

WRF

bidokhti@ut.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۲/۱۶ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۰/۳/۱۸)

()

WRF

()

()

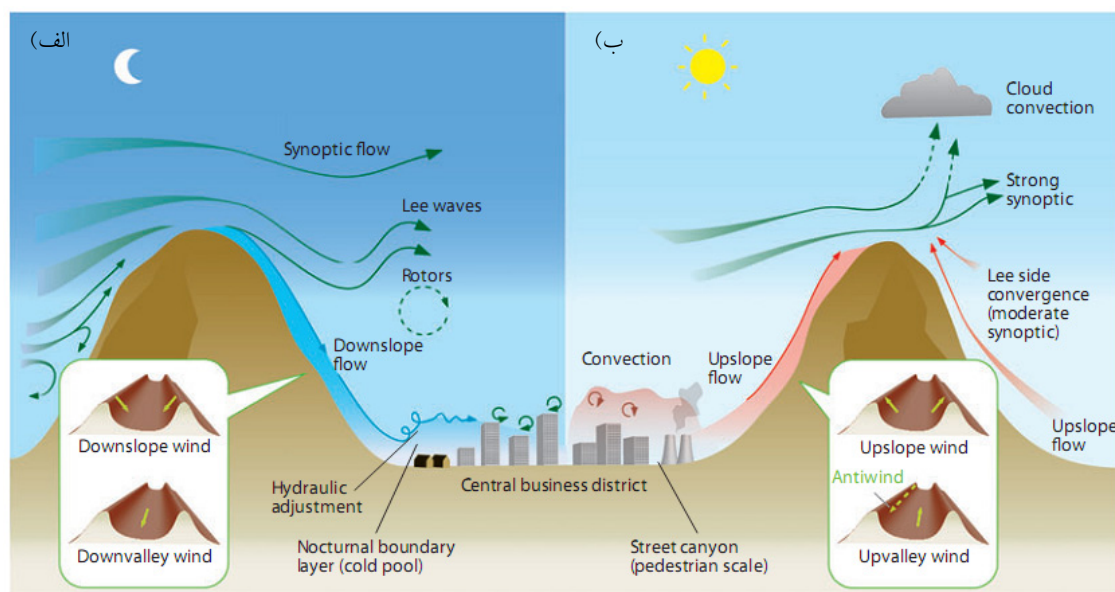
WRF

:

در جابه‌جایی آلاینده‌ها بازی می‌کند. تأثیر مثبت و حیاتی پیش‌بینی صحیح الگوی میدان باد و گردش‌های میان‌مقیاس را می‌توان در ناوبری هوایی نیز مشاهده کرد. آلودگی هوا در مناطق شهری تأثیر بسزائی در میزان دید پروازها خصوصاً در مناطق مجاور فرودگاه دارد. جنبه‌های دیگر این قضیه را می‌توان

بدون شک پیش‌بینی الگوی میدان باد و گردش‌های محلی^۱ مناطق شهری مهمترین عامل در میان انواع عوامل هواشناختی در راستای پیش‌بینی آلودگی هوا است؛ چرا که بیشترین نقش را

^۱. Local circulation



شکل ۱. جریان‌های شیب، بادهای دره، گردش شهری و جریان‌های بزرگ‌مقیاس (در، الف) شب و (ب) روز (فرناندو، ۲۰۱۰).

واکنش‌ها و نهشت در نتیجه کاهش دما در لایه‌های فوقانی جو می‌شود [۶]. از دیگر عوامل موثر بر گردش‌های جوی در مناطق شهری اثر جزیره گرمایی است که عامل همگرایی جریان در مناطق مرکزی شهر و شکل‌گیری یک گردش از مرکز به اطراف می‌شود. برهم‌نهی این جریان با دیگر جریان‌های محلی در نتیجه اثر کوهستان، جریان کوه - دره^۱ و باد شیب^۲، عامل پیچیده‌تر شدن جریان هوا در این منطقه هستند (شکل ۱).

ویژگی‌های جغرافیایی، رشد فزاینده جمعیت، وسایل حمل و نقل و کارخانه‌ها (اثر تشدید شونده جزیره گرمایی^۳) موجب شده است که در اغلب مواقع سال شاخص استاندارد آلودگی^۴ (PSI) تهران بالاتر از حد مجاز آن باشد. به نظر می‌رسد که خصوصاً در فصل زمستان این شرایط در حضور سامانه‌های واپرخندی یا به عبارت دیگر نبود و یا حضور کم‌رنگ جریان‌های بزرگ‌مقیاس رخ می‌دهد. این شرایط همدیدی زمینه مناسبی برای شکل‌گیری جریان‌های میان‌مقیاس گرما واداشت^۵

حتی در زندگی روزمره ساکنین شهرها نیز مشاهده کرد. الگوی جریان در مناطق شهری نسبت به مناطق غیر شهری دستخوش تغییرات است به گونه‌ای که به عنوان مثال نیم‌رخ باد در این مناطق از الگوی لگاریتمی جریان که در مناطق غیر شهری رخ می‌دهد، تبعیت نمی‌کند. شهری شدن، خود عامل افزایش مالش سطح و در نتیجه کاهش سرعت باد در جریان‌های تند [۱] و ایجاد منطقه همگرایی در سمت پشت به باد مناطق شهری در جریان‌های آرام می‌شود [۲]. اثر موانع شهری معمولاً باعث دو شاخه شدن جریان‌ها در سمت بادسو و به هم پیوستگی مجدد آن در سمت پشت به باد شهرها می‌شود [۲ و ۳].

کلان‌شهر تهران با جمعیتی بیش از ۱۰ میلیون نفر در حوزه‌ای تقریباً بسته در دامنه جنوبی البرز مرکزی قرار گرفته است. رشته‌کوه‌ها عاملی بسیار تاثیر گذار در پیچیدگی بیشتر الگوی جریان هوا در شهرهای مجاور آنها (نظیر نقش رشته‌کوه البرز روی باد در تهران) هستند، چرا که این موانع از یک‌سو همچون سدی در مسیر جریان‌ها قرار گرفته و تهویه آلودگی شهری را در این مناطق با مشکل روبرو ساخته است (به عنوان مثال؛ [۴]) و از سوی دیگر موجب انتقال آلاینده‌ها به ترازهای بالای جو می‌شود (به عنوان مثال؛ [۵]). صعود این جریان‌ها به ترازهای بالاتر باعث ماندگاری بیشتر این ذرات به دلیل کاهش

۱. Mountain - valley

۲. Slope wind

۳. Urban Heat Island

۴. Pollutant Standard Index

۵. Thermally driven flow

ناشی از اثر توپوگرافی و اثر گرمایش شهری فراهم می‌کند. به عبارت دیگر این جریان‌ها بیشترین نقش را در جابه‌جایی آلاینده‌ها بازی می‌کند [۷].

شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای به کمک مدل‌های عددی میان‌مقیاس برای تخمین واقعیت‌های فیزیکی جو در قالب فرمول‌های ریاضی و در مقیاس‌های متناسب با مقیاس شهری [۸، ۹ و ۱۰] استفاده می‌شود. امروزه مدل‌های عددی میان‌مقیاس، ابزاری توانمند در انجام مطالعات شهری و به ویژه تعیین الگوی باد و مطالعات آلودگی به حساب می‌آیند. با توجه به مطالب عنوان شده، آنچه اهمیت مطالعات جامع‌تر و دقیق‌تر الگوی باد و گردش روی شهر تهران را کاملاً توجیه می‌کند، نقصان مطالعات قبلی و منحصر به فرد بودن الگوی جریان در چنین مناطقی است. در این مقاله پس از ارائه تاریخچه مختصری از مطالعات پیشین انجام گرفته در سطح جهان و منطقه و به منظور دستیابی به شناختی کامل‌تر نسبت به ماهیت جریان‌های میان‌مقیاس روی شهرهای نزدیک به توپوگرافی‌های پیچیده مجموعه‌ای از شبیه‌سازی عددی به کمک مدل میان‌مقیاس WRF^۱ [۱۰] روی تهران انجام گرفته و نتایج حاصل از آنها شرح داده شده است.

سامانه‌های میان‌مقیاس را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: (۱) جریان‌های گرما واداشت و (۲) جریان‌هایی که به وسیله سامانه‌های بزرگ مقیاس به میان‌مقیاس منتقل می‌شوند (شکل ۱). دسته اول شامل نسیم‌های دریا - خشکی، بادهای کوه - دره، سیستم‌های گردش جریان در مناطق شهری ناشی از جزیره گرمایی (گردش‌های شهری)^۲ و جریان‌های اجباری بر روی ناهمواری‌ها و سطوح ناصاف می‌شود، به عبارت دیگر این جریان‌ها ناشی از حضور توپوگرافی یا تفاوت‌های فیزیوگرافی مرز پایین شکل می‌گیرند. دسته دوم شامل خطوط تندوزه^۳

هاریکن‌ها و ... است [۹ و ۱۱]. با توجه به موضوع مقاله، در اینجا تمرکز بر روی دسته اول و در آن میان بادهای کوه - دره و گردش‌های شهری است.

در مناطق کوهستانی به دلیل تفاوت گرمايش سطح در سطوح ناهمگون ارتفاعی، جریان‌های محلی شکل می‌گیرند. از آنجا که بیشترین تغییرات دمایی بر روی سطح زمین رخ می‌دهد، بنابراین در طول روز مناطق مرتفع به عنوان چشمه گرمایی و شب‌ها به عنوان چاه گرمایی عمل می‌کنند.

معمولا جریان های کوه - دره را به دو دسته تقسیم می کنند:

۱) جریان های شیب^۴ و ۲) بادهای دره^۵. آشکارسازی بهتر این جریان ها زمانی امکان پذیر است که جریان های بزرگ مقیاس ناچیز باشند [۹]. به طور خلاصه جریان شیب به جریان هوای سردی که شب ها به دلیل چگالی بیشتر از شیب کوه به پایین سرازیر می شود و جریان هوای گرمی که روزها به دلیل چگالی کمتر به بالا صعود می کند اشاره دارد. جریان اول با نام باد کوه - دشت^۶ و یا جریان زهکشی شبانه^۷ و جریان دوم با نام باد دشت - کوه^۸ شناخته می شود [۱۲]. پیشگامان مطالعه بر روی جریان های شیب، دانشمندان آلمانی و استرالیایی از جمله واگنر (۱۹۳۸) بوده اند [۱۳]. بررسی مجدد آن توسط دفنت (۱۹۴۹) [۱۴] و پس از آن نیز بررسی های زیادی توسط وایتمن (به عنوان مثال؛ [۱۵])، مانینز و سافورد [۱۶ و ۱۷] و همچنین اخیرا توسط رامپانلی و همکاران (۲۰۰۴) صورت گرفته است [۱۸]. در این زمینه تحقیقات گسترده ای نیز در قالب برنامه مطالعات جوی در مناطق با توپوگرافی پیچیده (ASCOT)^۹ انجام گرفته که کارهای دیکرسون و گادیکسون (۱۹۸۰ و ۱۹۸۱) [۱۹ و ۲۰] و یا شبیه سازی عددی سه بعدی بامادا (۱۹۸۱) [۲۱] بر روی باد

५. Slope flow1

5. Valley wind

٩. Katabatic wind

V. Nocturnal drainage flow

Λ. Anabatic wind

9. Atmospheric Studies in Complex Terrain

1. Weather Research and Forecasting

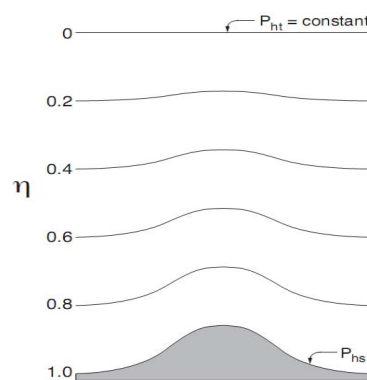
2. Urban circulation

۳. squall lines

بین دو منطقه، عامل ایجاد جریان هوا است. در اینجا نیز گرادیان دمای بین شهر و نواحی اطراف آن باعث شکل گیری این جریان است. در مناطق شهری گرمایش ناشی از فعالیت های انسانی، آسفالت، ساختمان ها و تغییر پوشش گیاهی می توانند بودجه گرمایش شهری را به سمت افزایش شار گرما (نسبت به مناطق اطراف آنها) در این مناطق سوق دهند. این سیستم گردش و دیگر جریان های حاکم بر محیط های شهری تأثیر قابل ملاحظه ای بر انتقال یا ماندگاری آلاینده ها دارند که به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر سلامت شهرنشینان تأثیر می گذارد.

در مجموع مطالعات گسترده ای بر جنبه های هواشناختی مناطق شهری از جمله باد، دما و رطوبت متمرکز شده است. به عنوان مثال می توان به کارهای لوز و بورنشتاین (۱۹۷۷) در زمینه تأثیر شهر نیویورک بر جریان های همدیدی اشاره کرد [۲۴]. مطالعات دیگری بیانگر این مطلب هستند که در جریان های آرام همچون نسیم دریا، جریان در نیمه پشت به باد کوه همگرا می شود. از دیدگاه آلودگی این امر به منزله افزایش غلظت آلاینده ها در منطقه می باشد [۱ و ۲]. شرفلر (۱۹۸۲) روی تغییر پذیری باد در شهر سنت لوئیس و اثر آن بر پیش بینی آلودگی کوتاه مدت بحث می کند [۲۵]. از دیگر مطالعات در این زمینه می توان به وکویچ و همکاران (۱۹۷۶)، بورنشتاین و لین (۲۰۰۰)، اکه (۱۹۷۳) و کیم دریم (۱۹۸۰) اشاره کرد [۳، ۲۶، ۲۷ و ۲۸]. شولتز و وارنر (۱۹۸۲) با یک مدل عددی دو بعدی به منظور بررسی اهمیت نسیم دریا - خشکی، باد کوه - دره و گردش های شهری بر روی لوس آنجلس به این نتیجه می رسند که در این میان نقش گردش های شهری ناچیز است [۲۹]. گودین و همکاران (۱۹۸۰) و مکرائه و سین فلد (۱۹۸۳) نیز با استفاده از مدل های عددی روی شهر لوس آنجلس نقش این جریان ها را در آلودگی این شهر بررسی کرده اند [۳۰ و ۳۱]. ریبل و همکاران (۱۹۸۳) نشان می دهند که رفتار پلوم ها را نمی توان تنها با استفاده از باد سطحی پیش بینی کرد بلکه برای این منظور نیاز به داشتن الگوی برش باد با ارتفاع نیز می باشد [۳۲].

در ایران نیز با انجام مطالعات محدودی به صورت نقطه ای و موردی تلاش شده است با توجه به الگوی دیدبانی ایستگاه



شکل ۲. مختصه قائم η در مدل WRF.

کوه - دشت در حضور گرادیان های شدید دما شاخص تر از دیگران است.

دسته دوم بادهای کوه - دره یعنی بادهای دره در واقع یک گردش جریان در دره است که از گرادیان فشار افقی شکل گرفته در کف دره به واسطه وارد شدن جریان های شیب به دره ایجاد می شوند. برای آشکارسازی باد دره به آشکارسازی جریان شیب و گرادیان دمای افقی کف دره نیاز است و ترکیب این دو کاملاً سه بعدی است. بنابراین تنها از طریق شبیه سازی عددی سه بعدی می توان این جریان را به خوبی آشکارسازی کرد (برای مثال [۲۲]). از آنجا که جریان های شیب نیازمند وجود گرادیان دمایی در امتداد شیب کوه هستند و معمولاً این گرادیان دمایی به مراتب شدیدتر از گرادیان دمای کف دره است و بنابراین این جریان زودتر از جریان دوم یعنی باد دره شکل می گیرد (شکل ۱).

بررسی های انجام گرفته در مناطق کوهستانی نشان می دهد که ناپیوستگی ایجاد شده در لایه مرزی در نتیجه حضور کوهستان و جریان های میان مقیاس منتج از آن، می تواند تا حد زیادی انتقال ماده و انرژی در لایه مرزی و از این لایه به جو آزاد را افزایش دهد [۵ و ۲۳]. این واقعیت گواهی بر تأثیر این جریان های میان مقیاس بر مقیاس های بزرگتر و لزوم آشکارسازی دقیق آنها توسط مدل های عددی است.

این پدیده تا حدودی شبیه نسیم دریا - خشکی و کوه - دره است چرا که در تمامی این جریان ها تفاوت گرمایش سطحی

مدل در حالت‌های مختلف با و بدون شهر و کم و زیاد کردن آثار شهر به ترتیب زیر اجرا شده و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته است:

الف) اجرای مدل با حضور پوشش (کاربری زمین^۱) شهری تهران به شکل پیش فرض در مدل WRF (اجرای مرجع یا اجرای شهری)،

ب) اجرای بدون حضور پوشش شهری به منظور مشاهده اثر توپوگرافی (اجرای بدون شهر)،

ج) اجرای مدل با زبری اصلاح شده (استفاده از توپوگرافی و کاربری اراضی واقعی‌تر در مدل) و وارد کردن سه کلاس شهری با زبریهای متفاوت با لحاظ کردن تراکم ساختمانی و جمعیتی (اجرای ۳ کلاسه).

مدل WRF یک مدل غیرهیدروستاتیک است که شبکه‌بندی افقی آن شبکه C-آراکاوا^۲ است. در این مدل از طرحواره‌های انتگرال‌گیری مرتبه دوم و سوم زمانی رانگ-کوتا^۳ و طرحواره‌های مرتبه دو تا شش برای فرارفت در دو راستای افقی و قائم استفاده می‌شود. هسته اصلی مدل بر پایه حل کننده اویلری برای یک جو کاملاً تراکم‌پذیر طراحی شده است. معادلات در قالب فرم شاری و تحت فلسفه اوایما (۱۹۹۰) نگارش شده‌اند. در این معادلات از یک مختصه قائم هیدروستاتیکی یا η (معادله ۱) بر مبنای عوارض زمین استفاده شده است (برای اطلاعات بیشتر به مرجع [۱۰] مراجعه شود).

$$\eta = \frac{P_h - P_{ht}}{P_{hs} - P_{ht}} \quad (1)$$

در این معادله مولفه هیدروستاتیک فشار، P_{ht} و P_{hs} ، به ترتیب مقادیر مربوط به فشار در مرزهای پایین و بالا می‌باشد.

منطقه هدف، ناحیه شهری تهران و بخشی از حومه در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه تفکیک داده‌های ایده‌آل مرزی و آغازگری ۵/۰ درجه جغرافیایی می‌باشد و به منظور انجام شبیه‌سازی دقیق‌تر و به نوعی حذف هر چه بیشتر آثار جریان‌های

ژئوفیزیک دانشگاه تهران و بعضاً ایستگاه مهرآباد، شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی در حالت ایده‌آل (به عنوان مثال؛ [۳۳]) و یا تحلیل‌های نظری [۳۴] به بررسی ساختار بادهای محلی (به عنوان مثال؛ [۳۵ و ۳۶]) و ساختار قائم آن (به عنوان مثال؛ [۳۷]) روی این ایستگاه‌ها پردازند. رنجبر و همکاران (۱۳۸۴) با مطالعه جزیره گرمایی شهر تهران به صورت موردی، وقوع انحراف‌های پادساعتگردی باد به هنگام ورود به منطقه شهری، وجود گردش‌های چرخندی تا ارتفاع بیش از ۴۰۰ متر و سرعت‌های قائم مثبت در ساعات روز در مرکز و شرق شهر را روی تهران مشاهده می‌کند [۳۸]. جایکا در سال ۱۹۹۷ نیز با هدف استخراج طرح جامع کنترل کیفیت هوا در تهران و با انجام ۱۴ روز دیدبانی در دو دوره در فصول پاییز و زمستان در ایستگاه اقدسیه تلاش کرد ویژگی‌های جریان و آلودگی هوای شهر تهران را به دست آورد [۴]. ملکوتی (۲۰۱۰) در پژوهشی به منظور شبیه‌سازی الگوی آلودگی تهران بیان می‌کند که مدل‌های سطح مبتنی بر نیروی پسا موفقت‌تر از مدل‌های بر پایه زبری در شبیه‌سازی‌های آلودگی هوا عمل می‌کنند [۳۹].

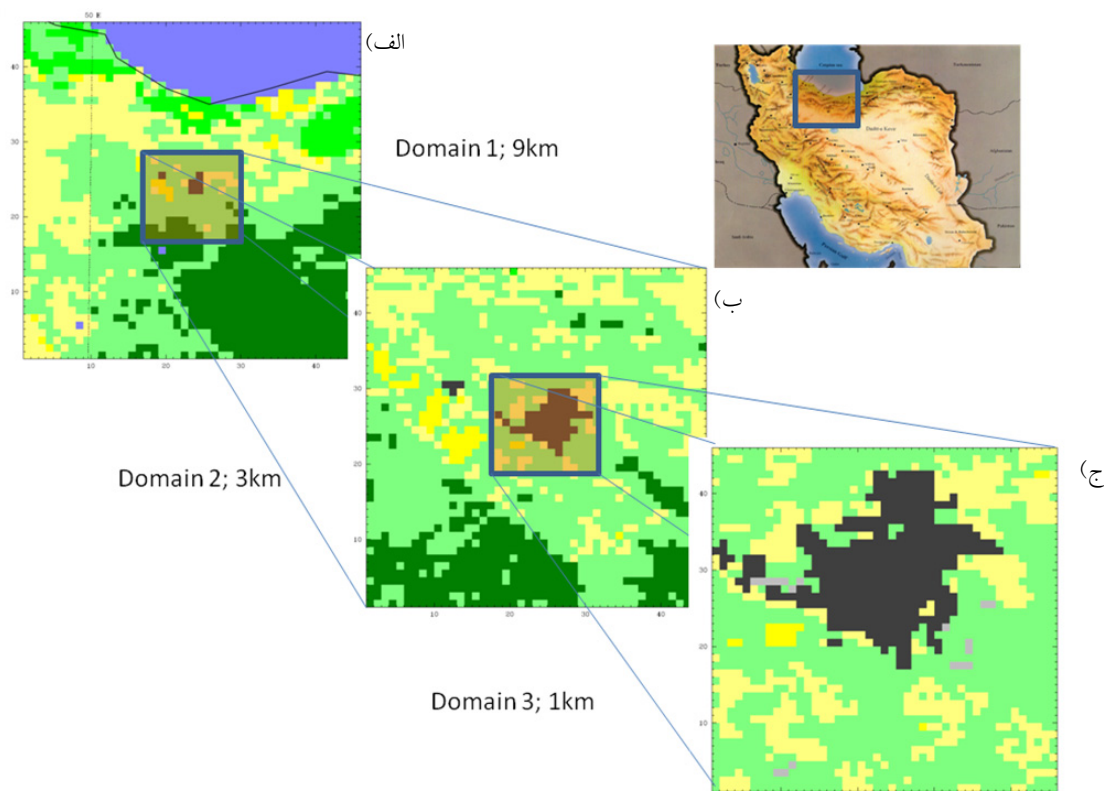
شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله با هدف یافتن پاسخ سوال‌هایی می‌باشد که با مطالعات نظری، داده‌های مشاهداتی و یا حتی شبیه‌سازی‌های معمول، قادر به پاسخگویی به آنها نیستیم. از جمله این سوال‌ها می‌توان به این مورد اشاره کرد؛ شبیه‌سازی‌های عددی میان مقیاس جریان‌های گرما واداشتی تهران که دارای توپوگرافی پیچیده است، تا چه حد با مطالعات نظری همخوانی دارد؟ نقش این جریان‌ها در مولفه کلی باد به چه میزان است؟ نقش جریان‌های شهری تهران در کنار نقش جریان‌های ناشی از اثر رشته کوه شمالی به چه شکل است؟ چه عواملی در کنار شهرنشینی باعث تغییر سرعت باد در مناطق شهری می‌شود؟

توجه نگارندگان بیش از هر پدیده میان مقیاس دیگری به جریان‌های گرما واداشتی همچون جریان‌های ناشی از اثر توپوگرافی و جریان‌های شهری بوده است. به همین منظور،

۱. Landuse

۲. Arakawa C-grid33 Arakawa C-grid

۳. Runge-Kutta



شکل ۳. کاربری زمین در حوزه‌های تو در تو با تفکیک‌های افقی (الف) ۹، (ب) ۳ و (ج) ۱ کیلومتری. مناطق تیره رنگ در (ج) نمایانگر مناطق شهری در مدل می‌باشند (توضیحات بیشتر در متن).

در این مرز از شرایط مرزی جذب امواج گرانی به شیوه پخش استفاده شده است. در دو اجرای اول داده‌های زمین به کار رفته و توپوگرافی سازمان نقشه برداری ایالات متحده^۲ (USGS) با ۲۴ کلاس شامل یک کلاس شهری با تفکیک افقی ۳ دقیقه و نسخه دوم داده‌های تعیین پوشش سطح خشکی‌های جهانی^۳ (GLCC) با تفکیک افقی ۳ دقیقه برای تعیین پوشش گیاهی و نوع خاک به کار برده شده است.

در اجرای سوم با تغییر کلاس‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ کاربری اراضی USGS به سه کلاس شهری مجزا با زبری‌های متفاوت، سعی شد تا حدی تأثیر واقعی‌تر زبری در برون‌دادهای مدل بررسی شود. طول زبری در این آزمایش برای سه کلاس جمعیتی - ساختمانی با تراکم کم، متوسط و کاملاً متراکم به ترتیب ۸۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. نتایج کاربری اراضی حاصل از پیاده سازی

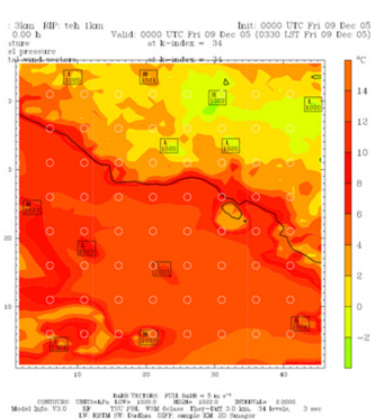
بزرگ‌مقیاس‌تر از سه لانه‌سازی با تفکیک‌های افقی ۹، ۳ و ۱ کیلومتری و تفکیک قائم ۳۵ ترازوی استفاده شده است.

در شکل ۳ می‌توان حدود حوزه‌ها و کاربری زمین به کار رفته در مدل را مشاهده کرد. شرایط آغازگری برای ساعت UTC^۱ ۰۰۰۰ تهیه شده و کل دامنه دارای یک نمایه قائم دما، فشار، رطوبت و ... است که نمایانگر متوسط نمایه‌های قائم ایستگاه جو بالایی فرودگاه مهرآباد در روزهای زمستانی پایدار می‌باشد (شکل ۴). برای تمامی این اجراها شرایط تابشی ماه دسامبر لحاظ شده است. شرایط مرزی به صورت تکراری هر ۲۴ ساعت (راس ساعت UTC ۰۰۰۰) یک بار به بزرگترین دامنه (دامنه با تفکیک ۹ کیلومتر) اعمال می‌شود. برای تعیین شرایط مرزی روش واهلش نمایی به کار برده شده است. به منظور پوشش دادن حداکثر جرم جو در روابط، تراز مرز فوقانی کاملاً مرتفع و در سطح فشاری ۱۰ هکتوپاسکالی لحاظ شده و

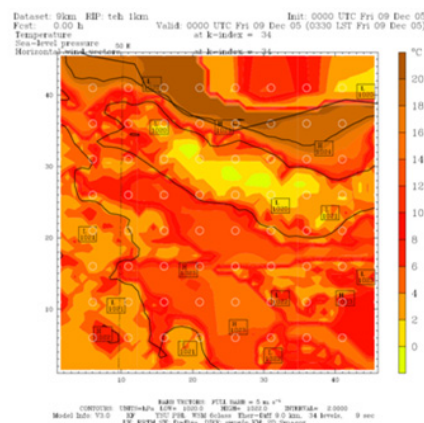
۲. United States Geological Survey

۳. Global Land Cover Characterization

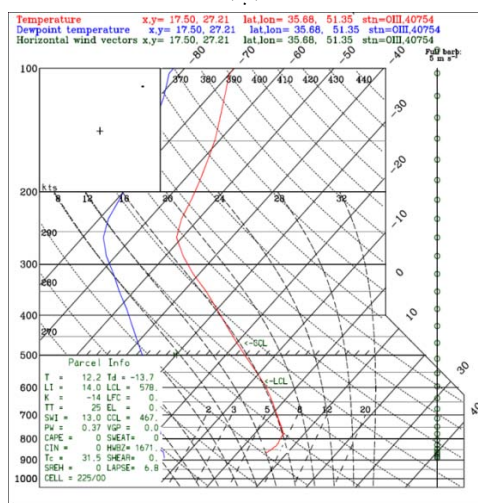
۱. Coordinated Universal Time



Domin 2; 3km
(ب)



Domin 1; 9km
(الف)



Domin 3; 1km

(د)

(ج)

شکل ۴. شرایط آغازگری مدل بدون حضور جریان‌های بزرگ مقیاس در حوزه‌های با تفکیک‌های افقی (الف) ۹، (ب) ۳ و (ج) ۱ کیلومتری. در این شکل‌ها دمای تراز ۲ متری (حاشورهای رنگی) و بردار باد ۱۰ متری نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است در اولین گام آغازگری، سرعت باد در تراز ۱۰ متری و البته سایر ترازها (شکل د) صفر است. (د) نمایه قائم میانگین دما (قرمز) و دمای نقطه شبنم (آبی) روزهای پایدار زمستانی ایستگاه جو بالای فرودگاه مهرآباد در غیاب جریان‌های بزرگ مقیاس (توضیحات بیشتر در متن).

برای تابش با طول موج بلند و کوتاه، طرحواره پخش گرمایی برای سطح و همچنین از طرحواره YSU^۴ برای لایه مرزی استفاده شده است. تمامی اجراها برای ۴۸ ساعت انجام شده ولی نتایج ۲۴ ساعت دوم برای آخرین حوزه با تفکیک افقی ۱ کیلومتر مورد تحلیل قرار گرفته است. روز اول به عنوان اسپین‌بالا^۵ لحاظ شده است.

روش‌های GIS بر روی نقشه تراکم شهری شهرهای تهران و کرج با درجه تفکیک ۱/۲۰۰۰ سال ۲۰۰۵ سازمان نقشه برداری ایران می‌باشد (شکل ۵). در این اجرا به منظور اصلاح توپوگرافی پیش‌فرض مدل از داده‌های شبکه‌ای شده توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری نیروهای مسلح با تفکیک ۳ ثانیه استفاده شده است. در کلیه اجراها از طرحواره‌های^۱ یکسان استفاده شده است. در این اجراها از طرحواره‌های RRTM^۲ و داده‌ها^۳ به ترتیب

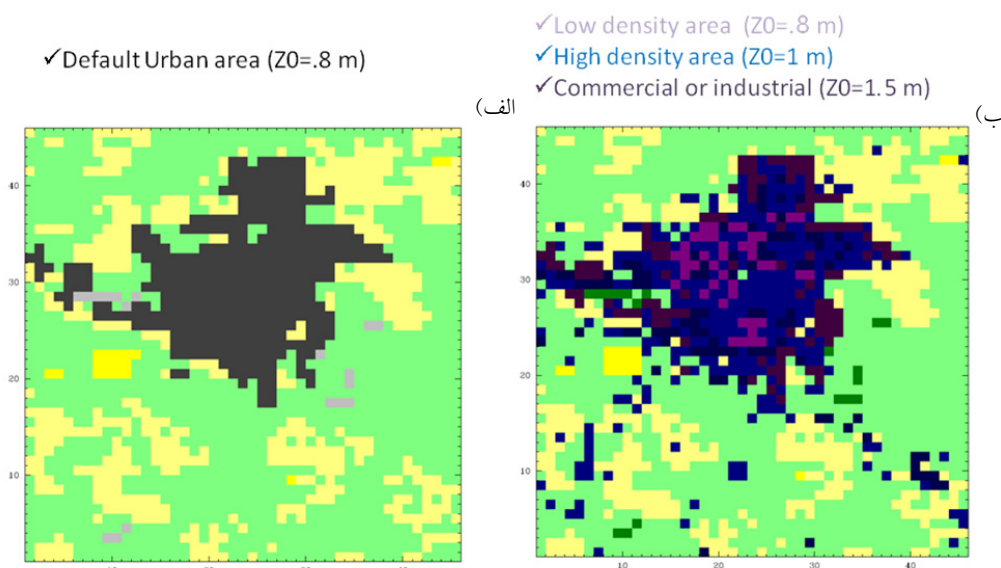
۴. Yonsei University Scheme

۵. Spin up

۱. Schemes

۲. Rapid Radiative Transfer Model

۳. Dudhia Scheme



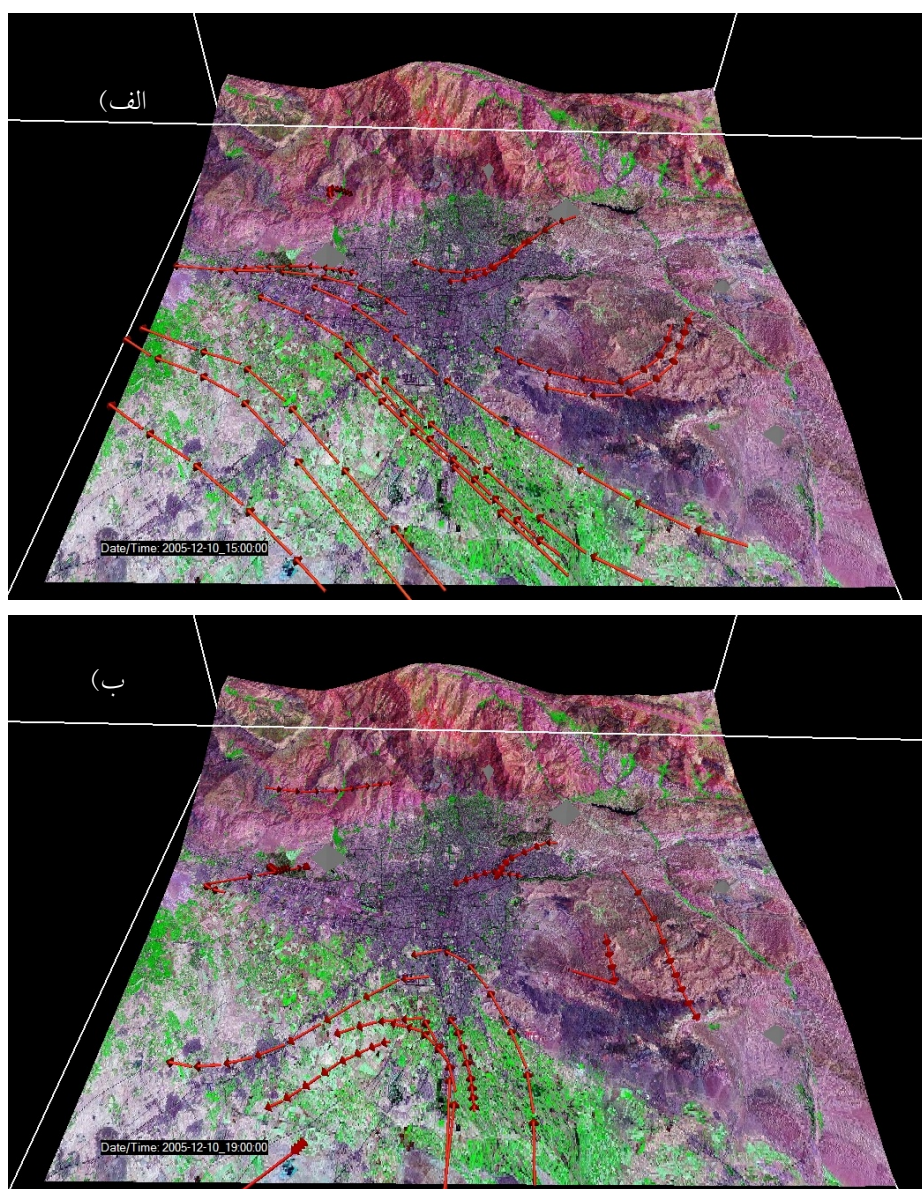
شکل ۵. تفاوت کاربری زمین در (الف) اجرای مرجع با یک کلاس شهری و (ب) اجرای سه کلاس برای حوزه شماره ۳ با تفکیک افقی ۱ کیلومتر. طول زبری در آزمایش ۳ کلاس برای سه گروه جمعیتی - ساختمانی با تراکم کم، متوسط و کاملاً متراکم (صنعتی) به ترتیب ۸۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های ترمودینامیکی در این سه کلاس یکسان در نظر گرفته شده است.

غربی‌تر می‌شوند. این روند تا ساعت ۰۲۳۰ ادامه می‌یابد ولی پس از آن جریان‌های شمال غربی روند شمالی‌تر و شرقی‌تر به خود می‌گیرند. از ساعت ۰۶۰۰ جریان‌های نیمه شمالی تهران در عین تضعیف شدن، جهت‌گیری کاملاً شرقی به خود می‌گیرند حال آنکه جهت جریان‌های نیمه جنوبی همچنان شمال غربی است. نکته قابل توجه اینکه چرخش جریان‌های جنوبی تهران پادساعتگرد و جریان‌های روی تهران و نیمه شمالی ساعتگرد است که این مسئله می‌تواند ناشی از تقابل اثر گرما و اداشته ارتفاعات محلی و ارتفاعات دوردست‌تر باشد. از ساعت ۰۷۰۰ جریان‌های نیمه شمالی، جنوبی است و با تاخیر نیم ساعته جریان‌های نیمه جنوبی نیز جنوبی می‌شوند. پس از آن رفته رفته جریان‌ها قوی‌تر می‌گردد. در ادامه ساعت‌ها جهت چرخش جریان‌ها در کل منطقه پادساعتگرد است. از ساعت ۱۵۰۰ جریان‌های نیمه شمالی جهت‌گیری شمالی می‌گیرند و به عبارت دیگر در این ناحیه گذار دوم یا گذار عصرگاهی رخ می‌دهد ولی همچنان جریان‌های نیمه جنوبی، جنوبی و جنوب شرقی است. جریان‌ها از ساعت ۱۸۰۰ در نیمه شمالی تضعیف می‌شود و در ساعت ۱۹۰۰ در نیمه جنوبی نیز گذار رخ می‌دهد (شکل‌های ۶ الف و ب).

(WRF)

در این اجرا بیشتر تمرکز بر زمان و نحوه تغییر جهت جریان بوده است. زمان تغییر جریان یا به عبارت دیگر ساعت گذار از دیدگاه مطالعات آلودگی هوا دارای اهمیت بسیاری است چرا که بهترین زمان برای انباشت آلاینده‌ها می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که جریان‌های نیمه شمالی شهر کاملاً متأثر از ارتفاعات مجاور آن منطقه می‌باشد، به نحوی که در ساعت‌های اولیه بامداد در شمال غربی شهر جریان‌های پایین‌سوی شمال غربی و در شمال شرقی جریان‌های پایین‌سوی شمال شرقی حاکم است. با توجه به اینکه در این زمان جریان‌های نیمه جنوبی از این الگو تبعیت نمی‌کنند، یک منطقه همگرایی در مناطق جنوبی و مرکزی تهران در این ساعات شکل می‌گیرد.

در جنوب تهران در ساعت‌های اولیه بامداد جریان‌ها شمال غربی هستند که این امر ناشی از تأثیر ارتفاعات دوردست‌تر و به عبارت دیگر شکل توپوگرافی کلی منطقه است. با گذشت زمان جریان‌های شمال شرقی، شرقی‌تر و جریان‌های شمال غربی،

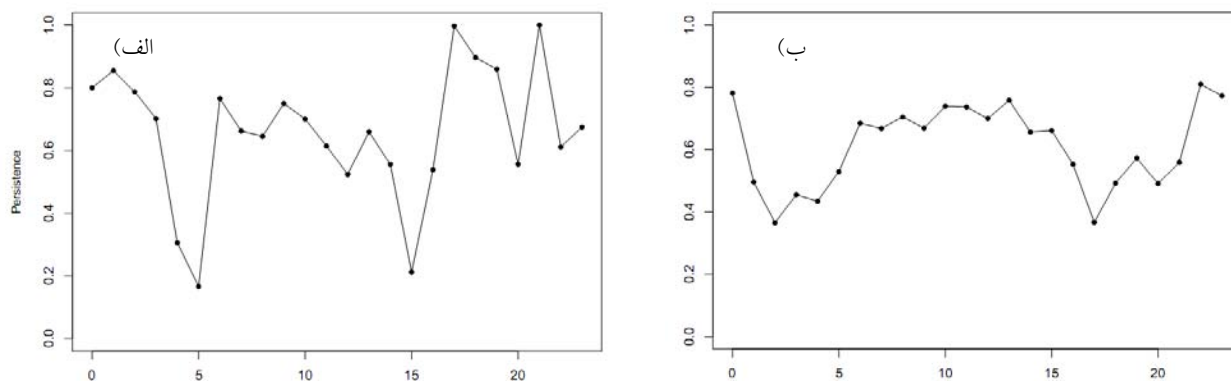


شکل ۶. بردارهای گردش جریان تراز ۱۰ متری برای ساعت‌های (الف) ۱۵۰۰، آغاز گذار عصرگاهی در نیمه شمالی تهران و (ب) ۱۹۰۰، همزمان با آغاز گذار عصرگاهی در نیمه جنوبی شهر.

با توجه به اهمیت پیش‌بینی ساعات گذار در برآورد ماندگاری آلاینده‌ها در مناطق مختلف شهر، مقایسه‌ای بین مقادیر مشاهداتی و برون‌داد شبیه‌سازی ۳ کلاسه از این کمیت ارائه شده است. شکل ۷ نشان دهنده نمودار ماندگاری^۱ یا ایستایی جریان زمستانی ایستگاه‌های اقدسیه (عرض جغرافیایی ۳۵° ۴۷' و طول ۵۱° ۲۹') و فرودگاه مهرآباد (عرض جغرافیایی ۳۵° ۴۱' و طول ۵۱° ۱۹') است. این نمودار نسبت جمع برداری جریان به جمع سرعت آن در ارتفاع ۱۰ متری سطح است. حاصل این کسر، زمانی ۱ می‌شود که جهت باد در یک نقطه و در طول مدت متوسط‌گیری کاملاً ثابت بماند. لذا مقادیر کم نمودار، بیانگر ساعات تغییر جهت جریان یا ساعات گذار جریان است. همان‌گونه که در شکل نیز مشخص است گذار صبحگاهی اقدسیه بین ساعت‌های ۴ الی ۵ رخ می‌دهد. این گذار در ایستگاه مهرآباد به‌صورت تقریباً مشابه بین ساعت‌های

با توجه به اهمیت پیش‌بینی ساعات گذار در برآورد ماندگاری آلاینده‌ها در مناطق مختلف شهر، مقایسه‌ای بین مقادیر مشاهداتی و برون‌داد شبیه‌سازی ۳ کلاسه از این کمیت ارائه شده است. شکل ۷ نشان دهنده نمودار ماندگاری^۱ یا ایستایی جریان زمستانی ایستگاه‌های اقدسیه (عرض جغرافیایی ۳۵° ۴۷' و طول ۵۱° ۲۹') و فرودگاه مهرآباد (عرض جغرافیایی ۳۵° ۴۱' و طول ۵۱° ۱۹')

۱. Wind persistence



شکل ۷. نمودار ماندگاری جریان باد اندازه گیری شده برای ایستگاه‌های الف) اقدسیه واقع در شمال شرق تهران و ب) فرودگاه مهرآباد برای فصل زمستان به وقت محلی (توضیحات بیشتر در متن).

حساسیت این جریان به میزان شیب منطقه و جنس سطح در تعیین میزان سرمایش بی دررو، تمامی مناطق دارای زمان پاسخ یکسانی نخواهند بود. مناطق مرتفع‌تر با شیب بیشتر بسیار زودتر از مناطق پایین‌دست انرژی خود را از دست می‌دهد و از سوی دیگر این ماهیت جریان در این مناطق کمی متفاوت‌تر از مناطق جنوبی با شیب کمتر است. چرا که در این مناطق علاوه بر جریان‌های شیب ناشی از گرادیان فشار افقی، جریان‌های کوه - دشت نیز که از جنس جریان‌های چگالی هستند رخ می‌دهد، لذا جریان‌های پایین‌سو در این مناطق زودتر آغاز می‌شود [۴۰]. شاید به همین دلیل بتوان ماندگاری بیشتر جریان‌های شمالی (پایین‌سو) ایستگاه‌های شمال شهر مانند اقدسیه را توجیه کرد (شکل ۷ الف).

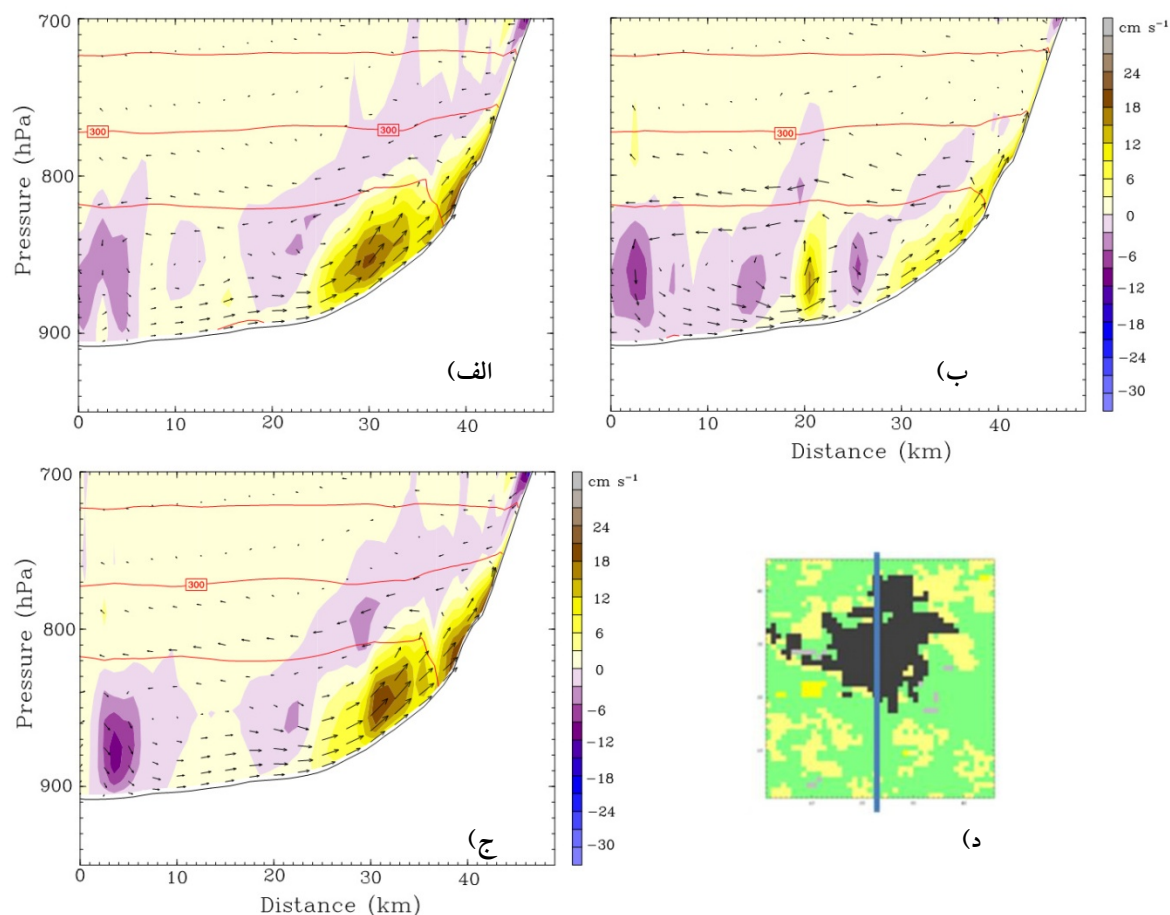
در گام بعد به منظور دیدن اثر منطقه شهری در پیش فرض مدل WRF و همچنین با هدف مشاهده اثر مجزای توپوگرافی، کلاس شهر به کلی حذف شد تا اثر این نوع از کاربری زمین در مدل دیده شود.

()

حذف عارضه شهری در اجراهای ایده‌آل و در مناطق بیابانی و یا نیمه بیابانی بیشتر به شکل حذف یا کاهش زبری در نتایج مدل نمایان می‌شود. علاوه بر آن انتظار می‌رود در این‌گونه شبیه‌سازی‌ها، تفاوت سپیدی، ظرفیت گرمایی و رطوبت موجود

۳ الی ۵ رخ می‌دهد ولی اختلاف عمده در گذار عصرگاهی است. همان‌گونه که مشخص است این گذار در اقدسیه حوالی ساعت ۱۵ به وقوع می‌پیوندد حال آنکه این پدیده در مهرآباد ۱ تا ۲ ساعت با تأخیر بین ساعت ۱۷ الی ۱۸ رخ می‌دهد. به عبارت دیگر همان‌گونه که مدل نیز نشان می‌دهد به‌طور عمده گذار صبحگاهی با اختلاف نیم تا یک ساعت در کل شهر به وقوع می‌پیوندد حال آنکه در گذار عصرگاهی این اختلاف زمان بین شمال و جنوب شهر به ۲ الی ۳ ساعت نیز می‌رسد. وقوع این امر یعنی ماندگاری بیشتر جریان‌های جنوبی در جنوب شهر به علت این اختلاف ساعات گذار عصرگاهی پتانسیل افزایش آلودگی را تا حد قابل توجهی در این ساعات بالا می‌برد که این امر از دیدگاه مدیریت شهری بسیار حائز اهمیت است.

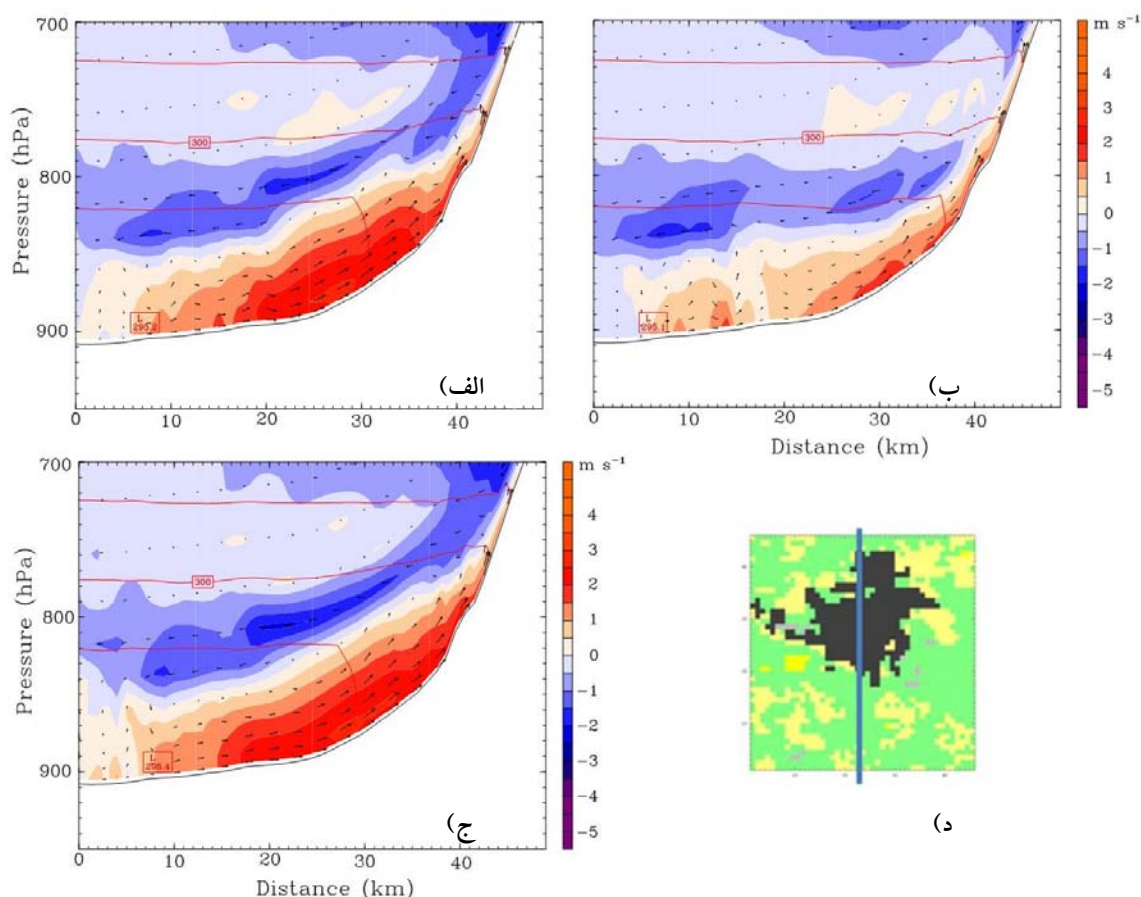
دلیل این تفاوت ساعات گذار صبح و عصر را شاید بتوان در ماهیت جریان‌های جنوبی و شمالی یا به عبارت دیگر جریان‌های پایین‌سوی شبانه و بالاسوی روز جستجو کرد. همان‌گونه که پیش از این نیز به آن اشاره شد، شکل‌گیری جریان‌های بالاسو نیازمند دریافت تابش خورشیدی مناسب در طول روز و ایجاد گرادیان مناسب در طول دامنه رشته کوه است. وقوع این عامل با توجه به زمان دریافت انرژی در مناطق مختلف دامنه البرز و تهران با تأخیر چندانی در بالای شهر و پایین آن همراه نیست، چرا که تمام مناطق با اختلاف زمانی کم شروع به دریافت انرژی خورشیدی می‌کنند. وقوع جریان مخالف یعنی جریان پایین‌سو روندی متفاوت دارد. با توجه به



شکل ۸. برش‌های قائم مولفه w (مولفه قائم باد) جریان گذرنده از ایستگاه مهرآباد (مطابق شکل (د) برش در طول جغرافیایی $51/320$) برای ساعت $16:10$ محلی و برای اجراهای الف) مرجع، ب) بدون شهر و ج) 33 کلاسه. تفاوت جریان قائم باد در دو اجرای مرجع و 3 کلاسه بسیار کم است ولی در اجرای بدون شهر، به شدت کاهش یافته است. محور قائم و افقی به ترتیب نمایشگر ارتفاع فشاری و فاصله و بردارها، بردارهای گردش جریان می‌باشند. مقادیر سرعت قائم به صورت حاشورهای رنگی نمایش داده شده است و شاخص مربوطه در کنار شکل‌ها آورده شده است.

ارائه نشده است). البته به نظر می‌رسد اثر سپیدی تا حدی نقش خود را در مدل نشان می‌دهد چرا که با حذف شهر تا حدی ضخامت جریان در روز کاهش می‌یابد (شکل‌های ۹ الف و ب). البته این اثر تا حد قابل ملاحظه‌ای نیز می‌تواند ناشی از تغییر میزان زبری در این منطقه باشد. در هر صورت تفاوت ناچیزتر ضخامت جریان سطحی در دو اجرای مرجع و بدون شهر، در شب نسبت به روز با در نظر داشتن تفاوت چگالی جریان، نشان دهنده نقش سپیدی در این اجراها و در منطقه شهری است. در مطالعه مشاهداتی دیگری روی شهر تهران [۴۱] نشان داده شده است که در ۵ دهه گذشته میانگین ماهانه سرعت باد در ساعات شب با توسعه بیشتر شهر، روند کاهشی

در مناطق شهری و غیر آن تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج داشته باشد. با حذف شهر، تلاطم در مسیر جریان و در دامنه کوه کاهش می‌یابد که این امر را می‌توان در برون‌داد سرعت قائم مدل در دو اجرای مرجع و بدون شهر (شکل‌های ۸ الف و ب) مشاهده کرد. از سوی دیگر این کاهش سرعت قائم در اجرای بدون شهر می‌تواند باعث کاهش ضخامت جریان نسبت به اجرای شهری شود (شکل‌های ۹ الف و ب). نتایج اجرای مدل در این حالت نشان می‌دهد که تفاوت ظرفیت گرمایی محیط شهری و اطراف آن تأثیر مشهودی بر جریان‌های میان مقیاس محلی نگذاشته است چرا که شب‌هنگام تفاوت قابل ملاحظه در دمای تراز 2 متری شهر و مناطق مجاور آن وجود ندارد (شکل‌ها



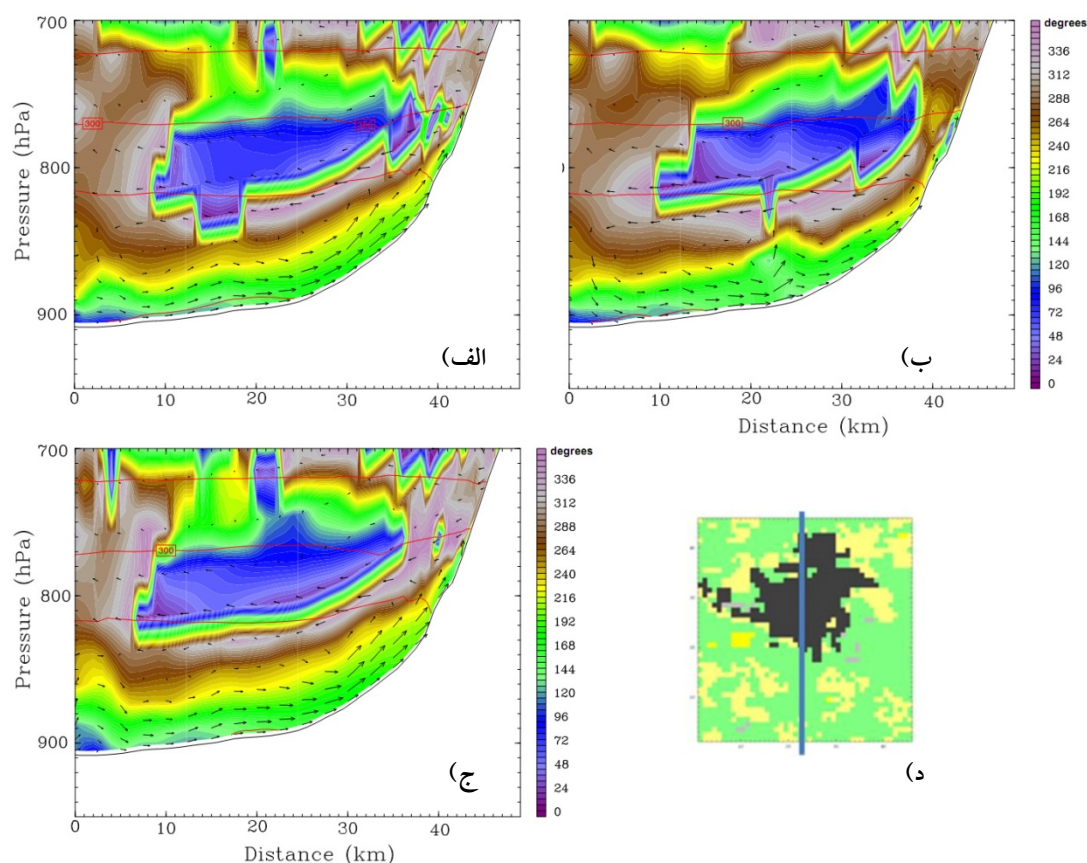
شکل ۹. برش‌های قائم مؤلفه ۷ (مؤلفه نصف‌النهاری باد) جریان گذرنده از ایستگاه مهرآباد (مطابق شکل (د) برش در طول جغرافیایی ۵۱/۳۲۵) برای ساعت ۱۴:۳۰ محلی و برای اجراهای الف) مرجع، ب) بدون شهر و ج) ۳ کلاسه. تفاوت جریان نصف‌النهاری در دو اجرای مرجع و ۳ کلاسه بسیار کم است ولی در اجرای بدون شهر، ضخامت جریان‌های بالاسو به شدت کاهش یافته است. محور قائم و افقی به ترتیب نمایشگر ارتفاع فشاری و فاصله و بردارها، بردارهای گردش جریان می‌باشند. مقادیر سرعت مؤلفه ۷ به صورت حاشورهای رنگی نمایش داده شده است و شاخص مربوطه در کنار شکل‌ها آورده شده است. حاشور قرمز رنگ مشخصه جریان‌های بالاسو و رنگ آبی نشان‌دهنده جریان‌های پایین‌سو هستند.

ضخامت جریان تا حدی بیشتر می‌شود که این اثر می‌تواند ناشی از نقش زبری در انتقال قائم تکانه باشد (شکل‌های ۸ و ۹ الف و ج). در این اجرا می‌توان مناطق همگرایی و واگرایی بیشتری به صورت پراکنده بر روی تهران مشاهده کرد که در اثر تفاوت کلاس‌های زبری در این منطقه ایجاد می‌شود.

به نظر می‌رسد که در اجراهای مرجع و ۳ کلاسه (اجراهای با حضور ویژگی‌های شهری در مدل)، ویژگی‌های دینامیکی و ترمودینامیکی موجود در منطقه شهری نقش قابل ملاحظه‌ای در انتقال آلاینده‌های ایجاد شده توسط وسایل حمل و نقل موتوری و کارخانه‌ها در ساعات روز به جو آزاد و در نتیجه ماندگاری بیشتر آنها دارد. مطالعات پیشین در مناطق کوهستانی نشان

قابل ملاحظه‌ای داشته است حال آنکه در روز این تغییرات کمتر است. به منظور بررسی بیشتر اثر زبری در مناطق شهری و بررسی میزان تأثیر آن بر کاهش جریان‌های شبانه، شبیه‌سازی با زبری اصلاح شده انجام شده است.

برونداد مدل نشان می‌دهد که هرچند اضافه کردن زبری نسبت به اجرای مرجع، تأثیر زیادی بر تغییر سرعت جریان‌ها نداشته ولی با این تغییر در کنار کاهش جریان در نزدیک سطح،



شکل ۱۰. برش‌های قائم جهت جریان گذرنده از ایستگاه مهرآباد (مطابق شکل (د) برش در طول جغرافیایی ۵۱/۳۲۵) برای ساعت ۱۶:۳۰ محلی و برای اجراهای (الف) مرجع، (ب) بدون شهر و (ج) ۳ کلاسه. همانند شکل‌های ۶ و ۷ تفاوت جهت جریان در دو اجرای مرجع و ۳ کلاسه بسیار کم است ولی در اجرای بدون شهر، ضخامت جریان‌های بالاسو به شدت کاهش یافته است. از سوی دیگر همان‌گونه که از بردارهای گردش جریان مشخص است، نفوذ جریان به ترازهای بالاتر در اجراهای مرجع و ۳ کلاسه بیشتر از اجرای بدون شهر است. محور قائم و افقی به ترتیب نمایشگر ارتفاع فشاری و فاصله و بردارها، بردارهای گردش جریان می‌باشند. مقادیر جهت جریان به صورت حاشورهای رنگی نمایش داده شده است و شاخص مربوطه در کنار شکل‌ها آورده شده است (توضیحات بیشتر در متن).

آلاینده‌های جوی هستند افزایش می‌یابد. هر چند که در نزدیکی سطح سرعت جریان به دلیل افزایش زبری تا حدی کاهش می‌یابد ولی با صعود جریان به ترازهای بالاتر، جریان با مقاومت کمتری برخورد دارد، لذا بر روی شیب ارتفاعات شمالی تا ترازهای بالاتر صعود می‌کند که در نتیجه آن می‌تواند موجب خروج آنها از لایه مرزی به جو آزاد و احتمالاً ماندگاری بیشتر این ذرات فراهم شود. با توجه به نتایج حاصل از این مقاله ضمن تایید نقش ارتفاعات در انتقال آلاینده‌ها به ترازهای فوقانی، به نظر می‌رسد که وجود مناطق شهری در مجاورت ارتفاعات می‌تواند به صورت قابل ملاحظه‌ای این مسئله را

داده‌اند که ناپیوستگی ایجاد شده در لایه مرزی در نتیجه حضور کوهستان و جریان‌های میان‌مقیاس منتج از آن، می‌تواند تا حد زیادی انتقال ماده و انرژی در لایه مرزی و از این لایه به جو آزاد را افزایش دهد. به عنوان مثال می‌توان به مطالعات گوهم و همکاران (۲۰۰۹) روی داده‌های مشاهداتی سطحی و سطوح فوقانی و انتقال آلودگی در دره‌های آلپ اشاره کرد [۵].

همان‌گونه که در شکل ۸ و ۱۰ نیز مشخص است در حضور زبری بیشتر، سپیدی کمتر (جذب انرژی بیشتر و شکل‌گیری سلول‌های همرفتی در ناحیه شهری) و افزایش انتقال تکانه از سطح به ارتفاعات، ضخامت جریان‌های بالاسو که حامل

تشدید کند (شکل ۱۰). دلیل این عامل می‌تواند اثر تلاطمی مناطق شهری باشد که در نتیجه فرایندهای دینامیکی و ترمودینامیکی مختلفی است که در مناطق شهری نسبت به مناطق مجاور آن بیشتر شکل می‌گیرد.

همان‌گونه که پیشتر توضیح داده شد، به منظور آشکارسازی بهتر جریان‌های محلی تهران که نقش کلیدی در انتقال آلاینده‌ها بازی می‌کنند، از مدل منطقه‌ای WRF و شرایط آغازین و مرزی ایده‌آل به منظور حذف شارش‌های بزرگ‌مقیاس، استفاده شده است. بروندادهای مدل نشان می‌دهند که در اغلب مواقع بروندادهای شبیه‌سازی‌های مرجع و اجرای ۳ کلاسه در مقابل اجرای بدون شهر همسانی بیشتری از خود نشان می‌دهند (شکل‌های ۸ تا ۱۰). جریان‌های پایین‌سو در ساعت‌های آغازین روز در اجرای بدون شهر نسبت به دو اجرای دیگر شدت بیشتری دارند حال آنکه در دو اجرای دیگر تفاوت مشهودی را نشان نمی‌دهند. از سوی دیگر نتایج بیانگر این مطلب است که اضافه کردن زبری تأثیر زیادی بر سرعت جریان‌های گرما واداشتی نداشته است. البته با این تغییر در کنار کاهش ناچیز

جریان در نزدیک سطح، ضخامت جریان سطحی در مناطق مختلف با توجه به میزان زبری به‌صورت جزئی تغییر می‌کند. با توجه به مطالب بیان‌شده در شبیه‌سازی‌های انجام شده مؤلفه گرمایش انسان‌زاد^۱ و دیگر پارامترهای شهری همچون اثر سایه ساختمان‌ها و ... لحاظ نشده است. به نظر می‌رسد که برای بهبود عملکرد دینامیکی و خصوصاً ترمودینامیکی مدل، استفاده از یک مدل شهری در قالب یک مدل جفت شده با مدل هواشناسی، بیش از پیش بتواند به بهبود عملکرد مدل در نمایش جریان‌های کلان‌شهرهایی همچون تهران کمک کند. به این منظور؛ نگارندگان مقاله در ادامه ضمن لحاظ کردن این عامل سعی خواهد داشت که نگاه دقیق‌تری به عمل‌کرد جریان‌های شهری در اصلاح الگوی جریان‌های محلی داشته باشد.

گروه نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت سازمان محترم هواشناسی کشور و گروه هواشناسی دینامیکی - همدیدی پژوهشکده هواشناسی و علوم جو در انجام این طرح تحقیقاتی کمال تشکر را داشته باشد.

9. R A Pielke, Sr., "Mesoscale meteorological modeling", 2nd Ed., Academic Press, San Diego, CA (2002).
10. J B Klemp, *Research-community priorities for WRF-system development* (2002). (available at <http://wrfodel.org/development/wrab/docs/RAB-plan-final.pdf>.)
11. C D Whiteman, "Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications". Oxford University Press, New York (2000).
12. B W Atkinson, "Meso-scale Atmospheric Circulations". Academic Press (1981) 495.
13. A Wagner, *Gerl. Beitr. Geophys.*, **52** (1938) 408; English translation: C D Whiteman, and E Dreiseitl, *Alpine Meteorology: Translations of Classic Contributions by A Wagner, E Ekhardt and F Defant*, PNL-5141/ASCOT-84-3, Pacific Northwest Laboratory (1984) 11.
14. F Defant, *Arch. Meteor. Geophys. Bioklim.*, **A1** (1949) 421; English translation: C D Whiteman, and

1. R Bornstein, and W T Thompson, *J. Appl. Meteor.*, **20** (1981) 843-858.
2. R Bornstein, *American Meteor. Soc.*, (1987) 53.
3. R Bornstein, and Q Lin, *Atmos. Environ.*, **34** (2000) 507.
4. Japan International Co-operation Agency, *The study on an integrated Master plan for Air Pollution Control in the Greater Tehran Area*, final report (1997).
5. A Gohm, F Harnsich, J Vergeiner, F Obleitner, R Schnitzhofer, A Hansel, A Fix, B Neininger, S Emeis, K Schäfer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **131** (2009) 441.
6. D Kim, and W R Stockwell, *Atmos. Environ.*, **42** (2008) 4006.
7. P Zavar-Reza, M Titov, G Azizi, A Bidokhti, and I Soltanzadeh, *6th International Conference on Urban Air Quality Limassol, Cyprus* (2007).
8. N Wright, and C J Baker, "Environmental applications of computational fluid dynamics, In: *Environmental modelling, finding simplicity in complexity*", ed. J Wainwright and M Mulligan, John Wiley and Sons Publishing (2002).

^۱. Anthropogenic Heating

۳۳. م. نوروزی، "مطالعه ساختار قائم یک جریان در محیطی با چینه‌بندی چگالی روی سطح شیبدار"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران (۱۳۸۴).
۳۴. م. ع. ثقفی، "بررسی تغییرات شبانه روزی باد در لایه مرزی بر پایه مدل نیمه‌زمینگرد اکمن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران (۱۳۸۱).
۳۵. س. معتمدی، "مطالعه اثر متقابل گردش‌های محلی (کوهستان) و پدیده جزیره گرمایی در تهران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران (۱۳۸۲).
۳۶. م. ثقفی، "ارائه مدلی برای بادهای کوه - دشت تهران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران (۱۳۷۶).
۳۷. م. نصیرزاده، "چینش قائم باد روی تهران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران (۱۳۶۸).
۳۸. ع. رنجبر سعادت‌آبادی، م. آزادی، ع. علی اکبری بیدختی، و ع. ر. صادقی حسینی، "مطالعه موردی جزیره گرمایی تهران و شبیه‌سازی آن"، مجله فیزیک زمین و فضا، (۱۳۸۴) ۶۳.
39. H. Malakooti, "Meteorology and air-quality in a mega-city: application to Tehran", Iran, École des Ponts ParisTech, PhD. thesis (2010).
۴۰. ع. رنجبر سعادت‌آبادی، و م. آزادی، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی (۱۳۸۴) ۱۷۱.
41. M. Kossmann, and F. Fiedler, *Meteor. Atmos. Phys.*, **75** (2000) 195.

- E Dreiseitl, 1984: *Alpine Meteorology: Translations of Classic Contributions* by A. Wagner, E. Ekhardt and F. Defant. PNL - 5141/ASCOT-84-3, Pacific Northwest Laboratory, (1984) 95.
15. C. D. Whiteman, *Atmospheric Processes over Complex Terrain*, Meteor. Monogr., **45** Amer. Meteor. Soc., (1990) 5.
16. P. C. Manins, and B. L. Sawford, *J. Atmos. Sci.*, **36** (1979) 619.
17. P. C. Manins and B. L. Sawford 1979b. Katabatic winds: a field case study. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **105**, 446 (1979) 1011.
18. G. Rampanelli, D. Zardi, and R. Rotunno, *J. Atmos. Sci.*, **61** (2004) 3097.
19. M. H. Dickerson, and P. H. Gudiksen, "ASCOT FY-1979 Progress Report," ASCOT (1980) 80.
20. M. H. Dickerson, and P. H. Gudiksen, "ASCOT FY-1980 Progress Report," ASCOT (1981) 81.
21. T. Yamada, *J. Appl. Meteor.*, **28** (1981) 545.
22. R. T. McNider 1981: "Investigation of the impact of topographic circulations in the transport and dispersion of air pollutants," PhD. Dissertation, Dept. of Env. Sciences, U. of Virginia, Charlottesville, VA (1981).
23. M. Kossmann, U. Corsmeier, S. De Wekker, F. Fiedler, R. Vogtlin, N. Kalthoff, H. Gusten, and B. Neininger, 1999: *Contributions to Atmospheric Physics*, **72** (1999) 329, 5207, 5215, 5218.
24. T. Loose, and R. D. Bornstein, *Mon. Wea. Rev.*, **105** (1976) 567.
25. J. H. Shreffler, *Boundary-Layer Meteorology*, **24**, 3 (1982) 345.
26. F. M. Vukovich, J. W. Dunn, and B. W. Crissman, *J. Appl. Meteor.*, **15** (1976) 417.
27. T. R. Oke, *Atmospheric Environment*, **7** (1973) 769.
28. L. C. Nkemdirim *J. Appl. Meteor.*, **19** (1980) 748.
29. P. Schultz, and T. Warner, *J. Appl. Meteor.*, **21** (1982) 672.
30. W. R. Goodin, G. J. McRae, and J. H. Seinfeld, *J. Appl. Meteor.*, **19** (1980) 98.
31. G. J. McRae and J. H. Seinfeld. *Atmos. Env.*, **17** (1983) 501.
32. D. D. Reible, F. H. Shair and R. Aris, *Atmos. Env.*, **17** (1983) 25.