

بررسی جریان‌های محلی روی تهران با استفاده از یک مدل شهری تک‌لایه‌ای جفت شده با مدل میان‌مقیاس WRF در حضور شرایط جوئی ایده‌آل

ایمان سولتانزاده^{۱*}، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۲ و پیمان زوار رضا^۳

^۱ پژوهشگر فوق‌دکتری، مرکز تحقیقات جوئی، دانشگاه کانتربری، نیوزیلند

^۲ استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ مدرس ارشد، مرکز تحقیقات جوئی، دانشگاه کانتربری، نیوزیلند

(دریافت: ۸۹/۷/۶، پذیرش نهایی: ۸۹/۱۲/۲۴)

چکیده

از آنجا که هر منطقه دارای ویژگی فیزیکی و شرایط فیزیوگرافی خاص خود است، الگوی جریان در هر منطقه، کاملاً خاص و منحصر به همان منطقه است. آنچه اهمیت تحقیقات جامع‌تر و دقیق‌تر الگوی باد و گردش روی شهر تهران را کاملاً توجیه می‌کند، نقصان پژوهش‌های قبلی در زمینه مدل‌های شهری و منحصربه‌فرد بودن الگوی جریان در چنین مناطقی است. در این مقاله تلاش شده است با در نظر گرفتن شرایط جوئی ایده‌آل و با استفاده از یک مدل شهری تک‌لایه‌ای جفت شده با مدل WRF، به سؤال‌هایی از جمله علت کاهش جریان‌های محلی پایین‌سوی شبانه در ۵ دهه اخیر پاسخ مناسبی داده شود. داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهند که افزایش دمای تراز ۲ متری در ۵۰ سال اخیر همبستگی بسیار خوبی با رشد جمعیت شهر تهران دارد. این مسئله اهمیت لحاظ کردن گرمایش انسان‌زاد به‌منظور واسنجی کردن مدل‌های میان‌مقیاس در این منطقه را مضاعف می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که با وارد کردن گرمایش انسان‌زاد، تباین دمایی شبانه‌گاهی بین شهر و محیط غیرشهری افزایش می‌یابد و این امر موجب شکل‌گیری جریان دشت به شهر می‌شود (واقعی‌تر شدن شبیه‌سازی جزیره گرمایی)؛ لذا این جریان جنوبی در کنار اثر اختلاط واقعی‌تر در اثر حضور گرمایش انسان‌زاد موجب کاهش جریان فروشیب شبانه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جریان‌های محلی، مدل میان‌مقیاس WRF، مدل شهری، برهم‌کنش جریان‌های توپوگرافی و جریان‌های شهری

Study of local winds over Tehran using a single-layer urban model coupled with WRF under ideal conditions

Soltanzadeh, I.¹, Aliakbari-Bidokhti, A. A.² and Zawar-Reza, P.³

¹ Postdoctoral Fellow, Centre for Atmospheric Research, University of Canterbury, New Zealand

² Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³ Senior Lecturer, Centre for Atmospheric Research, University of Canterbury, New Zealand

(Received: 28 Sep 2010, Accepted: 15 Mar 2011)

Abstract

Wind is the carrier of pollutants and any other gaseous or particle matters in the atmosphere. Stable atmosphere with low wind provides favorable conditions for high contamination of pollutants in urban areas. The importance of mesoscale atmospheric flows in air pollution dispersion has been recognized in the past three decades and has been the focus of intensive research; both observational and numerical. Mesoscale or local scale circulations are more prominent when the synoptic pressure gradients are weak, allowing horizontal temperature contrasts to develop, which in turn lead to

mesoscale pressure perturbations.

Tehran, a city which is situated at the southern foothills of the Alborz Mountain chain has an average elevation of 1500m, and covers an area of 864 km². Alborz Mountains have a significant influence on the dynamics and thermodynamic modification of air movement over the city. At the same time, the Urban Heat Island effect (UHI) can cause its own mesoscale flow, complicating an already complex local scale flow. The topography and the urban fabric can cause slope flows, mountain flows, and valley flows amongst many others factors.

This paper focuses on the use of state-of-the-art atmospheric numerical model – The Weather Research and Forecasting (WRF) – in an ideal situation to study the characteristics of the mesoscale flow systems that prevail over Tehran when air quality is unfavourable. So the average of soundings of Radiosonde at Mehrabad station, for the almost all fair days of cold seasons of 2005 to 2008 has been selected as ideal initial condition and boundary condition with 10 × 10 km spatial and 12-hour temporal resolutions. The simulations were carried out for a 3-day period in December 2005 when an aircraft, due to low visibility caused by high concentration of air pollution, crashed in 2 miles away from the end of runway into an inhabited area.

Three simulations are prepared. For the first experiment, called control run, we used the default urban setting of Tehran. In the second simulation urban properties of Tehran was removed completely from land-use fed to the model to investigate the effect of urban area on thermal induced circulation of Tehran. This simulation is called NoURB simulation. To investigate the role of urbanization the 3rd simulation was prepared. In this simulation which will be referred as Urban simulation, three urban categories are used; class 31 of USGS land use/land cover used for “Low Intensity Residential” which includes areas with a mixture of constructed materials and vegetation. These areas are most commonly included as single-family housing units in which the population densities is lower than that in high intensity residential areas. Class 32 of USGS represented as “High Intensity Residential” which includes highly developed areas where people reside in high numbers. Finally class 33 of USGS used for “Commercial/Industrial” which includes infrastructure (e.g. roads, railroads, etc.) and all highly developed areas not classified as High Intensity Residential.

The Noah LSM provides surface sensible and latent heat fluxes, and surface skin temperature as lower boundary conditions. It has a single vegetation canopy layer and the following prognostic variables: soil moisture and temperature in the soil layers, water stored on the canopy, and snow stored on the ground. It includes: 1) increasing the roughness length from 0.5 m to 0.8 m to represent turbulence generated by roughness elements and drag due to buildings; 2) reducing surface albedo from 0.18 to 0.15 to represent the shortwave radiation trapping in the urban canyons; 3) using a larger volumetric heat capacity of 3.0 J m⁻³ K⁻¹ for the urban surface (walls, roofs, and roads) which is usually consisted of concrete or asphalt materials; 4) increasing the value of soil thermal conductivity to 3.24 W m⁻¹ K⁻¹ to parameterize large heat storage in the urban surface and underlying surfaces, and 5) reducing green vegetation fraction over urban city to decrease evaporation.

In order to better represent the physical processes involved in the exchange of heat, momentum, and water vapor in urban environment in mesoscale model, an UCM is coupled to the WRF model. The main purpose of the coupled model is to improve the description of lower boundary conditions and to provide more accurate forecasts for urban regions. The UCM is a single layer model which has a simplified urban geometry. Some of the features of the UCM include, shadowing from buildings, reflection of short and longwave radiation, wind profile in the canopy layer and multi-layer heat transfer

equation for roof, wall and road surfaces.

The basic function of an UCM is to take the urban geometry into account in its surface energy budgets and wind shear calculations. The urban model is based on the urban canopy model which includes: 1) 2-D street canyons that are parameterized to represent the effects of urban geometry on urban canyon heat distribution; 2) shadowing from buildings and reflection of radiation in the canopy layer; 3) the canyon orientation and diurnal cycle of solar azimuth angle, 4) man-made surface consists of eight canyons with different orientation; 5) Inoue's model for canopy flows; 6) the multi-layer heat equation for the roof, wall, and road interior temperatures; 7) anthropogenic heating associated with energy consumption by human activities; and 8) a very thin bucket model for evaporation and runoff from road surface.

The main limits in this kind of study over Tehran metropolitan are lack of observation data beside lack of documentation. The previous studies over Tehran indicate a significant increase in minimum temperatures in 50-year trend especially in cold seasons. This indicates that the artificial and anthropogenic heating leading to urban heat island in Tehran have been significant in this period. These studies also indicate that nocturnal drainage flows in Mehrabad Int. Airport synoptic station has also been weakened, in this 50-year period. This paper focuses on the use of state-of-the-art atmospheric numerical model – The Weather Research and Forecasting (WRF) – in an ideal situation to study the characteristics of the mesoscale flow systems that prevail over Tehran when air quality is bad. The results indicate that urban areas near complex topography can increase transfer of material (pollution) and energy in the boundary layer and from this layer to the free atmosphere. Other results from this study show UHI induces rural-urban flows which significantly reduce drainage wind speed.

Key words: Local flows, WRF model, Urban model, Complex topography

۱ مقدمه

۴۷٪ در سال ۲۰۰۰ رسیده و پیش‌بینی می‌شود که این رقم در سال ۲۰۳۰ به ۶۱٪ برسد. افزایش شهرنشینی و توسعه شهرها که همراه با تغییر گسترده پوشش سطح زمین است، محسوس‌ترین تاثیر را بر جو زمین به همراه دارد. از سالها پیش در پژوهش‌های گسترده‌ای (برای مثال، هوارد، ۱۸۳۳؛ برنشتاین، ۱۹۶۸؛ اکه، ۱۹۸۲) تاثیر این تغییرات بر وضعیت هوا و اقلیم در مقیاسهای جهانی و بعضاً منطقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. شهرنشینی با بی‌هنجاری‌های دمایی مانند جزیره گرمایی شهری (Urban Heat Island) (UHI)، به اختصار جزیره گرمایی، و اثر واحه (اثر اویسیس (Oasis effect) همراه است. جزیره گرمایی با گرم‌تر شدن منطقه شهری نسبت به اطراف آن همراه است، حال آنکه اثر واحه با سرمایش بیشتر در نتیجه افزایش شار گرمای نهان. این پدیده‌ها شواهد مهمی بر

بشر سال‌ها است که ترکیب پوششی سطح زمین را با توجه به نیاز یا خواست خود تغییر می‌دهد. تحقیقات نشان می‌دهد که این تغییرات، به خصوص در ۲۰۰ سال گذشته تاثیرهای محسوسی بر جو زمین داشته است و به‌عبارت‌دیگر جو نسبت به این تغییرات حساسیت نشان می‌دهد. از یک سو افزایش گازهای گلخانه‌ای که عمدتاً در نتیجه هزاران سال جنگل‌زدایی و تخریب پوشش‌های گیاهی (رادیمن، ۲۰۰۳) است و از سوی دیگر، رشد هر روزه کارخانه‌ها، جمعیت و افزایش بیش از حد مصرف سوخت‌های فسیلی در دو قرن اخیر همه و همه در مقیاس‌های متفاوت، جو زمین را تحت‌تاثیر خود قرار می‌دهند. به موازات رشد جمعیت، جمعیت شهرها نیز رشد زیادی داشته‌اند. بنابر آمار سال ۲۰۰۴ سازمان ملل متحد، رشد جمعیت شهرها در سطح جهانی از ۲۹٪ در ۱۹۵۰ به

تأثیر مصرف انرژی و فعالیت‌های بشری بر جو زمین هستند (سیلر، ۱۹۹۵). از سوی دیگر افزایش گسیل آلاینده‌ها در مناطق شهری و تغییر ساختار لایه مرزی جو نیز از جمله عوامل ایجاد و یا تشدید مشکلات کیفیت وضع هوا هستند.

ویژگی‌های فیزیکی، فیزیوگرافی و رشد فزاینده جمعیت، وسایل حمل و نقل و کارخانه‌های تهران موجب شده است که در اغلب مواقع سال، شاهد شاخص استاندارد آلودگی (Pollutant Standard Index) بالاتر از حد مجاز آن باشیم. به نظر می‌رسد که به خصوص در فصل زمستان این شرایط در حضور سامانه‌های واچرندی یا به عبارت دیگر نبود و یا حضور کم‌رنگ جریان‌های بزرگ مقیاس رخ می‌دهد. در عین حال وجود شرایط همدیدی غالب همچون جریان‌های بزرگ مقیاس نیز بر پیچیدگی الگوی این جریان‌ها می‌افزاید؛ چرا که می‌تواند باعث تضعیف و یا محدود کردن اثر آنها شود (استال، ۱۹۸۸). این شرایط همدیدی زمینه مناسبی برای شکل‌گیری جریان‌های میان‌مقیاس گرما واداشت (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 می‌کنند (وایتمن، ۲۰۰۰).

قانون‌مند کردن و استخراج الگوی دقیق تأثیر مناطق شهری بر فرایندهای محلی و منطقه‌ای بسیار پیچیده و تقریباً امری محال است (اکه، ۱۹۸۲). با این حال با در دست داشتن ابزارهای محاسباتی و مشاهداتی گوناگون، می‌توان تا حد قابل قبولی این تأثیر را در قالب سناریوهای متفاوت از جمله ساده‌سازی‌ها، آزمون‌های حساسیت و شرایط جوئی ایده‌آل مورد تحلیل قرار داد. البته نه پژوهش‌های نظری و نه مشاهداتی به تنهایی جوابگوی این پیچیدگی‌ها نخواهند بود. به همین منظور در این تحقیق در کنار دو ابزار فوق، از مدل‌های عددی در اجرای

آزمایش‌های حساسیت و شبیه‌سازی‌های گوناگون استفاده شده است.

کلان‌شهر تهران با جمعیتی بیش از ۱۰ میلیون نفر در حوزه‌ای تقریباً بسته در دامنه جنوبی البرز مرکزی قرار گرفته است. ویژگی‌های جغرافیایی، رشد فزاینده جمعیت، وسایل حمل و نقل و کارخانه‌ها (اثر تشدید شونده جزیره گرمایی) موجب شده است که در اغلب مواقع سال، شاخص استاندارد آلودگی (PSI) بالاتر از حد مجاز آن باشد.

تحقیقات محدودی به صورت نقطه‌ای و موردی روی تهران صورت گرفته و تلاش شده است با توجه به الگوی دیدبانی ایستگاه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و بعضاً ایستگاه مهرآباد، شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی در حالت ایده‌آل (نوروزی، ۱۳۸۴) و یا تحلیل‌های نظری (ثقفی، ۱۳۸۱) به بررسی ساختار بادهای محلی (معمدی، ۱۳۸۲؛ ثقفی، ۱۳۷۶) و ساختار قائم آن (نصیرزاده، ۱۳۶۸) روی این ایستگاه‌ها پرداخته شود. رنجبر سعادت‌آبادی و همکاران (۱۳۸۴) با بررسی جزیره گرمایی شهر تهران به صورت موردی، وقوع انحراف‌های پادساعت گرد باد به هنگام ورود به منطقه شهری، وجود گردش‌های چرخندی تا ارتفاع بیش از ۴۰۰ متر و سرعت‌های قائم مثبت در ساعت‌های روز در مرکز و شرق شهر را روی تهران مشاهده کردند. جایکا (۱۹۹۷) نیز با هدف استخراج طرح جامع کنترل کیفیت هوا در تهران و با ۱۴ 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. در تحقیقات دیگر از جمله رنجبر سعادت‌آبادی و آزادی (۱۳۸۴) نشان داده شده است که میانگین ماهانه سرعت باد در ساعت‌های شب با افزایش شهری شدن، روند کاهشی قابل ملاحظه‌ای داشته است، حال آنکه در روز کمتر شاهد این تغییرات هستیم. ملکوتی (۲۰۱۰) در پژوهشی به منظور شبیه‌سازی الگوی آلودگی

به عبارت دیگر گرادیان فشار ناشی از UHI شهر ناگویا در مقابل گرادیان فشار نسیم دریا قرار گرفته و آن را تضعیف می‌کند.

اوهاشی و کیدا (۲۰۰۲) اثر شهرهای اوزاکا و کیوتو ژاپن بر جریان‌های نسیم دریای محلی را به صورت ایده‌آل شبیه‌سازی کرده‌اند. با این شبیه‌سازی مشخص شد که برهم کنش سطح زمین و نسیم دریا، ماهیت این نسیم را تغییر می‌دهد که آنها این جریان را جریان زنجیری نامیدند، چرا که برهم کنش این جریان‌ها منجر به توسعه پیدا کردن نسیم دریا تا مسافت زیادی درون خشکی می‌شود. در این شرایط آلودگی شهرهای ساحلی، کیفیت هوای شهرهایی که از دریا مسافت زیادی دارند را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد، ویژگی‌ای که هیچ‌یک از دو جریان ذکر شده به تنهایی در خود ندارند. از سوی دیگر شولتز و وارنر (۱۹۸۲) بیان می‌کنند شهر لوس آنجلس تاثیر چندانی بر جریان‌های توپوگرافی و نسیم دریای قوی آن منطقه ندارد. همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، میزان تاثیر شهرنشینی بر وضعیت هوای مناطق گوناگون بسیار به اقلیم منطقه و نوع کاربری اراضی تغییر یافته به شهر حساس است. به همین دلیل دستیابی به یک الگوی واحد برای برهم کنش شهرها بر سایر جریان‌های محلی تقریباً غیرممکن است.

تحقیقات صورت گرفته روی تهران (برای مثال: رنجبر سعادت‌آبادی و آزادی، ۱۳۸۴؛ سلطانزاده و همکاران، ۱۳۸۸) نشان می‌دهد که میانگین ماهانه مولفه نصف‌النهاری سرعت باد شبانه در چند دهه گذشته، روند کاهشی قابل ملاحظه‌ای داشته است و از سوی دیگر به نظر می‌رسد که جریان‌های گرما واداشتی ناشی از اثر کوهستان روی تهران بیشتر جریان‌های شیب هستند تا جریان‌های کوه - دشت. از این رو این مسئله پیچیده باید به سؤال‌های کوچک‌تری تقسیم شود تا بتوان از جنبه‌های متفاوت این واقعیت را مورد تحلیل قرار داد.

تهران بیان می‌کند که مدل‌های سطح مبتنی بر نیروی پسا موفق‌تر از مدل‌های بر پایه زبری در شبیه‌سازی‌های آلودگی هوا عمل می‌کنند. در ادامه پس از مرور تحقیقات پیشین در زمینه برهم کنش جریان‌های توپوگرافی و جریان‌های مناطق شهری تلاش شده است تا با اجرای آزمایش‌هایی به بررسی بیشتر این جریان‌ها پرداخته شود.

۲ برهم کنش جریان‌های توپوگرافی و جریان‌های مناطق شهری

در دنیای واقعی، بادهای محلی نتیجه برهم کنش سازوکارهای واداشتی متعددی است (شکل ۱). برای مثال: تاثیرهای متقابل نسیم دریا و جریان‌های توپوگرافی (ماهر و پیکه، ۱۹۷۷؛ استیواری و همکاران، ۲۰۰۳) و یا برهم کنش جریان‌های همدیدی، دریاچه، واحه و جریان‌های توپوگرافی (ریف و همکاران، ۲۰۰۲). پیکه و همکاران (۱۹۹۳) عنوان می‌کنند که تغییر سپیدی و تفاوت در شار گرمای محسوس نقش قابل توجهی در اصلاح جریان‌های توپوگرافی در شمال آریزونا بازی می‌کنند.

تحقیقات هر تیگ (۱۹۹۵) و کیتادا و همکاران (۱۹۹۸) نشان می‌دهد که مناطق شهری تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر اصلاح جریان‌های توپوگرافی به ترتیب در سوئیس و ژاپن دارند. هر تیگ (۱۹۹۵) بیان می‌کند که شهرهای سوئیس بر عمق لایه آمیخته و سرعت جریان‌های توپوگرافی بسیار تاثیرگذار است. در این تحقیق تفاوت در زبری سطح در مقابل دمای شهرها در حکم عامل این تغییر در نظر گرفته شده است.

کیتادا و همکاران (۱۹۹۸) بر این باورند که در میان همه جریان‌های میان‌مقیاس فلات نوهبی (Nohbi) جریان‌های کوهستان دارای اهمیت بیشتری است، ولی گردش‌های شهری در شهر ناگویا که در این فلات قرار دارد، به منزله نیروی مقابل نسیم دریا عمل می‌کند و باعث تضعیف همگرایی جریان در این شهر می‌شود.

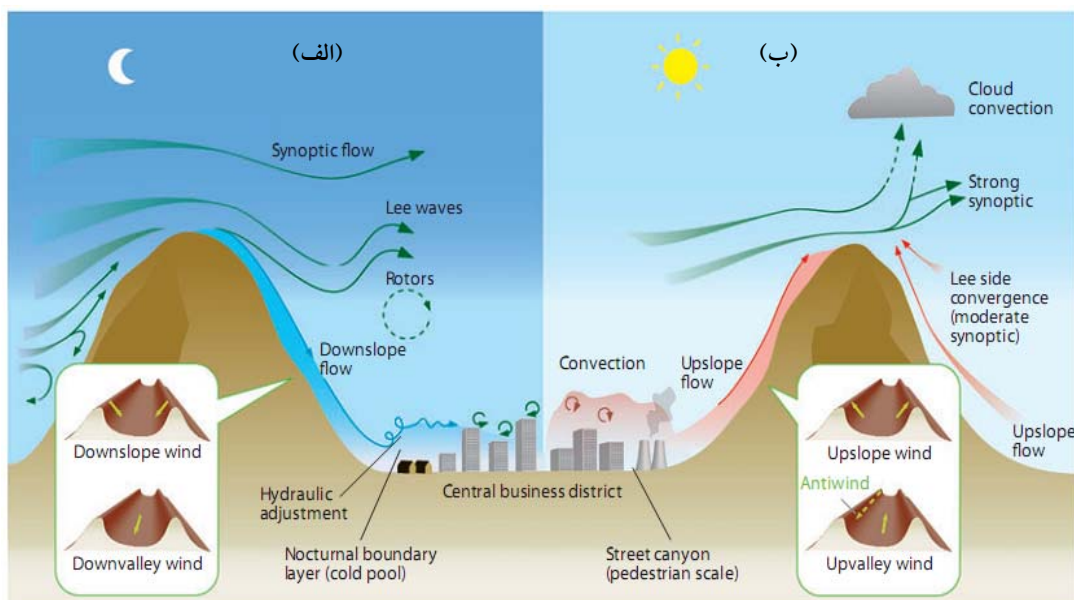
میان مقیاس به کار گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، این مدل به منظور شبیه‌سازی بهتر شرایط مرز پایین در مدل‌های میان‌مقیاس در مناطق شهری استفاده می‌شود. این مدل تک‌لایه‌ای که از هندسه ساده شده مناطق شهری استفاده می‌کند، کمیت‌هایی همچون سایه‌اندازی ساختمان‌ها، بودجه تابشی دیوارها، پشت‌بام‌ها و جاده‌ها، الگوی باد در منطقه شهری و مهم‌تر از همه گرمایش انسان‌زاد را در این گونه مناطق محاسبه می‌کند و در اختیار مدل میان‌مقیاس قرار می‌دهد (کوزاکا و کیمورا، ۲۰۰۴).

این مدل سطح کمیت‌هایی همچون شارهای گرمای محسوس و نهان و دمای سطح را در مرز پایین برآورد می‌کند و در اختیار مدل قرار می‌دهد (چن و دادهیا، ۲۰۰۱؛ اک و همکاران، ۲۰۰۳). این مدل دارای یک لایه محیط گیاهی (Vegetation Canopy) است و کمیت‌هایی همچون رطوبت خاک، دمای خاک در لایه‌های متفاوت، رطوبت ذخیره شده در محیط گیاهی و برف تجمع شده در محیط را نیز در مرز پایین محاسبه می‌کند.

برای نمونه، آیا در منطقه مورد بررسی، شهر تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر جریان‌های توپوگرافی دارد؟ در صورتی که پاسخ این سؤال مثبت است، کدامیک از جنبه‌های دینامیکی یا ترمودینامیکی نقش قابل ملاحظه‌تری بر جریان‌های شهری دارند؟ یا اینکه آیا می‌توان تاحدی در شبیه‌سازی ماهیت این جریان‌ها (توپوگرافی و شهر) بهبود حاصل کرد؟ به منظور یافتن پاسخ مناسب، شبیه‌سازی‌هایی با حضور مدل شهری جفت شده به مدل (Weather Research and Forecasting) WRF صورت گرفته که روش اجرای کار و نتایج آن در ادامه آمده است.

۳ مدل شهری جفت شده با مدل هواشناسی

مدل شهری مورد استفاده در این پژوهش به همراه مدل سطح Noah LSM (Noah Land Surface Model) Urban Canopy) این مدل شهری (Model) (UCM) به منظور شبیه‌سازی بهتر شارهای گرما، تکانه و رطوبت در مناطق شهری و در مدل‌های



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

مصرف انرژی.

(ز) یک مدل دلوی برای محاسبه رواناب و تبخیر سطح جاده‌ها.

همان‌گونه که پیش از این گفته شد، این مدل شهری شارهای گرمای محسوس از جداره‌ها، سقف و جاده را محاسبه می‌کند و آنها را به صورت تجمعی به بودجه انرژی و تکانه بین سطح محیط شهری و جو وارد می‌کند. محاسبه شارهای متفاوت همان‌گونه که در شکل ۲ مشخص است از روابط همانندی مونین - اوبوخوف استخراج می‌شود. دمای سطح با در نظر گرفتن تابش طول موج بلند بالاسو به دست می‌آید که خود حاصل تفاضل تابش طول موج بلند خالص و تابش طول موج بلند پایین سو است. تابش خالص طول موج بلند از روابط (۱) الی (۵) به دست می‌آید:

$$L_R = \varepsilon_R (L^\downarrow - \sigma T_R^4), \quad (1)$$

$$L_{W,1} = \varepsilon_W (L^\downarrow F_{W \rightarrow S} + \varepsilon_G \sigma T_G^4 F_{W \rightarrow G} + \varepsilon_W \sigma T_W^4 F_{W \rightarrow W} - \sigma T_W^4), \quad (2)$$

$$L_{W,2} = \varepsilon_W [(1 - \varepsilon_G) L^\downarrow F_{G \rightarrow S} F_{W \rightarrow G} + (1 - \varepsilon_G) \varepsilon_W \sigma T_W^4 F_{G \rightarrow W} F_{W \rightarrow G} + (1 - \varepsilon_W) L^\downarrow F_{W \rightarrow S} F_{W \rightarrow W} + (1 - \varepsilon_W) \varepsilon_G \sigma T_G^4 F_{W \rightarrow G} F_{W \rightarrow W} + \varepsilon_W (1 - \varepsilon_W) \sigma T_W^4 F_{W \rightarrow W} F_{W \rightarrow W}], \quad (3)$$

$$L_{G,1} = \varepsilon_G (L^\downarrow F_{G \rightarrow S} + \varepsilon_W \sigma T_W^4 F_{G \rightarrow W} - \sigma T_G^4), \quad (4)$$

$$L_{G,2} = \varepsilon_G [(1 - \varepsilon_W) L^\downarrow F_{W \rightarrow S} F_{G \rightarrow W} + (1 - \varepsilon_W) \varepsilon_G \sigma T_G^4 F_{W \rightarrow G} F_{G \rightarrow W} + \varepsilon_W (1 - \varepsilon_W) \sigma T_W^4 F_{W \rightarrow W} F_{G \rightarrow W}]. \quad (5)$$

در اینجا L^\downarrow تابش طول موج بلند فروسو است. F عامل دید آسمان (Sky View Factor) است که از روش مورد استفاده در مقاله کوزاکا و همکاران (۲۰۰۱) به دست می‌آید. زیرنویس‌های G ، W و S به ترتیب نماینده دیوار،

به صورت پیش فرض محاسبات مرتبط محیط شهری در این مدل با استفاده از روش پارامتری کردن‌های حجمی استفاده شده است (لیو و همکاران، ۲۰۰۴؛ تواری و همکاران، ۲۰۰۴) که شامل مشخصه‌های زیر است:

(الف) با توجه به افزایش یافتن تلاطم در محیط شهری، زبری در محیط شهری از ۰/۵ به ۰/۸ افزایش یافته است.

(ب) به منظور نمایش بهتر میزان تابش طول موج کوتاه خورشیدی در محیط شهری، میزان سپیدی سطح از ۰/۱۸ به ۰/۱۵ کاهش پیدا کرده است.

(ج) استفاده از ظرفیت گرمایی در واحد حجم نسبتاً زیاد در حد $3 \text{ Jm}^{-3} \text{ K}^{-1}$ به علت وجود دیوارها، سقف و جاده‌ها که معمولاً سیمانی یا آسفالتی هستند.

(د) افزایش میزان رسانایی گرمایی خاک به $Wm^{-1} \text{ K}^{-1}$ به ۳/۲۴ به منظور پارامتری کردن بهتر ظرفیت گرمایی بالای سطح شهرها و لایه‌های زیرین آن.

(ه) کاهش نسبت پوشش گیاهی در محیط شهری به منظور کاهش میزان رطوبت در این محیط‌ها.

مدل شهری UCM در کنار این تغییرات در محیط شهری ویژگی‌های دیگری نیز به این مدل سطح می‌افزاید که شامل:

(الف) عرضه یک مدل دو بُعدی برای خیابان‌ها در محیط شهری به منظور نشان دادن بهتر توزیع گرما در این محیط (شکل ۲).

(ب) محاسبه میزان سایه‌اندازی و بازتابش ساختمان‌ها (شکل ۳).

(ج) وارد کردن تغییرات روزانه زاویه سرسوی خورشیدی در محاسبات مربوط.

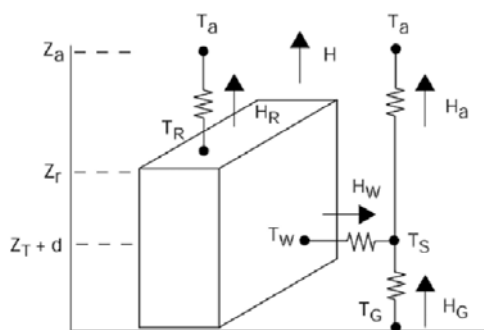
(د) وارد کردن مدل اینو (Inoue) برای محاسبه جریان در محیط شهری (اینو، ۱۹۶۳).

(ه) معادلات چند لایه‌ای گرما برای سقف، دیوارها و دمای محیط جاده‌ها.

(و) گرمایش انسان‌زاد حاصل از فعالیت‌های بشری و

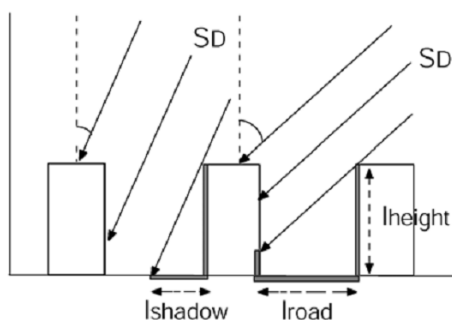
۴ داده‌ها روش کار

شبه سازی‌های صورت گرفته در این مقاله با هدف یافتن پاسخ سؤال‌هایی است که صرفاً با تحقیقات نظری، داده‌های مشاهداتی و یا حتی شبه‌سازی‌های معمول، قادر به پاسخگویی به آنها نیستیم. از جمله این سؤال‌ها می‌توان به این مورد اشاره کرد: 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؟



شکل ۲. طرحواره کلی مدل شهری UCM. Z_a ارتفاع پایین‌ترین لایه مدل میان‌مقیاس، T_a دما در Z_a ، H مجموع شار گرمای محسوس، Z_r ارتفاع ساختمان، Z_T طول زبری گرمایی، d ارتفاع جابجایی، T_R ، T_W و T_G به ترتیب دمای سطح پشت‌بام، دیوارها و جاده و به همین ترتیب H_R ، H_W و H_G به ترتیب شار گرمای محسوس از سطح پشت‌بام، دیوارها و جاده است.

(i) $I_{shadow} < I_{road}$ (ii) $I_{shadow} > I_{road}$



شکل ۳. تابش طول موج کوتاه خورشیدی به محیط کانال شکل خیابان‌ها. I_{shadow} و I_{road} طول سایه روی جاده‌ها و حداکثر طول سایه در طول روز هستند. I_{height} نیز ارتفاع ساختمان است.

جاده و آسمان هستند. به همین ترتیب متغیر $F_{G \rightarrow S}$ نشان‌دهنده عامل دید آسمان از جاده است. زیرنویس‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده جذب تابش مستقیم و تابش بازتاب شده است.

از دیگر کمیت‌های مهم در این مدل، برآورد بودجه انرژی مربوط به عوامل طبیعی همچون پارک و نظیر آن است، چرا که ممکن است سلول شبکه‌ای کاملاً در بر گیرنده ساختمان و دیگر مصنوعات بشری نباشد. در این مدل پارامتری به شکل U_p تعریف می‌شود که نشان‌دهنده درصد ناهمگونی زیر شبکه‌ای به واسطه مصنوعات ساخت بشر مانند ساختمان‌ها است. این کمیت از تعریف رده‌های گوناگون شهری در فایل ورودی مدل حاصل می‌شود. بنابراین لازم است که پیش از اجرای مدل فایل‌های ورودی به گونه‌ای طراحی شوند که در بر گیرنده ویژگی‌های متفاوت شهری مورد نیاز مدل باشند. با توجه به این امر، مجموع شار گرمای محسوس از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$H = (1 - U_p) \times H_{LSM} + U_p \times H_{Urban} \quad (6)$$

در معادله (۶)، H نماینده مجموع شار گرمای محسوسی است که در یک سلول شبکه‌ای از محیط شهری به مدل هواشناسی وارد می‌شود. همان گونه که پیش‌تر گفته شد، U_p نشان‌دهنده درصد ناهمگونی زیر شبکه‌ای به واسطه مصنوعات ساخت بشر مانند ساختمان‌ها است و $(1 - U_p)$ نشان‌دهنده درصد مساحت تحت پوشش عوامل طبیعی مانند چمن‌زارها، جنگل‌ها و نظیر آن است. H_{LSM} معرف شار گرمای محسوس از مدل سطح Noah LSM است و H_{Urban} در مقابل گرمای محسوس محاسبه شده در مدل شهری برای ساختمان‌ها و مانند آن است. شار گرمای محسوس و شار تابش طول موج بلند خورشیدی بالاسو نیز از همین روش محاسبه می‌شوند.

تفکیک قائم ۳۵ ترازوی استفاده شده است. شرایط آغازگری برای ساعت (Coordinated Universal Time) UTC ۰۰,۰۰ تهیه شده و کل حوزه دارای یک نمایه قائم دما، فشار، رطوبت و غیره است که نمایانگر متوسط نمایه‌های قائم ایستگاه جو بالایی فرودگاه مهرآباد در ۹۶ روزهای زمستانی پایدار سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ است (شکل ۵). برای همه این اجراها شرایط تابشی ماه دسامبر لحاظ شده است. شرایط مرزی به صورت تکراری هر ۲۴ ساعت (رأس ساعت UTC ۰۰,۰۰) یک بار به بزرگ‌ترین حوزه (حوزه با تفکیک ۹ کیلومتر) اعمال می‌شود. برای تعیین شرایط مرزی روش واهلش نمایی به کار برده شده است. در دو اجرای اول داده‌های زمین به کار رفته و توپوگرافی سازمان نقشه برداری ایالات متحده (United States Geological Survey) (USGS) با ۲۴ رده شامل یک رده شهری با تفکیک افقی ۳ دقیقه و نسخه دوم داده‌های تعیین پوشش سطح خشکی‌های جهانی (Global Land Cover Characterization) (GLCC) با تفکیک افقی ۳ دقیقه برای تعیین پوشش گیاهی و نوع خاک به کار برده شده است.

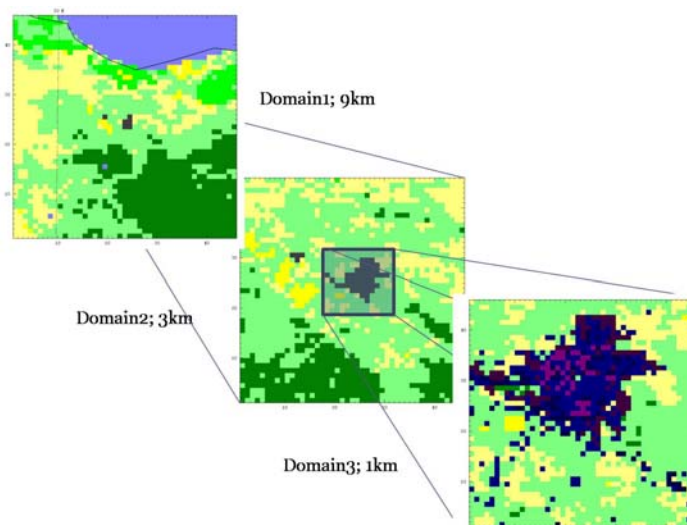
توجه نگارندگان بیش از هر پدیده میان‌مقیاس دیگر، به جریان‌های گرما واداشتی محلی همچون جریان‌های ناشی از اثر توپوگرافی و جریان‌های شهری بوده است. به همین منظور، مدل در حالت‌های متفاوت با و بدون شهر و کم و زیاد کردن آثار شهر به ترتیب زیر اجرا شده و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته است:

الف) اجرای مدل با حضور پوشش شهری تهران به شکل پیش فرض در مدل WRF (اجرای مرجع)،

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

ج) به کارگیری مدل تک‌لایه ای شهری جفت شده با مدل WRF و وارد کردن سه رده شهری با ویژگی‌های گوناگون، با لحاظ کردن تراکم ساختمانی و جمعیتی (اجرای شهری).

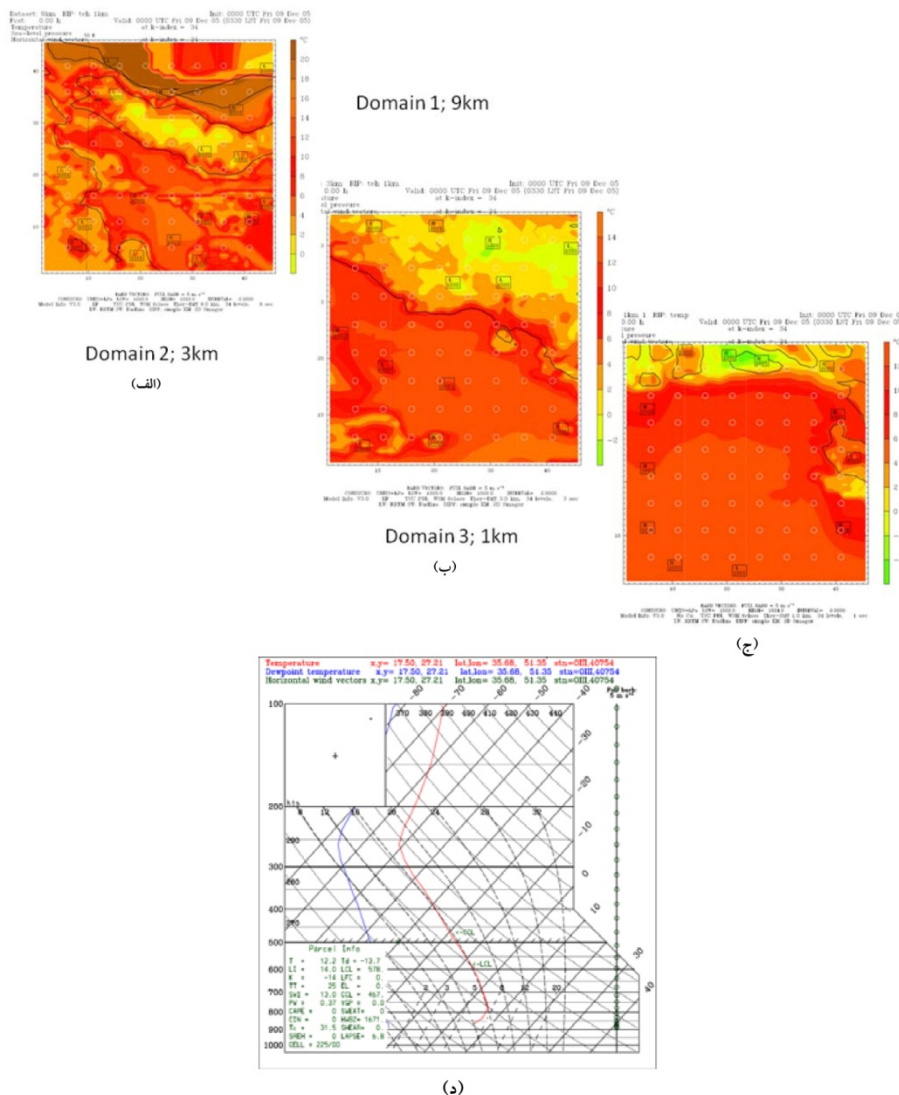
منطقه هدف، ناحیه شهری تهران و بخشی از حومه در نظر گرفته شده است (شکل ۴). با توجه به اینکه تفکیک داده‌های ایده آل مرزی و آغازگری ۰/۵ درجه جغرافیایی است و به منظور عملی ساختن شبیه‌سازی دقیق‌تر و به نوعی حذف بیشتر آثار جریان‌های بزرگ‌مقیاس تر از سه لانه‌سازی با تفکیک‌های افقی ۹، ۳ و ۱ کیلومتری و



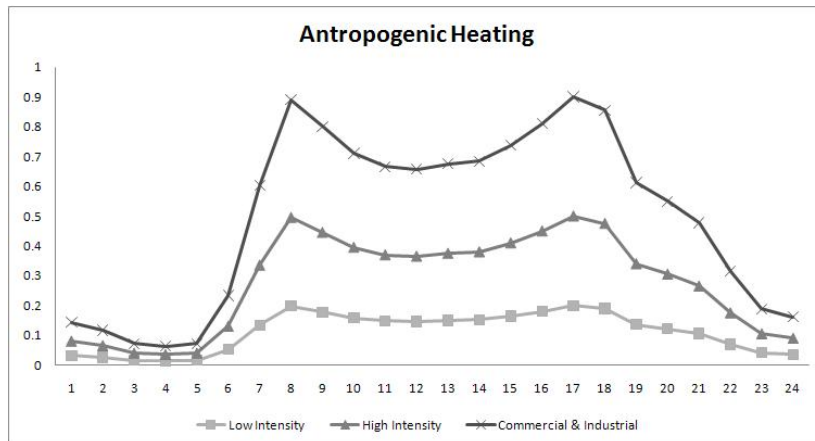
شکل ۴. حوزه شبیه‌سازی‌ها در هر سه آزمایش صورت گرفته برای سه لانه‌سازی با تفکیک‌های افقی ۹، ۳ و ۱ کیلومتری.

سوم به کار گرفته شده، در جدول ۱ آمده است. برای این منظور سه رده آخر داده‌های کاربری ارضی از داده‌های USGS به رده‌های شهری اختصاص داده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشخص است هریک از رده‌ها دارای میزان حداکثری مشخصی گرمای انسان‌زاد است. الگوی تغییرات شبانه‌روزی این کمیت در یک روز غیر تعطیل در شکل ۶ آمده است.

در اجرای سوم از مدل شهری تک‌لایه‌ای جفت شده با مدل WRF استفاده شده است. به این منظور داده‌های کاربری ارضی از داده‌های USGS ۳۳ رده‌ای استخراج شده است. در این بانک داده‌ای علاوه بر رده پیش‌فرض مدل WRF درحکم منطقه شهری، می‌توان گروه‌های دیگر شهری را با ویژگی‌های گوناگون تعریف کرد. ویژگی‌های ۳ رده شهری که در این تحقیق در شبیه‌سازی



شکل ۵. شرایط آغازگری مدل بدون حضور جریان‌های بزرگ‌مقیاس 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 (سرخ) و دمای نقطه شبنم (آبی) روزهای پایدار زمستانی ایستگاه جو بالای فرودگاه مهرآباد در غیاب جریان‌های بزرگ‌مقیاس (توضیحات بیشتر در متن).



شکل ۶. نمودار تغییرات شبانه‌روزی گرمایش انسان‌زاد در رده‌های گوناگون یعنی صنعتی و تجاری (منحنی با علامت ضربدر)، پرتراکم شهری (منحنی با علامت مثلث) و کم‌تراکم شهری (منحنی با علامت مربع) در یک روز غیر تعطیل. محور عمودی نمایشگر مقادیر نرمال شده به 100 Wm^{-2} است. محور افقی نمایشگر زمان محلی است.

نقش تغییر اقلیم بین سال‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۵ بسیار کمتر از مقادیر مشاهده شده در ایستگاه‌های سطح شهر تهران بوده است. برای نمونه می‌توان به داده‌های ایستگاه مهرآباد اشاره کرد. ایستگاه هواشناسی مهرآباد در نیمه جنوبی شهر تهران واقع شده است. نمودار شکل ۷ نشان می‌دهد که در کنار رشد جمعیتی در شهر تهران، دمای تراز ۲ متری نیز رشد محسوسی داشته است. با توجه به موقعیت جغرافیایی ایستگاه مهرآباد، مقادیر جریان اندازه‌گیری شده در این ایستگاه و در روزهای پایدار، شاخص مناسبی برای بررسی آثار پدیده جزیره گرمایی و برهم‌کنش جریان‌های فروشیب و آثار جریان‌های ناشی از جزیره گرمایی است. با در نظر گرفتن این واقعیت، به نظر می‌رسد که نقش متغیرهای ترمودینامیکی و مهم‌ترین آنها یعنی گرمایش انسان‌زاد، بر جریان‌های محلی تهران نقش قابل ملاحظه‌ای باشد.

بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد که اضافه کردن زبری تاثیر زیادی بر سرعت جریان‌های گرما واداشتی در شبیه‌سازی‌های ایدئال مدل WRF نداشته است. البته با این تغییر در کنار کاهش ناچیز جریان در نزدیک سطح، ضخامت جریان تا حدی بیشتر می‌شود. از سوی دیگر به

در همه اجراها از طرحواره‌های (Schemes) یکسان استفاده شده است. در این اجراها از طرحواره‌های (Rapid Dudhia Scheme) به ترتیب برای تابش با طول موج بلند و کوتاه، طرحواره پخش گرمایی برای سطح و همچنین از طرحواره (YSU Yonsei University Scheme) برای لایه مرزی استفاده شده است. به منظور آشکارسازی تبادل شارها بین سطح و جو از مدل سطح Noah LSM استفاده شده است. همه اجراها برای ۴۸ ساعت صورت پذیرفته ولی نتایج ۲۴ ساعت دوم مورد تحلیل قرار گرفته است. روز اول درحکم اسپین‌آپ (Spin up) لحاظ شده است.

۵ بحث نتایج

داده‌های ایستگاه‌های متفاوت هواشناسی تهران نشان می‌دهد که در کنار رشد سریع جمعیت در منطقه شهری تهران، دمای این شهر نیز رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است (شکل ۷). هرچند که در این افزایش دما باید آثار مربوط به تغییرات اقلیمی را نیز لحاظ کرد ولی گزارش‌های منتشر شده از مراکز گوناگون از جمله (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC)، نشان می‌دهد که

الف) شب هنگام به دلیل وارد شدن گرمای بیشتر به مرز پایین در اجرای شهری و شکل گیری تلاطم، چینش دمایی به هم می خورد و این امر می تواند تا حدی باعث تضعیف جریان های شمالی شبانه شود.

ب) فرایند تاثیر گذار دیگر بر جریان های فروشیب، گردش های شهری در قالب جریان های دشت به شهر است. این جریان ها مشخصاً در اثر نقش گرمایش انسان زاد و شکل گیری جزیره گرمایی در مدل تشدید می شوند، به گونه ای که در روز تقویت جریان های جنوبی و در اوایل شب تضعیف جریان های شمالی را به دنبال دارند. در اجرای شهری، ضخامت و سرعت جریان در اوایل شب به دلیل وجود این جریان به شکل محسوسی کاهش می یابد ولی رفته رفته اثر آن کمتر می شود. در کل جریان های فروشیب شبانه در حضور گرمایش شهری کاهش می یابد ولی جریان دشت به شهر تا حدی افزایش پیدا می کند.

۳- با وارد کردن گرمایش انسان زاد در اجرای شهری به نظر می رسد که روز هنگام نفوذ جریان ها به سطوح فوقانی نه تنها از پای کوه بلکه از کل فضای بالای محیط شهری صورت می گیرد. این امر می تواند در اثر شبیه سازی بهتر مدل از جزیره گرمایی شهری باشد. لذا به نظر می رسد که وارد کردن گرمایش انسان زاد تا حد قابل توجهی انتقال ماده و انرژی در لایه مرزی و از این لایه به جو آزاد را افزایش دهد.

نظر می رسد که وجود مناطق شهری در مجاورت ارتفاعات می تواند تا حد زیادی انتقال ماده و انرژی در لایه مرزی و از این لایه به جو آزاد را افزایش دهد (سلطانزاده و همکاران، ۱۳۸۸؛ گوهم و همکاران، ۲۰۰۹). خلاصه نتایج حاصل از این آزمایش ها به قرار زیر است:

۱- وسعت و شدت گرفتن جریان های جنوبی فراشیب در روز (شکل ۸).

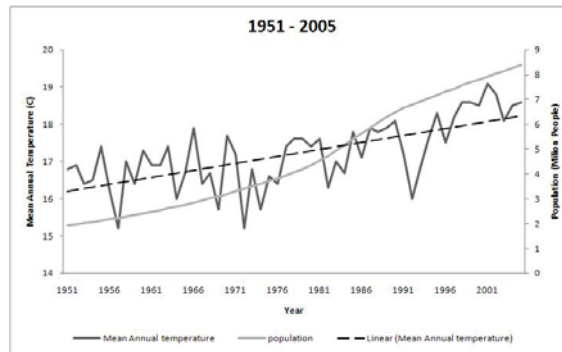
الف) به نظر می رسد مدل در آشکارسازی جریان های شیب موفق تر عمل می کند، چرا که در غیر این صورت جریان های روز در اثر افزایش دمای مرز پایین به واسطه گرمایش انسان زاد، باید کاهش می یافت ولی علی رغم این مسئله شدت آن بیشتر شده است. این امر همان گونه که پیش تر اشاره شد، می تواند به دلیل ماهیت این جریان ها نیز باشد.

ب) با شروع روز و گرم تر شدن سطح در مناطق شیب دار جریان های جنوبی فراشیب در نزدیکی سطح آغاز می شوند. در ادامه این جریان ها در اثر تلاطم و انتقال قائم تکانه، به ترازهای بالاتر نیز کشیده می شود. این روند در منطقه شهری با وجود شیب کمتر نیز رخ می دهد. ضخامت جریان در منطقه شهری در اثر نقش تعیین کننده گرمایش انسان زاد، بیشتر از مناطق مجاور است.

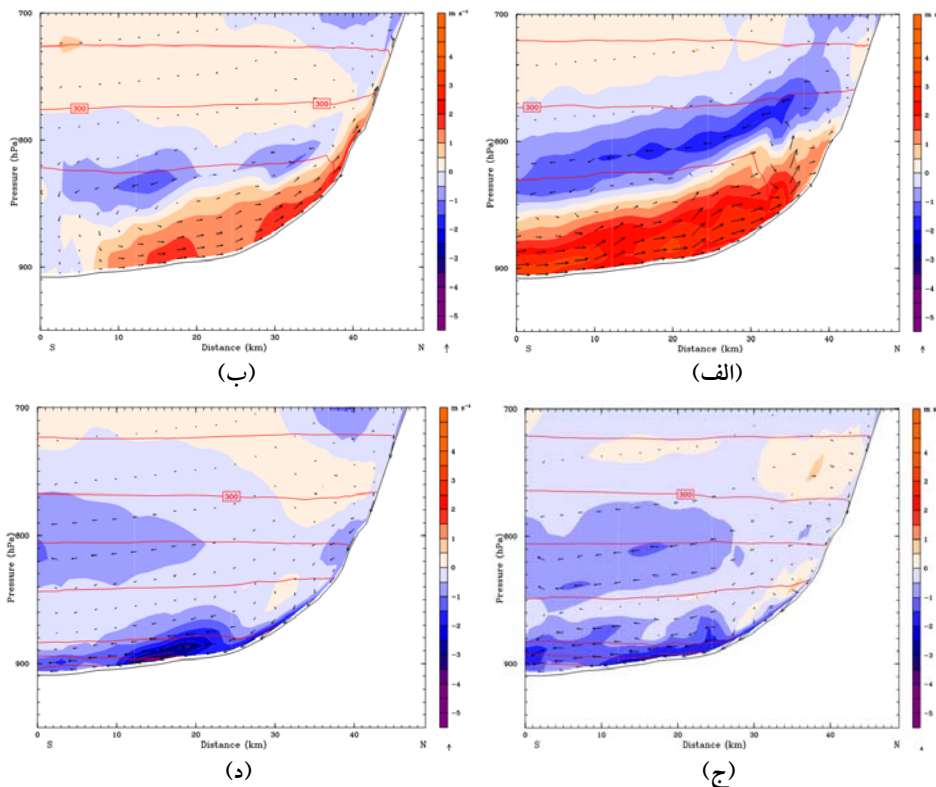
۲- کاهش شدت جریان های شمالی فروشیب شبانه (شکل های ۸-ج و ۸-د).

جدول ۱. ویژگی های ۳ رده شهری به کار گرفته شده در مدل شهری در شبیه سازی سوم.

نام رده شهری	رده شماره	سپیدی	طول زبری (m)	میانگین ارتفاع ساختمان ها (m)	عرض جاده ها (m)	گرمایش انسان زاد (Wm^{-2})	U_p
مناطق کم تراکم شهری	۳۱	۰/۱۵	۰/۶	۵	۸/۵	۲۰	۰/۵
مناطق پرتراکم شهری	۳۲	۰/۱۵	۰/۸	۷/۵	۹/۵	۵۰	۰/۹
مناطق صنعتی و تجاری	۳۳	۰/۱۵	۱	۱۰	۱۰	۹۰	۰/۹۵



شکل ۷. تغییرات دمای ارتفاع ۲ متری ایستگاه مهرآباد (منحنی پیوسته خاکستری) در مقابل رشد جمعیت در شهر تهران (منحنی پیوسته مشکی). محور عمودی سمت راست جمعیت و محور عمودی سمت چپ دما را نشان می‌دهد. محور افقی نشان‌دهنده دوره زمانی ۵۵ ساله از ۱۹۵۱ الی ۲۰۰۵ است (آمار مربوط به جمعیت از وب‌گاه سازمان آمار کشور و دما از وب‌گاه سازمان هواشناسی کشور استخراج شده است).



شکل ۸. برش‌های قائم در طول جغرافیایی $51^{\circ}32'$ مولفه ۷ (مولفه نصف‌النهاری باد) جریان گذرنده از ایستگاه مهرآباد برای اجراهای (الف) و (ج) شهری (ب) و (د) بدون شهر و برای ساعت‌های (الف) و (ب) $16:30$ و (ج) و (د) $04:30$ محلی. در این شکل‌ها محدوده‌های با حاشور سرخ‌رنگ نشان‌دهنده جریان‌های فراشیب جنوبی و رنگ آبی نمایشگر جریان‌های فروشیب شمالی است. محور قائم و افقی به ترتیب نمایشگر ارتفاع فشاری و فاصله و بردارها، بردارهای گردش جریان هستند. محدوده شهری تهران از ۱۵ تا ۳۵ کیلومتری محور افقی است. ضخامت و شدت بیشتر جریان‌های فراشیب روزانه (الف و ب) و ازسوی دیگر کاهش جریان‌های فروشیب شبانه (ج و د) در اجرای شهری در شکل مشخص است.

شده با مدل WRF تا حد امکان، شبیه‌سازی مناسب‌تر و بررسی دقیق‌تر جریان‌های محلی روی تهران صورت گیرد. داده‌های ایستگاه‌های متفاوت هواشناسی تهران نشان

۶ نتیجه‌گیری
در این مقاله تلاش شده با در نظر گرفتن شرایط جوّی ایده‌آل و با استفاده از یک مدل شهری تک‌لایه‌ای جفت

تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

ثقفی، م. ع.، ۱۳۸۱، بررسی تغییرات شبانه‌روزی باد در لایه مرزی بر پایه مدل نیمه‌زمین گرد اکمن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

رنجبر سعادت‌آبادی، ع. و آزادی، م.، ۱۳۸۴، بررسی تغییرات میدان‌های دما و باد در کلان شهر تهران ناشی از توسعه شهری، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۲۰(۹۱)، ۱۷۱-۱۹۱.

رنجبر سعادت‌آبادی، ع.، آزادی، م.، علی اکبری بیدختی، ع. ع. و صادقی حسینی، ع. ر.، ۱۳۸۴، مطالعه موردی جزیره گرمایی تهران و شبیه‌سازی آن، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۱(۱)، ۶۳-۷۸.

سلطانزاده، ا.، زوار رضا، پ. و بیدختی، ع.، ۱۳۸۸، بررسی جریان‌های محلی روی تهران با استفاده از مدل میان‌مقیاس WRF در حضور شرایط جوّ ایده‌آل، مجموعه مقالات هشتمین همایش پیش‌بینی عددی، تهران.

معتمدی، س.، ۱۳۸۲، مطالعه اثر متقابل گردش‌های محلی (کوهستان) و پدیده جزیره گرمایی در تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

نصیرزاده، م.، ۱۳۶۸، چینش قائم باد روی تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

نوروزی، م.، ۱۳۸۴، مطالعه ساختار قائم یک جریان در محیطی با چینه‌بندی چگالی روی سطح شیب‌دار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

Bornstein, R. D., 1968, Observations of the urban heat island effect in New York City. J. Appl. Meteor., 7, 575-582.

Chen, F. and Dudhia, J., 2001, Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity,

می‌دهد که در کنار رشد سریع جمعیت در منطقه شهری تهران، دمای این شهر نیز رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است. از این رو مدل در حالت‌های گوناگون با و بدون شهر و کم و زیاد کردن آثار شهر با هدف بهبود شرایط ترمودینامیکی به کار گرفته شده است. شرایط آغازگری از یک نمایه قائم دما، فشار، رطوبت و مانند آن استخراج شده است که نمایانگر متوسط نمایه‌های قائم ایستگاه جوّ بالای فرودگاه مهرآباد در ۹۶ روزهای زمستانی پایدار سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ است. برای همه این اجراها، شرایط تابشی ماه دسامبر لحاظ شده است.

نتایج نشان می‌دهد که شب‌هنگام به دلیل وارد شدن گرمای بیشتر به مرز پایین در اجرای شهری و شکل‌گیری تلاطم، چینش دمایی به هم می‌خورد. از سوی دیگر گردش‌های شهری در قالب جریان‌های دشت به شهر که در اثر گرمایش انسان‌زاد ایجاد می‌شود، شکل‌گیری جزیره گرمایی در مدل را تشدید می‌کند، به گونه‌ای که در روز باعث تقویت جریان‌های جنوبی و در اوایل شب باعث تضعیف جریان‌های شمالی می‌شود. با شبیه‌سازی بهتر مدل از اثر جزیره گرمایی (اجرای شهری) به نظر می‌رسد که نفوذ جریان‌ها به ترازهای بالاتر جوّ و لذا انتقال ماده و انرژی در لایه مرزی و از این لایه به جوّ آزاد در هنگام روز نه فقط از پای کوه، بلکه از کل فضای بالای محیط شهری صورت می‌گیرد.

در پایان به نظر می‌رسد که نمایش بهتر کمیت‌های ترمودینامیکی تاثیر بسیار مثبتی در جهت آشکارسازی جریان‌های محلی در این شبیه‌سازی ایده‌آل داشته است. از این رو عملی شدن تحقیقات میدانی به منظور اندازه‌گیری دقیق کمیت‌هایی مانند گرمایش انسان‌زاد، می‌تواند هرچه بیشتر به بهبود نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مدل کمک کند.

منابع

ثقفی، م.، ۱۳۷۶، ارائه مدلی برای بادهای کوه - دشت

- topography on sea and land breezes in a two-dimensional numerical model, *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1151-1162.
- Malakooti, H., 2010, Meteorology and air-quality in a mega-city: application to Tehran, Iran, *École des Ponts ParisTech*, PhD thesis.
- Ohashi, Y., and Kida, H., 2002, Local circulations developed in the vicinity of both coastal and inland urban areas: a numerical study with a mesoscale atmospheric model, *J. Appl. Meteor.*, **41**, 30-45.
- Oke, T. R., 1982, The energetic basis of the urban heat island, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 1-24.
- Pielke, R. A., Rodriguez, J. H., Eastman, J. L., Walko, R. L. and Stocker, R. A., 1993, Influence of albedo variability in complex terrain on mesoscale systems, *J. Climate*, **6**, 1798-1806.
- Rife, D. L., Warner, T. T., Chen, F. and Astling, E. G., 2002, Mechanisms for diurnal boundary layer circulations in the Great Basin Desert, *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 921-938.
- Ruddiman, W. F., 2003, The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago, *Clim. Change*, **61**, 261-293.
- Sailor, D. J., 1995, Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover, *J. Appl. Meteor.*, **34**, 1694-1704.
- Schultz, P. and T. T. Warner, 1982, Characteristics of summertime circulations and pollution ventilation in the Los Angeles Basin, *J. Appl. Meteor.*, **21**, 672-682.
- Stivari, S. M., de Oliveira, A. P., Karam, H. A. and Soares, J., 2003, Patterns of local circulation in the Itaipu Lake area: numerical simulations of lake breeze, *J. Appl. Meteor.*, **42**, 37-50.
- Stull, R. B., 1988, *An introduction to boundary layer meteorology*, Kluwer Academic Publishers, 666 pp.
- Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J. and Cuenca, R., 2004, Implementation and verification of the unified Noah land surface model in the WRF model. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction. 11-15 January, 2004, Seattle, Washington.
- Whiteman, C. D., 2000, *Mountain meteorology: Fundamentals and Applications*, Oxford University Press, New York.
- Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585.
- Ek, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grummann, P., Koren, V., Gayno, G., and Tarpley, J. D., 2003, Implementation of Noah land-surface model advances in the NCEP operational mesoscale Eta mode, *J. Geophys. Res.*, **108**, 12-16.
- Fernando, H. J. S., 2010, Fluid dynamics of urban atmospheres in complex terrain, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **42**, 365-389.
- Gohm, A., Harnsich, F., Vergeiner, J., Obleitner, F., Schnitzhofer, R., Hansel, A., Fix, A., Neininger, B., Emeis, S., Schäfer, K., 2009, Air pollution transport in an Alpine valley: results from airborne and ground-based observations, *Boundary-Layer Meteorol.*, **131**, 441-463.
- Hertig, J. A., 1995, The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes, and effects. wind climate in cities, J. E. Cermak et al., Eds., Kluwer Academic, 353-382.
- Howard, L., 1833, *The Climate of London*, Vols. I-III, London.
- Kitada, T., Okamura, K. and Tanaka, S., 1998, Effects of topography and urbanization on local winds and thermal environment in the Nohbi Plain, coastal region of central Japan: A numerical analysis by mesoscale meteorological model with a k-? turbulence model, *J. Appl. Meteor.*, **37**, 1026-1046.
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. and Kimura, F., 2001, A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models, *Bound.-Layer Meteorol.*, **101**, 329-358.
- Kusaka, H. and Kimura, F., 2004, Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **82**, 67-80.
- Liu, Y., Chen, F., Warner, T., Swerdlin, S., Bowers, J. and Halvorson, S., 2004, Improvements to surface flux computations in a non-local-mixing PBL scheme, and refinements on urban processes in the Noah land-surface model with the NCAR/ATEC real-time FDDA and forecast system, 2004, 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction, 11-15 January, Seattle, Washington.
- Mahrer, Y. and Pielke, R. A., 1977, The effects of