

مروری بر مطالعات رفتار باد به‌ویژه بر مناطق شهری

فرنود فریدونی^{۱*}، حمیدرضا نظیف^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

* قزوین، ۳۴۱۳۹۷۵۴۹۹، Farnood_freidooni@yahoo.com

چکیده

امروزه مطالعه رفتار باد در محیط‌های شهری مانند مجتمع‌های ساختمانی، شهرک‌ها، شهرها و ساختمان‌ها بلندمرتبه در کانون توجه قرار گرفته است. بررسی اثر دینامیک باد بر محیط‌های شهری و بطور متقابل اثر شهر بر رفتار و الگوی باد، موضوع اصلی این تحقیقات می‌باشد. در دهه‌ی ۱۹۵۰ با توجه به ضعف کامپیوترهای موجود، توسعه‌ی مطالعات تجربی و آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های هواشناسی برای بهبود پیش‌بینی عددی آب و هوا آغاز شد. در دهه‌ی ۱۹۶۰ با توسعه و بهبود مدل‌های عددی، معادلات ابتدایی و همچنین افزایش توان محاسباتی کامپیوترها، مدل‌سازی‌ها با هندسه‌ی پیچیده و دقت بیشتر آغاز شد. در دهه‌ی ۱۹۷۰ مدل‌های متوسط‌گیری شده‌ی رینولدزی تلاطم برای شبیه‌سازی ارائه گردیدند. به علت کارآمدی خوب، این مدل‌ها نیز در علم دینامیک باد شهری مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه در سال‌های ۱۹۸۰ مدل‌های عددی حل این معادلات توسعه یافتند. برای ارزیابی نتایج بدست آمده در دهه‌ی ۱۹۹۰ مدل‌های پیشرفته‌ی تلاطم ارائه و با نتایج آزمایش تونل باد مقایسه گردید. در سال‌های اخیر ارائه‌ی مدل‌های جدید عددی باعث ارتقاء دقت پیش‌بینی الگوی جریان و دینامیک باد بر روی ساختمان‌ها و به‌ویژه در سطح عابرین پیاده شده است. در مطالعه‌ی پیش‌رو برخی از کاستی‌های این مقوله ارائه شده است. همچنین مقالات مهم و تأثیر گذار ۶۵ سال گذشته در علم شبیه‌سازی جریان باد مرور شده است.

کلیدواژگان: جریان باد، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل‌های آشفتنگی

Review of wind behavior studies especially on urban environment

Farnood Freidooni*, Hamid Reza Nazif

1- Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

* P.O.B. 3413975499 Qazvin, Iran, farnood_freidooni@yahoo.com

Received: 22 February 2016 Accepted: 23 May 2016

Abstract

Wind flow modeling on urban geometry, such as a set of buildings, cities, towns and tall buildings are now in the spotlight. It is important to study and simulation of wind's dynamics due to the effects of urban areas on the attitude and regime of wind and in the other hand, the effects of wind's dynamics on the urban areas. In the 1950s, experimental studies and measurements of weather prediction were begun and developed due to computational disability of computers to improve numerical prediction of meteorological climate. In the 1960s, complex geometry simulations with higher precision were begun after development of Numerical Models of Primitive Equations and increase the computational ability of computers. In the 1970s, the Reynolds Averaged Navier- Stocks turbulence models for simulation were discussed. Then, in the years 1980 numerical methods for solving these equations were developed. In 1990s, assessment of Advanced Turbulent Models results with wind tunnel measurements was presented. In recent years presenting number of new models were done to improving prediction precision and flow dynamics of wind on buildings especially in the pedestrian level. In the present study, some of the shortcomings of this issue are provided. Also important and influential papers in wind flow simulation over the past 65 years were reviewed.

Keywords: Wind flow, Computational Fluid Dynamics, Turbulence Models



۱- مقدمه

دینامیک سیالات محاسباتی و مدل‌سازی جریان باد بر روی هندسه‌های شهری مانند مجموعه‌ای از ساختمان‌ها، شهرها، شهرک‌ها و ساختمان‌ها بلند-مرتبه هم‌اکنون در کانون توجه قرار گرفته است. به دلیل اثرات محیط‌های شهری بر جریان باد، مطالعه و شبیه‌سازی آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد. گردابه‌های جریان، تله‌های هوایی در پشت ساختمان‌ها، جدایش هوا از روی بام ساختمان‌ها و نواحی کم فشار از جمله‌ی این اثرات می‌باشند. نیروهای برآ و پس‌آ یکی از عوامل برخاستن ریزگردها است. صدای آیرودینامیکی بوجود آمده به دلیل ریزش گردابه‌ها، سرعت بالا هوا و شرایط باد در سطح پیاده‌رو از عوامل تعیین کننده‌ی شرایط آسایش ساکنین است. انتقال آلودگی را نیز می‌توان با توجه به رفتار جریان باد در سطح شهر پیش‌بینی نمود. موارد ذکر شده اهمیت مطالعه‌ی رفتار جریان باد را در شهر آشکار می‌سازد.

اولین مطالعات این زمینه‌ی پژوهش را می‌توان در سال‌های ۱۹۵۰ دنبال نمود. با توجه به اهمیت دینامیک سیالات و تاریخچه‌ی علم مذکور نیاز بر مرور تعدادی از منابع تأثیر گذار احساس می‌شود؛ بنابراین در مقاله‌ی حاضر به مروری بر تعدادی از پژوهش‌های پیشین پرداخته و در نهایت توصیه‌ها و پیشنهاداتی در راستای پژوهش‌های آتی ارائه می‌گردد.

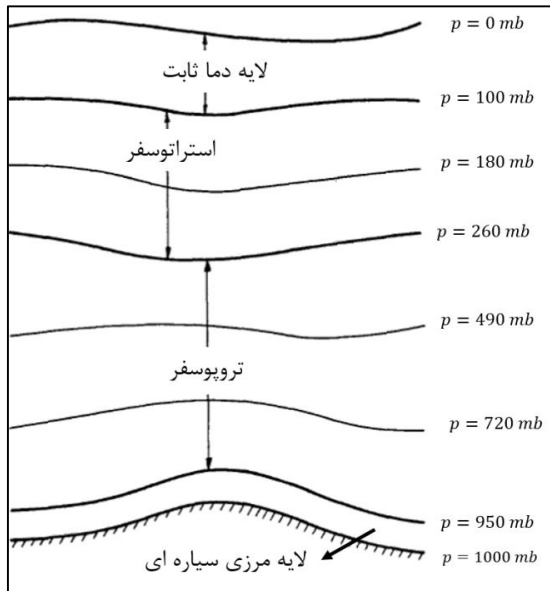
۲- شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

در دهه‌ی ۱۹۵۰ با توجه به ضعف کامپیوترهای موجود توسعه‌ی مطالعات تجربی و آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های هواشناسی برای بهبود پیش‌بینی عددی آب و هوا آغاز شد.

چارنی و همکاران (۱۹۵۰) [۱]، اسماگورینسکی (۱۹۵۳) [۲]، چارنی (۱۹۵۵) [۳]، فیلیپس (۱۹۵۶) [۴]، اسماگورینسکی (۱۹۵۸) [۵] از جمله پیش‌گامان پیش‌بینی عددی آب و هوا بوده‌اند.

در دهه‌ی ۱۹۶۰ مطالعات عددی پیش‌بینی آب و هوا و اقلیم‌شناسی با رویکرد کاربردی پیشرفت نمود. فیلیپس (۱۹۶۰) [۶] آلودگی صوتی را که بر اثر میدان‌های سرعت اولیه‌ی ناهمگرا در ناحیه‌ی شهری در اتمسفر باروکلینیک بوجود می‌آید با استفاده از معادلات اولیه مورد تحلیل قرار داد. همچنین از بسط شبه ژئوستروفیک برای تعریف داده‌های اولیه برای پیش‌بینی غیرخطی آب‌وهوا به کمک معادلات اولیه استفاده نمود. اسماگورینسکی (۱۹۶۳) [۷] معادله ابتدایی باروکلینیک^۱ را برای شبیه‌سازی دینامیک گردش عمومی هوا بهبود داد. با استفاده از معادلات نفوذ گردابه‌های بزرگ مقیاس، طبقات انرژی خالص فیزیکی با مقیاس‌های بزرگ‌تر از اندازه‌ی شبکه‌ی محاسباتی تا کوچکترین مقیاس‌ها که به دلیل خطای برشی در گسسته‌سازی-های عددی حذف می‌شدند، در نظر گرفت. کاساهازا و واشینگتن (۱۹۶۷) [۸] فرآیندهای فیزیکی مختلفی از جمله انتقال حرارت به دلیل تشعشع خورشیدی و از سطح زمین، آشفتگی‌های کوچک مقیاس و انتقال حرارت همرفت را که در گردش عمومی اتمسفر وجود دارند، مورد تحلیل قرار دادند. در این تحقیق رطوبت را در پیش‌بینی‌های خود وارد نکردند ولی فرض نمودند که اتمسفر از بخار آب اشباع است. همچنین تحلیل پایداری باروکلینیک برای بیان پایداری فرمول‌بندی المان محدود مدل ارائه شده، انجام شد. شومان و هاورمل (۱۹۶۸) [۹] مدل شش لایه‌ی اپراتوری معادله‌ی ابتدایی را ارائه نمودند. هفت معادله‌ی هیدرواستاتیک شهری را در مختصات عمودی دلخواه و مختصات افقی همچنین مخصه‌ی زمان را در مختصات

کارترین به کمک تصویر همدیس سطح زمین باز نویسی کردند. با استفاده از روش المان محدود معادلات را گسسته سازی، رطوبت و گرمای نهان را پیش-بینی نمودند.

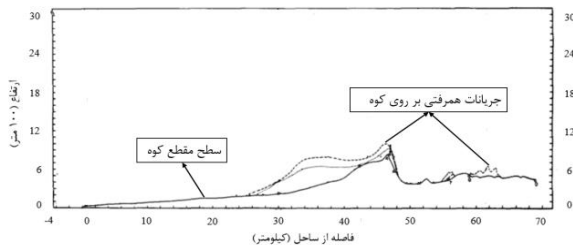


شکل ۱ مدل شش لایه‌ی معادله‌ی ابتدایی [۹]

پیرس (۱۹۵۵) [۱۰]، فیشر (۱۹۶۱) [۱۱] و استوک (۱۹۶۲) [۱۲] تحلیل دوبعدی در مقیاس میانه در مقاطع عمودی پدیده‌ی وزش باد در سطح دریا را مورد بررسی قرار دادند.

پس از آن اولین مدل‌سازی جریان‌های باد در سال ۱۹۶۳ صورت گرفت. اسماگورینسکی (۱۹۶۳) [۱۳] با توسعه و بهبود معادلات باروکلینیک به کمک گردابه‌های بزرگ مقیاس اولین مدل شبیه‌سازی جریان باد را با نام مدل اسماگورینسکی - لیلی ارائه نمود. امروزه این مدل در بسیاری از شاخه‌های مکانیک سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل بر اساس در نظر گرفتن مقیاس فضایی بنا نهاده شده است. زمینه‌ی اصلی مطالعات اسماگورینسکی توسعه‌ی پیش‌بینی‌های عددی آب و هوا در مقیاس سینوپتیک^۲ یا هواشناسی بزرگ مقیاس بود.

فوسبرگ (۱۹۶۹) [۱۴] حرکات همرفتی باد را بر روی سلسله کوه‌ها مطالعه نمود.



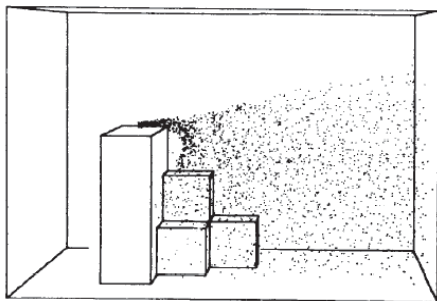
شکل ۲ مقطع عمودی از کوه‌های سانتانا و جریانات همرفتی. [۱۴]

^۱ Synoptic scale

^۱ Primitive equations

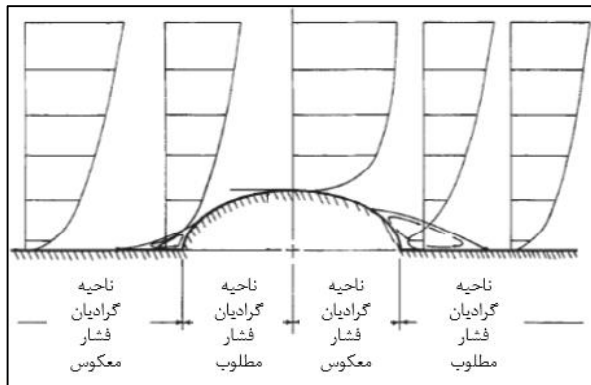
^۲ Baroclinic primitive equations





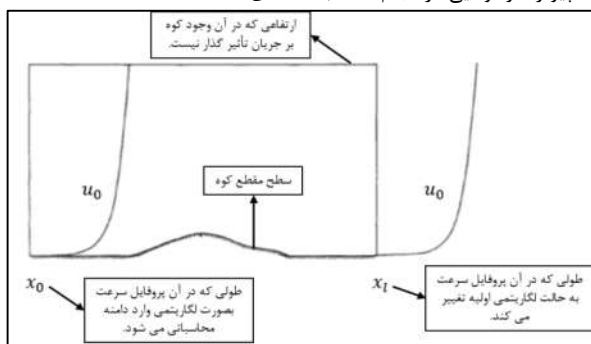
شکل ۵ میدان سرعت بر یک ساختمان منفرد [۱۹]

فراست و همکاران (۱۹۷۴) [۲۰]، جریان آرام دوبعدی باد را بر روی سطح مانع نیمه بیضوی بصورت عددی تحلیل نمودند تا یک ساختمان ایده‌آل را نشان دهند.



شکل ۶ توضیح کیفی میدان جریان بر روی مانع نیمه بیضوی [۲۰]

دیویس (۱۹۷۵) [۲۱]، جریان آرام دوبعدی را شبیه‌سازی عددی کرد و جریان را روی چندین شکل بخصوص تپه‌ها مدل نمود. اکثر مطالعات تا دهه‌ی ۷۰ میلادی دوبعدی بوده و بر روی هندسه‌های ساده مدل‌سازی انجام شده است. دلیل این موضوع را می‌توان ضعف کامپیوترها و توانایی در انجام محاسبات عددی دانست.



شکل ۷ ناحیه جریان و مرزها بر روی تپه [۲۱]

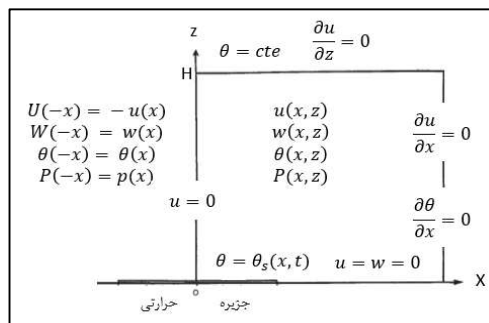
دریکسون و مرونی (۱۹۷۷) [۲۲]، رویکردی دوگانه را در پیش گرفتند. پیشگامان این رویکرد دوگانه^۱ مرونی و همکارانش بودند که یک مقایسه نظام‌مند از شبیه‌سازی‌های عددی و اندازه‌گیری‌های تونل باد اختصاصی برای لایه مرزی اتمسفری را بنا نهادند. «مقایسه اندازه‌گیری‌های تونل باد صحت

^۱ Hybrid method

استوک و همکاران (۱۹۶۹) [۱۵]، دیلگ و تیلور (۱۹۷۰) [۱۶]، مرونی و یامادا (۱۹۷۲) [۱۷] جریان باد را بر روی جزایر حرارتی در شهرسازی ساده شده با در نظر گرفتن باد و عدم حضور باد مورد مطالعه قرار دادند.

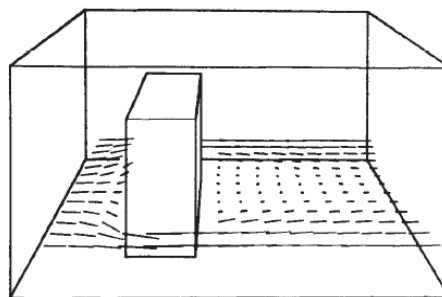
ولینگتون و پرتنال (۱۹۵۸) [۱۸]، جریان بر روی کوه‌ها را مدل‌سازی عددی نمودند. همچنین طول موج و تغییرات دامنه‌ی موج متغیر با ارتفاع برای ۱۹ جریان هوا که در آن امواج لی مشاهده شده‌اند محاسبه شد. مقایسه مشاهدات و محاسبه طول موج نشان می‌دهد که جریان تروپوسفری به اندازه کافی مستقل از شرایط استراتوسفر است.

امواج لی موج‌های پایای اتمسفری می‌باشند. رایج‌ترین نوع این موج‌ها، موج‌های کوهستانی هستند. در واقع تغییرات دوره‌ای فشار اتمسفری، دما و ارتفاع ارتومتریک در وضعیت هوا به دلیل جابجایی عمودی می‌باشند. همچنین وزش بادهای سطحی در دامنه‌ی کوه‌ها و یا فلات‌ها عامل بوجود آمدن این امواج می‌شوند. حرکات عمودی، تغییرات متناوبی را در سرعت و جهت هوای وضعیت مذکور ایجاد می‌کند. این تغییرات همیشه در گروه‌هایی در لی ساید از زمین رخ می‌دهند. معمولاً، گردابه آشفته با چرخش محوری موازی با دامنه‌ی کوه به طریق فوق ایجاد می‌شوند. قوی‌ترین امواج لی زمانی بوجود می‌آیند که نرخ انحراف، لایه‌ای پایدار بر روی یک مانع و دو لایه‌ی ناپایدار در زیر و روی لایه‌ی پایدار نشان دهد.



شکل ۳ شرایط مرزی بر روی جزیره‌ی حرارتی [۱۶]

هیرت و کوک (۱۹۷۲) [۱۹]، جریان سه‌بعدی را حول سازه‌های ساده مورد بررسی قرار دادند. همچنین جریان آلودگی را بصورت سه‌بعدی بر روی مجموعه ساختمان مدل‌سازی نمودند.

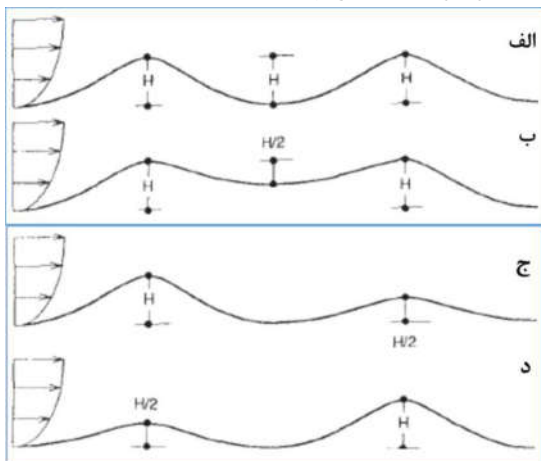


شکل ۴ میدان سرعت بر یک ساختمان منفرد [۱۹]



محاسبات برای جریانات بر روی تعدادی ناهمواری انجام شده است؛ از جمله کوه‌های منفرد و سلسله کوه دوتایی، پرتگاه‌ها و تپه‌ها. سه ساختار کوه مورد تحلیل قرار گرفت:

- ۱- دامنه‌ی کوه. ۲- کوه با قله‌ی تخت. ۳- قله‌ی ناقوصی شکل.
- چهار شیب خلاف جهت باد ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ بررسی شد. همچنین چهار گونه سلسله کوه دوتایی مورد ارزیابی قرار گرفت:
- الف- دو قله کوه با دره‌ی عمیق
- ب- دو قله کوه با دره‌ی کم عمیق
- ج- قله‌ی بلند و قله‌ی کوتاه در جهت باد
- د- قله‌ی کوتاه و قله‌ی بلند در جهت باد



شکل ۹ سلسله کوه‌ها با اشکال مختلف [۳۲]

اوهیا و همکاران (۱۹۹۵) [۳۳] تونل باد ساخته شده با جریان لایه‌ای^۴ دمایی برای مدل‌سازی جریان‌های سیالات محیط زیست را معرفی نمودند. این تونل باد بمنظور مطالعه‌ی اثرات دمای لایه‌ای شده بر جریان و نفوذ آن در لایه مرزی اتمسفری ساخته شده است. تونل از نوع مکشی با سطح مقطع ۱/۵ متر در عرض، ۱/۲ متر در ارتفاع و ۱۳/۵ در طول می‌باشد. این تونل مجهز به دو سیستم مستقل دمایی است؛ سیستم گرمایش جریان هوا^۵ و سیستم کنترل دمای کف^۶. با استفاده از این دو سیستم لایه‌سازی دمایی جریان، دامنه‌ی وسیعی از جریانات لایه‌ای دمایی در بازه سرعتی ۰/۲ تا ۲ متر بر ثانیه را می‌توان بوجود آورد. امکانات و توانایی‌های این تونل همچنین مشخصه‌ی جریان‌های لایه‌ای دمایی در مقاله بیان شده است.

رادی (۱۹۹۷) [۳۴] مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌ی بزرگ^۷ و معادلات ناویر-استوکس با رینولدز متوسط در جریان اطراف بلاف بادی‌ها را با یکدیگر مقایسه نمود. محاسبات مدل‌های ذکر شده در ریزش گردابه‌های عبوری از یک سیلندر مربعی در جریان با عدد رینولدز ۲۲۰۰۰ و عبور جریان سه‌بعدی از روی مکعب با رینولدز ۴۰۰۰۰ را مورد بررسی قرار داده است. مدل‌سازی‌های RANS با مدل‌های مختلف $k - \epsilon$ انجام شده است. در جریان عبوری از سیلندر با مقطع مربع مدل تنش رینولدزی نیز محاسبه؛ نتایج بدست آمده از محاسبات با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است و هزینه و پتانسیل مدل‌های مختلف در این مقاله بیان شده است.

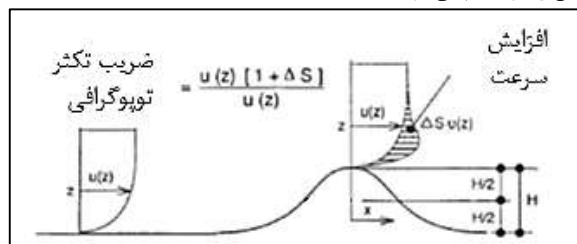
راستی‌آزمایی‌های شبیه‌سازی‌های عددی را فراهم می‌آورد. این در واقع استفاده از ابزارهای عملیاتی برای یافتن مکان بهینه برای تولید انرژی است. واسیلیک - ملینگ (۱۹۷۷) [۲۳]، پترسون و اپلت (۱۹۸۶) [۲۴] و (۱۹۸۹) [۲۵]، موراگامی و موجیدا (۱۹۸۸) [۲۶]، بر روی مدل‌سازی و تحلیل سرعت باد و همچنین توزیع فشار اطراف ساختمان‌ها مطالعاتی انجام دادند و با استفاده از مدل‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی با کاربرد مهندسی باد محاسباتی تغییرات سرعت باد را در اطراف ساختمان‌ها بدست آوردند و با استفاده از نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی و مدل‌سازی‌های تونل باد نتایج خود را راستی‌آزمایی نمودند.

هانسون و همکاران (۱۹۸۶) [۲۷] جریان باد را حول یک بلوک ساختمان شبیه‌سازی و نتایج را با جریانات مشاهده شده در لایه مرزی تونل باد مقایسه نمودند. جواب‌های بدست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی در حالت پایا و معادلات ناویر-استوکس با سه مولفه‌ی متوسط زمانی گرفته شده‌ی سرعت در ۲۰۰ نقطه‌ی شبکه‌ی تونل باد مقایسه شدند. همچنین مقایسه‌ی میدان فشار نیز صورت گرفته است. نتیجه‌ی حاصله در تله‌ی جریان مسأله‌ی حل نشدنی را بوجود آورد.

موراگامی (۱۹۹۰) [۲۸]، جریان باد را حول یک مجموعه‌ی ساختمان واقعی مدل‌سازی نمود. نخست، مدل ساده‌شده‌ای از مجموعه‌ی ساختمان را در نظر گرفت و با نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی تونل باد راستی‌آزمایی نمود. سپس مطالعات مجموعه‌ی واقعی ساختمان را انجام داد. جنبه‌ی مطلوب از این مطالعه بررسی شرایط باد محیطی در بالکن‌های منازل بود. سطح جزئیات بدست‌آمده توسط وی در آن سال‌ها با توجه به اینکه مراحل ابتدایی مهندسی باد محاسباتی در حال شکل‌گیری بود، قابل‌ستایش و چشمگیر بود. بیست و سه سال طول کشید تا مطالعات بعدی درباره‌ی شرایط باد در سطح بالکن گزارش گردد (منتظری و بلوکن (۲۰۱۳) [۲۹] و [۳۰]). خروجی تحقیقات وی پروفایل سرعت متوسط باد بود. این کار بوسیله‌ی مدل ناویر-استوکس با رینولدز متوسط^۱ شاخه‌ی مدل استاندارد $k - \epsilon$ انجام شد.

بوتما و همکاران (۱۹۹۳) [۳۱]، مطالعه‌ی جامعی را ارائه نمودند که بر الگوهای سرعت متوسط و انرژی جنبشی توربولانت حول ساختمان‌های با شکل و مشخصات معمول تمرکز داشت و نتایج بدست آمده را با نتایج آزمایش‌های تونل باد مقایسه نمودند. وی مدل‌سازی را توسط دو مدل استاندارد $k - \epsilon$ و مدل تنش جبری^۲ انجام داد.

پترسون و هولمز (۱۹۹۳) [۳۲] بیان می‌کنند که: «شبیه‌سازی‌های کامپیوتری جریان باد بر روی ناهمواری‌ها به منظور تعیین مقادیر دقیق ضرایب تکرر توپوگرافی‌ها برای سرعت‌های مه باد و سرعت‌های متوسط باد در سطح زمین انجام می‌شوند.»



شکل ۸ ضریب تکرر توپوگرافی و افزایش سرعت [۳۲]

⁴ Stratified
⁵ Air-flow heating unit
⁶ Floor temperature controlling unit
⁷ Large eddy simulation

¹ Reynolds averaged Navier - Stocks
² Standard $k - \epsilon$ model (SKE)
³ Algebraic stress model (ASM)



استاپولوس (۱۹۹۷) [۳۵]، مطالعه‌ی جامعی بر جایگاه و نقش مهندسی باد محاسباتی ارائه نمود. این تحقیق همچنین شامل ارزیابی‌های باد در شرایط سطح پیاده رو می‌شد. مدل‌سازی توسط مدل استاندارد $k - \epsilon$ صورت گرفت و تمرکز اصلی بر سرعت متوسط باد حول گروهی از ساختمان‌ها در مرکز شهر مونترال بود؛ همچنین در این تحقیق مطالعات تونل باد و پیش‌بینی‌های دینامیک سیالات محاسباتی نیز ارائه شد. او گزارش کرد: «بیشترین اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و داده‌های عددی زمانی ظاهر می‌گردد که نواحی گردش جریان بسیار پیچیده باشد و هر دو نتیجه‌ی تجربی و محاسباتی جواب دقیقی را بدست نمی‌دهند». وی اولین فردی بود نتیجه‌گیری و مقایسه‌ی آن را بین شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی و اندازه‌گیری‌های تجربی انجام داد.

موریکامی (۱۹۹۸) [۳۶]، در مقاله‌ی خود مشکلات عمده‌ی مهندسی باد محاسباتی را از قرار زیر اعلام نمود:

- ۱- اعداد رینولدز بالا در کاربردهای مهندسی باد مستلزم دقت^۱ بالای شبکه‌بندی است، بویژه در نواحی مجاور و نزدیک دیوارها. همچنین توابع دیوارها باید به دقت تعیین شوند.
- ۲- میدان جریان سه‌بعدی ماهیت پیچیده‌ای دارد از جمله برخورد، جدایش و ریزش گردابه‌ها.
- ۳- مشکلات عددی در جریان‌های روی لبه‌ها و گوشه‌های تیز بوجود می‌آید و در گسسته‌سازی‌ها ایجاد مشکل می‌نماید.
- ۴- شرایط مرزی جریان ورودی در مدل *LES* عمده‌ترین چالش مدل‌سازی عددی توسط این مدل کارا است.

موراکامی و همکاران (۱۹۹۹) [۳۷]، مقاله‌ی مروری بسیار مفهومی و پایه‌ای تحت عنوان تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی اقلیم باد در مقیاس انسان تا مقیاس شهری ارائه نمودند. این مقاله شامل مطالعات شرایط باد در سطح پیاده‌رو، شرایط آسایش باد و پروفایل فشار می‌شد. مطالعات انجام شده اثرات سرعت باد، جهت باد و پوشش گیاهی را برای ساختمان با ویژگی‌های ایده‌آل مورد ارزیابی قرار می‌دهد. راستی‌آزمایی توسط مقایسه با داده‌های استخراجی از اندازه‌گیری‌های میدانی دمای سطح زمین انجام شده است. مدل‌های بکار گرفته در این تحقیق مدل استاندارد $k - \epsilon$ و مدل اصلاح شده‌ی $k - \epsilon$ می‌باشند. معادلات انتقال حرارت و رطوبت نیز در این مدل‌ها دیده شده است.

هی و سانگ (۱۹۹۹) [۳۸]، اولین شبیه‌سازی شرایط باد در سطح پیاده‌رو با مدل *LES* را انجام دادند. در این شبیه‌سازی سه چیدمان مختلف ساختمان‌ها و همچنین وزش باد از جهات مختلف را پوشش می‌دهد. اطلاعات بدست آمده سرعت متوسط و مربع ریشه میانگین سرعت می‌باشد. این مدل‌سازی در پژوهش وی راستی‌آزمایی نشده است.

کاسی و وینترگروستر (۲۰۰۰) [۳۹]، یکی از بهترین مقالات راهبردی در زمینه‌ی مهندسی باد محاسباتی را ارائه نمودند (بلوکن (۲۰۱۴)).

لوبکه و همکاران (۲۰۰۱) [۴۰] در مقاله‌ی خود بیان می‌کنند: «چالش فرآیند شبیه‌سازی عددی، دقت در ارائه‌ی تعامل بین حرکت متوسط گذار و آشفتگی باقی مانده است. بیان آشفتگی در اکثر شبیه‌سازی‌های تجاری، وابسته به معادلات *RANS* و پیوستگی آن با مدل‌های بوسینسک - لزجت^۲ می‌باشد. مطالعات مختلف عدم توانایی مدل *RANS* را در شبیه‌سازی

جریان‌های گذار نشان می‌دهند. در مقابل، مدل *LES* در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در حال گذار از دقت بیشتری برخوردار است. نویسندگان هدف مقاله‌ی خود را دست‌یابی به جنبه‌های پیشرفته‌تر مدل‌های *RANS* مانند مدل تنش جبری صریح^۴ در مدل‌سازی جریان ناپایا روی بلاف بادی بیان می‌کنند. نتایج بدست آمده با مدل بوسینسک - لزجت، *LES* و نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل تنش جبری صریح تقریباً با نتایج *LES* همخوانی دارند؛ در حالی که نتایج سایر شبیه‌سازی با مدل خطی بوسینسک - لزجت تفاوت قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهند.

فریرا و همکاران (۲۰۰۲) [۴۱]، تأثیر دو ساختمان اضافی در محل نمایشگاه جهانی سال ۱۹۹۸ لیسبون پرتغال را مورد بررسی قرار دادند. محل این نمایشگاه شامل هفت ساختمان بود. تحلیل‌های دقیق اثرات ساختمان‌ها بر جریانات باد حول آن‌ها توسط آزمایش‌های تونل باد اعتبار سنجی شد. مدل انتخاب شده در این تحقیق *RANS* زیر شاخه‌ی *RNG*^۵ است.

بلوکن و همکاران (۲۰۰۴) [۴۲ و ۴۳]، مطالعاتی درباره‌ی شرایط باد در گذرگاه‌های بین سه ساختمان در بلژیک انجام دادند. مدل انتخابی وی *RANS* زیر شاخه *RLZ*^۶ است. برای راستی‌آزمایی مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی در ابتدا ساختمان منفردی را مدل‌سازی کردند که نتایج آزمایش تونل باد برای آن موجود بود. بر پایه‌ی این راستی‌آزمایی، شرایط باد واقعی انجام شد. در بین مقالات این شاخه‌ی مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، اولین مقاله‌ای که نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی را با داده‌های آماری شهری و معیارهای آسایش ترکیب نمود، مقاله فوق‌الذکر می‌باشد. در نتیجه در این تحقیق احتمال وقوع شرایط نامطلوب شناسایی و ارزیابی کاملی از شرایط باد انجام شد.

ژانگ و همکاران (۲۰۰۵) [۴۴]، تأثیر چیدمان‌های مختلف ساختمان‌ها و همچنین تأثیر جهات مختلف باد بر الگوی سرعت متوسط جریان را در ناحیه ای مسکونی در جنوب چین توسط مدل *RNG* مورد بررسی قرار دادند و نتایج را با داده‌های بدست آمده از شبیه‌سازی‌های تونل باد مقایسه نمودند.

هملین و برتر (۲۰۰۵) [۴۵] میدان جریان و فرآیندهای تبادل در لایه‌ی تاج شهری با زبری‌های در مقیاس شهر را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی کردند. سرعت تبادل کمیتهی است برای مقدار دادن به تبادل جرم، منتمم و انرژی در هنگام گذر از بالای لایه‌ی تاج. این مقدار را با استفاده از نرم‌افزار فلونت در حدود یک درصد سرعت باد در ارتفاع ۲/۵ برابر ارتفاع در چیدمان با تراکم کم ساختمان‌ها و در حدود ۰/۳ درصد در چیدمان‌های با تراکم بیشتر، بدست آوردند. نتیجه بدست آمده از مطالعه‌ی کمیتهی سرعت تبادل، شارهای غیر قابل نظر کردن در بالای لایه‌ی تاج بوده است. این شارها مربوط به از بین رفتن هوای آلوده و گرما از تاج شهرها است. نتیجه‌ی بدست آمده این است که جریان با زبری‌ها به دلیل تنوع هندسی ساختمان‌ها کاملاً تطابق نمی‌یابد و شارها بوجود می‌آید.

استاپولوس (۲۰۰۶) [۴۶]، مقاله‌ی مروری در باره‌ی شرایط آسایش باد در سطح پیاده‌رو و شرایط آسایش خارجی ارائه نمود که اطلاعاتی درباره‌ی ساختمان‌های بررسی شده در مقاله‌ی خود در سال ۱۹۹۷ را بیان نموده است.

⁴ Explicit Algebraic stress Models
⁵ Renormalization Group $k - \epsilon$ model
⁶ Realizable $k - \epsilon$ model

¹ Resolution
² Modified $k - \epsilon$ model
³ Boussinesq - Viscosity Models



بیان می‌کند. بسیاری از ابتکارات فنی در زمینه‌ی آزمایش‌های آیرودینامیک در محیط‌های با سرمایش عمیق مورد بازبینی قرار گرفته است و در نهایت به بررسی روند آینده‌ی تکامل تونل‌های باد و چالش‌های فنی پیش رو پرداخته شده است.

بلوکن و همکاران (۲۰۱۱) [۵۶]، اثرات پروفایل توربولانسی در جریان ورودی را شبیه سازی نمودند و به این نتیجه رسیدند که در نسبت‌های سرعت پایین، مدل‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی و اندازه‌گیری‌ها با یکدیگر تطابق قابل قبولی ندارند.

بلوکن و گوالتیوری (۲۰۱۲) [۵۷]، ده گام برای توسعه و بهبود مدل‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی را با کاربرد مکانیک سیالات محیط زیستی بیان نمودند و چهارچوب مفهومی جهت راستی‌آزمایی و صحت‌سنجی مدل‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی ارائه نمودند و در نهایت برای تلاش‌های آینده، استفاده از این ده گام تکرار شونده را ضروری و همچنین ثمر بخش می‌دانند. در این تحقیق دو مطالعه‌ی موردی برای مفهومی‌سازی این ده گام ضروری در دینامیک سیالات محاسباتی با کاربرد مکانیک سیالات محیط زیستی را مدل‌سازی و مورد بررسی قرار دادند.

آن و همکاران (۲۰۱۳)، تأثیر پروفایل‌های توربولانسی جریان ورودی بر سرعت باد پایین دست جریان و همچنین پروفایل انرژی جنبشی توربولانسی در طول خیابان برای چهار چیدمان مختلف ساختمان‌ها را پیش بینی نمودند. این پژوهش شامل چیدمان پنجمی از ساختمان‌ها نیز می‌شد که از آن برای راستی‌آزمایی مدل‌سازی استفاده نمودند. چیدمان پنجم دقیقاً مشابه با چیدمان یوشی و همکاران (۲۰۰۷) [۵۰] بود و راستی‌آزمایی به این شیوه انجام گرفت. با مقایسه‌ی نسبت‌های سرعت باد بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی‌ها، آن و همکاران (۲۰۱۳) به نتایجی مشابه با استابولوس (۱۹۹۷ و ۲۰۰۶) رسیدند. در این مطالعه معلوم شد که در نسبت‌های بالای سرعت باد، شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی و اندازه‌گیری‌ها با یکدیگر تطابق بسیار خوبی دارند، این در صورتی است که در نسبت‌های پایین سرعت باد دقت قبل به شدت دچار نقصان می‌شود. این دقیقاً همان نتیجه‌ی است که گاوس و همکاران (۲۰۱۱) [۵۸] به آن دست یافته بودند.

بارلو (۲۰۱۴) [۵۹]، مقاله‌ی جامعی درباره پیشرفت‌های مدل‌سازی و همچنین مشاهدات لایه مرزی شهری ارائه نموده است و بیان مفهومی از لایه‌های مرزی در مقیاس شهری، ناحیه‌ای و حومه‌ای و اجزای تشکیل دهنده‌ی لایه‌های مرزی شهری را آورده است. در این مقاله ذکر شده است که با پیشرفت و توسعه‌ی بسیار زیاد ابزارهای مدل‌سازی و شبیه‌سازی ضروری است که به شناخت ناهمگنی‌ها در زیر لایه‌های مرزی شهری پرداخت و صرفاً دید کلاسیک همگن بودن زیر لایه‌ها را مد نظر قرار نداد. همچنین پاسخ به تقاضای محیط زیست سالم‌تر و پایدار در شناسایی و مدل‌سازی دقیق و نزدیک به واقعیت لایه مرزی شهری است.

توپارلار و همکاران (۲۰۱۴) [۶۰]، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی دمای منطقه‌ای شهری در ترندام را پیش‌بینی نمودند. شبیه‌سازی‌ها سه‌بعدی $URANS^5$ با مدل آشفتگی قابل حصول $k - \epsilon$ و دقت شبکه‌بندی محاسباتی بالا انجام شد. این مدل شامل جریان باد و مکانیزم‌های انتقال حرارت جابجایی، هدایت و تشعشع می‌شود. راستی‌آزمایی بوسیله‌ی دمای سطح بدست آمده از محاسبات و داده‌های تجربی حاصل از ماهواره‌ی عکس برداری مادون سرخ با دقت بسیار بالا در طول موج گرمایی

بلوکن و همکاران (۲۰۰۷) [۴۷ و ۴۸ و ۴۹]، الگوی جریان باد بین ساختمان‌های موازی را توسط مدل RLZ شبیه سازی نمودند و با نتایج اندازه‌گیری‌های تونل باد توسط استابولوس و اشتورمز (۱۹۸۶) مقایسه کردند. همچنین آن‌ها اهمیت نحوه‌ی انتخاب شرایط مرزی دقیق را که از این جمله می‌توان پروفایل ورودی و توابع دیوارها را نام برد، نشان دادند. انتخاب دقیق شرایط مرزی در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای بدست آوردن شرایط باد در سطح پیاده‌رو بسیار حائز اهمیت است. در آخر، شارهای گذرگاه تحلیل شد تا شرایط بلوکه شدن باد نشان داده شود علی‌رغم آنکه انتظار می‌رفت شرایطی مانند گذر جریان از یک ونتوری ایجاد شود.

یوشی و همکاران (۲۰۰۷) [۵۰]، مطالعات محاسباتی وسیعی از انیستیتیوی معماری ژاین ارائه دادند. این مطالعات، برای دامنه‌ی وسیعی از چیدمان‌های ساختمان‌های ایده‌آل شده و همچنین ساختمان‌های واقعی انجام شده است. این مدل‌سازی‌های محاسباتی بوسیله‌ی اندازه‌گیری‌های تونل باد و اندازه‌گیری‌های بزرگ مقیاس راستی‌آزمایی شد و اطلاعات پایه‌ای را فراهم آورد و منجر به توصیه‌نامه‌هایی از انیستیتیوی معماری ژاین برای شبیه‌سازی بادها در سطح پیاده‌رو شد. مدل‌سازی‌ها توسط مدل‌های SKE و RNG و DSM انجام شد

موجیدا و لوون (۲۰۰۸) [۵۱]، آخرین توسعه‌ها و پیشرفت‌های مهندسی باد محاسباتی برای پیش‌بینی باد در سطح پیاده‌رو و شرایط دمایی محیطی در محیط شهری را در مقاله‌ای مرور نمودند؛ بویژه این تحقیق شامل شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی باد در سطح پیاده‌رو و تأثیرات درختان و خودروها بر باد می‌شود. علاوه بر بدست آوردن سرعت متوسط جریان، انرژی جنبشی توربولانسی هم محاسبه شده است. مدل استفاده شده در این پژوهش MKE می‌باشد؛ همچنین در این مقاله اثرات دمایی و رطوبت در معادلات مربوطه در نظر گرفته شده است.

موجیدا و همکاران (۲۰۰۸) [۵۲]، دقت مدل تاج درختان^۲ و همچنین اثرات پوشش گیاهی بر شرایط باد را مورد بررسی قرار دادند. این کار با در نظر گرفتن جمله‌ی اضافی تولید^۳ در معادلات مربوطه انجام شده است و مدل استفاده شده در این پژوهش MKE می‌باشد. در این تحقیق نتایج محاسبات با اندازه‌گیری‌های میدانی راستی‌آزمایی شد.

بلوکن و پرسون (۲۰۰۹) [۵۳]، شرایط آسایش باد در سطح پیاده و آسایش باد برای بندر و حومه‌ی استادیوم فوتبال آمستردام هلند را توسط مدل RLZ مدل‌سازی نمودند. این تحقیق شامل موارد زیر می‌شود:

- ۱- تحلیل حساسیت شبکه‌بندی
- ۲- بررسی اثرات دو چیدمان مختلف ساختمان‌ها
- ۳- اثرات زبری محلی سطح زمین
- ۴- همچنین تحلیل به اصطلاح دقت وابسته به زمین

نر و همکاران (۲۰۱۰) [۵۴]، اثرات شرایط باد در مقیاس خرد^۴ بر روی جریان باد اطراف ساختمان‌ها و همچنین بر اجزای ساختمان را مورد بررسی قرار دادند. این موارد شامل تهویه طبیعی، تعویض هوا و درجه‌های هوای دیواری و سقفی بود.

گرین و کوئست در سال (۲۰۱۱) [۵۵] مقاله‌ای منتشر نمودند که درباره‌ی تاریخچه‌ی تونل‌های باد با سرعت صوت در اروپا است. این مطالعه فرآیند تکامل تونل‌های باد با سرعت صوت در طراحی، ساخت و راه‌اندازی را

¹ Differential stress model

² Trees canopy model

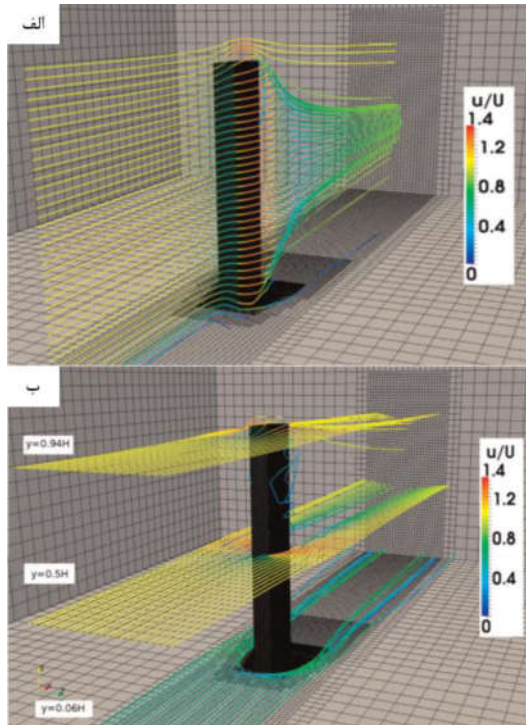
³ Source term

⁴ Micro scale

⁵ Unsteady RANS



متر می‌باشند. این ساختمان‌ها گوشه‌ی متقارن را شکل می‌دهند. همچنین ساختمان‌هایی با طول، عرض و ارتفاع، فاصله‌ی جدایش از گوشه، زاویه ورودی و ارتفاع‌های اندازه‌گیری مختلف را ارزیابی نمودند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در حالت ورودی همگرا، انرژی پتانسیل باد بر روی بام خانه‌ها با بزرگ‌تر شدن گوشه‌ی جدایش عموماً بصورت محسوسی افزایش می‌یابد؛ در حالیکه، در حالت ورودی واگرا با بزرگ شدن گوشه انرژی پتانسیل نسبتاً آهسته از حالت قبل کاهش می‌یابد. در عین حال، در مقایسه با خانه‌ی مرجع منفرد، اکثر چیدمان‌های گوشه‌ای مقادیر بیشتری از انرژی پتانسیل را در بام خانه‌ها نشان داده‌اند.



شکل ۱۰ خطوط جریان سه بعدی، متوسط با زمان. الف) عمودی (ب) افقی [۶۳]

۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در دهه‌ی ۱۹۵۰ با توجه به ضعف کامپیوترهای موجود توسعه‌ی مطالعات تجربی و آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های هواشناسی برای بهبود پیش‌بینی عددی آب و هوا آغاز شد. معادلات ابتدایی در این دوره مورد استفاده واقع می‌شد و مدل‌های پیشرفته‌ی دینامیک سیالات مانند *RANS* و سایر معادلات آشفتگی کاربرد وسیعی در این زمینه نداشت. در دهه‌ی ۱۹۶۰ توسعه و بهبود مدل‌های عددی معادلات ابتدایی و همچنین افزایش توان محاسباتی کامپیوترها، مدل‌سازی‌ها با هندسه‌ی پیچیده و دقت بیشتر آغاز شد. اسمانگورینسکی و لیلی مدل شبیه‌سازی گردابه‌ی بزرگ را ارائه نمودند و در دهه‌ی ۱۹۷۰ مدل‌های متوسط‌گیری شده‌ی رینولدز تابلیم برای شبیه‌سازی ارائه گردیدند. به علت کارآمدی خوب، این مدل‌ها نیز در علم دینامیک باد شهری مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه در سال‌های ۱۹۸۰ مدل‌های عددی حل این معادلات توسعه یافتند. برای ارزیابی نتایج بدست آمده در دهه‌ی ۱۹۹۰ مدل‌های پیشرفته‌ی تابلیم ارائه و با نتایج آزمایش تونل باد مقایسه گردید. در این دوره همچنین مطالعات وسیعی در جهت ساخت و

سال ۲۰۰۶ انجام گردید. نتایج حاصله نشان دهنده‌ی خطای ۷/۹ درصدی مدل‌های محاسباتی نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده در پیش‌بینی دمای سطوح شهری بود.

ریدر و همکاران (۲۰۱۵) [۶۱]، مدلی جدید برای اقلیم شهر^۱ ارائه نمودند. این مدل را *UrbClim* نام گذاری کرده‌اند و به منظور مطالعه‌ی دامنه‌های متراترم - مقیاس در دقت فضایی کمتر از صد متر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل شمایی از ناهمواری‌های سطح زمین به همراه فیزیک ساده شده‌ای از محیط شهری که با مدل لایه مرزی اتمسفری سه‌بعدی کوپل شده است را در نظر می‌گیرد. این مدل راستی آزمایشی‌های زیادی را پشت سر گذاشته است که از این دست می‌توان مدل‌سازی‌هایی در فرانسه، بلژیک و اسپانیا را نام برد. این مدل علی‌رغم ساده بودن دقتی به اندازه‌ی مدل‌های بسیار پیچیده دارد. همچنین از سایر مدل‌های مقیاس میانه سرعت همگرایی به جواب بیشتری دارد بنابراین در مدل‌سازی‌های وابسته به زمان طولانی بسیار کارآمد خواهد بود و کاربرد آن در تعیین اقلیم شهر می‌باشد.

تومیناگا و همکاران (۲۰۱۵) [۶۲] جریان باد حول یک ساختمان شیروانی منفرد را مورد بررسی قرار داده‌اند. این مطالعه با در نظر گرفتن شیب‌های مختلف به ویژه ۳:۱۰، ۵:۱۰ و ۷:۱۰ برای شبیه‌سازی در تونل باد و اندازه‌گیری داده‌های سرعت متوسط زمانی، انرژی جنبشی آشفتگی و ثابت فشار در اطراف ساختمان، انجام شده است. شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بر اساس مدل معادلات ناویر-استوکس با رینولدز متوسط پایا صورت گرفته است. آنالیز حساسیت برای دقت شبکه‌بندی و مدل‌های آشفتگی بررسی شده و نتایج با استفاده از داده‌های تجربی تونل باد مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. در پایان اثر شیب ساختمان‌های شیروانی بر میدان جریان تحلیل شده و نتیجه‌ی حاصل تفاوت بزرگی در میدان سرعت بین شیب‌های ۳:۱۰ و ۵:۱۰ و همچنین ۵:۱۰ و ۷:۱۰ را نشان می‌دهد.

ژوبرت و همکاران (۲۰۱۵) [۶۳] معتقداند دقت محاسبات آشفتگی با تخصیص کمترین منابع محاسباتی، یکی از چالش‌های اصلی مدل‌سازی عددی رژیم‌های جریان آشفته‌ی ناپایا است. در این مقاله از مدل اسپالارت - آلماراس استفاده شده که با مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده بهبود یافته است. عدد رینولدز جریان در تونل باد 7.6×10^4 و حول تیری با سطح مقطع مستطیل در نظر گرفته شده است. نسبت‌های $L/D = 2.63$ و 5 از مشخصه‌های تیر می‌باشند. نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج مدل‌سازی تونل باد متوسط‌گیری شده نسبت به زمان مقایسه شده است که شامل داده‌های سرعت سنجی تصویر ذرات و سنجش فشار می‌باشند. نتایج این قیاس نشان می‌دهد که مدل اسپالارت - آلماراس که با مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده بهبود یافته است با دقت میدان و انحراف کم جریان را حول تیر باز تولید می‌کند.

میدان جریان پیچیده‌ی سه‌بعدی متغیر با زمان نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که ریزش گردابه‌ها متناوباً اتفاق می‌افتد و بصورت دوره از بین می‌روند؛ عدد اشتروهل در راستای ارتفاع تیر بین 0.053 تا 0.059 تغییر می‌کند. بیشترین بار وارده‌ی دوره‌ای بر تیر در ارتفاع $y = 5H$ و در فاصله‌ی $0.8L$ از لبه‌ی جریان بالا دست تیر وارد می‌شود.

وانگ و همکاران (۲۰۱۵) [۶۴] رابطه‌ی بین انرژی پتانسیل و پیکربندی دو ساختمان عمود بر هم با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار دادند. ساختمان‌های مرجع دارای عرض ۶، طول ۱۵ و ارتفاع ۱۰

^۱ Urban climate



- [2] J. Smagorinsky, "The dynamical influence of large-scale heat sources and sinks on the quasi-stationary mean motions of the atmosphere," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 79, pp. 342-366, 1953.
- [3] J. Charney, "The Use of the Primitive Equations of Motion in Numerical Prediction," *Tellus*, vol. 7, no. 1, pp. 22-26, 1955.
- [4] N. a. Phillips, "The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 82, pp. 123-164, 1956.
- [5] Smagorinsky, J., "On the numerical integration of the primitive equations of motion for baroclinic flow in a closed region," *Mon. Weather Rev.*, vol. 86, no. 12, pp. 457-466, 1958.
- [6] N. A. Phillips, "On the Problem of Initial Data for the Primitive Equations," *Tellus*, vol. 12, no. 2, pp. 121-126, 1960.
- [7] J. Smagorinsky, "general circulation experiments with the primitive equations," *Weather Bur.*, vol. 91, no. 3, pp. 594-595, 1963.
- [8] A. Kasahara and W. M. Washington, "Near Global General Circulation Model of the Atmosphere," *Mon. Weather Rev.*, vol. 95, no. 7, pp. 389-402, 1967.
- [9] frederick G. Shuman and J. B. Hovermale, "An operational six-layer primitive equation model," *J. Appl. Meteorol.*, no. 4, p. 6, 1968.
- [10] R. P. Pearce, "The calculation of the sea breeze circulation in terms of the differential heating across the coast line.," *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 81, pp. 351-381, 1955.
- [11] B. E. A. Fisher, "a theoretical study of the sea breeze," *J. Meteorol.*, vol. 18, pp. 216-233, 1960.
- [12] M. a. Estoque, "the sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation," *J. Atmos. Sci.*, vol. 19, pp. 244-250, 1962.
- [13] J. Smagorinsky, "general circulation experiments with the primitive equations," *Weather Bur.*, vol. 91, no. 3, pp. 594-595, 1963.
- [14] michael A. fosberg, "airflow over a heated coastal mountain," *J. Appl. Meteorol.*, vol. 8, pp. 436-442, 1968.
- [15] M. a. Estoque and C. M. Bhumralkar, "Flow Over a Localized Heat Source," *Mon. Weather Rev.*, vol. 97, no. 12, pp. 850-859, 1969.
- [16] Y. Delage and P. a. Taylor, "Numerical studies of heat island circulations," *Boundary-Layer Meteorol.*, vol. 1, no. 2, pp. 201-226, 1970.
- [17] R.N. Meroney and T. Yamada, "Numerical and physical simulation of a stratified airflow over a series of heated islands," *In Proceedings of the Summer Simulation Conference*, June 13-16, 1972, San Diego, California. 1972.
- [18] C. E. Wallington and J. Portnall, "A numerical study of the wavelength and amplitude of lee waves," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 84, no. 359, pp. 38-45, 1958.
- [19] C. W. Hirt and J. L. Cook, "calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain," *J. Comput. Phys.*, vol. 10, pp. 324-340, 1972.
- [20] W. Frost, J. R. Maus, and G. H. Fichtl, "A boundary-layer analysis of atmospheric motion over a semi-elliptical surface obstruction," *Boundary-Layer Meteorol.*, vol. 7, no. 2, pp. 165-184, 1974.
- [21] D. M. deaves, "wind over hills: a numerical approach," *J. Ind. Aerodyn.*, vol. 1, pp. 371-391, 1976.
- [22] russel G. Derickson and robert N. Meroney, "a simplified physics airflow model for evaluating wind power sites in complex terrain," in *summer computer simulation conference*, 1977..
- [23] D.Vasilic-Melling, "Three dimensional turbulent flow past rectangular bluff bodies", Ph.D. thesis. Imperial College of Science and Technology, London, 1977.
- [24] D. A. Paterson and C. J. Apelt, "computation of wind flows over three-dimensional buildings," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 24, pp. 193-213, 1986.
- [25] D. A. Paterson and C. J. Apelt, "Simulation of wind flow around three-dimensional buildings," *Build. Environ.*, vol. 24, no. 1, pp. 39-50, 1989.

ارتقاء تونل‌های باد انجام شد. در سال‌های اخیر ارائه مدل‌های جدید عددی باعث ارتقاء دقت پیش‌بینی الگوی جریان و دینامیک باد بر روی ساختمان‌ها و به‌ویژه در سطح عابری پیاده شده است. با توجه به این موارد همچنان در شبیه‌سازی دینامیک باد کاستی‌هایی وجود دارد. از جمله این موارد، شبیه‌سازی یک شهر در مقیاس کامل و یا مجموعه‌ای از شهرها را نام برد. تمامی مطالعات انجام دامنه‌ی محاسباتی وسیعی ندارند. اما با توجه به معادلات حاکم بر جریان و همچنین توانایی محاسباتی کامپیوترهای کنونی می‌توان دامنه‌ی محاسباتی را حتی تا مقیاس ۵۰ کیلومتر مربع و یا بیشتر نیز افزایش داد.

شبیه‌سازی جریان صرفاً محدود به شبیه‌سازی جریان باد بر سطوح شهری نمی‌شود؛ بلکه می‌توان اثر ریزگردها، آلاینده‌های موجود در جریان باد، اثر دمای سطح و پوشش گیاهی را بصورت همزمان در شبیه‌سازی پیاده نمود. با توجه به مطالعات ارائه شده در این بررسی نواقصی بر تحقیقات پیشین به ذهن می‌رسد. از جمله این نقایص می‌توان موارد زیر نام برد:

در تعداد کمی از مقالات اثرات رطوبت و انتقال حرارت در معادلات جریان وارد شده است و بنابراین مدل‌سازی را از حالت واقعیت دور می‌کند. مطالعات انجام شده نشان داده است که رطوبت و انتقال حرارت اثر بسزایی در شناخت جریان باد دارد [۱۷]. علاوه بر آن هدف عمده‌ی مطالعات گذشته صرفاً بدست آوردن سرعت متوسط جریان بوده است؛ اما واضح است که تنها هدف از مدل‌سازی جریان باد در سطح شهر بدست آوردن پروفایل باد نیست، بلکه توزیع فشار و غلظت هوا نیز در محیط‌های شهری بسیار حائز اهمیت است. وانگهی، تعداد بسیار معدودی از کارهای پیشین راستی‌آزمایی‌های مقیاس کامل داشته‌اند. به این معنا که اندازه‌گیری‌های میدانی در بسیار کمی از مطالعات انجام شده است و اکثر راستی‌آزمایی‌ها توسط داده‌های حاصل از اندازه‌گیری تونل باد انجام شده است. از جمله مسائل مهم در شبیه‌سازی تحلیل حساسیت شبکه‌بندی در مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی کار بسیار مهم و همچنین وقت‌گیر می‌باشد و همچنان که مونت و همکاران (۲۰۱۲) [۶۵] اشاره نموده‌اند، انجام این کار از ضروریات مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی است. از مقالات بررسی و پردازش شده تنها در چند مقاله از جمله (بلوکن و همکاران، ۲۰۰۷) شارها از جمله حرارتی و انتقال ممنتوم در مدل‌سازی لحاظ شده است. بنابراین وارد نمودن این ترم‌ها در شبیه‌سازی ثمر بخش خواهد بود. راستی‌آزمایی و تعیین کیفیت ترم‌های چشمه و چاه با داده‌های تجربی بسیار مهم و از پارامترهای اساسی مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد. در مدل‌سازی به روش توابع دیوار، تعیین تابع دیوار مناسب بر اساس آزمایشات تجربی کار مهم و پایه‌ای در این شبیه‌سازی است. وارد نمودن جزئیات مدل‌های سه بعدی در نتایج بدست آمده از مدل‌سازی بسیار تأثیرگذار است و حساسیت مدل به جزئیات مدل‌سازی سه بعدی بالا است. بنابر موارد فوق لزوم انجام تحقیق جامع‌تری در باره مدل‌سازی جریان باد ثابت می‌شود و با علم بر وجود کاستی‌های مدل‌های پیشین، سعی بر مدل‌سازی کامل تر بسیار حائز اهمیت است.

۴- مراجع

- [1] J. Charney, "The Use of the Primitive Equations of Motion in Numerical Prediction," *Tellus*, vol. 7, no. 1, pp. 22-26, 1955.



- [47] B. Blocken and J. Carmeliet, "Validation of CFD simulations of wind-driven rain on a low-rise building facade," *Building and Environment*, 42(7), 2530–2548, 2007.
- [48] B. Blocken, J. Carmeliet and T. Stathopoulos, "CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(9–11), 941–962, 2007.
- [49] B. Blocken, T. Stathopoulos and J. Carmeliet, "CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems," *Atmospheric Environment*, 41(2), 238–252, 2007.
- [50] R. Yoshie, a. Mochida, Y. Tominaga, H. Kataoka, K. Harimoto, T. Nozu, and T. Shirasawa, "Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 95, no. 9–11, pp. 1551–1578, 2007.
- [51] A. Mochida and I. Y. F. Lun, "Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 96, no. 10–11, pp. 1498–1527, 2008.
- [52] A. Mochida, Y. Tabata, T. Iwata and H. Yoshino, "Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96 (10–11), 1667–1677, 2008.
- [53] B. Blocken and J. Persoon, "Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 97, no. 5–6, pp. 255–270, 2009.
- [54] K. Nore, B. Blocken, and J. V. Thue, "On CFD simulation of wind-induced airflow in narrow ventilated facade cavities: Coupled and decoupled simulations and modelling limitations," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 8, pp. 1834–1846, 2010.
- [55] J. Green and J. Quest, "A short history of the European Transonic Wind Tunnel ETW," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 47, no. 5, pp. 368–319, 2011.
- [56] B. Blocken, T. van Hooff, L. Aanen and B. Bronsema, "Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: venturi-effect versus wind-blocking effect," *Comput. Fluids* 48 (1), 202–213, 2011.
- [57] B. Blocken and C. Gualtieri, "Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics," *Environ. Model. Softw.*, vol. 33, no. 0, pp. 1–22, 2012.
- [58] P. Gousseau, B. Blocken, and G. J. F. van Heijst, "CFD simulation of pollutant dispersion around isolated buildings: On the role of convective and turbulent mass fluxes in the prediction accuracy," *J. Hazard. Mater.*, vol. 194, pp. 422–434, 2011.
- [59] J. F. Barlow, "Progress in observing and modelling the urban boundary layer," *Urban Clim.*, vol. 44, Aug. 2014.
- [60] Y. Toparlar, B. Blocken, P. Vos, G.-J. Van Heijst, W. D. Janssen, T. van Hooff, H. Montazeri, and H. Timmermans, "CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam," *Build. Environ.*, vol. submitted, pp. 1–12, 2014.
- [61] K. De Ridder, D. Lauwaet, and B. Maiheu, "UrbClim – A fast urban boundary layer climate model," *Urban Clim.*, vol. 12, pp. 21–48, 2015.
- [62] Y. Tominaga, S. Akabayashi, T. Kitahara, and Y. Arinami, "Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations," *Build. Environ.*, vol. 84, pp. 204–213, 2015.
- [63] E. C. Joubert, T. M. Harms, and G. Venter, "Computational simulation of the turbulent flow around a surface mounted rectangular prism," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 142, pp. 173–187, 2015.
- [64] B. Wang, L. D. Cot, L. Adolphe, S. Geoffroy, and J. Morchain, "Estimation of wind energy over roof of two perpendicular buildings," *Energy Build.*, vol. 88, no. 2015, pp. 57–67, 2015.
- [26] S. Murakami and A. Mochida, "3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the k-ε models," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 31, pp. 283–303, 1988.
- [27] T. Hanson and D.M. Summers and C.B. Wilson, "Validation of a computer simulation of wind flow over a building model," *Build. Environ.* 21, 97–111, 1986.
- [28] S. Murakami, "Numerical simulation of turbulent flowfield around cubic model current status and applications of model and LES," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 33, pp. 139–152, 1990.
- [29] H. Montazeri, B. Blocken, W. D. Janssen, and T. van Hooff, "CFD evaluation of new second-skin facade concept for wind comfort on building balconies: Case study for the Park Tower in Antwerp," *Build. Environ.*, vol. 68, pp. 179–192, 2013.
- [30] H. Montazeri, B. Blocken, W. D. Janssen, and T. van Hooff, "CFD evaluation of new second-skin facade concept for wind comfort on building balconies: Case study for the Park Tower in Antwerp," *Build. Environ.*, vol. 68, pp. 179–192, 2013.
- [31] Bottema, M., 1993. *Wind Climate and Urban Geometry*, Ph.D. thesis. Eindhoven University of Technology (212 p)
- [32] J. D. Paterson, D A Holms, "computation of wind flow over topography," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 43, pp. 1–6, 1993.
- [33] Y. Ohya, M. Tatsuno, Y. Nakamura, and H. Ueda, "A thermally stratified wind tunnel for environmental flow studies," *Atmos. Environ.*, vol. 30, no. 16, pp. 2881–2887, 1996.
- [34] W. Rodi, "Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 69–71, pp. 55–75, 1997.
- [35] T. Stathopoulos, "Computational wind engineering: Past achievements and future challenges," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 67–68, pp. 509–532, 1997.
- [36] S. Murakami, "Overview of turbulence models applied in CWE-1997," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 74–76, pp. 1–24, 1998.
- [37] S. Murakami, R. Ooka, A. Mochida, S. Yoshida, and Sangjin Kim, "CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 81, no. 1–3, pp. 57–81, 1999.
- [38] J. He and C. C. . Song, "Evaluation of pedestrian winds in urban area by numerical approach," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 81, no. 1–3, pp. 295–309, 1999.
- [39] M. Casey and T. Wintergerste, "ERCOFTAC Special Interest Group on Quality and Trust in Industrial CFD-Best Practice Guidelines," *Eur. Res. Community Flow, Turbul.*, no. January, pp. 0–3, 2000.
- [40] H. Lubeke, St. Schmidt, T. Rung, and F. Thiele, "Comparison of LES and RANS in bluff body flows," *J. Wind Eng. nad Ind. Aerodyn.*, vol. 89, pp. 1471–1485, 2001.
- [41] A. Ferreira, A. Sousa, and D. Viegas, "Prediction of building interference effects on pedestrian level comfort," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 90, pp. 305–319, 2002.
- [42] B. Blocken and J. Carmeliet, "Pedestrian Wind Environment around Buildings: Literature Review and Practical Examples," *J. Build. Phys.*, vol. 28, no. 2, pp. 107–159, 2004.
- [43] B. Blocken and S. Roels and J. Carmeliet, "Modification of pedestrian wind comfort in the Silvertop Tower passages by an automatic control system," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 92 (10), 849–873, 2004.
- [44] A. Zhang, C. Gao, & L. Zhang, "Numerical simulation of the wind field around different building arrangements," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(12), 891–904, 2005.
- [45] D. Hamlyn and R. Britter, "A numerical study of the flow field and exchange processes within a canopy of urban-type roughness," *Atmos. Environ.*, vol. 39, no. 18, pp. 3243–3254, 2005.
- [46] T. Stathopoulos, "Pedestrian level winds and outdoor human comfort," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 94, no. 11, pp. 769–780, 2006.



- [65] P. Moonen, T. Defraeye, V. Dorer, B. Blocken, and J. Carmeliet, "Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand," *Front. Archit. Res.*, vol. 1, no. 3, pp. 197–228, 2012.

