



شبیه سازی عددی اثرات تداخل بار باد در اطراف گروهی از ساختمان‌های بلند

مهرداد حجازی^{۱*}، محمدعلی محمد تقی‌زاده^۲ و ابراهیم افشاری^۳^۱دانشیار مهندسی سازه، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان^۲کارشناس ارشد مهندسی سازه، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان^۳استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۶/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۲۳

چکیده

برخلاف یک ساختمان در حالت منفرد در برابر نیروی باد، تعیین عملکرد دو یا چند ساختمان در کنار یکدیگر به علت پدیده آمدن اثرات تداخل بار باد، بسیار پیچیده است. از جدیدترین کارهای صورت گرفته در زمینه بررسی اثرات تداخل، می‌توان به بررسی ضرایب تداخل و ضرایب فشار روی گروهی از ساختمان‌های بلند با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) اشاره کرد. به این منظور در این مقاله، ضرایب فشار و تداخل گروهی از ساختمان‌های بلند با ارتفاع متغیر، فواصل متفاوت قرارگیری و زوایای مختلف بارگذاری باد، مورد مطالعه قرار گرفته است و تأثیر فاصله ساختمان‌ها و زاویه بارگذاری باد در دو گروه ۴ تایی از ساختمان‌های بلند، روی متوسط ضرایب فشار ساختمان‌های گروه بررسی شده است. در بازه فواصل انتخابی، در بیش از ۵۰٪ حالات با زیاد شدن فاصله قرارگیری ساختمان‌های بلند، متوسط ضرایب فشار روی ساختمان‌ها نیز افزایش می‌یابد. برای نشان دادن اثرات تداخل در ساختمان‌های گروهی، ضرایب تداخل که در واقع ضرایب فشار روی ساختمان‌ها قرار گرفته در گروه نسبت به ضرایب فشار در ساختمان منفرد است، محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. ضرایب تداخل، نشان می‌دهند که حداکثر و حداقل ضرایب فشار در ساختمان قرار گرفته در گروه نسبت به ساختمان منفرد در این تحقیق، به بیش از ۳ برابر رسیده است.

کلمات کلیدی: اثر تداخل؛ بارگذاری باد؛ ضریب فشار؛ ساختمان‌های بلند؛ CFD.

Numerical Simulation of Wind Interference Effects Around a Group of Tall Buildings

M.Hejazi^{1*}, M. A. Taghizadeh² and E. Afshari³¹Assoc. Prof., Department of Civil. Eng., Faculty of Eng., Univ. of Isfahan, Isfahan, Iran²M.Sc., Department of Civil. Eng., Faculty of Eng., Univ. of Isfahan, Isfahan, Iran³ Assist. Prof., Department of Mech. Eng., Faculty of Eng., Univ. of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

Unlike a single building, determining the performance of two or more buildings next to each other under the effect of wind is very complex due to the inference effect. One of the latest efforts in investigating the interference effect is determining the interference factors and pressure coefficients of a group of tall buildings using Computational Fluid Dynamics (CFD). In this paper, the pressure coefficients and interference factors of a group of tall buildings with different heights placed at different distances due to various wind directions have been studied. The effect of buildings distances and direction of wind load on two groups of four tall buildings on the average pressure coefficients of the buildings in the group has been investigated. For the selected distances, in over 50% of cases by increasing the distance between the tall buildings the average pressure coefficients on buildings increase. In order to show the wind interference effects, the interference factors, i.e. the ratio of pressure coefficients on a building in a group of tall buildings to those of a single building, are calculated and compared. Interference factors show that the maximum and minimum pressure coefficients on a building in a group of tall buildings are up to three times of those of a single building.

Keywords: Interference Factor; Wind Load; Pressure Coefficient; Tall Buildings; CFD.

۱- مقدمه

بارهای باد روی ساختمان‌ها، بیشتر با استفاده از آیین‌نامه‌ها و استانداردها تخمین زده می‌شوند. این آیین‌نامه‌ها، معمولاً بر پایه آزمایش‌های انجام شده روی ساختمان‌های تک استوار هستند که در تونل‌های باد انجام می‌شود، اما در واقع بارهای باد وارده بر ساختمان‌ها به شدت تحت تأثیر محیط اطراف هستند و اثبات شده است که میزان تأثیر بارهای وارده بر ساختمان‌های هم‌جوار با ساختمان‌های دیگر، با بارهای وارده بر ساختمان تک موجود، متفاوت است. وجود ساختمان‌های هم‌جوار، سبب به وجود آمدن اثراتی در جریان باد می‌شود که این مسأله، به چیدمان و هندسه ساختمان‌ها وابسته است؛ در نتیجه وجود ساختمان‌های بالادست و وزش‌های متفاوت باد بر مجموعه‌ی ساختمان‌ها، اثراتی قابل توجه روی ساختمان‌ها و جریان‌های باد به وجود می‌آورد. از این تأثیرات که باید مورد ارزیابی طراحان سازه قرار گیرد، به عنوان اثرات تداخل^۱ نام برده می‌شود. آنچه که در به دست آوردن اثرات تداخل مهم است، به دست آوردن ضرایب فشار در ساختمان‌های منفرد و ساختمان‌های گروهی است.

در دهه‌های گذشته، اثرات تداخل روی بارهای باد به وجود آمده در گروهی از ساختمان‌ها (شامل حداقل دو ساختمان) گزارش شده است [۱]. اکثر گزارش‌های موجود در این زمینه، بر اساس آزمایش‌های انجام شده در تونل باد است که در این آزمایش‌ها، مطالعه دو ساختمان با پلان یکسان و مکان‌های قرارگیری متفاوت به چشم می‌خورد؛ هرچند در سال‌های اخیر سعی شده که پلان‌های متفاوت نیز، مورد بررسی قرار گیرد. در این مطالعات، معمولاً مدل‌های صلب ساختمان را در درون تونل باد برای اندازه‌گیری متوسط نیروهای باد و ضرایب فشار، مدل می‌کنند [۲-۵].

مطالعات نشان می‌دهند که توزیع فشار روی دیواره‌های ساختمان به عوامل متعددی بستگی دارد [۶-۸]؛ از جمله مهم‌ترین این عوامل، می‌توان به شرایط محیطی (زبری زمین، ساختمان‌های اطراف و...) [۹]، هندسه ساختمان‌ها [۱۰] و جهت بار باد [۱۱] اشاره کرد. ضرایب فشار روی ساختمان‌ها از ۳ طریق به دست می‌آیند؛ اولین روش اندازه‌گیری این

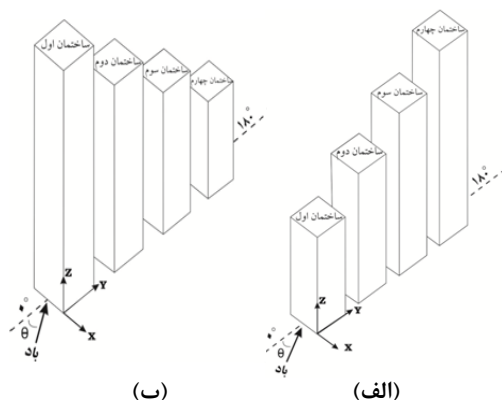
ضرایب، در محل است که بسیار محدود و پر هزینه است [۱۱] و [۱۲]. روش دوم، بررسی ضرایب فشار در تونل باد است که نسبت به روش اول کم هزینه‌تر است؛ اما محدودیت‌هایی همچون، ابعاد مدل‌ها در این روش به چشم می‌خورد [۱۳-۱۸]. سومین روش، استفاده از دینامیک سیال محاسباتی است. این روش در عین حال که در مقایسه با دو روش قبلی بسیار کم هزینه است، محدودیت‌های روش‌های قبلی را تا حد زیادی از بین برده است. علاوه بر این، سرعت به دست آوردن اطلاعات و بحث و بررسی پیرامون آن‌ها را به شدت افزایش داده است [۸ و ۱۹]. در حال حاضر، از CFD در بسیاری از مدل‌سازی جریان‌های لایه مرزی، مدل‌سازی باد اطراف ساختمان‌ها و بررسی الگوی جریان در محیط‌های شهری استفاده می‌شود [۲۰-۲۵].

با توجه به پیچیده بودن جریان باد و رفتار آن با ساختمان، استفاده از یک محیط سه بعدی، نتایجی دقیق را ارائه خواهد کرد که این نکته در نتایج مدل‌سازی‌ها قابل مشاهده است. در سال ۲۰۰۲، Hunter و همکاران [۲۶]، از LES برای شبیه‌سازی جریان در اطراف چندین مانع ساده استفاده کردند. در سال ۲۰۰۳، Chang و Meroney [۲۷] از CFD برای بررسی و توزیع جریان در خیابان‌های باریک موجود در شهرها و مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی بهره جستند. آن‌ها روش RANS^۲ و نرم‌افزار Fluent را برای شبیه‌سازی جریان به کار بردند. در سال ۲۰۱۲، Montazeri و Blocken [۲۸] برای شبیه‌سازی جریان باد روی یک ساختمان در دو حالت ساده و بالکن‌دار از CFD استفاده کردند و اختلاف ۱۰٪ تا ۱۲٪ را بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج نرم‌افزاری ملاحظه کردند. در این شبیه‌سازی که مدل‌های مختلف حل جریان مغشوش در آن به کار برده شده است، مدل استاندارد k-ε به عنوان بهترین مدل حل جریان آشفته با کمترین اختلاف نسبت به نتایج آزمایشگاهی شناخته شده است.

در مراجع و کارهایی که تاکنون روی مدل‌سازی عددی جریان باد انجام شده است، حداکثر سه ساختمان با ارتفاع متفاوت و یا چندین ساختمان با ارتفاع یکسان دیده می‌شود که برای زاویه بارگذاری صفر درجه، مدل‌سازی عددی انجام

^۱ Interference Factor (IF)^۲ Reynolds Average Navier Stokes

دامنه حل از ۳ m تا ۹/۶۲ m در جهت Y و از ۳ m تا m در جهت X گسترانیده شده است. دامنه‌ی حل در جهت Y نیز، به اندازه‌ی ۱۵ H گسترده شده است. دلیل این امر، شبیه‌سازی جریان در زاویه‌های مایل و 90° است [۲۸]. منظور از H، بیشینه ارتفاع ساختمان موجود در دو گروه یعنی، ۶۰۰ mm است.



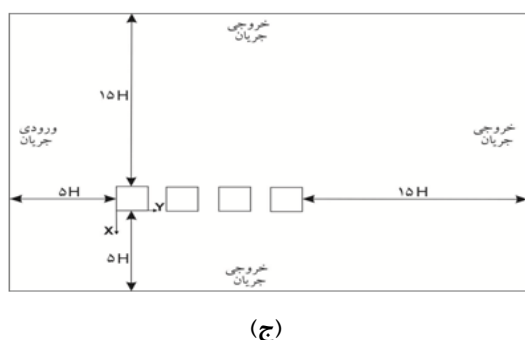
شده است؛ همچنین، مدل‌سازی عددی معمولاً روی متغیرهای محدودی انجام شده و به پارامترهایی از قبیل، ضریب تداخل و تاثیر ساختمان‌ها بر یکدیگر در زوایای مختلف باد و ارتفاع متفاوت ساختمان‌ها که سبب پیچیدگی‌های بیشتر در حل عددی می‌شود، پرداخته نشده است. در این مقاله، به تحقیق راجع به ضرایب فشار روی ساختمان‌های دو گروه از ساختمان‌های بلند پرداخته شده است که دارای ارتفاعات متفاوت می‌باشند. این ساختمان‌ها در فواصل مختلف، نسبت به هم قرار گرفته‌اند. در هر گروه، رفتار ساختمان‌ها در مقابل ۳ زاویه بارگذاری باد (0° ، 45° و 90°)، بررسی شده است؛ سپس به بررسی ضرایب تداخل (ضریب فشار روی ساختمان قرار گرفته در گروه نسبت به ساختمان منفرد) و اثرات نامطلوب قرارگیری ساختمان‌ها در مجاورت هم پرداخته شده است.

۲- مدل‌سازی ریاضی

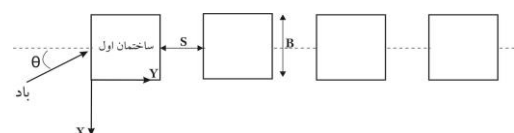
۲-۱- دامنه حل

برای بررسی ضرایب فشار و اثرات تداخل، ۴ ساختمان بلند با مقیاس ۱:۴۰۰ مدل شده است. این ساختمان‌ها که ارتفاعات متفاوتی دارند، دارای پلان مربعی شکل یکسان $10^{-4} \times 64 \text{ m}^2$ هستند. جهت بررسی نقش ارتفاع ساختمان‌های موجود و نحوه چیدمان آنها در مطالعه اثرات تداخل بار باد، ساختمان‌ها در دو گروه مجزای A و B همانند شکل ۱-الف) و ۱-ب) مدل شده‌اند. در گروه A، ساختمان‌ها در ارتفاع به صورت پلکانی و صعودی افزایش می‌یابند؛ در گروه B، ارتفاع ساختمان‌ها به صورت پلکانی و کاهشی است و در هر گروه، ساختمان‌های بلند در یک ردیف و پشت سرهم قرار گرفته‌اند. نسبت از $\frac{S}{B} = 0.5$ تا $\frac{S}{B} = 1/25$ متفاوت است (0.5 ، 1 ، 0.75 ، $1/25$) که S فاصله بین ساختمان‌ها و B عرض ساختمان‌های بلند است (شکل ۲).

کم‌ترین ارتفاع ساختمان قرار گرفته در هر یک از گروه‌ها، ۳۰۰ mm و بیش‌ترین آن ۶۰۰ mm است (۳۰۰ mm، ۴۰۰ mm، ۵۰۰ mm و ۶۰۰ mm). نمونه اصلی ساختمان‌های مدل شده دارای پلان 10.24 m^2 بوده، ارتفاع آن‌ها ۱۲۰ m تا ۲۴۰ m است. جهت مدل کردن هر یک از دو گروه، باید ابعاد دامنه حل و تعداد شبکه و نوع شبکه مشخص شود. به پیروی از اعتبارسنجی، دامنه حل همانند شکل ۱-ج) است.



شکل ۱- نحوه چیدمان ساختمان‌های بلند در دو گروه: (الف) چیدمان سه بعدی ساختمان‌ها در گروه A، (ب) چیدمان سه بعدی ساختمان‌ها در گروه B، (ج) پلان قرارگیری ساختمان‌ها درون دامنه‌ی حل و شرایط مرزی برای زاویه 0° بار باد



شکل ۲- پلان چیدمان ساختمان‌های بلند در دو گروه A و B

۲-۲- معادلات حاکم

معادلات مورد استفاده جهت حل ریاضی جریان باد بر پایه جریان آشفته، پایا و تراکم ناپذیر است. این معادلات، از دو معادله کلی پیوستگی و مومنوم جریان‌های آشفته تبعیت می‌کنند.

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

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = B_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j'} \right] \quad (2)$$

در کنار معادلات جریان آشفته از مدل‌های آشفته برای حل دستگاه معادلات استفاده می‌شود. در این مقاله، به تناسب هدف شبیه‌سازی جریان در اطراف ساختمان‌های بلند از مدل $K-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است [۲۹]. در مدل $K-\varepsilon$ میدان آشفته برحسب دو متغیر: انرژی جنبشی جریان آشفته^۱ و نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته^۲ بیان می‌شود. مدل $K-\varepsilon$ استاندارد، معادلات انتقال (۳) و (۴) را که برای K و ε استفاده می‌کند.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho K u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + G_K + G_b \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \quad (4)$$

$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} (G_K + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K}$
معادلات (۳) و (۴) شامل، پنج ثابت $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، $C_{3\varepsilon}$ ، σ_K ، σ_ε ، C_μ هستند. مقادیر این ثابت‌ها به شرح معادله‌های (۵) تعریف می‌شوند [۲۹].

$$C_\mu = 0.09, \sigma_K = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.30 \quad (5)$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92$$

۲-۳- شرایط مرزی

یکی از مسائل مهم در شبیه‌سازی‌ها، یافتن شرایط مرزی مناسب برای دامنه حل است. در مطالعات شبیه‌سازی، جریان باد اطراف ساختمان‌ها به شرایط مرزی متفاوتی برای حل عددی اشاره شده است؛ در این مقاله، به بهترین شرایط مرزی برای حل این‌گونه از مسائل پرداخته شده است [۲۸ و ۲۹].

در مرز ورودی دامنه، از شرط مرزی سرعت ورودی مشخص استفاده شده است. پروفیل سرعت وارده در این مرز، عمود بر مرز ورودی است و از معادله (۶) تبعیت می‌کند [۲۹].

$$\frac{\bar{u}(Z)}{\bar{u}(H)} = \left(\frac{Z}{H} \right)^{0.16} \quad (6)$$

در مرز ورودی، مقدار k (انرژی جنبشی آشفته) مقدار ثابت $0.34 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ و مقدار ε ، $0.9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ در نظر گرفته می‌شود. در مرز خروجی جریان، شرایط معادله (۷) اعمال می‌شود.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \bar{w} = 0 \quad (7)$$

این شرایط که نشانگر صفر بودن شارهای سرعت، شارهای انرژی جنبشی آشفته و ... است، مطابقت بسیار زیادی با مرز خروجی از نوع Out Flow در نرم‌افزار فلوئنت دارد.

در سقف دامنه یا به اصطلاح مرز خروجی جریان در بالای دامنه حل شرایط معادله (۸) حاکم است.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \bar{w} = 0 \quad (8)$$

این شرایط همانند شرایط مرز خروجی جریان بوده، برای این مرز نیز شرط Out Flow انتخاب شده است. باید توجه داشت که تنها تفاوت در این مرز با مرز خروجی جریان، نرخ جریان خروجی بوده که برای مرز خروجی نرخ 0.10 و برای مرز خروجی بالای دامنه (سقف دامنه)، مقدار 0.10 انتخاب شده است؛ در نهایت برای تمامی مرزهای جامد در نرم‌افزار (زمین، دیوارهای ساختمان، سقف ساختمان)، از شرط مرزی استاندارد دیوار استفاده شده است. برای شبیه‌سازی سطح زمین در نرم‌افزار از رابطه (۹) استفاده می‌شود [۳۰].

$$k_s = \frac{9.93 Z_0}{c_s} \quad (9)$$

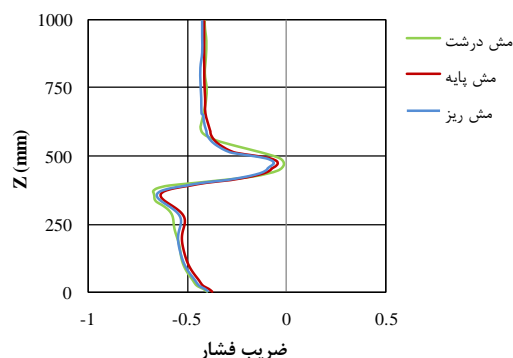
که Z_0 طول زبری آیرودینامیکی، k_s ارتفاع زبری و c_s ثابت زبری است. در این مدل‌سازی، از $k_s = 0.01$ و $c_s = 0.7$ استفاده شده است؛ این در حالی است که برای مدل‌سازی دیوارها و سقف ساختمان از $k_s = 0$ و $c_s = 0.5$ استفاده گردیده است. شرایط مرزی برای زاویه 0° باد مطابق شکل ۱-ج) است.

۲-۴- حل عددی

در حل عددی و در قسمت کنترل‌های حل از الگوریتم SIMPLE برای تصحیح فشار استفاده شده است. جهت حل معادلات درون شبکه، از درون‌یابی مرتبه اول برای معادلات

¹ Turbulent kinetic energy

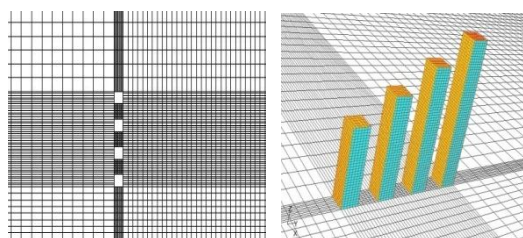
² Viscous dissipation rate of turbulent kinetic energy



شکل ۳- نمودار ضرب فشار در موقعیت قرارگیری $(X, Y) = (-0.04, 0.31)$ برای سه مش متفاوت ریز، پایه و درشت

جدول ۱- تعداد گره‌های شبکه در سه جهت مختصاتی (Z, Y, X) برای چهار فاصله متفاوت بین ساختمان‌ها

فاصله‌ی بین ساختمان‌ها (m)	تعداد گره در سه جهت مختصاتی		
	X	Y	Z
$S = 0.04$	۱۸۰	۲۰۳	۱۳۰
$S = 0.06$	۱۸۰	۲۰۶	۱۳۰
$S = 0.08$	۱۸۰	۲۱۲	۱۳۰
$S = 0.1$	۱۸۰	۲۱۵	۱۳۰



(ب)

(الف)

شکل ۴- نوع شبکه اطراف ساختمان‌ها: (الف) نمای سه بعدی نحوه شبکه‌بندی ساختمان‌های درون دامنه‌ی حل، (ب) پلان شبکه‌بندی ساختمان‌ها در درون دامنه‌ی حل

۳- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی براساس کار آزمایشگاهی Brown و همکاران [۳۱] در تونل باد با مقطع تست $18/3$ در $3/7$ متر و ارتفاع $2/1$ متر و همچنین مطالعه عددی Lien و Yee [۲۹] روی ۷ ساختمان دارای طول، ارتفاع و عرض یکسان 0.15 m انجام شده است. این ساختمان‌ها در یک ردیف و با

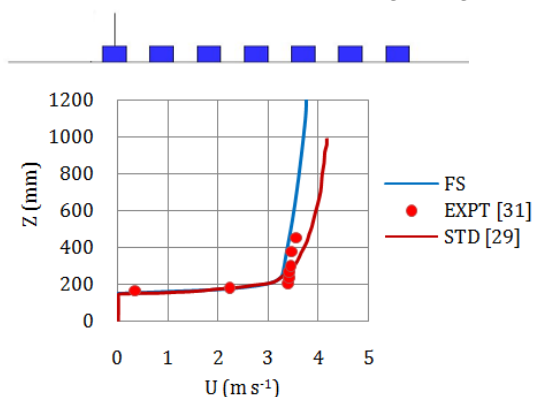
مومنوم، انرژی جنبشی آشفته و نرخ اضمحلال آشفتگی استفاده شده است. کنترل باقیمانده‌های مطلق سلول‌های دامنه حل، به عنوان پارامتر مورد قبول همگرایی حل است؛ به این منظور، حل زمانی همگرا می‌شود که باقیمانده‌های نسبی سلولی برای پیوستگی، تمامی مؤلفه‌های سرعت، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آشفتگی در مرز 0.1% و کمتر قرار گیرند که در این صورت، حل عددی همگرا شده است.

شبکه دامنه حل، با سازمان و مستطیل شکل است که این نوع شبکه، از دقیق‌ترین نوع شبکه جهت شبیه‌سازی جریان اطراف ساختمان‌ها است. شبکه اطراف ساختمان‌ها ریزتر و شبکه خارج از محوطه قرارگیری ساختمان‌ها درشت‌تر است در نزدیکی دیواره‌های ساختمان، فاصله نزدیک‌ترین مرکز شبکه محاسباتی تا دیوار، برابر 0.05 متر در نظر گرفته شده است.

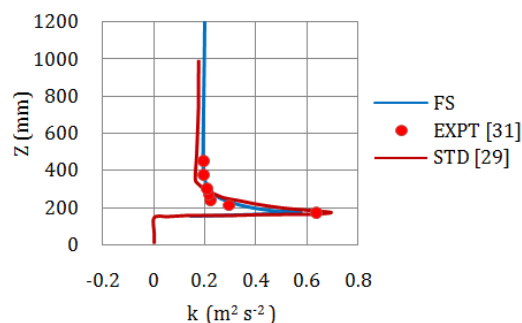
وابستگی حل عددی شبیه‌سازی شده به شبکه، توسط شبکه‌های درشت، پایه و ریز بررسی شده است. تعداد گره‌های شبکه ریز، در سه جهت مختصاتی X, Y, Z متناظر $185, 225$ و 135 بوده که این تعداد گره، 5608575 المان در سه بعد ایجاد کرده است. شبکه درشت، از تعداد کمتری گره در هر سه جهت برخوردار است. تعداد گره‌های این شبکه در سه جهت X, Y, Z متناظر $150, 190$ و 120 است که این تعداد گره، 3589200 المان ایجاد کرده است. شبکه پایه که شبکه نهایی برای آنالیزها بوده است و از لحاظ تعداد گره، بین شبکه ریز و درشت قرار گرفته است، در جهت X, Y و Z دارای $180, 215$ و 130 عدد گره بوده که این تعداد گره، 5020200 المان ایجاد کرده است. شکل ۳، نتایج عدم وابستگی حل عددی به شبکه با توجه به انحراف ناچیز جواب‌های حاصل از مش درشت و ریز نسبت به مش پایه، برای نمودار ضرب فشار در در زاویه 0° باد و در موقعیتی در دامنه حل نشان می‌دهد که مختصات آن $(X, Y) = (-0.04, 0.31)$ (فاصله‌ی بین ساختمان دوم و سوم) است.

در جدول ۱ به تعداد گره‌ها برای چهار فاصله متفاوت بین ساختمان‌ها (بر اساس تعداد المان‌های شبکه پایه) اشاره شده است. در شکل ۴، نحوه ایجاد شبکه اطراف ساختمان‌ها نشان داده شده است.

اندازه‌گیری پروفیل مورد نظر، با رسم شماتیک شکل ساختمان‌ها نشان داده شده است.



شکل ۵- پروفیل‌های متوسط سرعت باد در جهت X برای موقعیت اندازه‌گیری $X=75$ mm



شکل ۶- پروفیل‌های انرژی جنبشی آشفته در جهت X برای موقعیت اندازه‌گیری $X=75$ mm

در موقعیت $X=75$ mm که روی اولین ساختمان قرار گرفته در گروه است، تطابق بسیار خوبی بین نتایج FS و EXPT دیده می‌شود. قابل توجه است که تطبیق نتایج در شبیه‌سازی این مقاله در مقایسه با شبیه‌سازی STD بهتر بوده، به انحراف حداکثری ۵٪ رسیده است؛ این در حالی است که انحراف نتایج در شبیه‌سازی STD به حداکثر ۱۶٪ می‌رسد.

در موقعیت $X=1725$ mm، پروفیل متوسط سرعت باد در شبیه‌سازی FS بسیار نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی است؛ این در حالی است که انرژی جنبشی آشفته، انحراف قابل توجه‌تری نسبت به پروفیل متوسط سرعت باد در بین ساختمان‌ها دارد. در واقع اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی برای مولفه‌های سرعت (مانند U) پایین بوده، برای مقدار k

فاصله یکسان 0.15 m در کنار یکدیگر واقع شده‌اند. ارتفاع همه ساختمان‌ها، مساوی و مدل‌سازی ساختمان‌ها به صورت سه بعدی است. زبری زمین در تونل باد 0.001 متر بوده، بر اساس این مشخصات، مقدار سرعت اصطکاکی تقریباً 0.24 متر بر ثانیه است. برای اعتبار سنجی با روش عددی نیز، شبیه‌سازی سه بعدی تعداد ۷ ساختمان در دامنه حل $0 \leq \frac{X}{H} \leq 28$ (به صورتی که دیواره اولین ساختمانی که در زاویه صفر درجه رو به باد قرار گرفته است در $\frac{X}{H} = 0$ قرار دارد) انجام شده است.

در حل عددی، پروفیل سرعت وارده در ورودی جریان، عمود بر مرز ورودی است. به عبارتی دیگر، زاویه باد صفر درجه است. در مرز ورودی دامنه، از شرط مرزی سرعت مشخص استفاده شده است؛ اما به این علت که در شرایط آزمایشگاهی داده‌های مربوطه به نقاط با ارتفاع بیشتر از $Z=3H$ موجود نیست، پروفیل سرعت وارده در این نقاط، از قانون توانی پیروی می‌کند. پروفیل k یا همان انرژی جنبشی آشفته در نقاط با ارتفاع بالای $3H$ ثابت فرض شده است.

در مرز خروجی جریان، شرایطی که نشانگر صفر بودن شارهای سرعت، شارهای انرژی جنبشی آشفته و ... است، برقرار است. در سقف دامنه یا به اصطلاح مرز خروجی، جریان در بالای دامنه‌ی حل شرایط مطابق شرایط مرز خروجی جریان بوده است. باید توجه داشت که تنها تفاوت در این مرز با مرز خروجی جریان، نرخ جریان خروجی بوده که برای مرز خروجی نرخ ۱۰٪ و برای مرز خروجی بالای دامنه (سقف دامنه) مقدار ۱۰٪ انتخاب شده است. در نهایت، برای تمامی مرزهای جامد (زمین، دیوارهای ساختمان، سقف ساختمان) از عملکردهای استاندارد دیوار استفاده شده است. داخل دامنه حل از سیال هوا با چگالی $1.225 \frac{kg}{m^3}$ استفاده شده است. گرانیوی این سیال، $10^{-5} \frac{kg}{m.s}$ است.

در شکل‌های ۵ تا ۸، پروفیل‌های متوسط سرعت باد و انرژی جنبشی آشفته در جهت X و در دو موقعیت، نزدیک به ورودی جریان ($X=75$ mm) و نزدیک به خروجی جریان ($X=1725$ mm) ارائه شده است؛ در واقع در این شکل‌ها، مقایسه‌ای بین نتایج آزمایشگاهی [۳۱] (EXPT)، شبیه‌سازی عددی [۲۹] (STD) و شبیه‌سازی عددی در این مقاله (FS)، انجام گرفته است. در بالای هر یک از پروفیل‌ها موقعیت

اعتبارسنجی در ۳ موقعیت متفاوت دیگر در مجموعه ۷ ساختمان صورت گرفته است که جهت اطلاعات بیشتر، می‌توان به مرجع [۳۲] رجوع کرد.

۴- نتایج

۴-۱- تأثیر فاصله بین ساختمان‌ها و زاویه بارگذاری باد

بر متوسط ضرایب فشار در گروه A ساختمان‌ها

ضریب فشار (C_p) روی وجوه ساختمان‌ها به صورت معادله (۱۰) تعریف می‌شود.

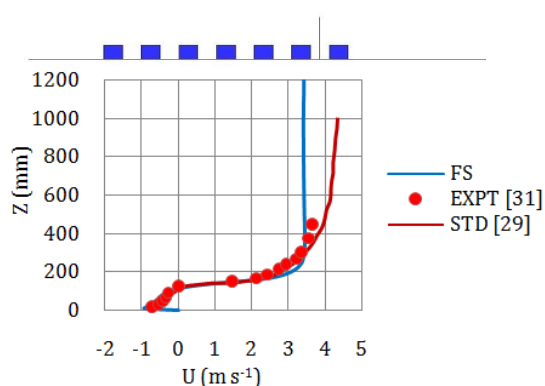
$$U_{ref}^2 / (0.5 \rho) p - p_0 (= C_p) \quad (10)$$

p فشار موضعی، p_0 فشار استاتیکی مرجع که در این تحقیق 101325 Pa است. این فشار، همان فشار اعمال شده مرز ورودی است. چگالی هوا در دامنه حل $1/225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ است. مقدار سرعت مرجع (U_{ref}) برای هر سه جهت بارگذاری باد، متوسط سرعت ورودی باد در مرز ورودی جریان در نظر گرفته شده که مقدار آن $4/47 \text{ m s}^{-1}$ است.

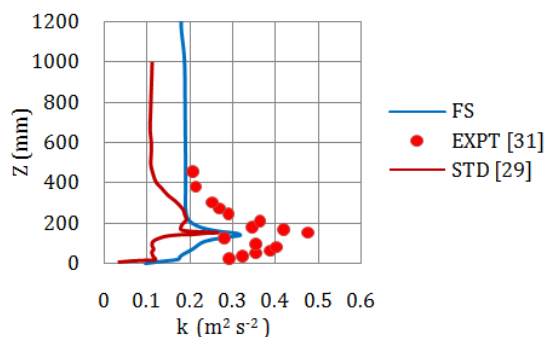
در مقالاتی که مستقیم روی اثر تداخل صحبت شده است، متوسط سرعت بار باد در محدوده ۳ تا ۱۰ متر بر ثانیه است [۳۳]. در این مقالات که همه آزمایشات تونل باد می‌باشند، مقیاس‌های متفاوتی دیده می‌شود که در بیشتر آنها مقیاس ۱ به ۴۰۰ (مشابه کار حاضر) است. در تحقیق حاضر نیز، به تناسب کار اعتبارسنجی، مقدار متوسط سرعت در نوک کوچکترین ساختمان ($H=300 \text{ mm}$) $\bar{u}_H = 3/35 \text{ m s}^{-1}$ است. باید توجه داشت که سرعت از قانون توانی تبعیت کرده، در ارتفاعات متفاوت در دامنه حل، مقدار متفاوتی دارد. عدد رینولدز بر اساس سرعت مرجع \bar{u}_H در ارتفاع کوچکترین ساختمان معادل ۶۸۰۰۰ است.

از پارامترهای تأثیرگذار بر اثرات تداخل ساختمان‌های بلند موجود در یک گروه، می‌توان به فاصله قرارگیری ساختمان‌ها نسبت به یکدیگر اشاره کرد. ذکر این نکته الزامی است که در این بررسی‌ها، به علامت \bar{C}_p توجه نشده و آنچه اهمیت داشته مقدار آن بوده است؛ زیرا علامت این ضریب صرفاً به معنای نوع نیرو (فشار یا مکش) بوده و در بررسی‌ها، آنچه که اهمیت داشته است، افزایش یا کاهش مقدار آن بوده است.

این مقدار بیشتر است. یکی از دلایل این امر، تفاوت در نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته در بین ساختمان‌ها به علت تفاوت در اندازه گردابه‌های به وجود آمده در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی است. همچنین این اختلاف، مربوط به ضعف اساسی رابطه بین تنش-کرنش خطی (بوزینسک) و حذف هرگونه تأثیر ادی-ویسکوزیته ناهمگن^۱ در مدل $k-\epsilon$ است.



شکل ۷- پروفیل‌های متوسط سرعت باد در جهت X برای موقعیت اندازه‌گیری $X=1725 \text{ mm}$

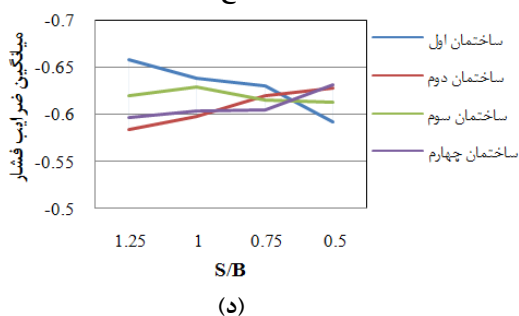
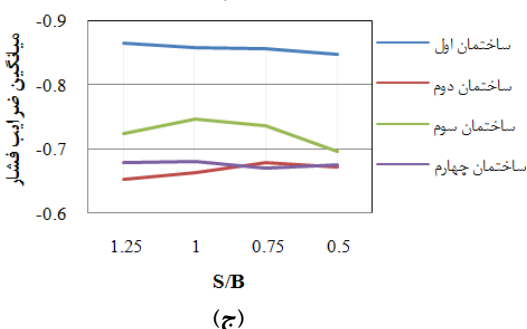
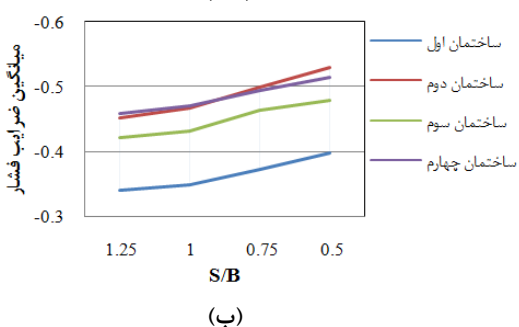
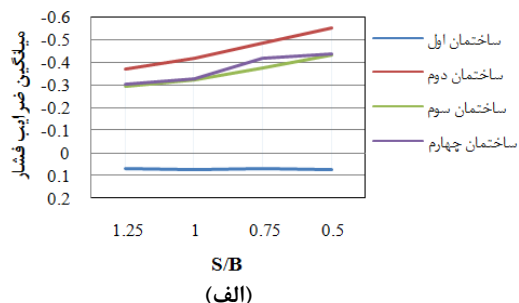


شکل ۸- پروفیل‌های انرژی جنبشی آشفته در جهت X برای موقعیت اندازه‌گیری $X=1725 \text{ mm}$

به این دلیل که شبیه‌سازی جریان برای مقیاس واقعی ساختارهای مختلف ساختمان‌ها است و جزئیات نزدیک دیوار هدف اصلی نبوده است، شبیه‌سازی جریان‌های آشفته اطراف ساختمان‌های بلند، حتی با وجود این اختلافات، مناسب و با دقت قابل قبول ارزیابی شده است [۲۹].

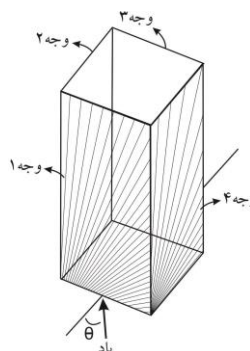
¹Anisotropic eddy-viscosity effects

در اکثر ساختمان‌های گروه با کاهش فاصله قرارگیری، \bar{C}_p کمتری را روی خود احساس می‌کنند.



شکل ۱۰- میانگین ضرایب فشار بر روی وجوه ساختمان‌های گروه A و جهت باد 0° : (الف) وجه ۱، (ب) وجه ۲، (ج) وجه ۳، (د) وجه ۴

این بدین معنی است که این ۳ وجه ساختمان با کاهش فاصله (از ۱/۲۵ به ۰/۵)، متحمل کاهش حداقل ۹٪ و حداکثر

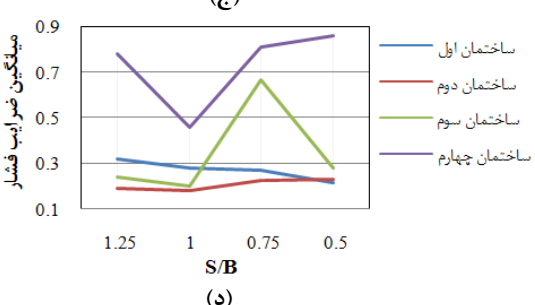
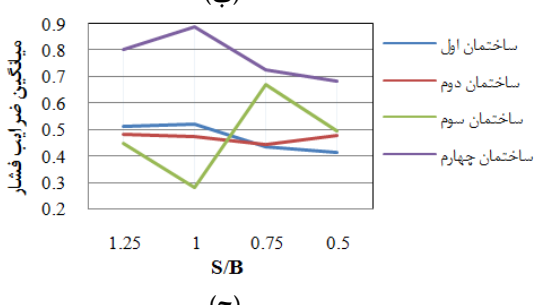
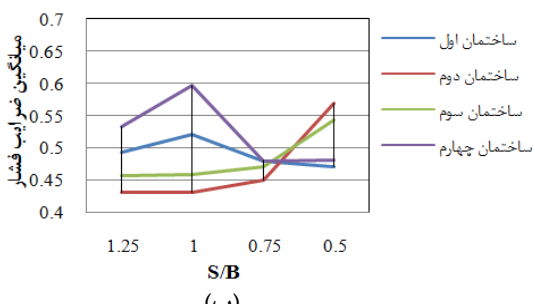
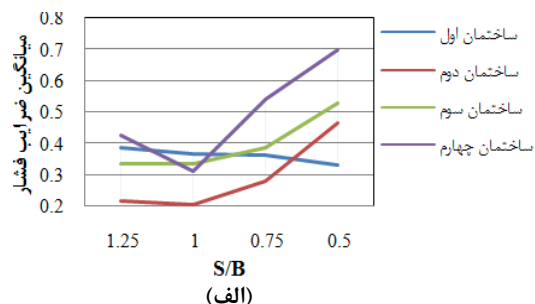


شکل ۹- نحوه‌ی نام‌گذاری وجه‌های هر ساختمان با توجه به جهت بار باد

در شهرسازی نوین فاصله قرارگیری بین ساختمان‌های بلند در کمترین حالت ممکن ۱۶ m گزارش شده است؛ بنابراین در این تحقیق سعی شده تا با در نظر گرفتن فواصلی منطبق با معیارهای شهرسازی نوین، اثرات تداخل مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور با محاسبه \bar{C}_p روی وجوه ساختمان‌های قرارگرفته در گروه (شکل ۹)، اثرات فاصله و زاویه وزش مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

شکل ۱۰، \bar{C}_p را برای زاویه‌ی 0° باد روی هر وجه ساختمان‌های گروه A نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در زاویه 0° بار باد، هرچه ساختمان‌ها به هم نزدیک می‌شوند، وجوه ۱ و ۲ ساختمان‌های قرارگرفته در گروه، متحمل ضرایب فشار بیشتری می‌شوند؛ این در حالی است که وجوه ۳ و ۴ ساختمان‌های قرارگرفته در گروه رفتار مشخصی از خود نشان نمی‌دهند. وجوه ۳ و ۴ ساختمان‌های اول و سوم در رفتاری متناقض با سایر ساختمان‌ها در این زاویه بارگذاری باد با کاهش فاصله، \bar{C}_p کمتری را روی خود احساس می‌کنند. یکی از نکات قابل توجه در این زاویه بارگذاری، \bar{C}_p روی وجه ۳ (وجه پشت به باد) ساختمان‌های قرارگرفته در گروه می‌باشند که در بیشتر ساختمان‌ها با کاهش فاصله بین ساختمان‌ها، این ضرایب کاهش نسبی می‌یابند. وجه ۱ ساختمان اول گروه، بدون توجه به فاصله قرارگیری سایر ساختمان‌ها، همواره \bar{C}_p ثابتی را احساس می‌کند. در این وجه به علت شرایط یکسان الگوی جریان برای تمامی حالات قرارگیری در زاویه 0° ، همواره \bar{C}_p ثابت می‌ماند.

شکل ۱۱، نمودارهای میانگین ضرایب فشار را برای زاویه‌ی 45° باد روی هر وجه ساختمان‌های گروه A نشان می‌دهد. در این زاویه مایل بارگذاری بار باد، وجوه ۲، ۳ و ۴

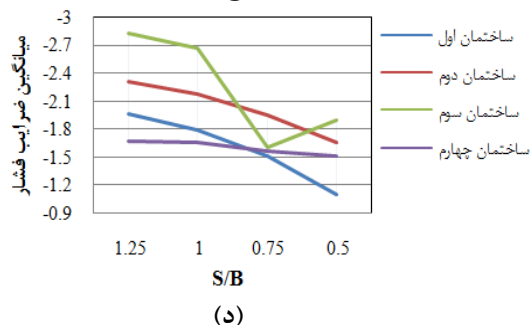
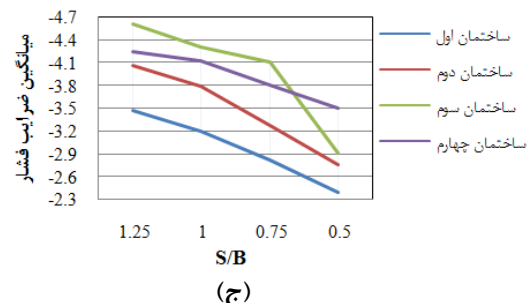
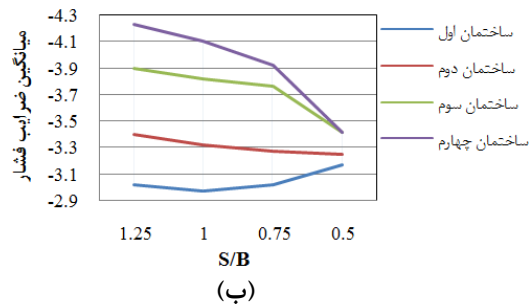
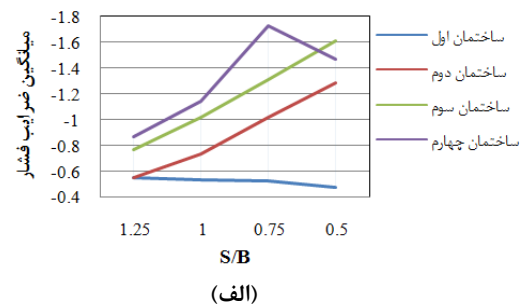


شکل ۱۲- میانگین ضرایب فشار بر روی وجوه ساختمان‌های گروه A و جهت باد ۹۰°: (الف) وجه ۱، (ب) وجه ۲، (ج) وجه ۳، (د) وجه ۴

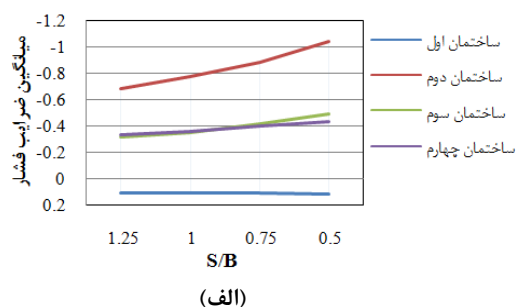
۴-۲- تأثیر فاصله بین ساختمان‌ها و زاویه بارگذاری باد بر متوسط ضرایب فشار در گروه B ساختمان‌ها

شکل ۱۲، نمودارهای میانگین ضرایب فشار را برای زاویه ۹۰° باد روی هر وجه ساختمان‌های گروه A نشان می‌دهد. وجه‌هایی که نقش دالان‌های هوا را در این زاویه

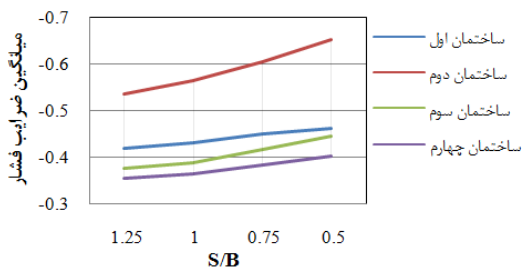
۴۵٪ متوسط ضرایب فشار روی خود می‌شوند؛ این در حالی است که \bar{C}_p روی وجه ۱ تمامی ساختمان‌های گروه به جز ساختمان اول با کاهش فاصله افزایش می‌یابد که این افزایش در \bar{C}_p حداکثر ۱۳۲٪ (روی ساختمان دوم) و حداقل ۷۰٪ (روی ساختمان چهارم) نسبت به فواصل بزرگ‌تر است.



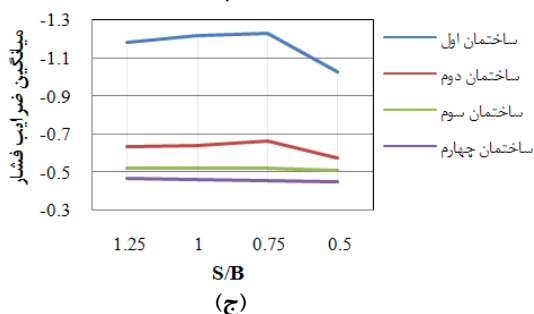
شکل ۱۱- میانگین ضرایب فشار بر روی وجوه ساختمان‌های گروه A و جهت باد ۴۵°: (الف) وجه ۱، (ب) وجه ۲، (ج) وجه ۳، (د) وجه ۴



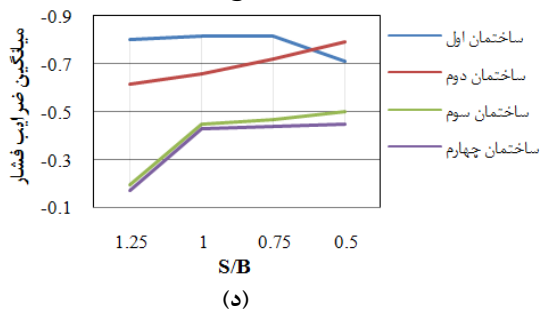
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۳- میانگین ضرایب فشار بر روی وجوه ساختمان‌های گروه B و جهت باد 0° : (الف) وجه ۱، (ب) وجه ۲، (ج) وجه ۳، (د) وجه ۴

\bar{C}_p بیشتری را روی خود احساس می‌کنند. این افزایش \bar{C}_p که حداکثر ۵۲٪ و حداقل ۱۲٪ است، به علت قرار گرفتن سایر ساختمان‌ها در گردابه‌های ناشی از جریان آشفته به وجود آمده در پشت اولین ساختمان گروه و سایر ساختمان‌ها است. وجه ۳ ساختمان‌ها که در این زاویه بارگذاری، وجه پشت به باد محسوب می‌شود، رفتار متفاوتی با سایر وجوه

بازی می‌کنند (وجه ۱ ساختمان‌های دوم، سوم و چهارم، وجه ۳ ساختمان‌های اول، دوم و سوم) با کاهش فاصله قرارگیری ساختمان‌های بلند، محتمل \bar{C}_p بیشتری می‌گردند. در این گروه از ساختمان‌ها که دالان‌های عبوری هوا در زاویه 90° بار باد در ارتفاع افزایش می‌یابند (متناسب با ارتفاع ساختمان‌های گروه)، اثرات تداخل بار باد در فواصل کوچک-تر، مشهودتر است.

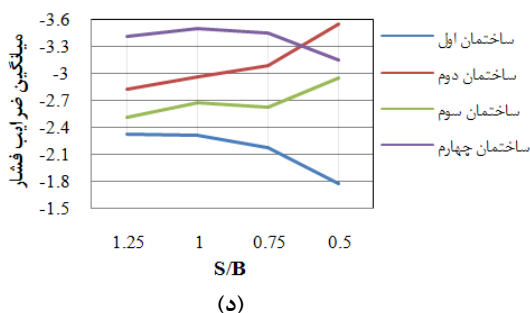
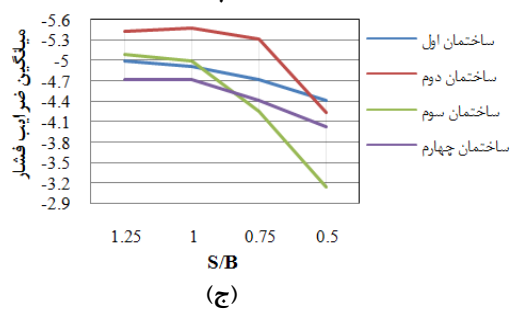
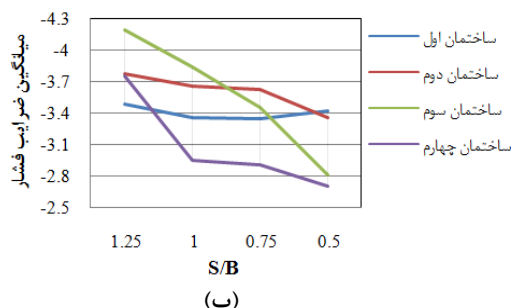
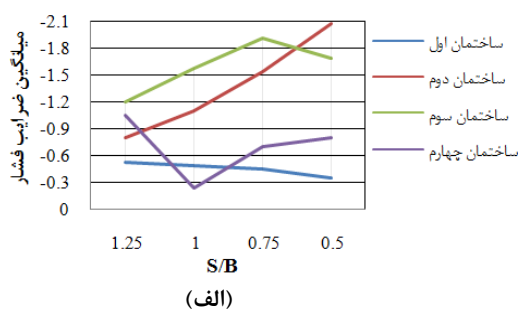
در گروه A ساختمان‌ها برای تمامی حالات (فواصل متفاوت و زوایای متفاوت بارگذاری بار باد) در ۴۲٪ حالات، S/B معادل $1/25$ به عنوان بحرانی‌ترین فاصله قرارگیری از لحاظ دارا بودن بیش‌ترین مقادیر \bar{C}_p شناخته می‌شود. S/B معادل $0/5$ در ۴۰٪ حالات، S/B معادل $0/75$ در ۶٪ و S/B معادل ۱ در ۱۲٪ حالات، بیش‌ترین مقادیر \bar{C}_p را به خود اختصاص می‌دهند.

به منظور بررسی نحوه چیدمان ساختمان‌ها، تأثیر فاصله روی \bar{C}_p هر یک از ساختمان‌های موجود در گروه B نیز بررسی می‌شود.

شکل ۱۳، نمودارهای \bar{C}_p را روی هر یک از وجوه ساختمان‌های موجود در گروه B، برای زاویه 0° باد و فواصل متفاوت قرارگیری ساختمان‌ها نشان می‌دهد. \bar{C}_p روی وجه ۱ تمامی ساختمان‌ها به جز ساختمان اول که بلندترین ساختمان در این گروه است با افزایش فاصله، کاهش می‌یابد. در این گروه نیز مشاهده می‌شود که وجه ۱ ساختمان اول که اولین وجه رو به باد محسوب می‌شود، رفتاری متفاوت نسبت به وجه ۱ سایر ساختمان‌ها از خود نشان می‌دهد. این وجه به علت عدم وجود ساختمان‌ها در بالادست جریان و در نتیجه عدم اثرات تداخلی، رفتار یکسانی را از خود در مقابل تغییرات فاصله از خود نشان می‌دهد.

از نکات قابل توجه در این گروه و زاویه بارگذاری 0° ، اثرات بسیار زیاد تداخلی اولین ساختمان در بالادست جریان است. اولین ساختمان این گروه که بلندترین ساختمان گروه با ارتفاع $0/6$ m نیز است، سبب به وجود آوردن اثرات شدید تداخلی بار باد روی سایر ساختمان‌ها شده است.

در این گروه برخلاف گروه A، اکثر وجوه در مقابل کاهش فاصله بین ساختمان‌ها، رفتار یکسانی از خود نشان می‌دهند. تمامی وجوه ۱، ۲ و ۴ به جز وجوه ۱ و ۴ ساختمان اول در این زاویه بارگذاری بار باد، با کاهش فاصله بین ساختمان‌ها



شکل ۱۴- میانگین ضرایب فشار بر روی وجوه ساختمان‌های گروه B و جهت باد 45° : (الف) وجه ۱، (ب) وجه ۲، (ج) وجه ۳، (د) وجه ۴

در گروه B ساختمان‌ها برای تمامی حالات محاسبه شده (فواصل متفاوت و زوایای متفاوت بارگذاری بار باد) در $0.48/S/B$ حالات، $1/25$ معادل S/B به عنوان بحرانی‌ترین فاصله قرارگیری از لحاظ دارا بودن بیش‌ترین مقادیر C_p شناخته می‌شود. S/B معادل 0.5 در $0.33/S/B$ حالات، S/B معادل 0.75

دارد. این وجه در ساختمان‌های اول و دوم که ابعاد گردابه‌های آشفته بزرگ‌تر و در نتیجه انرژی مکشی آن‌ها بیشتر است (گردابه‌های به وجود آمده پشت ساختمان‌ها) با افزایش فاصله C_p بیشتری را روی خود احساس می‌کنند. دلیل این امر، امکان ایجاد گردابه‌های آشفته در فواصل بزرگ‌تر است. به منظور بررسی اثرات سایر ساختمان‌ها در پایین‌دست جریان روی اولین ساختمان گروه، C_p روی وجوه اولین ساختمان محاسبه شده است. با دقت بر C_p روی وجه ۱ و ۳ اولین ساختمان گروه مشاهده می‌شود که در وجه ۱، مقدار C_p مثبت بوده، در وجه ۳ (وجه پشت به باد) مقدار این کمیت منفی است. این موضوع در حقیقت یک حالت تشدید را روی اولین ساختمان گروه پدید می‌آورد. مطابق شکل ۱۳ هرچه که سایر ساختمان‌ها به اولین ساختمان گروه نزدیک می‌شوند، از این حالت تشدید به علت کاهش مقدار C_p روی وجه ۳، کاسته می‌شود.

شکل ۱۴، نمودارهای میانگین ضرایب فشار را برای زاویه 45° باد روی هر وجه ساختمان‌های گروه B نشان می‌دهد. در این زاویه بارگذاری بار باد، وجوه ۱ و ۴ ساختمان‌های قرارگرفته در گروه رفتار مشخصی را از خود در مقابل تغییرات فاصله قرارگیری ساختمان‌ها، نشان نمی‌دهند. وجوه ۲ و ۳ ساختمان‌های قرارگرفته در گروه با کاهش فاصله قرارگیری، C_p بیشتری روی خود احساس می‌کنند. این افزایش C_p ، حداکثر 61% و حداقل 2% است.

شکل ۱۵، نمودارهای میانگین ضرایب فشار را برای زاویه 90° باد، روی هر وجه ساختمان‌های گروه B نشان می‌دهد. C_p روی وجوه ۲، ۳ و ۴ ساختمان‌های قرارگرفته در گروه با کاهش فاصله قرارگیری، کاهش می‌یابد.

وجوهی که نقش دالان‌های هوا را در این زاویه بارگذاری باد بازی می‌کنند، رفتار مشخصی در مقابل تغییرات فاصله از خود نشان نمی‌دهند؛ این در حالی است که در گروه A ساختمان‌ها، رفتار دالان‌های هوا مشخص است؛ بنابراین ابعاد دالان‌های هوا در تأثیرگذاری روی ضرایب فشار بسیار پر اهمیت است. یکی از نکات قابل توجه در این زاویه بارگذاری، علامت C_p است که روی تمام وجوه مثبت است. یکی از دلایل این امر، عدم وجود اثرات تداخلی ناشی از وجود ساختمان‌های دیگر در بالادستی جریان است.

۴-۳- ضریب تداخل (IF)

تأثیرات جریان در ساختمان بلند در حالتی که در مجاورت سایر ساختمان‌ها قرار گیرد، در مقایسه با زمانی بسیار متفاوت است که ساختمان به صورت منفرد وجود دارد. اکثر آیین نامه‌های بارگذاری باد، از روی داده‌های به دست آمده از مدل کردن ساختمان منفرد در تونل باد نوشته شده‌اند؛ در حالی که واقعیت چیز دیگری را نشان می‌دهد. از این رو سعی می‌شود با معرفی ضریب تداخل قسمتی از این پیچیدگی‌ها معرفی شود.

ضریب تداخل در واقع مقایسه‌ای از ضرایب فشار روی ساختمان‌های تک و ضرایب فشار روی ساختمانی است که در مجاورت سایر ساختمان‌ها قرار گرفته است. ضریب تداخل در هر تحقیق، معنا و مفهوم متفاوتی دارد. در یک سری از تحقیقات، ضریب تداخل نسبت نیروها و ممان‌ها و در بعضی ضریب، تداخل نسبت ضرایب فشار یا ضرایب نیرو تعریف می‌شود. آنچه که مهم است، متفاوت نشان دادن هر تأثیر جریان در ساختمان‌های گروهی نسبت به ساختمان تک است. در این مقاله که هدف اصلی آن بررسی ضرایب فشار ساختمان‌ها است، ضرایب تداخل همانند تحقیقات Kim و همکاران [۳۳] که روی دو ساختمان بلند انجام شده، معرفی می‌شود. ضریب تداخل، به معنای دو مفهوم حداکثر ضریب تداخل مثبت و حداقل ضریب تداخل منفی طبقه‌بندی می‌شود.

$$IF_{\max} = \frac{\text{حداکثر ضرایب فشار مثبت وارده بر هر ساختمان قرار گرفته در مجموعه‌ی ساختمان‌ها}}{\text{حداکثر ضرایب فشار مثبت وارده بر ساختمان منفرد}} \quad (11)$$

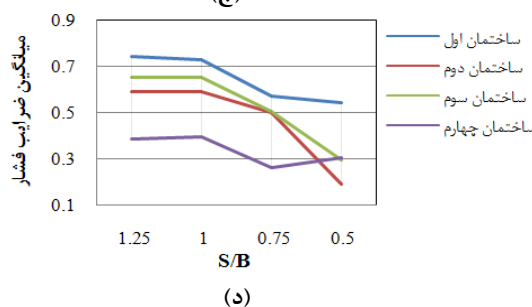
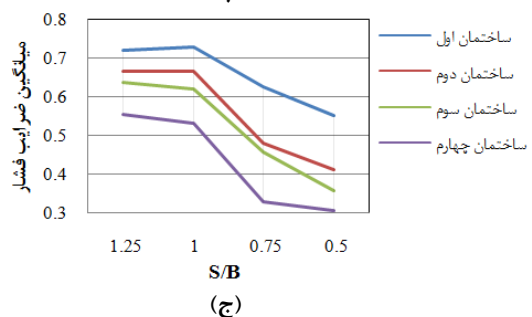
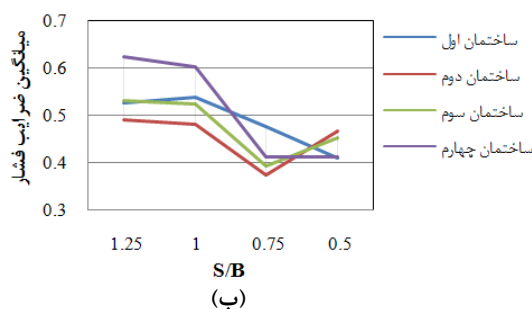
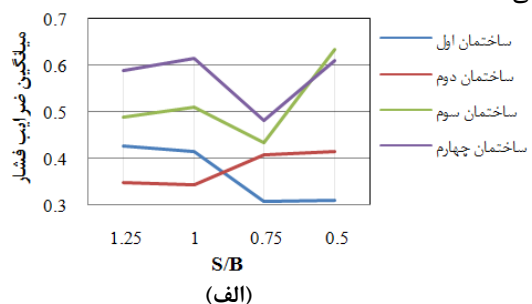
$$IF_{\min} = \frac{\text{حداقل ضرایب فشار منفی وارده بر هر ساختمان قرار گرفته در مجموعه‌ی ساختمان‌ها}}{\text{حداقل ضرایب فشار منفی وارده بر ساختمان منفرد}} \quad (12)$$

برای این منظور، حداکثر ضرایب فشار مثبت و حداقل ضرایب فشار منفی کل وجوه جانبی ساختمان‌های منفرد مدل شده، به دست آمده است. حداقل و حداکثر ضرایب تداخل بار باد بدون در نظر گرفتن محل وقوع ضرایب فشار، روی ساختمان‌ها محاسبه شده است.

۴-۴- IF_{\min} و IF_{\max} در گروه A ساختمان‌ها

در جدول ۲، IF_{\max} و IF_{\min} محاسبه شده روی ساختمان‌های گروه A ارائه شده است. این ضرایب، برای فاصله‌ی

در ۰.۸ و S/B معادل ۱ در ۱۱٪ حالات بیش‌ترین مقادیر \bar{C}_p را به خود اختصاص می‌دهند؛ بنابراین در گروه A و B ساختمان‌ها در حالت کلی S/B معادل ۱/۲۵ بیش‌ترین مقادیر \bar{C}_p را روی هر یک از وجوه جانبی ساختمان‌ها ایجاد می‌کند.



شکل ۱۵- میانگین ضرایب فشار بر روی وجوه ساختمان‌های گروه B و جهت باد 90° : (الف) وجه ۱، (ب) وجه ۲، (ج) وجه ۳، (د) وجه ۴

بحرانی برای بارگذاری باد ساختمان‌های تحت اثر تداخل است.

IF_{max} برای زوایای ۴۵° و ۹۰° در مقایسه با زاویه ۰° کمتر بوده، به حداکثر ۱/۲۹ می‌رسد. البته در این زوایا، جابجایی نیروها از کششی به فشاری یا برعکس بیشتر است. IF_{min} مؤلفه‌ای دیگر از ضرایب تداخل برای مقایسه- حداقل ضرایب فشار منفی است. IF_{min}(θ = 0°) از حداقل ۱/۸۹ تا حداکثر ۳/۲۵ تغییر می‌کند. فارغ از محل وقوع، روی هر یک از ساختمان‌های موجود در گروه، ساختمانی وجود دارد که حداقل ضرایب فشار منفی در این زاویه به بیشتر از ۳ برابر نسبت به ساختمان منفرد رسیده است. بیش‌ترین IF_{max} در زاویه‌ی ۰° متعلق به آخرین ساختمان موجود در گروه A با ارتفاع ۰/۶ m است؛ این درحالی است که بیش‌ترین IF_{min} متعلق به دومین ساختمان گروه است؛ بنابراین اثرات تداخل ناشی از ساختمان‌های مجاور در این زاویه، بیش‌ترین ضرایب فشار مثبت را روی آخرین ساختمان گروه با بیش‌ترین ارتفاع ایجاد کرده است.

IF_{min}(θ = 45°) از حداقل ۱/۵۱ به حداکثر ۲/۹۶ تغییر می‌کند. در این میان، ساختمان سوم با ارتفاع ۰/۵ m در این گروه، حداکثر IF_{min} را در مقایسه با سایر ساختمان‌ها به خود اختصاص داده است. در این ساختمان، ضرایب مکشی حدوداً ۳ برابر بیشتر از ضرایب مکشی در ساختمان تک است. IF_{min}(θ = 90°) روی هیچ یک از ساختمان‌ها موجود نیست. این امر به دو دلیل اتفاق افتاده است. در زاویه‌ی ۹۰° در برخی از موارد، ضریب فشار روی ساختمان‌ها مثبت است، بنابراین حداقل‌های ضرایب فشار منفی روی این نقاط از ساختمان‌ها مشاهده نمی‌شود. دومین دلیل، ناهمخوانی ضرایب فشار به صورت منفی یا مثبت روی نقاط است. به عبارتی دیگر، در جاهایی که ضرایب فشار منفی در روی ساختمان منفرد وجود دارد، ضرایب فشار مثبت روی ساختمان مورد نظر قرار گرفته در گروه مشاهده می‌شود. این حالات، جزء همان ۲۵٪ مورد بحث اولیه است.

۴-۵- IF_{min} و IF_{max} در گروه B ساختمان‌ها

جدول ۳ مقادیر محاسبه‌شده IF ها در گروه B ساختمان‌ها را نشان می‌دهد. در این گروه، اثرات تداخل نسبت به گروه A

قرارگیری ۰/۱ m ساختمان‌ها (S/B معادل ۱/۲۵) و بحرانی-ترین فاصله از لحاظ دارا بودن بیش‌ترین مقادیر میانگین ضرایب فشار، روی ساختمان‌های هر دو گروه، محاسبه شده-اند. در گروه A، ساختمان‌ها برای سه جهت ۰°، ۴۵° و ۹۰° بار باد، در ۲۵٪ حالات، ضرایب فشار مثبت به ضرایب فشار منفی یا برعکس (ساختمان‌های گروهی نسبت به ساختمان تک) تبدیل شده است به عنوان مثال، زمانی که یک ساختمان به صورت منفرد مورد بررسی قرار می‌گیرد، تمام وجوه آن در حالت فشاری هستند؛ درحالی‌که اگر همان ساختمان در مجموعه‌ای از ساختمان‌ها قرار گیرد، امکان این وجود دارد که تمام یا قسمتی از آن وجوه از فشاری به مکشی تبدیل شوند. مشاهده می‌شود که در بعضی از خانه‌های جدول ۲ داده‌ای وجود ندارد. همان‌گونه که اشاره شد، ۲۵٪ از این حالات مربوط به این نکته است.

جدول ۲- IF_{min} و IF_{max} بر روی ساختمان‌های قرار گرفته در

گروه A

گروه A	ساختمان قرار گرفته در گروه	IF _{max}	IF _{min}
زاویه ۰° وزش باد	اول	۱/۰۳۷۷	۲/۵۷۷۶
	دوم	۰/۵۲۶۷	۳/۲۵۶۸
	سوم	۰/۵۳۵۸	۲/۲۹۲۲
	چهارم	۲/۶۲۱۰	۱/۸۹۵۷
زاویه ۴۵° وزش باد	اول	۱/۲۰۲۵	۱/۵۱۲۴
	دوم	۰/۵۹۱۹	۲/۴۱۶۴
	سوم	۰/۵۷۸۲	۲/۹۶۴۰
	چهارم	۰/۶۴۸۸	۲/۵۲۳۵
زاویه ۹۰° وزش باد	اول	۱/۲۶۸۹	-
	دوم	۱/۲۹۴۱	-
	سوم	-	-
	چهارم	-	-

IF_{max}(θ = 0°) (که معرف حداکثر ضریب تداخل در زاویه‌ی ۰° باد است) در گروه A ساختمان‌ها، از حداقل مقدار ۰/۵۲ به حداکثر مقدار ۲/۶ تغییر می‌کند. IF_{max}(θ = 0°) = ۲/۶ بدین معناست که در یکی از نقاط ساختمان‌های موجود در گروه A، حداکثر ضرایب فشار مثبت ۲/۶ برابر حداکثر ضرایب فشار مثبت موجود روی ساختمان منفرد می‌باشند که این مسأله خود یک حالت

اثرات روی ساختمان چهارم گروه که در فاصله‌ی بیشتری نسبت به ساختمان اول قرار گرفته، به نسبت کمتر شده است. زاویه‌ی 0° بارگذاری باد در این گروه از ساختمان‌ها، اثرات بحرانی‌تری نسبت به سایر زوایا، روی ساختمان‌های گروه ایجاد کرده است؛ به طوری که مقدار حداقل ضرایب تداخل منفی در این زاویه، ۷٪ از سایر زوایا بیشتر است.

در این گروه نیز در 37% حالات مشاهده می‌شود که ضرایب فشار مثبت در ساختمان‌های گروهی، به ضرایب فشار منفی در ساختمان تک تبدیل شده است (و برعکس). اثرات تداخل به وجود آمده در ساختمان‌های گروهی علاوه بر مقدار، نحوه‌ی عملکرد ضرایب را نیز از فشاری به مکشی یا برعکس تغییر داده است.

در این گروه نیز در 37% حالات مشاهده می‌شود که ضرایب فشار مثبت در ساختمان‌های گروهی، به ضرایب فشار منفی در ساختمان تک تبدیل شده است (و برعکس). اثرات تداخل به وجود آمده در ساختمان‌های گروهی علاوه بر مقدار، نحوه‌ی عملکرد ضرایب را نیز از فشاری به مکشی یا برعکس تغییر داده است.

در این گروه نیز در 37% حالات مشاهده می‌شود که ضرایب فشار مثبت در ساختمان‌های گروهی، به ضرایب فشار منفی در ساختمان تک تبدیل شده است (و برعکس). اثرات تداخل به وجود آمده در ساختمان‌های گروهی علاوه بر مقدار، نحوه‌ی عملکرد ضرایب را نیز از فشاری به مکشی یا برعکس تغییر داده است.

در این گروه نیز در 37% حالات مشاهده می‌شود که ضرایب فشار مثبت در ساختمان‌های گروهی، به ضرایب فشار منفی در ساختمان تک تبدیل شده است (و برعکس). اثرات تداخل به وجود آمده در ساختمان‌های گروهی علاوه بر مقدار، نحوه‌ی عملکرد ضرایب را نیز از فشاری به مکشی یا برعکس تغییر داده است.

در این گروه نیز در 37% حالات مشاهده می‌شود که ضرایب فشار مثبت در ساختمان‌های گروهی، به ضرایب فشار منفی در ساختمان تک تبدیل شده است (و برعکس). اثرات تداخل به وجود آمده در ساختمان‌های گروهی علاوه بر مقدار، نحوه‌ی عملکرد ضرایب را نیز از فشاری به مکشی یا برعکس تغییر داده است.

در این گروه نیز در 37% حالات مشاهده می‌شود که ضرایب فشار مثبت در ساختمان‌های گروهی، به ضرایب فشار منفی در ساختمان تک تبدیل شده است (و برعکس). اثرات تداخل به وجود آمده در ساختمان‌های گروهی علاوه بر مقدار، نحوه‌ی عملکرد ضرایب را نیز از فشاری به مکشی یا برعکس تغییر داده است.

در این گروه نیز در 37% حالات مشاهده می‌شود که ضرایب فشار مثبت در ساختمان‌های گروهی، به ضرایب فشار منفی در ساختمان تک تبدیل شده است (و برعکس). اثرات تداخل به وجود آمده در ساختمان‌های گروهی علاوه بر مقدار، نحوه‌ی عملکرد ضرایب را نیز از فشاری به مکشی یا برعکس تغییر داده است.

جدول ۳- IF_{min} و IF_{max} بر روی ساختمان‌های قرار گرفته

در گروه B			
گروه B	ساختمان قرار گرفته در گروه	IF_{max}	IF_{min}
زاویه 0° وزش باد	اول	۱/۲۰۸۷	۱/۹۵۵۳
	دوم	-	۳/۴۵۸۸
	سوم	-	۳/۶۱۲۶
	چهارم	-	۱/۸۲۸۹
زاویه 45° وزش باد	اول	۱/۶۵۰۹	۱/۷۰۰۲
	دوم	۰/۵۱۶۸	۳/۵۱۸۷
	سوم	۰/۴۸۶۴	۳/۲۹۴۲
	چهارم	۰/۴۹۳۱	۳/۲۲۴۱
زاویه 90° وزش باد	اول	۱/۴۲۰۲	-
	دوم	-	-
	سوم	-	-
	چهارم	۱/۵۸۳۹	-

در این گروه نیز در 37% حالات مشاهده می‌شود که ضرایب فشار مثبت در ساختمان‌های گروهی، به ضرایب فشار منفی در ساختمان تک تبدیل شده است (و برعکس). اثرات تداخل به وجود آمده در ساختمان‌های گروهی علاوه بر مقدار، نحوه‌ی عملکرد ضرایب را نیز از فشاری به مکشی یا برعکس تغییر داده است.

۵- نتیجه‌گیری

در مجموعه‌های شهری که مجموعه‌ای از ساختمان‌ها در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، اثرات جریان روی ساختمان‌ها تغییر می‌کند. این تغییرات جریان بسیار پیچیده است. از این رو در این مقاله، قرارگیری ساختمان‌ها در کنار یکدیگر و اثرات آن روی ضرایب فشار بررسی شده است. پارامترهای تأثیرگذار در مطالعه ضرایب فشار: چیدمان ساختمان‌ها در دو گروه متفاوت از لحاظ ارتفاعی، زاویه وزش باد و فاصله بین ساختمان‌ها بررسی شده است. برای نشان دادن اثرات تداخل بار باد ناشی از قرار گرفتن ساختمان‌ها در گروه به ضرایب تداخل اشاره شده و اهم نتایج به شرح زیر است.

(۱) در گروه A ساختمان‌ها (افزایش در ارتفاع)، افزایش ارتفاع‌های ساختمان‌ها به صورت صعودی توأم با افزایش فاصله بین ساختمان‌ها در زاویه‌های متفاوت بارگذاری باد، می‌تواند به افزایش متوسط ضرایب فشار روی اکثر ساختمان‌های قرار گرفته در گروه منجر شود.

(۲) در گروه A، در زاویه‌ی 0° بارگذاری، هرچه که ساختمان‌ها به هم نزدیک می‌شوند، میانگین ضریب فشار روی آن‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش که حداقل ۷٪ است، به دلیل اثرات تداخلی هر ساختمان بالادست جریان روی ساختمان دیگر است.

(۳) در گروه B (کاهش در ارتفاع)، اثرات ناشی از وجود ساختمان بلند مرتبه در بالادستی جریان در زاویه‌ی 0° وزش مشهودتر است، به صورتی که هرچه ساختمان‌های دیگر به اولین ساختمان نزدیک‌تر می‌شوند، متوسط ضرایب فشار بیشتری روی خود احساس می‌کنند به طوری که افزایش ۳۳٪ در ضرایب فشار وارده بر ساختمان‌ها دیده می‌شود. در سایر زوایا، عملکرد متفاوتی دیده می‌شود؛ به صورتی که با افزایش فاصله در اکثر حالات، متوسط ضریب فشار نیز روی وجوه ساختمان‌ها بیشتر می‌شود.

(۴) در گروه A و B، قرارگیری ساختمان‌ها در زاویه 45° وزش باد هرچه که فاصله کم شود، میانگین ضرایب فشار هم کمتر می‌شوند. این کاهش که در گروه A حداقل ۱۱٪ است، در گروه B به حداقل ۱۶٪ می‌رسد.

(۵) با بررسی ضرایب تداخل به این نکته اشاره شد که اساساً قرارگیری ساختمان‌ها در کنار هم چه اثراتی می-

تواند روی یکدیگر بگذارند. ۳ برابر شدن ضرایب فشار و تغییر نوع ضرایب فشار از فشاری به کششی یا برعکس در مجموعه‌ی ساختمان‌ها نسبت به ساختمان منفرد، از نکات بسیار مهم این بخش است؛ بنابراین اکثر آیین‌های بارگذاری باد که بر اساس آزمایش روی ساختمان منفرد به دست آمده‌اند، به علت در نظر نگرفتن ساختمان‌های اطراف، نقص قابل توجهی دارند.

(۶) گروه B ساختمان‌ها، اثرات بسیار مخرب‌تری نسبت به گروه A ساختمان‌ها روی هر یک از ساختمان‌های گروه ایجاد می‌کند؛ به نحوی که تبدیل نوع ضرایب در این گروه، بسیار بیشتر از گروه A در زاویه‌ی 0° و 90° بارگذاری باد است.

(۷) زاویه 0° بارگذاری باد اثرات تداخلی بیشتری را نسبت به سایر زوایا از لحاظ مقادیر ضرایب تداخل روی مجموعه ساختمان‌ها نسبت به ساختمان منفرد ایجاد می‌کند.

۶- مراجع

- [1] Khanduri AC, Stathopoulos T, Bedard C (1998) Wind-induced interference effects on buildings – A review of the state-of-art. Eng Struct 20(7): 617-630.
- [2] Blessmann J, Riera JD (1979) Interaction effects in neighbouring tall buildings. Proc. 5th Int. Conf. Wind Engng, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo.
- [3] Saunders JW, Melbourne WH (1979) Buffeting effects of upwind buildings. In: Proc. 5th Int. Conf. Wind Eng. Fort Collins.
- [4] Hussain H, Lee BE (1980) A wind tunnel study of the mean pressure forces acting on a large group of low-rise buildings. J Wind Eng Ind Aerodyn. 31: 41-66.
- [5] English EC (1985) Shielding factors from wind-tunnel studies of mid-rise and high-rise structures. Proc. 5th US Nat. Conf. Wind Eng., Lubbock, 4A: 49-56.
- [6] Letchford CW, Mehta KC (1993) The distribution and correlation of fluctuating pressures on the Texas tech building. J Wind Eng Ind Aerodyn 50: 225-234.
- [7] Wu F, Sarkar PP, Mehta KC, Zhao Z (2001) Influence of incident wind turbulence on pressure fluctuations near flat-roof corners. J Wind Eng Ind Aerodyn 89: 403-420.

- [22] He J, Song CCS (1999) Evaluation of pedestrian winds in urban area by numerical approach. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 81: 295-309.
- [23] Richards PJ, Mallinson GD, McMillan D, Li YF (2002) Pedestrian level wind speeds in downtown Auckland. *Wind Struct* 5: 151-164.
- [24] Hirsch C, Bouffieux V, Wilquem F (2002) CFD simulation of the impact of new buildings on wind comfort in an urban area. In: Workshop proceedings, cost action C14, Impact of wind and storm on city life and built environment. Nantes, France.
- [25] Yoshie R, Mochida A, Tominaga Y, Kataoka H, Harimoto K, Nozu T, et al (2007) Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 95: 1551-1578.
- [26] Hanna SR, Tehranian S, Carissimo B, Macdonald RW and Lohner R (2002) Comparisons of model simulations with observations of mean flow and turbulence within simple obstacle arrays. *Atmos Environ* 36: 5067-5079.
- [27] Chang CH, Meroney RN (2003) Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 91: 1141-1154.
- [28] Montazeri H, Blocken B (2013) CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: validation and sensitivity analysis. *Build Environ* 60: 137-149.
- [29] Lien FS, Yee E (2003) Numerical modeling of the turbulent flow developing within and over a 3-D building array, Part I: A high-resolution reynolds-averaged navier-stokes approach. *Bound-Lay Meteorol* 112: 427-466.
- [30] Launder BE, Spalding DB (1974) The numerical computation of turbulent flows. *Comput Methods Appl Mech Eng* 3: 89-296.
- [31] Brown MJ, Lawson RE, DeCroix DS and Lee RL (2001) Comparison of centre line velocity measurements obtained around 2D and 3D building arrays in a wind tunnel. Report LA-UR-01-4138, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 7.
- [۳۲] محمد تقی زاده م ع (۱۳۹۲) اثرات تداخل بر روی بارگذاری باد در یک ردیف ساختمان‌های بلند با ارتفاعات متفاوت در فواصل نزدیک با استفاده از روش CFD. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، اصفهان.
- [33] Kim W, Tamura Y, Yoshida A (2011) Interference effects on local peak pressures between two buildings. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 99: 584-600.
- [8] Stathopoulos T (1997) Computational wind engineering: past achievements and future challenges. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 67-68: 509-532.
- [9] Kim YC, Yoshida A, Tamura Y (2012) Characteristics of surface wind pressures on low-rise building located among large group of surrounding buildings. *Eng Struct* 35: 18-28.
- [10] Uematsu Y, Isyumov N (1999) Wind pressures acting on low-rise buildings. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 82: 1-25.
- [11] Levitan ML, Mehta KC, Vann WP, Holmes JD (1991) Field measurements of pressures on the Texas tech building. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 38: 227-234.
- [12] Levitan ML, Mehta KC (1992) Texas tech field experiments for wind loads part 1: building and pressure measuring system. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 43: 1565-1576.
- [13] Castro IP, Robins AG (1977) The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. *J Fluid Mech* 79: 307-335.
- [14] Cochran LS, Cermak JE (1992) Full- and model-scale cladding pressures on the Texas Tech University experimental building. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 43: 1589-1600.
- [15] Richards PJ, Hoxey RP, Connell BD, Lander DP (2007) Wind-tunnel modelling of the Silsoe cube. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 95: 1384-1399.
- [16] Surry D (1991) Pressure measurements on the Texas tech building: wind-tunnel measurements and comparisons with full scale. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 38: 235-247.
- [17] Richardson GM, Surry D (1994) The Silsoe structures building: comparison between full-scale and wind-tunnel data. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 51:157-176.
- [18] Stathopoulos T, Saathoff P (1991) Wind pressure on roofs of various geometries. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 38: 273-284.
- [19] Stathopoulos T, Zhu X (1988) Wind pressures on building with appurtenances. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 31: 265-281.
- [20] Blocken B, Janssen WD, van Hooff T (2012) CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: general decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environ Modell Softw* 30: 15-34.
- [21] Blocken B, Persoon J (2009) Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 97: 255-270.