شبیه‌سازی پخش ریزگردها در محیط شهری با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ

محمدرضا شاه نظری[1*]، حمید چنارانی[1]، آریان احمدپور[1]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

*ایمیل نویسنده مسئول مکاتبات: shahnazari@kntu.ac.ir

چکیده

آلودگی و پخش ریزگردها در محیط شهری موجب طیف گسترده‌ای از بیماری‌ها می‌شود. گرد و غبار یکی از پدیده‌های جوی است که آثار نامطلوبی را بر سلامت و محیط زیست وارد می‌کند. آلودگی ناشی از ریزگردها با منشاهای مختلف در محدوده‌ی وسیعی از اتمسفر پخش می‌شود. درک ما از مکانیزم پخش ریزگردها و آشفتگی آن‌ها در مناطق شهری دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد چرا که ما را در جهت کاهش اثرات این نوع از آلودگی‌ها کمک می‌کند. مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی به دلیل رویکرد مناسب اقتصادی، برای تحقیق در زمینه‌ی پخش ریزگردها مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به آشفته بودن جریان باد در داخل شهر، برای مدل‌سازی این آشفتگی از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است که در مهندسی باد محاسباتی به صورت گسترده استفاده می‌شود. در این تحقیق به بررسی ریزگردها در محیط شهری پرداخته شده است. بدین منظور تاثیر زاویه جهت باد و محیط شهری و همچنین ارتفاع ساختمان‌ها بر توزیع سرعت و پخش ریزگردها با زمان در دو فضای محاسباتی جداگانه بررسی شده است. با مقایسه نتایج میان زاویه صفر درجه و ۱۰ درجه، با افزایش زاویه تشدید آشفتگی جریان مشاهده شده است که این ویژگی‌های تلاطمی منجر به پخش و ماندگاری بیشتر ریزگردها در محیط شهری می‌شود. مطابق نتایج مشاهده شد که با توجه به نتایج به دست آمده، روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ روشی مناسب برای شبیه‌سازی جریان بادی و غلظت ریزگردها در اطراف ساختمان‌ها می‌باشد.

کلمات کلیدی

ریزگردها، محیط شهری، آشفتگی، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، دینامیک سیالات محاسباتی

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

مدل‌سازی پخش آلودگی‌ها و ریزگردها در منطقه شهری به دلیل پیچیدگی در هندسه شهری، امری بسیار دشوار می‌باشد. آلودگی و پخش ریزگردها در منطقه شهری موجب طیف گسترده‌ای از بیماری‌ها می‌شود. گرد و غبار یکی از پدیده‌های جوی است که آثار نامطلوبی را بر سلامت و محیط زیست وارد کرده است. آلودگی ناشی از ریزگردها با منشاهای مختلف در محدوده‌ی وسیعی از اتمسفر پخش می‌شود. درک مفهوم مکانیزم پخش ریزگردها در مناطق شهری اهمیت زیادی دارد و در جهت کاهش اثرات این نوع آلودگی‌ها کمک شایانی می‌کند. مطالعاتی برای شبیه‌سازی جریان و انتقال آلودگی‌های اطراف یک ساختمان انجام گرفته است اما برای مناطق شهری که گسترده هستند مطالعات زیادی برای بررسی کیفیت هوای شهری باقی مانده است [۱].

از جمله مهم‌ترین روش‌های تحقیق در آلودگی و پخش ریزگردها در مناطق شهری می‌توان به میدان مشاهده و اندازه‌گیری‌ها، مدل‌سازی آزمایشگاهی و مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی اشاره کرد. تحقیق‌ها و اندازه‌گیری‌های انجام گرفته می‌توانند اطلاعات بسیار مفیدی در زمینه مشخصه جریان هوای آشفته و پخش آلودگی در داخل فضای شهری را در بر داشته باشند، اما این دسته از اندازه‌گیری‌ها به علت پایین بودن دقت فضایی، شرایط آب و هوایی غیرقابل کنترل و پیکره ساختمانی پیچیده محدود شده است. از طرفی دیگر مدل‌سازی فیزیکی مقیاس آزمایشگاهی دارای یک شرط مرزی بالادست قابل کنترل برای جریان هوا و هندسه فضای شهری می‌باشد که این کار بوسیله آزمایش‌های تونل باد صورت می‌پذیرد. این تکنیک‌های مدل‌سازی برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی استفاده می‌شود و اطلاعات مفیدی در زمینه الگوهای میدان جریان و پخش آلودگی ارائه می‌دهند [۲, ۳].

با این وجود، این روش نقاط ضعفی نیز دارد که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به هزینه بالا و موارد محدودی که با این روش می‌توان مورد مطالعه قرار داد، اشاره کرد. مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی[1] می‌تواند با یک رویکرد مناسب اقتصادی برای تحقیق در زمینه آلودگی و پخش ریزگردها مورد توجه قرار گیرد.

چنگ[2] و همکاران [۴]، در سال ۲۰۰۱ جهت توسعه مدل عددی برای پخش آلودگی در فضای شهری از چیدمان بلوک‌هایی شبیه به فضای شهری استفاده کردند. آن‌ها نتایج حاصل پژوهش خود را با نتایج تونل باد مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند که نرم‌افزار فلوئنت می‌تواند میدان جریان در مناطق شهری را با استفاده از مدل کی-اپسیلون به خوبی شبیه‌سازی کند، همچنین مدل کی-اپسیلون[3] استاندارد و مدل گروه نرمال‌سازی مجدد کی-اپسیلون[4] نتایج نزدیک به هم نشان می‌دهند. همچنین برای مواردی که تعداد زیادی ساختمان در قسمت جلویی منطقه شبیه‌سازی شده باشد، مدل‌های عددی در پیش‌بینی شدت غلظت ضعیف عمل می‌کند.

زنگ[5] و همکاران [۵]، به شبیه‌سازی جریان با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ[6] بر روی موانعی متفاوت که شبیه به منطقه شهری چیده شده بود پرداختند. برای رسیدن به یک درک عمیق در تاثیر تصادفی بودن توپولوژی موانع، نتایج رایج مانند سرعت متوسط، تنش‌های رینولدز و انرژی جنبشی آشفتگی را با نتایج روش گردابه‌های بزرگ پیشین خود و اطلاعات شبیه‌سازی عددی مستقیم[7] از جریان روی مکعب‌های یکنواخت را مقایسه کردند؛ آن‌ها به این نتیجه رسیدند که برای این نوع از جریان‌هایی که ذات ناپایدار دارند، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ رویکرد مناسبی را فراهم می‌آورد.

---

[1] Computational Fluid Dynamic (CFD)

[2] Cheng

[3] k-ε

[4] RNG k-ε

[5] Zheng

[6] Large Eddy Simulation (LES)

[7] Direct Numerical Simulation (DNS)

ACCEPTED MANUSCRIPT

جریان باد در محیط شهری یک فاکتور مهم در پخش آلودگی در خیابان‌ها و اطراف ساختمان‌ها است. وان هوف[۱] و همکاران [۶]، در تحقیق خود به ارائه یک روش مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی ترکیبی برای جریان باد درون شهر و تهویه طبیعی داخل استادیوم پرداختند. آن‌ها برای تولید موثر و هم‌زمان هندسه و شبکه‌هایی با دقت بالا برای هر دو محیط داخلی و خارجی از روش خاصی استفاده کردند. این رویه در تولید هندسه‌های پیچیده با کنترل کامل بر کیفیت و دقت شبکه، بر خلاف روش تولید شبکه نیمه اتوماتیک بی‌سازمان، استفاده می‌شود. این روش دارای مزایایی چون تولید هم‌زمان شبکه و هندسه برای هر دو محیط داخلی (داخل استادیوم) و خارجی مورد مطالعه، کنترل کامل بر کیفیت و دقت شبکه و تولید آسان شبکه‌های مختلف برای مطالعات پارامتری که به طور محسوسی زمان پیش پردازش را کاهش می‌دهد.

جهانگیری و همکاران [۷]، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به مطالعه اثر سرعت باد بر پخش آلاینده‌ها در مجرای یک خیابان شهری با نسبت عرض خیابان به ارتفاع ساختمان برابر ۲/۵ پرداختند. آن‌ها برای بررسی میدان باد و پخش آلودگی در داخل مجرای یک خیابان شهری از مدل آشفتگی دو معادله‌ای کی-اپسیلون و گروه نرمالسازی مجدد به همراه مدل انتقال گونه‌ها بدون واکنش[۲] استفاده کردند و به منظور شبکه‌بندی دامنه حل نرم‌افزار گمبیت[۳] مورد استفاده قرار گرفته است. با مقایسه پراکندگی آلودگی در سرعت‌های ۰/۵، ۲، ۸ و ۲۰ متر بر ثانیه، مشاهده کردند که با افزایش سرعت تا ۲۰ متر بر ثانیه، بعد از اختلاط گردابه‌ها در سرعت پایین‌تر، گردابه‌ی واحد تشکیل شده در مجرا تمایل دارد که به سمت دیوار در جهت مجرا حرکت پیدا کند. همچنین یک گردابه در گوشه دیوار پناه بوجود می‌آید که در انتقال آلودگی تاثیر دارد. این دو گردابه بوجود آمده در مجرا خیابان باعث رقیق‌سازی بهتر آلودگی می‌شوند.

مایدر[۴] و همکاران [۸]، در سال ۲۰۱۷ به بررسی تاثیر هندسه ساختمان بر جریان باد منطقه خیابانی با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ و تونل باد پرداختند. آن‌ها این کار را با تغییر در هندسه سقف ساختمان‌ها و بررسی تاثیرات جریان باد متوسط و آشفته بررسی کردند. برای هندسه‌های پیچیده کدهای روش گردابه‌های بزرگ را پیاده‌سازی کردند و با مقایسه نتایج حاصل از تونل باد با آن مشاهده کردند که به طور کلی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی دارای سازگاری بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. با وجود خطاهایی در نتایج شبیه‌سازی عددی، به هرحال شبیه‌سازی به روش گردابه‌های بزرگ در ساختمان‌هایی که به خوبی شبیه‌سازی شده بودند نتایج با کیفیت بالایی ارائه داد که قابل اعتماد بودند.

در سال‌های اخیر مطالعه‌های زیادی در شبیه‌سازی جریان باد و پخش آلودگی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است. بیشتر مطالعه‌ها نشان داده است که شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بر اساس معادلات ناویر-استوکس با میانگین‌گیری زمانی[۵] از مقادیر میدان جریان دارای کمبودهایی در تولید الگوهای جریان باد و غلظت پخش آلودگی‌ها در اطراف ساختمان‌ها می‌باشند؛ از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به تحقیق موراکامی[۶] و همکاران [۹] و مرونی[۷] و همکاران [۱۰] اشاره کرد. روش شبیه‌سازی عددی مستقیم نیز به خاطر بالا بودن بسیار زیاد هزینه‌ی محاسباتی در مسائل مربوط به شبیه‌سازی شهری مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. به همین دلیل در این پژوهش روشی با دقت بالا و هزینه‌ی محاسباتی پایینی مورد بررسی قرار گرفته است. روش شبیه‌سازی با استفاده از گردابه‌های بزرگ یکی از روش‌هایی است که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین در زمینه شبیه‌سازی جریان باد در مناطق شهری قرار گرفته است [۱۱]. این روش به خاطر تحلیل کردن گردابه‌های بزرگ و مدل کردن گردابه‌های کوچک که بیشتر دارای رفتار کلی هستند، دقتی بالاتر از روش معادلات ناویر-استوکس بصورت میانگین‌گیری زمانی و هزینه محاسباتی پایین‌تری نسبت به روش شبیه‌سازی عددی مستقیم دارند. السا و همکاران [۱۲]،

---

۱ Van Hooff

2 Species transport without reaction

3 Gambit

4 Maider

5 Reynolds averaged Navier-stokes (RANS)

6 Murakami

7 Meroney

ACCEPTED MANUSCRIPT

به بررسی توزیع و پراکندگی ذرات آلاینده در مجموعه‌ی هفت ساختمانی در محوطه شهر لندن پرداخته‌اند که منبع آلودگی بصورت نقطه‌ای و از دودکش سیستم تولید همزمان برق و انرژی بوده است. آن‌ها نتایج شبیه‌سازی خود را با تونل باد مقایسه کرده و مدلی برای طراحی مبلمان شهری و قرارگیری سیستم‌های آلاینده ارائه کرده‌اند. مویدی و همکاران [۱۳]، با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ، میدان سرعت و پراکندگی ذرات آلاینده را در مدلی ساده برای یک ساختمان و در مدلی دیگر از ناحیه شهری تهران را مورد بررسی قرار دادند. همچنین آن‌ها

پژوهش حاضر با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ، به شبیه‌سازی پراکندگی ذرات آلودگی موجود در جریان هوا بر روی ساختمان‌ها در یک محوطه شهری پرداخته است. همچنین تاثیر زاویه وزش باد، ارتفاع ساختمان‌ها و سرعت باد بر توزیع و پراکندگی ذرات آلاینده بررسی شده است.

۲- روابط و فرمول‌های ریاضی

جریان‌های آشفته به وسیله گردابه‌هایی با محدوده‌ی وسیع از مقیاس‌های طول و زمان توصیف می‌شوند. بزرگ‌ترین گردابه‌ها، قابل مقایسه با اندازه طول مشخصه جریان متوسط هستند. کوچک‌ترین مقیاس‌ها نیز مسئول اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشند. در عمل می‌توان تمامی طیف مقیاس‌های آشفتگی را بوسیله روش شبیه‌سازی عددی به طور مستقیم تحلیل کرد اما به دلیل هزینه بسیار بالای این نوع شبیه سازی، پیاده‌سازی این روش برای جریان‌هایی با عدد رینولدز بالا مورد استفاده قرار نگرفت.

به دلیل محدودیت‌های یاد شده می‌توان از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده کرد. در روش شبیه‌سازی با استفاده از گردابه‌های بزرگ، گردابه‌های بزرگ به دلیل عمل فیلتراسیون در مجموعه باقی می‌مانند. نتیجه فیلتر کردن معادلات ناویر-استوکس اصلی، معادلات ناویر-استوکس فیلتر شده می‌باشد که معادلات حاکم در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در رابطه (۱) ارائه شده است:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t}+\bar{u}_j\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}+\upsilon\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2}-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad (۱)$$

که در رابطه فوق، ترم τ_{ij} تنش زیرشبکه‌ای می‌باشد و با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$\tau_{ij}=\overline{u_i u_j}-\overline{u_j u_i} \qquad (۲)$$

تنش‌های زیرشبکه‌ای که حاصل از اپراتور فیلترسازی می‌باشند، مجهول بوده و نیازمند مدل‌سازی هستند. مدل‌های آشفتگی زیرشبکه‌ای که برای مدل‌سازی این نوع از تنش‌ها استفاده می‌شوند همانند مدل‌های معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری زمانی، فرضیه بوسینسک[۱] می باشند که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{ij}-\frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij}=-2\mu_t\overline{s_{ij}} \qquad (۳)$$

که در رابطه (۳)، μ_t و τ_{kk} به ترتیب ویسکوزیته آشفتگی و قسمت ایزوتروپیک تنش زیرشبکه‌ای می‌باشند. همچنین $\overline{s_{ij}}$ تانسور نرخ کرنش برای گردابه‌های قابل تحلیل می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

[۱] Boussinesq

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$\overline{s}_{ij} = \frac{۱}{۲}\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i}\right) \quad (۴)$$

برای مدل‌سازی μ_t، از روش اسماگورینسکی-لیلی[۱] استفاده شده است. در این روش، ویسکوزیته‌ی آشفتگی زیرشبکه‌ای به صورت زیر مدل می‌شود:

$$\mu_t = \rho l_s^{۲} \left|\overline{s}\right| \quad (۵)$$

که در رابطه (۵)، l_s طول اختلاط برای مقیاس زیرشبکه‌ای است و $\left|\overline{s}\right| = \sqrt{۲\overline{s}_{ij}\overline{s}_{ji}}$ می‌باشد. در نرم افزار فلوئنت، l_s به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$l_s = \min\left(kd.C_s\Delta\right) \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، k ثابت ون کارمن[۲]، d فاصله تا نزدیک‌ترین دیوار، C_s ثابت اسماگورینسکی و Δ مقیاس شبکه محلی می‌باشند.

در این پژوهش فاز گسسته به روش لاگرانژی[۳] بررسی شده است. مدل فاز گسسته لاگرانژی در نرم افزار فلوئنت از روش اویلر-لاگرانژ[۴] پیروی می‌کند. فاز سیال که به صورت فاز پیوسته تلقی شده، بوسیله معادلات ناویر-استوکس حل می‌شود در حالی که فاز گسسته بوسیله حرکت تعداد بسیار زیادی از ذرات داخل میدان جریان محاسبه شده، حل شده است. فاز گسسته می‌تواند مومنتوم، جرم و انرژی را با فاز سیال مبادله کند. تعادل نیرو در این حالت در معادله زیر نشان داده شده است. با حل معادله حرکت ذرات، سرعت و موقعیت هر ذره بدست می‌آید.

$$\frac{d\overrightarrow{u_p}}{dt} = \overrightarrow{F_D} + \overrightarrow{F_G} + \overrightarrow{F} \quad (۷)$$

که در رابطه (۷)، $\overrightarrow{F_D}$ نیروی پسا بر واحد جرم ذره، $\overrightarrow{F_G}$ نیروی شناوری بر واحد جرم ذره و $\overrightarrow{F}$ سایر نیروهای بر واحد جرم ذره مانند نیروی برآی سافمن، نیروی جرم مجازی و نیروی گرادیان فشاری می‌باشد. نیروی پسا مهم‌ترین نیروی وارد از سیال به ذره است که به دلیل اختلاف سرعت سیال و ذره حاصل می‌شود:

$$\vec{F}_D = \frac{\left(\vec{u}_f - \vec{u}_p\right)}{\tau_r} \quad (۸)$$

---

۱ Smagorinsky-Lilly

۲ Kármán

3 Lagrangian

4 Euler- Lagrange

ACCEPTED MANUSCRIPT

در رابطه فوق، $\vec{u}_f$ سرعت سیال و τ_r زمان آرامش ذره[1] می‌باشند. τ_r از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^{۲}}{۱۸\mu_f} \frac{۲۴}{C_D \operatorname{Re}_p} \tag{۹}$$

که ρ_p چگالی ذره، d_p قطر ذره، μ_f لزجت دینامیکی سیال می‌باشند. همچنین Re_p عدد رینولدز نسبی ذره بوده و رابطه (۱۰) بیانگر آن می‌باشد:

$$\operatorname{Re}_p = \frac{\rho_f d_p \left|\overrightarrow{u_f} - \overrightarrow{u_p}\right|}{\mu_f} \tag{۱۰}$$

همچنین در معادله حرکت ذره کمیت $\overrightarrow{F_G}$ نیروهای گرانش و شناوری بر واحد جرم ذره می‌باشد که قادر است مسیر ذرات را تحت تاثیر قرار دهد و از رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$F_G = \left(۱ - \frac{۱}{s}\right)\vec{g} \tag{۱۱}$$

در رابطه (۱۱)، s نسبت چگالی ذره به چگالی سیال می‌باشد. سایر نیروهای بر واحد جرم ذره نیروی برآی سافمن، نیروی جرم مجازی و نیروی گرادیان فشاری می‌باشند که در معادله حرکت ذره با برآیند $\vec{F}$ نشان داده شده است.

نیروی برآی سافمن در جریان با اعداد رینولدز پایین و با قطر کمتر از یک میکرون دارای اهمیت است [۱۴]. همچنین نیروی جرم مجازی و گرادیان فشاری هنگامی که چگالی سیال بزرگ‌تر از چگالی ذره باشد دارای اهمیت است [۱۵]. از آن‌جا که در این مطالعه چگالی ذره بسیار بزرگتر از چگالی سیال است (حدود۲۰۴۰ برابر) بنابراین در این مطالعه اثر این سه نیرو بسیار کم است و از آن صرف نظر شده است.

جهت بررسی توزیع اندازه ذرات در محیط شهری از معادله رزین-رملر[2] استفاده شده است. توزیع اندازه رزین-رملر بر پایه یک رابطه نمایی بین قطر ذره d و کسر جرمی ذره با قطر بزرگتر از d می‌باشد. این رابطه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \tag{۱۲}$$

در رابطه (۱۲)، $\bar{d}$ به عنوان قطر متوسط و n به عنوان پارامتر پراکندگی تعریف شده که در این پژوهش مقدار n برابر با ۳/۵ در نظر گرفته شده است [۱۴].

اعداد بی بعد چون عدد رینولدز و عدد استروهال به ترتیب بیانگر نیروهای اینرسی به نیروهای ویسکوز و توصیف مکانیزم جریان نوسانی سیال هستند که مطابق زیر تعریف می‌شوند.

[1] Particle relaxation time

[2] Rosin-rammler

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$\mathrm{Re} = \frac{U_{\infty} D}{\upsilon} \quad (۱۳)$$

$$St = \frac{fD}{U_{\infty}} \quad (۱۴)$$

در رابطه فوق، f فرکانس می‌باشد که بوسیله ضریب برآ در زمان‌های مختلف بدست می‌آید.
زمان نیز بوسیله سرعت ورودی یکنواخت و عرض سطح مقطع بی بعد شده و به صورت زیر در آمده است:

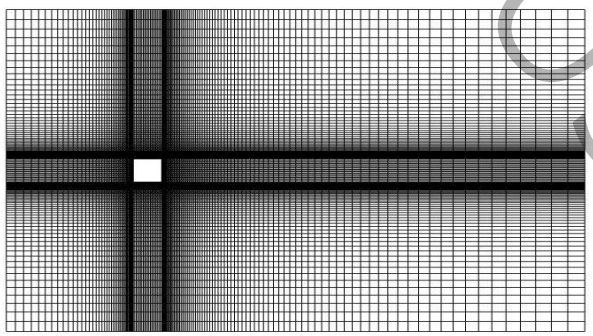
$$T = t\frac{U_{\infty}}{D} \quad (۱۵)$$

در رابطه فوق، T زمان بی بعد شده و t زمان مورد نیاز برای رسیدن به یک همگرایی آماری می‌باشد.

۳- شبیه‌سازی عددی

۳-۱ اعتبارسنجی

در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی، ابتدا روش خود را بر روی یک بلاف بادی[1] پیاده کرده و بعد از اطمینان درستی روش به پیاده‌سازی آن بر مدل شهری واقعی پرداخته شده است. به منظور شبیه‌سازی جریان بر روی یک بلاف بادی، فضای محاسباتی و شبکه‌بندی توسط نرم‌افزار گمبیت تولید شده است. برای شبکه‌بندی منظم، فضای محاسباتی به قسمت‌هایی تقسیم شده و هر کدام بطور جداگانه شبکه‌بندی شده است. فضای محاسباتی استفاده شده در این بخش دارای ابعاد $۲۰D \times ۱۴D \times ۴D$ در جهت $X \times Y \times Z$ بوده که D طول مقطع عرضی سیلندر است. فاصله بین ورودی دامنه حل و سیلندر مربعی ۴D می‌باشد. سطح خروجی محدوده حل به فاصله ۱۵D از سیلندر قرار گرفته شده است. طول سینلدر به اندازه $۴D$ در جهت مخالف جریان قرار دارد و فاصله بین مرزهای صفحه بالا و پایین محدوده حل به فاصله $۶/۵D$ از یکدیگر می‌باشد. مقدار D برابر ۴ سانتی‌متر، $U_{\infty} = ۰/۵۳۵\ m/s$ و فرکانس تولید گردابه‌ها $۱/۷۷ \pm ۰/۰۰۵$ هرتز در نظر گرفته شده است. شبکه‌بندی فضای محاسباتی برای مدل معیار بصورت سازمان یافته انجام شده است که با افزایش فاصله از سیلندر مربعی اندازه شبکه‌های مورد استفاده با نرخی ثابت افزایش پیدا می‌کنند؛ این کار برای کاهش هزینه محاسباتی انجام شده است. شکل۱ نشان دهنده شبکه‌بندی ساختاریافته ایجاد شده می‌باشد.



شکل۱. شبکه‌بندی فضای محاسباتی برای مدل معیار

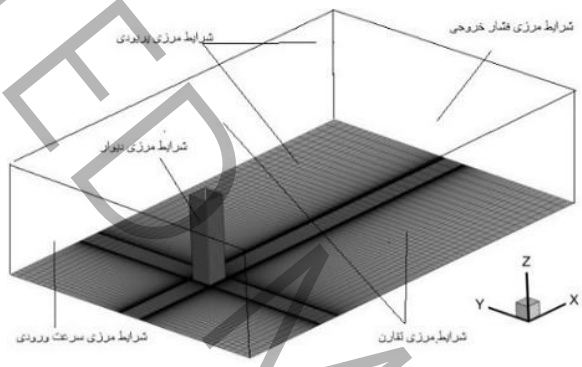
Fig. 1. Domain mesh for verification model

[1] Bluff body

ACCEPTED MANUSCRIPT

همانطور که در شکل۱ مشاهده می‌شود، برای شبکه بندی اطراف بلاف بادی از شبکه‌های ریزتری استفاده شده تا لایه مرزی به خوبی تحلیل شود. تعداد این شبکه‌های ریز اطراف دیوار بلاف بادی ۱۵ عدد بوده که فاصله اولین سلول تا دیواره‌ی سیلندر $۰/۰۰۲D$ می‌باشد و با نرخ ۱/۲ افزایش پیدا می‌کنند. تعداد کل شبکه‌های به کار رفته برای این شبیه‌سازی حدود یک میلیون می‌باشد. برای بررسی استقلال از شبکه، از تعداد شبکه‌های ۸۰۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰۰۰ استفاده شده است. برای محدوده محاسباتی بیان شده در شکل۱، سرعت جریان یکنواخت ورودی U_{∞} مطابق با عدد رینولدز ۲۱۴۰۰ می‌باشد. با توجه به نتایج تحقیق لین و همکاران [۱۶] جریان آشفته می‌باشد.

شدت آشفتگی برای جریان ورودی ۲ درصد می‌باشد که مطابق با سطح آشفتگی در کار با تونل باد است. سطح خروجی مطابق شکل۲ دارای شرایط فشار استاتیکی صفر می‌باشد. سطح سیلندر به عنوان دیوارهای بدون لغزش در نظر گرفته شده است. مرزهای بالا و پایین به صورت شرایط مرزی پریودیک بیان شده‌اند. برای سطوح باقی مانده شرایط مرزی متقارن در نظر گرفته شده است.



شکل۲. شرایط مرزی محدوده محاسباتی

Fig. 2. Boundary condition

به منظور گسسته‌سازی معادلات از روش حجم محدود و جهت بدست آوردن معادله فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل[1] برای ترکیب معادلات پیوستگی و مومنتوم استفاده شده است. در این شبیه‌سازی ترم‌های گسسته‌سازی زمانی مرتبه دوم بکار گرفته شده است. گام زمانی استفاده شده برابر با ۰/۰۰۱ بوده که در این صورت بیشتر سلول‌های تشکیل دهنده‌ی فضای محاسباتی دارای عدد کورانت کمتر از یک هستند. همچنین برای ترم‌های جابه‌جایی از دقت مرتبه دوم استفاده شده است.

نتایج عددی بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی لین[۲] و همکاران [۱۶]، مقایسه شده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج، مقدار زمان بی‌بعد، همانند پژوهش لین و همکاران، برابر ۱۴۰ قرار گرفته است. ضریب نیروی پسا[۳] و برآ[۴] و نیز عدد استروهال[۵] (بر پایه ضریب برآ) محاسبه شده در پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در Table 1. Comparison of numerical and experimental results

جدول۱ ضریب پسا متوسط، انحراف استاندارد ضریب برآ و عدد استروهال در مقایسه با نتایج لین و همکاران آورده شده است.

[1] Simple
[۲] Lyn
[۳] Drag
[۴] Lift
[۵] Strouhal

ACCEPTED MANUSCRIPT

Table 1. Comparison of numerical and experimental results

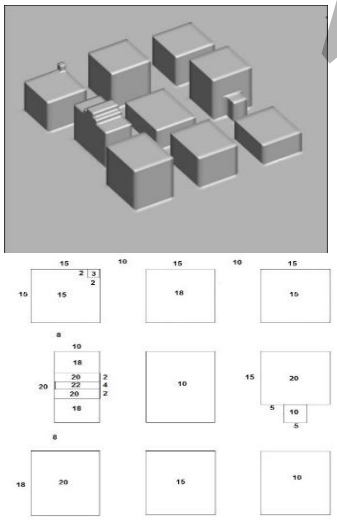
جدول۱. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

موارد تحقیق	تعداد شبکه	مدل زیرشبکه‌ای	مدل زیرشبکه‌ای	ضریب پسا متوسط	انحراف استاندارد ضریب برا	عدد استروهال	درصد انحراف عدد استروهال از تحقیق لین و همکاران
پروژه حاضر تست ۱	۸۰۰۰۰۰			۲/۳۳	۱/۴۵	۰/۱۲۷	٪ ۳/۷
پروژه حاضر تست ۲	۱۰۰۰۰۰۰	اسماگورینسکی- لیلی	اسماگورینسکی- لیلی	۲/۲۹	۱/۳۹	۰/۱۳۴	٪ ۱/۵
پروژه حاضر تست ۳	۱۵۰۰۰۰۰			۲/۲۷	۱/۴	۰/۱۳۴	٪ ۱/۵
لین و همکاران	------			۲/۱	---	۰۰۴/۰±۱۳۲/۰	

همانطور که در جدول۱ نشان داده شده است نتایج پژوهش حاضر با تعداد المان متفاوت بسیار نزدیک به پژوهش تجربی لین و همکاران بوده که خود بیانگر کارآمدی روش ‘گردابه‌های بزرگ در شبیه‌سازی‌های مربوط به جریان باد اطراف بلاف بادی می‌باشد. عدد استروهال، میانگین ضریب پسا و انحراف استاندارد ضریب برا خطای زیر هشت درصد دارند. حال با توجه به کارآمدی و دقت این روش در ایجاد میدان سرعت، از آن در شبیه‌سازی توزیع و پخش گرد و غبار در محیط شهری استفاده شده است.

۲-۳ مدل شهری واقعی

در بخش قبل اطلاعات کلی چون تنظیمات بهینه برای شبیه‌سازی بدست آمده است. با استفاده از چیدمان ساختمان‌های محیط شهری در منطقه فاز دو اندیشه تهران که در شکل۳ قابل مشاهده است، تاثیر زاویه محیط شهری در نحوه‌ی پخش گرد و غبار در محیط شهری مورد بررسی قرار گرفته است. مساحت محیط شهری استفاده شده برابر با ۴۴۸۵ مترمربع است.



شکل۳. نمایی از محیط شهری با ابعاد مربوطه

ACCEPTED MANUSCRIPT

Fig. 3. Urban environment and it's relevant dimensions

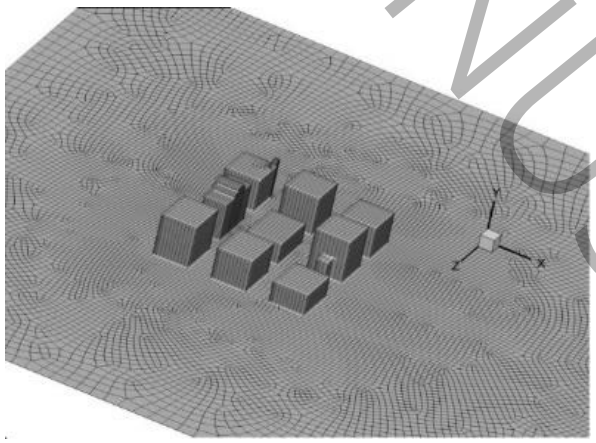
اندازه محدوده‌ی محاسباتی در جهت‌های مختلف نسبت به جهت جریان، به ابعاد فضای شهری شبیه‌سازی شده و شرایط مرزی مورد استفاده وابسته است. در روش گردابه‌های بزرگ علاوه بر شرایط بیان شده، فضای محاسباتی باید بقدری بزرگ باشد که بتواند بزرگترین ساختارهای مربوط به جریان را شامل شود [۱۶]. فاصله صفحه ورودی و بالای محدوده‌ی محاسباتی تا محیط شهری $5H_{max}$ می‌باشد که H_{max} برابر با ارتفاع بلندترین ساختمان می‌باشد و فاصله صفحه خروجی تا محیط شهری حدود ۱۵H_{max} می‌باشد. صفحه‌های ورودی و خروجی در جهت عمود بر جریان باد قرار دارند. اندازه محدوده‌ی محاسباتی برابر با ۲۸۶×۱۳۲×۵۰۰ در جهت X×Y×Z می‌باشد. انتخاب ابعاد مورد استفاده برای محدوده‌ی محاسباتی در این تحقیق بر پایه‌ی COST Action 732 می‌باشد [۱۷].

نسبت انسداد به صورت نسبت مساحت تصویر شده‌ی ساختمان‌ها در جهت جریان به سطح مقطع محدوده‌ی محاسباتی در همان جهت تعریف می‌شود. در دینامیک سیالات محاسباتی بیشینه نسبت انسداد زیر ٪ ۳ می‌باشد که بر پایه‌ی نتایج باتکه[1] و همکاران [۱۸] است. در پژوهش حاضر نسبت انسداد برابر با ٪ ۲/۸۳ و ٪ ۲/۹۵ می‌باشد که شرایط ٪ ۳ را ارضا می‌کند.

به منظور کنترل کامل کیفیت و اندازه‌ی شبکه، از روش خاصی استفاده شده است که شبکه و هندسه به صورت هم‌زمان تولید می‌شوند. در این روش ابتدا هندسه و شبکه‌ی مورد نظر در یک صفحه دو بعدی تولید شد و سپس هندسه مورد نظر از آن استخراج شده است. این روش باعث می‌شود که شبکه بندی در جهت افقی به صورت نامنظم تولید شود در حالی که شبکه‌بندی در جهت عمودی به صورت منظم شکل می‌گیرد. شبکه مورد استفاده در شکل۴ نمایش داده شده است.

در این پژوهش از دو دامنه محاسباتی با ابعاد یکسان استفاده شده که در یکی از آن‌ها منطقه شهری دارای زاویه‌ی ۱۰ درجه نسبت به خط جریان می‌باشد. یو[2] و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثر زاویه بر حضور آلاینده‌های موجود در هوای گذرنده از ساختمان‌های بلند پرداختند که بیشینه حضور مربوط به زوایای صفر تا ۱۵ درجه (۹۰ تا ۷۵ درجه) می‌باشد. با توجه به هزینه محاسباتی بالا در این پژوهش دو زاویه صفر و ده درجه بررسی شده است.

همه مراحل انجام گرفته در این پژوهش برای ایجاد و شبکه بندی فضای محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار گمبیت انجام شده است. تمامی سلول‌های ایجاد شده برای فضای محاسباتی بدون زاویه حمله حدود ۱/۴ میلیون بوده است که تمام این سلول‌ها به صورت شش وجهی بوده و برای دامنه‌ی محاسباتی با زاویه حمله ۱۰ درجه این تعداد برابر با ۱/۱۵ میلیون سلول شش وجهی می‌باشد.



شکل۴. شبکه‌بندی مربوط به ساختمان‌هایی بدون زاویه حمله

Fig. 4. Unstructured mesh for the shown region without angle of attack.

[1] Baetke
[2] Yu

ACCEPTED MANUSCRIPT

صفحه ورودی فضای محاسباتی به عنوان شرایط مرزی ورودی در نظر گرفته می‌شود که در جهت عمود بر جهت جریان می‌باشد تا بتوان پروفیل سرعت متوسط را ایجاد کرد. لایه مرزی اتمسفری ایجاد شده در این پژوهش به صورت خنثی می‌باشد. پروفیل سرعت متوسط در لایه مرزی اتمسفری خنثی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{U(z)}{U_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^n \qquad (۱۶)$$

در رابطه (۱۶)، $U(z)$ به عنوان سرعت متوسط، U_{ref} سرعت در ارتفاع z_{ref}، z بیانگر ارتفاع از سطح زمین و z_{ref} ارتفاع مرجع را نشان می‌دهد. هم چنین n برابر با ۰/۳ می‌باشد که مناسب ناحیه شهری می‌باشد [۲۰]. ارتفاع مرجع در این پژوهش، ارتفاع بزرگترین ساختمان در نظر گرفته شده است که سرعت متناسب با این ارتفاع با توجه به مناطق جنوب کشور که بیشتر در معرض گرد و غبار هستند و همچنین برای مطالعات بررسی آلاینده‌ها در استان تهران با ارتفاع متفاوت مقدار سرعت گزارش شده است که برای ارتفاع بیشینه تقریبا برابر با ۵ متر

ADDIN EN.CITE <EndNote><Cite><Author>Moayyedi</Author><Year>2021</Year><RecNum>13</RecNum><DisplayText>[13]</DisplayText><record><rec-number>13</rec-number><foreign-keys><key app="EN" key></foreign-/>db-id="vw9t2f202f5vs8ewdawxeef3apsa0e9sedww" timestamp="1705589133">13 keys><ref-type name="Journal Article">17</ref-type><contributors><authors><author>Moayyedi, Mohammad Kazem</author><author>Azadi Talab, Vahid</author></authors></contributors><titles><title>Modeling of turbulent atmospheric boundary and dispersion of solid pollutant particles in an urban area using large eddy layer simulation</title><secondary-title>Amirkabir Journal of Mechanical Engineering</secondary-title><short-title>Modeling of turbulent atmospheric boundary layer and dispersion of solid pollutant particles in an urban area using large eddy simulation</short-title></titles><periodical><full-title>Amirkabir Journal of Mechanical Engineering</full-title></periodical><pages>2839-keyword>Large Eddy ><2856</pages><volume>53</volume><number>5</number><keywords Simulation</keyword><keyword>Air pollution</keyword><keyword>computational fluid dynamics</keyword><keyword>Particulate Material Pollutant</keyword><keyword>Environmental fluid dynamic</keyword></keywords><dates><year>2021</year></dates><urls><related-urls><url>https://mej.aut.ac.ir/article_4149_f58ab448e1beca063ace1352f8a9bb2b.pdf</url></related-urls></urls><electronic-resource-num>10.22060/mej.2020.17685.6656</electronic-resource-

ADDIN EN.CITE <EndNote><Cite><Author>Gousseau</Author><Year>2011</Year><RecNum>22</RecNum><DisplayText>[20]</DisplayText><record><rec-number>22</rec-number><foreign-keys><key app="EN" key></foreign-/>db-id="vw9t2f202f5vs8ewdawxeef3apsa0e9sedww" timestamp="1705589801">22 keys><ref-type name="Journal Article">17</ref-type><contributors><authors><author>Gousseau, P</author><author>Blocken, Bert</author><author>Stathopoulos, Theodore</author><author>Van Heijst, GJF</author></authors></contributors><titles><title>CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: A case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal</title><secondary-title>Atmospheric Environment</secondary-title></titles><periodical><full-title>Atmospheric Environment</full-title></periodical><pages>428-438</pages><volume>45</volume><number>2</number><dates><year>2011</year></dates><isbn>

ACCEPTED MANUSCRIPT

شرط مرزی تقارن در دو طرف فضای محاسباتی و بالای آن فرض شده است که سبب سرعت نرمال صفر و گرادیان صفر همه متغییرها در این مرزها شده است. در بخش خروجی فضای محاسباتی شرط مرزی فشار استاتیکی صفر در نظر گرفته می‌شود. سطح همه ساختمان‌های شبیه‌سازی شده و سطح زمین در قسمت پایین فضای محاسباتی به صورت دیوار بدون لغزش تعریف شده‌اند. برای رهاسازی ریزگردها نیز از صفحه ورودی فضای محاسباتی استفاده شده که ریزگردها با سرعت نسبی ۰/۱ متر بر ثانیه تزریق می‌شوند.

گام زمانی مورد استفاده در این پژوهش متغیر بوده و به همین دلیل ابتدا از گام زمانی کوچک ۰/۰۰۱ استفاده شده و بعد از ۱۰ ثانیه گام زمانی به ۰/۰۰۳ برای محیط شهری بدون زاویه حمله و ۰/۰۰۵ با زاویه حمله ۱۰ درجه، تغییر داده شده است.

معادلات مومنتوم با استفاده از روش تفاضل مرکزی محدود شده[1] گسسته‌سازی شده است. درون‌یابی فشار با استفاده از روش مرتبه دوم صورت گرفته و برای انتگرال‌گیری زمانی از روش ضمنی مرتبه دو استفاده شده است. گام زمانی مورد استفاده در این پژوهش متغیر بوده و به همین دلیل ابتدا از گام زمانی کوچک ۰/۰۰۱ استفاده شده و بعد از ۱۰ ثانیه گام زمانی به ۰/۰۰۳ برای محیط شهری بدون زاویه حمله و ۰/۰۰۵ با زاویه حمله ۱۰ درجه، تغییر داده شده است.

عدد کورانت[2] در بیشتر سلول‌های مورد استفاده در فضاهای محاسباتی استفاده شده کمتر از ۱ می‌باشد. برای افزایش دقت نتایج، ابتدا به مدت چند ثانیه حل را بدون تزریق ریزگردها پیش برده تا اثرات ناشی از شرایط اولیه از بین برود.

۴- نتایج و بحث

مطالعه و درک پخش ریزگردها در مناطق شهری بسیار حائز اهمیت است، چرا که کشور ما به خاطر موقعیت جغرافیایی خود بسیار تحت تاثیر این پدیده‌ی زیست محیطی قرار گرفته است. در این تحقیق به بررسی تاثیر زاویه شهر نسبت به جهت جریان در نحوه پخش ریزگردها در محیط شهر شبیه‌سازی شده پرداخته شده است. نرم‌افزار انسیس فلوئنت مورد استفاده قرار گرفته است.

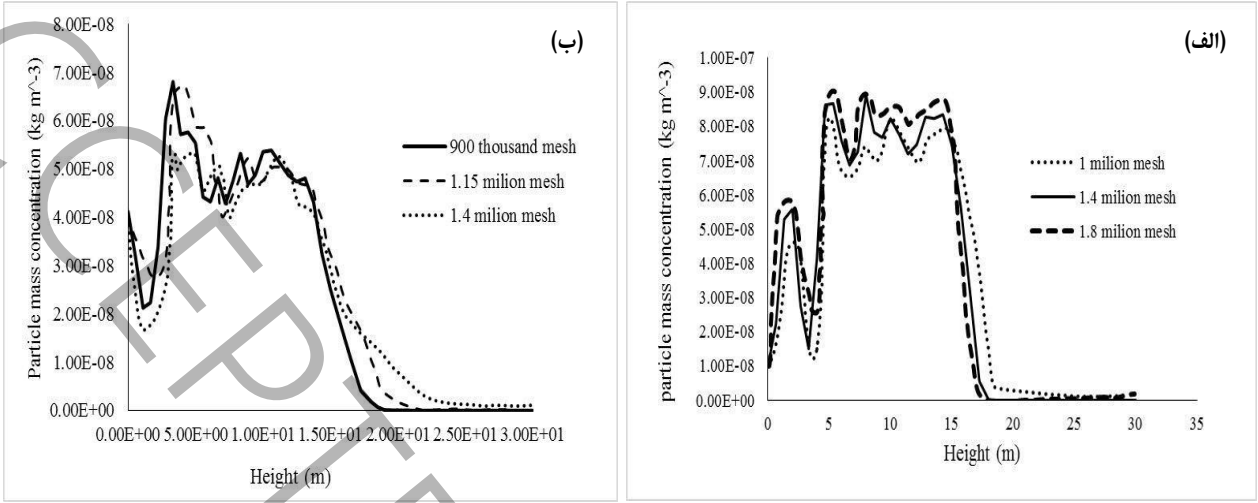
همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، با توجه به نبود اطلاعات آزمایشگاهی و عددی در نحوه‌ی پخش ریزگردها در مناطق شهری، به منظور اعتبارسنجی روش مذکور بر روی یک سیلندر مربعی پیاده شده است تا درستی و دقت آن اطمینان حاصل شود تا بتوان از آن در این پژوهش استفاده شود.

برای بررسی استقلال از شبکه از تعداد شبکه‌های مختلف استفاده شد. برای بررسی آن یک خط افقی قائم در فضای محاسباتی مورد استفاده قرار گرفت که نمودار غلظت را بر اساس افزایش ارتفاع نشان می‌دهد. این خط در بین ساختمان‌ها ردیف اول قرار دارد:

[1] Bounded central differencing

[2] Courant

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۵. غلظت با استفاده از تعداد شبکه‌های مختلف: الف) محیط شهری بدون زاویه نسبت به خط جریان، ب) محیط شهری با زاویه ۱۰ درجه نسبت به خط جریان

Fig. 5. Particle mass concentration for three different mesh a) Urban environment without an angle to streamlines, b) Urban environment with a 10-degrees angle to streamline

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی تاثیر زیادی بر روی جواب‌های حل ندارد.

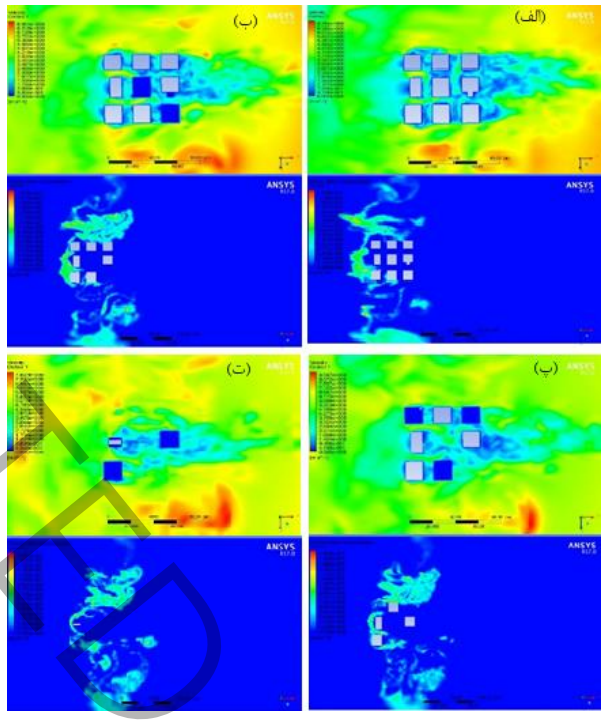
در مطالعه انجام گرفته دو فضای محاسباتی مورد استفاده قرار گرفته است که محیط شهری نسبت به جهت جریان در زاویه‌ی ۰ و ۱۰ درجه قرار گرفته است. در هر دو مورد بررسی شده اندازه U_{ref} برابر با ۵ متر بر ثانیه می‌باشد.

در این بخش شرایط مربوط به اولین فضای محاسباتی که زاویه صفر درجه دارد، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مربوطه ارائه شده است. همانطور که در قسمت‌های قبل بیان شد، تعداد سلول‌های محاسباتی حدود ۱/۴ میلیون می‌باشد. سرعت مرجع در ارتفاع مرجع برابر با ۵ متر بر ثانیه است. ریزگرد محاسبه شده در این تحقیق خاک رس می‌باشد که دارای قطر متوسط ۰/۷۳ میکرومتر می‌باشد. کوچک‌ترین قطر ذره‌ی در این تحقیق ۰/۲ میکرومتر و بزرگ‌ترین آن ۱۷ میکرومتر می‌باشد که با توجه به توزیع روزین-رملر[1] در فضای محاسباتی پخش شده است. چگالی خاک رس استفاده شده در این تحقیق ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. ریزگردها از صفحه‌ی ورودی فضای محاسباتی با نرخ ۰/۰۰۱ کیلوگرم بر ثانیه به مدت ۶ ثانیه تزریق شده‌اند.

برای درک بهتر پخش ریزگردها در داخل محیط شهری، نحوه‌ی پخش ریزگردها را در ثانیه‌ها و ارتفاع‌های مختلف ارائه شده است.

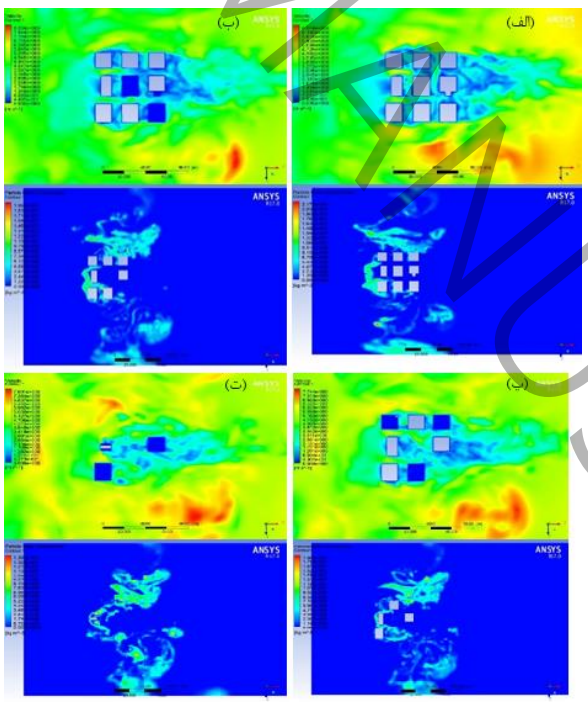
[1] Rosin-Rammler

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۶. پخش ریزگرد و توزیع سرعت در ثانیه ۳۷/۷ و زاویه صفر درجه: الف) ارتفاع ۵، ب) ارتفاع ۱۰، پ) ارتفاع ۱۵، ت) ارتفاع ۲۰

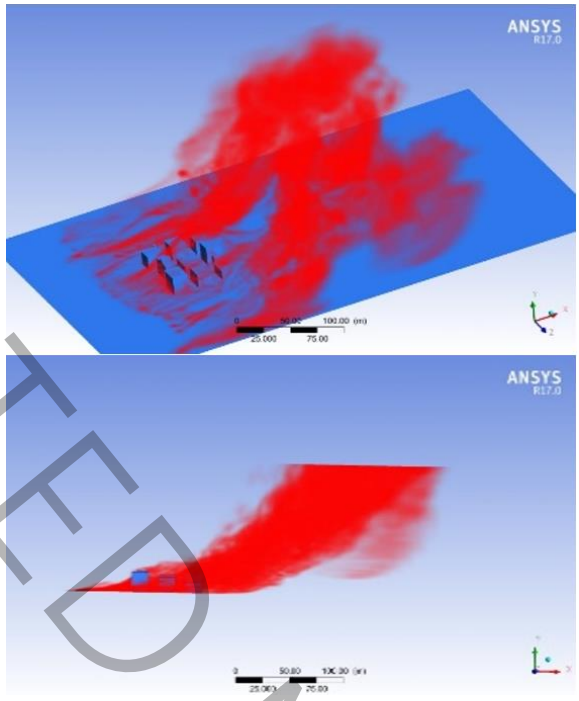
Fig. 6. Dust dispersion and velocity distribution contour at t=37.7s, angle=0: a) height=5m, b) height=10m, c) height=15m, d) height=20m.



شکل۷. پخش ریزگرد و توزیع سرعت در ثانیه ۴۱/۳ و زاویه صفر درجه: الف) ارتفاع ۵، ب) ارتفاع ۱۰، پ) ارتفاع ۱۵، ت) ارتفاع ۲۰

Fig. 7. Dust dispersion and velocity distribution contour at t=41.3s, angle=0: a) height=5m, b) height=10m, c) height=15m, d) height=20m.

ACCEPTED MANUSCRIPT

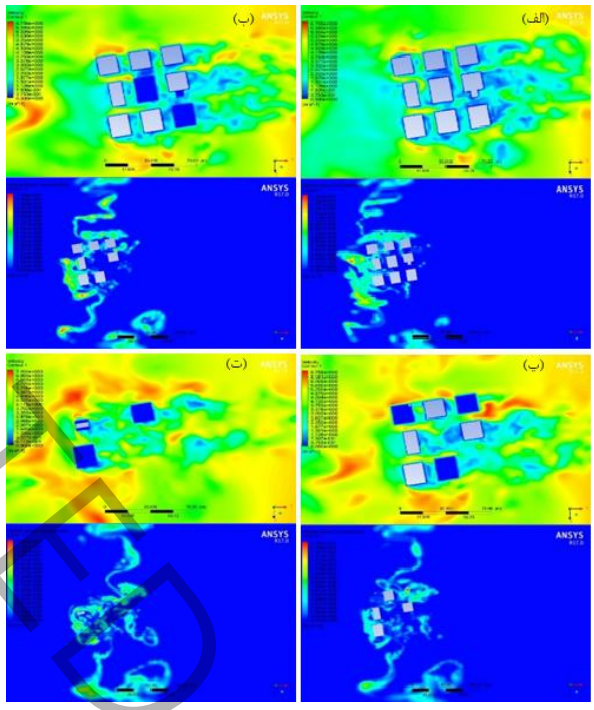


شکل۸. نمایی کلی از پخش ریزگردها در ثانیه ۴۱/۳ (زاویه صفر درجه)

Fig. 8. Dust dispersion at time=41.3s and angle=0

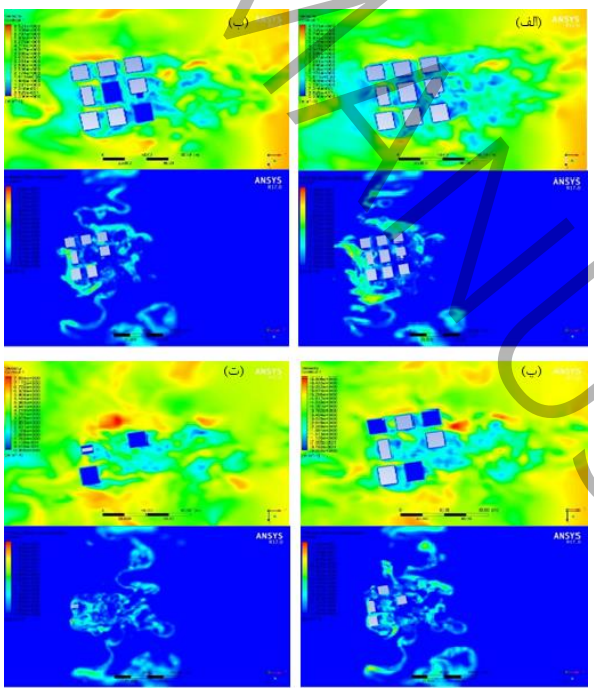
در ادامه به ارائه نتایج حاصل از فضای محاسباتی با زاویه ۱۰ درجه نسبت به خط جریان پرداخته شده است. تنها تفاوت دو فضای محاسباتی استفاده شده در تعداد المان‌های محاسباتی و زاویه شهری می‌باشد و بقیه شرایط کاملا یکسان می‌باشند.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۹. پخش ریزگرد و توزیع سرعت در ثانیه ۳۶ و زاویه ۱۰ درجه: الف) ارتفاع ۵، ب) ارتفاع ۱۰، پ) ارتفاع ۱۵، ت) ارتفاع ۲۰

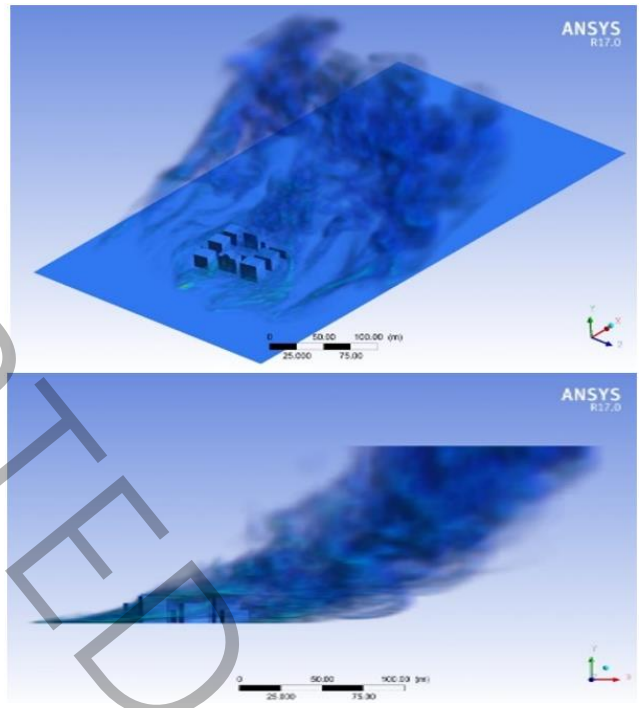
Fig. 9. Dust dispersion and velocity distribution contour at t=36s, angle=10: a) height=5m, b) height=10m, c) height=15m, d) height=20m.



شکل۱۰. پخش ریزگرد و توزیع سرعت در ثانیه ۴۱/۳ و زاویه ۱۰ درجه: الف) ارتفاع ۵، ب) ارتفاع ۱۰، پ) ارتفاع ۱۵، ت) ارتفاع ۲۰

Fig. 10. Dust dispersion and velocity distribution contour at t=41.3s, angle=10: a) height=5m, b) height=10m, c) height=15m, d) height=20m.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۱۱. نمایی کلی از پخش ریزگردها در ثانیه ۴۱/۳ (زاویه ۱۰ درجه)

Fig. 11. Dust dispersion at time=41.3s and angle=10

با مقایسه نتایج بدست آمده در ارتفاع‌ها و ثانیه‌های مختلف برای دو فضای محاسباتی متفاوت و شرایط مرزی یکسان تاثیر زاویه محیط شهری نسبت به خط جریان در پخش ریزگردها به طور کامل مشهود است که در بخش نتیجه‌گیری به آن پرداخته شده است.

۵- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای پیش‌بینی پخش ریزگردها در محیط شهری انجام شده است. برای بررسی تاثیر زاویه‌ی محیط شهری نسبت به جهت جریان در پخش ریزگردها در اطراف ساختمان‌ها از دو فضای محاسباتی استفاده شده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها در ثانیه‌ها و ارتفاع‌های مختلف در بخش نتایج نمایش داده شده است.

با مقایسه نتایج مشاهده شد که ریزگردها در اطراف و مابین ساختمان‌ها با زاویه ۱۰ درجه نسبت به جهت جریان دارای پخش آلودگی زیادی نسبت به ساختمان‌هایی با زاویه‌ی صفر درجه می‌باشند. زاویه بوجود آمده باعث تشدید در آشفتگی جریان باد در داخل و اطراف محیط شهری شده است که این ویژگی‌های تلاطمی باعث پخش، رقیق یا ماندگار شدن ریزگردها در داخل محیط شهری شده که می‌تواند باعث ایجاد شرایط بسیار نامطلوبی برای سلامت ساکنان باشد. بنابرین واضح است که نوع آرایش ساختمان‌ها تاثیر بسیار زیادی در پخش ریزگردها داشته باشند.

دومین نتیجه‌ی این پژوهش، توانایی روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در تعیین نحوه‌ی پخش ریزگردها در لایه مرزی اتمسفری می‌باشد. این روش، روش بسیار مناسبی برای بررسی نحوه‌ی پخش ریزگردها در محیط شهری می‌باشد؛ چراکه با توجه به نتایج بدست آمده هر قدر مدل‌سازی دقیق آشفتگی‌ها در فضای محاسباتی امکان پذیر باشد، به همان اندازه شبیه‌سازی پخش ریزگردها دقت خواهد داشت.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۶- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از حمایت آزمایشگاه محیط متخلخل و سیالات پیچیده دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

đ	فاصله تا نزدیکترین دیوار، m
d	قطر، m
D	عرض سیلندر، m
f	فرکانس، Hz
F	نیرو، $\mathrm{N/m^2}$
H	ارتفاع، m
k	ثابت وون کارمن
l	طول اختلاط، m
P	فشار، Pa
S	تانسور کرنش
s	نسبت چگالی ذره به سیال
T	زمان، s
U	سرعت، m/s
x	جهت محور مختصات
Z	ارتفاع، m
Re	عدد رینولدز
St	عدد استروهال

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
ν	ویسکوزیته سینماتیک، m^2/s

زیرنویس

F	سیال
P	ذره

بالانویس

*	شرایط مرجع

ACCEPTED MANUSCRIPT

۸- مراجع

[۱] M. Carpentieri, A.G. Robins, Influence of urban morphology on air flow over building arrays, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 145 (2015) 61-74.

[۲] J.-J. Baik, R.-S. Park, H.-Y. Chun, J.-J. Kim, A laboratory model of urban street-canyon flows, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 39(9) (2000) 1592-1600.

[۳] J. Baker, H.L. Walker, X. Cai, A study of the dispersion and transport of reactive pollutants in and above street canyons—a large eddy simulation, Atmospheric Environment, 38(39) (2004) 6883-6892.

[۴] C.-H. Chang, R.N. Meroney, Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89(14-15) (2001) 1325-1334.

[۵] Z.-T. Xie ,O. Coceal, I.P. Castro, Large-eddy simulation of flows over random urban-like obstacles, Boundary-layer meteorology, 129 (2008) 1-23.

[۶] T. Van Hooff, B. Blocken, Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam ArenA stadium, Environmental Modelling & Software, 25(1) (2010) 51-65.

[۷] M. Jahangiri, R. Babae, A. Sedaghat, Numerical study of the effect of wind speed on the pollutants dispersion in the channel of an urban street, in: The 5th National Confrence on environmental Engineering and Management (5CEEM)-31 May 2023, 2011.

[۸] M. Llaguno-Munitxa, E. Bou-Zeid, M. Hultmark, The influence of building geometry on street canyon air flow: validation of large eddy simulations against wind tunnel experiments, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 165 (2017) 115-130.

[۹] S. Murakami, A. Mochida, Y. Hayashi, S. Sakamoto, Numerical study on velocity-pressure field and wind forces for bluff bodies by κ-ϵ, ASM and LES ,Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 44(1-3) (1992) 2841-2852.

[۱۰] R.N. Meroney, B.M. Leitl, S. Rafailidis, M. Schatzmann, Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81(1-3) (1999) 333-345.

[۱۱] Y. Zhiyin, Large-eddy simulation: Past, present and the future, Chinese journal of Aeronautics, 28(1) (2015) 11-24.

[۱۲] E. Aristodemou, L.M. Boganegra, L. Mottet, D. Pavlidis, A. Constantinou, C. Pain, A. Robins, H. ApSimon, How tall buildings affect turbulent air flows and dispersion of pollution within a neighbourhood, Environmental pollution, 233 (2018) 782-796.

[۱۳] M.K. Moayyedi, V. Azadi Talab, Modeling of turbulent atmospheric boundary layer and dispersion of solid pollutant particles in an urban area using large eddy simulation, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 53(5) (2021) 2839-2856 (in persian).

[۱۴] A. Fluent, Ansys Fluent 12.0 theory guide, ANSYS Inc., Canonsburg, PA.(۲۰۰۹) ,

[۱۵] D. Drew, R. Lahey Jr, The virtual mass and lift force on a sphere in rotating and straining inviscid flow, International Journal of Multiphase Flow, 13(1) (1987) 113-121.

[۱۶] D.A. Lyn, S. Einav, W. Rodi, J.-H. Park, A laser-Doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder, Journal of Fluid Mechanics, 304 (1995) 285-319.

[۱۷] J. Franke, A. Hellsten, H. Schlünzen, B. Carissimo, Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, COST European Cooperation in Science and Technology, 2007.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[۱۸] F. Baetke, H. Werner, H. Wengle, Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 35 (1990) 129-147.

[۱۹] Y. Yu, K. Kwok, X. Liu, Y. Zhang, Air pollutant dispersion around high-rise buildings under different angles of wind incidence, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 167 (2017) 51-61.

[۲۰] P. Gousseau, B. Blocken, T. Stathopoulos, G. Van Heijst, CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: A case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal, Atmospheric Environment, 45(2) (2011) 428-438.

ACCEPTED MANUSCRIPT

Investigation of dust dispersion in urban environment using large eddy simulation method

M.R. Shahnazari[a1], Hamid Chenarani[a], Aryan Ahmadpour[a]

[a] Mechanical faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Pollution and the distribution of dust in urban areas have caused a wide range of diseases. Dust is one of the environmental phenomena that has caused adverse effects on health and the environment. Contamination caused by dust of different origins is spread across a wide range of atmospheres. Our understanding of the mechanism of dust distribution and the turbulence in urban areas is very important, which helps us reduce the effects of these types of contaminants. Computational Fluid Dynamics models have been considered in this study due to the economical approach to research in the field of dust distribution. Due to the turbulence of the wind flow inside the city, we use the large eddy simulation method to model this turbulence, which is widely used in computational wind engineering. In this study, we have investigated the dust in the urban area. For this purpose, the effect of the wind direction angle and the urban environment as well as the height of the buildings on the speed distribution and dispersion of fine dust with time has been investigated in two separate computing spaces. By comparing the results between 0° and 10° angle, it has been observed that with the increase of the flow turbulence intensity angle, these turbulent characteristics lead to the dispersion and persistence of fine dust in the urban environment. By comparing the results, we conclude that by creating an angle in the urban area due to increased mixing, the amount of dust distribution in the urban area rises.

Keywords

Dust, Urban area, Turbulence, Large eddy simulation

[1] Corresponding Author Email: shahnazari@kntu.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT