



دستورالعمل انجمن معماری ژاپن در کاربرد عملی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در شرایط محیطی باد در تراز عابر پیاده پیرامون ساختمان‌ها^۱

نویسندگان: یوشی‌هیده تومیناگا، آکاشی موشیدا، ریچیرو یوشی، هیروتو کاتاوکا، سویوشی نوزو، ماسارو یوشیکاوا، تایچی شیراساوا

مترجمان: سیده حمیده موسوی^{۱*}، شهرام دلفانی^۲

۱. کارشناسی ارشد، فناوری معماری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
۲. دانشیار، مهندسی مکانیک، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران
* تهران، کدپستی ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱، hamideh.moosavi17@gmail.com

چکیده

پیشرفت چشمگیر رایانه‌ها و نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی^۲ در سال‌های اخیر، امکان پیش‌بینی و ارزیابی شرایط محیطی باد در تراز عابر پیاده پیرامون ساختمان‌ها را، در مرحله طراحی فراهم کرده است. لذا وجود دستورالعمل‌هایی که به صورت خلاصه به نکات مهم و کاربردی تکنیک CFD در این حوزه بپردازد، ضروری است. تأکید این مقاله به دستورالعمل‌های ارائه شده توسط انجمن معماری ژاپن است. از ویژگی این دستورالعمل آن است که با مقایسه بین پیش‌بینی‌های CFD، نتایج تونل باد و اندازه‌گیری‌های میدانی بر روی ۷ نمونه موردی، نتایجی را جمع‌بندی نموده تا به صورتی نسبتاً جامع بتوان بسیاری از شرایط محاسباتی مؤثر بر رژیم‌های جریان را بررسی نمود.

کلیدواژه‌ها

CFD، باد در تراز عابر پیاده، پیش‌بینی، دستورالعمل، آزمایش تجربی

AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings

Yoshihide Tominaga, Akashi Mochida, Ryuichiro Yoshie, Hiroto Kataoka, Tsuyoshi Nozu, Masaru Yoshikawa, Taichi Shirasawa

Translated by: Seyedeh Hamideh Moosavi^{1*}, Shahram Delfani²

1. Urban and Architecture Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Department of Mechanical Engineering, Road, Housing, and Urban Development Research Center, Tehran, Iran
* P.O. Box 1983969411, Tehran, Iran, hamideh.moosavi17@gmail.com

Abstract

Significant improvements of computer facilities and computational fluid dynamics (CFD) software in recent years have enabled prediction and assessment of the pedestrian wind environment around buildings in the design stage. Therefore, guidelines are required that summarize important points in using the CFD technique for this purpose. This paper describes guidelines proposed by the Working Group of the Architectural Institute of Japan (AIJ). The feature of these guidelines is that they are based on cross-comparison between CFD predictions, wind tunnel test results and field measurements for seven test cases used to investigate the influence of many kinds of computational conditions for various flow fields.

Keywords

^۱ این متن، ترجمه مقاله "AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings" است که در شماره ۹۶ نشریه علمی "Wind Engineering and Industrial Aerodynamics" در سال ۲۰۰۸ به چاپ رسیده است و تا آوریل ۲۰۱۹ (زمان ترجمه متن)، ۱۰۸۰ مقاله علمی به آن ارجاع داده شده است.

^۲ Computational Fluid Dynamic (CFD)

CFD, Pedestrian wind environment, Prediction, Guidelines, Benchmark test

۱- مقدمه

رینولدزهای پایین مطلوب‌تر است، اما استفاده از این مدل‌ها برای تجزیه و تحلیل جریان باد در تراز عابر پیاده، به دلیل نیاز به تعداد بسیار زیادی شبکه و بالا رفتن نرخ محاسبات مشکل است. با وجود این، این دستورالعمل‌ها می‌توانند هنگام استفاده از مدلی با دقت بسیار بالا، مانند شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ یا مدل‌های با رینولدز پایین نیز مفید باشند.

۲- طرح کلی از نمونه‌های مورد مقایسه

به منظور روشن ساختن عوامل اصلی تأثیرگذار در میزان دقت پیش‌بینی‌ها، مقایسه‌هایی متقابل بین آزمایش‌های تونل باد، اندازه‌گیری‌های میدانی و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی (با استفاده از مدل‌های مختلف $k-\epsilon$ ، DSM و LES) پیرامون یک ساختمان مجزای بلند مرتبه که در لایه مرزی سطحی^{۱۰} قرار گرفته، در میان مجموعه‌ای از ساختمان‌ها در یک بستر شهری واقعی و پیرامون یک درخت، انجام شده است. شکل ۱، هفت نمونه مورد بررسی شده در این مقایسه را نشان می‌دهد. به منظور بررسی تأثیر یک فاکتور مشخص مثلاً عملکرد یک مدل جریان آشفته^{۱۱} (توربولانسی)، دیگر عوامل تأثیرگذار ثابت و یکسان (تحت شرایط یکسان محاسباتی) در نظر گرفته شده‌اند. مبنای شرایط محاسباتی، برای مثال: تنظیمات شبکه، شرایط مرزی و غیره از پیش تعیین شده و از محققان خواسته شده تا با استفاده از این شرایط محاسباتی مینا به انجام شبیه‌سازی‌ها بپردازند و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است [۱۰-۱۶].

۳- دامنه حل و نمایش محیط اطراف

۳-۱- ابعاد دامنه حل^{۱۲}

در دامنه محاسباتی، بر اساس اطلاعات دریافتی از تونل باد، نرخ انسداد^{۱۳} باید زیر ۳٪ باشد. در مدلی که تنها یک ساختمان مجزا قرار دارد، فاصله مدل از صفحات جانبی و بالایی دامنه حل باید $5H$ یا بیشتر باشد. درحالی‌که H بیانگر ارتفاع مدل ساختمان هدف است [۱۰، ۱۷]. فاصله بین ورودی جریان و مدل مورد بررسی باید به نحوی تنظیم شود که با آنچه به صورت آزمایشگاهی در تونل باد و در بالادست جریان در تونل باد قرار دارد (ناحیه صاف و هموار)، مطابقت داشته باشد. در شبیه‌سازی، مرز پایین دست دامنه حل (خروجی جریان) باید حداقل به اندازه $10H$ بعد از مدل ساختمانی امتداد یابد. هنگامی که ساختمان‌های اطراف نیز در نظر گرفته می‌شوند، ارتفاع دامنه محاسباتی باید طوری تنظیم شود که با ارتفاع لایه مرزی^{۱۴} بستر

پیشرفت چشمگیر رایانه‌ها و نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی در سال‌های اخیر، امکان پیش‌بینی شرایط محیطی باد تراز عابر پیاده را در فاز طراحی ساختمان‌ها فراهم کرده است. در این میان، در بسیاری از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی^۱ به دلیل اطلاعات ناکافی درباره عوامل مؤثر بر شرایط محاسباتی، نتایجی نامعتبر کسب می‌شود. تاکنون چندین مطالعه موردی درباره شرایط باد در تراز عابر پیاده پیرامون ساختمان‌های واقعی، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است [۱-۴]. با وجود این، تأثیر شرایط محاسباتی، مانند: نحوه شبکه‌بندی، ابعاد دامنه حل، شرایط مرزی و غیره در دقت نتایج هنوز به صورت قاعده‌مند مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین، نیاز به مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها که نکات مهم در استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی در پیش‌بینی شرایط باد عابر پیاده را به طور خلاصه بیان کند، ضروری است. شایان ذکر است تعدادی دستورالعمل در حوزه‌ی کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در صنعت درمورد شیوه‌های اعتبارسنجی^۲ و صحت‌سنجی^۳، منتشر شده است [۵-۷]. هرچند این دستورالعمل‌ها اطلاعات باارزشی در خصوص بررسی جریان باد پیرامون ساختمان‌ها فراهم کرده‌اند، اما هنوز دستورالعملی مختص استفاده از این روش برای پیش‌بینی جریان باد پیرامون ساختمان‌ها تدوین نشده است.

اخیرا پیشنهادهایی درباره استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی در پیش‌بینی شرایط محیطی باد در تراز عابر پیاده توسط مؤسسه کاست^۴ (مؤسسه اروپایی همکاری در زمینه علمی و تحقیقات فنی) و گروه اکشن^۵ C14 تدوین شده است. این پیشنهادها بیشتر مبتنی بر نتایج منتشر شده از دیگران بوده که توسط فرانک در سال ۲۰۰۶ ارایه شده است [۸، ۹].

دستورالعمل پیش‌رو صرفاً برای پیش‌بینی جریان باد پیرامون ساختمان‌ها به کمک شیوه دینامیک سیالات محاسباتی توسط انجمن معماری ژاپن^۶ و با همکاری چندین محقق از دانشگاه‌ها و مؤسسه‌های خصوصی متفاوت، منتشر شده است. این گروه تحقیقاتی، نتایج زیادی از آزمایش‌های تونل باد، اندازه‌گیری‌های میدانی و نتایج عددی منتج از نرم‌افزارهای متفاوت دینامیک سیالات محاسباتی را برای بررسی تأثیر مشخصه‌های محاسباتی مختلف در میدان‌های جریان گردآوری کرده‌اند. یکی از ویژگی‌های متمایز این دستورالعمل این است که نتایج ارایه شده از آن، منتج از بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی همین گروه تحقیقاتی بوده است. در حالی‌که دستورالعمل‌های ارایه شده توسط کاست عمدتاً شامل نتایج سایر پژوهشگران است. این مقاله همچنین به بحث درباره شباهت‌ها و تفاوت‌های این دو دستورالعمل می‌پردازد.

دستورالعمل‌های پیشنهاد شده در اینجا اکثراً بر پایه عدد رینولدز^۷ بالا و معادلات نویر-استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز^۸ است. اگرچه برای بالا بردن دقت نتایج، استفاده از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۹ و

¹⁰ Surface Boundary Layer

در این لایه از اتمسفر عوارض طبیعی، مصنوعی و توپوگرافی سطح زمین باعث ایجاد نیروی اصطکاک و رانش شده، که در نهایت سبب تغییر عمودی سرعت متوسط باد در لایه نزدیک به زمین می‌شود. سرعت متوسط باد در این لایه با افزایش ارتفاع تغییر می‌کند و این تغییر تا جایی امتداد می‌یابد که تنش حاصل از نیروی برشی سطح را بتوان نادیده گرفت؛ در این ارتفاع سرعت باد به بیشترین میزان می‌رسد و بدون تغییر باقی می‌ماند (ASCE 1999). این ارتفاع را ارتفاع گرادبان (Z_g) می‌نامند. در این لایه هوا، پروفیل سرعت باد توسط قانون لگاریتمی محاسبه و مقدار سرعت اصطکاک ثابت فرض می‌شود.

¹¹ حرکت بسیار نامنظم سیال را که معمولاً در سرعت‌های بالا دیده می‌شود، آشفته یا توربولانسی می‌نامند.

12 Solution Domain

13 Blockage Ratio

نسبت سطحی از نمونه که مقابل جریان قرار می‌گیرد نسبت به مقطع عرضی ورودی جریان

¹⁴ Boundary Layer

در این لایه از اتمسفر عوارض طبیعی، مصنوعی و توپوگرافی سطح زمین باعث ایجاد نیروی اصطکاک و رانش و در نهایت، سبب تغییر عمودی سرعت متوسط باد در لایه نزدیک به زمین می‌شود. سرعت

¹ Computational Fluid Dynamics (CFD)² Validation³ Verification⁴ COST⁵ Action C14⁶ AIJ⁷ Reynolds Number (Re)⁸ Reynolds Average Navier-Stokes (RANS)⁹ Large Eddy Simulation (LES)

است که شرطهایی به معادلات اولیه جریان برای کاهش سرعت باد ولی افزایش توربولانس، اضافه کنیم. این مدل را که بر اساس مدل $k-\epsilon$ است، کانایی مدل^۱ می‌نامند. البته همان‌طور که ذکر شد، در این مدل شرطهایی به معادلات حاکم افزوده شده است [۲۰-۲۳].

کاشت درخت یکی از متداول‌ترین اقدامات برای بهبود شرایط محیطی در تراز عابر پیاده است. موکیدا و همکارانش [۱۱] انواع سایه‌های درختی را طبقه‌بندی کرده‌اند و همچنین، مدل‌های مختلف سایه ایجاد شده را با اندازه‌گیری‌های میدانی جریان پیرامون درخت‌ها مقایسه کرده‌اند. به پژوهشگران پیشنهاد می‌شود، هنگام بررسی میزان سایه‌اندازی درختان، نتایج خود را با موکیدا و همکاران [۱۱] مقایسه نمایند.

۴- تقسیمات شبکه

۴-۱- کلیات

به منظور پیش‌بینی رژیم جریان پیرامون ساختمان با دقتی قابل قبول، مهمترین نکته بازآفرینی صحیح پدیده جدایش جریان در کنار سقف و دیوارهاست. بنابراین، برای حل جریان در گوشه‌های ساختمان، به یک شبکه‌بندی ریز نیاز است. با این حال، معمولاً حل زیرلایه‌ی لزجتی^۲ در نزدیکی دیواره‌های ساختمان و اعمال شرط عدم لغزش بر روی دیوارها، بسیار مشکل است. استفاده از توابع دیواره، برای نمایش جریان پیرامون ساختمان‌ها اساساً اشتباه است. زیرا بسیاری از توابع دیواره به دلیل در نظر نگرفتن پدیده جدایش جریان، توابعی نادقیق هستند. این درحالی است که بیشتر ساختمان‌ها اجزای صلب با لبه‌های تیز هستند و همیشه نقاط جدایش، صرفنظر از عدد رینولدز، در گوشه‌های اصلی پدیدار می‌شود. اما نتایج نشان می‌دهد که میزان خطای به‌وجود آمده ناشی از توابع دیواره، کمتر از میزان مورد انتظار است.

بر اساس نتایج [۱۰، ۱۲، ۱۵] برای یک مدل ساختمانی ساده وجود حداقل ۱۰ سلول در یک جبهه ساختمان برای بازآفرینی جدایش جریان پیرامون گوشه‌های رو به سمت باد، ضروری است.

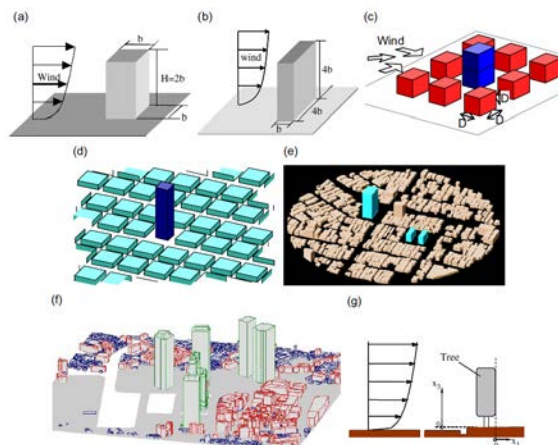
شکل سلول‌ها باید به نحوی تنظیم شود که عرض سلول‌های مجاور هم مشابه باشد، خصوصاً در ناحیه‌هایی که تغییرات سرعت قابل توجه است. در این نواحی، مطلوب است که ضریب رشد^۳ سلول‌های مجاور $1/3$ یا کمتر در نظر گرفته شود. با این حال، اثبات این امر که نتایج، وابسته به شبکه‌بندی نیست، الزامی است؛ زیرا ضریب رشد پیشنهاد شده ممکن است بر اساس شکل ساختمان و محیط اطراف آن، تغییر کند.

کاست نیز محدودیت‌های مشابهی را برای ضریب رشد شبکه‌ها ارائه می‌دهد و پیشنهاد می‌کند که حساسیت نتایج به دقت شبکه باید بررسی شود [۸].

۴-۲- دقت شبکه برای محوطه ساختمانی واقعی

حداقل دقت شبکه باید حدود 0.1 مقیاس ساختمان (بین 0.5 تا 5.0 متر) در ناحیه پیرامون ساختمان هدف، تنظیم شود. به‌علاوه، شبکه‌ها باید به نحوی

مورد مطالعه، مطابقت داشته باشد [۱۸]. در این حالت نیز، فاصله از دیوارهای جانبی محدوده محاسباتی باید حدود $5H$ از لبه‌ی بیرونی مدل ساختمان هدف باشد. نهایتاً مدل‌های ساختمانی موجود نباید بیشتر از 3% فضای حل را اشغال کنند.



شکل ۱ نمونه‌های موردی مقایسه شده:

(a) نمونه موردی A (مکعب مستطیل ۱:۲:۱)؛ (b) نمونه موردی B (مکعب مستطیل ۱:۴:۱)؛ (c) نمونه موردی C (بلوک‌های شهری ساده)، (d) نمونه موردی D (ساختمان بلند در بستر شهری)، (e) نمونه موردی E (مجموعه‌های ساختمانی با احجام ساده شده در بستر شهری واقعی)؛ (f) نمونه موردی F (مجموعه‌های ساختمانی با احجام ساده شده در بستر شهری واقعی)؛ (g) نمونه موردی G (یک درخت کاج دو بعدی)

در کاست نیز الزامات مشابهی برای ورودی و ارتفاع دامنه‌ی حل ارائه شده است. بر اساس این دستورالعمل فواصل جانبی، $2.3W$ ، درحالی که W عرض محدوده ساختمانی و فاصله مدل تا خروجی جریان، $15H_{max}$ ، درحالی که H_{max} ارتفاع بلندترین ساختمان است، پیشنهاد شده است که کمی محافظه‌کارانه به نظر می‌رسد [۹]. چنانچه در دامنه حل تنها تأکید بر ساختمان هدف باشد و از ساختمان‌های اطراف صرفنظر شود، احتمال ایجاد نتایج غیر واقعی بالا می‌رود [۱۹].

۳-۲- محیط پیرامون ساختمان هدف

در هنگام بررسی یک ساختمان در محیط شهری، عموماً شعاعی به میزان $1-2H$ از مدل ساختمان هدف، باید به طور دقیق مدل‌سازی شود. به‌علاوه، حداقل یک بلوک شهری در اطراف ساختمان هدف بازآفرینی شود [۱۵، ۱۶]. همچنین، استفاده از تعدادی احجام ساختمانی ساده جهت تعیین طول زبری مناسب (Z_0) برای شرط مرزی سطح زمین و ارائه زبری منطقه بیرونی (از لبه بیرونی بلوک‌های شهری اضافی تا مرز دامنه محاسباتی) توصیه می‌شود. کاست پیشنهاد می‌دهد که ساختمان هدف، باید با بیشترین میزان جزئیات ارائه شود ولی به جزئیات محیط اطراف اشاره‌ای نکرده است [۹].

۳-۳- تدابیری برای موانع کوچکتر از اندازه شبکه

برای شبیه‌سازی اثرهای اپرویدینامیکی موانع با ابعاد کوچک مانند ساختمان‌های کوچک، تابلوهای راهنمایی، درختان و اتومبیل‌ها و غیره نیاز

¹ Canopy Model

² Viscous SubLayer

زیر لایه لزجتی منطقه‌ای از یک جریان عمدتاً آشفته است که در نزدیکی مرز با شرایط عدم لغزش رخ می‌دهد. در این ناحیه، تغییرات سرعت جریان در جهت عمود بر مرز جسم صلب به صورت خطی است.

³ Stretching Ratio

متوسط باد در این لایه با افزایش ارتفاع تغییر می‌کند و این تغییر تا جایی امتداد پیدا می‌کند که تنش حاصل از نیروی برشی سطح را بتوان نادیده گرفت؛ در این ارتفاع سرعت باد به بیشترین میزان رسیده و بدون تغییر باقی می‌ماند.

$$I(z) = \frac{\sigma_z(z)}{U(z)} = 0.1 \left(\frac{z}{z_G}\right)^{(-\alpha-0.05)}$$

درحالی که Z_G ارتفاع لایه مرزی تعیین شده بر اساس نوع زمین و σ_u مقادیر کمینه مربعات بهینه^۳ نوسانات سرعت در جهت رو به سمت وزش باد است.

در لایه مرزی اتمسفری، رابطه زیر بین $I(z)$ و $k(z)$ برقرار است:

$$k(z) = \frac{\sigma_u^2(z) + \sigma_v^2(z) + \sigma_w^2(z)}{2} \cong \sigma_u^2(z) = (I(z) U(z))^2$$

پیشنهاد می شود که مقادیر ε نیز با در نظر گرفتن موازنه $P_k = \varepsilon$ ارایه شود.

$$\varepsilon(z) \cong P_k(z) \cong \frac{-u'w'}{dz} \cong C_u^2 k(z) \frac{dU(z)}{dz}$$

در صورتی که فرض شود تغییرات سرعت در جهت عمود بر سطح ساختمان از قانون توانی (رابطه (۱)) تبعیت می کند، می توان با استفاده از آن گرادین سرعت در این جهت و بر اساس رابطه (۴) مقدار ε را به صورت زیر تعیین نمود:

$$\varepsilon(z) = \sqrt{C_u} k(z) \frac{U_s}{z_s} \alpha \left(\frac{z}{z_s}\right)^{(\alpha-1)}$$

در اینجا C_u ثابت و برابر ۰/۰۹ فرض می شود.

دستورالعمل کاست برای شرایط مرزی ورودی، فرمول هایی را که توسط ریچارد و هاگزی [۲۵] در سال ۱۹۹۳ ارایه شده است، پیشنهاد می دهد. پروفیل های عمودی برای $U(z)$ ، $k(z)$ و $\varepsilon(z)$ در لایه مرزی اتمسفری با فرض تنش برشی ثابت، به شرح زیر است:

$$U(z) = \frac{U_{ABL}^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_s}\right)$$

$$k(z) = \frac{U_{ABL}^*}{\sqrt{C_u}}$$

$$\varepsilon(z) = \frac{U_{ABL}^*}{\kappa(z+z_0)}$$

در حالی که κ ثابت فون کارمن و برابر با ۰/۴ و U_{ABL}^* سرعت اصطکاکی لایه مرزی اتمسفری است.

U_{ABL}^* از سرعت مرجع U_h در ارتفاع h به صورت زیر محاسبه می شود:

$$U_{ABL}^* = \frac{\kappa U_h}{\ln\left(\frac{h+z_0}{z_s}\right)}$$

به طور خلاصه می توان گفت که شرط مرزی سرعت، k ، ε در مرز بالادست ناحیه حل و در جهت عمود بر سطح ساختمان بر اساس معادلات ۱ تا ۴، قابل دستیابی است که در آنها مقدار توان α مطابق این دستورالعمل و بر مبنای مقدار سرعت باد ارایه شده است [۱۸]. درحالی که در کاست، مقدار شرط مرزی سرعت، k ، ε در مرز بالادست ناحیه حل و در جهت عمود بر سطح ساختمان بر اساس معادلات ۶ تا ۹ که بر پایه z_0 یا فاکتور میزان زبری سطح است، بیان می شود. در معادلات ۶ تا ۹ فرض می شود که ارتفاع دامنه محاسباتی بسیار کمتر از ارتفاع لایه مرزی اتمسفری است. زیرا فرض تنش برشی ثابت تنها در قسمت پایینی لایه مرزی اتمسفری معتبر است.

قرار گیرند که تا تراز مورد ارزیابی (۱/۵ تا ۵ متر بالاتر از زمین) حداقل سه ردیف سلول، از سطح زمین قرار گرفته باشد [۱۴، ۱۵].

کاست پیشنهاد می کند که حداقل ۱۰ شبکه باید در هر وجه ساختمان یا ۱۰ سلول به ازای هر مقدار از ریشه سوم حجم ساختمان در هر وجه آن استفاده شود. همچنین، پیشنهاد می دهد که به هنگام محاسبه سرعت در تراز ۱/۵ متری، بایستی حداقل سه ردیف سلول زیر تراز مدنظر قرار گرفته باشد. این الزامات با دستورالعمل های انجمن معماری ژاین مطابقت دارد.

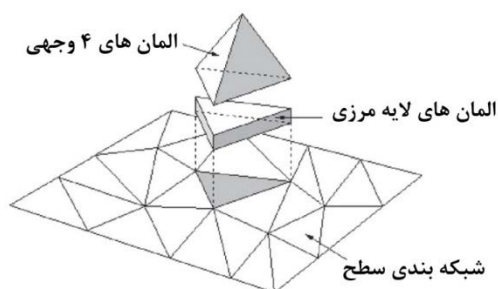
۳-۴- استقلال از مش^۱

در روند استقلال از مش باید اثبات گردد که نتایج حاصل وابسته به تعداد شبکه ها نیست. تعداد شبکه های ریز باید حداقل ۱/۵ برابر تعداد مش های درشت در هر بُعد باشد [۲۴].

طبق کاست، باید حداقل ۳ نمونه شبکه بندی را به طوری که نسبت سلول ها برای هر ضلع در دو شبکه متوالی حداقل ۱/۵ باشد، ارزیابی کرد. این افزایش ابعاد باید به طور نسبتا مساوی در هر ضلع سلول اعمال شود [۸].

۴-۴- شبکه های سازمان نیافته

در این نوع شبکه بندی لازم است نسبت اضلاع سلول های شبکه مجاور به شبکه های درشت یا نزدیک سطوح هندسه های پیچیده از حد بیان شده در بخش ۲-۴ فراتر نرود. برای افزایش دقت، مطلوب است که سلول های مجاور دیواره به صورت موازی با سطح آن، درنظر گرفته شود (شکل ۲).



شکل ۲ چیدمان المان های شبکه مجاور سطح صلب در شبکه بندی سازمان نیافته

۵- شرط مرزی

۵-۱- شرایط مرزی ورودی

پروفیل عمودی سرعت $U(z)$ بر روی یک سطح صاف معمولا با قانون توانی^۲ بیان می شود [۱۸]:

$$(۱)$$

$$U(z) = U_s \left(\frac{z}{z_s}\right)^\alpha$$

درحالی که U_s سرعت در ارتفاع مرجع z_s و α توان از پیش تعیین شده برای هر نوع پوشش کف (زمین) است.

توزیع عمودی انرژی توربولانس $k(z)$ را می توان از یک آزمایش تونل باد یا مشاهده محیط اطراف، به دست آورد. اگر مقادیر انرژی توربولانس در دسترس نباشد، $k(z)$ را می توان بر اساس معادله ۲، معادله محاسبه پروفیل عمودی شدت توربولانس - $I(z)$ - که توسط انجمن معماری ژاین برای برآورد بار باد به ساختمان پیشنهاد شده است، به دست آورد.

$$(۲)$$

¹ Grid Independency

² Power Law

³ Root Mean Square (RMS)

لایه مرزی نزدیک سطح زمین لایه‌های پایدار و ثابت در نظر گرفته می‌شود، لذا میزان Z_0 را نیز می‌توان با استفاده از رابطه $\sqrt{(\tau_w/\rho)} = U^* = C_u^{1/4} k^{1/2}$ و مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت و k در نزدیکی سطح زمین، به دست آورد.

(۱۲)

$$Z_0 = \frac{z_p}{\exp(\kappa U_p / C_u^{1/4} k_p^{1/2})}$$

درحالی که k_p مقدار k در Z_p است.

برای بررسی مناسب بودن شرایط مرزی داده شده، باید ثابت شود که پروفیل سرعت در نزدیکی سطح زمین در چند نقطه اندازه‌گیری، مشابه با تونل باد است. این مقایسه را می‌توان با محاسبه‌ای در دامنه‌ی حلی دو بعدی (مقطعی از دامنه‌ی حل سه بعدی اصلی که شامل وجه‌های پایینی زمین، وجه بالا دست و پایین دست جریان و وجه جریان آزاد است) با شبکه‌بندی‌ای مشابه با شبکه‌بندی سه بعدی در این مقطع انجام داد [۱۰]. همچنین، دستورالعمل کاست، به جهت صحت‌سنجی دامنه حل، پیشنهاد می‌دهد ابتدا در محدوده‌ای خالی از ساختمان شبیه‌سازی انجام شود و سپس، پروفیل شبیه‌سازی شده با پروفیل از پیش تعیین شده، مقایسه گردد.

۲-۴-۵- سطح زمین برای بستری با ساختمان‌های واقعی

شرایط مرزی باید متناسب با سطح زمین واقعی باشد. مثلاً برای زمینی با سطح هموار و صاف از قانون لگاریتمی مختص دیواره‌ی صاف (معادله ۱۰) می‌توان استفاده کرد.

برای زمینی با سطح زبر، که می‌توان آن را با طول زبری Z_0 معرفی کرد، قانون لگاریتمی (معادله ۱۱) شامل شاخص زبری قابل استفاده است.

دستورالعمل کاست بیان می‌کند که ایجاد شرایط مرزی زبر با k_s منجر به خطای زیاد در نزدیک زمین می‌شود، زیرا اندازه اولین سلول در مجاورت زمین باید حداقل به اندازه k_s باشد. بنابراین، توصیه می‌شود برای شبیه‌سازی زمین بستر شهری از شرط زمین مسطح و هموار (معادله ۱۰) استفاده شود [۸]. جزییات بیشتر توسط بلوکن در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است [۲۷].

۳-۴-۵- دیواره ساختمان

برای دیواره‌های ساختمان، شرایط مرزی بر اساس معیارهای بخش ۲-۴-۵ استفاده می‌شود.

۵-۵- شرایط مرزی سطح صلب برای انرژی توربولانس (k) و نرخ اتلاف (e)

۱-۵-۵- انرژی توربولانس (k)

معادله تعیین مقدار k در شرایطی حل می‌شود که گرادیان k در جهت عمود بر مرز جسم برابر با صفر باشد.

۲-۵-۵- نرخ اتلاف

نرخ اتلاف در اولین گره شبکه محاسباتی به صورت زیر است:

(۱۳)

$$\varepsilon_p = \frac{\frac{3}{4} C_u^2 k_p^2}{\kappa z_p}$$

۶- الگوریتم حل، روش منفصل کردن معادلات در میدان حل

۱-۶- الگوریتم حل

بنابراین، ضروری است که به رابطه بین ارتفاع دامنه‌ی محاسباتی و لایه مرزی اتمسفری توجه شود.

۲-۵- سطوح جانبی و فوقانی دامنه‌ی حل

اگر دامنه‌ی حل به اندازه کافی بزرگ باشد (به بخش ۳-۱ رجوع کنید)، شرایط مرزی اعمال شده بر سطوح جانبی و فوقانی تأثیر زیادی در نتایج محاسبات پیرامون ساختمان هدف نخواهد داشت [۱۰، ۱۲، ۱۵]. استفاده از شرط دیواره غیرلزج (در این شرط در مرز دیواره سرعت عمود بر جسم و همچنین، گرادیان سرعت موازی با سطح جسم در جهت عمود بر آن جسم برابر با صفر فرض می‌شود) به همراه یک دامنه‌ی محاسباتی بزرگ‌تر و ریزتر، محاسبات را پایدارتر خواهد کرد.

۳-۵- شرط مرزی خروجی جریان

به طور متداول برای شرط مرزی خروجی جریان، گرادیان تمام متغیرها در جهت عمود بر مرز پایین دست دامنه حل برابر با صفر فرض می‌شود. همان‌گونه که در قسمت‌های قبل گفته شد، مرز پایین دست دامنه حل باید به اندازه کافی دور باشد تا تأثیر آن مرز در رژیم جریان در اطراف ساختمان‌های هدف قابل اغماض باشد.

۴-۵- شرط مرزی سرعتی سطوح صلب

۱-۴-۵- سطح زمین برای یک ساختمان منفرد برای مقایسه با نتایج تجربی

در خصوص شرط مرزی مربوط به سطح زمین مهمترین اصل آن است که در محاسبات این ناحیه از دامنه حل ابتدا باید مقادیر مشخصه‌های مختلف برای زمین، بدون وجود ساختمان، تحت یک شبیه‌سازی عددی مستقل تعیین گردد. تغییرات سرعت باد نه تنها در جهت عمود بر سطح زمین به صورت تدریجی از مقدار صفر (در سطح زمین) تا مقادیر سرعت جریان آزاد تغییر می‌کند، بلکه در جهت جریان و به سمت پایین دست دامنه حل و در هر مقطع نیز متغیر است.

تغییرات سرعت در جهت عمود بر سطح زمین از یک قانون لگاریتمی با فرض سطح زمین صاف و یا یک قانون لگاریتمی با ضرایب زبری Z_0 و k_s (ارتفاع زبری) را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد.

برای سطحی با دیواره صاف و هموار قانون لگاریتمی به صورت زیر خواهد بود:

(۱۰)

$$\frac{U_p}{\sqrt{(\tau_w/\rho)}} = \frac{1}{\kappa} \ln z_n^+ + A = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\sqrt{(\tau_w/\rho)} z_p}{v} + A$$

در رابطه بالا، U_p مقدار سرعت مماس با سطح زمین در اولین سلول نزدیک به زمین، τ_w تنش برشی در زمین، z_n^+ یکای بدون بعد دیواره (در اینجا دیواره یعنی سطح زمین)، z_p فاصله بین نقطه مورد نظر U_p و دیواره و A ثابت جهانی است که بین ۵ تا ۵/۵ در نظر گرفته می‌شود.

برای به دست آوردن τ_w بدون شبیه‌سازی، از معادله عمومی ۱۱ می‌توان استفاده کرد [۲۶]. موراکامی و موکیدا در سال ۱۹۸۸ از شرایط مرزی کلی قانون لگاریتمی برای بررسی جریان باد پیرامون ساختمان‌ها استفاده کرده‌اند. در صورت فرض زمین دارای زبری Z_0 ، قانون لگاریتمی به صورت زیر

بیان می‌شود:

(۱۱)

$$\frac{U_p}{\sqrt{(\tau_w/\rho)}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z_p}{Z_0} \right)$$

۷-۲- حدس اولیه (مقداردهی اولیه)

برای هرچه سریع‌تر شدن روند همگرایی، ویژگی‌های فیزیکی اولیه مناسبی باید تعریف شده باشد. به همین منظور باید حدس اولیه متغیرها، برابر با مقادیر متغیرها در مرز بالادست دامنه حل فرض شود و یا آنکه در ابتدا با فرض آرام بودن جریان در اطراف ساختمان معادلات بقای جرم و ممنتوم (نویر استوکس) بدون معادلات توربولانسی حل شود و جواب‌های حاصل برای متغیرها به عنوان مقادیر اولیه برای شبیه‌سازی جریان در این دامنه حل و در حالت توربولانسی (حضور معادلات کمکی توربولانسی) در نظر گرفته شود.

۸- مدل‌های توربولانسی

مشکل شناخته شده مدل توربولانسی standard k-ε این است که نمی‌تواند جدایش و جریان معکوس بر فراز سقف را به دلیل بیش‌برآورد انرژی توربولانس در ناحیه اتصال دیوارهای ساختمان بهم، تولید کند. اگرچه این مشکل در نزدیکی سطح زمین به اندازه‌ی نزدیک سقف ساختمان نیست، اما ممکن است دقت پیش‌بینی نقاطی را که دارای سرعت بالا هستند، تحت تأثیر قرار دهد. با این حال، بسیاری از مدل‌های اصلاح شده‌ی k-ε و مدل دیفرانسیلی^۴ این مشکل را کاهش داده و دقت پیش‌بینی باد با سرعت بالا را در نزدیکی سطح زمین افزایش داده‌اند [۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۵].

در مورد انتخاب مدل توربولانسی، کاست نتیجه می‌گیرد که مدل استاندارد k-ε نباید در شبیه‌سازی‌های مسایل مهندسی باد استفاده شود. این دستورالعمل مدل‌های ارتقا یافته‌ی دو معادله‌ای را با روش لزجت گردابه خطی^۵ پیشنهاد می‌دهد [۹]. این یافته‌ها درباره مدل توربولانسی با یافته‌های انجمن معماری ژاپن نیز مطابقت دارد. اگرچه کاست تأکید بیشتری بر استفاده از مدل‌های غیرخطی یا مدل‌های تنش رینولدزی^۶ دارد [۹]. در حال حاضر نمونه‌های بسیار کمی از دقت پیش‌بینی این مدل‌ها در تحلیل مسایل باد در تراز عابر پیاده به منظور ارزیابی کارایی، اعمال شده است. بنابراین، انتظار می‌رود که تحقیقات بیشتری در آینده نزدیک توسط کاست انجام شود.

۹- اعتبارسنجی

کاربران باید نتایج محاسبات خود را با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی مشخص، حداقل با یک نمونه ساختمان بلند منفرد و یک مورد از مجموعه ساختمانی در منطقه واقعی شهری که توسط انجمن معماری ژاپن انجام شده است، مقایسه کنند. این نتایج تجربی در صفحه وب http://www.aij.or.jp/Jpn/publish/cfdguide/index_e.htm در دسترس است.

۱۰- نتایج

این دستورالعمل برای استفاده کاربردی از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی شرایط محیطی باد اطراف ساختمان‌ها در تراز عابر پیاده، توسط گروه تحقیقاتی انجمن معماری ژاپن تدوین شده است. این نتایج بر اساس مقایسه‌ی متقابل بین پیش‌بینی‌های دینامیک سیالات محاسباتی، نتایج آزمایش تونل باد و اندازه‌گیری‌های میدانی برای ۷ نمونه موردی، برای ارزیابی تأثیر بسیاری از شرایط محاسباتی بر میدان‌های جریان متفاوت، انجام گرفته

شبیه‌سازی جریان هوا در اطراف ساختمان از منفصل کردن معادلات بقای جرم و ممنتوم به صورت پایا و گذرا در دامنه حل نشأت می‌گیرد که یکی از مهمترین این تکنیک‌ها حل معادلات نویر-استوکس به شیوه میانگین‌گیری رینولدز است، چنانچه نوسانات گذرای در محاسبه اتفاق نیفتد و هر دو صورت پایا و گذرا به سمت یک جواب همگرا شوند. با وجود این، در شرایط واقعی، نوسانات تناوبی به شکلی گذرا معمولاً در وجه پشت به باد ساختمان‌های بلند رخ می‌دهد. این نوسانات را نمی‌توان با محاسبه در حالت پایا مشاهده نمود. این نوسانات تناوبی را که در بسیاری موارد در رینولدز بالا رخ می‌دهد، نمی‌توان در شبیه‌سازی‌های مختص معادلات بقا در حالت پایدار (مدل k-ε) مشاهده نمود. لذا لازم است در صورت نیاز به مشاهده این نوسانات از مدل‌سازی‌های گذرا که مختص مدل‌های توربولانسی ویژه است (نظیر LES) استفاده نمود [۱۰، ۲۸].

۶-۲- طرح کلی برای ترم (بخش) جابه‌جایی معادلات نویر استوکس

معادلات بقای ممنتوم (نویر-استوکس) و بقای انرژی شامل دو بخش اصلی جابه‌جایی^۱ (اثر نیروهای اینرسی) و نفوذ^۲ (اثر نیروهای لزجی) است. به منظور منفصل نمودن بخش‌های جابه‌جایی توصیه می‌شود از روش‌های انفصال مرتبه اول استفاده نشود، چراکه خطای ناشی از این انفصال از درجه ۲ است و این خطا می‌تواند در شبیه‌سازی خود را نظیر نیروهای لزجی نشان دهد و تبعاً منجر به حل‌های غلط شود.

کاست استفاده از روش‌های انفصال مرتبه اول برای بخش جابه‌جایی را فقط برای تکرارهای اولیه (سعی و خطاهای اولیه) روند حل مجاز می‌داند [۸].

۷- همگرایی حل

۷-۱- معیارهای همگرایی

محاسبات زمانی به پایان می‌رسد که حل به همگرایی مناسبی رسیده باشد. بدین منظور، با مقایسه متغیرهایی نظیر سرعت، فشار، k، ε و غیره در نقاط هندسی مشخص و در تکرارهای متوالی باید ثابت کرد که مقادیر به دست آمده برای این متغیرها در تکرارهای متوالی تغییرات بسیار ناچیزی دارد. هنگامی که همگرایی به کندی صورت می‌گیرد، نکات زیر باید بررسی شود:

- نسبت ابعاد و نسبت افزایش طول شبکه‌ها ممکن است بسیار بزرگ باشد.
- حل عددی دستگاه معادلات منفصل شده زمانبر بوده و لازم است برای حل این روش عددی از روش‌های مناسب‌تری استفاده شود.
- به دلیل فیزیک واقعی جریان اطراف ساختمان (وجود جریان گذرا) ممکن است نوسانات دوره‌ای مانند پدیده دفع گردابه^۳ رخ دهد.

دستورالعمل کاست پیشنهاد می‌دهد که مقدار باقی‌مانده‌ها (قدر مطلق تفاضل مقادیر متغیرها در تکرارهای متوالی) باید تا ۴ مرتبه اعشار کاهش یابد [۹]. هرچند این مقادیر به میزان زیادی وابسته به مشخصات جریان و شرایط مرزی است، ولی بهتر است که حل مستقیماً با استفاده از شاخص‌های همگرایی که در بالا اشاره شد، بررسی شود.

⁴ Differential Stress Models (DSM)

⁵ Linear Eddy Viscosity

⁶ Reynolds-Stress Models

¹ Convection

² Diffusion

³ Vortex Shedding

- [17] T. Shirasawa, et al., DEVELOPMENT OF CFD METHOD FOR PREDICTING WIND ENVIRONMENT AROUND A HIGH-RISE BUILDING, Part 2, The cross comparison of CFD results using various k- ϵ models for the flow field around a building model with 4:4:1 shape (Environmental Engineering), *AIJ Journal of Technology and Design*, 9(18), pp. 169-174, 2003.
- [18] Japan, A.I.O., *Recommendations for loads on buildings*, 2004.
- [19] R. Yoshie, M. A. Y. Tominaga, CFD prediction of wind environment around a high-rise building located in an urban area, in *the Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering*, Japan, 2006.
- [20] H. Hiraoka, Modelling of turbulent flows within plant/urban canopies, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46-47, pp. 173-182, 1993.
- [21] T. Maruyama, Optimization of roughness parameters for staggered arrayed cubic blocks using experimental data, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46-47, pp. 165-171, 1993.
- [22] N. Hataya, M. A. T. Iwata, Y. Tabata, H. Yoshino, Y. Tominaga, Development of the simulation method for thermal environment and pollutant diffusion in street canyons with subgrid scale obstacles, in *the Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering*, Japan, 2006.
- [23] C. W. Hirt, Volume-fraction techniques, powerful tools for wind engineering, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46-47, pp. 327-338, 1993.
- [24] J. H. P. M. Ferziger, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, 2002.
- [25] P. J. Richards, R. P. Hoxey, Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46-47, pp. 145-153, 1993.
- [26] B. S. D. Launder, The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, pp. 269-289, 1974.
- [27] B. Blocken, T. Stathopoulos, J. Carmeliet, CFD simulation of the atmospheric boundary layer, wall function problems, *Atmospheric Environment*, 41(2), p. 238-252, 2007.
- [28] Y. M. A. Tominaga, S. Murakami, Large eddy simulation of flow field around a high-rise building, in *Conference Preprints of 11th International Conference on Wind Engineering*, Texas, U.S.A., pp. 2543-2550, 2003.
- است و نکات مهم در استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی برای پیش‌بینی شرایط باد به طور خلاصه بیان شده است. نتایج مقایسه‌ی متقابل ۷ نمونه موردی در این پروژه را برای اعتبارسنجی دقت کدهای دینامیک سیالات محاسباتی که برای ارزیابی شرایط باد در تراز عابر پیاده به کار می‌روند، می‌توان استفاده کرد.
- ۱۱- مراجع
- [1] T. Stathopoulos, B. A. Baskaran, Computer simulation of wind environmental conditions around buildings, *Engineering Structures*, 18(11), pp. 876-885, 1996.
- [2] N., T., Numerical study of wind mode of a territory development, *Proceedings of the Second East European Conference on Wind Engineering*, Prague, Czech Republic, 1998.
- [3] P. S. Westbury, M. S. D., T. Stathopoulos, CFD application on the evaluation of pedestrian-level winds, *Workshop on Impact of Wind and Storm on City Life and Built Environment*, Cost Action C14, CSTB, France, 2002.
- [4] P. J. Richards, M. G. D., D. McMillan, Y. F. Li, Pedestrian level wind speeds in downtown Auckland, *Wind Structure*, 5, pp. 151-164, 2002.
- [5] P. J. Roache, G. K., F. White, Editorial policy statement on the control of numerical accuracy, *Fluids Engineering*, 108, 1986.
- [6] AIAA, Guide, Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations (AIAA G-077-1998(2002)), American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1998.
- [7] ERCOFTAC, Best practices guidelines for industrial computational fluid dynamics, 2002.
- [8] J. Franke, H. C. Jensen, A. G. Kru's, H. W. M. Schatzmann, P. S. Westbury, S. D. Miles, J. A. Wisse, N. G. Wright, Recommendations on the use of CFD in wind engineering, in *Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics*, Belgium, 2004.
- [9] J. F. Recommendations of the COST action C14 on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment, *the Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering*, Japan, 2006.
- [10] A. Mochida, T.Y. S. Murakami, R. Yoshie, T. Ishihara, R. Ooka, Comparison of various k- ϵ models and DSM applied to flow around a high-rise building- Report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment, *Wind Structure*, 5, pp. 227-244, 2002.
- [11] A. Mochida, Y. H., T. Iwata, Y. Tabata, Optimization of tree canopy model for CFD prediction of wind environment at pedestrian level, in *the Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering*, Japan, 2006.
- [12] T. Shirasawa, T. T. R. Yoshie, A. Mochida, H. Yoshino, H. Kataoka, T. Nozu, Development of CFD method for predicting wind environment around a high-rise building part 2, the cross comparison of CFD results using various k-models for the flow field around a building model with 4:4:1 shape, *Technol. Des.*, 18, pp. 169-174, 2003.
- [13] Y. Tominaga, M. A. T. Shirasawa, R. Yoshie, H. Kataoka, K. Harimoto, T. Nozu, Cross comparisons of CFD results of wind environment at pedestrian level around a high-rise building and within a building complex, *Asian Architecture Building Engineering*, 3, pp. 63-70, 2004.
- [14] Y. Tominaga, Y. R. A. Mochida, H. Kataoka, K. Harimoto, T. Nozu, Cross comparisons of CFD prediction for wind environment at pedestrian level around buildings, Part 2, Comparison of results for flow field around building complex in actual urban area, in *the Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Korea, 2005.
- [15] R. Yoshie, M. A. Y. Tominaga, H. Kataoka, K. Harimoto, T. Nozu, T. Shirasawa, Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in Architectural Institute of Japan, *Wind Engineering Ind.*, Aerodyn, 95, pp. 1551-1578, 2005.
- [16] R. Yoshie, M. A. Y. Tominaga, H. Kataoka, M. Yoshikawa, Cross comparisons of CFD prediction for wind environment at pedestrian level around buildings, Part 2, Comparison of results of flow field around a high-rise building located in surrounding city blocks, in *the Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Korea, 2005.