

# تحلیل روش‌های مختلف تولید آشفتگی ورودی در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای پیش‌بینی پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف ساختمان‌های مدل

فرزاد بازدید\*، داریوش بدافی، محسن کیامنسوری و محمد جدیدی  
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۱ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۱۰/۲۹)

DOI: 10.18869/acadpub.jcme.35.2.85

چکیده - هدف از این مطالعه بررسی و تحلیل عددی مکانیزم‌های مؤثر بر میدان جریان و پراکندگی آلاینده‌ها پیرامون یک دره خیابانی ساده و طویل توسط رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با استفاده از چندین روش مختلف تولید آشفتگی ورودی است. به همین منظور، از چهار روش گردابه، نگاشتی، سنتزی و بدون آشفتگی ورودی به‌عنوان تولیدکننده‌های آشفتگی ورودی در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که تمامی روش‌ها قادر به پیش‌بینی دو ساختار مهم گردابه دره و گردابه گوشه هستند که تأثیر زیادی بر تهویه هوای داخل دره خیابانی می‌گذارند. مقادیر غلظت بر روی دیوار بادپناه ساختمان اول حدود ۴ برابر دیوار بادگیر ساختمان دوم به‌دست آمده است. از بین روش‌های مختلف تولید آشفتگی ورودی، روش گردابه دقیق‌ترین روش و روش بدون آشفتگی ورودی، کم‌دقت‌ترین روش است.

واژه‌های کلیدی: پراکندگی آلاینده‌ها، رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، روش‌های تولید آشفتگی ورودی، دره خیابانی، دینامیک سیالات محاسباتی.

## Analysis of Various Inflow Turbulence Generation Methods in Large Eddy Simulation Approach for Prediction of Pollutant Dispersion around Model Buildings

F. Bazdidi Tehrani, D. Badaghi, M. Kiamansori and M. Jadidi

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology

**Abstract:** The purpose of the present study is to investigate and analyze numerically, the effective mechanisms on the flow field and pollutant dispersion around a simple and long street canyon by means of Large Eddy Simulation (LES) approach using various inflow turbulence generation methods. For this purpose, four methods i.e. vortex, mapping, synthetic and no-inlet perturbation methods are used as inflow turbulence generators in LES. Results suggest that all methods are capable of capturing

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: bazdid@iust.ac.ir

the two important structures of canyon vortex and corner eddy, which have great influences on air ventilation inside the street canyon. The magnitudes of concentration on the leeward wall of the first building are approximately four times as much as those of windward wall of the second building. Among the various inflow turbulence generation methods, the vortex method is the most precise method and no-inlet perturbation method is the least precise method.

**Keywords:** Pollutant dispersion, Large eddy simulation approach, Inflow turbulence generation methods, Street canyon, Computational fluid dynamics.

## فهرست علائم

جهت جریان (افقی)	x	متوسط زمانی	$\langle \rangle$
جهت عمودی	y	تانسور تبدیل متعامد	$a_{ij}$
فاصله عمودی بی بعد از دیواره	$y_p^+$	غلظت حجمی	c
جهت جانبی (عرضی)	z	غلظت متوسط بی بعد	$\langle c^+ \rangle$
بردار واحد در راستای جریان	$\bar{z}$	نوسانات غلظت بی بعد	$C'^+$
علائم یونانی		ضریب مدل اسماگورینسکی دینامیکی	C
گردش	$\Gamma_i$	عدد کورانت	Co
عرض فیلتر	$\Delta$	ضریب پخش مولکولی	D
گام زمانی	$\Delta t$	ضریب پخش گردابه‌ای مقیاس زیرشبکه	$D_{SGS}$
ضخامت لایه مرزی	$\delta$	ارتفاع ساختمان‌ها	$H_b$
دلتای کرونیگر	$\delta_{ij}$	انرژی جنبشی آشفتگی	k
نرخ اضمحلال آشفتگی	$\varepsilon$	عدد موج	$k_j^n$
تانسور جایگشت	$\varepsilon_{ijk}$	تنش دینامیکی لئونارد	$L_{ij}$
توزیع فضایی گردابه	$\eta$	مقیاس طولی آشفتگی	l
فاصله عمودی بی بعد	$\theta = y/\delta$	طول ساختمان‌ها	$L_b$
لزجت مولکولی سینماتیک	$\nu$	متوسط	M
لزجت گردابه‌ای مقیاس زیرشبکه	$\nu_{SGS}$	روش نگاشتی	Mapping
چگالی	$\rho$	تعداد کل گردابه‌ها	N
انحراف معیار	$\sigma$	روش بدون آشفتگی ورودی	NoPerturb.
انحراف معیار نوسانات سرعت عمودی	$\sigma_v$	فشار	p
انحراف معیار نوسانات غلظت بی بعد	$\sigma_c$	دبی حجمی خروجی آلاینده	Q
مقیاس زمانی آشفتگی	$\tau$	بردار شار اسکالر مقیاس زیرشبکه	$q_i^{SGS}$
تانسور تنش مقیاس زیرشبکه	$\tau_{ij}$	تانسور هم‌بستگی سرعت	$r_{ij} \equiv \overline{u_i u_j}$
تابع میرایی	$\phi$	خطای نسبی موضعی	R.E.
ورتیسیته	$\omega$	مساحت صفحه ورودی	S
فرکانس طیف آشفتگی	$\omega_n$	تانسور نرخ کرنش	$S_{ij}$

زیر نویس		عدد اشمیت آشفته مقیاس زیر شبکه	$Sc_{SGS}$
ساختمان	b	روش سنتزی	Synth.
تجربی	Exp	زمان	t
ورودی	inlt	زمان بی بعد	$t^* = t \times u_H / H_b$
عددی	Num	مؤلفه سرعت در جهت جریان (افقی)	u
صفحه بازیافت	recy	سرعت افقی متوسط بی بعد	$\langle u^+ \rangle = \langle u \rangle / u_H$
مقیاس زیر شبکه	SGS	سرعت ورودی در ارتفاع ساختمان	$u_H$
جریان آزاد	$\infty$	سرعت جریان آزاد	$u_\infty$
بالانویس		مؤلفه سرعت عمودی	v
کمیت نوسانی (لحظه‌ای)	( )'	سرعت عمودی متوسط بی بعد	$\langle v^+ \rangle = \langle v \rangle / u_H$
کمیت فیلتر شده	( ) $\bar{\bar{}}$	روش گردابه	Vortex
کمیت دو مرحله فیلتر شده	( ) $\bar{\bar{\bar{}}}$	مؤلفه سرعت جانبی (عرضی)	w
کمیت بی بعد	+	فاصله بین دو ساختمان	W
		عرض ساختمان‌ها	$W_b$

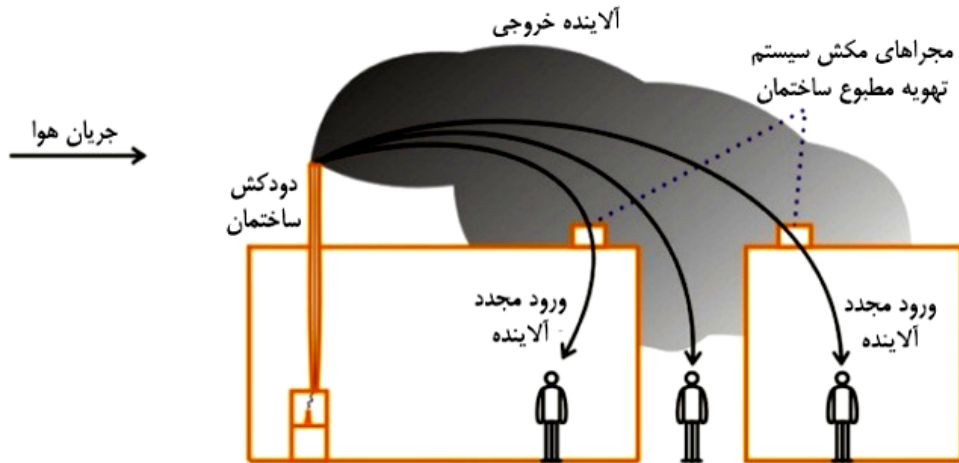
## ۱- مقدمه

پیشرفته از قبیل دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> صورت پذیرفته است. این روش‌ها می‌توانند خواص جریان را در هر نقطه به‌طور آنی نشان دهند که با توسعه سریع کامپیوترها، تعداد مسائل جریانی مختلف که می‌توانند با دینامیک سیالات محاسباتی مدل شوند افزایش قابل توجهی یافته است.

از سه روش متداول برای شبیه‌سازی توسط دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان استفاده نمود که شامل روش معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز ناویر-استوکس<sup>۲</sup>، روش شبیه‌سازی عددی مستقیم و روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۳</sup> است. معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز ناویر-استوکس با میانگین‌گیری زمانی از معادله‌های ناویراستوکس به دست می‌آیند و همه مقیاس‌های آشفتگی را مدل می‌کند [۲]. در این روش مقدار عدد اشمیت آشفته تأثیر بالایی بر انتقال آلاینده‌ها دارد [۳ و ۴]. روش شبیه‌سازی عددی مستقیم تمام مقیاس‌های حرکت را به‌طور دقیق حل می‌کند و تا به امروز دقیق‌ترین روش موجود است. البته این روش از لحاظ سخت‌افزاری محدودیت دارد و

آلاینده‌های موجود در هوا می‌توانند آثار بسیار مضر بر سلامتی انسان داشته باشند. در مناطق شهری، ورود آلاینده‌ها از طریق پنجره‌های باز یا همچنین از طریق مجراهای مکش سیستم تهویه مطبوع ساختمان به داخل ساختمان، ممکن است بر کیفیت هوای داخل ساختمان و سلامتی افراد داخل ساختمان تأثیر زیادی داشته باشد (شکل (۱)) [۱]. با این وجود به‌علت محدودیت‌های عملی همیشه این امکان وجود ندارد تا از مکش دوباره آلاینده‌ها جلوگیری شود. وظیفه اصلی طراح این است که خطر مکش دوباره آلاینده‌های خروجی را با یک هزینه منطقی تا سطحی قابل قبول کاهش دهد. به‌همین سبب پیش‌بینی پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف ساختمان‌ها بسیار مهم است.

در حالت کلی روش‌های زیادی برای تخمین آلاینده‌ها پیرامون ساختمان‌ها وجود دارد. با این حال در دهه‌های گذشته پیشرفت‌های مهمی در مدل‌سازی عددی با استفاده از روش‌های



شکل ۱- ورود آلاینده‌های خروجی از دودکش به پیاده‌رو و داخل خانه [۱]

است. اما این روش زمان طولانی و محاسبات پس پردازش اضافی را می‌طلبد.

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، شرط مرزی ورودی است. محققین بسیاری بر ضرورت استفاده از شرایط مرزی ورودی مناسب در شبیه‌سازی لایه مرزی جوی آشفته، با استفاده از رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، تأکید داشته‌اند [۸-۱۴]. به دلیل اینکه شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، در لایه مرزی جوی آشفته یک شبیه‌سازی گذرا بوده و به زمان وابسته است، شرایط مرزی ورودی باید به گونه‌ای تعیین شود که نوساناتی وابسته به زمان داشته باشد. بنابراین تعیین صحیح شرایط مرزی ورودی برای پیش‌بینی دقیق فرآیندهایی گذرا، نظیر پراکنندگی آلاینده‌ها، بسیار اهمیت دارد.

مارویاما [۱۵] به دلیل وابستگی شدید نتایج محاسبه‌های ناحیه پایین‌دست به مشخصه‌های سیال ورودی، به تولید شرط مرزی ورودی پرداخته است و نوسان‌های باد ورودی را به روش مصنوعی با استفاده از سری‌های فوریه تولید نموده است. وی در این کار از نتایج کامدا و موریکاوا [۱۶] استفاده نموده است. آنها گزارش دادند که مقادیر متوسط وابسته به زمان مرتبط با فرایندهای تصادفی مشروط، هم به ضرایب فوریه و هم به تعداد توابع زمانی قطعی مشروط

بسیار زمان‌بر نیز است. در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مقیاس‌های کوچک آشفته‌گی با فیلترگیری از حل خارج شده و به جای آنها از مدل استفاده می‌شود. مقیاس‌های بزرگ آشفته‌گی نیز از فیلتر عبور می‌کنند و حل می‌شوند این روش هم از لحاظ هزینه و هم دقت نسبت به دو روش دیگر صرفه است.

بازدید طهرانی و جدیدی [۵] به بررسی نقش عدد اشمیت آشفته مقیاس زیرشبکه در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، برای بررسی میدان جریان و پراکنندگی آلاینده‌ها در اطراف ساختمان مدل مکعبی، پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که پیش‌بینی شارهای دیفیوژن آشفته توسط اشمیت دینامیکی بسیار منطقی‌تر از عدد اشمیت ثابت است. غفوری [۶ و ۷] به تأثیر نظریف شبکه برای پیش‌بینی دقت رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، برای پراکنندگی آلاینده‌ها در اطراف ساختمان مدل مکعبی، پرداخت. او با به‌کار بردن چندین شبکه و بررسی روش‌های ارزیابی تطریف شبکه در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، همانند همبستگی<sup>۴</sup>های دو نقطه‌ای، نسبت ویسکوزیته مقیاس زیرشبکه به ویسکوزیته مولکولی و نسبت تنش برشی مقیاس زیرشبکه به تنش‌های حل شده نتیجه گرفت که همبستگی دو نقطه‌ای، دقیق‌ترین روش برای ارزیابی تطریف شبکه

وابسته هستند. همچنین اعلام نمودند که انحراف معیار این فرایندها فقط به تعداد توابع زمانی قطعی مشروط بستگی دارد. ژئ و کاسترو [۸] برای روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در جریان با مقیاس خیابانی با تولید یک فیلتر دیجیتال برای شرایط ورودی، یک روش مناسب برای شبیه‌سازی جریان‌های توسعه یافته مکانی ساخته‌اند. جریان‌های ورودی آشفته تولید شده توسط آنها به روش مصنوعی، مقیاس‌های طولی انتگرالی معین و تانسور تنش رینولدز را ارضا می‌کنند. این روش توسط شبیه‌سازی جریان کانال سطحی با عبور از روی گروهی از مکعب‌ها، صحت‌سنجی شده است. در روش گردابه که توسط متی و همکاران [۱۷] پیشنهاد شده است، نوسانات سرعت از طریق یک میدان ورتیسیتیه دوبعدی در صفحه ورودی عمود بر جهت جریان به پروفیل سرعت متوسط اضافه می‌شوند. میدان سرعت تولید شده توسط روش گردابه دارای همبستگی مکانی و زمانی است که باعث برتری آن نسبت به روش‌های قبلی می‌شود. این روش به‌طور موفقیت‌آمیزی در جریان داخل کانال و لوله، جریان بر روی ایرفویل و همچنین جریان بر روی یک تپه آزمایش شده است. اسمیرنوف و همکارانش [۱۸] روی روش سنتزی برای تولید شرط مرزی ورودی مطالعه نموده‌اند. هدف آنها ارائه الگوریتمی ساده برای تولید جریان تصادفی بوده است که بتواند جریان‌های آشفته غیرایزوتروپ و غیرهمگن در حال توسعه فضایی تعیین کند و در شرط مرزی ورودی و شرایط اولیه استفاده شود. الگوریتم تولید این جریان تصادفی بر پایه کار کریچنان [۱۹] توسعه یافته است و می‌تواند به‌عنوان یک تولید کننده میدان جریان تصادفی مناسب در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شود. لاند و همکارانش [۲۰] از نگاشت میدان سرعت در برخی صفحات ورودی دامنه، برای مشخص نمودن سرعت ورودی و خواص آشفتگی استفاده نموده‌اند که به روش نگاشتی معروف است. در این روش، قسمت نگاشت شده بخشی از دامنه محاسباتی اصلی است و نیازمند یک شبیه‌سازی

جداگانه نیست. البته به منظور اعمال روش لاند برای پروفیل سرعت لحظه‌ای در ورودی، ناحیه محاسباتی باید تقریباً به اندازه  $10^5$  برابر ضخامت لایه مرزی  $\delta$  یا  $10^6 H_b$  توسعه پیدا کند. با این حال رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ نیز به‌شدت وابسته به شبکه محاسباتی است و بنابراین هزینه محاسباتی برای این روش بسیار بالا می‌رود. روش دیگری توسط کاتاوکا و میزونو [۲۱] ارائه شده است که با ساده‌سازی روش لاند و حفظ دقت حل، این هزینه محاسباتی را کاهش می‌دهد. این روش براساس ثابت فرض نمودن ارتفاع لایه مرزی در ورودی است که در مسائل لایه مرزی جوی، به دلیل کوچک بودن رشد لایه مرزی نسبت به ارتفاع لایه مرزی در ورودی، می‌توان با در نظر گرفتن کمی خطا رشد لایه مرزی را در نظر نگرفت [۲۲]. به همین سبب، قسمت ورودی ناحیه محاسباتی می‌تواند به اندازه  $10^5 H_b$  توسعه پیدا کند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش‌های زیادی برای تولید آشفتگی ورودی در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ توسعه یافته‌اند ولی تا به حال مقایسه‌ای بین عملکرد این روش‌ها برای پیش‌بینی پراکندگی آلاینده‌ها پیرامون ساختمان‌ها انجام نشده است. لذا در پژوهش حاضر، مقایسه‌ای بین عملکرد چهار روش تولید آشفتگی ورودی مختلف شامل روش‌های گردابه، نگاشتی، سنتزی و روش بدون آشفتگی ورودی برای رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ صورت گرفته است. از داده‌های تجربی تونل باد گرومکه و همکاران [۲۳] برای اعتبارسنجی نتایج و همچنین مقایسه دقت نتایج روش‌های مختلف تولید آشفتگی ورودی استفاده شده است. نمونه معیار مورد بررسی، یک دره خیابانی<sup>۵</sup> ساده با دو ساختمان با ارتفاع  $H_b$  است که عرض ساختمان‌ها با ارتفاع آنها برابر بوده و طول ساختمان‌ها نیز برابر  $10^5 H_b$  است. آلاینده‌ها نیز توسط چهار منبع تولید آلاینده واقع در کف دره خیابانی به داخل دامنه وارد می‌شوند.

## ۲- معادلات حاکم

### ۱-۲- معادلات پیوستگی، مومنتوم و انتقال آلاینده‌ها در

#### رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مقیاس‌های کوچک آشفتگی مستقل از هندسه فرض و مدل‌سازی می‌شوند و مقیاس‌های بزرگ آشفتگی از فیلتر عبور می‌کنند و حل می‌شوند، زیرا به هندسه و شرایط جریان وابسته‌اند.

معادلات حاکم در این روش، با فیلترگیری از معادلات

ناویر-استوکس به دست می‌آیند:

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial (\nu \bar{S}_{ij})}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{c}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} - q_j^{SGS} \right) + f \quad (3)$$

$$\text{که } \bar{S}_{ij} \text{ به صورت } \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \text{ است.}$$

در معادله انتقال مومنتوم، عبارت  $\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j$ ، تانسور تنش مقیاس زیرشبکه و در معادله انتقال آلاینده‌ها عبارت  $q_i^{SGS} = \bar{u}_i \bar{c} - \bar{u}_i \bar{c}$ ، بردار شار اسکالر مقیاس زیرشبکه، بیانگر تأثیر مقیاس‌های کوچک (که باید مدل شوند) بر روی مقیاس‌های بزرگ (که قابل حل هستند) بوده و نیاز به مدل شدن دارند [۲۴]. تابع فیلتر به صورت یک فیلتر جعبه با عرض  $\Delta$  انتخاب شده است. عرض فیلتر برابر با ریشه سوم حجم سلول محاسباتی به صورت  $\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{\frac{1}{3}}$  در نظر گرفته شده است.

قسمت انحراف تانسور تنش مقیاس زیرشبکه مطابق با

تقریب بوزینسک به صورت زیر مدل می‌شود:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

که در آن  $\nu_{SGS}$ ، لزجت آشفتگی مقیاس زیرشبکه و  $\delta_{ij}$  دلتای کرونیگر است. در این مقاله،  $\nu_{SGS}$  در معادله (۴) از مدل

اسماگورینسکی دینامیکی [۲۵ و ۲۶] به دست می‌آید که اخیراً به طور موفقیت‌آمیز توسط بازدید پهرانی و جدیدی [۵] در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در پیش‌بینی پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف یک ساختمان مدل مکعبی اعمال شده است. در مدل اسماگورینسکی دینامیکی روابط زیر برقرار است:

$$\nu_{SGS} = C \Delta^2 |\bar{S}| \quad (5)$$

$$C = -\frac{L_{ij} M_{ij}}{2M_{ij} M_{ij}} \quad (6)$$

$$M_{ij} = \left( \Delta^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} - \Delta^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \right) \quad (7)$$

$$L_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (8)$$

ضریب C در مدل اسماگورینسکی دینامیکی (معادله (۶))

توسط کاربر مشخص نمی‌شود و در واقع توسط خود مدل به صورت دینامیکی محاسبه می‌شود که تابعی از مکان و زمان است.

در این مقاله شار آشفتگی مقیاس زیرشبکه،  $q_i^{SGS}$  بر پایه فرضیه دیفیوژن گرادیانی استاندارد محاسبه شده است. در این روش  $q_i^{SGS}$  توسط  $D_{SGS}$  به گرادیان اسکالر حل شده مرتبط است که رابطه آنها به صورت زیر است:

$$q_i^{SGS} = -D_{SGS} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \quad (9)$$

که  $D_{SGS}$  ضریب پخش آشفتگی مقیاس زیرشبکه است.  $D_{SGS}$  توسط عدد اشمیت آشفتگی مقیاس زیرشبکه،  $Sc_{SGS}$ ، به ویسکوزیته گردابه‌ای مقیاس زیرشبکه،  $\nu_{SGS}$ ، به صورت زیر مرتبط می‌شود:

$$D_{SGS} = \frac{\nu_{SGS}}{Sc_{SGS}} \quad (10)$$

ضریب پخش آشفتگی مقیاس زیرشبکه به انتخاب مدل مقیاس زیرشبکه برای محاسبه  $\nu_{SGS}$  و تعریف عدد اشمیت آشفتگی مقیاس زیرشبکه،  $Sc_{SGS}$ ، وابسته است. در کار حاضر، از مقدار  $Sc_{SGS} = 0.5$  استفاده شده است. لازم به توجه است در حالی که هیچ مقدار جامع و مورد استنادی از مطالعات

قبلی برای انتخاب ScSGS وجود ندارد، در تعدادی از مقالات پیشین در این زمینه [۵، ۶، ۲۷، ۲۸ و ۲۹] از مقدار  $Sc_{SGS} = 0.5$  استفاده شده است که دلیل انتخاب مشابه در مقاله حاضر بوده است.

## ۲-۲- مروری بر روش‌های تولید آشفتگی ورودی در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

در این مقاله، سه روش تولید آشفتگی ورودی گردابه، نگاشتی و سنتزی برای تولید آشفتگی‌های مورد نیاز در ورودی به‌کار رفته است. همچنین از روش بدون آشفتگی ورودی نیز برای مقایسه با نتایج سایر روش‌ها استفاده شده است.

### ۲-۲-۱- روش گردابه

روش گردابه ابتدا توسط سرگنت توسعه داده شد و پس از آن توسط متی و همکارانش [۱۷] در بسته نرم‌افزاری انسیس فلونت به‌کار گرفته شده است. این روش نوسان‌هایی عرضی تولید می‌کند که شامل چند رابطه فضایی است و در ورودی به پروفیل سرعت متوسط اضافه می‌شود. میدان ورتیسیت تولید شده توسط انرژی جنبشی آشفتگی متوسط در ورودی محاسبه می‌شود. این روش نیازمند داده‌های سرعت ورودی متوسط و انرژی جنبشی آشفتگی است که این داده‌ها از محاسبه‌های متوسط‌گیری شده رینولدز ناویر-استوکس یا تونل باد به‌دست می‌آیند.

میدان ورتیسیت دویبعده تصادفی در صفحه ورودی به‌دست می‌آید (عمود بر سرعت جریان) و نوسانات مماسی نیز از طریق این میدان ورتیسیت محاسبه می‌شود. تکامل میدان ورتیسیت با زمان توسط معادله ورتیسیت توصیف می‌شود که برای سیال تراکم‌ناپذیر و در فرم لاگرانژی به‌صورت زیر است:

$$\frac{d\bar{\omega}}{dt} = \bar{\omega} \cdot \nabla \bar{u} + v \nabla^2 \bar{\omega} \quad (11)$$

که  $v$  لزجت سینماتیکی است. برای حل این معادله از

گسسته‌سازی ذرات استفاده شده است که ذرات یا نقاط گردابه از صفحه ورودی جابه‌جا می‌شوند. ورتیسیت، از مجموع همه نقاط گردابه‌ها  $i = 1, 2, 3, \dots, N$  واقع در موقعیت  $\bar{x}(x, y)$  در ورودی به‌دست می‌آید که توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\omega_i(\bar{x}, t) = \sum_{i=1}^n \Gamma_i(t) \eta(|\bar{x} - \bar{x}_i|, t) \quad (12)$$

که در آن  $\Gamma_i$  گردش و  $\eta$  توزیع مکانی مفروض گردابه است. گردش  $\Gamma_i$  شدت نوسان‌ها را نشان می‌دهد که تابعی از انرژی جنبشی آشفتگی محلی است. برای ارزیابی  $\Gamma_i$  از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\Gamma_i(\bar{x}_i) \approx 4 \sqrt{\frac{\pi S k(\bar{x}_i)}{r N (r \ln(r) - r \ln(r))}} \quad (13)$$

که در آن  $N$  تعداد کل نقاط گردابه‌های مورد استفاده است. توزیع فضایی  $\eta$  نیز توسط رابطه زیر ارزیابی می‌شود:

$$\eta(\bar{x}) = \frac{1}{r \pi \sigma^2} \left( \frac{1}{r e^{\frac{|\bar{x}|^2}{2\sigma^2}} - 1} \right) \frac{|\bar{x}|^2}{r e^{\frac{|\bar{x}|^2}{2\sigma^2}}} \quad (14)$$

در این رابطه  $\sigma$  اندازه گردابه‌ها را کنترل می‌نماید تا گردابه‌ها متعلق به مقیاس‌های حل شده باشند. این عمل توسط اندازه شبکه محلی  $\Delta$  صورت می‌گیرد. مقدار  $\sigma$  هم می‌تواند ثابت باشد یا می‌تواند از تحقیق‌های مقیاس طولی آشفته به‌دست آید:

$$\sigma = \frac{C_{\mu}^{r/2} k^{r/2}}{\varepsilon} \quad (15)$$

گسسته بودن میدان سرعت مماسی،  $\bar{u} = (v, w)$  توسط قانون بیو-ساوار به‌دست می‌آید که مرتبط کننده سرعت و ورتیسیت است:

$$\bar{u}(\bar{x}) = \frac{1}{r \pi} \sum_{i=1}^N \Gamma_i \frac{(\bar{x}_i - \bar{x}) \times \bar{z}}{|\bar{x} - \bar{x}_i|^2} \left( 1 - e^{-\frac{|\bar{x} - \bar{x}_i|^2}{2\sigma^2}} \right) e^{\frac{|\bar{x} - \bar{x}_i|^2}{2\sigma^2}} \quad (16)$$

بنابراین نقاط گردابه‌ها، تأثیر متفاوتی روی سرعت هر موقعیت  $\bar{x}$  می‌گذارند. این مقدار برحسب فاصله بین موقعیت  $\bar{x}$  و موقعیت گردابه  $\bar{x}_i = (x_i, y_i)$  است. بردار  $\bar{z}$  یک بردار واحد

در راستای جریان است.

### ۲-۲-۲- روش نگاشتی

روش نگاشتی توسط لاند و همکارانش [۲۰] توسعه یافته است. اصلی‌ترین ویژگی این روش، تخمین سرعت در صفحه ورودی بر مبنای حل در پایین دست جریان است. روند عمل نمودن این روش به گونه‌ای است که اطلاعات مربوط به میدان سرعت را از یک صفحه در پایین دست مرز ورودی به دست می‌آورد و آن را مقیاس‌بندی مجدد نموده و پس از آن، این اطلاعات را به عنوان شرط مرزی در ورودی اعمال می‌کند. در حقیقت این روش داده‌های ورودی را خود تولید می‌کند. به منظور اعمال روش لاند برای پروفیل سرعت لحظه‌ای در ورودی باید ناحیه محاسباتی تقریباً به اندازه  $10$  برابر ضخامت لایه مرزی  $\delta$  یا  $H_b$  یا  $60$  توسعه پیدا کند [۲۰]. همچنین رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به شدت وابسته به شبکه محاسباتی است. بنابراین هزینه محاسباتی برای این روش بسیار بالا است. روش دیگری توسط کاتاوکا و میزونو [۲۱] ارائه شده است که با ساده‌سازی روش لاند سعی دارد با حفظ دقت حل، این هزینه محاسباتی را کاهش دهد. در مسائل لایه مرزی جوی به دلیل کوچک بودن رشد لایه مرزی نسبت به ارتفاع لایه مرزی در ورودی، می‌توان با در نظر گرفتن کمی خطا رشد لایه مرزی را در نظر نگرفت [۲۲]. مؤلفه‌های سرعت لحظه‌ای در مرز ورودی با روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} u_{inlt}(y, z, t) &= u_{inlt}(z) + \phi(\theta) \times \{u(y, z, t) - u(y, z)\}_{recy} \\ v_{inlt}(y, z, t) &= \phi(\theta) \times \{v(y, z, t) - v(y, z)\}_{recy} \\ w_{inlt}(y, z, t) &= \phi(\theta) \times \{w(y, z, t) - w(y, z)\}_{recy} \end{aligned} \quad (17)$$

که در آن  $\theta = y/\delta$  بوده و  $\delta$  ضخامت لایه مرزی است. زیرنویس (inlt) بیانگر مقادیر در صفحه ورودی و زیرنویس (recy) بیانگر مقادیر در صفحه بازیافت در پایین دست جریان در بخش ابتدایی تولید جریان ورودی است.  $u_{inlt}(z)$  پروفیل سرعت متوسط در جهت جریان در ورودی است که از داده‌های

آزمایشگاهی تعیین می‌شود. تابع میرایی  $\phi(\theta)$  به کار رفته در این روش باعث میرا کردن نوسانات سرعت در ناحیه جریان آزاد می‌شود و از توسعه آنها در این ناحیه جلوگیری می‌نماید. این تابع میرایی به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\phi(\theta) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \tanh \left[ \frac{\lambda/\theta (\theta - 1)}{0.182 - 0.4\theta} \right] / \tanh(\lambda/\theta) \right\} \quad (18)$$

از آنجایی که فرض شده است که ضخامت لایه مرزی در داخل بخش ابتدایی تولید جریان ورودی ثابت است بنابراین برای  $\theta > 1$  مقدار  $\phi(\theta) = 0$  است.

### ۲-۲-۳- روش سنتزی

روش سنتزی توسط اسمیرنوف و همکارانش [۱۸] توسعه یافته است. هدف این روش ارائه یک الگوریتم ساده تولید جریان تصادفی است که بتواند برای تعیین جریان‌های آشفته غیرایزوتروپ و غیرهمگن در حال توسعه فضایی در شرط مرزی ورودی و شرایط اولیه استفاده شود. الگوریتم تولید جریان تصادفی بر پایه کار کریچنان [۱۹] توسعه یافته است و می‌تواند به عنوان یک تولید کننده میدان جریان تصادفی پربازده در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شود.

برای تولید این روش از نسخه اصلاح شده تکنیک کریچنان استفاده می‌شود. این روند که RFG نام دارد، از لحاظ محاسباتی مقرون به صرفه است. این روش شامل عمل‌های تبدیل متعامد و مقیاسی است که به یک میدان جریان پیوسته اعمال شده است. این میدان جریان با انطباق توابع هارمونیک تولید شده است. مراحل روند این الگوریتم به قرار زیر است:

الف) یک تانسور هم‌بستگی سرعت غیرایزوتروپ  $\{\bar{u}_i(x_j, t)\}_{i,j=1,2,3}$  برای یک میدان جریان آشفته تعیین می‌شود. سپس یک تانسور تبدیل متعامد  $a_{ij}$  تعیین می‌شود تا  $\Gamma_{ij}$  را قطری کند:

$$\begin{aligned} a_{mi} a_{nj} \Gamma_{ij} &= \delta_{mn} c_{(n)}^v \\ a_{ik} a_{kj} &= \delta_{ij} \end{aligned} \quad (19)$$



همبستگی این میدان  $\bar{r}_{ij} \equiv \overline{\bar{u}_i \bar{u}_j}$  بوده و مقیاس‌های مکانی و زمانی آشفته این میدان برابر با  $l$  و  $\tau$  است.

### ۲-۳- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

ابعاد دامنه محاسباتی مورد استفاده در این مقاله، با توجه به دو معیار  $COST^{[30]}$  و  $AIJ^{[31]}$  برای کاربردهای عملی دینامیک سیالات محاسباتی در شبیه‌سازی جریان باد در اطراف ساختمان‌ها انتخاب شده است. همانگونه که در شکل (۲) مشخص است، ابعاد دامنه محاسباتی به ترتیب  $24H_b \times 6H_b \times 23H_b$  در راستای افقی، عمودی و عرضی است. ارتفاع دامنه محاسباتی  $6H_b$  در نظر گرفته شده است تا از تأثیر مرز بالایی و شتاب مصنوعی جریان بر روی ساختمان‌ها جلوگیری شود. همچنین فاصله عرضی دیوارهای جانبی ساختمان‌های مدل تا مرزهای عرضی دامنه محاسباتی برابر با  $7H_b$  است. علاوه بر این، فاصله ورودی دامنه محاسباتی تا دیوار بادگیر ساختمان اول  $5H_b$  توصیه شده است. همچنین مرز خروجی باید حداقل  $15H_b$  پشت دیوار بادپناه ساختمان دوم باشد تا اجازه دهد که جریان آشفته پس از ناحیه گردابه، مجدداً توسعه یابد و از ورود جریان از مرز خروجی به داخل جلوگیری شود زیرا این امر تأثیری منفی بر روی همگرایی حل دارد.

با توجه به بزرگ بودن عدد رینولدز در مسأله حاضر، پیشنهاد می‌شود که از دامنه محاسباتی بزرگتری در اطراف ساختمان‌ها برای شبیه‌سازی استفاده شود تا دقت حل بالاتری به دست آید. اما، با توجه به این که تمرکز اصلی در مقاله حاضر بر روی مقایسه روش‌های تولید آشفستگی جریان ورودی مختلف بوده است، نظر به محدودیت‌های محاسباتی موجود از دو معیار  $COST^{[30]}$  و  $AIJ^{[31]}$  برای انتخاب ابعاد دامنه محاسباتی استفاده شده است تا سرعت حل به‌طور چشم‌گیری افزایش یابد. البته، این نکته باعث شده است تا دقت محاسبات کمی افت کند ولی با توجه به افزایش بسیار زیاد سرعت حل از کاستی ایجاد شده چشم‌پوشی شده است. با این حال، بهتر است

که  $a_{ij}$  و  $c_n$  توابعی معین بر پایه مکان هستند. ضرایب  $c_n = \{c_1, c_2, c_3\}$  نقش سرعت‌های نوسانی آشفته  $(u', v', w')$  در دستگاه مختصات جدید را دارند که این دستگاه مختصات توسط تانسور تبدیل  $a_{ij}$  تولید شده است.

ب) یک میدان جریان گذرا در دامنه سه‌بعدی  $\{v_i(x_j, t)\}_{i,j=1,2,3}$  با استفاده از روش اصلاح شده کریچنان تولید می‌شود:

$$v_i(\bar{x}, t) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=1}^N \left[ p_i^n \cos(\tilde{k}_j^n \tilde{x}_j + \omega_n \tilde{t}) + q_i^n \sin(\tilde{k}_j^n \tilde{x}_j + \omega_n \tilde{t}) \right]$$

$$\tilde{x}_j = \frac{x_j}{l}, \tilde{t} = \frac{t}{\tau}, c = \frac{l}{\tau}, \tilde{k}_j^n = k_j^n \frac{c}{c_{(j)}}$$

$$p_i^n = \varepsilon_{ijm} \zeta_j^n k_m^n, q_i^n = \varepsilon_{ijm} \zeta_j^n k_m^n$$

$$\zeta_i^n, \xi_i^n, \omega_n \in N(0, 1), k_i^n \in N(0, \sqrt{2}) \quad (20)$$

که  $l$  و  $\tau$  مقیاس‌های مکانی و زمانی آشفستگی،  $\varepsilon_{ijk}$  تانسور جایگشت مورد استفاده در عملیات ضرب برداری و  $N(M, \sigma)$  توزیع نرمال با  $M$  متوسط و انحراف استاندارد  $\sigma$  است. اعداد  $\omega_n$  و  $k_j^n$  بیانگر یک نمونه از بردارهای عدد موج  $n$  و فرکانس‌های طیف آشفستگی مدل شده هستند:

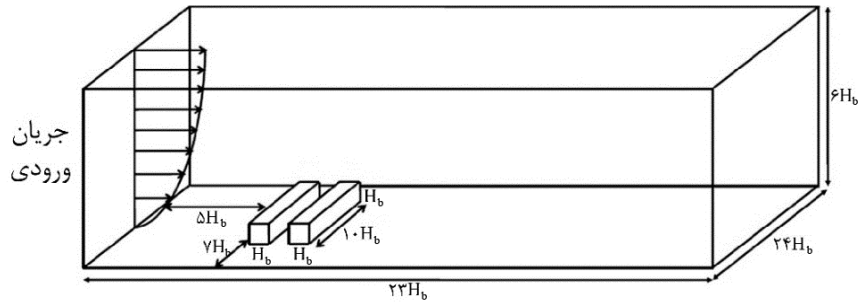
$$E(k) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} k^\tau \exp(-\tau k^\tau) \quad (21)$$

پ) تبدیل‌های متعامد و مقیاسی به میدان جریان  $v_i$ ، تولید شده در مرحله قبل، اعمال می‌شوند تا میدان جریان جدید  $u_i$  به دست آید:

$$w_i = c_{(i)} v_{(i)} \quad (22)$$

$$u_i = a_{ik} w_k$$

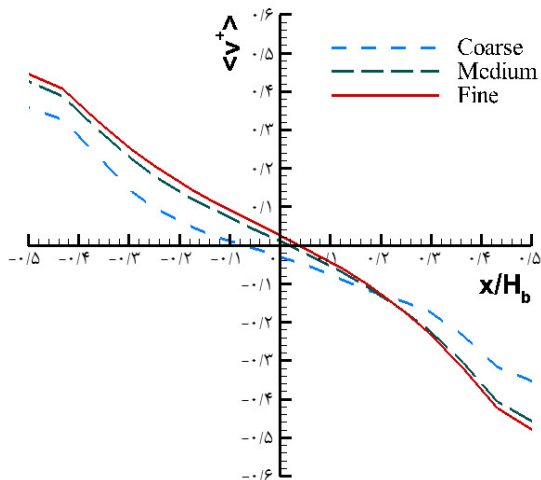
در روند بالا از تانسور همبستگی میدان جریان اصلی  $r_{ij}$  و اطلاعاتی پیرامون مقیاس مکانی و زمانی آشفستگی ( $l$  و  $\tau$ ) به‌عنوان ورودی استفاده می‌شود. این مقادیر می‌توانند از محاسبات متوسط‌گیری شده رینولدز ناویر-استوکس حالت پایا یا داده‌های تجربی به دست آیند. خروجی این الگوریتم یک میدان جریان وابسته به زمان  $u_j(x_j, t)$  است که توابع



شکل ۲- ناحیه محاسباتی با توجه به آزمایش تجربی تونل باد گرومکه و همکاران [۲۳]

جدول ۱- پارامترهای هندسی و جریانی براساس آزمایش تجربی تونل باد گرومکه و همکاران [۲۳]

مقدار	نماد	کمیت
۰/۱۲ m	$H_b$	ارتفاع ساختمان‌ها
۰/۱۲ m	$W_b$	عرض ساختمان‌ها
۱/۲ m	$L_b$	طول ساختمان‌ها
۰/۱۲ m	$W$	فاصله بین دو ساختمان
۴/۷ m/s	$u_H$	سرعت ورودی در ارتفاع ساختمان
۷/۲۹۷ m/s	$u_\infty$	سرعت جریان آزاد
۰/۵ m	$\delta$	ضخامت لایه مرزی
$۱/۶۲ \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{Q}_e$	دبی حجمی خروجی آلاینده



شکل ۳- مقایسه پروفیل‌های سرعت عمودی متوسط بی‌بعد در داخل دره خیابانی بر روی خط  $z/H_b = 0/5$  و  $y/H_b = 0/5$  در روش گردابه برای شبکه‌های محاسباتی ریز، متوسط و درشت

برای بررسی دقیق‌تر خطاهای روش‌های مختلف، از دامنه محاسباتی بزرگتری با تعداد سلول محاسباتی بیشتری استفاده شود تا خطای ناشی از ابعاد دامنه محاسباتی و مشکلات شبکه به حداقل ممکن برسد.

ناحیه محاسباتی برای رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با روش تولید ورودی نگاشتی به‌گونه‌ای است که فاصله ورودی دامنه محاسباتی تا دیوار بادگیر ساختمان اول  $15H_b$  است. سایر ابعاد دامنه محاسباتی مانند دیگر روش‌ها است. دلیل این عمل، نیاز این روش به ناحیه ورودی بزرگتری است [۲۱]. در این مطالعه از گاز  $SF_6$  به‌عنوان گاز آلاینده استفاده شده است که از چهار منبع خطی موجود در کف دره خیابانی به ناحیه محاسباتی وارد می‌شود. سایر پارامترهای جریانی و هندسی مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) نمایش داده شده است.

برای یافتن یک شبکه محاسباتی مناسب در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، سه شبکه محاسباتی توسط بسته نرم‌افزاری گمبیت [۳۲] در روش گردابه تولید شده است. تعداد سلول‌های این شبکه‌ها برابر با ۲۵۴۰۸۶، ۱۰۱۲۵۳۶ و ۵۴۵۳۸۶ است که به ترتیب بیانگر شبکه محاسباتی ریز، متوسط و درشت است. به‌منظور اطمینان لازم در خصوص استقلال نتایج از شبکه، پروفیل‌های سرعت عمودی متوسط بی‌بعد،  $\langle v^+ \rangle = \langle v \rangle / u_H$  در داخل دره خیابانی بر روی خط  $z/H_b = 0/5$  و  $y/H_b = 0/5$  برای شبکه‌های محاسباتی ریز، متوسط و درشت در شکل (۳) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که مشخص است، نتایج برای شبکه‌های متوسط و ریز تقریباً بر هم منطبق هستند. در نهایت، از شبکه متوسط با ۱۰۱۲۵۳۶ سلول محاسباتی در تمامی شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. سلول‌ها در نزدیکی دیوارها طوری انتخاب شده‌اند که مقدار  $y_p^+$  اولین نقطه بر روی دیوارهای مختلف با توجه به استفاده از توابع دیواره، کمتر از ۲۰ باشد. در نتیجه تعداد سلول‌ها بر روی دیواره ساختمان و در راستای عمودی برابر با ۱۴، در راستای عرضی برابر با ۸۴ و در راستای طولی نیز برابر با ۱۴ می‌شود. کانتورهای  $y_p^+$  بر روی دیوارهای ساختمان و کف دره خیابانی در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، توزیع  $y_p^+$  به دلیل ثابت نبودن تنش برشی بر روی دیوارها یکنواخت نیست.

در مسائل مربوط به لایه مرزی جوی، عدد رینولدز معمولاً بسیار زیاد است. در نتیجه به‌کار بردن رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در حالتی که لایه نزدیک دیواره کاملاً حل شود باعث هزینه‌های محاسباتی بسیار زیادی می‌شود. بنابراین، استفاده از توابع دیواره در کاربردهای لایه مرزی جوی برای کاهش هزینه‌های محاسباتی در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ ضروری است [۱۱]. شرایط مرزی در شکل (۵) برای هر دو ناحیه محاسباتی نشان داده شده است. برای تمامی هندسه‌ها، شرایط مرزی دیوارهای ساختمان‌ها، به‌صورت شرط مرزی عدم لغزش به‌همراه توابع دیواره هستند که برای رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با ورودی گردابه و سنتزی از تابع دیواره ورنر-ونگل استفاده شده است. همچنین برای روش بدون آشفتگی ورودی و روش نگاشتی از تابع دیواره اسپالدینگ استفاده شده است.

در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، پروفیل سرعت متوسط و انرژی جنبشی آشفتگی در ورودی دامنه محاسباتی مورد نیاز است. در این مطالعه از پروفیل‌های تجربی تونل باد گرومکه و همکاران [۲۳] استفاده شده است که در شکل (۶) نشان داده شده‌اند.

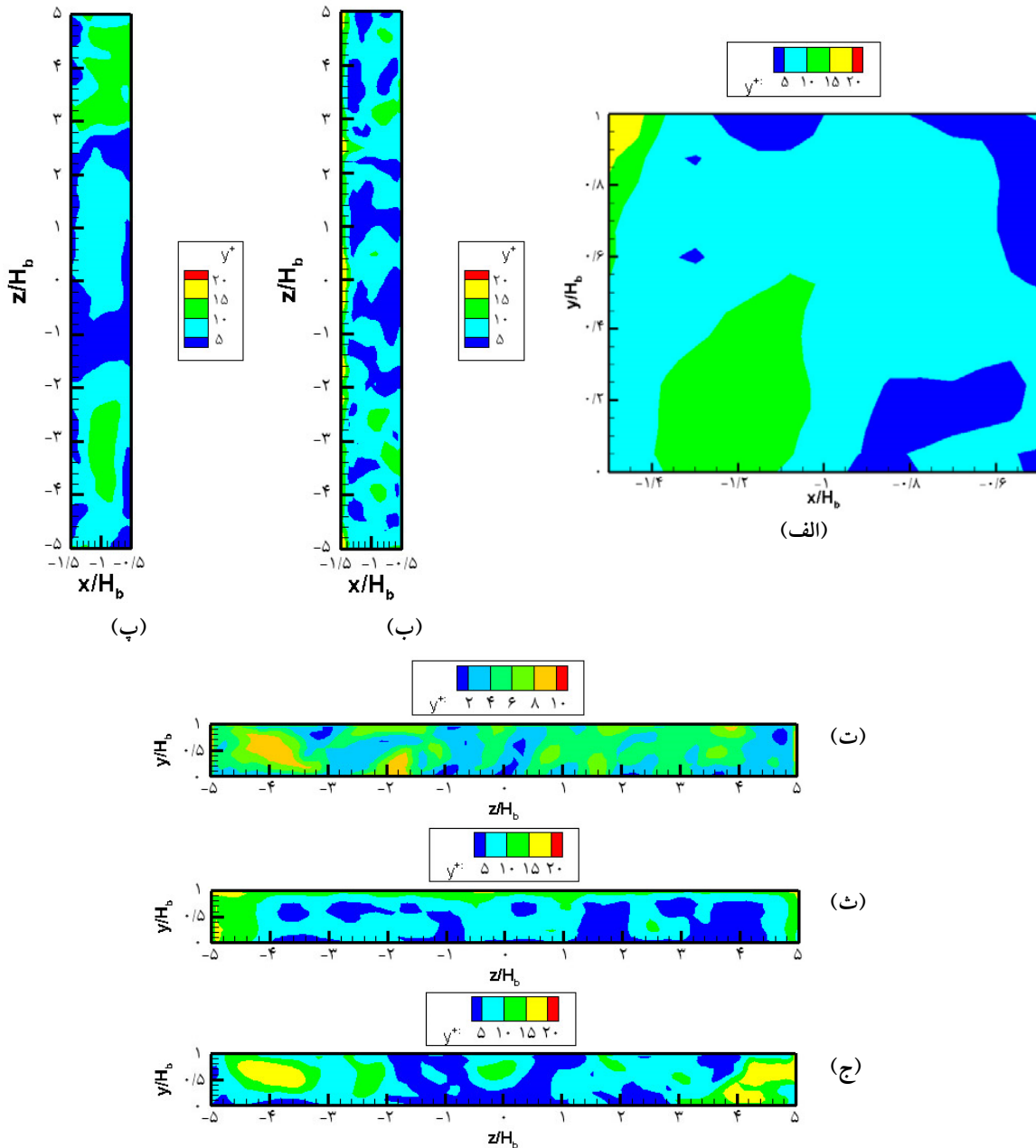
همچنین یکی از پارامترهای مورد نیاز در ورودی، نرخ اضمحلال آشفتگی است که توسط رابطه (۲۳) به‌دست می‌آید [۳۱] و در شکل (۶) نشان داده شده است:

$$\varepsilon(y) = C_{\mu}^{0.5} k(y) \frac{\partial u}{\partial y} \quad (23)$$

### ۲-۳-۱- روش عددی

جزئیات روش عددی در جدول (۲) مشخص شده است. شبیه‌سازی عددی رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با ورودی گردابه و سنتزی در بسته نرم‌افزاری فلوئنت [۳۳] اجرا شده است و برای رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ دارای ورودی نگاشتی و بدون آشفتگی ورودی از کد منبع باز این فوم [۳۴-۳۶] استفاده شده است. این فوم بر پایه روش حجم محدود بوده و به‌صورت منبع باز است که قابلیت توسعه معادلات، شرایط مرزی و روش‌های حل مختلف بر مبنای برنامه‌نویسی شیء‌گرا به زبان ++C را در اختیار کاربران تحقیقاتی قرار می‌دهد.

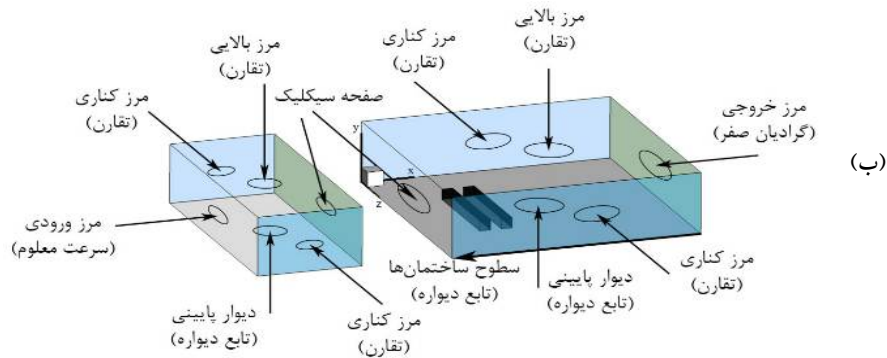
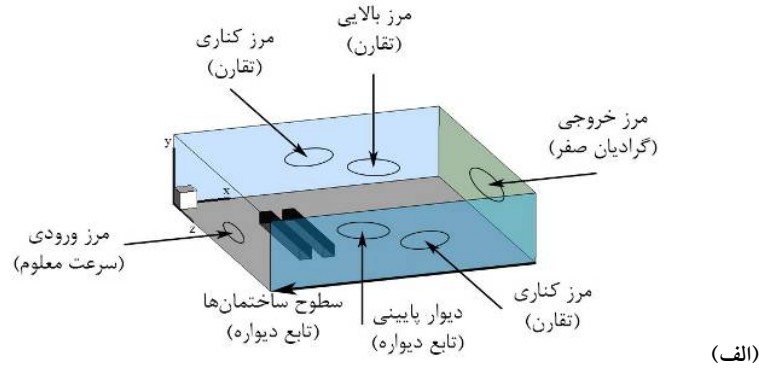
در مطالعه حاضر، اندازه گام زمانی بر مبنای معیار عدد کورانت،  $Co = \frac{|u|\Delta t}{\Delta x}$ ، تعیین می‌شود که برای داشتن محاسبات پایدار باید کمتر از ۱ باشد. به‌منظور حل دقیق ویژگی‌های جریان، محاسبات با سه گام زمانی مختلف ۰/۰۰۰۴، ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۲ که به‌ترتیب متناظر با اعداد کورانت حداکثر تقریباً ۰/۲، ۰/۵ و ۱ هستند، انجام شده‌اند. مشاهده می‌شود که با کاهش عدد کورانت به کمتر از ۰/۵، بهبود قابل توجهی در نتایج حاصل نمی‌شود. در نتیجه گام زمانی ۰/۰۰۱ متناظر با عدد کورانت حداکثر تقریباً برابر با ۰/۵ در تمامی محاسبات انتخاب شده است. هر شبیه‌سازی به دو مرحله مختلف تقسیم می‌شود. مرحله اول شامل حل اولیه در هر حالت است تا زمانی که شرایط گذرای اولیه از حل کاملاً زدوده شده و جریان توسعه یابد. این مرحله تقریباً به ۱۰۰۰۰ گام زمانی نیاز دارد. مرحله دوم حل شامل متوسط‌گیری زمانی و جمع‌آوری مؤلفه‌های آماری برای



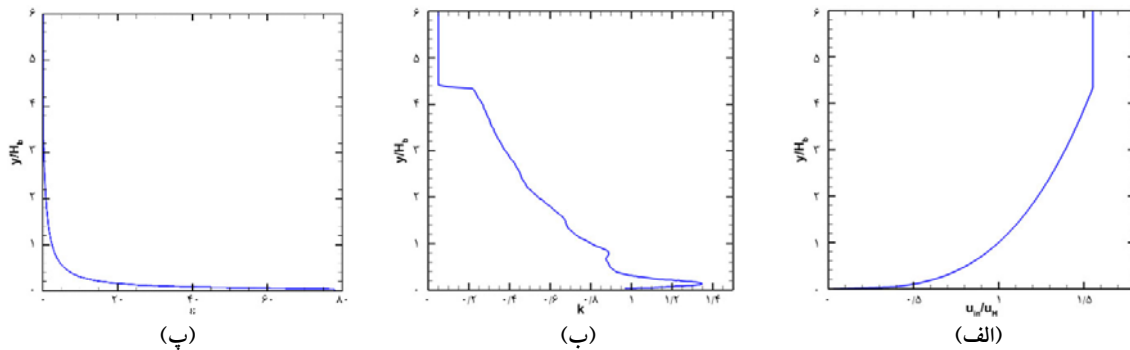
شکل ۴- کانتورهای  $y_p^+$  بر روی الف) دیوار سمت راست ساختمان اول، ب) سقف ساختمان اول، پ) کف دره خیابانی، ت) دیوار پشتی ساختمان اول، ث) دیوار جلویی ساختمان اول و ج) دیوار جلویی ساختمان دوم

برای اطمینان از کافی بودن این زمان برای متوسط‌گیری، کمیت‌های متوسط‌گیری شده در گام‌های زمانی ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ بعد از مرحله اول در چند نقطه در داخل ناحیه محاسباتی در اطراف ساختمان‌ها با یکدیگر مقایسه

تمامی کمیت‌های مورد نیاز است که این مرحله شامل ۳۰۰۰۰ گام زمانی آخر برای تمامی شرایط مرزی ورودی در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ است. این زمان معادل با ۵۱ بار جارو کردن کامل جریان از درون ناحیه محاسباتی است.



شکل ۵- شرایط مرزی جریان در اطراف یک دره خیابانی ساده برای الف) رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با ورودی‌های گردابه، سنتزی و ب) رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با روش ورودی نگاهی و بدون آشفتگی ورودی



شکل ۶- پروفیل‌های ورودی جریان براساس آزمایش تجربی تونل باد گرومکه و همکاران [۲۳] الف) سرعت متوسط، ب) انرژی جنبشی آشفتگی و پ) نرخ اضمحلال انرژی جنبشی محاسبه شده

گام‌های زمانی ۲۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ بعد از مرحله اول تقریباً برهم منطبق هستند. در نتیجه، استقلال نتایج از زمان انتخابی برای متوسط‌گیری، در گام زمانی ۳۰۰۰۰ یا  $t=30s$  بعد از مرحله اول به دست می‌آید.

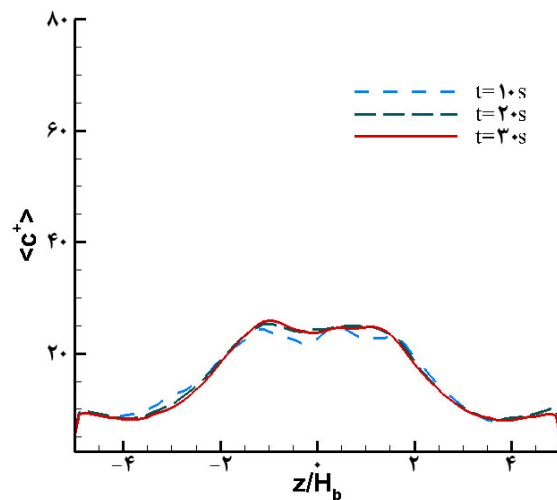
شده‌اند. برای مثال، شکل (۷) پروفیل‌های غلظت متوسط بی‌بعد بر روی دیوار بادپناه ساختمان اول در ارتفاع  $y/H_b = 0.5$  را برای روش گردابه در زمان‌های  $t=10s$ ،  $t=20s$  و  $t=30s$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، نتایج در

جدول ۲- مشخصات روش محاسباتی

الگوریتم پیرو	الگوریتم ارتباط سرعت و فشار
روش تفاضلی رو به عقب مرتبه دوم زمانی	گسسته‌سازی زمانی
روش تفاضل مرکزی محدود شده	گسسته‌سازی مکانی
مدل اسماگورینسکی دینامیکی	مدل مقیاس زیرشبکه
$1 \times 10^{-3}$ ثانیه	گام زمانی
۳۰ ثانیه (معادل ۳۰۰۰۰ گام زمانی)	زمان نمونه‌گیری از مؤلفه‌های آماری
۰/۵	عدد اشمیت آشفتگی مقیاس زیرشبکه

پایین حرکت می‌کند، باعث می‌شود تا جریان‌های مجاور نیز به سمت پایین متمایل شوند. نتیجه این عمل، حرکت رو به پایین جریان اصلی در نزدیکی دیوار بادگیر ساختمان دوم است که شروعی برای تشکیل یک گردابه است. این گردابه به گردابه دره معروف است. این گردابه ساعتگرد در میانه دره خیابانی تشکیل می‌شود که قطری برابر با عرض دره خیابانی دارد. یک پدیده مشابه نیز در دیوارهای جانبی رخ می‌دهد. در این دیوارها جدایی جریانی رخ داده که باعث ایجاد گردابه‌هایی در گوشه‌های دره خیابانی می‌شود که به گردابه‌های گوشه معروف هستند. نمای کلی گردابه دره و گردابه گوشه در مطالعه گرومکه و همکاران [۲۳] در شکل (۸) نشان داده شده است. براساس نتایج هانتز و همکاران [۳۷]، فقط برای دره‌های خیابانی که  $L/H_b > 7$  است در میانه دره خیابانی، گردابه دره به وجود می‌آید.

با مقایسه این الگوهای جریان با شکل (۹) که خطوط جریان در اطراف ساختمان‌ها برای روش‌های مختلف تولید آشفتگی در نمای روبرو در صفحه  $z/H_b = 0.5$  را نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که روش نگاشتی، گردابه نعل اسبی را نتوانسته پیش‌بینی کند ولی دیگر مدل‌ها این ساختار را مدل کرده‌اند. علاوه بر این، روش سنتزی و بدون آشفتگی ورودی، ناحیه دنباله را به خوبی تخمین زده‌اند. با توجه به اینکه در این مطالعه نسبت  $L/H_b = 10$  است، تمامی شبیه‌سازی‌ها نتوانسته‌اند گردابه دره را پیش‌بینی نمایند.

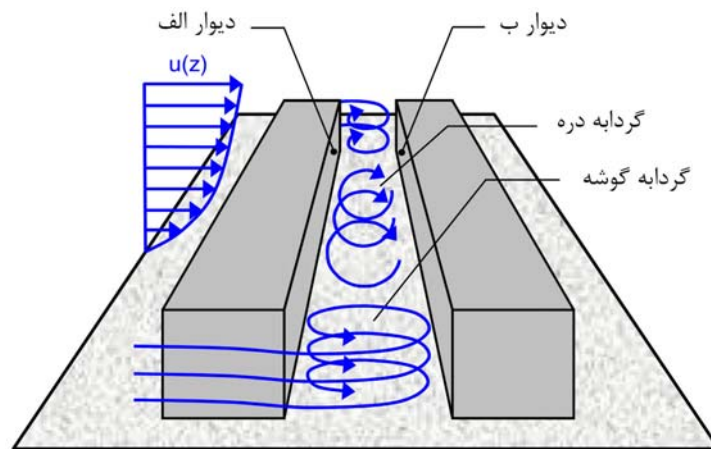


شکل ۷- پروفیل‌های غلظت متوسط بی‌بعد بر روی دیوار بادپناه ساختمان اول در ارتفاع  $y/H_b = 0.5$  برای روش گردابه در زمان‌های  $t=10s$ ،  $t=20s$  و  $t=30s$

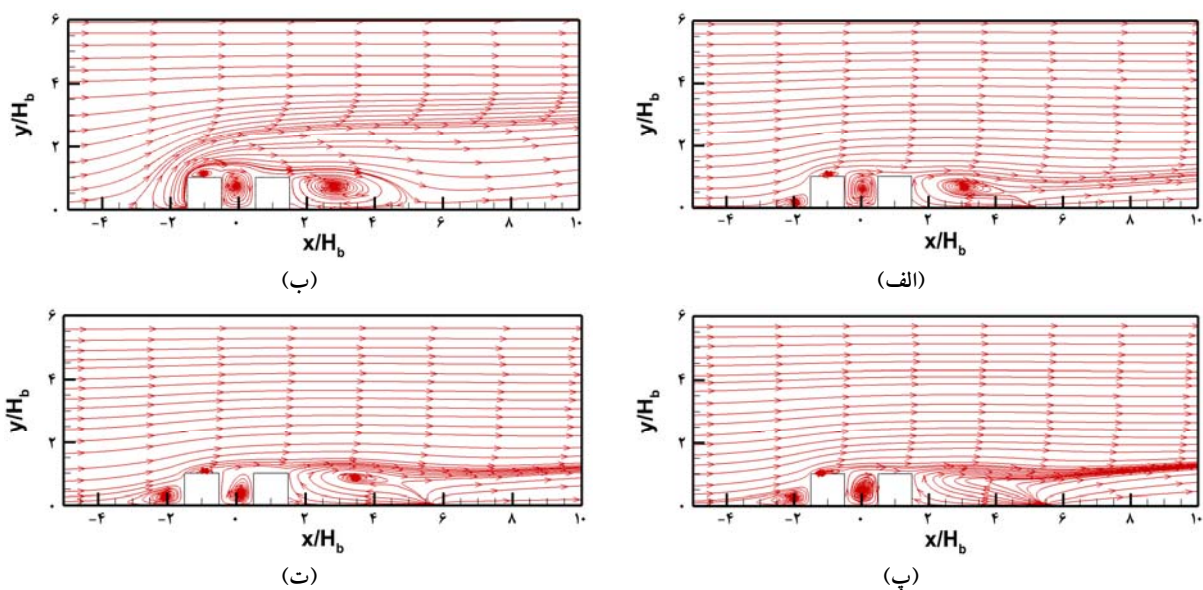
### ۳- نتایج

#### ۳-۱- میدان سرعت

با توجه به مراجع [۲۳ و ۳۷]، الگوی صحیح جریان در اطراف یک دره خیابانی به این صورت است که یک گردابه در قسمت پایینی دیوار بادگیر ساختمان اول شکل می‌گیرد که نشان‌دهنده گردابه نعل اسبی<sup>۱۰</sup> است. ناحیه دنباله<sup>۱۱</sup> نیز بعد از ساختمان دوم به وجود می‌آید. همچنین در بالای سقف ساختمان اول حباب جدایی<sup>۱۲</sup> تشکیل می‌شود. هنگامی که جریان جدا شده از سقف ساختمان اول به سمت



شکل ۸- ساختار گردابه دره و گردابه گوشه [۲۳]



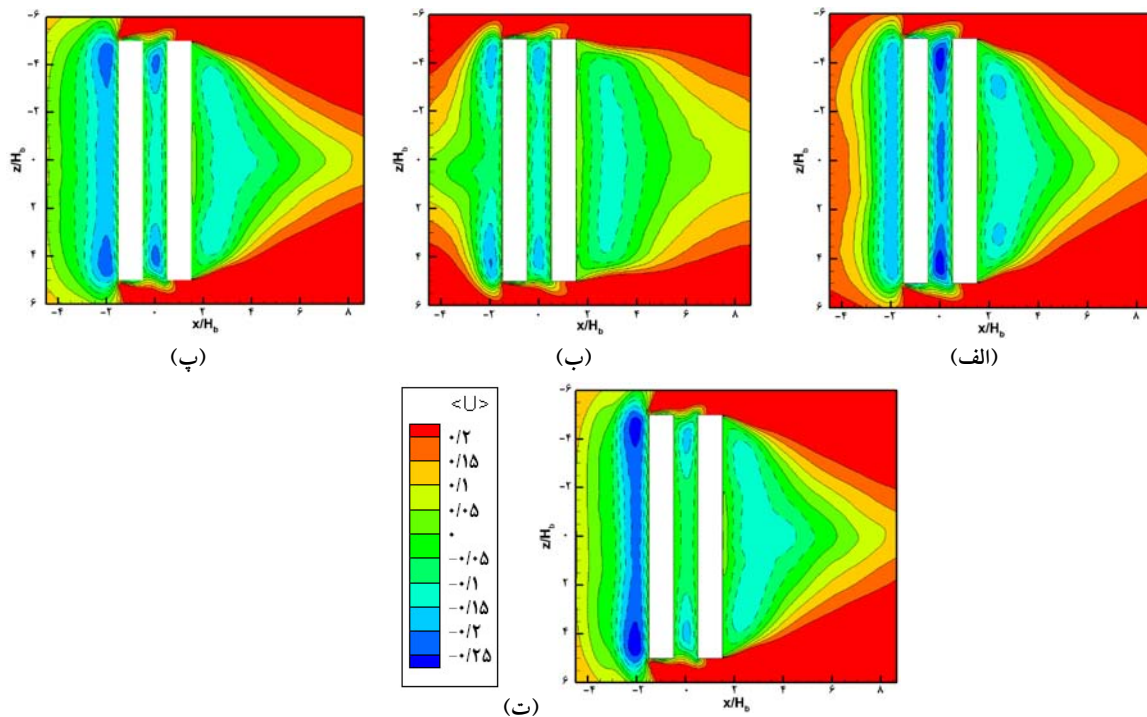
شکل ۹- خطوط جریان اطراف ساختمانها در نمای روبرو در صفحه  $z/H_b = 0.5$  برای روش

(الف) گردابه، (ب) نگاهی، (پ) سنتزی و (ت) بدون آشفتگی ورودی

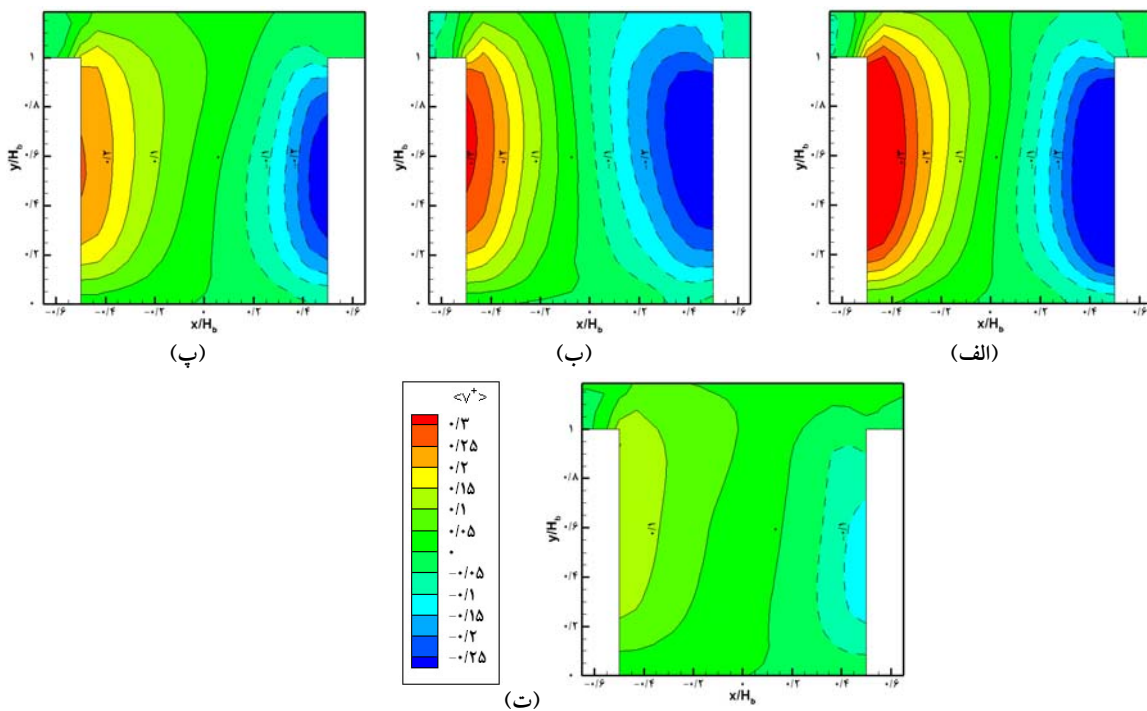
کناره‌های دره به دلیل گردابه گوشه بوده و جریان برگشتی موجود در داخل دره واقع در میانه دره به دلیل گردابه دره است. جریان برگشتی واقع در پشت ساختمان دوم نیز به سبب ناحیه دنباله ایجاد شده است.

شکل (۱۱) نشان‌دهنده کانتورهای سرعت عمودی متوسط بی‌بعد،  $\langle v^+ \rangle = \langle v \rangle / u_H$ ، در داخل دره خیابانی در صفحه  $z/H_b = 0.5$  برای روش‌های مختلف تولید آشفتگی ورودی

شکل (۱۰) نشان‌دهنده کانتورهای سرعت افقی متوسط بی‌بعد،  $\langle u^+ \rangle = \langle u \rangle / u_H$ ، بر روی کف دره خیابانی برای روش‌های مختلف تولید آشفتگی ورودی است. در این شکل‌ها مشخص است که در نزدیکی ساختمان‌ها تغییرات سرعت زیادی وجود دارد. قبل از ساختمان اول، سرعت کاهش یافته و جریان برگشتی نیز پیش‌بینی شده است که به دلیل وجود گردابه نعل اسبی است. جریان برگشتی موجود در داخل دره واقع در



شکل ۱۰- کانتورهای سرعت افقی متوسط بی‌بعد بر روی کف دره خیابانی برای روش الف (گردابه، ب) نگاهی، پ) ستیزی و ت) بدون آشفتگی ورودی



شکل ۱۱- کانتورهای سرعت عمودی متوسط بی‌بعد در داخل دره خیابانی در صفحه  $z/H_0 = 0.5$  برای روش

الف) گردابه، ب) نگاهی، پ) ستیزی و ت) بدون آشفتگی ورودی



است. با توجه به شکل‌های بالا، یک جریان رو به پایین در مقابل دیوار بادگیر ساختمان دوم ( $0 \leq x/H_b \leq 0.5$ ) و یک جریان رو به بالا در مقابل دیوار بادپناه ساختمان اول ( $-0.5 \leq x/H_b \leq 0$ ) وجود دارد که این سرعت‌های مثبت و منفی تا بالای دره خیابانی ادامه دارند و یکی از دلایل تهویه هوای دره خیابانی هستند. همچنین با توجه شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که اندازه سرعت  $\langle v^+ \rangle$  در راستای  $+y$ ، کمی بیشتر از اندازه سرعت  $\langle v^+ \rangle$  در راستای  $-y$  است و ماکزیمم سرعت بر روی این دیواره‌ها حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد  $u_H$  است. این سرعت‌ها نشان‌دهنده وجود گردابه دره نیز هستند.

### ۳-۲- میدان غلظت

در این مطالعه، غلظت توسط رابطه (۲۴) بی‌بعد می‌شود که حاصل آن غلظت متوسط بی‌بعد،  $\langle c^+ \rangle$ ، است:

$$\langle c^+ \rangle = \frac{u_H H_b \langle c \rangle}{Q/l} \quad (24)$$

که در آن  $\langle c \rangle$  غلظت حجمی متوسط،  $Q$  شدت منبع آلاینده،  $H_b$  ارتفاع ساختمان و  $u_H$  سرعت ورودی در ارتفاع ساختمان و  $l$  طول منبع آلاینده در جهت عرضی است.

شکل‌های (۱۲) و (۱۳)، کانتورهای غلظت متوسط بی‌بعد،  $\langle c^+ \rangle$ ، را بر روی دیواره بادپناه ساختمان اول (دیوار الف) و دیوار بادگیر ساختمان دوم (دیوار ب) برای روش‌های مختلف تولید آشفستگی ورودی و همچنین نتایج تونل باد گرومکه و همکاران [۲۳] نشان می‌دهند.

همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، دو مشخصه بارز در توزیع آلاینده‌ها در دیواره‌های دره خیابانی وجود دارد:

الف) غلظت متوسط در دیوار بادپناه ساختمان اول حدود ۴ برابر دیوار بادگیر ساختمان دوم است.

ب) غلظت آلاینده‌ها با حرکت به سمت دو انتهای دره

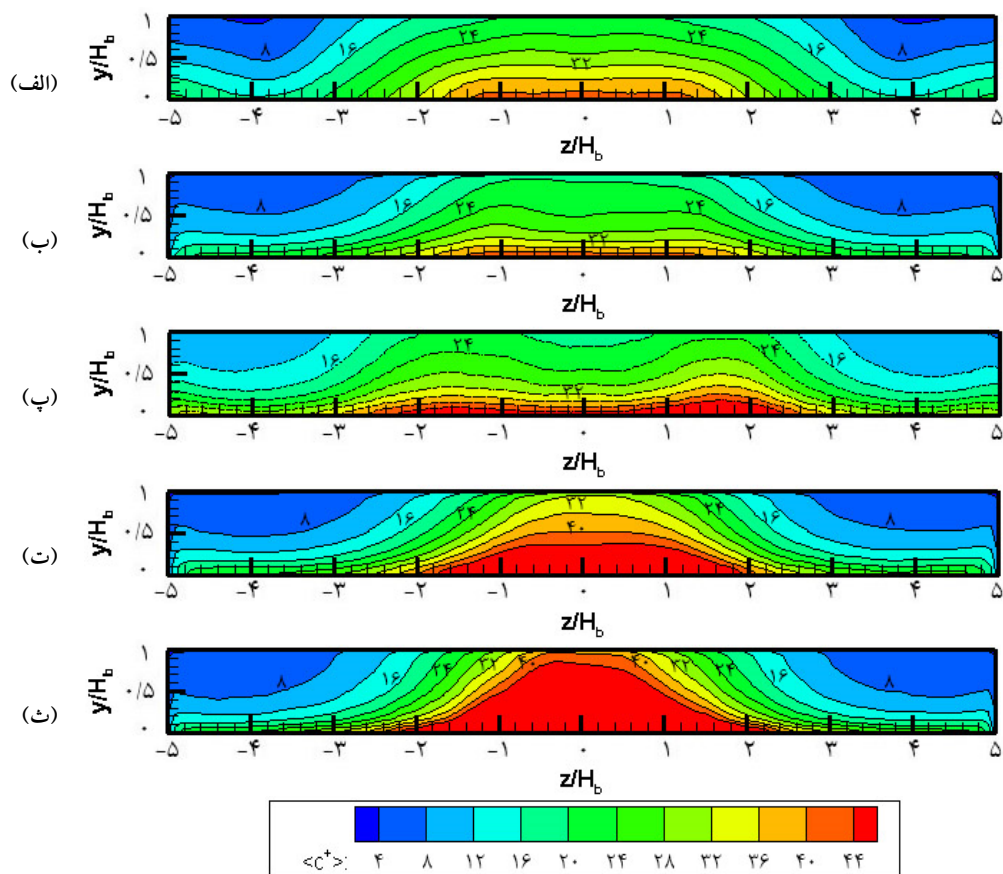
خیابانی کاهش می‌یابد.

اولین مشخصه به دلیل غالب بودن ساختار گردابه دره است که آلاینده‌ها را از دیوار بادگیر ساختمان دوم به سمت دیوار بادپناه ساختمان اول هدایت می‌کند و در آنجا انباشته می‌کند. دومین مشخصه به دلیل اثر دو گردابه گوشه صورت می‌گیرد که باعث می‌شوند تا تهویه طبیعی بیشتری از انتهای دره صورت گیرد.

با توجه به این شکل‌ها، الگوی کلی توزیع غلظت برای تمامی روش‌ها شبیه به نتایج تجربی است. با این حال تمامی روش‌ها به جز روش‌های گردابه و نگاشتی، غلظت بر روی دیوار (الف) را بیشتر از نتایج تجربی پیش‌بینی نموده‌اند. روش گردابه اندکی مقدار غلظت را کمتر از نتایج تجربی پیش‌بینی کرده است ولی الگو را به بهترین شکل پیش‌بینی کرده است. روش نگاشتی نیز در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در قسمت میانی دیوار (الف) اندکی خطا دارد.

شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب نشان‌دهنده پروفیل‌های غلظت متوسط بی‌بعد،  $\langle c^+ \rangle$ ، بر روی شش ارتفاع مختلف واقع بر دیواره‌های (الف) و (ب) برای روش‌های مختلف تولید آشفستگی ورودی در مقایسه با نتایج تجربی [۲۳] هستند. در این شکل‌ها، نمادهای *Synth.*، *Vortex*، *Mapping*، *NoPerturb.*، به ترتیب بیانگر روش‌های گردابه، سنتزی، بدون آشفستگی ورودی و نگاشتی هستند. برای بررسی این شکل‌ها ابتدا شکل‌ها به دو بخش  $y/H_b \neq 0$  و  $y/H_b = 0$  تقسیم شده و هر قسمت به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با توجه به شکل (۱۴)، تمامی روش‌های تولید آشفستگی ورودی به جز روش نگاشتی با دور شدن از سطح زمین (ارتفاع‌های بالاتر از  $y/H_b = 0$ ) نتایج یکسانی را در گوشه‌های دره خیابانی پیش‌بینی نموده‌اند که با نتایج تجربی نیز هم‌خوانی دارد. روش نگاشتی مقادیر غلظت را در این ناحیه بیشتر از نتایج تجربی تخمین می‌زند. در میانه دره خیابانی، روش گردابه الگویی مشابه با نتایج تجربی دارد ولی



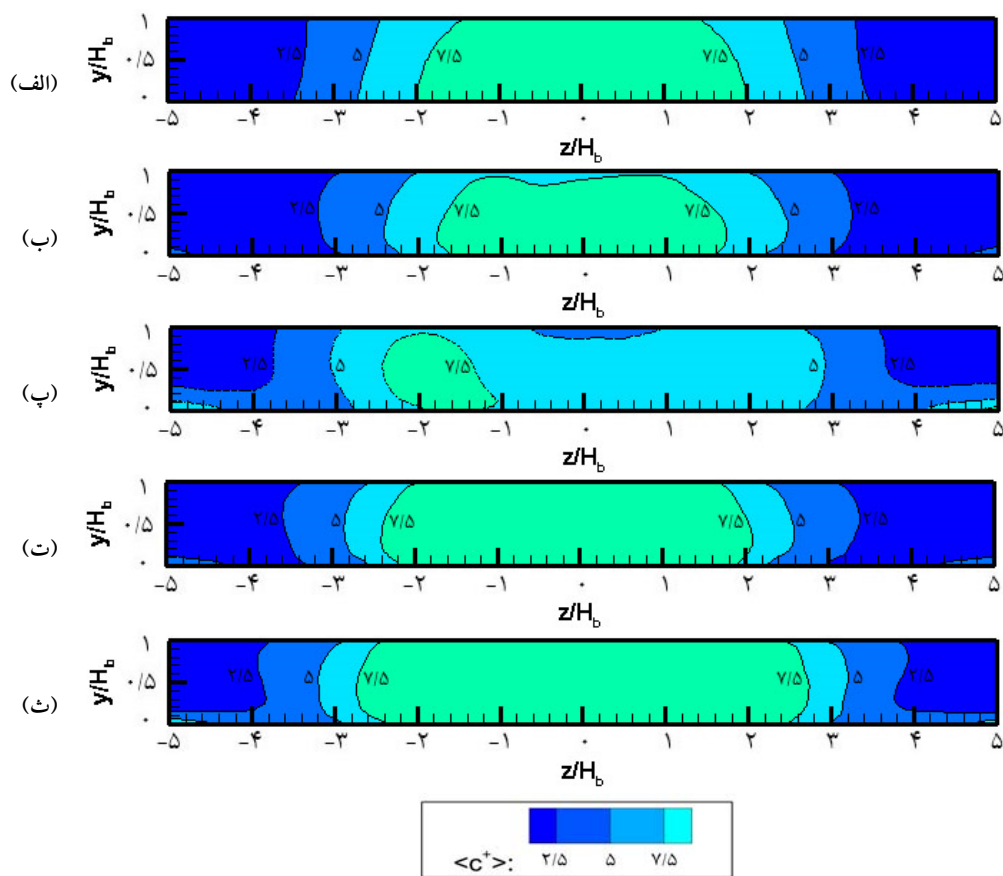
شکل ۱۲- کانتورهای غلظت متوسط بی‌بعد بر روی دیوار بادپناه ساختمان اول برای روش (الف) تجربی [۲۳]، (ب) گردابه، (پ) نگاشتی، (ت) سنتزی و (ث) بدون آشفته‌گی ورودی

در میانه دره خیابانی، نتایج روش گردابه بر نتایج تجربی منطبق است و سایر روش‌ها، مقادیر غلظت بالاتری را در این ناحیه پیش‌بینی نموده‌اند.

در شکل (۱۵) برای ارتفاع‌های بالاتر از  $y/H_b = 0$ ، در قسمت گوشه دره خیابانی، نتایج روش‌های گردابه و سنتزی بر نتایج تجربی منطبق هستند. روش‌های بدون آشفته‌گی ورودی و نگاشتی مقادیر زیادتری را برای غلظت بی‌بعد در این ناحیه تخمین زده‌اند. همانند دیوار بادپناه ساختمان اول، در میانه این دیوار نیز روش گردابه، الگوی نتایج تجربی را به‌خوبی مدل کرده است ولی مقادیر غلظت را کمتر از نتایج تجربی پیش‌بینی نموده است. روش‌های سنتزی و بدون آشفته‌گی ورودی نیز مقادیر بیشتری را نسبت به نتایج تجربی

مقادیر غلظت را کمتر از نتایج تجربی پیش‌بینی کرده است. درحالی‌که روش‌های سنتزی و بدون آشفته‌گی ورودی، غلظت بالایی را در این دیوار به‌دست آورده‌اند که با افزایش ارتفاع، خطای آنها کمتر می‌شود. مقادیر به‌دست‌آمده توسط روش نگاشتی نیز با نتایج تجربی برابری دارد. این روش در تخمین الگوی پروفیل‌ها خطا دارد به‌گونه‌ای که پروفیل‌های این روش متقارن نشده است.

اما بر روی سطح زمین ( $y/H_b = 0$ ) نتایج کمی متفاوت است. در ارتفاع صفر و در گوشه‌های دره خیابانی، تمامی روش‌های تولید آشفته‌گی ورودی، میزان غلظت را بیشتر از نتایج تجربی تخمین زده‌اند. به‌گونه‌ای که کمترین خطا برای روش گردابه و بیشترین خطا مربوط به روش نگاشتی است.



شکل ۱۳- کانتورهای غلظت متوسط بی بعد بر روی دیوار بادگیر ساختمان دوم برای روش (الف) تجربی [۲۳]، (ب) گردابه، (پ) نگاشتی، (ت) سنتزی و (ث) بدون آشفتگی ورودی

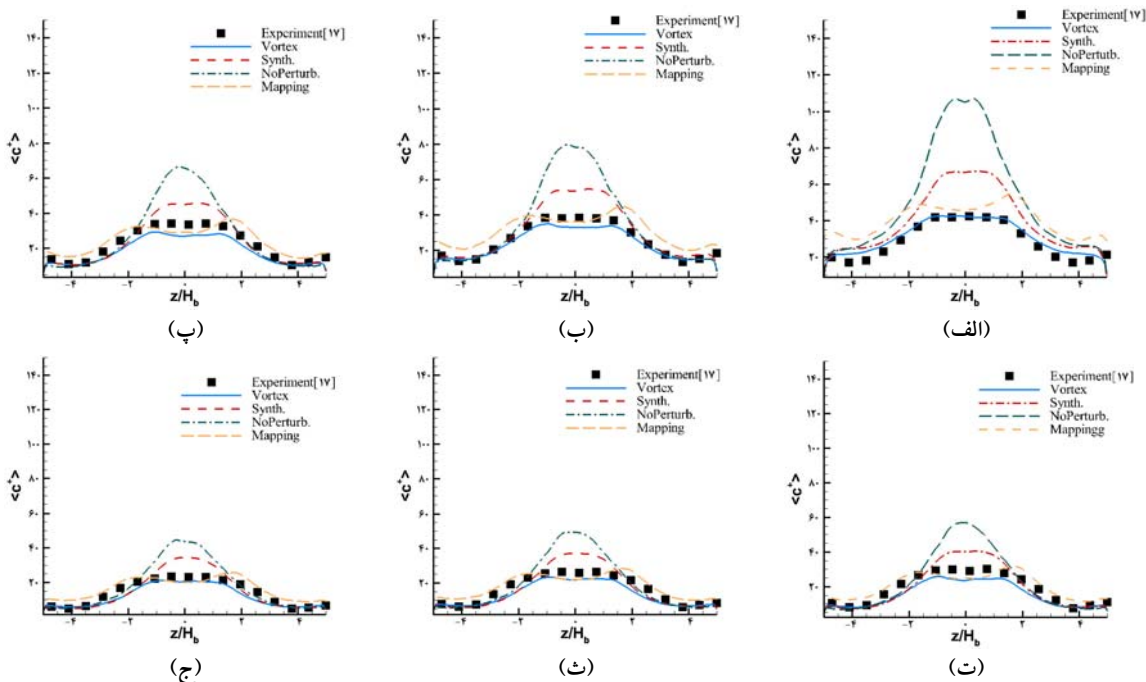
به منظور بررسی دقت روش‌های مختلف تولید آشفتگی ورودی، کانتورهای خطای نسبی موضعی روش‌های مختلف برای دیوار بادپناه ساختمان اول و دیوار بادگیر ساختمان دوم در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده‌اند. همچنین میانگین این خطاهای نسبی برای روش‌های مختلف در جدول (۳) بیان شده‌اند. مقدار خطای نسبی موضعی غلظت بی بعد متوسط، R.E.، به صورت زیر تعریف شده است:

$$R.E. \equiv \left| \frac{\langle c^+_{Num} \rangle - \langle c^+_{Exp} \rangle}{\langle c^+_{Exp} \rangle} \right| \quad (25)$$

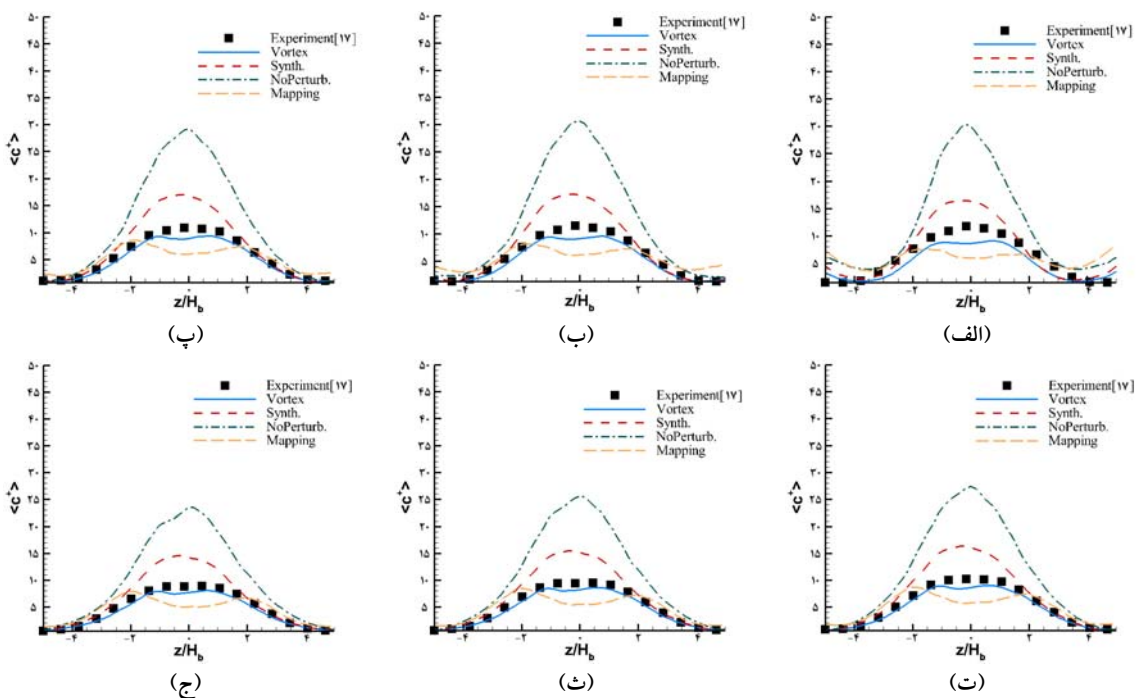
همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، روش گردابه با میانگین خطای نسبی برابر با ۱۶٪ در دیوار بادپناه ساختمان اول و ۱۴٪ در دیوار بادگیر ساختمان دوم دقیق‌ترین روش تولید آشفتگی ورودی است. همچنین

پیش‌بینی نموده‌اند. روش نگاشتی در این دیوار خطای بیشتری نسبت به دیوار بادپناه ساختمان اول برای شبیه‌سازی غلظت بی بعد دارد و مقادیر غلظت را کمتر از نتایج تجربی پیش‌بینی نموده است. همچنین روش نگاشتی در این دیوار نیز نتایج مقارنی به دست نیآورده است.

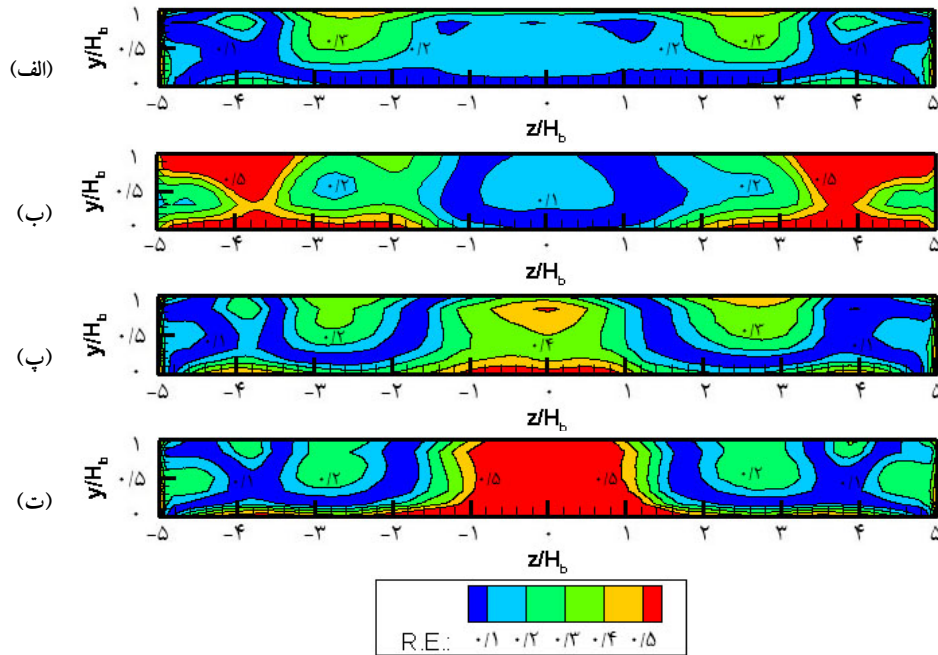
اما بر روی سطح زمین ( $y/H_b = 0$ ) و در گوشه‌های دره خیابانی، تمامی روش‌ها میزان غلظت را بیشتر از نتایج تجربی تخمین زده‌اند، به گونه‌ای که بیشترین خطا مربوط به روش نگاشتی است. در میانه دره خیابانی، نتایج روش‌های گردابه و نگاشتی کمتر از نتایج تجربی هستند در حالی که دیگر روش‌ها مقادیر غلظت بالاتری در این ناحیه پیش‌بینی نموده‌اند.



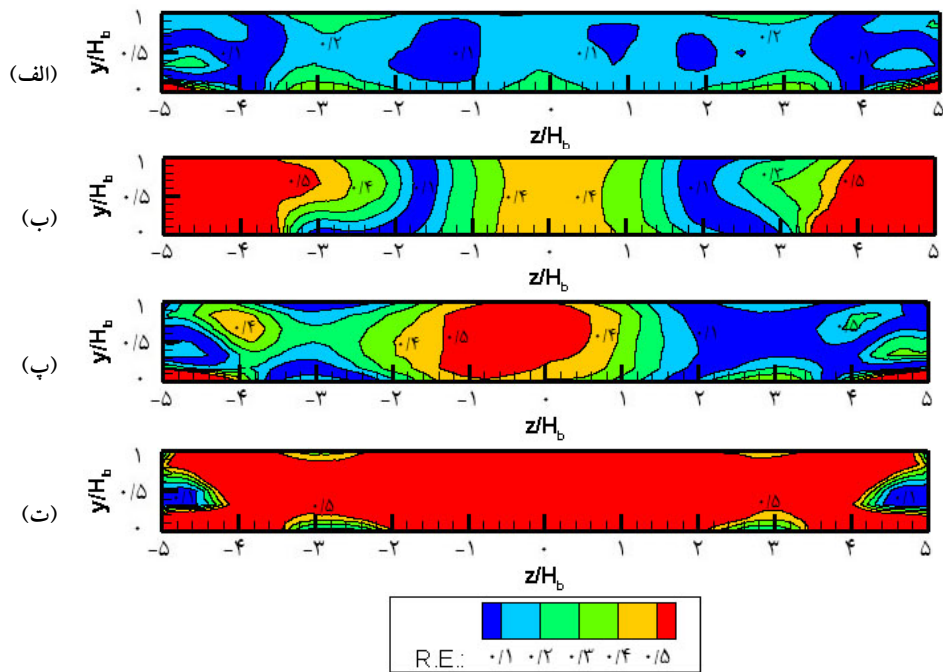
شکل ۱۴- پروفیل‌های غلظت متوسط بی‌بعد بروی دیوار بادپناه ساختمان اول برای روش‌های مختلف تولید آشفتگی ورودی در مقایسه با نتایج تجربی [۲۳] در ارتفاع الف)  $y/H_b = 0$ ، ب)  $y/H_b = 0.167$ ، پ)  $y/H_b = 0.333$ ، ت)  $y/H_b = 0.5$ ، ث)  $y/H_b = 0.667$  و ج)  $y/H_b = 0.833$



شکل ۱۵- پروفیل‌های غلظت متوسط بی‌بعد بروی دیوار بادگیر ساختمان دوم برای روش‌های مختلف تولید آشفتگی ورودی در مقایسه با نتایج تجربی [۲۳] در ارتفاع الف)  $y/H_b = 0$ ، ب)  $y/H_b = 0.167$ ، پ)  $y/H_b = 0.333$ ، ت)  $y/H_b = 0.5$ ، ث)  $y/H_b = 0.667$  و ج)  $y/H_b = 0.833$



شکل ۱۶- کانتورهای خطای نسبی موضعی بر روی دیوار بادپناه ساختمان اول نسبت به نتایج تجربی گرومکه و همکاران [۲۳] برای روش الف) گردابه، ب) نگاهشی، پ) سنتزی و ت) بدون آشفتگی ورودی



شکل ۱۷- کانتورهای خطای نسبی موضعی بر روی دیوار بادگیر ساختمان دوم نسبت به نتایج تجربی گرومکه و همکاران [۲۳] برای روش الف) گردابه، ب) نگاهشی، پ) سنتزی و ت) بدون آشفتگی ورودی

جدول ۳- خطای نسبی میانگین روش‌های مختلف تولید آشفته‌گی ورودی بر روی دیوار بادپناه ساختمان اول و دیوار بادگیر ساختمان دوم نسبت به نتایج تجربی گرومکه و همکاران [۲۳]

روش ورودی	خطای نسبی میانگین بر روی دیوار بادپناه ساختمان اول	خطای نسبی میانگین بر روی دیوار بادگیر ساختمان دوم
روش گردابه	۱۶٪	۱۴٪
روش نگاشتی	۲۹٪	۵۳٪
روش سنتزی	۲۲٪	۲۸٪
روش بدون آشفته‌گی ورودی	۳۳٪	۹۰٪

بزرگتر از روش بدون آشفته‌گی ورودی است.

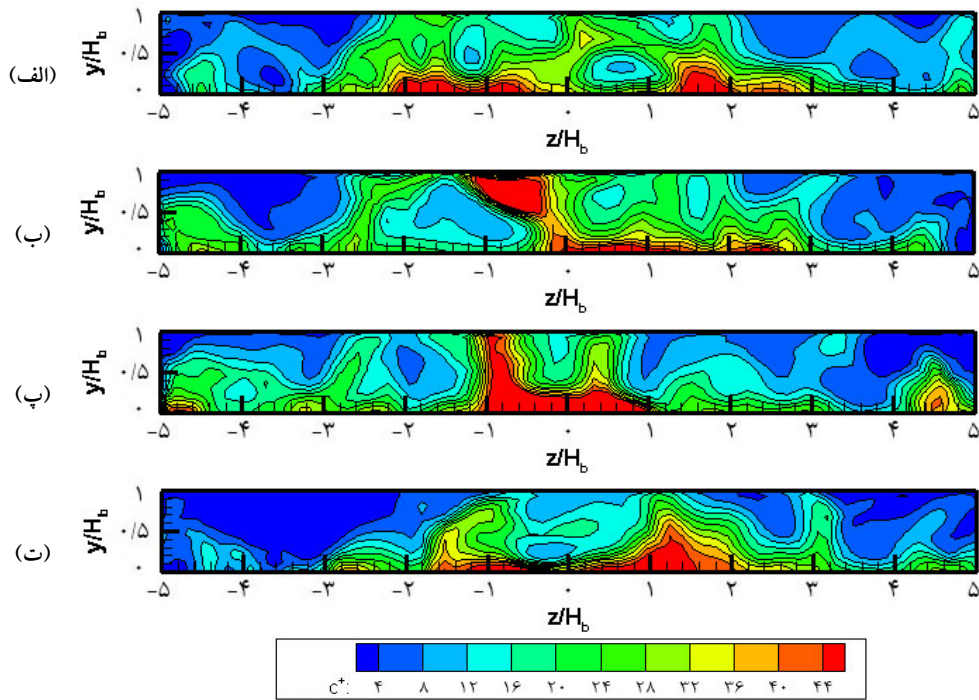
### ۳-۳- هزینه‌های محاسباتی

برای مقایسه روش‌های مختلف، از ۴ هسته پردازنده برای پردازش استفاده شده است و معیار مقایسه، زمان حل ۱۰ گام زمانی است. در جدول (۴) زمان‌های مورد نیاز برای حل ۱۰ گام زمانی، تعداد پارامترهای ورودی لازم و تعداد تکرارها در هر گام زمانی برای هر روش آورده شده‌اند. مقدار زمان لازم برای حل ۱۰ گام زمانی توسط روش بدون آشفته‌گی ورودی برابر با ۱۳۲/۵۱۵ ثانیه به دست آمده است. این زمان برای روش حل سنتزی برابر با ۱۵۴/۵۳۱ ثانیه است و روش گردابه زمانی برابر با ۱۷۴/۶۲۷ ثانیه نیاز دارد. روش نگاشتی نسبت به دیگر روش‌ها زمان بیشتری صرف کرده است که مقدار آن ۴۵۲/۱ ثانیه است. علاوه بر این، با داشتن گام زمانی و معیارهای همگرایی یکسان، تعداد تکرارها در هر گام زمانی در روش نگاشتی بیشتر از سایر روش‌ها است. برای نمونه، مطابق با جدول (۴)، تعداد تکرارها در هر گام زمانی برای روش‌های بدون آشفته‌گی ورودی، سنتزی، گردابه و نگاشتی به ترتیب برابر با ۹، ۱۰، ۱۰ و ۱۲ است. پارامترهای مورد نیاز در ورودی برای هر روش متفاوت است به گونه‌ای که روش بدون آشفته‌گی ورودی فقط نیازمند پارامتر سرعت متوسط در ورودی است. روش نگاشتی علاوه بر سرعت متوسط به انرژی جنبشی آشفته‌گی در ورودی نیز نیاز دارد. در حالی که روش گردابه، سرعت متوسط،

روش بدون آشفته‌گی ورودی با میانگین خطای نسبی برابر با ۳۳٪ در دیوار بادپناه ساختمان اول و ۹۰٪ در دیوار بادگیر ساختمان دوم کم‌دقت‌ترین روش است.

شکل (۱۸) بیان‌کننده کاتوره‌های غلظت لحظه‌ای بی‌بعد بر روی دیوار بادپناه ساختمان اول برای روش گردابه در زمان‌های  $t=0s$ ،  $t=10s$ ،  $t=20s$  و  $t=30s$  است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل نواحی دارای غلظت بالای آلاینده‌ها در هر گام زمانی تغییر زیادی می‌کند. این موضوع نشان‌دهنده این است که پراکنندگی آلاینده‌ها پیرامون ساختمان‌ها به شدت ناپایا است.

شکل (۱۹) تاریخچه زمانی سیگنال‌های نوسانات سرعت عمودی بی‌بعد  $\langle v' \rangle / u_H$  و نوسانات غلظت بی‌بعد  $(C^{++})$  را برحسب زمان بی‌بعد  $(t^* = t \times u_H / H_b)$  در وسط دره خیابانی در نقطه‌ای با موقعیت  $x/H_b = 0$ ،  $y/H_b = 0/5$  و  $z/H_b = 0/5$  برای روش‌های مختلف تولید آشفته‌گی ورودی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، بیشترین کمترین نوسانات سرعت عمودی و غلظت بی‌بعد به ترتیب توسط روش گردابه و روش بدون آشفته‌گی ورودی پیش‌بینی می‌شود. برای مثال، بررسی انحراف معیار نوسانات سرعت عمودی  $(\sigma_v)$  و غلظت بی‌بعد  $(\sigma_c)$  برای روش گردابه در شکل‌های (۱۹-الف) و (۱۹-ب) و مقایسه آنها با روش بدون آشفته‌گی ورودی در شکل‌های (۱۹-چ) و (۱۹-ح) نشان می‌دهد که نوسانات سرعت عمودی و غلظت بی‌بعد برای روش گردابه به ترتیب تقریباً ۸۲ درصد و ۲۱۱ درصد



شکل ۱۸- کانتورهای غلظت لحظه‌ای بی‌بعد بر روی دیوار بادپناه ساختمان اول برای روش گردابه در زمان  
 (الف)  $t=0s$ ، (ب)  $t=10s$ ، (پ)  $t=20s$  و (ت)  $t=30s$

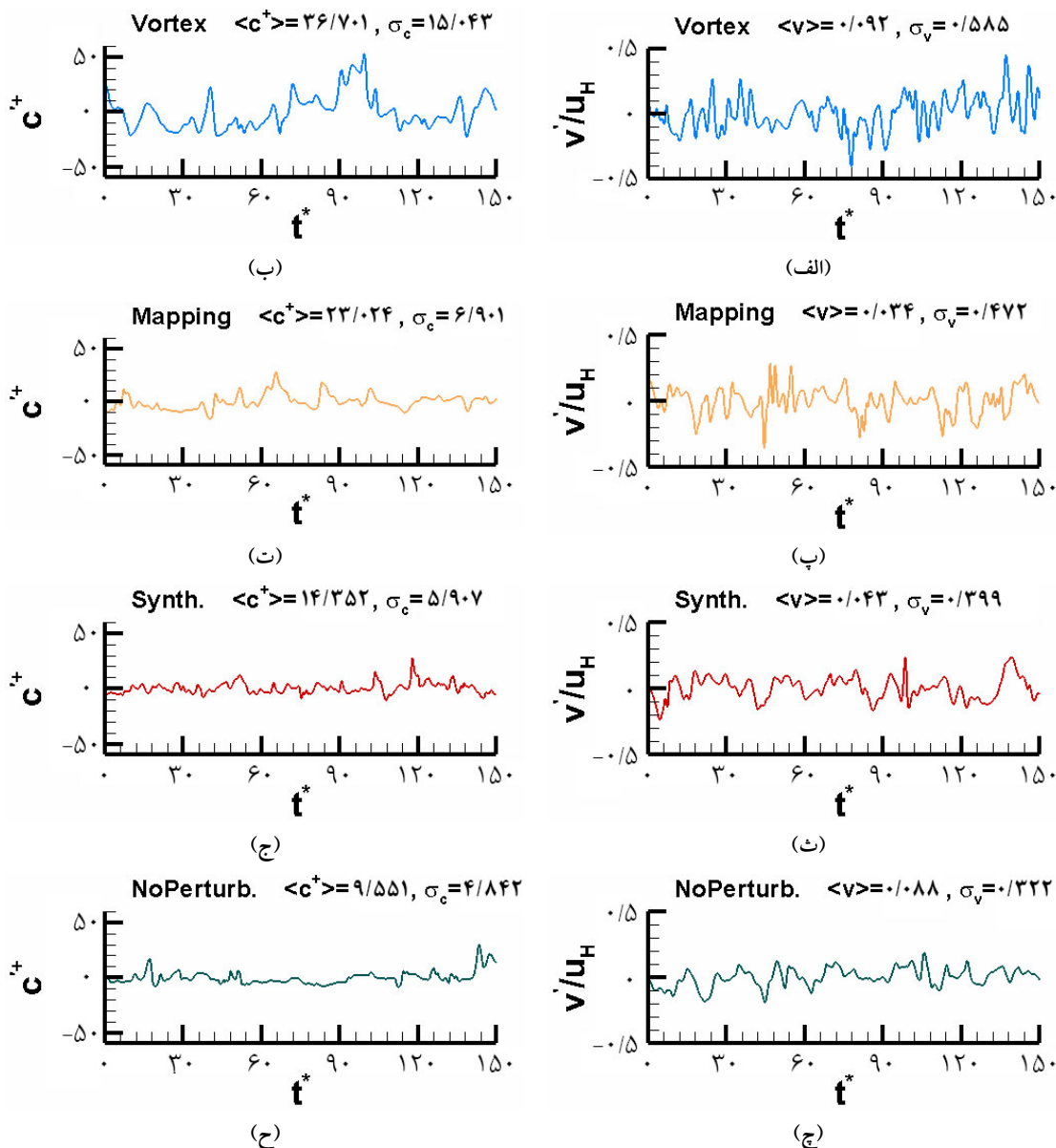
جدول ۴- زمان اجرا (ثانیه) برای ۱۰ گام زمانی، تعداد تکرارها در هر گام زمانی و تعداد پارامترهای ورودی موردنیاز برای روش‌های تولید آشفته‌گی ورودی مختلف

روش تولید آشفته‌گی ورودی	زمان اجرا برای ۱۰ گام زمانی	تعداد تکرارها در هر گام زمانی	تعداد پارامترهای ورودی
روش گردابه	۱۷۴/۶۲۷	۱۰	۶
روش نگاشتی	۴۵۲/۱	۱۲	۲
روش سنتزی	۱۵۴/۵۳۱	۱۰	۹
روش بدون آشفته‌گی ورودی	۱۳۲/۵۱۵	۹	۱

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، پراکندگی آلاینده‌ها پیرامون یک دره خیابانی توسط روش‌های مختلف تولید آشفته‌گی ورودی در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ شبیه‌سازی شده است. نتایج این روش‌ها برای پیش‌بینی میدان سرعت و میدان غلظت نسبت به نتایج تجربی [۲۳] با یکدیگر مقایسه شده‌اند و به صورت خلاصه عبارتند از:

انرژی جنبشی آشفته‌گی، نرخ اضمحلال آشفته‌گی و تنش‌های عمودی رینولدز را به‌عنوان ورودی می‌پذیرد. ولی روش سنتزی نه تنها به تمامی پارامترهای ورودی لازم برای روش گردابه نیاز دارد، بلکه علاوه بر آنها از مؤلفه‌های غیرقطری تانسور تنش رینولدز نیز استفاده می‌کند. با این حال، روش سنتزی با اینکه به پارامترهای ورودی بیشتری نسبت به روش گردابه نیاز دارد ولی زمان حل آن کمتر است.



شکل ۱۹- تاریخچه زمانی سیگنال‌های نوسانات سرعت عمودی و غلظت بی‌بعد در وسط دره خیابانی در  $x/H_b = 0, y/H_b = 0.5$  و  $z/H_b = 0.5$  برای روش‌های مختلف تولید آشفتگی ورودی

روش‌ها پیش‌بینی شده‌اند.  
 ۲. یک جریان رو به پایین در مقابل دیوار بادگیر ساختمان دوم و یک جریان رو به بالا در مقابل دیوار بادپناه ساختمان اول وجود دارد که موجب تهویه هوای دره خیابانی می‌شود. اندازه سرعت  $\langle v \rangle$  در راستای  $+y$

۱. یک گردابه دره در میانه دره خیابانی تشکیل شده است که قطری برابر با عرض دره خیابانی دارد که توسط تمامی روش‌ها پیش‌بینی شده است. همچنین در دو قسمت جانبی انتهایی دره خیابانی، دو گردابه گوشه تشکیل شده است که این گردابه‌ها نیز توسط تمامی



۴. روش گردابه با میانگین خطای نسبی برابر با ۱۶٪ در دیوار بادپناه ساختمان اول و ۱۴٪ در دیوار بادگیر ساختمان دوم دقیق‌ترین روش تولید آشفتگی ورودی و روش بدون آشفتگی ورودی با میانگین خطای نسبی برابر با ۳۳٪ در دیوار بادپناه ساختمان اول و ۹۰٪ در دیوار بادگیر ساختمان دوم کم‌دقت‌ترین روش است.

۵. روش بدون آشفتگی ورودی زمان کمتری برای اجرا نیاز دارد. روش سنتزی با اینکه به پارامترهای ورودی بیشتری نسبت به روش گردابه نیاز دارد ولی زمان حل آن کمتر است. روش نگاشتی نیز بیشترین زمان حل را در بین تمامی روش‌های تولید کننده آشفتگی ورودی دارد.

کمی بیشتر از اندازه سرعت  $\langle v \rangle$  در راستای  $y$  است و بیشینه سرعت بر روی این دیوارها حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد  $u_H$  است.

۳. غلظت متوسط در دیوار بادپناه ساختمان اول حدود چهار برابر دیوار بادگیر ساختمان دوم است و آلاینده‌ها با حرکت به سمت دو انتهای دره خیابانی کاهش می‌یابند. همچنین روش گردابه نسبت به سایر روش‌های تولید کننده آشفتگی ورودی، مقدار غلظت را در دو دیوار بادپناه ساختمان اول و بادگیر ساختمان دوم بهتر پیش‌بینی نموده است و تطابق مطلوب‌تری با نتایج تجربی دارد.

## واژه‌نامه

1. computational fluid dynamics
2. Reynolds-averaged Navier–Stokes
3. large eddy simulation
4. correlation
5. street canyon
6. damping function
7. random flow generation
8. european cooperation in science and technology
9. architectural institute of Japan
10. horseshoe vortex
11. Zake
12. separation bubble

## مراجع

1. Blocken, B., Tominaga, Y., and Stathopoulos, T., "CFD Simulation of Micro-Scale Pollutant Dispersion in the Built Environment", *Building and Environment*, Vol. 64, pp. 225-230, 2013.
۲. بازدید طهرانی، ف.، بدآقی، د.، کیامنسوری، م. و جدیدی، م.، "شبیه‌سازی عددی جریان و پراکنش آلاینده‌ها در اطراف ساختمان‌ها در یک دره خیابانی"، سومین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا، شماره ۱۰۸۲، دی ۱۳۹۳.
3. Bazdidi-Tehrani, F., Bodaghi, D., Kiamansouri, M., and Jadidi, M., "Turbulent Schmidt Number Effects on Pollutant Dispersion in a Street Canyon", *The 23rd Annual International Conference on Mechanical Engineering-ISME2015*, Tehran, Iran, May 2015.
4. Bazdidi-Tehrani, F., Mohammadi-Ahmar, A., Kiamansouri, M., and Jadidi, M., "Investigation of Various Non-linear Eddy Viscosity Turbulence Models for Simulating Flow and Pollutant Dispersion on and Around a Cubical Model Building", *Building Simulation*, Vol. 8, No. 2, pp. 149-166, 2015.
5. 윗훤梃佺難di-Tehrani, F., and Jadidi, M., "Large Eddy Simulation of Dispersion Around an Isolated Cubic Building: Evaluation of Localized Dynamic kSGS-Equation Sub-Grid Scale Model", *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 14, No. 3, pp. 303-319, 2014.
6. Bazdidi-Tehrani, F., Ghafouri, A., and Jadidi, M., "Grid Resolution Assessment in Large Eddy Simulation of Dispersion around an Isolated Cubic Building", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 121, pp. 1-15, 2013.
۷. غفوری، ا.، "برآورد تأثیر شرایط نزدیک دیواره و ارزیابی مناسب بودن شبکه در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۰.
8. Xie, Z. T., and Castro, I. P., "Efficient Generation of Inflow Conditions for Large Eddy Simulation of Street-Scale Flows", *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 81, No. 3, pp. 449-470, 2008.
9. Jadidi, M., Bazdidi-Tehrani, F., and Kiamansouri, M., "Dynamic Sub-Grid Scale Turbulent Schmidt Number Approach in Large Eddy Simulation of

- Dispersion around an Isolated Cubical Building”, *Building Simulation*, Vol. 9, No. 2, pp. 183-200, 2016.
10. Jiang, G., Yoshie, R., Shirasawa, T. and Jin, X., “Inflow Turbulence Generation for Large Eddy Simulation in Non-isothermal Boundary Layers”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 104, pp. 369-378, 2012.
  11. Murakami, S., “Overview of Turbulence Models Applied in CWE-1997”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74, pp. 1-24, 1998.
  12. Tamura, T., Okuno, A., and Sugio, Y., “LES Analysis of Turbulent Boundary Layer over 3D Steep Hill Covered with Vegetation”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95, No. 9, pp. 1463-1475, 2007.
  13. Tominaga, Y., Mochida, A., Murakami, S., and Sawaki, S., “Comparison of Various Revised  $k-\epsilon$  Models and LES Applied to Flow Around a High-Rise Building Model with 1: 1: 2 Shape Placed within the Surface Boundary Layer”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 4, pp. 389-411, 2008.
  14. Wang, T., Cao, S., and Ge, Y., “Generation of Inflow Turbulence using the Local Differential Quadrature Method”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 122, pp. 96-104, 2013.
  15. Maruyama, T., “Surface and Inlet Boundary Conditions for the Simulation of Turbulent Boundary Layer over Complex Rough Surfaces”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 81, No. 1, pp. 311-322, 1999.
  16. Kameda, H., and Morikawa, H., “Conditioned Stochastic Processes for Conditional Random Fields”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 120, No. 4, pp. 855-875, 1994.
  17. Mathey, F., Cokljat, D., Bertoglio, J. P., and Sergent, E., “Assessment of the Vortex Method for Large Eddy Simulation Inlet Conditions”, *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, Vol. 6, No. 1, pp. 58-67, 2006.
  18. Smirnov, A., Shi, S., and Celik, I., “Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling”, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 123, No. 2, pp. 359-371, 2001.
  19. Kraichnan, R. H., “Diffusion by a Random Velocity Field”, *Physics of Fluids*, Vol. 13, No. 1, pp. 22-31, 1970.
  20. Lund, T. S., Wu, X., and Squires, K. D., “Generation of Turbulent Inflow Data for Spatially-Developing Boundary Layer Simulations”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 140, No. 2, pp. 233-258, 1998.
  21. Kataoka, H. and Mizuno, M., “Numerical Flow Computation around Aeroelastic 3D Square Cylinder using Inflow Turbulence”, *Wind and Structures*, Vol. 5, No. 2, pp. 379-392, 2002.
  22. Kataoka, H., “Numerical Simulations of a Wind-Induced Vibrating Square Cylinder within Turbulent Boundary Layer”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 10, pp. 1985-1997, 2008.
  23. Gromke, C., Denev, J., and Ruck, B., “Dispersion of Traffic Exhausts in Urban Street Canyons with Tree Plantings-Experimental and Numerical Investigations”, *Proceeding. of the International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena*, Vol. 1, 2007.
  24. Sagaut, P., *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows: An Introduction*, Springer Science & Business Media, 2006.
  25. Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., and Cabot, W. H., “A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model”, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)*, Vol. 3, No. 7, pp. 1760-1765, 1991.
  26. Lilly, D. K., “A Proposed Modification of the Germano Subgrid-scale Closure Method”, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)*, Vol. 4, No. 3, pp. 633-635, 1992.
  27. Tominaga, Y., and Stathopoulos, T., “Numerical Simulation of Dispersion around an Isolated Cubic Building: Model Evaluation of RANS and LES”, *Building and Environment*, Vol. 45, No. 10, pp. 2231-2239, 2010.
  28. Tominaga, Y., and Stathopoulos, T., “CFD Modeling of Pollution Dispersion in a Street Canyon: Comparison between LES and RANS”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, No. 4, pp. 340-348, 2011.
  29. Tominaga, Y., and Stathopoulos, T., “CFD Modeling of Pollution Dispersion in Building Array: Evaluation of Turbulent Scalar Flux Modeling in RANS Model using LES Results”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 104, pp. 484-491, 2012.
  30. Franke, J., Hellsten, A., and Schlunzen, K. H., Carissimo, B., “The COST 732 Best Practice Guideline for CFD Simulation of Flows in the Urban Environment: a Summary”, *International Journal of Environment and Pollution*, Vol. 44, No. 1, pp. 419-427, 2011.
  31. Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., and Shirasawa, T., “AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 10, pp. 1749-1761, 2008.
  32. “GAMBIT 2.4 User’s Guide”, 2007.
  33. “Ansys Fluent 15 Users’ Guide”, *Ansys Fluent Inc*,

- 2014.
34. "OpenFoam, The Open Source CFD Toolbox, Programmer's Guide, Version 2.1.1", *Open CFD Ltd., 9 Albert Road, Caversham, Reading, Berkshire RG4 7AN, UK*. 2011.
35. احمر، ا. م.، "تحلیل پراکندگی آلاینده‌های خروجی از دودکش مدل ساختمان مکعبی توسط مدل‌های آشفتگی k-ε غیرخطی و LES"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۲.
36. Hunter, L. J., Watson, I., and Johnson, G., "Modelling Air Flow Regimes in Urban Canyons", *Energy and Buildings*, Vol. 15, No. 3, pp. 315-324, 1991.
36. بازدید-طهرانی، ف.، احمر، ا. م. و کیامنصوری، م.، "تحلیل دقت مدل‌های مختلف k-ε غیرخطی در پیش‌بینی میدان جریان و پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف یک ساختمان مدل"، *نشریه مهندسی مکانیک مدرس*، سال ۱۴، شماره ۶ ص. ۱۶۵-۱۷۴، ۱۳۹۳.

