مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۶، ص‌ص ۱۶۵-۱۷۴

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل دقت مدل‌های مختلف k-ε غیرخطی در پیش‌بینی میدان جریان و پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف یک ساختمان مدل

فرزاد بازدیدی تهرانی[1*]، اکبر محمدی احمر[2]، محسن کیامنصوری[3]

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، bazdid@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۶ دی ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۳ اسفند ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۲ تیر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

پراکندگی آلاینده‌ها

دینامیک سیالات محاسباتی

اپن‌فوم

مدل‌های k-ε غیرخطی

ساختمان مدل

چکیده

در مقاله حاضر، قابلیت مدل‌های مختلف k-ε غیرخطی برای پیش‌بینی میدان جریان و پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف یک ساختمان مدل مکعبی‌شکل به همراه دودکش واقع در مرکز سقف آن در داخل لایه مرزی آشفته بررسی شد. یک مدل غیرخطی مربعی که توسط نیسیزیما و یوشیزاوا پیشنهاد گردید و دو مدل غیرخطی مکعبی که توسط لین و همکاران و ارهارد و موسیوپولاس ارائه شد، با نتایج مدل k-ε استاندارد و نتایج تجربی موجود مقایسه شدند. تمامی محاسبات انجام شده با استفاده از توسعه برنامه‌نویسی شی‌گراء C++ در بسته نرم‌افزاری اپن‌فوم انجام گرفت که شامل برنامه‌هایی برای حل‌کننده‌های حجم محدود می‌باشد. برای میدان جریان، مدل k-εاستاندارد به لیل اینکه قادر به بازتولید جریان برگشتی بر روی سقف ساختمان مدل نیست نتایج نامطلوبی را پیش‌بینی کرد. در مقابل، مدل‌های غیرخطی به‌دلیل توانایی در پیش‌بینی تنش‌های غیرایزوتروپی، نشان دادند که تنش‌های رینولدز در جهت جریان بر روی سقف غالب هستند. مدل‌های غیرخطی به‌دلیل داشتن جمله‌های مربعی و مکعبی قادر بودند میدان غلظت را بهتر از مدل k-ε استاندارد پیش‌بینی نمایند. مدل مکعبی ارهارد از میان مدل‌های آشفتگی بررسی شده، بهترین توافق را با نتایج تجربی نشان داد. همچنین همه مدل‌های مورد مطالعه پخش میدان غلظت را کمتر از نتایج تجربی پیش‌بینی کردند، ولی نشان داده شده است که مدل‌های غیرخطی این اختلاف را کاهش می‌دهند.

Analysis of various non-linear k–ε models accuracy to predict flow field and pollutant dispersion around a model building

Farzad Bazdidi Tehrani*, Akbar Mohammadi Ahmar, Mohsen Kiamansouri

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 16846-13114 Tehran, Iran, bazdid@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 January 2014
Accepted 22 February 2014
Available Online 13 July 2014

Keywords:
Pollutant Dispersion
Computational Fluid Dynamics (CFD)
Open Foam
Non-Linear k–ε Models
Model Building

ABSTRACT

The present paper investigated the capability of various non-linear k–ε models for predicting flow field and pollutant dispersion around a cubical model building with a stack vent located on its roof center within the turbulent boundary layer. One quadratic model proposed by Nisizima and Yoshizawa, and two cubic models, proposed by Lien et al. and Ehrhard and Moussiopoulos were examined by comparing their simulation results with the wind tunnel data and standard k–ε model. All the computations were performed by using the self-developed object-oriented C++ programming in OpenFOAM CFD package, which contains applications and utilities for finite volume solvers. The standard k–ε model provided inadequate results for the flow field, because it could not reproduce the basic flow structures, such as reverse flow on the roof. By contrast, the non-linear models were able to predict anisotropic stresses and correctly showed the dominant stress over the roof to be the streamwise Reynolds stress. The non-linear models were able to predict the concentration field better than the SKE model due to inclusion of the quadratic and cubic terms. Among the RANS models, the Ehrhard model showed the best agreement with the experimental data. It was shown that concentrations predicted by all turbulence models were less diffusive than those of the experiment, although the non-linear k–ε models have reduced this difference.

۱- مقدمه

در طی دهه‌های گذشته، تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان و پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف ساختمان‌ها به سرعت توسعه یافته است. محققین مختلف، نتایج نسبتاً خوبی را در ناحیه‌هایی که در آن جریان به سطح ساختمان متصل است، به‌دست آورده‌اند، اما برای محاسبه ناحیه‌های سیرکولاسیون مجدد در اطراف ساختمان‌ها و در ناحیه‌هایی که

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

F. Bazdidi Tehrani, A. Mohammadi Ahmar, M. Kiamansouri, Analysis of various non-linear k–ε models accuracy to predict flow field and pollutant dispersion around a model building, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 165-174, 2014 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.8.7]

جدایی اتفاق می‌افتد، توافق میان نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی و تونل باد به‌سختی به‌دست می‌آید[۱].

در میان مدل‌های آشفتگی مختلف، مدل k-ε استاندارد که توسط جونز و لاندر[۲] در سال ۱۹۷۲ ارائه شد، در حال حاضر محبوب‌ترین و قابل اجراترین مدل ناویراستوکس متوسط‌گیری به روش رینولدز (RANS) در محاسبات جریان‌های بدون ساختارهای پیچیده با دقت پیش‌بینی معقول است. مدل k-ε استاندارد از مفهوم لزجت گردابه‌ای خطی ایزوتروپیک بوزینسک[1] استفاده می‌کند، به‌طوری که در این مفهوم، تنش‌های رینولدز به‌صورت خطی متناسب با نرخ کرنش متوسط هستند. این مدل در پیش‌بینی ساختارهای پیچیده آشفتگی در جریان حول ساختمان ناتوان است. این مدل به‌دلیل اینکه مبتنی بر فرض خطی ایزوتروپیک بوزینسک عمل می‌کند دارای ضعف‌های متعددی است که از جمله می‌توان به ناتوانی در حل تنش‌های عمودی غیرایزوتروپی، حساسیت ناکافی یا غیرصحیح به دوران سیستم مرجع، چرخش، انحنای خط جریان، کرنش‌های ثانویه، به‌کار نبستن محدودیت تحقق‌گرایی[2] برای تنش‌های رینولدز در نرخ کرنش‌های بزرگ یعنی نیاز برای مثبت شدن مقادیر ویژه تانسور تنش و در نهایت پیش‌بینی زیاد و دور از واقعیت انرژی جنبشی آشفته در نواحی برخورد و سکون اشاره کرد[۳]. برای تخمین بهتر تولید انرژی جنبشی آشفتگی و طبیعت غیرایزوتروپی جریان، مدل‌های غیرخطی k-ε پیشنهاد شدند. در این مدل‌ها، جمله‌های غیرخطی به رابطه تنش و کرنش اضافه شده و باعث ایجاد یک رابطه کلی برای تنش‌های رینولدز برحسب مولفه‌های نرخ کرنش و ورتیسیته می‌شوند.

مدل‌های لزجت گردابه‌ای غیرخطی ابتدا در سال ۱۹۷۰ به‌وسیله لاملی[۴] معرفی شدند. یوشیزاوا[۵] در سال ۱۹۸۴ با استفاده از دیدگاه آماری و از طریق برهم‌کنش مستقیم دو مقیاسی توانست رابطه‌ای برای تنش‌های رینولدز برحسب چند جمله‌هایی از گرادیان‌های سرعت متوسط از مرتبه مربعی به‌دست آورد. اما می توان گفت که اولین مدل غیرخطی مربعی توسط اسپژیال[۶] در سال ۱۹۸۷ معرفی گردید که مبتنی بر عدم وابستگی به چارچوب مادی[3] بود. مدل ارائه شده توسط اسپژیال دارای مشتقات جابه‌جایی اولدروید برای نرخ کرنش متوسط بود؛ به‌طوری که این جمله‌ها باعث ایجاد مشکلاتی در همگرایی و پایداری این مدل می‌گردیدند. در همین سال نیسیزیما و یوشیزاوا[۷] و به‌طور کامل‌تر در سال ۱۹۸۹ نیسیزیما[۸] مدل مربعی k-ε غیرخطی برای جریان‌های کوئت و داخل کانال و جریان داخل لوله‌های با مقطع مربعی را ارائه نمودند.

شیه و همکاران[۹] در سال ۱۹۹۳ با استفاده از تئوری تغییرناپذیری در مکانیک محیط پیوسته، رابطه‌ای ساختاری برای تنش‌های آشفته به‌دست آوردند. در این مدل، ضرایب چندجمله‌ای به‌صورت تابعی از نسبت مقیاس زمانی آشفتگی به نرخ کرنش متوسط و نرخ چرخش متوسط براساس تحلیل تحقق‌گرایی محاسبه می‌شد. تحقق‌گرایی عبارت است از شرایطی که در آن تنش‌های عمودی آشفتگی $\overline{u_i'^2}$ مثبت باشند و نامساوی شوارز[4] برای تنش‌های برشی یعنی $\overline{u_i'u_j'}^2 \le \overline{u_i'^2+u_j'^2}$ ارضا گردد. تحقق‌گرایی دارای مفهوم ریاضی و فیزیکی است به‌طوری که برای حل هر معادله آشفتگی باید از آن پیروی کرد. این مفهوم نشان‌دهنده کمترین نیازمندی‌هاست برای اینکه از نتایج غیرفیزیکی مدل جلوگیری شود. در سال ۱۹۹۶ یک مدل k-ε غیرخطی مکعبی توسط لین و همکاران[۱۰] ارائه شد که در این مدل، جمله‌های مربعی از مدل رینولدز بالای شیه و همکاران[۹] گرفته شده و با توسعه به مدل مکعبی، برای جریان‌های با عدد رینولدز پایین مورد استفاده قرار گرفت. به‌طوری که برخلاف مدل‌های قبلی، در این مدل تانسورهای ورتیسیته و نرخ کرنش از مرتبه مکعبی بودند. برای توضیح بیشتر می‌توان گفت که مدل‌های مربعی قادر هستند که خواص غیرایزوتروپی جریان ناشی از تنش‌های عمودی را به‌خوبی پیش‌بینی نمایند. در حالی‌که برای درنظر گرفتن انحنای خط جریان و چرخش جریان، این مدل‌ها کارایی چندانی ندارند لذا مدل‌های مکعبی ظهور یافتند. در سال ۲۰۰۰ ارهارد و موسیوپولاس[۱۱] مدل مکعبی جدیدی را توسعه دادند و برای کالیبره کردن ضرایب مدل از جریان حول آرایه‌ای از موانع مکعبی در داخل یک کانال بهره بردند.

کارهای مهمی که در سال‌های اخیر در زمینه بررسی مدل‌های لزجت گردابه‌ای غیرخطی انجام شده است فقط در زمینه بررسی میدان جریان بوده که از میان آن‌ها می‌توان به مقاله ارهارد و موسیوپولاس در سال ۲۰۰۰[۱۱] اشاره کرد. همچنین در سال ۲۰۰۳ رایت و ایسوم[۱۲] مقایسه‌ای از مدل‌های آشفتگی غیرخطی و خطی برای شبیه‌سازی جریان در اطراف یک ساختمان در مقیاس کامل (به‌جای مقیاس تونل باد) انجام دادند. این دو با مقایسه مدل غیرخطی کرافت و مدل‌های خطی دیگر به این نتیجه رسیدند که مدل‌های غیرخطی نتایجی بسیار دقیق و مفید برای مهندسی باد ارائه می‌نماید. در سال ۲۰۱۲ شائو و همکاران[۱۳] عملکرد مدل‌های k-ε غیرخطی برای پیش‌بینی جریان باد در اطراف یک ساختمان بلند با مقیاس ۱:۱:۲ را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که مدل‌های غیرخطی قادر به پیش‌بینی بهتر بازتولید جریان برگشتی در بالای سقف و ریزش ورتکس در پشت ساختمان در محاسبات غیر دائمی هستند. ولی تا به حال در مورد پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف ساختمان‌ها با استفاده از مدل‌های k-ε غیرخطی، کارهای مهمی انجام نشده است.

بازدیدی تهرانی و همکاران[۱۴] به بررسی نقش عدد اشمیت آشفته مقیاس زیرشبکه در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) برای بررسی میدان جریان و پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف یک ساختمان مدل مکعبی پرداختند. تومیناگا و استاتپولوس[۱۵] عملکرد مدل‌های مختلف RANS برای جریان‌های آشفته همراه با انتقال جرم را مورد بررسی قرار دادند. برای تخمین شار آشفتگی در مدل‌های RANS معمولا از فرضیه دیفیوژن گرادیانی که نیازمند تعریف عدد اشمیت آشفتگی می‌باشد، استفاده می‌شود؛ به‌طوری که انتخاب بهینه عدد اشمیت آشفتگی تاثیر زیادی در دقت مدل‌سازی انتقال جرم دارد. آن‌ها گزارش کردند که در ادبیات فن، مقادیر بهینه برای عدد اشمیت آشفتگی بین ۰/۲ تا ۱/۳ گسترده شده است. همچنین بیان کردند که مقدار بهینه برای عدد اشمیت آشفتگی وابستگی زیادی به خصوصیات محلی جریان دارد؛ بنابراین توصیه کردند که مقدار بهینه باید با درنظر گرفتن ساختارهای غالب جریان در هر هندسه انتخاب شود. آن‌ها تاثیر عدد اشمیت آشفتگی را برای جریان حول ساختمان‌ها بررسی و مقدار بهینه ۰/۷ را پیشنهاد کردند.

بازدیدی تهرانی و همکاران[۱۶] به تاثیر تظریف شبکه برای پیش‌بینی دقت رهیافت LES برای پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف یک ساختمان مدل مکعبی پرداختند. بررسی دقت مدل مقیاس زیرشبکه دینامیکی انرژی جنبشی محلی در رهیافت LES برای پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف یک ساختمان مدل مکعبی توسط بازدیدی تهرانی و جدیدی مورد بررسی قرار گرفت[۱۷]. اخیرا ارزیابی روش‌های DES و DDES در شبیه‌سازی جریان آشفته تراکم ناپذیر باد بر روی یک ساختمان توسط جدیدی و حیدری نژاد[۱۸] انجام شد و مدل‌های

1- Isotropic Boussinesq
2- Realizability
3- Material frame-indifference
4- Schwarz' inequality

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.8.7]

مذکور با مدل‌های آشفتگی نظیر اسماگورینسکی و k-ε مقایسه شدند.

تومیناگا و استاتپولوس[۱۹] به بررسی جریان و پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف یک ساختمان مکعبی با استفاده از چهار مدل آشفتگی k-ε شامل مدل k-ε استاندارد، مدل RNG k-ε، مدل k-ε اصلاح‌شده لاندر و کاتو و در نهایت مدل Realizable k-ε پرداختند. نتیجه مهمی که به‌دست آمد این بود که دقت پیش‌بینی میدان سرعت به‌طور قابل توجهی میدان غلظت را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. به‌طورکلی مدل RNG k-ε توافق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی از خود نشان داد و بهترین مدل آشفتگی استفاده شده بود. اخیرا لیو و همکاران[۲۰] عملکرد سه مدل آشفتگی k-ε مختلف شامل k-ε استاندارد، RNG k-ε و Realizable k-ε برای شبیه‌سازی فشار سطحی جریان باد و همچنین میدان غلظت در اطراف یک ساختمان بلند سی و سه طبقه با هندسه‌ای پیچیده را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که توزیع‌های فشار سطحی پیش‌بینی شده توسط دو مدل k-ε اصلاح شده بطور قابل قبولی با داده‌های تجربی تونل باد توافق دارد.

با این حال براساس بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان مقاله حاضر در ادبیات فن محرز شده است که مدل‌های آشفتگی k-ε غیرخطی در اکثر کارهای قبلی تنها برای پیش‌بینی میدان جریان به کار برده شده‌اند و کارایی آن‌ها برای شبیه‌سازی پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف یک ساختمان مدل تا به امروز مورد ارزیابی و تحلیل قرار نگرفته‌اند. در مقاله حاضر بررسی و تحلیل دقت سه مدل مختلف k-ε غیرخطی برای پیش‌بینی میدان جریان و پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف یک ساختمان مدل مکعبی شکل و مقایسه نتایج این مدل‌ها با نتایج تجربی موجود انجام شده است. برنامه‌های کامپیوتری شیءگرا به زبان C++ برای سه مدل مذکور k-ε غیرخطی توسط نویسندگان مقاله حاضر توسعه یافته‌اند و به کتابخانه اپن فوم اضافه گردیده‌اند. همچنین چگونگی بهبود نتایج این مدل‌ها در مقایسه با مدل k-ε استاندارد نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معادلات حاکم متوسط‌گیری شده رینولدز

برای جریان‌های تراکم ناپذیر تحت شرایط عدم وجود نیروهای شناوری (لایه مرزی آشفته خنثی[1]) و بدون انتقال حرارت، معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز حاکم بر جریان سیال و انتقال آلاینده ها عبارت‌اند از[۱]:

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i}=0 \qquad (۱)$$

معادلات ناویر-استوکس:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t}+U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\overline{u_i'u_j'}\right) \qquad (۲)$$

معادله انتقال آلاینده:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+U_i\frac{\partial C}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D\frac{\partial C}{\partial x_i}-\overline{u_i'c'}\right) \qquad (۳)$$

که در آن x_i مختصات کارتزین، t زمان، ρ چگالی و C, P, U_i به‌ترتیب سرعت متوسط، فشار استاتیکی متوسط و غلظت آلاینده متوسط می‌باشند. u_j', u_i' و c' مولفه‌های نوسانی سرعت و آلاینده حول مقدار متوسط آن‌ها است. $\overline{u_i'u_j'}$ تانسور تنش رینولدز، $\overline{u_i'c'}$ شار آشفتگی آلاینده و D ضریب نفوذ[2] مولکولی آرام می‌باشند. معادلات حاکم به‌صورت غیر مزدوج[3] پشت سر هم حل می‌شوند یعنی ابتدا میدان سرعت محاسبه شده و سپس به حل میدان غلظت پرداخته می‌شود.

۳- مدل‌های آشفتگی

۳-۱- مدل‌های لزجت گردابه‌ای خطی و غیرخطی

مدل‌های لزجت گردابه‌ای خطی همانند مدل k-ε استاندارد براساس رابطه خطی ایزوتروپیک بین تنش و نرخ کرنش هستند که توسط بوزینسک[۲] ارائه گردیدند و فرض می‌کنند که شارهای آشفته مجهول $\overline{u_i'u_j'}$ متناسب با نرخ کرنش هستند یعنی:

$$\frac{\overline{u_i'u_j'}}{k}=\frac{2}{3}\delta_{ij}-2\frac{\upsilon_t}{k}S_{ij} \qquad (۴)$$

$$\upsilon_t=C_\mu\frac{k^2}{\epsilon} \qquad (۵)$$

مدل‌های لزجت گردابه‌ای غیرخطی، کلاسی بین مدل‌های لزجت گردابه‌ای خطی و مدل‌های انتقال تنش رینولدز هستند. این مدل‌ها، تنش رینولدز را به‌صورت صریح برحسب یک عبارت جبری شامل جمله‌های تانسوری نرخ کرنش و ورتیسیته بیان می‌کنند. همه مدل‌های غیرخطی در حالت کلی دارای رابطه‌ای پایه به‌صورت زیر می‌باشند[۱۱].

$$\begin{aligned}\frac{\overline{u_i'u_j'}}{k}&=\frac{2}{3}\delta_{ij}-2\frac{\upsilon_t}{k}S_{ij}+C_1\frac{\upsilon_t}{\epsilon}\left[S_{ik}S_{kj}-\frac{1}{3}S_{kl}S_{kl}\delta_{ij}\right]\\&+C_2\frac{\upsilon_t}{\epsilon}\left[\Omega_{ik}S_{kj}+\Omega_{jk}S_{ki}\right]+C_3\frac{\upsilon_t}{\epsilon}\left[\Omega_{ik}\Omega_{jk}-\frac{1}{3}\Omega_{lk}\Omega_{lk}\delta_{ij}\right]\\&+C_4\upsilon_t\frac{k}{\epsilon^2}\left[S_{ki}\Omega_{lj}+S_{kj}\Omega_{li}\right]S_{kl}\\&+C_5\upsilon_t\frac{k}{\epsilon^2}\left[\Omega_{il}\Omega_{lm}S_{mj}+S_{il}\Omega_{lm}\Omega_{mj}-\frac{2}{3}S_{lm}\Omega_{mn}\Omega_{nl}\delta_{ij}\right]\\&+C_6\upsilon_t\frac{k}{\epsilon^2}S_{ij}S_{kl}S_{kl}+C_7\upsilon_t\frac{k}{\epsilon^2}S_{ij}\Omega_{kl}\Omega_{kl}\end{aligned} \qquad (۶)$$

که در رابطه (۶)، تانسور نرخ کرنش S_{ij} و تانسور ورتیسیته Ω_{ij} به‌صورت رابطه (۷) تعریف می‌گردند:

$$S_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right),\quad \Omega_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad (۷)$$

مدل‌های غیرخطی مربعی و مکعبی در جدول ۱ ارائه گردیده‌اند. این مدل‌ها در فرمول‌بندی ضرایب C_1-C_7 و ضریب لزجت گردابه‌ای C_μ با هم اختلاف دارند. از نظر فیزیکی، مدل‌های آشفتگی لزجت گردابه‌ای غیرخطی مربعی برای توصیف بهتر ساختارهای آشفتگی غیرایزوتروپی و ایجاد تمایز میان تنش‌های نرمال $\overline{u_i'^2}$ و مدل‌های آشفتگی لزجت گردابه‌ای غیرخطی مکعبی برای تخمین هرچه دقیق‌تر تاثیرات چرخش و انحنای خطوط جریان به‌کار می‌روند.

$\bar{S}$ و $\bar{\Omega}$ به‌ترتیب نرخ کرنش و ورتیسیته بی‌بعد نامیده می‌شوند که به‌صورت زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$\bar{S}\equiv\frac{k}{\epsilon}\sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \qquad (۸)$$

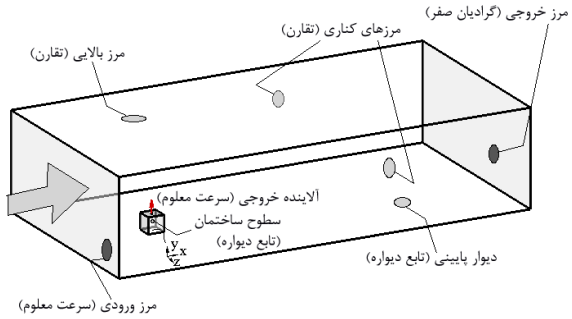
$$\bar{\Omega}\equiv\frac{k}{\epsilon}\sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \qquad (۹)$$

۴- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

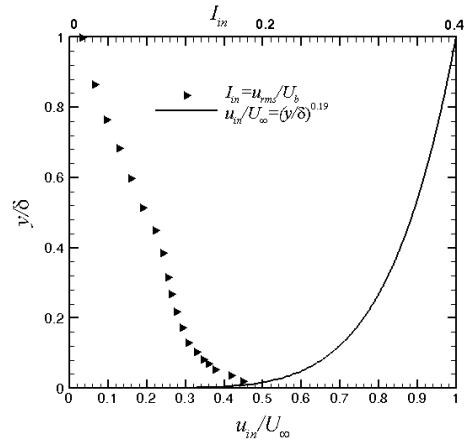
فاصله ورودی دامنه محاسباتی تا دیوار بادگیر ساختمان مدل $5H_b$ و فاصله صفحه دیوار بادپناه ساختمان مدل تا خروجی جریان $20H_b$ می‌باشد. فاصله عرضی دیوارهای کناری ساختمان مدل از مرزهای جانبی دامنه محاسباتی $6H_b$ و ارتفاع دامنه محاسباتی $6H_b$ است.

1- Neutral turbulent boundary layer
2- Diffusivity
3- Decoupled

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.8.7]



(الف)



(ب)

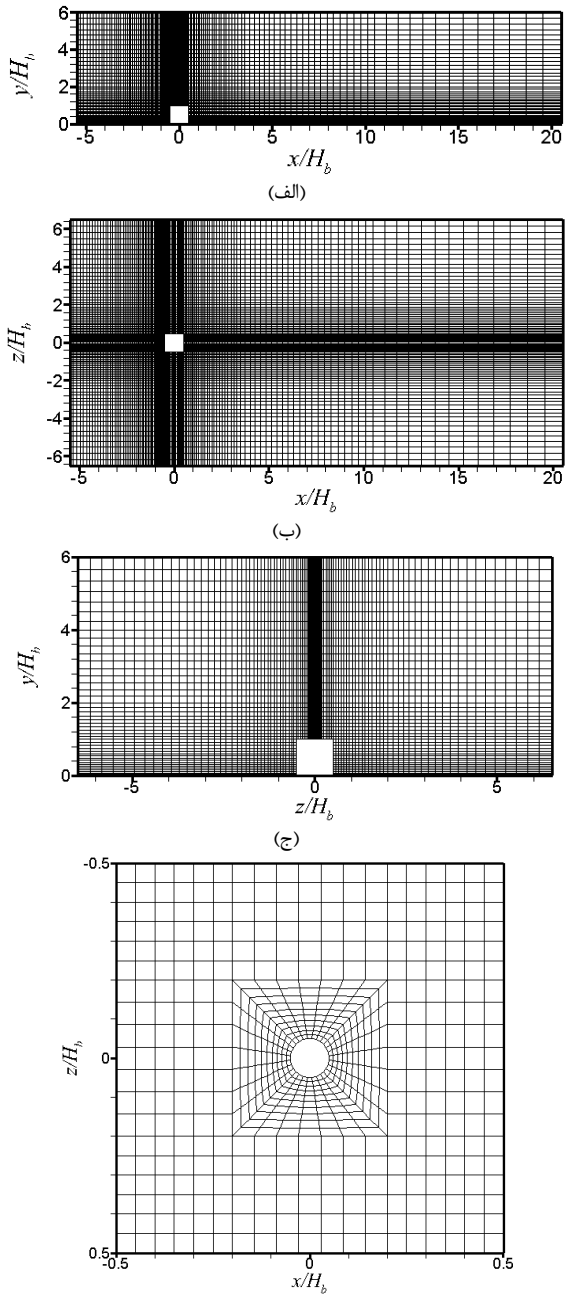
شکل ۱ الف) ناحیه محاسباتی و ب) پروفیل‌های سرعت متوسط طولی بی‌بعد و شدت آشفتگی در ورودی جریان براساس آزمایش تجربی تونل باد لی و مرونی[۲۱]

جدول ۱ ضرایب به‌کار رفته در مدل‌های k-ε غیرخطی مربعی و مکعبی

	نیسیزیما و یوشیزاوا[۷]	لین و همکاران[۱۰]	ارهارد و موسیوپولاس[۱۱]
C_μ	0.09	$\frac{2/3}{1.25+\bar{S}+0.9\bar{\Omega}}$	$\min\left[\frac{1}{0.9\bar{S}^{1.4}+0.4\bar{\Omega}^{1.4}+3.5},0.15\right]$
C_1	-0.02837	$\frac{3/c_\mu}{1000+\bar{S}^3}$	-0.2
C_2	0.0637	$\frac{15/c_\mu}{1000+\bar{S}^3}$	0.4
C_3	0.3843	$\frac{19/c_\mu}{1000+\bar{S}^3}$	$2-\exp\left(-\left(\bar{S}-\bar{\Omega}\right)^2\right)$
C_4	0	$-80c_\mu^2$	$-32c_\mu^2$
C_5	0	0	0
C_6	0	$-16c_\mu^2$	$-16c_\mu^2$
C_7	0	$16c_\mu^2$	$16c_\mu^2$

جدول ۲ پارامترهای جریانی و هندسی

کمیت	نماد	مقدار
ارتفاع ساختمان	H_b	0.05 m
سرعت ورودی در ارتفاع ساختمان	U_b	3.3 m/s
سرعت جریان آزاد	U_∞	4.5 m/s
ضخامت لایه مرزی	δ	0.3 m
عدد رینولدز	$\mathrm{Re_{Hb}}$	1.1×10^4
قطر دودکش	d	0.005 m
نسبت مومنتوم خروجی	M	0.19
نرخ خروج آلاینده	$\dot{Q}_e$	12.5×10^{-6} m^3/s
ضریب نفوذ مولکولی آرام مخلوط گازی	D	71×10^{-6} m^2/s



شکل ۲ شبکه‌بندی در: الف) صفحه $z/H_b=0$ ، ب) صفحه $y/H_b=0$ ، ج) صفحه $x/H_b=0$ و د) سقف ساختمان مدل

ناحیه محاسباتی در شکل ۱ ترسیم شده است. همانند آزمایش تونل باد لی و مرونی[۲۱]، در شبیه‌سازی عددی حاضر هم گاز هلیوم از دودکش مستقر بر روی سقف ساختمان مدل به ناحیه محاسباتی وارد می‌شود. این دودکش دارای قطر $0.1H_b$ بوده و در وسط سقف ساختمان مدل قرار دارد. سایر پارامترهای جریانی و هندسی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

شرایط مرزی و شبکه‌بندی استفاده شده در مطالعه حاضر در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. در دیواره‌های جامد، توابع دیواره استاندارد به‌کار رفته است[۲۲]. مرزهای کناری و مرز بالایی ناحیه محاسباتی، به‌صورت شرط مرزی تقارن مدل‌سازی گشته است. در ورودی ناحیه محاسباتی، شرط مرزی سرعت معلوم انتخاب شده است. پروفیل این سرعت کاملا مشخص و شدت آشفتگی آن، دقیقاً در آزمایش تجربی لی و مرونی[۲۱] بیان گشته است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.8.7]

جدول ۳ مشخصات روش محاسباتی

پارامترهای حل	روش محاسباتی
الگوریتم ارتباط سرعت و فشار	الگوریتم پیزو
گسسته‌سازی زمانی	روش پسرو مرتبه دوم زمانی
گسسته‌سازی مکانی	روش تفاضل مرکزی محدود شده
تابع دیواره	تابع دیواره استاندارد
گام زمانی	$۱/۵ \times ۱۰^{-۵}$ ثانیه
عدد اشمیت آشفتگی	۰/۷
عدد کورانت حداکثر	۱

برای شبیه‌سازی مدل‌های k-ε خطی و غیرخطی، پروفیل‌های سرعت متوسط و شدت آشفتگی در ورودی دامنه محاسباتی موردنیاز می‌باشد. لذا تعیین صریح این شرایط از طریق آزمایش‌های تجربی، کمک شایانی در دست‌یابی به نتایج صحیح خواهد نمود. با معین شدن سرعت متوسط و شدت آشفتگی و با استفاده از فرضیه تعادل موضعی، از طریق معادلات (۱۰) و (۱۲) کمیت‌های میزان انرژی جنبشی آشفته k و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته ε محاسبه می‌گردند.

$$k\left(y\right)=\frac{1}{2}\left(\overline{u'^2}+\overline{v'^2}+\overline{w'^2}\right) \tag{۱۰}$$

$$I_{\text{in}}=\frac{u_{\text{rms}}}{U_b} \tag{۱۱}$$

$$\varepsilon\left(y\right)=P_k\left(y\right)=C_\mu^{0.5}k\left(y\right)\frac{\partial u}{\partial y} \tag{۱۲}$$

۵- روش عددی

جزئیات روش عددی در جدول ۳ مشخص شده است. محاسبات مربوطه، توسط توسعه زیر برنامه‌های محاسباتی مورد استفاده در کد منبع باز اپن‌فوم[۲۳] انجام گردیده است. کد اپن‌فوم بر پایه روش حجم محدود بوده و به‌صورت منبع باز است که قابلیت توسعه معادلات، شرایط مرزی و روش‌های حل مختلف بر مبنای برنامه‌نویسی شی‌گرا به زبان C++ را در اختیار کاربران تحقیقاتی قرار می‌دهد.

۶- نتایج

۶-۱- میدان سرعت

بردارهای سرعت و کانتورهای مولفه در راستای جریان سرعت متوسط، u بر روی سقف، دیوار بادپناه و دیوار جانبی ساختمان مدل برای سه مدل لزجت گردابه‌ای غیرخطی و مدل k-ε استاندارد در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. طول هر بردار سرعت در نقطه میانی شبکه به‌طور نسبی به اندازه ۰/۱ مقدار آن رسم شده است. جهت مقایسه جریان برگشتی با علامت منفی بر روی سقف میان این چهار مدل از پارامتر کمی سرعت $-۰/۵\,(\text{m/s})$ استفاده شده است. کانتور سرعت متوسط برای مدل مکعبی ارهارد و موسیوپولاس[۱۱] جریان برگشتی بزرگتری را بر روی سقف پیش‌بینی می‌کند ولی برای مدل لین و همکاران[۱۰] میدان سرعت منفی نسبت به مدل ارهارد و موسیوپولاس، کوچکتر است. میدان سرعت برای مدل مربعی نیسیزیما و یوشیزاوا[۷] شبیه مدل k-ε استاندارد جونز و لاندر[۲] است که این به‌دلیل ثابت فرض شدن ضریب c_μ در این مدل همانند مدل k-ε استاندارد است. همچنین مطابق شکل، مدل k-ε استاندارد هیچ میدان سرعت منفی‌ای را پیش‌بینی نمی‌کند. از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهند که در دیوارهای بادپناه و جانبی، اختلاف قابل توجهی بین مدل‌ها در پیش‌بینی بردارهای سرعت و کانتورهای مولفه افقی سرعت وجود ندارد و همه مدل‌ها بر روی دیوار جانبی ناحیه سرعت $-۰/۵\,(\text{m/s})$ را پیش‌بینی کرده‌اند.

پروفیل‌های سرعت بی‌بعد، u/U_b، در راستای جریان بر روی سقف $x/H_b=0$، و در پایین‌دست جریان در ناحیه گردابه نزدیک در پشت ساختمان مدل در $x/H_b=1$، بر روی خط مرکزی برای مدل‌های آشفتگی k-ε غیرخطی و مدل آشفتگی k-ε استاندارد، در شکل ۴ نشان داده شده است. U_b مقدار سرعت ورودی در ارتفاع H_b می‌باشد. از آنجایی که هیچ‌گونه داده سرعتی در مقاله لی و مرونی[۲۱] گزارش نشده است، لذا نتایج پروفیل‌های سرعت بی‌بعد u/U_b، با داده‌های تجربی تومیناگا و استاتپولوس[۲۴]، که از هندسه و شرایط یکسانی با کار تجربی لی و مرونی به‌دست آمده، مقایسه شده‌اند. نتایج به‌دست آمده از تمامی مدل‌های آشفتگی به‌خوبی با داده‌های تجربی همخوانی دارند. اختلاف میان توزیع‌های سرعت بی‌بعد بین مدل‌های آشفتگی مختلف نسبتا کم است. در نتایج مدل k-ε استاندارد هیچ‌گونه جریان برگشتی و سرعت منفی بر روی سقف $x/H_b=0$ مطابق شکل ۴ (الف) مشاهده نمی‌شود درحالی‌که نتایج تجربی وجود یک سرعت منفی بر روی سقف را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۴ (الف) می توان مشاهده نمود، مدل مکعبی ارهارد و موسیوپولاس، در مقایسه با سایر مدل‌های غیرخطی و مدل k-ε استاندارد، جریان برگشتی و سرعت منفی را بر روی سقف $x/H_b=0$ بهتر پیش‌بینی کرده است و نتایج این مدل به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. از سوی دیگر در ناحیه گردابه نزدیک در پشت ساختمان مدل در $x/H_b=1$، تفاوت قابل توجهی میان نتایج مدل‌های عددی مختلف وجود ندارد و مدل‌های مکعبی به انحنای خط جریان، حساسیت بیشتری نشان داده‌اند. سرعت در ناحیه جریان برگشتی یعنی $x/H_b=1$ برای مدل‌های مکعبی بهتر پیش‌بینی شده‌اند و سایر مدل‌ها، مقادیر منفی بزرگتر و در نتیجه ناحیه جریان برگشتی قوی‌تر و کشیدگی بیشتر طول ناحیه دنباله را نسبت به نتایج تجربی نشان می‌دهند. این اختلاف عمدتا ناشی از این حقیقت است که نوسانات متناوب سرعت ناشی از ورتکس‌ها در پشت ساختمان مدل در مدل‌های مکعبی بهتر از سایر مدل‌های RANS تولید می‌شوند. همچنین تمامی مدل‌های غیرخطی، سرعت را در موقعیت‌های بالاتر از ارتفاع ساختمان در ناحیه دنباله $1<y/H_b<1.5$ نسبت به مدل k-ε استاندارد و نتایج تجربی کمتر تخمین می‌زنند. دلیل اصلی این موضوع این است که ناحیه دنباله در مدل‌های غیرخطی نسبت به داده‌های تجربی و مدل k-ε استاندارد در جهت عمودی عریض‌تر است.

۶-۲- میدان غلظت

غلظت بی‌بعد متوسط K، به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

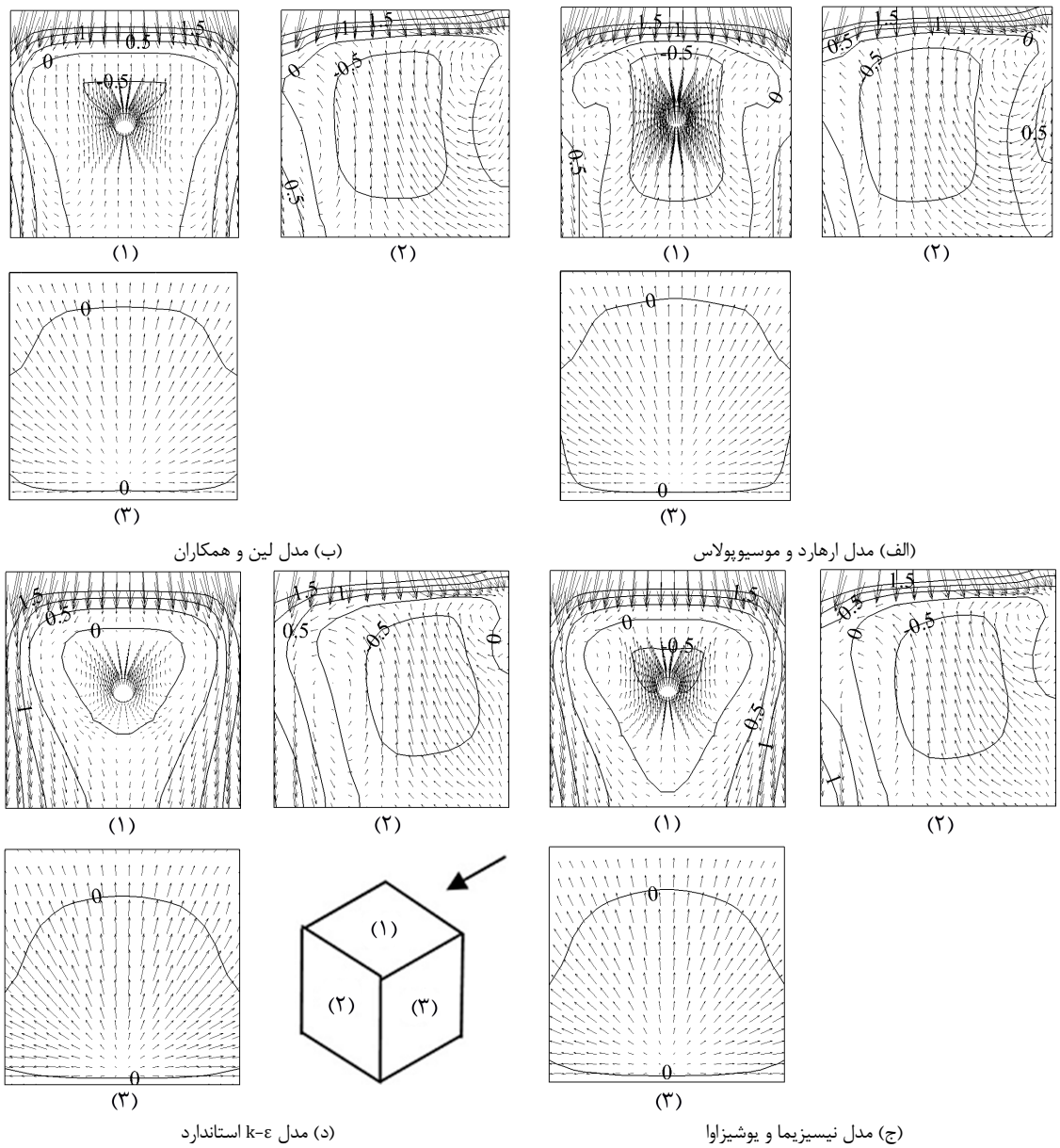
$$K=\frac{C}{c_0}=\frac{C}{\dot{Q}_e/H_b^2U_b} \tag{۱۳}$$

که در آن C کسر حجمی متوسط آلاینده، $\dot{Q}_e$ نرخ حجمی جریان خروجی آلاینده، H_b ارتفاع ساختمان و U_b سرعت در ورودی در ارتفاع ساختمان است.

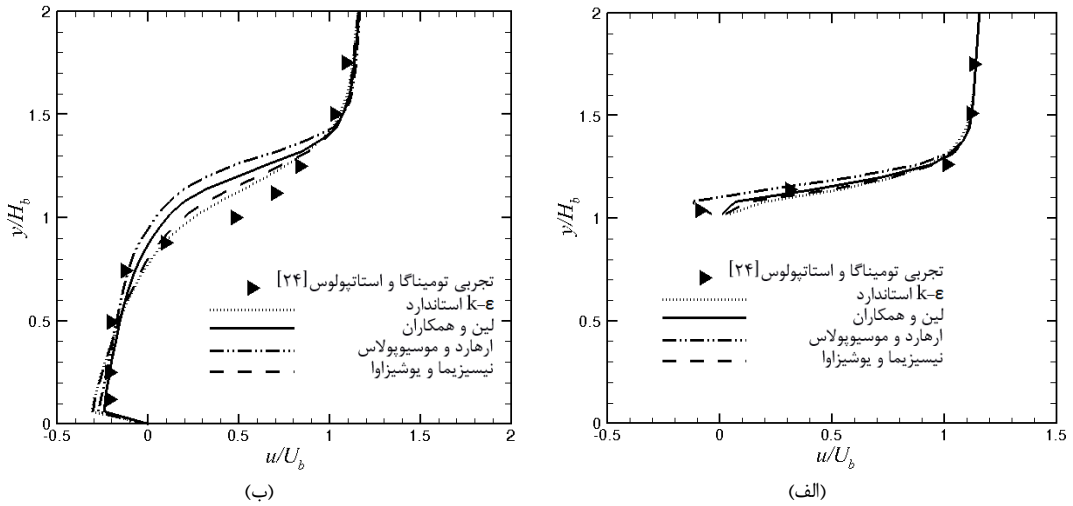
پروفیل‌های غلظت بی‌بعد متوسط، K در ناحیه گردابه در پشت ساختمان مدل در موقعیت‌های (الف) $x/H_b=2$ و (ب) $x/H_b=3$ بر روی سطح زمین $y/H_b=0$ به‌ترتیب در شکل ۵ برای مدل k-ε استاندارد و مدل‌های غیرخطی مربعی و مکعبی نشان داده شده اند. نتایج تجربی لی و مرونی[۲۱] نیز برای مقایسه ارائه شده است. مطابق شکل ۵، تمامی مدل‌ها روند مشابهی را با نتایج تجربی در $x/H_b=2$ و $x/H_b=3$ پیش‌بینی می‌کنند و بیشترین مقدار K برای همه مدل‌ها و نتایج تجربی بر روی خط مرکزی $z/H_b=0$ می‌باشد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.8.7]

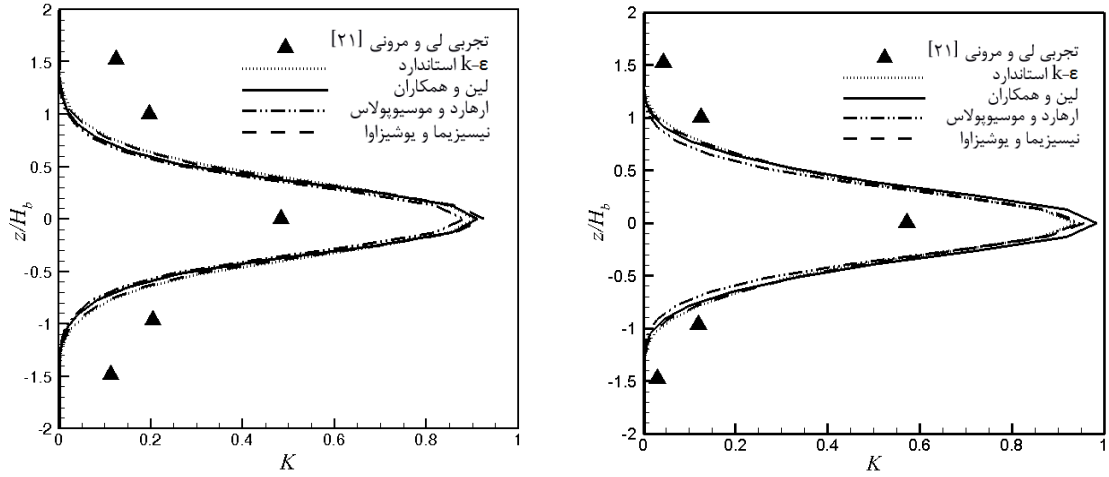


شکل ۳ بردارهای سرعت و کانتورهای مولفه در راستای جریان سرعت متوسط u بر روی (۱) سقف، (۲) دیوار بادپناه و (۳) دیوار جانبی ساختمان مدل



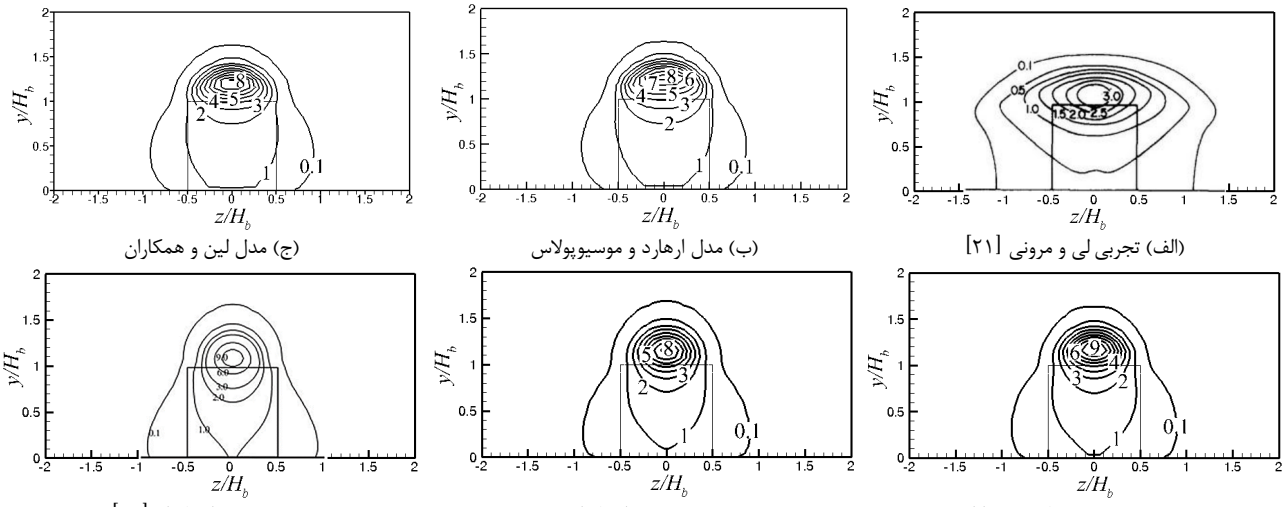
شکل ۴ مقایسه پروفیل‌های سرعت طولی بی‌بعد u/U_b بر روی خط مرکزی؛ الف) بر روی سقف ساختمان مدل $x/H_b=0$، ب) در پایین دست جریان در پشت ساختمان مدل در $x/H_b=1$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.8.7]



(الف) $x/H_b=2$ (ب) $x/H_b=3$

شکل ۵ پروفیل‌های غلظت بی‌بعد متوسط، K در ناحیه گردابه در پشت ساختمان مدل در $y/H_b=0$



(الف) تجربی لی و مرونی [۲۱] (ب) مدل ارهارد و موسیوپولاس (ج) مدل لین و همکاران

(د) مدل نیسیزیما و یوشیزاوا (ه) مدل k-ε استاندارد (و) مدل k-ε استاندارد[۱۹]

شکل ۶ کانتورهای غلظت بی‌بعد متوسط، K در ناحیه گردابه نزدیک در پشت ساختمان مدل در $x/H_b=1$

در ناحیه دور از ساختمان مدل در جهت جانبی، همه مدل‌های RANS مقدار غلظت را کمتر از نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کنند و نقطه حداکثر K برای تمامی مدل‌ها در مقایسه با نتایج تجربی، بیشتر است.

شکل ۶ کانتورهای غلظت بی‌بعد متوسط، K در ناحیه گردابه نزدیک در پشت ساختمان مدل در $x/H_b=1$ را نشان می‌دهد. داده‌های تجربی مربوط به لی و مرونی[۲۱] و همچنین نتایج عددی تومیناگا و استاتپولوس[۱۹] مبتنی بر مدل k-ε استاندارد نیز برای مقایسه آورده شده‌اند.

مدل k-ε استاندارد در مقایسه با نتایج تجربی، گسترش جانبی غلظت در جهت z را کمتر پیش‌بینی می‌کند در حالی که مدل‌های غیرخطی به‌دلیل تخمین بهتر دیفیوژن در جهت جانبی z، این نفوذ غلظت را بهتر پیش‌بینی کرده، ولی این گسترش در مقایسه با نتایج تجربی هنوز کمتر است. از سوی دیگر شکل ۶ نشان می‌دهد که مقدار حداکثر غلظت در مدل‌های RANS در مقایسه با نتایج تجربی بسیار بیشتر پیش‌بینی شده است.

پروفیل‌های غلظت بی‌بعد متوسط، K در ناحیه دنباله، در پشت ساختمان مدل در جهت عمود بر دیواره در موقعیت‌های $x/H_b=1, 2, 3, 4$ به‌ترتیب در شکل ۷ (الف-د) نشان داده شده است. در مدل‌های غیرخطی به‌دلیل اینکه ارتفاع جریان برگشتی در جهت عمود بر دیواره در پشت ساختمان بیشترگسترده شده است، لذا در نزدیکی ارتفاع ساختمان نتایج این مدل‌ها کمی از نتایج تجربی انحراف دارد. همچنین از شکل ۷ (الف-د) معلوم است که هر چه از ناحیه دنباله فاصله می‌گیریم، این انحراف کمتر شده و انحنای غلظت کاهش می‌یابد و نتایج همه مدل‌ها بر هم منطبق می‌گردند. به‌طور کلی با مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان گفت که در جهت عمود بر دیواره y نسبت به جهت جانبی z، توافق بهتری بین مدل‌ها در مقایسه با نتایج تجربی وجود دارد.

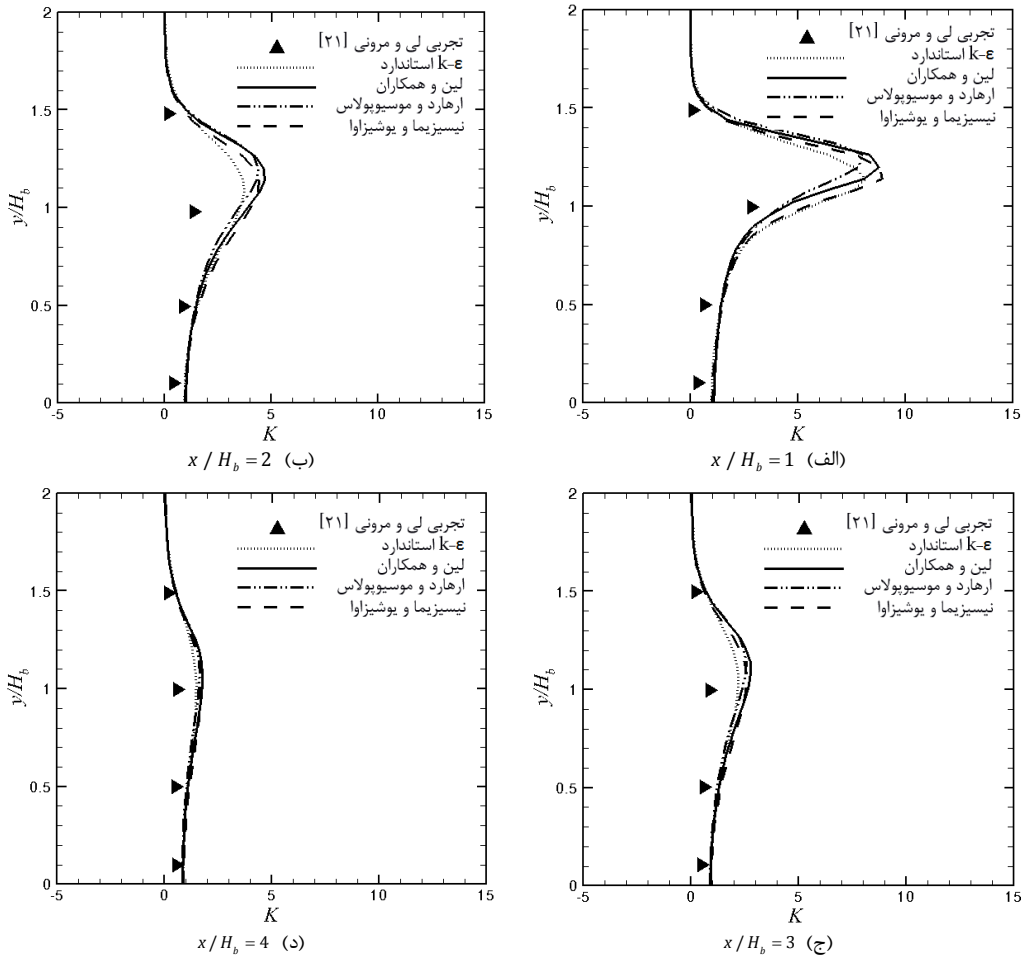
۶-۳- شارهای غلظت

انتقال اسکالر غلظت شامل عبارت‌های جابه‌جایی و دیفیوژن آشفتگی است. این عبارت‌ها به‌ترتیب به‌صورت شارهای اسکالر متوسط U_iC و شارهای دیفیوژن آشفتگی $\overline{u_i'c'}$ بیان می‌شوند. شارهای جابه‌جایی با استفاده از سرعت‌های متوسط U_i و غلظت متوسط C محاسبه می‌شوند در حالی که شارهای دیفیوژن آشفتگی در مدل‌های RANS توسط فرضیه زیر مدل می‌شوند:

$$-\overline{u_i'c'}=\left(\nu_t/\mathrm{Sc}_t\right)\left(\partial C/\partial x_i\right) \qquad (۱۴)$$

در رابطه فوق، ν_t لزجت آشفته و Sc_t عدد اشمیت آشفتگی نامیده می‌شود که مقدار آن طبق مطالعات قبلی [۱۵] برای مدل‌های RANS، برابر با ۰/۷ انتخاب شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.8.7]



شکل ۷ پروفیل‌های غلظت بی‌بعد متوسط، K در ناحیه دنباله، در پشت ساختمان مدل در جهت عمود بر دیواره

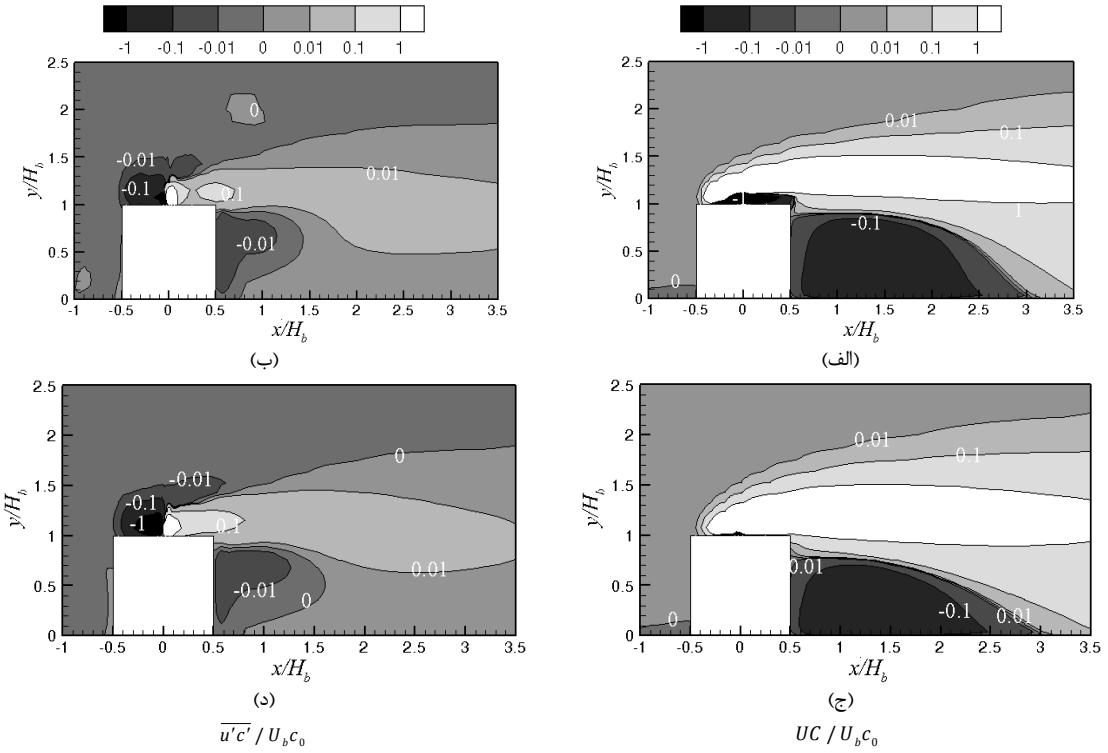
شکل ۸ کانتورهای شار جابه‌جایی بی‌بعد UC/U_bc_0 و شار دیفیوژن آشفتگی بی‌بعد $\overline{u'c'}/U_bc_0$ را برای مدل‌های ارهارد و موسیوپولاس و k-ε استاندارد در صفحه تقارن $z/H_b=0$ نشان می‌دهد. مقایسه کانتورهای شار جابه‌جایی نشان می‌دهد که مدل k-ε استاندارد هیچ‌گونه جریان برگشتی بر روی سقف پیش‌بینی نمی‌کند؛ درحالی که مدل ارهارد و موسیوپولاس به‌دلیل اینکه ضریب c_μ آن تابعی از نرخ کرنش بی‌بعد $\bar{S}$ و ورتیسیته بی‌بعد $\bar{\Omega}$ بوده و همچنین به‌دلیل داشتن جمله‌های غیرخطی مربعی و مکعبی به‌خوبی جریان برگشتی تشکیل شده بر روی سقف را مدل می‌کند. این عامل باعث می‌شود تا مطابق شکل، مدل غیرخطی ارهارد و موسیوپولاس ارتفاع ناحیه جریان برگشتی در پشت ساختمان مدل را بیشتر از مدل k-ε استاندارد پیش‌بینی نماید. نواحی منفی و مثبت شکل به‌خوبی نشان‌دهنده مقادیر منفی و مثبت سرعت U می‌باشند. مقادیر مثبت و منفی در کانتور شار دیفیوژن آشفتگی بی‌بعد $\overline{u'c'}/U_bc_0$ نشان‌دهنده کاهش و یا افزایش غلظت در این نواحی است. به این صورت که مقدار مثبت به معنی این است که با افزایش فاصله، مقدار غلظت در حال کاهش است. از طرف دیگر، مقایسه کانتورهای شار جابه‌جایی بی‌بعد UC/U_bc_0 و شار دیفیوژن آشفتگی بی‌بعد $\overline{u'c'}/U_bc_0$ برای دو مدل ارهارد و موسیوپولاس و k-ε استاندارد حاکی از آن است که شار دیفیوژن آشفتگی دارای مرتبه بزرگی کمتری نسبت به شار جابه‌جایی است. این مقایسه نشان می‌دهد که جابه‌جایی مکانیزم غالب‌تر در انتقال آلاینده در برابر دیفیوژن آشفتگی می‌باشد. یعنی آلاینده بیشتر توسط جریان سیال جابه‌جا و منتقل شده و مقدار انتقال آلاینده در اثر نفوذ آشفتگی سهم کمتری را دارد.

از طرف دیگر مقایسه کانتورهای شار جابه‌جایی VC/U_bc_0 برای دو مدل بر طبق شکل ۹ نشان می‌دهد که مدل غیرخطی ارهارد و موسیوپولاس گسترش بیشتری از میدان غلظت را نسبت به مدل k-ε استاندارد در بالای سقف و در ناحیه گردابه در پشت ساختمان مدل پیش‌بینی می‌کند. مشکل اصلی مدل‌های RANS که در کارهای قبلی نیز به آن‌ها اشاره شده است؛ این است که اغلب این مدل‌ها به‌دلیل اینکه گسترش کمتری از آلاینده را پیش‌بینی می‌کنند، باعث برآورد بالایی از غلظت در نزدیکی ساختمان مدل می‌شوند[۱۹،۲۴]. لذا می‌توان گفت که مدل‌های غیرخطی این نقصان را بهبود می‌بخشند. از طرف دیگر مقایسه کانتورهای شار جابه‌جایی بی‌بعد VC/U_bc_0 و شار دیفیوژن آشفتگی بی‌بعد $\overline{v'c'}/U_bc_0$ برای دو مدل ارهارد و موسیوپولاس و k-ε استاندارد نشان می‌دهد که شار دیفیوژن آشفتگی و شار جابه‌جایی در جهت عمود بر دیواره دارای مرتبه بزرگی تقریبا یکسانی هستند. این بدین دلیل است که سرعت V در جهت عمود بر دیواره نسبت به سرعت U در راستای جریان کوچک‌تر است بنابراین اثرات ترم جابه‌جایی در جهت عمود بر دیواره کم‌رنگ‌تر می شود.

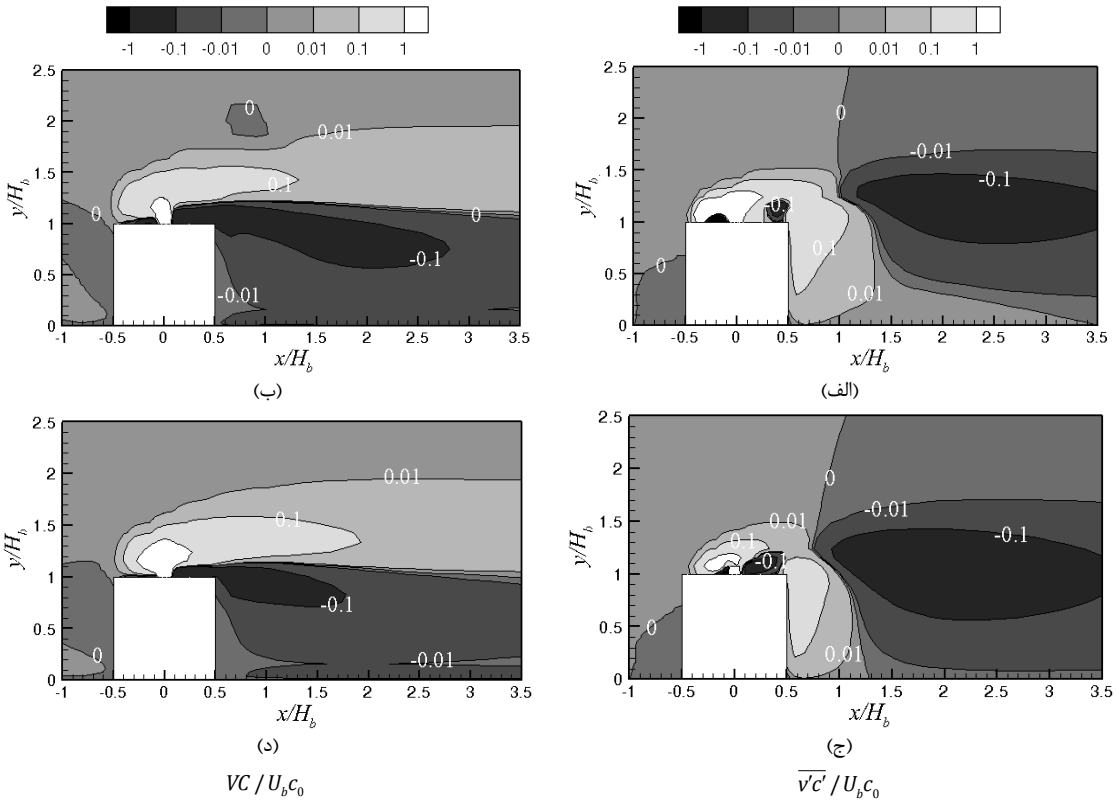
۷- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، به‌منظور تحلیل دقت و قابلیت مدل‌های آشفتگی غیرخطی مقایسه‌های متنوعی بین نتایج آن‌ها و مدل خطی k-ε استاندارد در پیش‌بینی میدان جریان و پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف ساختمان مدل مکعبی به همراه یک دودکش واقع بر روی مرکز سقف ساختمان انجام شد. مهم‌ترین نتایج به‌طور خلاصه در زیر ارائه شده است:

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.8.7]



شکل ۸ کانتورهای شار جابه‌جایی بی‌بعد $UC / U_b c_0$ و شار بی‌بعد دیفیوژن آشفتگی $\overline{u'c'} / U_b c_0$ برای مدل‌های الف) و ب) ارهارد و موسیوپولاس و ج) و د) k-ε استاندارد در صفحه $z / H_b = 0$



شکل ۹ کانتورهای شار جابه‌جایی بی‌بعد $VC / U_b c_0$ و شار بی‌بعد دیفیوژن آشفتگی $\overline{v'c'} / U_b c_0$ برای مدل‌های الف) و ب) ارهارد و موسیوپولاس و ج) و د) k-ε استاندارد در صفحه $z / H_b = 0$

الف) مدل غیرخطی مکعبی ارهارد و موسیوپولاس در مقایسه با سایر مدل‌های غیرخطی و مدل k-ε استاندارد، جریان برگشتی و سرعت منفی بزرگتری را بر روی سقف $x / H_b = 0$ پیش‌بینی کرده است و نتایج این مدل به نتایج تجربی موجود نزدیک‌تر است. این در حالی است که مدل k-ε استاندارد هیچ میدان سرعت منفی را پیش‌بینی نمی‌کند.

ب) در مدل غیرخطی مربعی نیسیزیما و یوشیزاوا به‌دلیل اینکه ضریب c_μ و

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.8.7]

ضرایب مربعی ثابت انتخاب شده‌اند میدان سرعت پیش‌بینی شده توسط آن بسیار شبیه مدل k-ε استاندارد است.

ج) مدل k-ε استاندارد در مقایسه با نتایج تجربی، گسترش جانبی غلظت در جهت z را کمتر پیش‌بینی می‌کند در حالی که مدل‌های غیرخطی به‌دلیل تخمین بهتر دیفیوژن در جهت جانبی z، این نفوذ غلظت را بهتر پیش‌بینی کرده، ولی این گسترش در مقایسه با نتایج تجربی هنوز کمتر است.

د) مدل غیرخطی ارهارد و موسیوپولاس گسترش بیشتری از میدان غلظت را نسبت به مدل k-ε استاندارد در بالای سقف و در ناحیه دنباله پشت ساختمان پیش‌بینی می‌کند.

ه) شار جابه‌جایی نسبت به شار دیفیوژن در جهت جریان دارای مرتبه بزرگی بیشتری است، در حالی که در جهت عمود بر دیواره این شارها دارای مرتبه بزرگی تقریبا یکسانی می‌باشند.

۸- فهرست علائم

H_b	ارتفاع ساختمان
U_b	سرعت ورودی در ارتفاع ساختمان
U_∞	سرعت جریان آزاد
k	انرژی جنبشی آشفته
M	نسبت مومنتوم خروجی
$\dot{Q}_e$	نرخ خروج آلاینده
V_e	سرعت خروجی آلاینده
$\overline{S}$	نرخ کرنش بی‌بعد
$\overline{u_i'u_j'}$	تنش های رینولدز
S_{ij}	تانسور نرخ کرنش ایزوتروپیک
ε	نرخ پخش انرژی جنبشی آشفته
C_μ	ضریب ویسکوزیته آشفته
P_k	تولید انرژی جنبشی آشفتگی
I_{in}	شدت آشفتگی در ورودی
d	قطر دودکش خروجی
Re_{Hb}	عدد رینولدز

علایم یونانی

ρ	چگالی
μ	لزجت دینامیکی
δ	ضخامت لایه مرزی
Ω_{ij}	تانسور ورتیسیتی
δ_{ij}	دلتای کرونیکر
υ_t	ویسکوزیته آشفته
$\overline{\Omega}$	ورتیسیتی بی‌بعد

۹- مراجع

[1] C. H. Chang, Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons, PhD Thesis, Colorado State University, Colorado, 2001.

[2] W. P. Jones, B. E. Launder, The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, No. 2, pp. 301-314, 1972.

[3] M. A. Leschziner, Modelling turbulent separated flow in the context of aerodynamic applications, Fluid dynamics research, Vol. 38, No. 2, pp. 174-210, 2006.

[4] J. L. Lumley, Toward a turbulent constitutive relation, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 41, No. 2, pp. 413-434, 1970.

[5] A. Yoshizawa, Statistical analysis of the deviation of the Reynolds stress from its eddy-viscosity representation, Physics of Fluids, Vol. 27, No. 6, pp. 1377-1387, 1984.

[6] C. G. Speziale, On non-linear kl and k-ε models of turbulence, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 178, No. 1, pp. 459-475, 1987.

[7] S. Nisizima, A. Yoshizawa, Turbulent channel and Couette flows using an anisotropic k-epsilon model, AIAA journal, Vol. 25, No. 3, pp. 414-420, 1987.

[8] S. Nisizima, A numerical study of turbulent square-duct flow using an anisotropic k-ε model, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, Vol. 2, No. 1, pp. 61-71, 1990.

[9] T. H. Shih, J. Zhu, J. L. Lumley, A realizable Reynolds stress algebraic equation model, Linthicum Heights, MD: NASA Center for AeroSpace Information, c 1993, Vol. 1, pp. 1-34, 1993.

[10] F. S. Lien, W. L. Chen, M. A. Leschziner, Low Reynolds-number eddy-viscosity modelling based on non-linear stress-strain/vorticity relations, Engineering Turbulence Modelling and Experiments, Vol. 3, pp. 91-100, 1996.

[11] J. Ehrhard, N. Moussiopoulos, On a new nonlinear turbulence model for simulating flows around building shaped structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 88, No. 1, pp. 91-99, 2000.

[12] N. G. Wright, G. J. Easom, Non-linear k-ε turbulence model results for flow over a building at full-scale, Applied Mathematical Modelling, Vol. 27, No. 12, pp. 1013-1033, 2003.

[13] J. Shao, J. Liu, J. Zhao, Evaluation of various non-linear k-ε models for predicting wind flow around an isolated high-rise building within the surface boundary layer, Building and Environment, Vol. 57, pp. 145-155, 2012.

[14] F. Bazdidi-Tehrani, M. Jadidi, H. Khalili, M. Karami, Investigation of effect of subgrid scale turbulent Schmidt number on pollutant dispersion, in Proceedings of the 22nd International Symposium on Transport Phenomena, Delf, The Netherlands, 2011.

[15] Y. Tominaga, T. Stathopoulos, Turbulent Schmidt numbers for CFD analysis with various types of flowfield, Atmospheric Environment, Vol. 41, No. 37, pp. 8091-8099, 2007.

[16] F. Bazdidi-Tehrani, A. Ghafouri, M. Jadidi, 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.

[17] F. Bazdidi-Tehrani, M. Jadidi, 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. 565-589, 2014.

[18] A. M. Jadidi, G. Heidarinejad, Evaluating DES and DDES models for wind flow over building and comparing with traditional turbulence models, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 14, pp. 81-93, 2014. (In Persian)

[19] Y. Tominaga, T. Stathopoulos, Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: Comparison of various types of k-ε models, Atmospheric Environment, Vol. 43, No. 20, pp. 3200-3210, 2009.

[20] X. Liu, J. Niu, K. C. Kwok, Evaluation of RANS turbulence models for simulating wind-induced mean pressures and dispersions around a complex-shaped high-rise building, Building Simulation, Vol. 6, No. 2, pp. 151-164, 2013.

[21] W. W. Li, R. N. Meroney, Gas dispersion near a cubical model building. Part I. Mean concentration measurements, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 12, No. 1, pp. 15–33, 1983.

[22] B. E. Launder, D. B. Spalding, The numerical computation of turbulent flows, Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 269-289, 1974.

[23] OpenFOAM, the Open Source CFD Toolbox, User Guide, Version 2.2.2, 28th September 2013; http://www. openfoam. org/ docs/ user/.

[24] Y. Tominaga, T. Stathopoulos, 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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.8.7]