

## بررسی تأثیر پایه بر میدان جریان باد اطراف دو ساختمان هم ردیف

حمیدرضا حقیقی فرد، محمد مهدی توکل\*

گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۶  
بازنگری: ۱۴ تیر ۱۳۹۶  
پذیرش: ۲۵ تیر ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲ مرداد ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

ساختمان‌های هم ردیف  
ساختمان بر روی پایه  
طول جدایش  
جریان برگشتی

**چکیده:** در تحقیق حاضر میدان جریان متلاطم باد اطراف دو ساختمان هم ردیف بدون پایه و بر روی پایه در فواصل مختلف به روش عددی بررسی شده است. به منظور مدل سازی آشفته‌گی از دو مدل آشفته ( $k-\epsilon$  (دسته نرمالسازی مجدد) و  $k-\epsilon$  تحقق پذیر استفاده شده است. براساس شبیه سازی های عددی صورت گرفته، توزیع سرعت طولی اطراف ساختمانهای منفرد بدون پایه و بر روی پایه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده اند. سپس با استفاده از مدل اعتبار سنجی شده، برای شبیه سازی میدان جریان اطراف ساختمانهای هم ردیف بدون پایه و بر روی پایه از مدل  $k-\epsilon$  تحقق پذیر استفاده شده و سرعت طولی برای دو عدد رینولدز ۱۷۰۰۰ و ۱۷۰۰۰۰ ارائه شده اند. به صورت تقریبی میدان سرعت اطراف مدل ساختمان های بدون پایه در دو عدد رینولدز مشابه می باشند، اگر چه برای ساختمان های بر روی پایه تفاوت اندکی در توزیع سرعت به ویژه در بخش زیرین و روی ساختمانها مشاهده می شود. مقایسه نتایج نشان می دهد که قرار دادن ساختمان بر روی پایه به دلیل حذف جریان برگشتی در پشت ساختمان منجر به کاهش نیروی پسی وارد شده به ساختمان می گردد. همچنین وجود پایه ها سبب می شود که طول اتصال مجدد روی ساختمان بالادست افزایش یابد.

### ۱- مقدمه

میدان جریان اطراف ساختمان تأثیر مهمی بر بارگذاری باد، توزیع فشار، استحکام ساختمان، توزیع نشست ذرات معلق و آلودگی دارد. در دهه‌های اخیر میدان جریان اطراف گونه‌های متنوع ساختمان و اجسام پخ در تونل باد به صورت آزمایشگاهی [۳-۱] مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با پیشرفت رایانه‌ها و کدهای تجاری امکان شبیه‌سازی عددی میدان جریان اطراف ساختمان‌ها فراهم شده است.

از جمله کارهای انجام شده در این زمینه، پژوهش تجربی کاسترو و روبینز [۴] بود. آن‌ها به بررسی تجربی جریان برشی آشفته پیرامون مدل یک ساختمان به صورت یک مکعب پرداختند. در تحقیق مطلبی و همکاران [۵]، ابتدا با استفاده از مدل‌های مختلف جریان آشفته میدان جریان اطراف یک مدل ۳ بعدی ساختمان بدون پایه و یک مدل سه بعدی ساختمان بر روی پایه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در ادامه با انجام شبیه‌سازی‌های عددی، بهترین مدل آشفته‌گی با مقایسه نتایج تجربی و عددی انتخاب شده است. آنها نشان دادند که طول اتصال مجدد پشت ساختمانی که بر روی پایه قرار دارد، کمتر از مقدار آن برای ساختمان بدون پایه است. در پژوهش تامیناگا [۶] معادلات ناویر استوکس غیردائمی جریان هوا حول مدل یک

ساختمان بلند با استفاده از مدل اس. اس. تی  $k-\omega$  مورد بررسی قرار گرفته و نوسانات ناپایدار پشت ساختمان با موفقیت مشابه سازی شده است. تامیناگا و همکاران [۷] نشان دادند که در بررسی جریان هوا اطراف مدل ساختمان با سقف شیروانی، شبیه‌سازی میدان سرعت در جهت جریان توسط مدل‌های دائمی رنس<sup>۱</sup> به طور متوسط تا ۱۵ درصد و حداکثر تا ۳۰ درصد با نتایج حاصل شده از آزمایش تفاوت دارد. لین و یی [۸] میدان جریان آشفته بر روی مجموعه‌ای از مدل‌های سه بعدی ساختمان در یک ردیف را مورد بحث و بررسی قرار داده و نشان دادند که مدل  $k-\epsilon$  استاندارد، تولید انرژی جنبشی آشفته نزدیکی نقطه سکون را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند و انرژی جنبشی آشفته پیش‌بینی شده به وسیله مدل آشفته اطراف ساختمان‌ها کمتر از مقدار تجربی بوده است. در زمینه میدان جریان اطراف اجسام پخ هم ردیف تحقیقات تجربی و عددی صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به پژوهش مارتینوزی و هاول [۹] اشاره کرد. در این تحقیق جریان آشفته اطراف دو مکعب هم ردیف در فواصل مختلف در عدد رینولدز ۲۲۰۰۰ به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌های سرعت متوسط در جهت جریان به وسیله سرعت سنج لیزری صورت گرفته و الگوی جریان سطحی به وسیله تکنیک فیلم لایه روغن بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهند برای فواصل کوچک بین دو مکعب، لایه برشی جدا شده از اولین

<sup>1</sup>Reynolds-Averaged Navier-Stokes

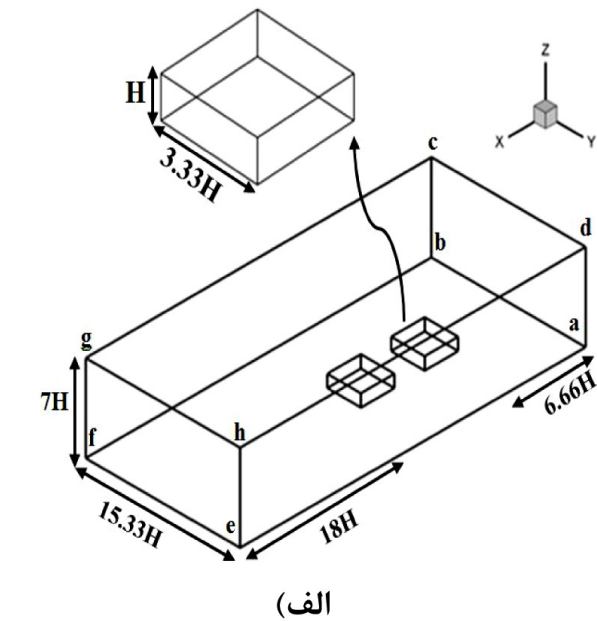
جهت مدل‌سازی جریان نزدیک دیوار از تابع دیواره استاندارد استفاده شده است. با توجه به این که در بررسی جریان اطراف ساختمان‌های مکعب مستطیلی نقاط جدایش در لبه‌های ابتدایی و انتهایی ساختمان مشاهده می‌شوند، خطای ناشی از استفاده از تابع دیواره در محاسبه نقطه جدایش وارد نمی‌شود [۲۰]. با استفاده از این شرط مرزی گرادیان انرژی جنبشی آشفته روی مرز صفر بوده و برای نرخ استهلاک انرژی آشفته در مرکز نزدیک‌ترین سلول به دیواره از رابطه  $(\epsilon_p = (C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}) / \kappa z_p)$  استفاده شده است [۲۰]. در این رابطه  $z_p$  فاصله مرکز اولین سلول از دیواره،  $k_p$  انرژی جنبشی آشفته

مکعب به کناره‌های مکعب دوم باز می‌گردد. در تحقیق دیگر تولپورکارا و همکاران [۱۰] دریافتند که بیشترین انحراف از توزیع اولیه سرعت برای ساختمان‌های منفرد و هم ردیف در خط تقارن آن‌ها رخ می‌دهد. اثر قرار گرفتن دو ساختمان با ارتفاع متفاوت بر روی سطح بر مشخصات جریان باد در مطالعه میتال [۱۱] و ناتوسکا [۱۲] بررسی شده است. آنها نشان دادند ساختار جریان اطراف مکعب‌ها به عوامل مختلفی از جمله ضخامت لایه مرزی نسبت به ارتفاع ساختمان، شدت آشفتگی ورودی و فاصله دو مکعب بستگی دارد. علاوه بر این، از گذشته تاکنون تحقیقات متعددی برای بررسی نیروهای آیرودینامیکی وارده بر اجسام پخ و مدل ساختمان [۱۶-۱۳] و میدان انتقال حرارت اطراف این اجسام [۱۹-۱۷] انجام گرفته است.

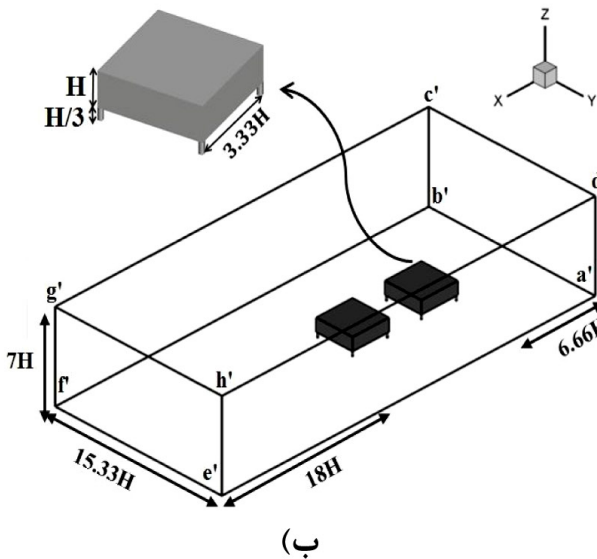
با توجه به تحقیقات پیشین تاکنون اثر تداخل باد بین مجموعه هم ردیف ساختمان‌های روی پایه بررسی نشده است، از این رو در تحقیق حاضر میدان و خصوصیات جریان اطراف مجموعه هم ردیف مدل ساختمان بدون پایه و بر روی پایه در دو فاصله مختلف بررسی شده‌اند. تمامی ابعاد مدل ساختمان‌ها با مقیاس ۰/۰۱ از اندازه‌های متداول و واقعی کوچک شده‌اند. ابعاد ناحیه محاسباتی طبق دستورالعمل‌های انجمن معماری ژاپن [۲۰] انتخاب شده است. این دستورالعمل‌ها برای شبیه‌سازی لایه مرزی اتمسفری اطراف ساختمان‌ها و ایجاد ناحیه محاسباتی مناسب به منظور حل عددی مسأله کمک شایان توجهی می‌نماید. با توجه به این که تعیین میدان جریان در پیش‌بینی الگوی نشست ذرات معلق اطراف این ساختمان‌ها و تهویه مطبوع تأثیر قابل توجهی دارد، این مطالعه از جنبه زیست محیطی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

## ۲- هندسه مورد نظر، دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

در پژوهش حاضر میدان سرعت اطراف مدل هم ردیف ساختمان بدون پایه و بر روی پایه شبیه‌سازی شده است. به این منظور مدل ساختمان بدون پایه مکعب مستطیلی با ابعاد  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  و ساختمان بر روی پایه با همین ابعاد بر روی پایه با ابعاد  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 0.4 \text{ cm}$  به عنوان مدلی از ساختمان‌های واقعی انتخاب شده‌اند. میدان جریان اطراف ساختمان‌های بدون پایه و بر روی پایه در فواصل  $H$  و  $3H$  از یکدیگر به صورت عددی شبیه‌سازی شده‌اند که در آن  $H$  نشان‌دهنده ارتفاع ساختمان بدون پایه می‌باشد. با توجه به اینکه انتخاب شرایط مرزی و دامنه محاسباتی مناسب در مسائل دینامیک سیالات محاسباتی اهمیت ویژه‌ای دارد در این مطالعه از معیار ای. آی. جی استفاده شده است. ابعاد دامنه محاسباتی مورد استفاده برای حل عددی در شکل ۱ و شرایط مرزی برای صفحات مختلف ناحیه محاسباتی در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. شرایط مرزی شامل سرعت ورودی در مرز ورودی دامنه محاسباتی، دیوار در صفحه پایینی و رویه و جوه ساختمان‌ها، تقارن برای صفحات جانبی و صفحه بالایی دامنه محاسباتی و فشار خروجی در صفحه خروجی می‌باشند. برای کاهش هزینه محاسبات،



(الف)



(ب)

شکل ۱: دامنه محاسباتی ساختمان‌های هم ردیف، (الف) بدون پایه (ب) بر روی پایه مورد استفاده در حل عددی در فاصله  $3H$

Fig. 1. Computational domain for inline buildings, a) non-supported, b) supported used in numerical simulation for distance  $3H$

<sup>1</sup>Architectural Institute of Japan (AIJ)

جدول ۱: شرایط مرزی برای صفحات دامنه محاسباتی

Table 1. Boundary conditions for planes of computational domain

| صفحات (شکل ۱)  | شرط مرزی   |
|----------------|--|
| abcd, a'b'c'd' | سرعت ورودی (شکل ۳)، انرژی جنبشی آشفته (شکل ۴)، نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفته (شکل ۵) |
| efgh, e'f'g'h' | فشار خروجی   |
| abfe, a'b'f'e' | دیوار  |
| cghd, c'g'h'd' | تقارن  |
| adhe, a'd'h'e' | تقارن  |
| bcfg, b'c'g'f' | تقارن  |

روابط ارائه شده در [۲۰] محاسبه شده و به کمک تابع تعریف شده توسط کاربر در نرم افزار فلوئنت وارد شده است.

۳- معادلات حاکم

در تحقیق حاضر جریان هوا تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده، همچنین از مدل دو معادله‌ای آشفتگی برای مدل سازی میدان جریان متلاطم استفاده شده است. مدل دو معادله‌ای مدلی است که به حل دو معادله دیفرانسیل انتقال، علاوه بر معادلات پیوستگی، مومنتوم نیاز دارد. معادلات پیوستگی و مومنتوم به صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

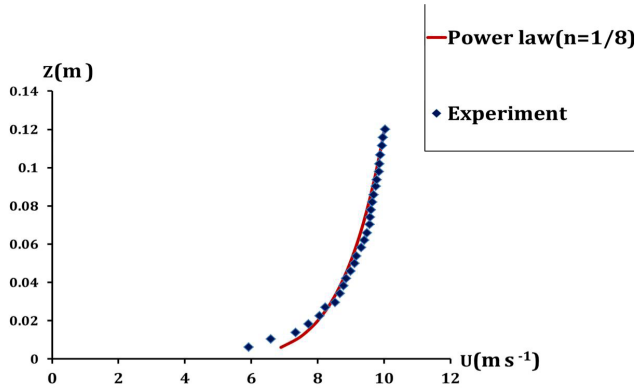
در این روابط  $\bar{U}_i$  متوسط سرعت جریان،  $\bar{p}$  متوسط فشار جریان،  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی،  $\rho$  چگالی و  $\overline{u'_i u'_j}$  تنش رینولدز است. متداول ترین مدل دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  استاندارد می‌باشد که برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ توسط لاندرو و اسپالدینگ [۲۲] ارائه شده است. این مدل در مسائل مربوط به مهندسی باد معمولاً پیش‌بینی مناسبی را از میدان جریان به دست نمی‌دهد، از این رو مدل آر. ان. جی  $k-\epsilon$  [۲۳] به عنوان جایگزینی برای مدل  $k-\epsilon$  استاندارد ارائه شده است. مدل  $k-\epsilon$  تحقق پذیر نیز یک مدل آشفته دو معادله‌ای بوده که توسط شیه و همکاران [۲۴] توسعه داده شده و به عنوان جایگزین مدل  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده می‌شود. در این مقاله از دو مدل فوق برای شبیه سازی آشفتگی استفاده شده است.

در مرکز اولین سلول،  $K$  ثابت فن کارمن و  $C_{\mu} = 0.09$  می‌باشند. همچنین در شرط مرزی تقارن، مؤلفه سرعت عمود بر مرز صفر بوده و گرادیان تمام متغیرها عمود بر سطح نیز صفر است.

شبکه بندی دامنه محاسباتی، از نوع سازمان یافته و مکعب مستطیل شکل بوده و به منظور تولید شبکه مناسب میزان نرخ رشد مناسب برای سلول‌ها در نزدیکی ساختمان‌ها و دیواره‌ها در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۲ (الف) و ۲ (ب) شبکه محاسباتی تولید شده برای شبیه سازی عددی جریان اطراف دو ساختمان بدون پایه و بر روی پایه را در فاصله  $H$  در صفحه تقارن عرضی،  $(Y/H=0)$  دامنه محاسباتی نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۲ (ج) شبکه تولید شده اطراف پایه‌ها نشان داده شده است.

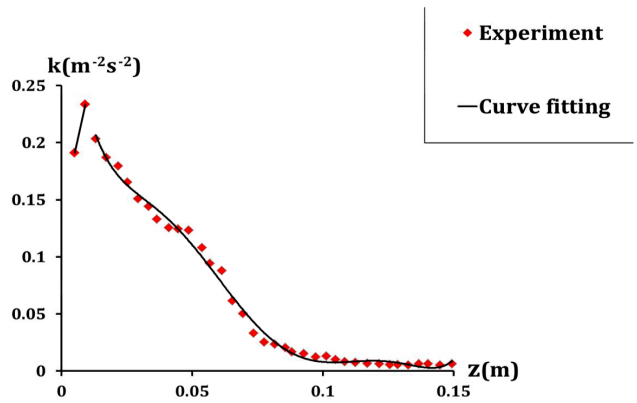
انتخاب شرایط مرزی مناسب در ورودی دامنه محاسباتی در شبیه سازی لایه مرزی اتمسفری از موضوعات چالش برانگیز بوده و برای بدست آوردن نتایج مناسب بسیار اهمیت دارد [۲۰]. بر این اساس در مقاله حاضر با توجه به دستورالعمل پیشنهاد شده توسط ای. آی. جی مقادیر سرعت، انرژی جنبشی آشفته و نرخ استهلاک انرژی آشفته در مرز ورودی دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۳ توزیع سرعت اندازه گیری شده در تونل باد در تحقیق مطلبی و همکاران [۲۱] را نشان می‌دهد. براساس توزیع سرعت اندازه گیری شده در تونل باد و با استفاده از برازش منحنی در ورودی ناحیه محاسباتی از رابطه قانون توانی برای سرعت ورودی استفاده شده و این رابطه به کمک تابع تعریف شده توسط کاربر در نرم افزار فلوئنت وارد شده است.

در شکل‌های ۴ و ۵ تغییرات انرژی جنبشی آشفته و نرخ استهلاک انرژی آشفته در صفحه ورودی دامنه محاسباتی نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها از مقادیر شدت آشفتگی اندازه گیری شده در تحقیق مطلبی و همکاران [۲۱] توزیع انرژی جنبشی آشفته و نرخ استهلاک انرژی آشفته از



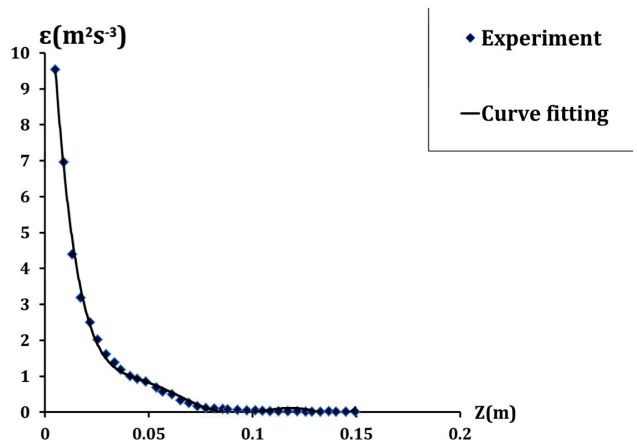
شکل ۳: توزیع سرعت آزمایشگاهی و مقایسه آن با توزیع سرعت توانی در صفحه ورودی

Fig. 3. Experimental velocity profile and comparison to the power law velocity profile at the inlet plane



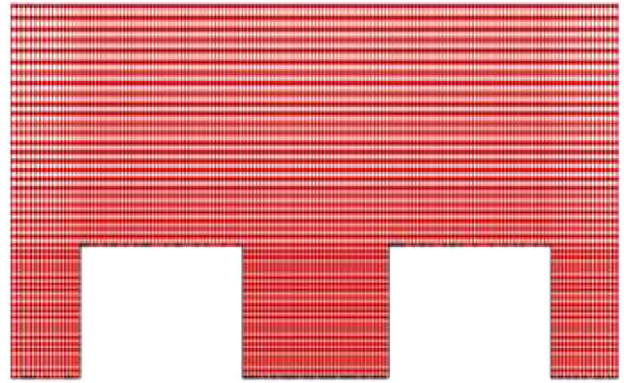
شکل ۴: توزیع مقدار انرژی جنبشی آشفته و مقایسه آن با منحنی برازش شده در صفحه ورودی

Fig. 4. Turbulence kinetic energy profile in comparison to the fitted curve at the inlet plane

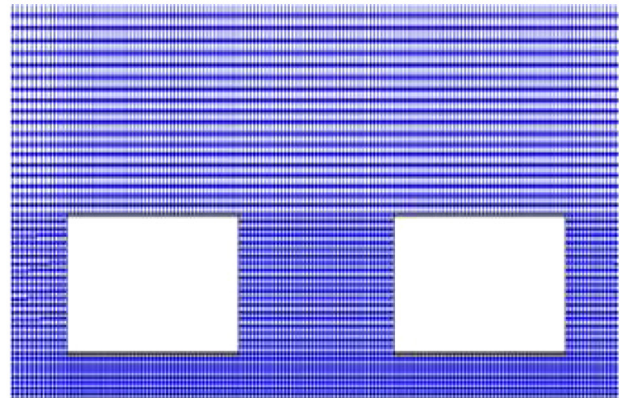


شکل ۵: توزیع نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته و مقایسه آن با منحنی برازش شده در صفحه ورودی

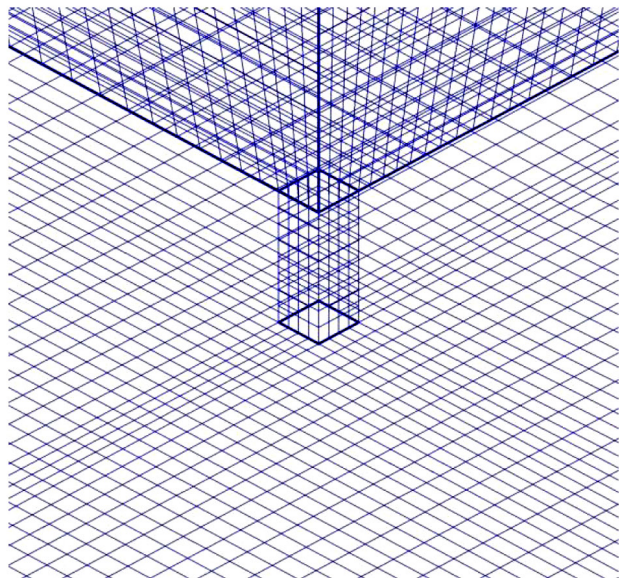
Fig. 5. Turbulence dissipation rate profile in comparison to fitted curve at the inlet plane



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲: شبکه تولید شده برای شبیه سازی عددی در فاصله  $H$  برای ساختمان‌های هم ردیف، الف) بدون پایه، ب) بر روی پایه، ج) شبکه تولید شده اطراف پایه

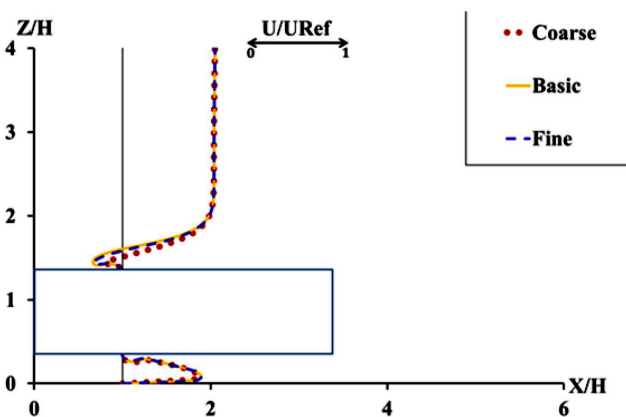
Fig. 2. Generated mesh for numerical simulations in the distance of  $H$  for inline buildings, a) non-supported, b) supported, c) generated mesh around support

حل عددی برای ساختمان‌های هم ردیف ۳ شبکه محاسباتی متفاوت دارای ۱/۵ میلیون، ۲ میلیون و ۲/۵ میلیون سلول استفاده شده است. با توجه به نتایج حاصل شده برای سرعت طولی برای سه شبکه ذکر شده، شبکه با ۲ میلیون سلول برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی انتخاب گردیده است.

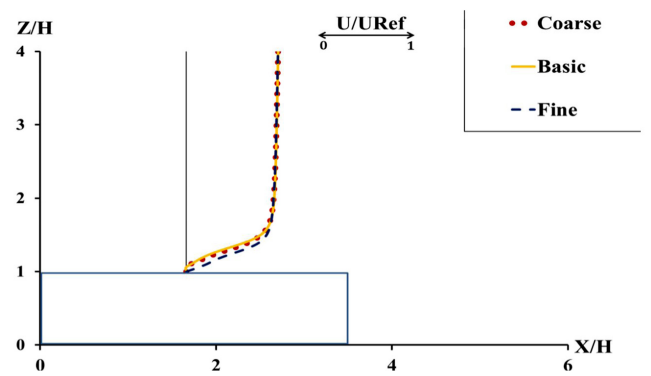
### ۵- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی جریان اطراف ساختمان‌های منفرد پایه دار و بدون پایه براساس پژوهش مطلبی و همکاران [۲۱] و برای جریان اطراف ساختمان‌های هم ردیف از پژوهش ناکامورا و ایگاشی [۲۵] انجام شده است. بدین منظور مدل ساختمان منفرد بدون پایه با ابعاد  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  و ساختمان روی پایه با همین ابعاد و پایه با اندازه  $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$  در نظر گرفته شده است. عدد رینولدز جریان  $(Re = U_{Ref}H/\nu)$ ،  $17000$  بوده، توزیع سرعت در جهت جریان و شدت آشفتگی  $(\sqrt{u'^2} / U_{Ref})$  توسط دو مدل  $k-\epsilon$  آر. ان. جی و  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر پیش‌بینی شده و با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. همچنین برای مدل ساختمان‌های هم ردیف مکعب‌هایی با ابعاد ۳ سانتی متر و با فاصله ۲ سانتی متر در نظر گرفته شده است. برای این هندسه ضرایب فشار در جلو، بالا و پشت مدل ساختمان‌ها برای عدد رینولدز  $32000$  و توسط مدل  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر شبیه‌سازی شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب توزیع سرعت طولی و شدت آشفتگی در صفحه تقارن عرضی در ۳ مکان مختلف، اطراف ساختمان بدون پایه بررسی شده و با نتایج آزمایشگاهی مطلبی و همکاران [۲۱] مقایسه شده است. شبیه‌سازی عددی به وسیله هر دو مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  آر. ان. جی و  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر در عدد رینولدز  $17000$  انجام شده است. در شکل ۸ با توجه



شکل ۷: بررسی استقلال از شبکه در حل عددی برای توزیع سرعت طولی در صفحه تقارن عرضی برای ساختمان منفرد بر روی پایه  $(Re=17000)$   
 Fig. 7. Study of grid independency in the numerical simulation for streamwise velocity profile at the transverse symmetry plane for supported single building,  $(Re=17000)$



شکل ۶: بررسی استقلال از شبکه در حل عددی برای توزیع سرعت طولی در صفحه تقارن عرضی برای ساختمان منفرد بدون پایه  $(Re=17000)$

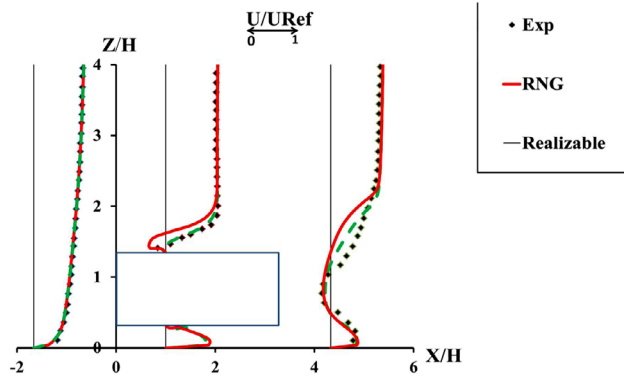
Fig. 6. Study of grid independency in the numerical simulation for streamwise velocity profile at the transverse symmetry plane for non-supported single building,  $(Re=17000)$

### ۴- حل عددی

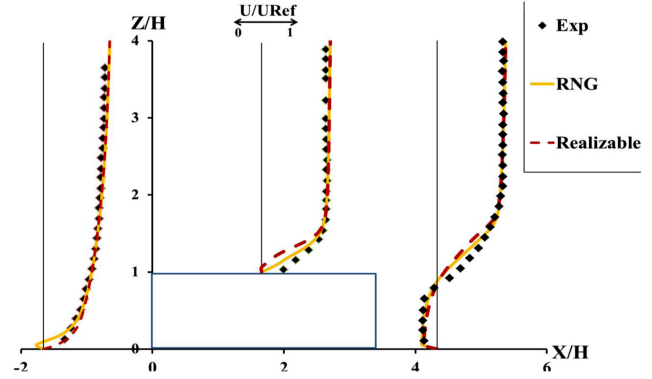
به منظور حل عددی معادلات حاکم از نرم افزار فلوئنت نسخه ۶,۳,۲۶ و از روش حجم محدود استفاده شده است. در حل عددی توسط نرم افزار فلوئنت به منظور حل میدان سرعت و فشار همبسته از الگوریتم سیمپل استفاده شده، همچنین روش میان‌یابی تمامی جملات گسسته سازی شده به جز فشار، کوپیک<sup>۱</sup> بوده و به منظور میان‌یابی جمله فشار از روش مرتبه دوم استفاده شده است. در این روش برای میان‌یابی فشار در وجوه حجم کنترل از روش تفاضل مرکزی استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته روند حل تا کاهش مقادیر پسماند به  $1 \times 10^{-6}$  ادامه پیدا کرده است. همچنین مقادیر سرعت و فشار در چندین نقطه از میدان محاسباتی پایش شده‌اند تا از حصول همگرایی اطمینان حاصل گردد. به منظور انجام شبیه‌سازی‌های عددی از یک سامانه کامپیوتری با دو پردازشگر موازی با سرعت ۶,۲ گیگا هرتز و ۸ گیگابایت حافظه استفاده شده است. با استفاده از این سامانه زمان انجام محاسبات ۶۲ ساعت بوده است.

در شبیه‌سازی عددی حاضر شبکه‌های متفاوت استفاده شده‌اند که در آن‌ها دامنه محاسباتی شامل  $0.8$  میلیون سلول،  $1/6$  میلیون سلول و  $2/3$  میلیون سلول بوده است. شبکه اول شبکه درشت و شبکه با  $2/2$  میلیون سلول، شبکه ریز نامیده می‌شود. توزیع سرعت به دست آمده از حل عددی برای مدل ساختمان بدون پایه و بر روی پایه برای شبکه‌های ریز و درشت در یک مقطع از دامنه محاسباتی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. با مقایسه توزیع سرعت می‌توان گفت که استقلال از شبکه محاسباتی حاصل شده است. با توجه به محاسبات صورت گرفته و به منظور حصول دقت مناسب و هم چنین صرفه‌جویی در هزینه محاسباتی، شبکه با تعداد  $1/6$  میلیون سلول انتخاب شده است. همچنین برای بررسی استقلال از شبکه در

<sup>1</sup>QUICK



شکل ۱۰: مقایسه توزیع سرعت طولی در صفحه تقارن عرضی ساختمان منفرد بر روی پایه با نتایج تجربی [۲۱] ( $Re=17000$ )  
 Fig. 10. Comparison of streamwise velocity profile with experimental results of [21] at the transverse symmetry plane for supported single building, ( $Re=17000$ )



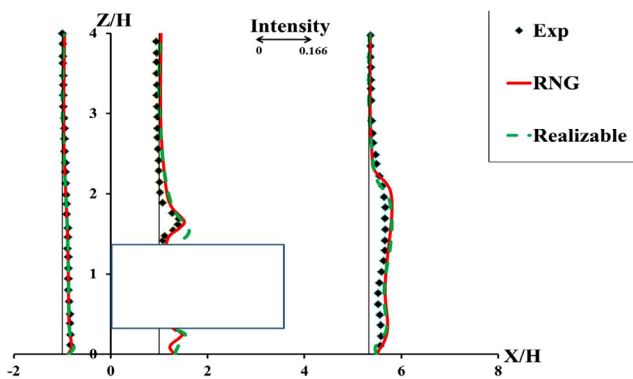
شکل ۸: مقایسه توزیع سرعت طولی در صفحه تقارن عرضی برای ساختمان منفرد بدون پایه با نتایج تجربی [۲۱] ( $Re=17000$ )  
 Fig. 8. Comparison of streamwise velocity profile with experimental results of [21] at the transverse symmetry plane for non-supported single building, ( $Re=17000$ )

مقادیر بیشتری از مقدار مورد انتظار و مدل  $k-\epsilon$  آر. ان. جی مقادیر کمتری از شدت آشفتگی اندازه‌گیری شده را پیش‌بینی می‌کنند. در ناحیه پشت ساختمان هر دو مدل آشفتگی شدت آشفتگی را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌کند.

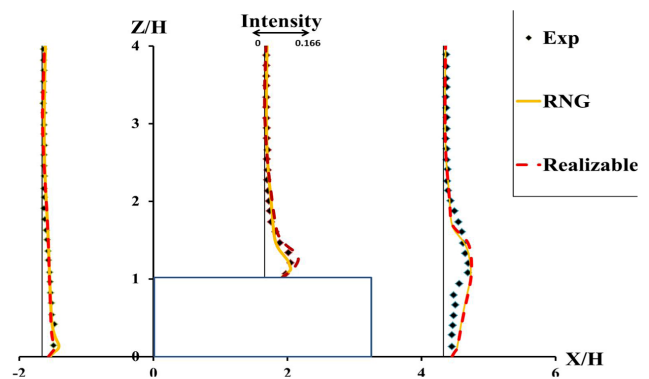
در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ توزیع سرعت طولی و شدت آشفتگی در سه مقطع صفحه تقارن عرضی اطراف ساختمان منفرد بر روی پایه در عدد رینولدز ۱۷۰۰۰ توسط دو مدل آشفتگی شبیه‌سازی شده و با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۱۰ تغییرات سرعت طولی در ناحیه رو به جریان ساختمان، نسبت به ساختمان بدون پایه کمتر و در ناحیه پشت به جریان بیشتر بوده و نتایج هر دو مدل آشفتگی در این ناحیه تطابق خوبی با نتایج تجربی دارند. بر روی ساختمان و پشت ساختمان، مدل  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر نسبت به مدل دیگر پیش‌بینی بهتری را از توزیع سرعت طولی ارائه می‌دهد.

به توزیع سرعت بدست آمده دو ناحیه شامل جریان برگشتی در بخش رو به جریان و پشت به جریان باد مشاهده می‌شود. همچنین با مقایسه نتایج حاصل از دو مدل آشفتگی با نتایج تجربی در جلو ساختمان بدون پایه مشاهده می‌شود که مدل  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر پیش‌بینی دقیق‌تری از توزیع سرعت طولی نسبت به مدل  $k-\epsilon$  آر. ان. جی ارائه می‌دهد، در حالی که مدل  $k-\epsilon$  آر. ان. جی در نزدیکی سطح مقادیر سرعت را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده به روش آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند. بر روی ساختمان مدل  $k-\epsilon$  آر. ان. جی پیش‌بینی دقیق‌تری از توزیع سرعت طولی دارد و مدل  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر مقادیر سرعت طولی را بیشتر از نتایج اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌کند. در ناحیه پشت به جریان ساختمان، هر دو مدل آشفتگی پیش‌بینی نسبتاً مناسبی از نتایج سرعت طولی ارائه می‌دهند و تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

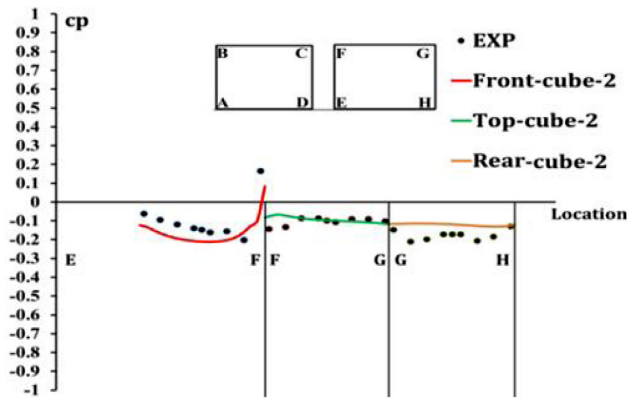
در شکل ۹ در ناحیه بالا و نزدیک سقف ساختمان، مدل  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر



شکل ۱۱: مقایسه توزیع شدت آشفتگی در صفحه تقارن عرضی برای ساختمان منفرد بر روی پایه با نتایج تجربی [۲۱] ( $Re=17000$ )  
 Fig. 11. Comparison of turbulent kinetic energy profile with experimental results of [21] at the transverse symmetry plane for non-supported single building, ( $Re=17000$ )



شکل ۹: مقایسه توزیع شدت آشفتگی در صفحه تقارن عرضی برای ساختمان منفرد بدون پایه با نتایج تجربی [۲۱] ( $Re=17000$ )  
 Fig. 9. Comparison of turbulent kinetic energy profile with experimental results of [21] at the transverse symmetry plane for non-supported single building, ( $Re=17000$ )

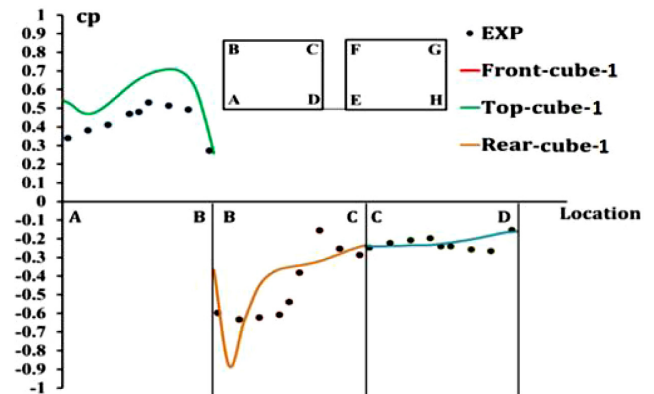


شکل ۱۳: مقایسه ضریب فشار با نتایج آزمایشگاهی [۲۵] در اطراف ساختمان پایین دست برای ساختمان‌های بدون پایه هم ردیف ( $Re=32000$ )

Fig. 13. Comparison of pressure coefficient around downstream building for inline non-supported buildings with experimental results of [25], ( $Re=32000$ )

مشاهده می‌شود که به دلیل انسداد جریان توسط ساختمان، ضریب فشار در بخش رو به جریان ساختمان اول مثبت بوده و مدل آشفته روند تغییرات ضریب فشار را در سطح جلویی ساختمان به خوبی پیش‌بینی کرده ولی مقادیر پیش‌بینی شده، بیشتر از مقادیر مورد انتظار است. به دلیل جدایش جریان از لبه ورودی، ضریب فشار بر روی ساختمان اول، منفی بوده و مدل آشفته روند تغییرات ضریب فشار را به خوبی پیش‌بینی کرده است. مقادیر ضریب فشار حاصل از شبیه‌سازی عددی در بخش پشت به جریان ساختمان اول منفی بوده و نسبت به دو سطح دیگر تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد.

در شکل ۱۳ توزیع ضریب فشار در صفحه تقارن در بخش رو به جریان، صفحه بالا و صفحه پشت به جریان ساختمان پایین دست، از شبیه‌سازی مدل دو ساختمان هم ردیف نشان داده شده‌اند. شبیه‌سازی عددی توسط مدل  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر انجام شده و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. با توجه به این شکل می‌توان گفت که مدل مذکور روند تغییرات ضریب فشار در بخش رو به جریان ساختمان دوم را به خوبی پیش‌بینی کرده ولی مقدار ضریب فشار در گوشه بالایی سطح (نقطه  $F$ ) را کمتر از مقدار مورد انتظار محاسبه می‌کند. توزیع ضریب فشار محاسبه شده توسط مدل آشفته بر روی ساختمان منفی بوده و تطابق نسبتاً خوبی با نتایج تجربی دارد. در بخش ابتدایی سطح بالایی، مقادیر ضریب فشار پیش‌بینی شده بیشتر از مقدار تجربی بوده است. توزیع ضریب فشار در پشت ساختمان منفی بوده و روند تغییرات توسط مدل آشفته با مقادیر تجربی تطابق خوبی دارد ولی مقادیر ضریب فشار به صورت دقیق پیش‌بینی نشده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقادیر ضریب فشار در روی ساختمان پایین دست نسبت به دو سطح دیگر بیشترین تطابق را با نتایج تجربی نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: مقایسه ضریب فشار با نتایج آزمایشگاهی [۲۵] در اطراف ساختمان بالادست برای ساختمان‌های بدون پایه هم ردیف ( $Re=32000$ )

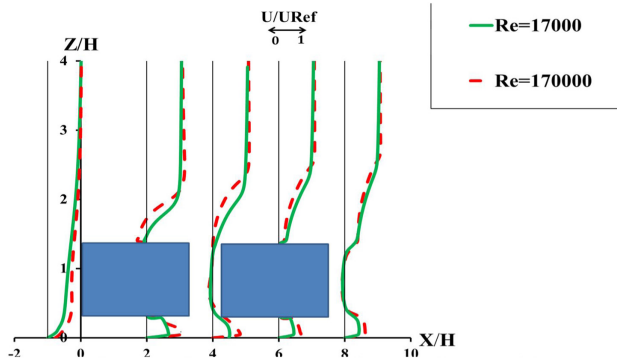
Fig. 12. Comparison of pressure coefficient around upstream building for inline non-supported buildings with experimental results of [25], ( $Re=32000$ )

با توجه به شکل ۱۱ در ناحیه جلو ساختمان، مقادیر محاسبه شده توسط هر دو مدل، با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری تطابق دارند و تغییر چندانی در مقادیر شدت آشفتگی از سطح زمین تا لبه لایه مرزی ملاحظه نمی‌شود. در ناحیه بالا و نزدیک سقف ساختمان مدل  $k-\epsilon$  آر. ان. جی پیش‌بینی دقیقی‌تری از توزیع شدت آشفتگی ارائه می‌دهد. در ناحیه پشت ساختمان، تا نزدیکی ارتفاع ساختمان روند تغییرات شدت آشفتگی را به درستی پیش‌بینی می‌کنند اما مقادیر محاسبه شده توسط هر دو مدل کمی بیشتر از مقادیر متناظر تجربی می‌باشند.

بررسی کمی نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان اختلاف توزیع سرعت طولی بین نتایج تجربی و نتایج مدل  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر بر روی سقف ساختمان بدون پایه و پشت ساختمان بر روی پایه بوده که به ترتیب ۱۶ درصد و ۵ درصد می‌باشند. برای شدت آشفتگی بیشترین اختلاف در پشت ساختمان بدون پایه و بر روی سقف ساختمان بر روی پایه مشاهده می‌شود که به ترتیب ۴ درصد و ۱۷ درصد می‌باشند.

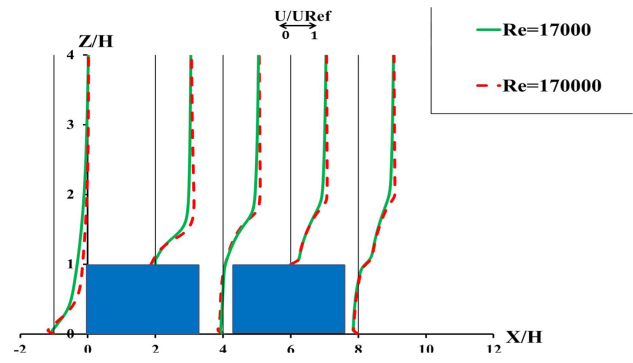
بیشترین میزان تفاوت سرعت طولی بین نتایج تجربی و نتایج مدل  $k-\epsilon$  آر. ان. جی برای ساختمان‌های بدون پایه و بر روی پایه، بر روی سقف ساختمان‌ها بوده که به ترتیب ۱۴ درصد و ۲۰ درصد می‌باشند. برای شدت آشفتگی، بیشترین اختلاف در پشت ساختمان بدون پایه و بر روی سقف ساختمان بر روی پایه مشاهده می‌شود که به ترتیب ۱۶ درصد و ۵ درصد می‌باشند.

در شکل ۱۲ نتایج مربوط به اعتبارسنجی مدل عددی برای ساختمان‌های هم ردیف ارائه شده است. در این شکل توزیع ضریب فشار حاصل از رابطه  $C_p = (P - P_{ref}) / (0.5 \times \rho U^2)$  در صفحه تقارن ساختمان در سطوح جلو، بالا و پشت ساختمان بالادست نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۲



شکل ۱۵: توزیع سرعت طولی در صفحه تقارن عرضی در دو عدد رینولدز اطراف ساختمان‌های هم ردیف بر روی پایه در فاصله  $H$

Fig. 15. Streamwise velocity profile in the transverse symmetry plane for two Reynolds numbers around supported inline building at distance  $H$ .



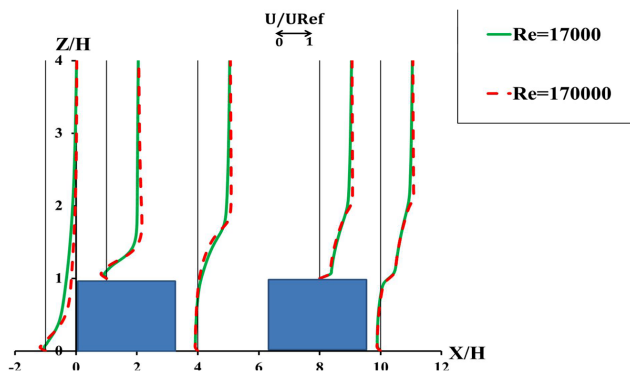
شکل ۱۴: توزیع سرعت طولی در صفحه تقارن عرضی در دو عدد رینولدز اطراف ساختمان‌های هم ردیف بدون پایه در فاصله  $H$

Fig. 14. Streamwise velocity profile in the transverse symmetry plane for two Reynolds numbers around non-supported inline building at distance  $H$ .

## ۶- نتایج

دلیل جدایش جریان ناحیه جریان برگشتی مشاهده می‌شود و در ارتفاع بالاتر از ساختمان ناحیه جریان برشی دیگری مشاهده می‌شود که تا ارتفاع تقریبی  $2/5$  برابر ارتفاع ساختمان ادامه می‌یابد. شکل ۱۶ توزیع سرعت طولی جریان را در صفحه تقارن عرضی در دو عدد رینولدز  $17000$  و  $170000$  برای ساختمان‌های هم ردیف بدون پایه در فاصله  $3H$  نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان به این نکته اشاره کرد که بر روی ساختمان اول و برای هر دو عدد رینولدز ناحیه جدا شده مشاهده می‌شود و توزیع سرعت در اطراف ساختمان در دو عدد رینولدز تقریباً مشابه است.

در شکل ۱۷ سرعت طولی جریان در چندین مقطع در صفحه تقارن عرضی برای ساختمان‌های هم ردیف بر روی پایه در فاصله  $3H$  در دو عدد رینولدز نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل در قسمت زیر ساختمان‌ها توزیع سرعت برای اعداد رینولدز  $17000$  و  $170000$  اندکی تفاوت را نشان می‌دهد. همچنین در پشت ساختمان‌ها، ناحیه جریان برگشتی در نزدیکی



شکل ۱۶: توزیع سرعت طولی در صفحه تقارن عرضی در دو عدد رینولدز اطراف ساختمان‌های هم ردیف بدون پایه در فاصله  $3H$

Fig. 16. Streamwise velocity profile in the transverse symmetry plane for two Reynolds numbers around non-supported inline building at distance  $3H$ .

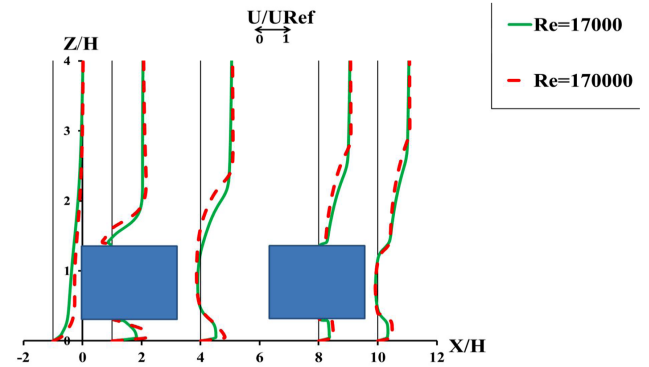
بر اساس اعتبارسنجی صورت گرفته می‌توان گفت که در مجموع مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر پیش‌بینی مناسب‌تری از میدان جریان در اطراف مدل ساختمان‌های هم ردیف ارائه می‌دهد. از این رو در ادامه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی برای مدل ساختمان‌های هم‌ردیف با استفاده از این مدل ارائه شده است. به منظور مقایسه، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی برای جریان با دو عدد رینولدز مختلف در صفحه تقارن عرضی ارائه شده است. در شکل ۱۴ توزیع سرعت طولی در صفحه تقارن عرضی در دو عدد رینولدز  $17000$  و  $170000$  اطراف ساختمان‌های هم ردیف بدون پایه در فاصله  $H$  نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای عدد رینولدز بالاتر ابعاد ساختمان  $10$  برابر شده‌اند و توزیع سرعت مشابه حالت قبل می‌باشد. مطابق انتظار برای جریان با عدد رینولدز  $170000$  تغییرات سرعت بیشتری نسبت به عدد رینولدز  $17000$  در بخش رو به جریان ساختمان اول و روی ساختمان‌ها ملاحظه می‌گردد. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد که برای هر دو عدد رینولدز بر روی ساختمان اول ناحیه جریان برگشتی تا نصف طول ساختمان گسترش یافته است.

در شکل ۱۵ توزیع سرعت طولی در صفحه تقارن عرضی در دو عدد رینولدز  $17000$  و  $170000$  برای ساختمان‌های هم ردیف بر روی پایه در فاصله  $H$  نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که همانند ساختمان‌های بدون پایه، در عدد رینولدز  $170000$  تغییرات سرعت در نواحی رو به جریان ساختمان بالادست و روی هر کدام از ساختمان‌ها نسبت به عدد رینولدز  $17000$  بیشتر می‌باشد. مقایسه شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهد که وجود پایه‌ها سبب می‌شود که ناحیه جریان برگشتی در بخش پشت به جریان از روی زمین حذف گردد و میدان جریان به سه ناحیه تقسیم شود. در این حالت در بخش زیر سطحی ساختمان به دلیل وجود دیوار در پایین و بالا، الگوی جریان شبیه جریان داخل کانال بوده، در بین دو ساختمان و در ناحیه پشتی ساختمان دوم و در ارتفاع بالاتر از پایه‌ها، به



ساختمان بدون پایه ناحیه سکون در بخش رو به جریان ساختمان اول وجود دارد؛ اما ناحیه جریان برگشتی در جلوی ساختمان حذف شده است. همچنین طول ناحیه شامل جریان برگشتی بر روی ساختمان نسبت به ساختمان بدون پایه بزرگتر است. در پشت ساختمان پایین دست دو گردابه خلاف جهت یکدیگر مشاهده می‌شود و طول ناحیه جریان برگشتی نسبت به ساختمان بدون پایه کوچکتر است. همچنین کمترین میزان فشار در بخش جریان جدا شده از لبه بالایی و پایینی ساختمان بر روی پایه مشاهده می‌شود. در شکل ۱۸ (د) کانتور فشار به همراه خطوط جریان برای صفحه میانی ساختمان رسم شده است. در قسمت‌های کناری ساختمان بالادست ناحیه فشار منفی نسبت به ساختمان بدون پایه کاهش یافته و جریان برگشتی به میزان بسیار کمتری وجود دارد.

در شکل ۱۹ خطوط جریان و کانتور فشار اطراف ساختمان‌های هم ردیف

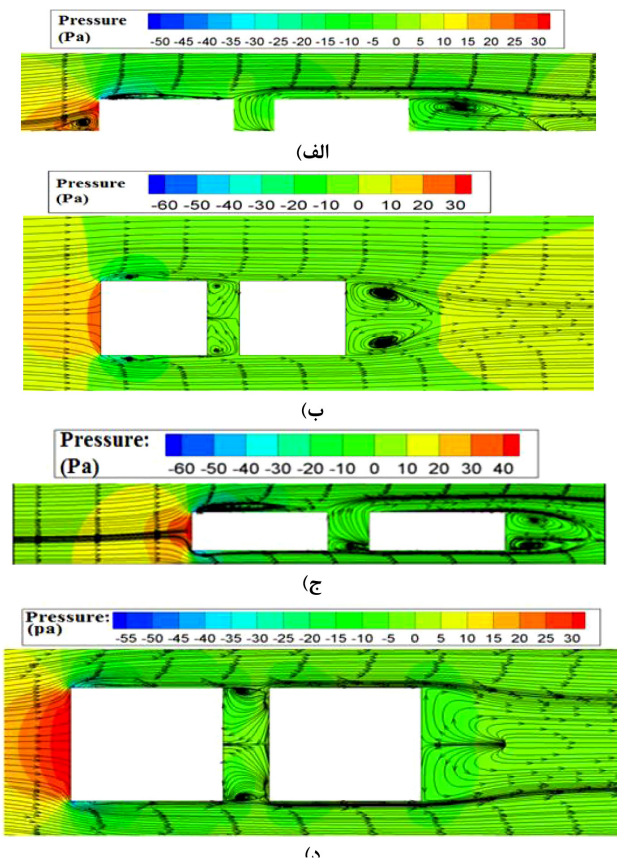


شکل ۱۷: توزیع سرعت طولی در صفحه تقارن عرضی در دو عدد رینولدز اطراف ساختمان‌های هم ردیف بر روی پایه در فاصله  $3H$

Fig. 17. Streamwise velocity profile in the transverse symmetry plane for two Reynolds numbers around supported inline building in the distance  $3H$ .

زمین حذف شده و در ادامه در ارتفاع تقریبی ساختمان دیده می‌شود. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که برای ساختمان‌های بدون پایه تغییر عدد رینولدز تأثیر چندانی بر میدان جریان ندارد در حالی که برای ساختمان‌های بر روی پایه تغییر عدد رینولدز سبب تغییر اندک میدان جریان به ویژه در قسمت زیر سطحی و بر روی ساختمان می‌شود. از این رو می‌توان گفت که در عدد رینولدز ۱۷۰۰۰ جریان به صورت تقریبی مستقل از عدد رینولدز می‌باشد و در ادامه کانتورهای خط جریان و فشار برای جریان با عدد رینولدز ۱۷۰۰۰ ترسیم شده‌اند.

در شکل ۱۸ خطوط جریان و کانتور فشار اطراف ساختمان‌های هم ردیف بدون پایه و بر روی پایه در فاصله  $H$  در صفحه تقارن عرضی و صفحه میانی ساختمان، برای جریان با رینولدز ۱۷۰۰۰ نشان داده شده‌اند. شکل ۱۸ (الف) خطوط جریان و کانتور فشار را در صفحه تقارن عرضی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۸ (الف)، جدایش جریان در بالادست ساختمان اول سبب ایجاد ناحیه جریان برگشتی در بالادست ساختمان اول شده و جدایش جریان از لبه ورودی ساختمان اول سبب تشکیل جریان برگشتی بر روی ساختمان اول شده است. همچنین در فاصله بین دو ساختمان و پشت ساختمان دوم جریان برگشتی مشاهده می‌شود. با توجه به توزیع فشار در بخش رو به جریان ساختمان، ناحیه با فشار بالا مشاهده می‌شود که ناشی از انسداد جریان توسط ساختمان می‌باشد. با توجه به این شکل کمترین میزان فشار مربوط به جریان جدا شده از لبه ساختمان اول می‌باشد. در شکل ۱۸ (ب) کانتور فشار به همراه خطوط جریان در صفحه میانی ساختمان‌ها نشان داده شده است. در قسمت‌های کناری ساختمان اول، ناحیه فشار منفی به وضوح مشاهده شده و با نزدیک شدن به سطح جلویی ساختمان اول، فشار مثبت افزایش می‌یابد. در قسمت‌های کناری ساختمان دوم ناحیه جریان برگشتی مشاهده نمی‌شود و ناحیه فشار منفی پشت ساختمان دوم به میزان اندکی وجود دارد. در شکل ۱۸ (ج) خطوط جریان و کانتور فشار در صفحه تقارن عرضی برای ساختمان‌های بر روی پایه نشان داده شده است. همانند



شکل ۱۸: خطوط جریان و کانتور فشار برای ساختمان‌های هم ردیف در فاصله  $H$ ،  $(Re=17000)$ ، (الف) بدون پایه در صفحه تقارن عرضی، (ب) بدون پایه در صفحه میانی ساختمان، (ج) بر روی پایه در صفحه تقارن عرضی، (د) بر روی پایه در صفحه میانی ساختمان

Fig. 18. Streamlines and pressure contours around inline buildings at distance  $H$ ,  $(Re=17000)$ , a) non-supported in the transverse symmetry plane, b) non-supported in the central plane of building, c) supported in the transverse symmetry plane, d) supported in the central plane of building

هم ردیف بر روی پایه در فاصله  $3H$  در صفحه تقارن عرضی رسم شده، این شکل نشان می‌دهد که با افزایش فاصله بین دو ساختمان هم ردیف بر روی پایه دو گردابه بزرگ نامتقارن در بین ساختمان‌ها مشاهده می‌شود. در شکل ۱۹ (د) کانتور فشار به همراه خطوط جریان برای ساختمان‌های هم ردیف بر روی پایه در فاصله  $3H$  برای صفحه میانی ساختمان رسم شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در ساختمان بر روی پایه بالادست فشار مثبت نسبت به ساختمان‌های بدون پایه بیشتر و فشار منفی در نواحی کناری کمتر بوده و در نواحی بین ساختمان‌های هم ردیف بدون پایه نسبت به ساختمان‌های هم ردیف بر روی پایه الگوی جریان برگشتی متفاوت است. از این رو می‌توان گفت وجود پایه‌ها سبب تغییر میدان فشار و الگوی جریان در اطراف ساختمان اول می‌گردد.

در جدول ۲ به منظور مقایسه کمی، مقادیر طول جدایش و اتصال مجدد مطابق تعریف شکل ۲۰ گزارش شده‌اند. با توجه به نتایج با افزایش فاصله دو ساختمان بدون پایه طول ناحیه جریان برگشتی در پشت ساختمان پایین دست افزایش می‌یابد و در بخش رو به جریان نقطه جدایش جریان در فاصله بیشتری از ساختمان بالادست قرار دارد. همچنین طول ناحیه برگشتی بر روی ساختمان اول برای ساختمان بر روی پایه نسبت به ساختمان بدون پایه بزرگتر است.

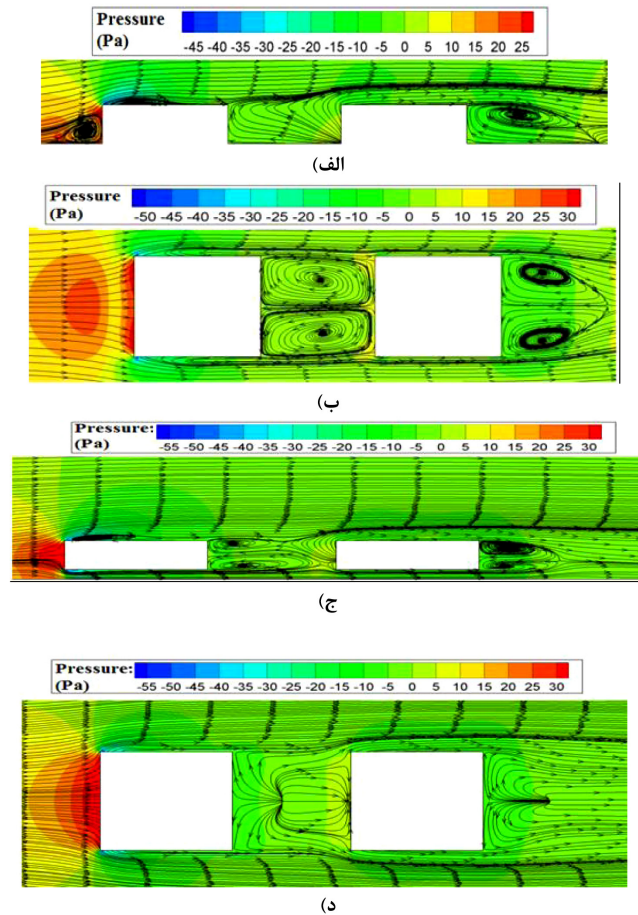
## ۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش میدان جریان اطراف دو ساختمان هم ردیف بدون پایه و بر روی پایه با استفاده از شبیه‌سازی عددی مقایسه شده‌اند. برای شبیه‌سازی عددی از مدل‌سازی آشفتگی به کمک مدل‌های  $k-\epsilon$  آر. ان. جی و  $k-\epsilon$  تحقیق‌پذیر استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج از نتایج تجربی موجود برای مدل ساختمان‌های منفرد بدون پایه و بر روی پایه و مدل ساختمان‌ها و اجسام هم ردیف بر روی سطح استفاده شده است. مقایسه نتایج برای مدل محاسباتی استفاده شده برای اعتبارسنجی نشان می‌دهد

جدول ۲: طول اتصال مجدد و جدایش برای مدل ساختمان‌های هم ردیف در فاصله‌های مختلف

Table 2. Re-attachment and separation lengths for inline building models at different distances

| $\frac{X_{r3}}{H}$ | $\frac{X_{r1}}{H}$ | $\frac{X_{s1}}{H}$ | فواصل و نوع ساختمان    |
|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| ۳/۳۳               | ۲/۶۷               | ۱/۶۷               | بدون پایه ( $S=H$ )    |
| -                  | ۲/۸۸               | -                  | بر روی پایه ( $S=H$ )  |
| ۳/۵                | ۲                  | ۲/۳۳               | بدون پایه ( $S=3H$ )   |
| -                  | ۲/۷۳               | -                  | بر روی پایه ( $S=3H$ ) |

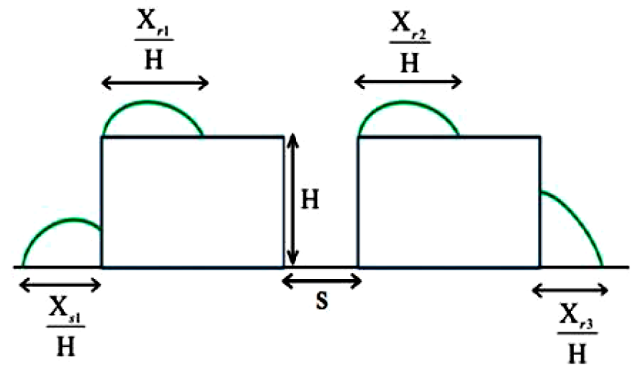


شکل ۱۹: خطوط جریان و کانتور فشار برای ساختمان‌های هم ردیف در فاصله  $3H$ ، ( $Re=17000$ )، (الف) بدون پایه در صفحه تقارن عرضی، (ب) بدون پایه در صفحه میانی ساختمان، (ج) بر روی پایه در صفحه تقارن عرضی، (د) بر روی پایه در صفحه میانی ساختمان

Fig. 19. Streamlines and pressure contours around inline buildings at distance  $3H$ , ( $Re=17000$ ), a) non-supported in the transversal symmetry plane, b) non-supported in the central plane of building, c) supported in the transversal symmetry plane, d) supported in the central plane of building

بدون پایه و بر روی پایه در فاصله  $3H$  در صفحه تقارن عرضی و صفحه میانی ساختمان نشان داده شده است. در شکل ۱۹ (الف) خطوط جریان و کانتور فشار در صفحه تقارن عرضی رسم شده است. برای ساختمان‌های بدون پایه گردابه بزرگتری در جلو ساختمان بالا دست در فاصله  $3H$  نسبت به فاصله  $H$  مشاهده می‌شود، همچنین در این فاصله جریان برگشتی در فضای بین ساختمان‌ها نسبت به فاصله  $H$  گسترش بیشتری دارد. در شکل ۱۹ (ب) کانتور فشار به همراه خطوط جریان برای ساختمان‌های هم ردیف بدون پایه در فاصله  $3H$  برای صفحه میانی ساختمان رسم گردیده است. در فضای بین ساختمان‌ها و پشت ساختمان پایین دست (برای ساختمان‌های هم ردیف بدون پایه) در فاصله  $3H$  نسبت به فاصله  $H$  گردابه بزرگتری مشاهده می‌شود. در شکل ۱۹ (ج) خطوط جریان و کانتور فشار اطراف ساختمان‌های

|   |                        |
|---|------------------------|
| انرژی جنبشی آشفته جریان ( $m^2s^{-2}$ )       | $k$                    |
| فشار متوسط جریان ( $N.m^{-2}$ )               | $\bar{p}$              |
| عدد رینولدز                                   | Re                     |
| فاصله دو ساختمان                              | $S$                    |
| سرعت جریان آزاد ( $m.s^{-1}$ )                | $U_{Ref}$              |
| سرعت نوسانی جریان سیال ( $m.s^{-1}$ )         | $u'$                   |
| تنش رینولدز ( $m^2s^{-2}$ )                   | $\overline{u'_i u'_j}$ |
| سرعت متوسط جریان ( $m.s^{-1}$ )               | $\bar{U}$              |
| طول اتصال مجدد روی ساختمان                    | $X_r$                  |
| طول جدایش و طول اتصال مجدد روی زمین           | $X_S$                  |
| نرخ استهلاك انرژی جنبشی آشفته ( $m^2s^{-3}$ ) | $\varepsilon$          |
| ویسکوزیته دینامیکی ( $kg.m^{-1}s^{-1}$ )      | $\mu$                  |
| چگالی ( $kg.m^{-3}$ )                         | $\rho$                 |
| لزجت سینماتیک ( $m^2s^{-1}$ )                 | $\nu$                  |



شکل ۲۰: محل نقاط جدایش و اتصال مجدد

Fig. 20. Location of separation and re-attachment points

که مدل مورد نظر روند تغییرات فشار در اطراف دو مکعب هم ردیف را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته نشان می‌دهند که برای دو ساختمان هم ردیف بدون پایه در پشت ساختمان‌ها دو گردابه در خلاف جهت هم شکل می‌گیرد. مقایسه نتایج برای مدل ساختمان‌ها بدون پایه و بر روی پایه نشان می‌دهند که وجود پایه‌ها سبب می‌شوند که ناحیه جدایش جریان در وجه‌های جانبی ساختمان اول کوچک شده و ناحیه کم فشار نیز در این قسمت کوچکتر شود. از آنجا که قسمت عمده نیروی پسای وارده به ساختمان ناشی از اختلاف فشار در اطراف ساختمان می‌باشد، وجود نواحی کم فشار در اطراف ساختمان سبب ایجاد نیروی پسای بیشتر به ساختمان می‌گردد. از این رو قرار دادن ساختمان‌ها بر روی پایه می‌تواند به کاهش نیروی پسای وارده به ساختمان بیانجامد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که در هر دو عدد رینولدز پایین ( $17000$ ) و بالا ( $170000$ ) در نواحی بین ساختمان‌ها و پشت ساختمان پایین دست برای ساختمان‌های بر روی پایه نسبت به ساختمان‌های بدون پایه گرادیان سرعت بیشتری وجود دارد. برای هر دو ساختمان در عدد رینولدز  $170000$  گرادیان سرعت در نواحی جلو ساختمان بالا دست و روی سقف هر کدام از ساختمان‌ها نسبت به عدد رینولدز  $17000$  بیشتر می‌باشد. همچنین وجود پایه‌ها سبب حذف ناحیه جریان برگشتی در نزدیکی زمین در پشت ساختمان‌ها می‌گردد. برای ساختمان‌های هم ردیف بدون پایه با افزایش فاصله، طول اتصال مجدد بر روی سقف ساختمان بالادست افزایش می‌یابد. برای ساختمان‌های هم ردیف بر روی پایه با افزایش فاصله، طول اتصال مجدد بر روی سقف ساختمان بالادست کاهش می‌یابد.

### فهرست علائم

$C_p$  ضریب فشار

$H$  ارتفاع ساختمان بدون پایه (cm)

- منابع و مراجع**
- [1] W. Schofield, E. Logan, Turbulent shear flow over surface mounted obstacles, Journal of fluids engineering, 112(4) (1990) 376-385.
  - [2] I. Castro, Measurements in shear layers separating from surface-mounted bluff bodies, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 7(3) (1981) 253-272.
  - [3] D. Maull, R. Young, Vortex shedding from bluff bodies in a shear flow, Journal of Fluid Mechanics, 60(2) (1973) 401-409.
  - [4] I. Castro, A. Robins, The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams, Journal of fluid Mechanics, 79(2) (1977) 307-335.
  - [5] Motalebi.S, Abouali.O, Goshtasbi. E, investigation of flow field around a building with subsurface flow, Seventeenth International Conference on Mechanical Engineering, (2009) (in Persian).
  - [6] Y. Tominaga, Flow around a high-rise building using

- [16] E. Meinders, K. Hanjalić, Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes, *International Journal of Heat and fluid flow*, 20(3) (1999) 255-267.
- [17] B. Ničeno, A. Dronkers, K. Hanjalić, Turbulent heat transfer from a multi-layered wall-mounted cube matrix: a large eddy simulation, *International Journal of Heat and fluid flow*, 23(2) (2002) 173-185.
- [18] V. Natarajan, M. Chyu, Effect of flow angle-of-attack on the local heat/mass transfer from a wall-mounted cube, *Journal of heat transfer*, 116(3) (1994) 552-560.
- [19] E. Meinders, K. Hanjalić, Experimental study of the convective heat transfer from in-line and staggered configurations of two wall-mounted cubes, *International Journal of Heat and mass transfer*, 45(3) (2002) 465-482.
- [20] Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa, T. Shirasawa, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(10-11) (2008) 1749-1761.
- [21] S.M. Hasankola, E.G. Rad, O. Abouali, Experimental investigation of the airflow around supported and surface mounted low rise rural buildings, *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Mechanical Engineering*, 36(M2) (2012) 143.
- [22] B.E. Launder, D.B. Spalding, *Mathematical models of turbulence*, Academic press, 1972.
- [23] V. Yakhot, S. Orszag, S. Thangam, T. Gatski, C. Speziale, Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7) (1992) 1510-1520.
- [24] T.-H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu, A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows, *Computers & Fluids*, 24(3) (1995) 227-238.
- [25] H. Nakamura, T. Igarashi, T. Tsutsui, Fluid flow and local heat transfer around two cubes arranged in tandem on a flat plate turbulent boundary layer, *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 44(4) (2001) 584-591.
- steady and unsteady RANS CFD: Effect of large-scale fluctuations on the velocity statistics, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 142 (2015) 93-103.
- [7] Y. Tominaga, S.-i. Akabayashi, T. Kitahara, Y. Arinami, Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations, *Building and Environment*, 84 (2015) 204-213.
- [8] F.-S. Lien, E. Yee, Numerical Modelling of the Turbulent Flow Developing Within and Over a 3-D Building Array, Part I: A High-Resolution Reynolds-Averaged Navier—Stokes Approach, *Boundary-Layer Meteorology*, 112(3) (2004) 427-466.
- [9] R.J. Martinuzzi, B. Havel, Turbulent flow around two interfering surface-mounted cubic obstacles in tandem arrangement, *Journal of fluids engineering*, 122(1) (2000) 24-31.
- [10] E. Tulapurkara, B. Gowda, J. Chaukar, Mean velocity field around prismatic bodies in tandem arrangement, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 93(10) (2005) 777-796.
- [11] A. Mittal, D. Ghosh, S. Behera, I. Siddiqui, D. Dharmshaktu, Wind flow simulation in the vicinity of tall buildings through CFD, in: *Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Chennai, India, 2013.
- [12] R. Gnatowska, Aerodynamic characteristics of three-dimensional surface-mounted objects in tandem arrangement, *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 28(1) (2011) 21-29.
- [13] Z. Liu, T. Ishihara, A study of tornado induced mean aerodynamic forces on a gable-roofed building by the large eddy simulations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 146 (2015) 39-50.
- [14] A.-M. Aly, J. Bresowar, Aerodynamic mitigation of wind-induced uplift forces on low-rise buildings: A comparative study, *Journal of Building Engineering*, 5 (2016) 267-276.
- [15] W. Kim, Y. Tamura, A. Yoshida, Interference effects on aerodynamic wind forces between two buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 147 (2015) 186-201.

Please cite this article using:

H. Haghighifard, M. Tavakol, Effect of Support on Wind Flow Field Around Array of Two Inline Buildings, *Amirkabir*

*J. Mech. Eng.*, 51(2) (2019) 249-260.

DOI: 10.22060/mej.2017.12784.5437

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

