندگی انسان، بررسی و مطالعه این پدیده‌ها همواره مورد توجه بوده است. هدف این مطالعه بررسی پدیده دودکشی است که در همه ساختمان‌ها اتفاق می‌افتد اگر چه در ساختمان‌های بلندمرتبه محسوس‌تر است. با توجه به اهمیت این پدیده در مصرف انرژی ساختمان‌های بلندمرتبه در این پژوهش این نوع ساختمان‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. به دلیل اهمیت تاثیر مقطع ساختمان‌ها در بروز و رفتار این پدیده، مقاطع بیضوی، مثلثی و مستطیلی با سطح یکسان مورد بررسی قرار گرفته و با مقایسه نتایج به دست آمده، مقاطع متفاوت ارزیابی و مقایسه شده‌اند. شبیه‌سازی این پدیده در نرم‌افزار فلونت انجام گرفته و نتایج تحلیلی با عددی مقایسه شده است که تطابق خوبی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد مقطع بیضی‌گون با توجه به هندسه آن و رابط آیرودینامیکی، بهترین عملکرد را از نظر میزان حجم هوای لازم جهت ایجاد فشار مثبت و غلبه بر پدیده دودکشی و در نتیجه کاهش مصرف انرژی دارد.

### کلمات کلیدی

پدیده دودکشی، آیرودینامیک ساختمان، بهینه‌سازی مصرف انرژی، مقطع هندسی ساختمان.

## Numerical and Analytical Study of the Effect of Different Architectural Geometries on the Stack Effect and Energy Consumption in Tall Buildings

Saeed Vahidifar<sup>1\*</sup>, Sadjad Kalidari<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

2- Master's student, Faculty of Mechanics and Energy, Sadjad University, Mashhad, Iran

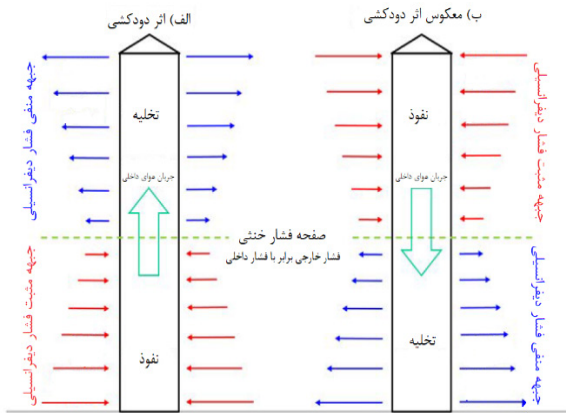
### Abstract

Due to the importance of natural phenomena in human life, investigation and study of these phenomena has always been of interest. The aim of this study is to investigate the stack effect that occurs in all buildings, although it is more noticeable in high-rise buildings. Due to the importance of this phenomenon in the energy consumption of high-rise buildings, in this research, these types of buildings have been studied. Due to the importance of the influence of the cross-section of buildings on the occurrence and behavior of this phenomenon, therefore, elliptical, triangular and rectangular cross-sections with the same surface have been examined and by comparing the results, different cross-sections have been evaluated and compared. The simulation of this phenomenon has been done in Fluent software and the analytical results have been compared, which shows a good match. The results show that the elliptical cross-section, according to its geometry and aerodynamic conditions, has the best performance in terms of the amount of additional pressure required to create positive pressure and energy consumption.

### Keywords

Stack effect, Aerodynamic of building, Optimization of energy, Cross section of building.

## ۱- مقدمه



شکل ۱: نمای نحوه ایجاد پدیده دودکشی و عکس آن در ساختمان

هوای گرم بالا رونده باعث کاهش فشار در پایین ساختمان می شود و هوای سرد را از درها، پنجره ها یا دیگر بازشوها و درزها به داخل نفوذ می کند [۲]. در طول فصل تابستان، اثر دودکشی معکوس<sup>۲</sup> می شود، اما با توجه به تفاوت دمای کمتر به طور معمول خفیف تر است. مشخصات جریان هوای ساختمان های بلندمرتبه که توسط اثر دودکشی در زمستان هدایت می شوند عبارتند از:

۱- جریان هوای بیرون در پایین ساختمان رخ می دهد.

۲- هوای داخلی گرم تر از طریق هسته های عمودی ساختمان، مانند چاله آسانسور و راه پله، به دلیل نیروی شناوری که اختلاف فشار ایجاد می کند، بالا می رود.

۳- هوای داخل ساختمان از طریق فضاهای افقی شامل راهروها و اتاقها در طبقات بالا به بیرون از ساختمان جریان می یابد [۳].

میورسکی<sup>۳</sup> و همکاران با استفاده از اعداد و داده های ASHRAE (۲۰۱۳) به بررسی پدیده دودکشی در یک مدل ساختمان ۲۳۰ متری با شرایط آب و هوایی کشورهای قزاقستان و عربستان سعودی و تحلیل اثرات این پدیده با تغییر شرایط آب و هوایی پرداخته اند و تاثیر پارامترهایی از قبیل: دما، محفظه هوابندی شده نمای خارجی، سرعت باد

با افزایش جمعیت و رشد اقتصاد، تقاضا برای انرژی زیاد شده است که در سه دهه اخیر این تقاضای انرژی به شدت افزایش یافته است. نفت و گاز نقش مهمی را در تامین نیازهای انرژی مورد نیاز در دنیا به خود اختصاص داده اند، اما با توجه به افزایش قیمت سوخت های فسیلی و همچنین افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه ای، به طوری که در سال ۲۰۱۵ شاهد انتشار ۳۲/۲۹۴ میلیون تن دی اکسید کربن بر اثر سوختن سوخت های فسیلی بوده ایم، امروزه بشر دائما در حال تلاش است تا وابستگی خود را به سوخت های فسیلی از بین ببرد [۱].

به دلیل اهمیت موضوع مصرف انرژی، تحقیقات زیادی بر روی پدیده دودکشی صورت گرفته است. پژوهش درباره این پدیده طبیعی، در بالا بردن سطح بازدهی دستگاه های گرمایشی و سرمایشی مورد استفاده در ساختمان ها تاثیر بسزایی دارد. با افزایش بازدهی وسایل گرمایشی و سرمایشی می توان به بهبود مصرف انرژی و کاهش مصرف حامل های آن کمک شایانی نمود. این پدیده در ساختمان های بلند مرتبه هم در طول فصول گرم و هم در فصولی که دمای هوای پایین است رخ می دهد.

اثر دودکشی به معنی حرکت هوا به داخل و خارج ساختمان ها، دودکش ها و یا دیگر محفظه ها است و محرک آن نیروی شناوری هوا<sup>۱</sup> است. شناوری به دلیل تفاوت در چگالی هوا در محیط داخلی و فضای باز ناشی از اختلاف دما و رطوبت رخ می دهد و نتیجه آن یک نیروی شناوری مثبت یا منفی است. مطابق با شکل ۱ در طول فصل زمستان، هوای گرم تر داخلی از داخل ساختمان به بالا می رود و در بالا از طریق پنجره های باز، بازشوها و تهویه و یا دیگر درزها به خارج ساختمان هدایت می شود.

۱ Buoyancy

۲ Reverse Stack Effect

۳Sergey Mijorski

پوشش داخلی و مقاومت جریان هوای داخلی بستگی دارد؛ بنابراین مشکلات ناشی از اثر این پدیده ممکن است تا حدودی با نصب هشتی‌ها در اطراف درهای ورودی و سرویس دهنده آسانسور و با منطقه بندی آسانسورها حل شود [۵]. پروفیسور لیم<sup>۳</sup> و همکاران در پژوهشی به بررسی مشکلات ناشی از پدیده دودکشی پرداخته‌اند؛ آنان بسیاری از اقدامات لازم برای به حداقل رساندن خرابی عملکرد ساختمان توسط اثر دودکشی نموده‌اند، اما گاهی اوقات روش ترکیبی آنها نتایج مورد انتظار را ایجاد نکرد. در مطالعه آنها اصول اساسی پدیده دودکشی و اقدامات لازم آن را در یک ساختمان اداری بلندمرتبه با تمرکز ویژه بر تجزیه و تحلیل تعامل بین اقدامات متقابل بررسی شده و یک مدل شبکه (CONTAM) که جریان هوا و فشار را در ساختمان‌ها شبیه‌سازی می‌کند، استفاده شد. آنان دریافتند که تداخل هم‌افزایی-تضادی و مثبت-منفی قابل توجهی در عملکرد اقدامات متقابل اثر دودکشی بسته به ترکیب آنها وجود دارد؛ بنابراین، اقدامات متقابل اثر باید با توجه به ویژگی‌های آن و تعامل بین اقدامات متقابل ایجاد شود [۶]. در پژوهش دیگری سونگ‌مین یون<sup>۴</sup> و همکارانش تحقیقاتی در ساختمان‌های بلندمرتبه درباره بار گرمایش انجام داده‌اند؛ آنها با در نظر گرفتن اینکه جریان هوای عمودی در ساختمان‌های بلند به دلیل اثر دودکشی ناشی از اختلاف دما بین داخل و خارج ساختمان ایجاد می‌شود، تفاوت‌های ناشی از اثر دودکشی با اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی جریان هوا و انرژی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج شبیه‌سازی شده سه نوع عنصر بار گرمایشی را از فعل و انفعالات جریان هوا با جریان هوای عمودی نشان می‌دهند: (۱) بار نفوذ هوا در فضای باز، (۲) بار نفوذ هوای بین منطقه‌ای و (۳) افزایش انتقال حرارت در بین دیوارهای بین راهروها و

منطقه و جهت باد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. مطالعات آنها نشان داد که فشار باد و همچنین اثر دودکشی نقش بسزایی در عملکرد کلی ساختمان‌ها دارند. آنها همچنین دریافتند که برای یک ساختمان منشوری شکل ساده، فشار باد به طور معمول به افزایش نرخ تخلیه در سراسر قسمت‌های بالایی سطوح ساختمان در مورد اثر دودکشی، کمک می‌کند. از طرفی درباره اثر معکوس پدیده دودکشی به این نکته پی‌برده‌اند که فشار باد تمایل به خنثی کردن اثر نیروهای شناوری را دارد [۲]. ژیاوژین مان<sup>۱</sup> و همکاران در مطالعه دیگر اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی‌های عددی عملکرد هوابندی و توزیع فشار دودکشی را برای یک ساختمان مسکونی بلند ۱۰۶/۷ متر در هاربین، واقع در شمال شرقی چین ارائه دادند. یک آزمایش میدان هوابندی با استفاده از روش تحت فشار قرار گرفتن فن انجام شد و مقادیر اندازه‌گیری شده به عنوان داده‌های ورودی برای پیش‌بینی‌ها استفاده شد. بیشترین اختلاف فشار ایجاد شده تحت پدیده دودکشی در طبقه همکف به (پاسکال) ۵۱/۵ رسید که یک اثر مخرب شدید در پدیده دودکشی محسوب می‌شود. علاوه بر این، تأثیرات محل و هوابندی درهای مختلف راه پله بر روی اثر پدیده دودکشی مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این مطالعه به تبیین اهمیت هوادهی ساختمان در آب و هوای سرد و کاهش اثر انباشت ساختمان‌های بلندمرتبه نیز کمک می‌کند [۴]. در پژوهشی دیگر، یانگ<sup>۲</sup> و همکاران تجزیه و تحلیل تأثیر پدیده دودکشی در ساختمان‌های بلند برای حل مشکلات مختلف ناشی از آن را بررسی نموده و ارزیابی تأثیرات روی پدیده دودکشی، شبیه‌سازی برنامه‌های کامپیوتری مدل شبکه برای یک ساختمان اداری مرتفع معمولی انجام شد، نتایج شبیه‌سازی‌ها آنها نشان داد که تأثیر ناشی از این اثر عمدتاً به سفتی

<sup>۱</sup>Xiaoxin Man

<sup>۲</sup>In-Ho Yang

<sup>۳</sup>Hyunwoo Lim

<sup>۴</sup>Sungmin Yoon

با توجه به اینکه عوامل زیادی در ایجاد و اثر بخشی این پدیده در ساختمان نقش دارند که در این مطالعه به بررسی و مقایسه اثر بخشی اشکال مقاطع متفاوت معماری در این نوع ساختمان‌ها می‌پردازیم زیرا اشکال مختلف هندسی در میزان مصرف انرژی بسیار تاثیر گذار هستند و هدف این مقاله ارائه راه حلی مناسب برای کاهش و بهبود مصرف انرژی در این نوع ساختمان‌های بلند مرتبه است. ذکر این نکته بسیار مهم است که عدم توجه به اثرات این پدیده در زمان طراحی معماری و تاسیسات مکانیکی ساختمان است؛ چنانچه در زمان طراحی به مسائل و مشکلاتی که این پدیده ممکن است برای ساختمان در مدت زمان طولانی به وجود بیاورد، توجه شود می‌توان از مصرف بی رویه انرژی و حامل‌های آن جلوگیری کرد.

## ۲- شبیه‌سازی عددی و حل تحلیلی

برای انجام این مطالعه از دو روش استفاده شده است:

الف) روش تحلیلی: در این روش یک ساختمان واقعی در شهر مشهد با استفاده از روش تحلیلی مورد مطالعه قرار خواهد گرفته و نتایج آن گزارش شده است.

ب) روش عددی: در روش دوم با استفاده از نرم‌افزار فلوننت ورژن R1 ۲۰۲۱ اقدام به محاسبه همان ساختمان در روش الف شده و نتایج را با هم مقایسه شده است.

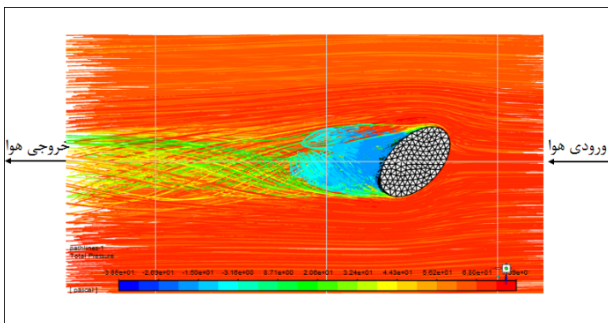
در این پژوهش همان‌طور که در بالا اشاره شد، نمونه ایی که تحلیل و بررسی آن را در دستور کار خود داریم ساختمانی با ارتفاع ۷۸ متر و در شرایط آب و هوایی شهر مشهد می‌باشد. همچنین در این مدل فیزیکی هیچگونه بازشویی وجود ندارد و فقط اثر و جهت فشار وارد شده به ساختمان در نتیجه برخورد باد در تونل باد عاملی است که باید اندازه‌گیری شود. نمونه واقعی که با توجه به مشخصات آن تصمیم به طرح این مسئله و حل این مشکل گرفته‌ایم، برج مسکونی در کشور ایران، استان

اتاق‌های در طبقات پایین. بر اساس ویژگی‌های مختلف آنها به تفکیک طبقه، نسبت‌های اختلاف بین حداقل و حداکثر بار گرمایش در طبقات به ترتیب در ضلع بالا و پایین از سطح خنثی ۲۹۱٪ و ۱۱۹۷٪ بود. این مطالعه نشان می‌دهد که در نظر گرفتن جریان هوای عمودی ناشی از پدیده دودکشی با روش شبیه‌سازی پیشنهادی در محاسبه انرژی گرمایش در ساختمان‌های مسکونی بلند، به ویژه در مناطق سرد، مهم است [۷]. یوچن شی<sup>۱</sup> و همکاران مطالعاتی را با هدف بررسی تأثیر نرخ تهویه مکانیکی بر میزان نفوذ تحت اثر دودکشی برای ساختمان‌های دارای پنجره‌های چندلایه انجام داده‌اند و روشی که رابطه ریاضی بین این دو نرخ را توضیح می‌دهد را ارائه نموده‌اند. چون آنها از روش استاندارد برای محاسبه حداقل نرخ تهویه مکانیکی مورد نیاز برای دستیابی به نرخ نفوذ صفر برای یک ساختمان با پنجره‌های چند لایه استفاده کردند لذا آنها نتیجه‌گیری کردند که حداقل نسبت بین نرخ تهویه مکانیکی و نفوذ هوای اولیه برای دستیابی به نرخ نفوذ صفر به نسبت عرض به ارتفاع پنجره، فاصله عمودی بین پنجره‌ها و تعداد لایه‌های پنجره بستگی دارد. آنها دستور العمل‌های بیشتری برای راهنمایی روش‌های طراحی تهویه ارائه کردند [۸]. در پژوهشی که ریستو کاسونن<sup>۲</sup> و همکارانش انجام دادند، دریافتند روش‌هایی برای به حداقل رساندن پدیده دودکشی بود که شامل اثرات هوابندی ساختمان، توزیع نشت هوا و شرایط محیطی در فضای باز بر شرایط فشار هوا و مصرف انرژی در یک ساختمان مسکونی مرتفع در شرایط آب و هوایی سرد بررسی کردند. با ترتیب فضا بندی و هوا بندی بهبود یافته می‌توان از این پدیده جلوگیری کرد. بر اساس تجزیه و تحلیل انجام شده، هوا بندی داخلی ساختمان نقش اصلی را در کنترل اثر دودکشی ایفا می‌کند [۹].

<sup>۱</sup> Yuchen Shi

<sup>۲</sup> Risto Kosonen

با توجه به اینکه برای تحلیل این نوع مسائل در نرم‌افزار فلوئنت باید شرایط مرزی نیز تعیین نماییم. در این مسئله شرایط مرزی به شکل زیر انتخاب شده است: (۱) شکل‌هایی که قرار است مورد بررسی قرار بگیرند همگی از یک جنس مشخص (شیشه) با ضخامت ۰/۰۴ متر در دیواره خود قرار دارند تا به نمونه واقعی نزدیک‌تر باشد، (۲) دمای تونل بادی ۱۰- درجه سانتی‌گراد می‌باشد و سرعت هوا ورودی این تونل باد نیز بر طبق گلباد به‌دست آمده از هواشناسی استان خراسان رضوی، برحسب متوسط باد غالب مشهد ۱۰ متر بر ثانیه انتخاب شده است، (۳) در تونل باد به جز ورودی و خروجی سیالی که با اجسام برخورد دارد، بقیه دیواره‌های این تونل باد دیوار<sup>۱</sup> در نظر گرفته می‌شود، (۴) دمای داخلی اجسام نیز برابر با دمای آسایش ساختمان‌های مسکونی ۲۵ درجه سانتی‌گراد انتخاب گردیده است.



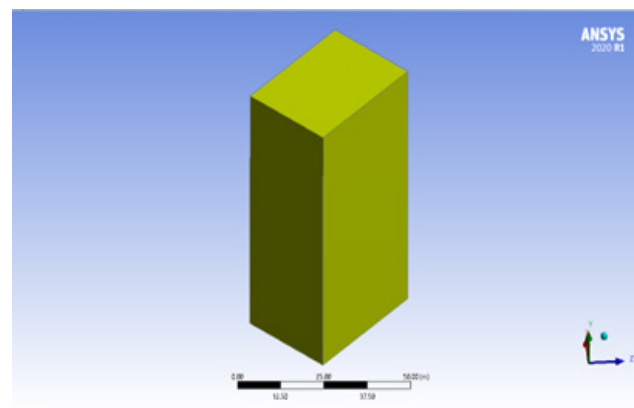
شکل ۳: نمای از بالای تونل باد انتخابی جهت شبیه‌سازی

اشکال و مقاطع انتخابی برای حل این مسئله ابتدا شبکه بندی شده و سپس در نرم‌افزار فلوئنت اقدام به حل آنها شده است.

خراسان رضوی و در شهر می‌باشد. این پروژه در زمینی به مساحت ۲۳۰۰ متر با زیر بنای حدود ۳۰۰۰۰ متر مربع در حال احداث می‌باشد. این برج در ۲۶ طبقه تجاری و مسکونی طراحی شده که بخش مسکونی آن از ۶۰ واحد تشکیل شده است.

## ۲-۱- روش عددی

با استفاده از قابلیت حل معادلات انتقال گرما در نرم‌افزار فلوئنت اقدام به حل این معادله شده است و با استفاده از دیگر قابلیت نرم‌افزار فلوئنت که نشان دادن نواحی پر فشار و کم فشار بر روی جسم توسط نقشه‌های برجسته است، به بررسی و تحلیل این نقاط جهت یافتن شکل هندسی مورد گردیده است. در این روش ما از سه مقطع هندسی برای شبیه‌سازی استفاده شده است که این مقاطع شامل مقطع مثلثی، مستطیلی و بیضی‌گون می‌باشد. در طراحی اشکال مختلف، داشتن شباهت هندسی با نمونه واقعی چه از نظر حجم و مساحت و چه از نظر نزدیکی هندسی است. به طور مثال اگر بخواهیم شکلی بیضی‌گون طراحی کنیم حتماً نزدیک‌ترین شکل هم از نظر حجمی و هم از نظر هندسی به نمونه واقعی انتخاب خواهد شد. از طرفی با استفاده از نتایج به‌دست آمده از حل و با تحلیل داده‌ها می‌توانیم نقاطی که دارای بیشترین اتلاف انرژی را دارا هستند نیز شناسایی نموده و با استفاده از معادلات، انرژی لازم را برای رفع این اتلاف تامین کنیم.



شکل ۲: طرح فیزیکی مسئله (مقطع مستطیلی)

شده است تا علاوه بر مشاهده مقادیر اختلاف در اعداد به دست آمده در هر شبکه بندی، به اعتبارسنجی روش حل این پژوهش نیز کمک نماییم و همچنین مقدار شبکه بندی بهینه جهت حل این مسأله با توجه به اختلاف کم در بین شبکه بندی های مختلف هر طراحی، کمترین مقدار آن در هر طراحی در نظر گرفته می شود. شایان ذکر است که مقدار انتخابی نشان دهنده فشار جهت مقایسه در این نمودار مربوط به اواسط طول ضلع عبوری باد در همه این مقاطع می باشد.

همچنین باید به این نکته اشاره کنیم با توجه به شکل فوق و با توجه به مقادیر ثبت شده در حلگر با مقادیر مختلف شبکه بندی که اختلاف بسیار کمی با یکدیگر دارند، پس در حل هر کدام از مقاطع کمترین مقدار شبکه بندی انتخاب می شود تا در وقت و در هزینه نیز صرفه جویی شود.

#### ۲-۱-۱- معادلات حاکم

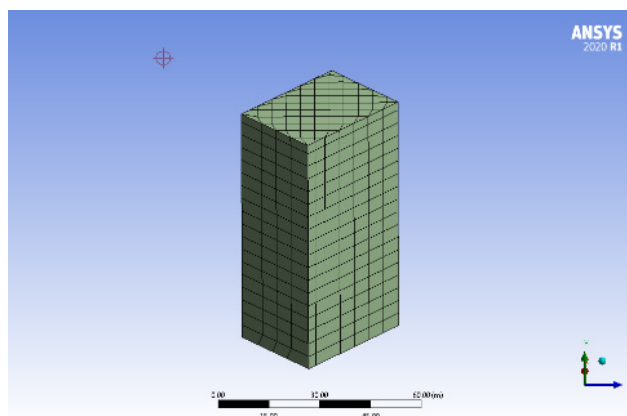
معادلات حاکم بر جریان سیال لزج در حالت آشفته، توسط معادلات ناویر-استوکس<sup>۳</sup> متوسط گیری زمانی شده، بیان می شوند. معادلات پیوستگی<sup>۴</sup> (بقای جرم، معادله ۱)، حرکت<sup>۵</sup> (بقای مومنتم، معادله ۲) و انرژی<sup>۶</sup> (معادله ۳) بعد از متوسط گیری زمانی به صورت زیر می باشند:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot (\vec{U}\vec{U}) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2)$$

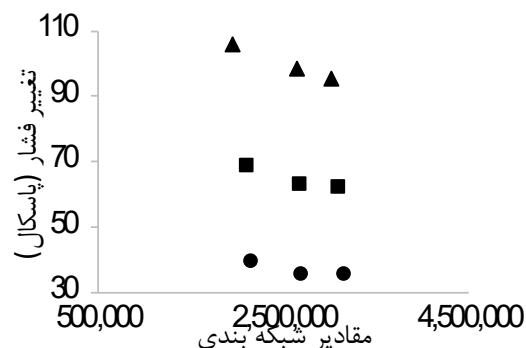
$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

معادلات اصلی و حاکم در حل این پژوهش معادلات فوق می باشند اما معادلات دیگری نیز به ما در این مطالعه جهت رسیدن به پاسخ های درست کمک می کنند. همان طور که قبلا گفته شد با کمک شبیه سازی در



شکل ۴: شبکه بندی طراحی مقطع مستطیلی به روش مربع کامل

شبکه بندی این طراحی ها در دو نوع به انجام شده است که به شرح ذیل می باشد: (۱) شبکه بندی مربع کامل<sup>۱</sup> (۲) شبکه بندی چهاروجهی<sup>۲</sup>؛ طراحی این مقاطع به این دلیل در دو نوع شبکه بندی انجام می شود که با به دست آمدن پاسخ حل این پژوهش توسط حلگر، مشخص شود که آیا این طراحی دارای خطا بوده و همچنین نشان می دهد که پاسخ و یا پاسخ های به دست آمده چه مقدار با یکدیگر متفاوت هستند تا به درستی حل و طراحی پی ببریم.



شکل ۵: نمودار استقلال از شبکه در مقاطع مختلف

در نمودار بالا به بررسی استقلال از شبکه در شبکه بندی مختلف با تعداد متفاوت المان در تمامی مقاطع پرداخته

۱ Complete Square Mesh

۲ Tetrahedrons mesh

۳ Navier-Stokes Equations

۴ Continuity Equation

۵ Momentum Equation

۶ Energy Equation

خواهیم نمود. خط فشار خنثی، رابطه (۷)، بخشی است که در آن فشار هوا در خارج برابر فشار هوای داخل ساختمان است [۴].

$$H_{NPL} = \frac{H_0}{1 + \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 * \left(\frac{T_i}{T_o}\right)}$$

برای زمستان  $T_i < T_o$

در رابطه (۷)،  $A_1$  برابر با مساحت پایین‌ترین بازشو ساختمان و  $A_2$  مقدار مساحت بالاترین بازشو ساختمان و همچنین  $T_i$  و  $T_o$  به ترتیب دمای داخل و خارج ساختمان در نظر گرفته می‌شوند. همچنین جهت بدست آوردن تغییرات فشار هر طبقه نسبت به خط فشار خنثی از معادله زیر، معادله (۸)، استفاده می‌گردد:

$$\Delta p_{\text{stack effect}} = c_1 \rho_i \left[ \frac{T_i - T_o}{T_i} \right] \cdot g \cdot [H_{NPL} - H] \quad (8)$$

تنها متغیر در عبارت فوق  $H$  است و بقیه پارامترها ثابت هستند.  $C_1$  عددی برابر  $0.0598$  فرض می‌گردد و ما بقی اعداد بر حسب طبقه مورد بررسی در نظر گرفته می‌شوند. همچنین لازم به ذکر است که تغییرات فشار در اثر دودکشی بر حسب اینج آب<sup>۱</sup>، ارتفاع ساختمان بر حسب فوت<sup>۲</sup> و دماهای انتخابی بر حسب رانکین در نظر گرفته می‌شود [۱۰].

از آنجایی که می‌دانیم سرعت باد در طبقات مختلف با یکدیگر فرق می‌کنند (با توجه به شکل حرکتی سرعت باد) پس فشار هم در طبقات مختلف ساختمان متفاوت خواهد بود (با توجه به رابطه فشار دینامیکی<sup>۳</sup>)، لذا با بررسی رابطه زیر تغییرات فشاری در هر طبقه با توجه به سرعت باد را به دست آمده است.

$$U_H = 1/59 * U_{met} * \left[ \frac{H}{z} \right]^a \quad (9)$$

در رابطه (۹)  $U_H$  نشان‌دهنده سرعت باد در هر طبقه (بر حسب مایل بر ساعت)،  $U_{met}$  برای در نظر گرفتن

نرم‌افزار، رسیدن به نتایج در این مطالعه آسان‌تر خواهد بود و معادلاتی که در نرم‌افزار استفاده خواهد شد از دسته مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای در دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد. مدل انتخابی از این دسته مدل آشفتگی دو معادله‌ای K-ε خواهد بود که معادلات حاکم بر آن در زیر آمده است. که در آن معادلات (۴) و (۵) و (۶) به ترتیب معادلات فرمولاسیون مدل توربولانس K-ε استاندارد، مدل انتقالی K و مدل انتقالی ε می‌باشند.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

مقادیر ثابت‌ها مدل که در معادلات از آنان استفاده

شده به شرح زیر است:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

## ۲-۲- روش تحلیلی

در این بخش با استفاده از روابط تحلیلی اقدام به محاسبه پارامترهای تاثیرگذار بر بررسی پدیده دودکشی شده است.

فرضیات موجود در این روش حل با توجه به شرایط آب و هوای منطقه مورد بحث، در نظر گرفته شده است که در این پژوهش شرایط آب و هوایی شهر مشهد انتخاب شده است و چون بیشترین اتلاف انرژی را در زمستان خواهیم داشت پس شرایط زمستانی این شهر استفاده خواهد شد. که در آن دمای شهر را متوسط دمایی دوره زمستان شهر مشهد مطابق گزارش هواشناسی ۱۰- درجه سانتی‌گراد فرض شده است.

در ادامه به معادلات مورد استفاده در این روش اشاره

۱ In.water

۲ Ft

۳ Dynamic pressure

$$\dot{V} = c_d * A_{(e,l)} * 4005 * (\Delta P)^{0.5}$$

دلیل حل این رابطه به دست آوردن سطح مقطع نشست موثر<sup>۳</sup> در ساختمان به جهت یافتن مقدار حجم هوای ورودی به ساختمان که این عدد نشان دهنده همان مقدار هوایی است که لازم است وارد ساختمان کنیم تا از فشار تولید شده توسط برخورد باد جلوگیری کنیم. در رابطه بالا  $c_d$  متغییر ضریب تخلیه بوده و برابر عدد ثابت یک،  $A_{e,l}$  متغییر نشان دهنده سطح مقطع نشست موثر بوده و بر حسب فوت مربع محاسبه می گردد. از طرفی با توجه به معادله زیر فشار کل در ضلع از ساختمان را به دست می آوریم و با به دست آوردن این عدد و با جای گذاری آن در رابطه بالا حجم هوای نفوذی به ساختمان در هر ضلع محاسبه می شود.

$$\Delta P_t = \Delta P_w + \Delta P_{st} + \Delta P_{in}$$

با حصول اعداد فوق، اکنون می توان به حل تحلیلی این مسئله پرداخت و این مشکل بزرگ در ساختمان های بلندمرتبه که علاوه بر تحمیل هزینه های گزاف باعث هدررفت انرژی نیز می شود را بررسی کنیم و راه کنترل آن را معرفی کنیم.

### ۳- نتایج و بحث

جهت اطمینان از صحت روش عددی، ابتدا چندین شبیه سازی با اشکال مختلف اما با مساحت یکسان و با شرایط یکسان انجام شد.

در این مقاله روش اول با حل تحلیلی معادلات و روابط موجود تئوری پدیده دودکشی مقدار تغییرات فشار داخلی در نمونه واقعی به دست آمده است و در روش دوم با بررسی عددی و شبیه سازی مقاطع مختلف و نمونه واقعی نتایج مورد نظر برای مقایسه با روش اول مقایسه شده است.

سرعت باد غالب (بر حسب مایل بر ساعت)،  $H$  متناظر با ارتفاع هر طبقه (بر حسب فوت) و متغیرهای  $a$  و  $\xi$  وابسته به موقعیت ساختمان (از نظر داخل یا خارج شهر، وضعیت ساختمان های اطراف آن، وضعیت اقلیم منطقه) می باشند.

چون سرعت باد در هر طبقه از ساختمان برای ما مشخص گردیده است، به مرحله بعد یعنی به دست آوردن تغییرات فشاری وابسته به هر طبقه می رسیم که از طریق رابطه (۱۰) به این مهم دست خواهیم یافت

$$\Delta P_w = c_2 * S^2 * c_p * \rho_0 \left( \frac{U_H}{2} \right)^2$$

در رابطه فوق  $\Delta P_w$  نشان دهنده تغییرات فشار در هر طبقه (بر حسب اینچ. آب)،  $c_2$  عدد ثابت ۰٫۰۲۹،  $S$  فاکتور شل تر<sup>۱</sup> که برای ساختمان های بلند مرتبه برابر ۱ می باشد و  $c_p$  ضریب باد محلی و وابسته به طبقه ساختمان است. در ادامه روابط مورد نیاز به منظور به دست آوردن مقدار هوای اضافی و ایجاد فشار مثبت جهت جلوگیری از فشار ایجاد شده در اثر برخورد باد به ساختمان، معرفی می شود. لذا با بررسی این روابط و همچنین بررسی فشارهای موجود در هر ضلع ساختمان به پاسخ اصلی حل این مشکل دست خواهیم یافت.

$$\dot{V} = c_{flow} * (\Delta P)^{0.65} * A_w \quad (11)$$

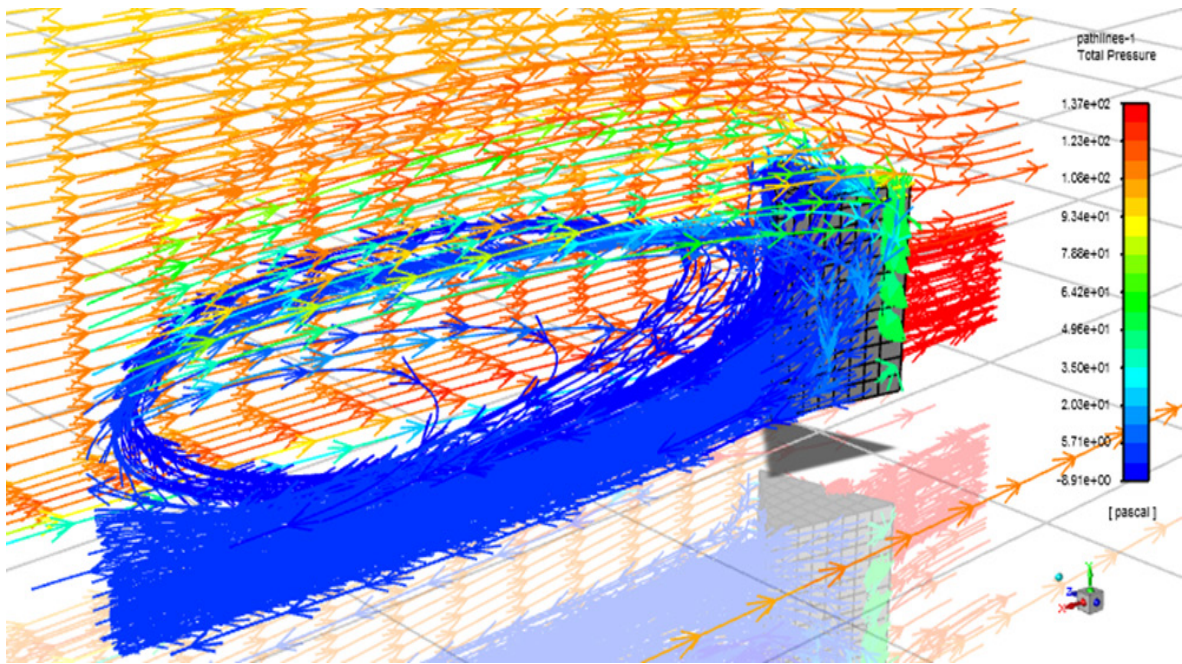
در رابطه (۱۱) متغیر  $\dot{V}$  که نشان دهنده میزان نشست هوا می باشد، بر حسب فوت مکعب بر دقیقه<sup>۲</sup> محاسبه می گردد. همچنین نشانگر متغیر وابسته به درزبندی ساختمان بوده و برای ساختمان های بدون درز عددی برابر ۰٫۳، برای ساختمان های با نشست متوسط برابر ۱ و برای ساختمان با درزبندی ضعیف و نشست زیاد ۲ در نظر گرفته می شود. متغیر تغییرات فشار عددی ثابت و مساوی ۰٫۳ و بر حسب اینچ. آب بوده و  $A_w$  متغیر مساحت ضلع روبرو به برخورد باد را نشان می دهد.

<sup>۱</sup> Shelter factor

<sup>۲</sup> CFM (Cubic Feet Per Minute)

<sup>۳</sup> Effective Leak





شکل ۶: گردابه‌های ایجاد شده در پشت ساختمان با مقطع مثلثی با شبکه‌بندی مربع کامل

### ۳-۱- بررسی روش عددی

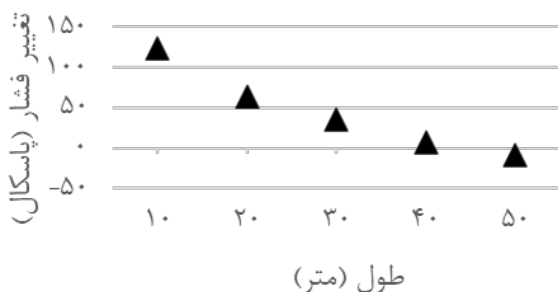
#### ۳-۱-۱- بررسی مقطع مثلثی

در این بخش اولین مقطعی که مورد بررسی و تحلیل نتایج آن می‌پردازیم مقطع مثلثی می‌باشد؛ در این مقطع همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، در نقاطی که اولین بر خورد را با باد دارند بیشترین فشار را خواهیم داشت.

۱- بیشترین مقدار فشار ناشی از برخورد باد با ساختمان عدد ۱۳۷ (پاسکال) است و کمینه فشار نیز همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود در پشت ساختمان ایجاد می‌شود و مقدار آن برابر با ۵/۷۱ (پاسکال) می‌باشد.. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود در اثر برخورد باد به ساختمان در پشت آن گردابه‌هایی تولید شده است که این گردابه‌ها باعث اثر فشاری نامطلوب بر روی دیواره‌های ساختمان می‌گردد که برای رفع این اثر معمولاً در ساختمان‌ها با کمک از بعضی تاسیسات مکانیکی هوای اضافی داخل ساختمان وارد می‌شود تا با این اثر نامطلوب مقابله شود.

شده و جهت بردار جریان آن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خلا بزرگی در پشت ساختمان به وجود آمده که خود این خلا نیز دوباره با صرف انرژی باید رفع گردد و باعث افزایش میزان مصرف انرژی شود. همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است این افزایش فشار فقط در ضلع روبرو به باد فقط دیده می‌شود و اضلاعی که با باد هیچگونه برخورد مستقیمی ندارند دارای فشاری منفی می‌باشند. این موضوع به این دلیل است که این نقاط در حال خارج کردن فشار اضافی وارده به ساختمان که در اثر برخورد باد با آن ایجاد شده، می‌باشند.

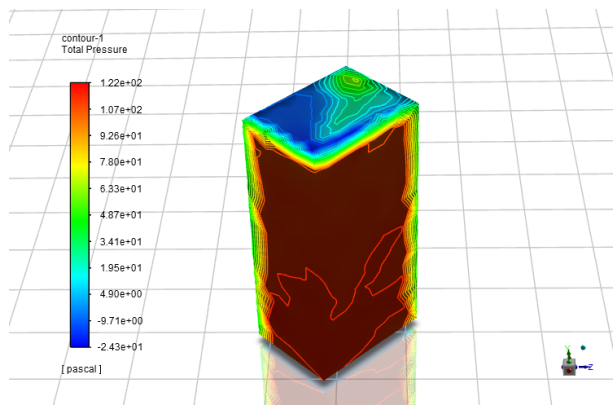
مقطع مثلث



شکل ۷: تغییرات فشار باد بر ساختمان بر حسب طول برای مقطع مثلثی

خارج کردن فشار اضافی وارده به ساختمان با هدر رفت انرژی همراه بوده و لذا برای جبران این انرژی

نکته قابل توجه در این تصویر شکل گردابه ایجاد



شکل ۹: توزیع فشار وارد بر ساختمانی با معماری مستطیلی

همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌گردد بیشترین فشار وارد شده به ساختمان در این مقطع توسط باد که در حلگر اندازه‌گیری شده است، برابر ۱۲۲ (پاسکال) و کمترین فشار حدوداً ۵ (پاسکال) می‌باشد.

### ۳-۱-۳- بررسی مقطع بیضی‌گون

جهت بررسی و تجزیه تحلیل نتایج، اقدام به بررسی شکل بیضی‌گون گردیده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود همانند دو مقطع قبل در فصل زمستان فشار در قسمت بالایی ساختمان بیشتر بوده و بدین معناست که فشار خروجی از ساختمان به محیط بیرونی در طبقات فوقانی بسیار زیاد خواهد بود.

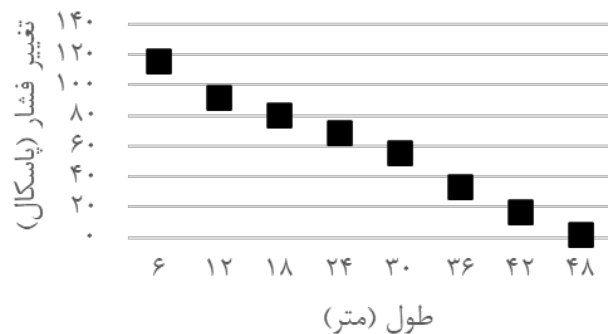
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است فشار وارده به سمت برخورد باد بسیار زیاد است و این نشان‌دهنده فشار بالای وارده به ساختمان در این قسمت و همچنین نیاز به کنترل آن می‌باشد. در این قسمت بیشترین تلفات انرژی را شاهد هستیم و برای برطرف سازی این اتلاف چاره‌ای جز مقابله با این بار اضافی توسط ایجاد فشار مثبت و هزینه انرژی در کل ساختمان نداریم.

اتلافی، مجبور به مصرف سوخت و تولید انرژی بیشتری برای جبران آن می‌شویم که خود باعث ایجاد هزینه‌های اضافی برای ساختمان می‌گردد.

### ۳-۱-۲- بررسی مقطع مستطیلی

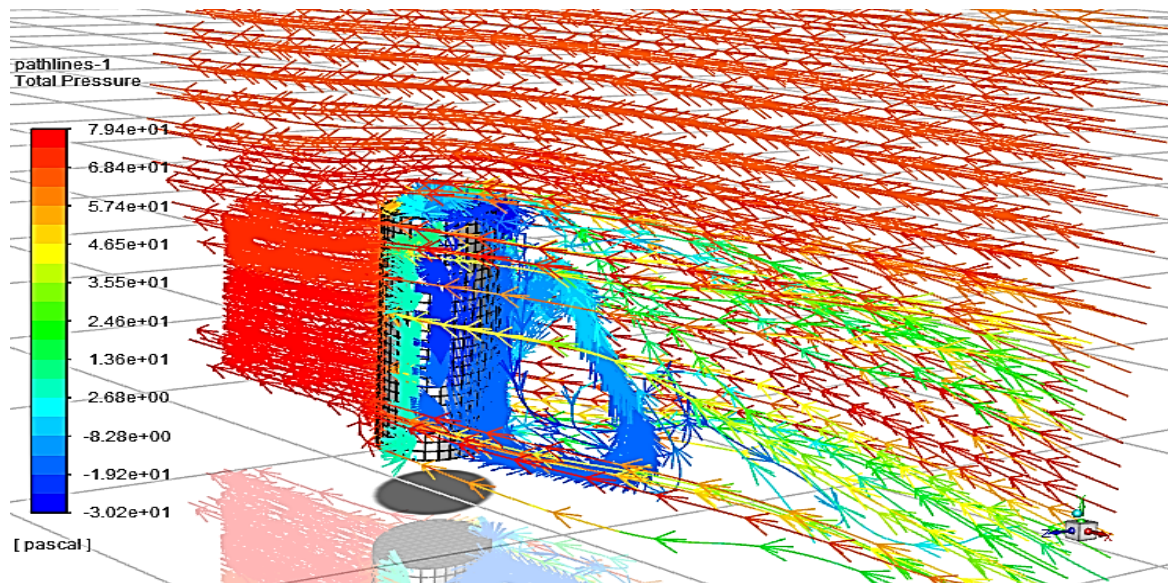
مقطع دیگری که قرار است آن را مورد بررسی قرار دهیم مقطع مستطیلی است. این نوع مقطع یکی از پر کاربردترین مقاطع در معماری می‌باشد و از همین‌رو با بررسی این مقطع در صدد یافتن معایب استفاده از این نوع مقطع از دیدگاه اثرات پدیده دودکشی هستیم.

### مقطع مستطیل



شکل ۸: مقادیر مختلف فشار ایجاد شده توسط برخورد باد بر حسب طول ساختمان برای مقطع مستطیلی

در این مقطع با توجه به اینکه سطح برخورد باد با ساختمان بیشتر شده است، گردابه‌هایی که در پشت آن تشکیل می‌شوند اندازه کمتر اما تعداد بیشتری دارند زیرا نیروی پس‌آی بیشتری ایجاد می‌شود که از نیروی فشاری موجود بیشتر نیز می‌باشد. در این مقطع نیز مشاهده می‌گردد که فشار وارده به ساختمان در اضلاعی که در مقابل برخورد باد قرار دارند به شدت زیاد و به سمت داخل ساختمان می‌باشد و همچنین قسمت‌های آبی رنگ مناطقی است که فشار وارده اضافی از ساختمان از آن قسمت‌ها در حال خروج است و این به طور کاملاً واضحی قابل مشاهده است که در پشت ساختمان گردابه‌هایی تشکیل می‌شود که باعث هدر رفت بسیار بیشتر انرژی ساختمان می‌گردد.



شکل ۱۰: توزیع گردابه‌ها در پشت ساختمانی با معماری بیضی‌گون

می‌پردازیم

در جدول زیر به مقایسه اعداد بیشینه و کمینه فشار وارده به ساختمان در طراحی‌های مختلف اشاره شده است.

جدول ۱: مقایسه نتایج به‌دست آمده از حل عددی

ردیف	نوع مقطع	بیش‌ترین فشار (پاسکال)	کم‌ترین فشار (پاسکال)
۱	مثلثی	۱۳۷	۵/۷۱
۲	مستطیلی	۱۱۶	۲/۱۵
۳	بیضوی	۷۹/۴	۲/۶۸

با بررسی جدول بالا مشخص می‌شود؛ در مقاطع انتخابی در روش شبکه‌بندی، مقطع بیضی‌گون در ضلع مواجه با باد که فشار بیشینه است، در مقایسه با دیگر هندسه‌ها کمتر می‌باشد و همچنین در پشت ساختمان طبق اعداد به‌دست آمده مقطع مثلثی شاهد کمترین فشار معکوس در بین دیگر مقاطع هستیم. ایجاد این تفاوت در بین این دو مقطع به چند دلیل مربوط می‌باشد؛ یکی از این دلایل جهت و سرعت وزش باد و علت دیگر آن شکل ساختمان در محل برخورد آن و پشت آن می‌باشد. نکته دیگری که می‌توان به آن اشاره نمود این است که بردارهای سرعت برخورد باد و عبور آن از روی ساختمان‌ها کمک شایانی به بررسی و تحلیل این نتایج کرده است.



شکل ۱۱: تغییرات فشار وارده بر ساختمان بر حسب تغییرات طول آن در مقطع بیضی‌گون

حال نتایج اختلاف فشار در این قسمت را بررسی می‌کنیم تا مقدار فشار مورد نیاز برای ایجاد این تغییر مثبت را به‌دست آوریم. بیشینه فشاری که در این مقطع شاهد هستیم مربوط به ضلع مقابل به باد بوده و در حدود (پاسکال) ۷۹/۴ و کمینه فشار مقدار (پاسکال) ۲/۶۸ را به ما نشان می‌دهد ۳-۱-۴- مقایسه پاسخ‌های به‌دست آمده از روش عددی

با بررسی اشکال مختلف معماری ساختمان، با توجه به شرایط اولیه و شرایط مرزی مسئله را حل شده، به بررسی و مقایسه نتایج به‌دست آمده از حل مساله

## ۳-۲- بررسی روش تحلیلی

در این روش با استفاده از روابط معرفی شده در بخش دوم به بررسی اثر دودکشی در یک نمونه واقعی ساختمان بلندمرتبه می‌پردازیم تا با تحلیل اعداد و پاسخ‌های به‌دست در این روش ابتدا به نحوه اثرگذاری این پدیده در ساختمان پی‌برده و سپس با مقایسه اعداد به‌دست آمده در هر دو روش به میزان خطای موجود در حل این مسئله توسط این دو روش اشاره خواهیم نمود.

ساختمان مورد مطالعه با مشخصات ذکر شده در ابتدای بخش دوم با مقطع بیضی‌گون به نتایج زیر به‌دست آمده است.

جدول ۲: نتایج حاصل شده طبق شرایط اولیه و مرزی با استفاده از روابط (۷) و (۸)

طبقه	ارتفاع (فوت)	تغییر فشار در اثر پدیده دودکشی	اینچ. آب	پاسکال
همکف	۰		۰/۱۶۲	۴۰/۳۱۲
۱	۱۶/۱۴		۰/۱۳۹	۳۴/۶۱۴
۲	۳۲/۴۶		۰/۱۲۳	۳۰/۶۱۷
۳	۴۷/۷۸		۰/۱۰۸	۲۶/۹۷۴
۴	۵۰/۱		۰/۰۹۱	۲۲/۶۲۴
۵	۶۱/۴۲		۰/۰۷۵	۱۸/۶۲۸
۶	۷۲/۷۴		۰/۰۵۹	۱۴/۶۳۱
۷	۸۴/۰۶		۰/۰۴۳	۱۰/۶۳۴
۸	۹۵/۳۷		۰/۰۲۷	۶/۶۴۱
۹	۱۰۶/۷		۰/۰۱۱	۲/۶۴۱
۱۰	۱۱۸/۰۱		-۰/۰۰۵	-۱/۳۵۲
۱۱	۱۲۹/۳۳		-۰/۰۲۱	-۵/۳۴۸
۱۲	۱۴۰/۶۵		-۰/۰۳۸	-۹/۳۴۵
۱۳	۱۵۱/۹۷		-۰/۰۵۴	-۱۳/۳۴۱
۱۴	۱۶۳/۲۹		-۰/۰۷۰	-۱۷/۳۳۸
۱۵	۱۷۴/۶۱		-۰/۰۸۶	-۲۱/۳۳۴
۱۶	۱۸۵/۹۳		-۰/۱۰۲	-۲۵/۳۳۱
۱۷	۱۹۷/۲۴		-۰/۱۱۸	-۲۹/۳۲۴
۱۸	۲۰۸/۵۶		-۰/۱۳۴	-۳۳/۳۲۰
۱۹	۲۱۹/۸۸		-۰/۱۵۰	-۳۷/۳۱۷
۲۰	۲۳۱/۲		-۰/۱۶۶	-۴۱/۳۱۴
۲۱	۲۴۲/۵۲		-۰/۱۸۲	-۴۵/۳۱۰
۲۲	۲۵۵/۸۱		-۰/۲۰۱	-۵۰/۰۰۲

همان‌گونه که در جدول ۲ قابل مشاهده است مقادیر فشارهای به‌دست آمده با نتایجی که نرم افزار از شبیه‌سازی این طراحی‌ها ارائه نموده کمی خطا دارد. نماد منفی در جدول نشان‌دهنده جهت عکس فشار بوده و این نشان‌دهنده فشار ایجاد شده توسط باد در زمستان و در محیط ساختمان چگونه عمل می‌کند و به این اصل اشاره دارد که طبق پدیده دودکشی در زمستان هوای

داخلی ساختمان میل به خروج از آن دارد.

لذا با توجه با این نتایج به‌دست آمده به ادامه حل جهت به‌دست آوردن تغییرات فشار با نگاه به تغییرات سرعت باد در هر طبقه شده است. از این رو با توجه به رابطه (۹) که در بخش سوم به آن اشاره شد، تغییرات سرعت باد در هر طبقه را به‌دست آورده و سپس جواب‌های آن را در معادله (۱۰) وارد شده تا تغییرات فشار در هر طبقه از ساختمان با توجه به تغییرات سرعت باد به‌دست آید. با توجه به اینکه شهر مشهد از نظر وسعت بسیار بزرگ بوده و اکثر ساختمان‌بلند این شهر ارتفاعی بیش از ۲۱ متر دارند، پس برای ضرایب  $a$  و  $\gamma$  به ترتیب مقادیر  $۰/۱$  و  $۷۰۰$  در نظر گرفته شده است [۱۱].

از طرفی برای حل این مسئله در ساختمان‌های بلندمرتبه، با توجه به اینکه متغیر نشان‌دهنده فاکتور شل‌تر و ضریب باد محلی با تغییر طبقه کمی تغییر می‌کنند، لذا طبقات ساختمان را به سه بخش اصلی تقسیم نموده تا هم حل بهتری داشته باشیم و هم این تغییرات را در نظر گرفته شود.

برای بخش اول که شامل هفت طبقه ابتدایی ساختمان می‌شود جدول زیر مقادیر تغییرات فشار برحسب سرعت باد در هر طبقه و سرعت باد در هر طبقه را به ما نشان می‌دهد. با بررسی پاسخ‌های به‌دست آمده به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش ارتفاع و همچنین سرعت باد، فشار ایجاد شده توسط این تغییر سرعت نیز افزایش می‌کند؛ البته این افزایش فشار در طبقات پایین نامحسوس است و هر چه به طبقات بالایی می‌رویم شاهد تغییر فشار محسوس و بسیار زیادی خواهیم بود

روش حل می‌پردازیم تا مقادیر اختلاف جواب‌های حاصل شده را بررسی و تحلیل نماییم همچنین با مقایسه این دو فشار به دست آمده از دو راه یافتن پاسخ مسئله به صحت انجام پژوهش را نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است.

#### جدول ۶: مقایسه فشارهای به دست آمده از هر دو روش حل پژوهش

نوع ساختمان	روش حل	بیشینه فشار (پاسکال)	کمینه فشار (پاسکال)
مثلی	شبه‌سازی	۱۵۳	۳/۳۴
مستطیلی	//	۱۲۲	۴/۹۰
بیضی	//	۷۹/۹	۳/۱۶
نمونه واقعی	//	۱۱۳	۲

همان‌گونه که قبلاً توضیح داده شده شکل ساختمان نمونه واقعی در نظر گرفته شده ترکیبی از همه این مقاطع انتخابی برای حل در روش شبه‌سازی، می‌باشد و در جدول بالا نیز مشاهده می‌شود که مقادیر به دست آمده در روش تحلیلی حل این پژوهش عددی میانگین نسبت به مقادیر به دست آمده برای همه مقاطع مورد بررسی در شبه‌سازی بوده و در نتیجه مشخص شود که روش حل تحلیلی و هم در روش عددی برای حل این مسئله با خطاهای موجود جواب‌هایی بسیار نزدیک بهم را در اختیار ما قرار می‌دهند و همچنین می‌توان نتیجه گرفت که پاسخ‌های به دست آمده در روش شبه‌سازی با توجه روابط تحلیلی موجود دارای صحت و اعتبار می‌باشند.

در ادامه به بررسی فشارهای وارد شده بر هر نمای ساختمان پرداخته شده است تا علاوه به دست آوردن فشار کلی وارد شده به ساختمان، مشخص شود که میزان هوای اضافی مورد نیاز ساختمان را مقایسه کنیم با فشارهای اضافی که به ساختمان به دلیل برخورد باد وارد می‌شود، مقابله کنیم؛ از این رو با ترسیم جهت فشار موجود در نماهای مختلف تمامی بخش‌های در نظر گرفته شده از طبقات ساختمان و با بررسی و تحلیل مقادیر آنان به نتیجه دلخواه که مقدار فشار و هوای اضافی که قرار است به داخل ساختمان وارد کنیم دست یابیم. ابتدا

#### جدول ۳: نتایج حاصل شده با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) برای هشت طبقه اول

ارتفاع (فوت)	سرعت باد (مایل بر ساعت)	تغییرات فشار (اینچ. آب / پاسکال)
۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
۱۶/۱۴	۲۴/۴۰	۴۵/۳۲
۲۷/۴۶	۲۵/۷۳	۵۰/۴۰
۳۷/۷۸	۲۶/۵۶	۵۳/۷۲
۵۰/۱	۲۷/۳۲	۵۶/۸۴
۶۱/۴۲	۲۷/۸۹	۵۹/۲۱
۷۲/۷۴	۲۸/۳۶	۶۱/۲۴
۸۴/۰۶	۲۸/۷۷	۶۳/۰۴

در بخش بعدی که شامل ۸ طبقه وسط ساختمان در نظر گرفته شده، با حل روابط (۹) و (۱۰) مقادیر سرعت باد هر طبقه و تغییرات فشار مرتبط با آن را محاسبه نماییم

جدول ۴: نتایج حاصل شده با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) برای هشت طبقه وسط

ارتفاع (فوت)	سرعت باد (مایل بر ساعت)	تغییرات فشار (اینچ. آب / پاسکال)
۹۵/۳۷	۲۹/۱۴	۷۳/۸۹
۱۰۶/۷	۲۹/۴۷	۷۵/۵۷
۱۱۸/۰۱	۲۹/۷۷	۷۷/۱۱
۱۲۹/۳۳	۳۰/۰۴	۷۸/۵۳
۱۴۰/۶۵	۳۰/۲۹	۷۹/۸۶
۱۵۱/۹۷	۳۰/۵۳	۸۱/۱۱
۱۶۳/۲۹	۳۰/۷۵	۸۲/۲۸
۱۷۴/۶۱	۳۰/۹۶	۸۳/۳۹

در جدول فوق شاهد رشد محسوس تغییر فشار با افزایش ارتفاع در ساختمان هستیم و همان‌گونه که در قبل اشاره شده است، هر چه به سمت بالاترین نقطه ساختمان حرکت کنیم این تغییر فشار بیشتر حس می‌شود. در ادامه به بررسی تغییر فشار ناشی از تغییر سرعت باد و نیز مقادیر افزایش سرعت باد در هر طبقه از هفت طبقه آخر این نمونه واقعی می‌پردازیم.

#### جدول ۵: نتایج حاصل شده با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) برای هفت طبقه آخر

ارتفاع (فوت)	سرعت باد (مایل بر ساعت)	تغییرات فشار (اینچ. آب / پاسکال)
۱۸۵/۹۳	۳۱/۱۵	۵۲/۷۸
۱۹۷/۲۴	۳۱/۳۴	۵۳/۴۰
۲۰۸/۵۶	۳۱/۵۱	۵۴/۰۰
۲۱۹/۸۸	۳۱/۶۸	۵۴/۵۸
۲۳۱/۲	۳۱/۸۴	۵۵/۱۳
۲۴۲/۵۲	۳۱/۹۹	۵۵/۶۶
۲۵۵/۸۱	۳۲/۱۶	۵۶/۲۶

در جدول زیر به مقایسه فشارهای به دست آمده از هر دو

این شکل عددی برابر  $0.4018$  - را نشان می‌دهد بدین معنی که جهت فشار کل موجود در این ضلع به سمت خارج از ساختمان می‌باشد.

جدول ۷: مقادیر حجم هوای نشتی، سطح مقطع نشت موثر، تغییرات فشار کل و حجم هوای نفوذی در هر نمای هفت طبقه آخر ساختمان نمونه واقعی

نمای ساختمان	حجم هوای نشتی از نما (فوت مکعب بر دقیقه)	سطح مقطع نشت موثر (فوت مربع)	تغییرات فشار کل نم (اینچ. آب)	حجم هوای نفوذی از نما (فوت مکعب بر دقیقه)
غربی	۴۱۷۳	۱/۹۰	-۰/۰۴۰۱۸	۱۵۲۷
شمالی و جنوبی	۳۵۹۵	۳/۳*	-۰/۰۶۲۰۵	۳۲۷۰
شرقی	۴۱۷۳	۱/۹۰	-۰/۲۷۰۲۵	۳۹۶۱

\* این عدد سطح مقطع نشت موثر در دو نما نشان می‌دهد.

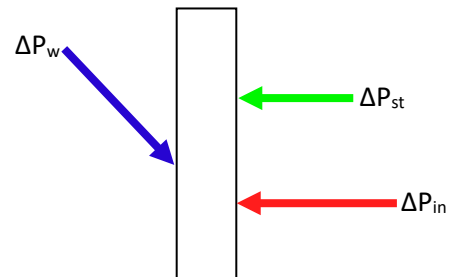
طبق روابط (۱۱) و (۱۲) حجم هوای نشت یافته برابر (فوت مکعب بر دقیقه) ۴۱۷۳ می‌باشد و مساحت سطح مقطع نشت موثر آن عددی برابر (فوت مربع)  $1/90$  و در نتیجه مقدار حجم هوای نفوذی موثر عدد (فوت مکعب بر دقیقه) ۱۵۲۷ خواهد بود. اکنون برای هر کدام از اضلاع موجود در ساختمان و همچنین برای هر بخش این محاسبات را انجام می‌دهیم که پاسخ‌های این محاسبات در جدول زیر مشاهده می‌گردد.

حال با جمع اعداد حاصل شده در قسمت حجم هوای نفوذی از نمای هر ضلع در هر بخش از ساختمان (نمونه واقعی)، مقدار هوای لازم جهت جلوگیری از فشار اضافی تولیدی از برخورد باد به ساختمان را تعیین می‌کنیم که عدد (فوت مکعب بر دقیقه) ۳۱۲۰۰ می‌شود

#### ۴- نتیجه‌گیری

با مطالعه نتایج به‌دست آمده توسط نرم افزار در روش عددی و نیز به واسطه روابط موجود در روش تحلیلی به این نتیجه می‌رسیم که پدیده دودکشی اثرات مخربی بر روی ساختمان می‌گذارد؛ همان‌طور که می‌دانیم این پدیده به دلایل مختلفی در ساختمان ایجاد می‌شود که یکی از این دلایل ایجاد فشار و بار اضافی بر ساختمان توسط

با توجه به اینکه شکل نمونه واقعی که در نظر گرفته ایم شکلی یکپارچه همانند مقاطع انتخابی در این پروژه نمی‌باشد و شکلی است ترکیبی از چنین شکل هندسی متفاوت اما در اینجا ما شکل کلی ساختمان در نظر گرفته شده را به سه قسمت کلی تقسیم شده است به طوری که شکل کلی ساختمان همانند مستطیل در نظر گرفته شده و در ادامه برای رسیدن به پاسخ‌های مورد انتظار، طبق همان بخش‌بندی که جهت به‌دست آوردن تغییرات فشار بر حسب سرعت باد در هر طبقه انجام شده است و بر همین اساس برای هر ضلع از ساختمان تغییرات فشار بر آن ضلع را بررسی نموده و مقدار هوای نشتی که به ساختمان نفوذ کرده را محاسبه شده است و با اندازه‌گیری آن به نتیجه دلخواه و پاسخ کلی مسئله اصلی رسیده شده است. به طور مثال برای بخش آخر که ۷ طبقه آخر ساختمان را شامل می‌شود، روش زیر را برای به‌دست آوردن مقدار نشت هوا و نشت موثر انجام می‌دهیم. ابتدا شمایل جهات برخورد فشارهای موجود بر هر ضلع از ساختمان را رسم نموده و سپس با استفاده از روابط موجود در بخش سوم نتایج را به‌دست خواهیم آورد.



شکل ۱۲: جهت فشارهای موجود بر نمای غربی هفت طبقه آخر ساختمان نمونه واقعی

حال با توجه به شکل ۱۲ حجم هوای نشت یافته به درون ساختمان را محاسبه نموده و پس از آن به دنبال به‌دست آوردن سطح مقطع نشت موثر خواهیم بود تا مقدار هوای نشت یافته موثر را به‌دست آوریم. البته تغییرات فشار کل در هر ضلع نیز با توجه به جهت فشارهای موجود طبق رابطه (۱۳) به‌دست می‌آید که در

## زیرنویس

$A_1$	سطح مقطع پایین‌ترین بازشو، $ft^2$
$A_2$	سطح مقطع بالاترین بازشو، $ft^2$
$A_{e,l}$	سطح مقطع نشت موثر، $ft^2$
$A_w$	سطح مقطع مقابل به باد، $ft^2$
$C_{flow}$	متغیر وابسته به درزبندی ساختمان
$NPL$	خط فشار خنثی، Neutral Pressure Line، ft
$i$	داخل ساختمان، in
$o$	خارج ساختمان، out
$st$	پدیده دودکشی، Stack Effect
$t$	کل، Total
$w$	فشار باد هر طبقه

## ۱- مراجع

- [1] EPA Climate Change Indicators, 2021, Chapter “Global Greenhouse Gas Emissions”, Figure 1. Global Greenhouse Gas Emissions by Gas, 1990–2015
- [2] Sergey Mijorski, Stefano Cammelli, 2016, Stack Effect in High-Rise Buildings: A Review, International Journal of High-Rise Buildings, Vol 5, No 4, 327-338
- [3] Sungmin Yoon, Doosam Song, Jaehun Kim, Joowook Kim, Hyunwoo Lim, Junemo Koo, 2020, Identifying stack-driven indoor environmental problems and associated pressure difference in high-rise residential buildings Airflow noise and draft, Building and Environment 168 (2020) 106483
- [4] Xiaoxin Man, Yanyu Lu, Guolei Li, Yanling Wang, Jing Liu, 2019, A study on the stack effect of a super high-rise residential building in a severe cold region in China, Indoor and Built Environment, DOI: 10.1177/1420326X19856045
- [5] In-Ho Yang, Jae-Hun Jo, Myoung-Souk Yeo, Kwang-Woo Kim, 2003, Evaluation of the Impacts of Stack Effect in High-Rise Buildings, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol 11, No 2 (2003)/pp. 91-103
- [6] Lim H, Seo J, Song D, Yoon S, Kim J, 2019, Interaction Analysis of Countermeasures for the Stack Effect in a High-Rise Office Building, Building and Environment,
- [7] Sungmin Yoon, Doosam Song, Joowook Kim, Hyunwoo Lim, 2019, Stack-driven infiltration and heating load differences by floor in high-rise residential buildings, Building and Environment 157 (2019) 366–379,
- [8] Shi Y, Li X, Effect of Mechanical Ventilation on Infiltration Rate under Stack Effect in Buildings with Multilayer Windows, Building and Environment.
- [9] Risto Kosonen, Juha Jokisalo, Ilari Ranta-aho, Esa-Pekka Koikkalainen, 2017, Methods to Reduce Stack Effect and Improve Energy Efficiency in a Nordic High Rise Residential Building, Procedia Engineering 205 (2017) 2311–2317, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.118>
- [10] Air conditioning systems, 2011, First edition, Bahram Khakpour, Yazda Publications (in persian)
- [11] ASHRAE Fundamentals Handbook, 1997, Chapter 15 “Airflow around Buildings”, p.265

برخورد باد غالب در محیط اطراف ساختمان به آن می‌باشد. حال با بررسی‌های انجام شده در این پژوهش به این نتایج رهنمون شده است که

(۱) با تغییر ارتفاع ساختمان، فشار وارده ناشی از باد به ساختمان افزایش می‌یابد.

(۲) در مقاطع انتخابی برای بررسی مقطع بهینه شاهد آن بودیم که در مقطع بیضی‌گون کمترین هدررفت

انرژی را داریم و بالعکس در مقطع مستطیلی بیشترین هدررفت را مشاهده می‌نماییم.

(۳) با بررسی حل تحلیلی نمونه انتخابی در این روش با توجه به سرعت و جهت باد غالب منطقه، در بین طبقات نهم و دهم جهت فشار دودکشی در نمونه واقعی تغییر می‌کند.

(۴) بیشترین فشار ایجاد شده در نمونه واقعی با استفاده از ضریب تصحیح تقریباً عدد (پاسکال) ۵۰ و کمترین آن حدوداً (پاسکال) ۱/۳۵۲ می‌باشد.

(۵) با محاسبات انجام شده به مقدار هوای لازم برای جلوگیری از ایجاد این پدیده در ساختمان نیز پی‌بردیم که عددی در حدود (فوت مکعب بر دقیقه) ۳۱۲۰۰ اندازه‌گیری شد.

## ۵- فهرست علائم

## علائم انگلیسی

$A$	سطح مقطع بازشو، $ft^2$
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه هوا، $J/kg.K$
$G$	ترم تولید انرژی
$g$	ضریب گرانش، $ft/s^2$
$H$	ارتفاع، ft
$k$	ضریب رسانش، $w/m.k$
$P$	فشار، Pa
$S$	فاکتور شل تر
$T$	دما، K
$U$	سرعت سیال، mph
$Y$	ترم تولید انرژی

## علائم یونانی

$\Delta P$	تغییرات فشار، Pa
$t$	تنش برشی، $N/m^2$
$\mu$	لزجت دینامیکی، Pa.s
$\mu_t$	لزجت آشفتگی، Pa.s
$\nu$	لزجت سینماتیکی، $m^2/s$
$\rho$	چگالی، $lb/ft^3$
$\sigma_x$	عدد پراوتل برای k
$\sigma_e$	عدد پراوتل برای E
$a, x$	متغیرهای وابسته به موقعیت ساختمان
$c_p$	ضریب باد محلی
$c_d$	ضریب تخلیه هوا
$V$	نشت هوا